

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Simulační ověření spotřeby aku vozidla na trati Tábor-Bechyně

Ondřej Chudlařský

Diplomová práce

2023

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Ondřej Chudlařský
Osobní číslo:	D20532
Studijní program:	N3708 Dopravní inženýrství a spoje
Studijní obor:	Elektrotechnické a elektronické systémy v dopravě
Téma práce:	Simulační ověření spotřeby aku vozidla na trati Tábor-Bechyně
Zadávací katedra:	Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě

Zásady pro vypracování

- příprava SW pro energetické simulace jízdy vlaku
- specifikace vstupních dat vozidla a projížděné trati
- porovnání provozu akumulátorového vozidla s již existujícím elektrickým provozem

Rozsah pracovní zprávy:

Rozsah grafických prací:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Jansa F.: Vozidla elektrické trakce. 2.vyd. NADAS 1987

Danzer J.: Elektrická trakce 1., 3vyd. ZČU Plzeň 2008

Danzer J.: Elektrická trakce 7. – Adheze, skripta ZČU Plzeň

Drábek J.: Dynamika a energetika elektrické trakce. VŠDS

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Ladislav Mlýnařík, Ph.D.

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací
techniky v dopravě

Datum zadání diplomové práce: **18. února 2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2022**

L.S.

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

Ing. Dušan Čermák, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 8. dubna 2022

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., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 16.1.2023

Ondřej Chudlařský

PODĚKOVÁNÍ

Zde bych rád poděkoval Ing. Ladislavu Mlynaříkovi, Ph.D, který vedl mou práci, za předání spousty svých zkušeností a rad zejména při tvorbě simulačního programu, ale i celkově při psaní této práce. Také bych chtěl poděkovat své rodině za podporu po celou dobu studia.

ANOTACE

Tato práce se zabývá simulací spotřeby akumulátorového vozidla na železniční trati z Tábora do Bechyně. V teoretické části seznamuje čtenáře se samotnou tratí a simulovaným vozidlem, včetně obecného popisu a příkladů skutečných aku vozidel. Dále je v této práci popsána problematika trakčních výpočtů, na jejichž základě byl sestaven simulační program v Matlabu. Cílem práce je určení spotřeby vozidla a posouzení vhodnosti nasazení na tuto trať v porovnání se současným elektrickým provozem.

KLÍČOVÁ SLOVA

akumulátorové kolejové vozidlo, trakční mechanika, simulace, Matlab, spotřeba

TITLE

Battery rail vehicle - simulation verification on the line Tábor-Bechyně

ABSTRACT

This thesis deals with simulation verification of electricity consumption on the railway line from Tábor to Bechyně. In the theoretical part, the thesis introduces the reader with the railway line and the simulated vehicle, including a general description and example of really battery rail vehicle. Furthermore, there is described a problematics of traction calculation, based on which was created simulation software in Matlab. The aim of this thesis is detection of electricity consumption and the suitability assessment to use this vehicle on this line in comparison with actual electrical operation.

KEYWORDS

battery rail vehicle, traction mechanic, simulation, Matlab, electricity consumption

OBSAH

OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 SPECIFIKACE VSTUPNÍCH PARAMETRŮ.....	11
1.1 TRATĚ.....	11
1.1.1 ZÁKLADNÍ VÝZNAM.....	11
1.1.2 PARAMETRY TRATĚ.....	12
1.2 VOZIDLO.....	17
1.2.1 KONCEPCE AKUMULÁTOROVÝCH VOZIDEL.....	17
1.2.2 TRAKČNÍ AKUMULÁTORY.....	19
1.2.3 PŘÍKLADY SKUTEČNÝCH AKU VOZIDEL.....	21
1.2.4 SPECIFIKACE PARAMETRŮ SIMULOVANÉHO VOZIDLA.....	23
2 SIMULACE JÍZDY VLAKU.....	30
2.1 TRAKČNÍ VÝPOČTY.....	30
2.1.1 SÍLY UVÁDĚJÍCÍ VLAK DO POHYBU.....	30
2.1.2 SÍLY PŮSOBÍCÍ PROTI JÍZDĚ VLAKU.....	31
2.1.3 FÁZE JÍZDY VLAKU.....	35
2.2 METODY URČOVÁNÍ A MĚŘENÍ SPOTŘEBY.....	39
2.3 SIMULACE V MATLABU.....	41
2.3.1 POPIS PROGRAMU.....	42
2.3.2 VÝVOJOVÉ DIAGRAMY.....	53
3 VYHODNOCENÍ SIMULACE.....	62
3.1 NAPÁJENÍ Z TROLEJOVÉHO VEDENÍ.....	63
3.1.1 VOZIDLO S 3000 V MEZIOBVODEM.....	63
3.1.2 VOZIDLO S 750 V MEZIOBVODEM.....	64
3.2 NAPÁJENÍ Z AKUMULÁTORU.....	64

3.2.1	VOZIDLO S AKUMULÁTOREM PŘES ODDĚLOVACÍ MĚNIČ (NAPĚTÍ MEZIOBVODU 3000 V)	64
3.2.2	VOZIDLO S AKUMULÁTOREM V MEZIOBVODU (NAPĚTÍ MEZIOBVODU 750 V)	65
4	POROVNÁNÍ AKUMULÁTOROVÉHO PROVOZU S ELEKTRICKÝM PROVOZEM	66
4.1	POROVNÁNÍ SPOTŘEBY	66
4.2	PROVOZNÍ ZÁLEŽITOSTI A NABÍJENÍ	67
4.2.1	VOZIDLO S AKUMULÁTOREM V MEZIOBVODU (NAPĚTÍ MEZIOBVODU 750 V)	69
4.2.2	VOZIDLO S AKUMULÁTOREM PŘES ODDĚLOVACÍ MĚNIČ (NAPĚTÍ MEZIOBVODU 3000 V)	71
	ZÁVĚR	73
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	75
	SEZNAM OBRÁZKŮ	78
	SEZNAM TABULEK	79
	SEZNAM ZKRATEK	80
	SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN	81
	SEZNAM PŘÍLOH	84

ÚVOD

Dne 21.6.1903 byl slavnostně zahájen provoz na železniční trati z Tábora do Bechyně. Jelikož zde František Křižík prosadil z důvodu úspor provoz v elektrické trakci, stala se tak první elektrifikovanou železniční tratí na tehdejším území Rakouska-Uherska. Zpočátku byla trať elektrifikována soustavou 2x 700 V, kdy trolejové vedení bylo dvou vodičové (+700 V, - 700 V), nulovým vodičem byla kolejnice. Ve 30. letech minulého století bylo trakční vedení rekonstruováno na jednovodičové o napětí 1500 V, které se na trati dochovalo dodnes. [1]

Právě unikátní napájecí soustava 1,5 kV DC je v poslední době dost často řešeným problémem. Takováto napájecí soustava již nikde jinde v ČR provozována není. Trakční vedení je na hranici své životnosti a řeší se rekonstrukce. Od počátku byly ve hře tři možnosti, buďto zachovat současnou napájecí soustavu, rekonstruovat napájení na střídavých 25 kV/50 Hz nebo trať deelektrifikovat. Poslední dvě zmiňované možnosti by zcela vyloučily provoz historických vozidel, která významnou měrou přispívají na významu této tratě.

Přesto, že se v poslední době vážně uvažuje o zachování současného napájecího systému, neexistuje vhodné moderní vozidlo, které by na této trati mohlo být provozováno. Všechny osobní vlaky jsou dnes vedeny elektrickou lokomotivou řady 113 se dvěma přípojnými vozy řady BDtax⁷⁸². Problematika nasazení vhodného vozidla rekonstrukce napájecí soustavy nevyřeší, jelikož jsou na trati velmi malé poloměry oblouků a nízké nápravové zatížení, a žádné ze současných střídavých vozidel těmto parametrům nevyhovuje. Z motorových jednotek vyhovuje Regionova řady 814, která zde byla několik let pravidelně nasazována, ale nedisponovala vhodnými adhezními vlastnostmi.

V poslední době se nejen v Evropě, ale i v ČR rozmáhá myšlenka provozu bateriových či hybridních vozidel. Možnostmi nasazení takovéto jednotky na trati z Tábora do Bechyně se zatím nikdo nezabýval. V případě vývoje bateriové jednotky, která by svými parametry vyhovovala pro provoz na této trati, by bylo možné trakční vedení buď snést nebo zachovat stávající napájecí soustavu pouze pro historický provoz. Aby se nejednalo o atypickou jednotku využitelnou pouze pro tuto trať, měla by být schopna elektrického provozu pod střídavou napájecí soustavou 25 kV/50 Hz a mohla by tak být nasazována i na okolních tratích.

Cílem této práce je na základě simulace jízdy akumulátorového vozidla určit spotřebu elektrické energie na trati z Tábora do Bechyně a porovnat jeho spotřebu s čistě elektrickým vozidlem na 25 kV AC. Na základě tohoto srovnání určit, zda by vůbec bylo možné takovéto vozidlo na této trati provozovat a jaký by to mělo vliv na provozní využitelnost vozidel.

1 SPECIFIKACE VSTUPNÍCH PARAMETRŮ

1.1 TRATĚ

1.1.1 ZÁKLADNÍ VÝZNAM

Trat', na které bude v této práci simulován provoz, spojuje dvě významná jihočeská města, Tábor a Bechyni. Město Tábor patří se svými cca 34 tisíci obyvateli k druhému největšímu v kraji. Je významným dopravním, hospodářským a kulturním centrem regionu. [2] Tábor je významnou železniční křižovatkou, leží na 4. tranzitním železničním koridoru spojujícím Prahu s Českými Budějovicemi a Rakouskem. Mimo tratě do Bechyně zde odbočuje trať do Písku a přes Pelhřimov do Horní Cerekve a Jihlavy. Bechyně je lázeňským městem ležícím přibližně 20 km jihovýchodně od Tábora a má necelých 5 000 obyvatel. [3]

„Bechyňka“, jak se trati přezdívá, má tedy velký význam z hlediska dojíždění lidí za prací nebo do škol. Další významnou složkou ovlivňující provoz na této trati je turistický ruch, který vrcholí v letní sezóně. V Táboře najdeme mnoho historických památek, v Bechyni jsou lázně, zámek a krásná příroda v údolí řeky Lužnice. Na obou koncích tratě vlak překonává údolí řeky Lužnice, v Táboře po ocelovém mostě z roku 1903, v Bechyni po železobetonovém z roku 1928. Most v Bechyni je technickou památkou a slouží nejen železniční, ale i silniční dopravě a chodcům. Železniční trať zde vede přímo po okraji vozovky silnice II/122, v pravém pruhu ve směru do Bechyně. Při jízdě vlaku tedy musí být ve směru do Bechyně zastaven provoz silničních vozidel. K tomu slouží světelné přejezdové zabezpečovací zařízení umístěné na jižním okraji mostu. Most je tak zároveň nejdelším železničním přejezdem v ČR.

Turistickým lákadlem je i samotná železniční trať. Byla totiž postavena Františkem Křižíkem již v roce 1903 a stala se tak první elektrifikovanou železniční tratí v tehdejší Rakousku-Uhersku. Zpočátku na trati zajišťovaly provoz 4 elektrické motorové vozy řady EM 400.0, jeden z nich je v provozu dodnes, vždy každou sobotu o letních prázdninách. V 50. letech dodala Škoda Plzeň společně pro trať Rybník-Lipno 4 lokomotivy řady E 422.0, odvozené od větší a rychlejší řady E 499.0 na napětí 3 kV. Tato lokomotiva bývá dodnes nasazována o letních sobotách na pravidelné vlaky. Pravidelný provoz zajišťují od 70. let „žehličky“ řady 113. [4] Počínaje prosincovou změnou GVD v roce 2010, byly po několik let na osobní vlaky nasazovány i motorové „Regionovy“ řady 814. Nasazení těchto vozidel na tuto sklonově náročnou trať však nebylo úplně ideálním řešením, zejména z důvodu špatných adhezních vlastností, a provoz byl později navrácen zpět do elektrické trakce.

1.1.2 PARAMETRY TRATĚ

Trat' je napájena stejnosměrnou napájecí soustavou o napětí 1,5 kV, v současné době jako jediná v republice. Napájení je jednostranné z trakční měničny Malšice, odkud jsou napájeny oba úseky, do Tábora i do Bechyně. Zpočátku byla trat' napájena stejnosměrným napětím 1 400 V. Trakční vedení bylo dvou vodičové, kdy v jednom vodiči bylo +700 V, ve druhém - 700 V a nulovým vodičem byla kolejnice. Do současné podoby, tedy na jednovodičové napájení 1 500 V, byla trat' rekonstruována ve 30. letech 20. století. Trakční vedení je polokompensované. Skládá se z měděného trolejového drátu o průřezu 100 mm², popř. 150 mm², bronzového nosného lana o průřezu 70 mm², popř. 50 mm² Fe a zesilovacího vedení tvořeného AlFe lanem o průřezu 240 mm², popř. měděného drátu s průřezem 70 mm². Zpětné vedení je tvořeno kolejnicemi typu S49. Trakční měnična se skládá ze dvou usměrňovacích jednotek, jejichž základem je suchý transformátor s dvojitým sekundárním vinutím o výkonu 1960 kVA. Jelikož trakční vedení pochází z roku 1938, je již na hranici své životnosti. Ze stejného roku pocházejí i ocelové trakční podpěry typu T, jejichž pevnost je narušena probíhající korozí jak vnější, tak způsobenou bludnými proudy. Suché transformátory v TNS Malšice pocházejí z roku 2004, kdy nahradily původní olejové. Právě z těchto důvodů vypracoval správce infrastruktury záměr projektu „Rekonstrukce trakčního vedení trati Tábor-Bechyně“, ve kterém zmínil jako jednu z možností i konverzi na střídavý systém 25 kV/50 Hz z důvodu unifikace náhradních dílů a eliminace bludných proudů. V tomto případě by mohlo být trakční vedení navrženo bez zesilovacího vedení s možností jednostranného napájení z TNS Chotoviny i z TNS Veselí nad Lužnicí. Nutností by byla výstavba spínací stanice v ŽST Tábor. V současné době se pracuje s možností zachování stávající napájecí soustavy s tím, že trakční podpěry i izolace budou navrženy pro 25 kV (pro případ přechodu na AC v budoucnu). Rekonstrukce měla proběhnout v letech 2023-2024, ale z důvodu nedostatku financí bude nejspíše odložena. [5]

Maximální rychlost na trati je 60 km/h, provoz je řízen dle předpisu D3. Z hlediska nápravového zatížení se jedná o trat' třídy A, tedy maximálně 16 t na nápravu. Na trati se nachází 8 zastávek a 3 dopravní D3. Dirigující stanicí je ŽST Bechyně, přílehlou ŽST Tábor. Dopravní D3 Malšice je vybavena samovratnými výhybkami. ŽST Bechyně je koncová, na konci tratě se nachází remíza, která původně sloužila k úschově hnacího vozidla během noční přestávky. Poté byla mnoho let nevyužívaná a chátrala. V nedávné době byla opravena a ČD ji využívají k propagačním účelům, o letních sobotách zde bývá výstava modelového kolejiště s vozidly „bechyňky“ a nyní se zde nachází nejstarší elektrická lokomotiva na českém území,

s označením E 225.001, kterou zapůjčilo NTM. Ve stanici ze 4. staniční koleje odbočuje vlečka do keramických závodů Laufen, od roku 2004 je nevyužívaná. [6]

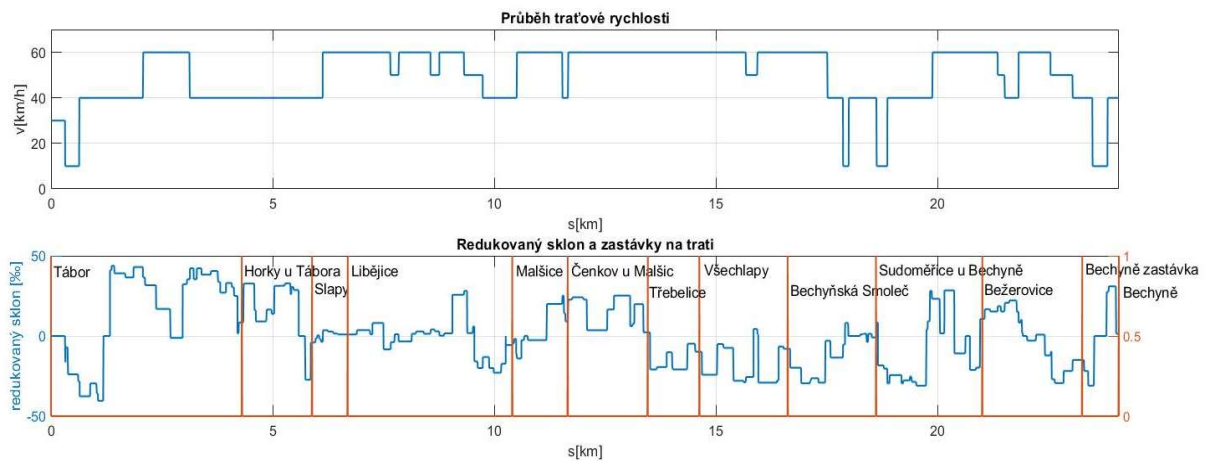
V ŽST Tábor je kolejiště „bechyňky“ umístěno odděleně od hlavního kolejiště napájeného soustavou AC 25 kV/50 Hz. Nástupiště se nachází před staniční budovou. Kolejiště jsou propojena pouze nezatrolejovanou manipulační kolejí. Původní Křížíkova remíza, ve které probíhala veškerá údržba vozidel „bechyňky“ je nyní v majetku soukromé společnosti a trakční vedení zde bylo sneseno. Nyní se veškerá údržba provádí v depu Tábor, kam jsou vozidla dopravována pomocí vozidel nezávislé trakce.

V km 17,530 nedaleko Sudoměric u Bechyně odbočuje z tratě vojenská vlečka do areálu vojenského útvaru Bechyně. Hlavní sláva vlečky skončila se zrušením bechyňského letiště v 90. letech, nicméně dodnes je vlečka využívána několikrát ročně pro vojenské přepravy.

Před dostavením mostu v Bechyni v roce 1928 končila trať na levém břehu Lužnice. Trať se oddělovala v místech dnešní bechyňské zastávky. Staré nádraží později sloužilo jako nákladiště dřeva, vedla tam zatrolejovaná vlečka. Ještě v prvním desetiletí 21. století byla pravidelně obsluhována lokomotivami řady 113. Po vzniku společnosti ČD Cargo byla vlečka obsluhována řadou 742, ale po pár letech byla vlečka zrušena. Nejprve bylo sneseno trakční vedení, dnes už se zde nenacházejí ani koleje.

Mimo atypické napájecí soustavy, je výrazně omezujícím faktorem na této trati četnost ostrých směrových oblouků. Nejostřejší oblouky na trati mají poloměr pouhých 125 m. První takový oblouk se nachází hned na záhlaví ŽST Tábor, další je v Sudoměricích u Bechyně. V obou případech je rychlost omezena na 10 km/h. Dále je na trati také značné množství oblouků o poloměru 150 m. [7]

Trať je také velice sklonově náročná. Největší stoupání na trati dosahuje dokonce až 41 ‰, což je výrazně více než na běžných tratích v Česku. Nejvyšším bodem na trati jsou Třebelice s nadmořskou výškou 535 m n. m. Trať tedy z Tábora (440 m n. m.) stoupá, z Třebelic do Bechyně (415 m n. m.) zase klesá. [8] Rozhodně ale nemůže být řeč o konstantním stoupání nebo klesání. Sklon tratě se mění poměrně často. Například z Tábora nejprve trať klesá k mostu přes Lužnici a poté teprve stoupá. V Bechyni je také most níže než zbytek tratě, na obě strany je stoupání 31 ‰. Průběh redukováného sklonu, který vzniknul sloučením odporu ze sklonu a odporu z oblouku je zobrazen v níže uvedeném grafu (Obrázek 1). Podrobněji je pojem redukováný sklon popsán později v kapitole 2.1.2 (vztah 19). [6]



Obrázek 1 traťová rychlost, redukovaný sklon a zastávky na trati (zdroj: autor)

Právě ostré oblouky a nízké nápravové zatížení je významně omezujícím faktorem pro výběr vhodného vozidla pro tuto trať. V souvislosti s oblouky je na trati zakázán provoz čtyřnápravových vozů se vzdáleností otočných čepů větší jak 16 m nebo vozů s pevným rozvorem větším jak 6,5 m. [9] Ne vždy tomu tak bylo, po několik let zde byly v osobní dopravě nasazovány dvoupatrové vozy řady Bmto, které uvedené parametry překračují. Ze stejných důvodů je na trati zakázán postrk. I ten byl ale v minulých letech v nákladní dopravě běžně využíván. V současné době je tedy problémem najít adekvátní náhradu za současně nasazovaná vozidla (lokomotivy řady 113 s přívěsnými vozy řady BDtax). Ani jednotky RegioPanter, jejíž parametry jsou využity za účelem simulace v této práci, nesplňují parametry pro tuto trať. V roce 2021 zde probíhaly zkoušky této jednotky, z hlediska průchodnosti oblouky, bohužel s negativním výsledkem.

Sklon tratě je podrobně popsán v prováděcím nařízení pro trať D3 (obrázek 2) [6], traťová rychlost je uvedena v příslušné tabulce TTP (obrázek 3). [9] Hodnoty poloměrů oblouků byly zjištěny pomocí nákresných přehledů železničního svršku poskytnutých správcem infrastruktury (obrázek 4). [7] Pro účely simulace byly tyto parametry seskupeny do tabulky pomocí programu Microsoft Excel a převedeny do proměnné *trat* v simulačním skriptu v Matlabu.

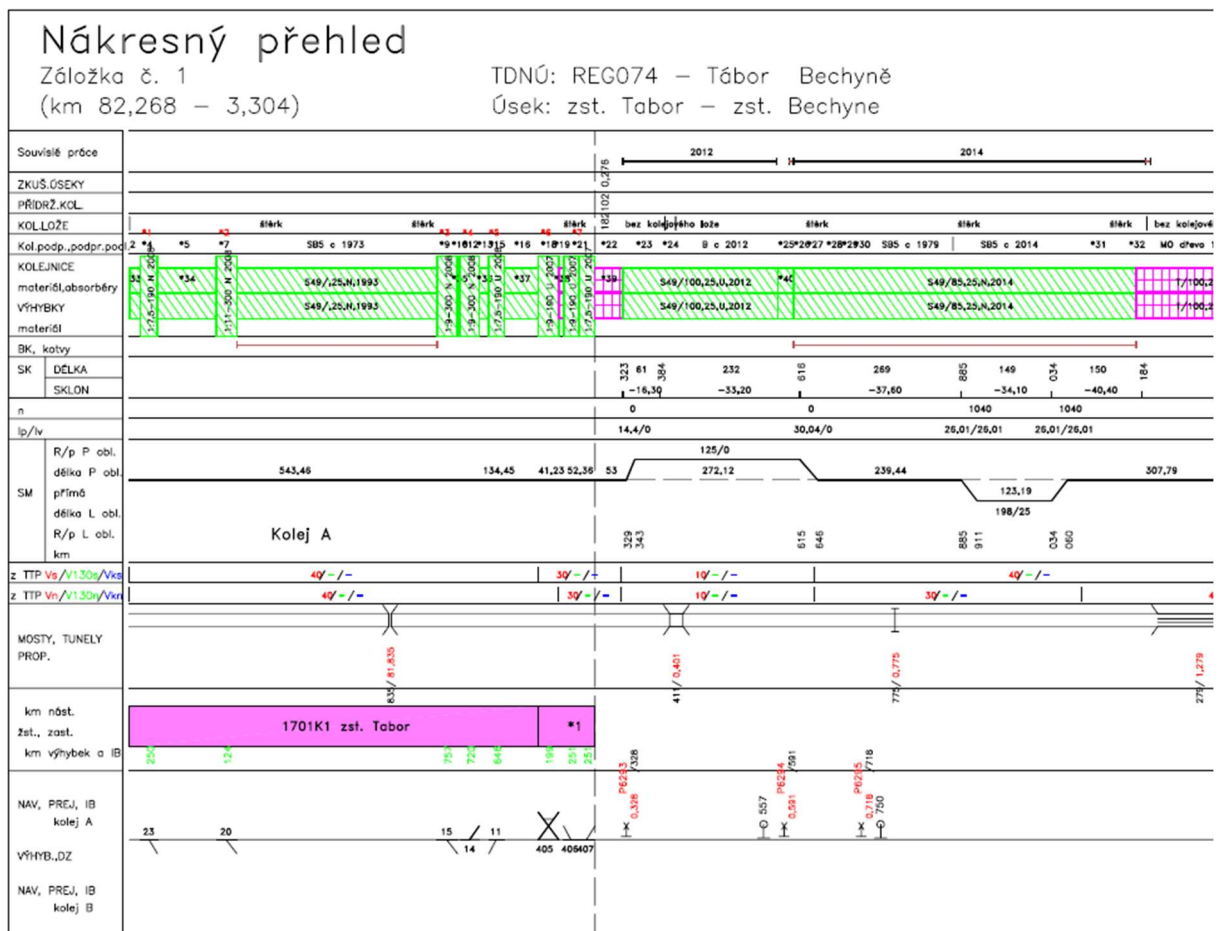
Sklon na trati Tábor – Bechyně			
od km	do km	sklon	poznámka
0,323	0,384	-16,3	
0,384	0,616	-33,2	vi. náv. Tábor
0,616	0,885	-37,6	
0,885	1,034	-34,1	
1,034	1,184	-40,4	
1,331	1,432	41,0	
1,432	1,679	34,0	
1,679	2,122	36,5	
2,122	2,247	31,7	
2,247	2,372	8,5	
2,372	2,696	16,9	
2,696	2,971	-1,2	
2,971	3,071	32,3	
3,071	3,397	35,4	
3,397	3,608	31,4	
3,608	3,819	33,7	
3,819	3,948	27,0	
3,948	4,131	30,4	
4,131	4,208	25,0	
4,208	4,346	1,6	zast. Horky
4,346	4,592	25,9	
4,592	4,866	9,1	
4,866	5,040	13,8	
5,040	5,280	24,5	
5,280	5,473	26,0	
5,473	5,590	24,1	
5,740	5,861	-27,3	
5,861	5,970	-4,0	
5,970	6,051	-1,4	dopravná D3 Slapy
6,051	6,129	-3,7	
6,136	6,471	1,5	
6,471	7,253	1,0	zast. Liběčice
7,253	7,503	8,1	
7,503	7,755	-8,3	
7,755	8,139	-3,4	
8,139	8,663	1,4	
8,663	9,055	0,2	
9,055	9,390	25,7	
9,390	9,551	1,8	
9,551	9,987	-20,0	
9,987	10,161	-22,9	
10,161	10,258	-17,3	
10,262	10,419	-5,6	dopravná D3 Malšice
10,419	10,495	-4,5	
10,495	10,613	-14,0	
10,613	11,189	-2,6	
11,189	11,574	20,0	
11,574	11,671	9,0	zast. Čenkov
11,671	12,093	22,7	
12,093	12,552	3,6	
12,552	12,702	16,5	
12,702	13,067	25,2	
13,067	13,162	6,1	
13,162	13,367	18,4	
13,367	13,517	2,3	zast. Třebelice
13,517	13,891	-20,8	
13,891	14,017	-11,6	
14,017	14,362	-20,8	
14,362	14,537	-4,8	

Sklon na trati Tábor – Bechyně			
od km	do km	sklon	poznámka
14,537	14,687	-9,8	zast. Všechlapy
14,687	15,034	-24,2	
15,034	15,175	-5,0	
15,175	15,400	-7,4	
15,400	15,625	-27,9	
15,625	15,850	-28,9	
15,850	15,959	1,0	
15,959	16,416	-29,1	
16,416	16,677	-8,0	zast. Bechyňská Smoleč
16,677	16,927	-19,8	
16,927	17,129	-29,5	
17,129	17,314	-27,8	
17,314	17,472	-30,6	
17,472	17,588	-3,0	vlečka Dolina
17,588	17,915	-13,5	
18,257	18,438	-3,8	
8,438	18,518	1,4	dopravná D3 Sudoměřice u Tábora
18,518	18,657	-0,9	
18,657	18,790	-27,6	
18,790	19,233	-29,6	
19,233	19,378	-31,0	
19,378	19,523	-28,6	
19,523	19,752	-31,0	
19,752	19,832	4,2	
19,832	20,057	23,2	
20,057	20,157	1,7	
20,157	20,382	28,5	
20,382	20,632	-10,8	
20,732	20,963	-21,2	
20,963	21,068	9,2	zast. Bežerovice
21,068	21,789	15,3	
21,789	21,910	8,3	
22,025	22,225	-2,9	
22,225	22,425	0,8	
22,425	22,579	-12,1	
22,579	22,847	-29,4	
22,847	23,402	-21,8	zast. Bechyně zastávka
23,402	23,538	-31,0	
23,818	23,865	27,5	
23,865	24,032	31,0	ŽST Bechyně
24,032	24,297	1,4	

Obrázek 2 sklonové poměry na trati uvedené v PND3 (zdroj: [6])

TZZ/ VZ	SZZ/ PZZ	Zařízení, místo, ...	km	Kolej 1	Poznámky	%/TT
1	2	3	4	5	6	7
↕	PZS S	P6294	0,591		Neurčený	x
↕		Přep. kanál. sk. S10	0,630			
			0,640	40		
↕	PZS S	P6295	0,718			
↕	k	P6296	1,463			
↕	k	P6297	1,638			
			2,080	60		
↕	k	P6298	2,494			
			3,130	40		
			3,850			
↕	X39		3,940		n	x
↕	k	P6299	3,940		↓	x
↕	PZS Z	P6300	4,260			x
↕		Horky u Tábora z	4,303			x
↕		Konec nástupiště	4,347			
↕	k	P6301	4,574			x
		Hranice dopravní	5,750			
	k	P6303	5,854			x
-D3	D3	Slapy	5,889			↗ 27,3
			6,130	60		
↕	k	P6304	6,634		n	x
↕		Libějice z	6,694			
↕		Konec nástupiště	6,718			
			7,660	50		
			7,850	60		
↕	k	P6305	7,957			
			8,560	50		
			8,760	60		
			9,320	50		
↕	X095		9,500			n
			9,740	40	↓	
↕	PZS S	P6307	9,950		v bez z, n	x
		Hranice dopravní	10,062			
		Napájecí stanice	10,353		1., 3. kolej	
-D3	D3	Malšice	10,406			↗ 22,9
	k	P6308	10,449			x
			10,512	60		

Obrázek 3 ukázka z tabulky 9 TTP (zdroj: [9])



Obrázek 4 část nákrešného přehledu železničního svršku (zdroj: [7])

1.2 VOZIDLO

1.2.1 KONCEPCE AKUMULÁTOROVÝCH VOZIDEL

V poslední době jsou dost častým tématem vozidla s nezávislým zdrojem energie, tedy akumulátorem a také hybridní vozidla, kombinující jak zdroje napájení, tak i trakci. To ovšem není žádnou novinkou, taková vozidla se vyvíjela už od počátků elektrizace. Například v Praze posunovali akumulátorové lokomotivy už ve 20. letech minulého století, tedy ještě před masivním rozvojem elektrizace. Ať už se jednalo o lokomotivy s odporovou regulací nebo střídavé tyristorové „Žehličky“ řady 210 napájené z bateriových vozů, nikdy nedošlo k žádnému masivnímu rozšíření. Největší rozvoj akumulátorových vozidel začal až v poslední době, zejména v souvislosti s omezováním fosilních paliv a aplikuje se nejčastěji u moderních vozidel poháněných asynchronním motorem. Může existovat několik kombinací, mimo čistě akumulátorová vozidla může jít o kombinaci trolej/akumulátor při trolejovém napájení různých soustav i jejich kombinací. Akumulátor dává vždy stejnosměrné napětí. Trakční obvod vozidel českých výrobců bývá obvykle koncipován jako stejnosměrný, s předsazenou střídavou částí.

Napětí je přivedeno přes sběrač a hlavní vypínač na transformátor, kde dojde k transformaci vstupního napětí na přípustnou hodnotu pro polovodičové měniče. Toto napětí je následně usměrněno v pulsním usměrňovači. Následuje stejnosměrný meziobvod obsahující filtrační kondenzátor a brzdový odporník. Stejnosměrné napětí je opět rozstředáno ve střídači a přivedeno na třífázové asynchronní motory. DC napájení bývá připojeno přímo na meziobvod a obchází tak střídavou část tvořenou transformátorem a pulsním usměrňovačem. Napětí se na meziobvod dostane ze sběrače přes hlavní vypínač a vstupní vyhlazovací tlumivku. Tato tlumivka společně s kondenzátorem meziobvodu tvoří filtr, který v meziobvodu zajišťuje stále stejnosměrné napětí bez výkyvů. Stejným způsobem může být připojen i akumulátor. V závislosti na napětí meziobvodu může být baterie připojena buď přímo do meziobvodu nebo přes oddělovací měnič. V případě zapojení přes oddělovací měnič je nutné galvanické oddělení pomocí transformátoru, který chrání baterii proti přepětí v případě, že dojde k poškození měniče. Oddělovací transformátor musí být schopen přenést výkon baterie. V případě, že má vozidlo v akumulátorovém režimu stejný výkon jako v elektrickém, musí být tento transformátor schopen přenést stejný výkon jako hlavní transformátor. V opačném případě má vozidlo v akumulátorovém režimu snížený výkon. Vzhledem k tomu, že transformátor je dost těžký a zabírá ve vozidle značný prostor, pracuje oddělovací transformátor obvykle na mnohem vyšší frekvenci, což značně snižuje jeho velikost. Možné zapojení trakčního obvodu je znázorněno v kapitole 1.2.4 na obrázcích 8, 9 a 10. [10]

Vozidla s asynchronními motory většinou využívají elektrodynamického brzdění. Otáčky rotoru jsou v tuto chvíli vyšší než rychlost otáčení magnetického pole vyprodukovaného statorem a motor tak vyvíjí záporný moment. Motory tak pracují v režimu generátor. Kinetická energie vlaku se tak přeměňuje na elektrickou, kterou můžeme rekuperovat zpět do napájecího zdroje, tedy vracet do trakčního vedení nebo nabíjet trakční akumulátor. V případě, že rekuperovat nemůžeme (max. napětí v troleji, plně nabitá baterie, zákaz rekuperace) mění se energie na teplo v brzdovém odporníku, umístěném ve stejnosměrném meziobvodu. V případě brzdění do akumulátoru je také nutno vzít v úvahu maximální nabíjecí proud baterie. Velikost brzděného proudu při brzdění do odporu se reguluje pulsním měničem. [10]

Hybridní vozidlo trolej/akumulátor může jezdit v režimu elektrickém nebo v režimu akumulátorovém. V elektrickém režimu teče energie od sběrače přes celý trakční obvod až do motorů, při brzdění EDB teče energie z motorů přes trakční obvod do brzdového odporníku nebo zpět ke sběrači. Zároveň při jízdě (stání) pod trakčním vedením dochází k nabíjení akumulátoru. V režimu akumulátorovém jede vozidlo se staženými sběrači. Energie teče

z akumulátoru do trakčních motorů, při brzdění EDB zpět z motorů do akumulátoru. Při plném nabití akumulátoru teče energie z motorů do brzdového odporníku.

1.2.2 TRAKČNÍ AKUMULÁTORY

Základním prvkem tohoto typu trakčního vozidla je samotný trakční akumulátor. Mezi základní nejčastěji používané typy patří akumulátory olovené, lithiové a NiCd. V současné době jako trakční akumulátory kolejových vozidel jednoznačně vítězí lithiové, zejména z důvodu více než trojnásobné objemové a hmotnostní kapacity. Lithiové akumulátory zároveň disponují poměrně vysokou životností a je možno je nabíjet i vybíjet poměrně vysokými proudy. Mezi základní typy lithiových článků patří Li-ion s tekutým elektrolytem nasáklým do separátorů a Li-pol s tuhým elektrolytem.

Technologie Li-ion:

LCO (lithium kobalt oxid) – kladná elektroda LiCoO_2 , záporná elektroda z uhlíku. Mají poměrně vysokou hustotu energie, ale z důvodu poměrně nízké životnosti, nízké teplotní stability a nízké výkonové hustoty nejsou pro trakční účely příliš vhodné. [11]

LMO (lithium mangan oxid) – kladná elektroda LiMn_2O_4 , záporná elektroda z uhlíku. Díky malému vnitřnímu odporu je možno nabíjení i vybíjení poměrně vysokými proudy. Nevýhodou je nízká životnost. Tato technologie je vhodná pro trakční účely, používá se především v elektromobilech. [11]

NMC (nikl mangan kobalt) – kladná elektroda LiNiMnCoO_2 , záporná elektroda z uhlíku. Patří mezi velmi často užívané technologie, zejména v elektro kolech, aku nářadí apod. Výhodou jsou vysoké hodnoty nabíjecích proudů, vysoká hustota energie, dobrá životnost a bezpečnost. Nevýhodou je zejména vysoká cena. Často se používají v kombinaci s technologií LMO. [11]

LFP (lithium železo fosfát) – kladná elektroda LiFePO_4 , záporná elektroda z uhlíku. Tento typ článků se vyznačuje dobrými elektrochemickými vlastnostmi a nízkým vnitřním odporem. Díky tomu je možné nabíjení i vybíjení poměrně vysokými proudy. V kombinaci s přijatelnou cenou, vysokou životností a bezpečností patří k velice často využívaným technologiím v trakčních vozidlech. [11] [12]

NCA (nikl kobalt hliník) – kladná elektroda LiNiCoAlO_2 , záporná elektroda z uhlíku. Vyznačují se zejména vysokou hustotou energie. Nevýhodou je naopak nízká bezpečnost a vysoká cena. [11] [12]

LTO (lithium titan oxid) – kladná elektroda z uhlíku, záporná elektroda LiNiCoAlO_2 . Změna struktury výrazně mění vlastnosti. Technologie byla vyvinuta speciálně pro trakční účely, nabíjení je možné i při teplotách pod $0\text{ }^\circ\text{C}$. Nevýhodou je nízká objemová a hmotnostní hustota energie a vysoká cena. [11]

Li-pol:

SLPB (superior lithium polymer battery) – tyto baterie se vyznačují tuhým elektrolytem a plochým tvarem. Nejčastěji využívá technologie NMC, nebo kombinací NMC, LFP a LTO. Výhodou jsou vysoké vybíjecí proudy, vysoká hmotnostní a objemová hustota energie a nízký vnitřní odpor. Nevýhodou je zejména nutnost termoregulace článků během provozu a vysoká cena. [12]

základní parametry [12] [13]:

- napětí článku [V]
- kapacita článku [Ah] (energetická kapacita [Wh])
- hloubka vybití (DOD – depth of discharge) [%]
- stav nabití (SOC – state of charge) [%]
- životnost [počet cyklů]
- pracovní teplota článku [$^\circ\text{C}$]
- samovybití
- nabíjecí proud [C – násobek kapacity]
- vybíjecí proud [C – násobek kapacity]
- rozměry článku [mm]
- hmotnost článku [kg]
- objemová hustota energie [Wh/dm^3]
- hmotnostní hustota energie [Wh/kg]
- vnitřní odpor [Ω]

Určení celkového vnitřního odporu a účinnosti baterie:

Při výpočtu energetické náročnosti nelze opomenout ztráty vznikající na samotném akumulátoru. Ztráty jsou dány především vnitřním odporem a proudem baterie.

$$\eta_{baterie} = \frac{|P| - R_{i_{celk}} * I_{aku}^2}{|P|} \quad (1)$$

kde $\eta_{baterie}$ je účinnost baterie, P je výkon odebíraný nebo dodávaný do baterie, $R_{i_{celk}}$ je celkový vnitřní odpor baterie a I_{aku} proud akumulátoru.

Celkový vnitřní odpor si lze představit jako sérioparalelní zapojení vnitřních odporů jednotlivých článků.

$$\frac{1}{R_{i_{celk}}} = \frac{1}{R_i * n_{sériově}} * n_{paralelně} \Rightarrow R_{i_{celk}} = R_i * \frac{n_{sériově}}{n_{paralelně}} \quad (2)$$

1.2.3 PŘÍKLADY SKUTEČNÝCH AKU VOZIDEL

Flirt Akku

Flirt Akku je akumulátorová verze jednotky koncepce Flirt od firmy Stadler. V roce 2019 si společnost NAH.SH GmbH objednala celkem 55 těchto jednotek pro provoz v regionu Šlesvicko-Holštýnsko na severu Německa, dalších 44 jednotek si objednala společnost DB regio. Jednotky jsou určeny pro provoz na částečně elektrifikovaných linkách. Vyrábějí se ve dvouvozových nebo třívozových verzích, kdy jednotlivé vozy jsou spojeny Jacobsovými podvozky. Tato jednotka má na svědomí rekord v dojezdu bateriových vozidel, kdy při testovací jízdě ujela 224 km na jedno nabití. [14] [15]

trolejové napětí	AC 15 kV, 16,7 Hz
max. rychlost	160 km/h
výkon	2x500 kW
typ baterie	Li-ion
průměrný dojezd	150 km

Tabulka 1 základní parametry jednotky Flirt Akku (zdroj dat: [15][16])



Obrázek 5 jednotka Flirt Akku (zdroj: autor)

Mireo plus B

V souvislosti se snahou nahrazování dieselových vlaků v Německu za účelem snížení negativních dopadů na životní prostředí si objednala společnost SFBW baterieelektrickou jednotku z rodiny Siemens Mireo. Další jednotky jsou vyráběny např. pro Dánsko. Jedná se o dvouvozovou nebo třívozovou jednotku s Jacobsovými podvozky. [17]

trolejové napětí	AC 15 kV, 16,7 Hz; AC 25 kV, 50 Hz
max. rychlost	160 km/h
výkon	1700 kW
průměrný dojezd	>80/120 ¹ km

Tabulka 2 základní parametry jednotky Mireo plus B (zdroj dat: [18])



Obrázek 6 jednotka Mireo plus B (zdroj: autor)

¹ dvouvozová/třívozová verze

Desiro ML ÖBB Cityjet eco

V září 2019 zahájil rakouský národní dopravce ÖBB ve spolupráci s Siemens Mobility upgrade již provozované elektrické jednotky Cityjet na alternativní pohon na baterie. Jedná se o třívozovou jednotku, kde krajní vozy jsou hnací a v prostředním jsou umístěny baterie. [19]

trolejové napětí	AC 15 kV, 16,7 Hz; AC 25 kV, 50 Hz
max. rychlost	120 km/h ²
výkon	2600 kW
hmotnost akumulátoru	14 t
typ baterie	LTO
kapacita baterie	528 kWh

Tabulka 3 základní parametry jednotky Desiro Cityjet eco (zdroj dat: [19])



Obrázek 7 jednotka Desiro Cityjet eco (zdroj: [19])

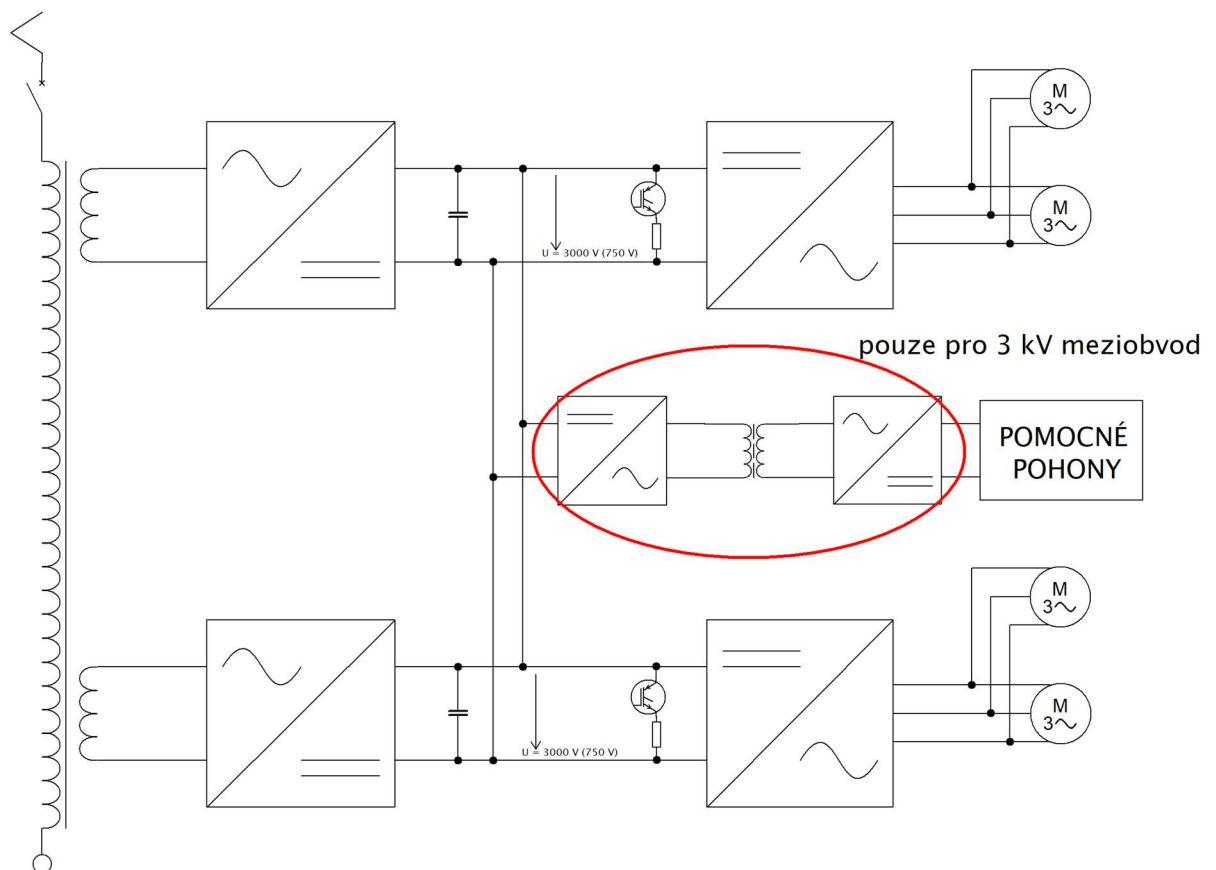
1.2.4 SPECIFIKACE PARAMETRŮ SIMULOVANÉHO VOZIDLA

Vzhledem k tomu, že žádné z již existujících vozidel není přizpůsobeno provozu na trati z Tábora do Bechyně, je simulováno vozidlo smyšlené. Parametry simulovaného vozidla vycházejí z elektrické jednotky Škoda 10 Ev, kterou provozují České dráhy pod obchodní značkou RegioPanter. Simulována je dvouvozová jednotka, kde každý vůz má 2 dvounápravové podvozky. Celkem je tedy jednotka osminápravová, vždy krajní podvozky jsou hnací. Takováto jednotka je simulována ve čtyřech verzích. Dvě z nich jsou čistě elektrické, provozované pod střídavou napájecí soustavou 25 kV, další dvě jsou schopny

² při napájení z trakčního vedení 140 km/h

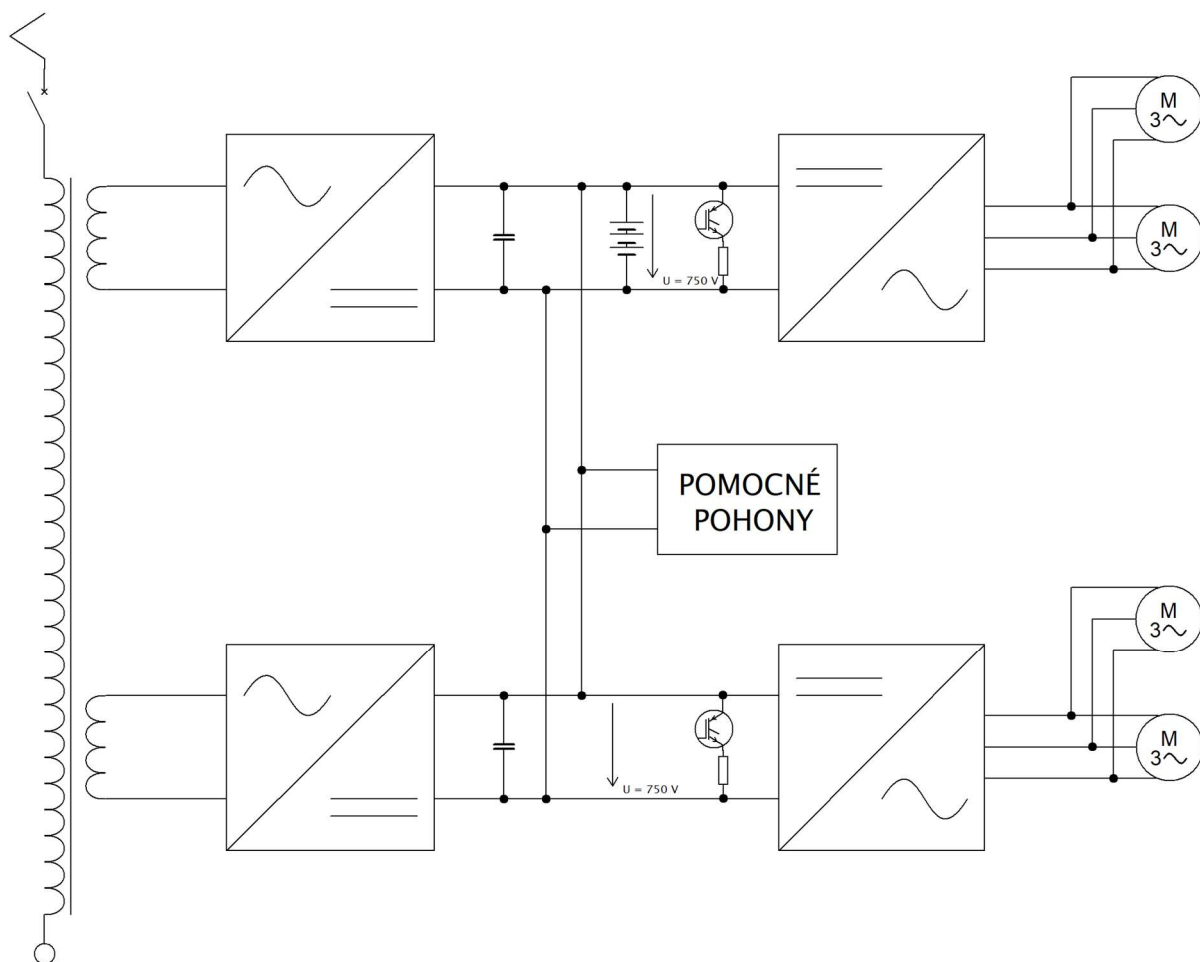
provozu na baterie. Obě verze se liší napětím DC meziobvodu, bateriové v závislosti na napětí ještě podle zapojení akumulátoru.

Nejprve je popsán obvod čistě elektrického vozidla napájeného z AC troleje (Obrázek 8). Ze sběrače teče proud přes hlavní vypínač na primární vinutí transformátoru. Sekundární vinutí je rozděleno na dvě části, z nichž každá je připojena na vstup pulsního usměrňovače, kde se napětí usměrní a vstupuje na stejnosměrný meziobvod. Ten obsahuje filtrační kondenzátor, zajišťující stabilní stejnosměrné napětí, a brzdový odporník spolu s pulsním měničem, kterým je regulován. V simulaci je počítáno s vozidlem o napětí meziobvodu 750 V i s vozidlem o napětí meziobvodu 3000 V. Následuje střídač, kde je napětí rozstředáno na tři fáze a připojeno paralelně na dva trakční motory.



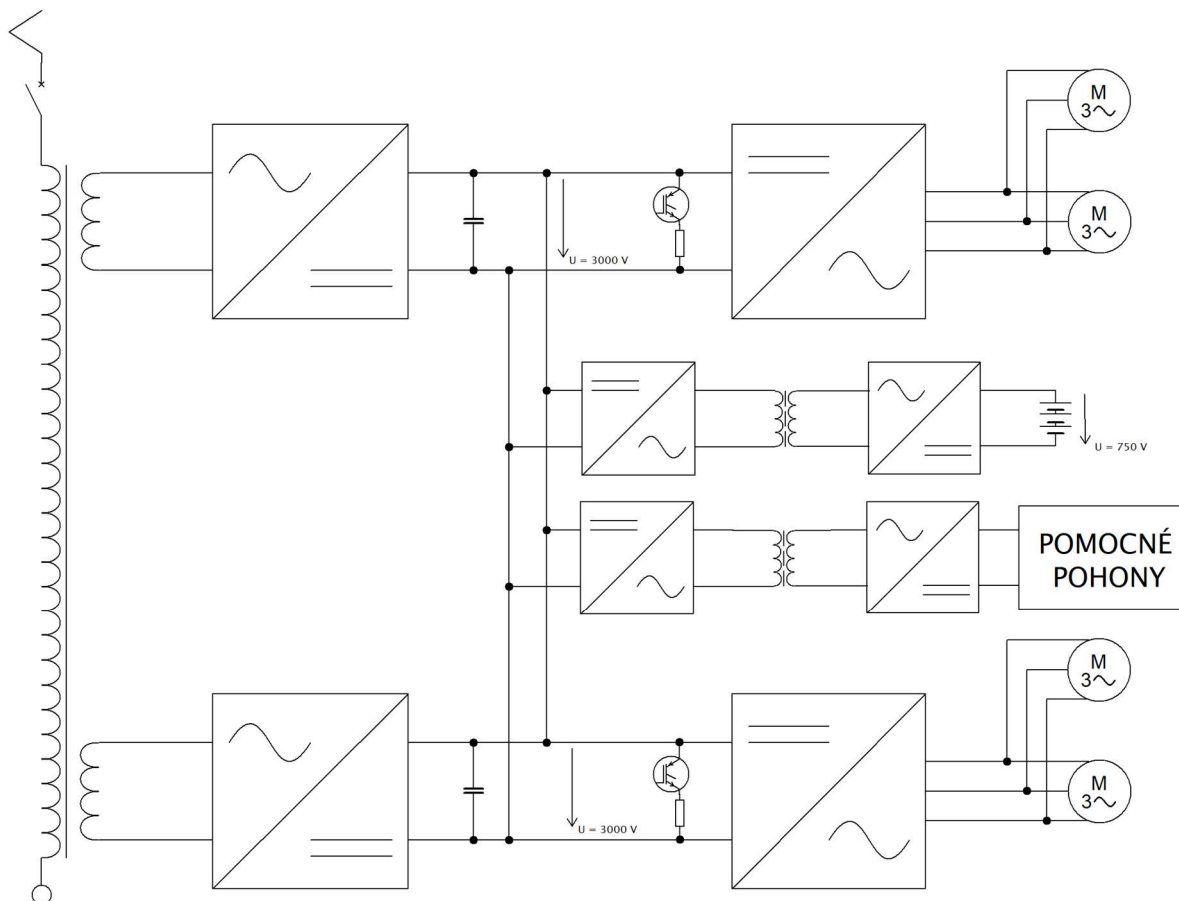
Obrázek 8 schéma trakčního obvodu elektrického vozidla pro obě varianty napětí meziobvodu

Další variantou je dvoudrojové vozidlo napájené z baterie umístěné přímo ve stejnosměrném meziobvodu (Obrázek 9). V tomto případě musí být napětí meziobvodu rovno svorkovému napětí baterie. V našem případě uvažujeme napětí 750 V. Mimo to je vozidlo schopno i elektrického provozu pod střídavou napájecí soustavou 25 kV/50 Hz, ze které je možno ji i nabíjet, což je využito v simulaci.



Obrázek 9 schéma trakčního obvodu vozidla s akumulátorem v meziobvodu

Poslední variantou je dvouzdrojové vozidlo napájené z baterie oddělené oddělovacím měničem (Obrázek 10). V tomto případě je napětí meziobvodu odlišné od napětí baterie. Baterii uvažujeme stejnou, tedy se svorkovým napětím 750 V. Napětí meziobvodu uvažujeme 3 000 V. Napětí z baterie je nejprve rozstředáno ve střídači, poté transformováno na vyšší hodnotu a poté opět usměrněno v usměrňovači, jehož výstupní svorky jsou připojeny přímo do DC meziobvodu. Stejně jako předchozí varianta, i tato je schopna elektrického AC provozu. Nabíjení je možné z AC troleje. Pro obě akumulátorové verze platí, že v jednom voze se nachází transformátor a vstupní usměrňovač, ve druhém voze je umístěn trakční akumulátor a trakční výzbroj jednotlivých podvozků.



Obrázek 10 schéma trakčního obvodu vozidla s akumulátorem zapojeným přes oddělovací měnič

Dalším důležitým prvkem vozidla, jež se výraznou měrou podílí na spotřebě, jsou pomocné pohony. Popišme si tedy uspořádání pomocných pohonů simulované jednotky, které vychází z uspořádání pomocných pohonů jednotky Škoda 10 Ev.

Do trakčního obvodu na stejnosměrný meziobvod je připojena síť o napětí 600 V. V případě 3 kV meziobvodu je síť pomocných pohonů galvanicky oddělena přes oddělovací měnič. U 750 V meziobvodu stačí k vytvoření požadovaného napětí DC/DC měnič. Samotných 600 V DC slouží hlavně k vytápění oddílu pro cestující nebo např. k ohřevu stupínku na stanovišti strojvedoucího. Dále je 600 V DC rozstrídáno a transformováno na třífázových 400 V pro napájení třífázových spotřebičů jako jsou např. kompresory nebo klimatizace. Třífázových 400 V je možné připojit také externě pomocí kabelu. [20] U akumulátorových vozidel je možné z této sítě dobíjet trakční akumulátor. Vzhledem k nízkému nabíjecímu výkonu ale tato přípojka slouží pouze k udržování provozní teploty baterie a činnosti pomocných pohonů.

Ze 600 V DC sítě je také napájen střídač a transformátor k vytvoření jednofázové sítě 230 V. Ta je využitelná k napájení zásuvek v oddíle pro cestující nebo k vyhřívání oken. [20]

Dalším měničem je DC/DC měnič přeměňující stejnosměrné napětí ze 600 V na 24 V pro dobíjení palubní baterie. Ta slouží k napájení spotřebičů jako je řídicí systém, informační systém, osvětlení oddílu pro cestující, návěstní světla, ovládání dveří atd. [20]

Spotřeba pomocných pohonů samozřejmě závisí na jejich výkonu, který je v průběhu jízdy proměnlivý, činnost kompresorů závisí na způsobu jízdy, zejména četnosti používání mechanické brzdy. Vytápění oddílu pro cestující a klimatizace zase závisí na ročním období a venkovní teplotě. Osvětlení oddílu je používáno zejména v noci, délka doby, kdy je nutné svítit je opět závislá na ročním období. Pro vyjmenované velké množství faktorů by bylo složité určit přesně aktuální výkon pomocných pohonů, proto je počítáno s hodnotou průměrnou. Pro účely simulace byl určen výkon pomocných pohonů 60 kW.

Jedním z nejdůležitějších prvků v akumulátorovém vozidle je samotný trakční akumulátor. Trakční akumulátor byl zvolen typu SP-LFP100AHA o energetické kapacitě 600 kWh a jmenovitém napětí 750 V. Jedná se o Li-ion akumulátor technologie LFP (LiFePO₄ – Lithium železo fosfát) jehož významnými přednostmi jsou vysoké hodnoty nabíjecích a vybíjecích proudů, vysoká životnost, přijatelná cena, a hlavně vysoký stupeň bezpečnosti. Nevýhodou je poměrně nízká objemová a hmotnostní hustota energie, což má za následek vyšší hmotnost a rozměry celého akumulátoru.

kapacita	100 Ah
jmenovité napětí	3,2 V
hmotnost	3,15 kg
počet nabíjecích cyklů	>2000 (80 % DOD)
rozměry	221x142x61 mm
maximální nabíjecí proud	200 A (2C)
trvalý nabíjecí/vybíjecí proud	100 A
maximální vybíjecí proud	300 A (3C)
vnitřní odpor	2 mΩ
pracovní teplota při nabíjení	0 °C až 45 °C
pracovní teplota při vybíjení	-20 °C až 55 °C

Tabulka 4 parametry jednoho článku akumulátoru simulovaného vozidla (zdroj dat: [21])

Na základě výše uvedených parametrů jednoho článku je možné určit celkový počet článků pro 750 V baterii.

$$n_{sériově} = \frac{U_{aku}}{U_{článek}} = \frac{750}{3,2} \doteq 234 \text{ článků} \quad (3)$$

$$n_{paralelně} = \frac{E_{aku}}{E_{článek} * n_{sériově}} = \frac{600 * 10^3}{3,2 * 100 * 234} \doteq 8 \text{ článků} \quad (4)$$

$$n_{celk} = n_{sériově} * n_{paralelně} = 234 * 8 = 1872 \text{ článků} \quad (5)$$

Dále je možné spočítat hmotnost akumulátoru. Mimo samotných článků je součástí akumulátoru ještě chladicí systém a pouzdro, ve kterém je uložen. Celková hmotnost tedy bývá přibližně 1,5 až 2 násobek hmotnosti článků.

$$m_{aku} = m_{článek} * n_{celk} = 3,15 * 1872 = 5896,8 \text{ kg} \sim 10 \text{ t} \quad (6)$$

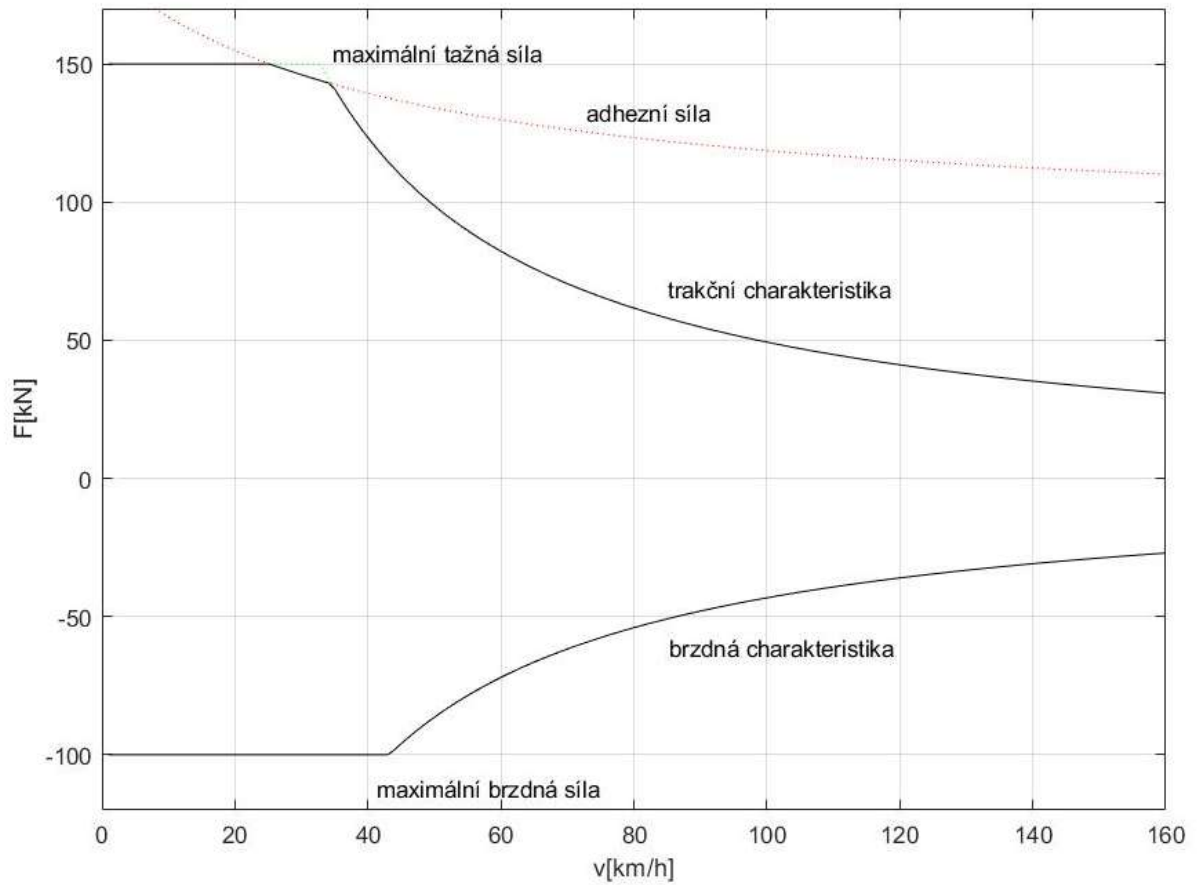
Za účelem simulace bylo tedy navrženo vozidlo s následujícími parametry:

maximální rychlost	160 km/h
maximální výkon	1,36 MW
maximální výkon EDB	1,2 MW
maximální tažná síla	150 kN
součinitel rotujících hmot	1,08
jízdní odpor	$1+0,00038*v^2$ N/kN
uspořádání náprav	Bo'2'+2'Bo'
napětí DC meziobvodu	750 V/3000 V ³
maximální brzdná síla EDB	100 kN
koeficient využití adhezní tíhy	1
výkon pomocných pohonů	60 kW
hmotnost vozidla	103,5 t/113,5 t ⁴
energie akumulátoru	600 kWh
napětí akumulátoru	750 V DC
poloměr kola	0,4 m

Tabulka 5 parametry simulovaného vozidla

³ v závislosti na simulované verzi

⁴ elektrické/akumulátorové vozidlo



Obrázek 11 v simulacích uvažovaná trakční a brzdňá charakteristika vozidla (zdroj: autor)

2 SIMULACE JÍZDY VLAKU

2.1 TRAKČNÍ VÝPOČTY

2.1.1 SÍLY UVÁDĚJÍCÍ VLAK DO POHYBU

Pro výpočet průběhu jízdy kolejového vozidla, jízdních dob a spotřebované energie slouží trakční výpočty, vycházející ze základních fyzikálních zákonů. Pro jednoduchost můžeme považovat vozidlo za hmotný bod, který se pohybuje přímočaře (má jen 1° volnosti). [22]

Aby se vlak vůbec rozjel, musí vyvinout tažnou sílu. Tažná síla ale musí překonat i síly působící proti směru jízdy, které se nazývají jízdní odpory. Jízdní odpory jsou vyjadřovány v poměrných jednotkách N/kN, což nám říká, jaká odporová síla v N působí na 1 kN tíhy vozidla.

$$F_T = F_a + F_o + F_b \quad (7)$$

kde F_T je tažná síla, F_a jsou síly urychlující vozidlo, F_o síly působící proti jízdě vozidla (jízdní odpory) a F_b brzdná síla.

Rozlišuje se tažná síla na obvodu kol a na háku. Pro trakční výpočty se používá zásadně tažná síla vypočtená na obvodu kol, protože na rozdíl od tažné síly na háku zohledňuje i parametry a spotřebu hnacího vozidla.

Tažná síla je dána schopnostmi daného vozidla, zejména jeho trakčním pohonem. Vlastnosti každého trakčního vozidla jsou popisovány trakční charakteristikou (viz Obrázek 11). Jedná se o závislost tažné síly vozidla na jeho rychlosti. Shora je trakční charakteristika omezena maximální tažnou silou, kterou je vozidlo schopno vyvinout. To závisí na maximálním momentu trakčních motorů (tedy na jeho maximálním možném proudovém zatížení). Zprava je trakční charakteristika omezena maximální rychlostí vozidla. Zpočátku je tedy tažná síla konstantní, výkon roste. Po dosažení maximálního výkonu následuje jízda konstantním výkonem a tažná síla klesá po hyperbole. Tato část trakční charakteristiky se nazývá trakční hyperbola. [23]

Dalším omezujícím faktorem je adheze. Adheze je schopnost přenést tažnou sílu mezi kolem a kolejnicí. Je dána koeficientem adheze. [21]

$$\varphi_A = \frac{7500}{v + 44} + 161 \left[\frac{N}{kN} \right] \quad (8)$$

kde φ_A je koeficient adheze a v je rychlost vozidla.

Koeficient adheze závisí na rychlosti vozidla, materiálu kola a kolejnice, průměru kola a znečištění povrchu kola a kolejnice. [23]

Maximální tažnou sílu, kterou je možno přenést mezi kolem a kolejnicí určíme vynásobením adhezní tíhy vozidla koeficientem adheze. Adhezní tíha je dána adhezní hmotností, což je hmotnost působící na nápravy, které se podílejí na adhezi, tedy hnací nápravy. [24]

$$F_{adh} = M_{adh} * g * \varphi_A \quad (9)$$

kde F_{adh} je adhezní síla, M_{adh} adhezní hmotnost vozidla, g tíhové zrychlení a φ_A koeficient adheze.

Při rozjezdu vozidla nastává jev, kdy větší část hmotnosti vozidla leží na zadní nápravě. Přední náprava je tedy odlehčená, což může vést ke zhoršení adheze. Existuje několik způsobů, jak tento jev vyřešit, např. se jedná o vzduchové válce, které při rozjezdu vyvíjejí na přední nápravu větší tlak než na zadní. Mimo mechanické způsoby je řešení v oblasti regulace pohonu, kdy je možné omezit tah předního podvozku nebo naopak zvýšit tah zadního podvozku. Tímto se celkově omezuje využitelná adhezní síla vozidla. Tuto vlastnost popisuje koeficient využití adhezní tíhy ε . Tento jev se nejvíce projevuje u těžkých vlaků s hnacím vozidlem pouze vepředu. U jednotek je tento jev zanedbatelný, proto se koeficient využití adhezní tíhy rovná jedné. [24]

$$F_{adh} = M_{adh} * g * \varphi_A * \varepsilon \quad (10)$$

2.1.2 SÍLY PŮSOBÍCÍ PROTI JÍZDĚ VLAKU

Síly působící proti jízdě vlaku se nazývají jízdni odpory.

Rozdělení:

a) vozidlové

- odpor valivého tření mezi kolem a kolejnicemi
- odpor čepového tření v nápravových ložiskách
- odpor vzduchu

b) traťové

- odpor ze sklonu
- odpor z průjezdu obloukem
- odpor z průjezdu tunelem

Vozidlové odpory:

Vozidlové odpory vznikají třením na vozidle. Skládají se ze 3 složek, z nichž můžeme sestavit pohybovou rovnici jízdy vlaku. Měrný jízdní odpor vozidla se zpravidla určuje měřením při zkouškách vozidla. [23]

$$f_o = a + b * v + c * v^2 \left[\frac{N}{kN} \right] \quad (11)$$

kde a je odpor čepového tření v nápravových ložiskách, člen $b*v$ charakterizuje odpor valivého tření mezi kolem a kolejnicí a člen $c*v^2$ charakterizuje odpor vzduchu. [23]

Odpor čepového tření v nápravových ložiskách:

Tato složka vozidlového odporu bývá uvažována po celou dobu jízdy konstantní, nezávislá na rychlosti jízdy, protože je uvažován konstantní součinitel smykového tření. Kromě toho je tato síla závislá na poloměru čepu nápravy, poloměru kola, tíze vozidla připadající na jedno kolo a na počtu náprav. [23]

Odpor valivého tření mezi kolem a kolejnicí:

Jak je možno vidět z pohybové rovnice, tato složka vozidlového odporu je lineárně závislá na rychlosti. Vzniká pružnou deformací materiálu kola a kolejnice v místě jejich styku. Vzhledem k poměrně nízkým hodnotám bývá tento odpor často zanedbáván. [23]

Odpor vzduchu:

Odpor vzduchu závisí na rychlosti kvadraticky. Tato síla se také nazývá aerodynamický odpor. Mimo rychlosti závisí na koeficientu tvaru vozidla, který je tím menší, čím lépe může vzduch obtékat čelo. Dále závisí také na měrné hustotě vzduchu a ploše čela vozidla. [23]

Trat'ové odpory:

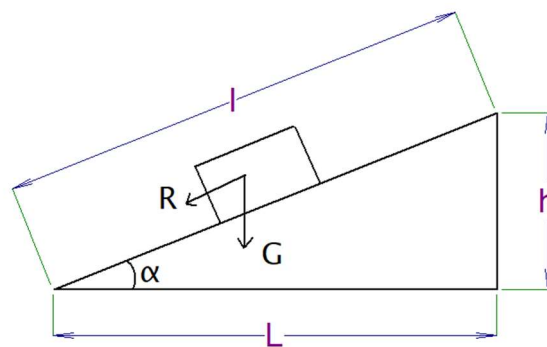
Odpor ze sklonu:

Odpor ze sklonu je síla, která působí na vozidlo při jízdě do stoupání, kdy má kladnou hodnotu a tedy vozidlo zpomaluje, nebo při klesání, kdy má zápornou hodnotu a tedy vozidlo urychluje. Velikost sklonu se udává v promilích a vyjadřuje poměr výšky stoupání tratě ku jeho délce. Velikost odporové síly se vyjadřuje jako poměr síly působící proti jízdě vozidla ku jeho tíze a udává se v poměrných jednotkách N/kN. [23]

$$s = \frac{h}{L} [\text{‰}] \quad (12)$$

$$r_s = \frac{R}{G} \quad (13)$$

kde s značí sklon tratě, r_s odpor ze sklonu, h výšku, o kterou trať vystoupá, R odporová síla a G tíha vozidla (viz Obrázek 12).



Obrázek 12 odpor ze sklonu (zdroj: autor)

Na běžných železničních tratích s adhezním provozem jsou sklony poměrně malé (přibližně do 40 ‰) a tudíž je rozdíl mezi skutečnou délkou úseku tratě l na kterém měříme sklon zanedbatelný vůči vodorovné vzdálenosti L . V tomto případě se tedy hodnota sklonu v promilích rovná hodnotě odporu v N/kN. [23]

$$\sin \alpha = \frac{h}{L} = \frac{R}{G} \quad (14)$$

Odpor z průjezdu obloukem:

Při průjezdu vozidla obloukem vzniká odporová síla, která má několik příčin. Jednou z nich je fakt, že vnější kolejnice je v oblouku delší než vnitřní kolejnice. Vzhledem k tomu, že se obě kola otáčejí stejnou rychlostí musí jedno z kol prokluzovat a vzniká tak tření. [23]

Další příčina se projevuje hlavně u dvounápravových rámových vozidel, kdy se okolky kol dostávají do styku se zakřivenou kolejnicí v oblouku. Pro snížení tření mezi okolkem a kolejnicí bývá na kolejových vozidlech instalováno automatické mazání okolků. [23]

Další vliv na odpor z oblouku má dostředivá a odstředivá síla působící na vozidlo projíždějící obloukem. Tyto síly se projevují jen při přebytku nebo nedostatku převýšení. [23]

$$F_{od} = \frac{m * v^2}{R} \quad (15)$$

kde F_{od} je odstředivá síla, m hmotnost, v aktuální rychlost a R poloměr oblouku.

Pro určení odporu z oblouku je při standardním rozchodu koleje 1435 mm používán empirický vztah (18),

$$r_o = \frac{650}{R - 55} \left[\frac{N}{kN} \right] \quad (16)$$

kde R je poloměr oblouku v metrech. [23]

Odpor z průjezdu tunelem:

Tento odpor vzniká zvýšeným aerodynamickým odporem při průjezdu vozidla úzkým tunelem. Vzhledem k tomu, že se na trati z Tábora do Bechyně žádný tunel nenachází, nebudeme se tímto odporem dále zabývat. [23]

Dynamické odpory:

Jak již bylo uvedeno na začátku této kapitoly, pohyb kolejového vozidla je považován za přímočarý. Ve vozidle se ale nachází mnoho součástí, které vykonávají pohyb rotační. Jedná se zejména o kola, převodovku a trakční motory. Při pohybu vozidla tak vzniká dynamický odpor. Jedná se zejména o odpor ze zrychlení. Při výpočtu síly potřebné k urychlení vozidla je využíváno Newtonova zákona. Ten je ale nutno vynásobit ještě veličinou, zohledňující právě pohyb rotujících součástí. Tato veličina se nazývá součinitel rotujících hmot a je značena písmenem ζ .

$$r_d = m * \zeta * a \quad (17)$$

kde r_d je dynamický odpor, m hmotnost vozidla (vlaku), ζ součinitel rotujících hmot, a zrychlení.

Skutečný jízdní odpor dostaneme součtem všech dílčích odporových sil a vynásobením tíhou vozidla.

$$F = M * g * (f_o + r_s + r_o + r_d) \quad (18)$$

Redukovaný sklon:

Pro zjednodušení výpočtů mohou být za určitých podmínek sloučeny některé hodnoty sklonů dohromady. Hlavním významem redukovaného profilu trati je ale sloučení odporu ze sklonu a odporu z oblouku (tunelu). Hodnota odporu z oblouku je tedy přičtena ke sklonu trati a vznikne tak redukovaný sklon.

Podmínky jsou stanoveny předpisem V7 o trakčních výpočtech [25]:

- sousední traťové úseky se mohou slučovat pouze tak, aby výsledná délka jednoho prvku redukovaného profilu byla celistvým násobkem 100 m
- nesmí být slučováno stoupání a klesání a nesmí se slučovat úseky s rozdílem větším jak 2,5 ‰, pokud nejsou úseky kratší než 100 m
- není-li rozdíl mezi jednotlivými sklony větší jak 1 ‰, lze sloučit jednotlivé úseky na libovolnou délku
- při rozdílu sklonů od 1,1 do 2,5 ‰ lze slučovat úseky do maximální délky 3 km

$$r_s = \frac{r_s * l_s + \sum r_o * l_o}{l} \quad (19)$$

kde r_s značí redukovaný sklon, r_s a r_o odpory ze sklonu a z oblouku, l_s a l_o délky úseků s tímto jízdním odporem a l délku celého úseku, na kterém je redukovaný sklon počítán.

Výpočet výsledného jízdního odporu tedy může být zjednodušen na:

$$F = M * g * (F_o + r_s) \quad (20)$$

2.1.3 FÁZE JÍZDY VLAKU

Rozjezd:

Při rozjezdu je celková tažná síla součtem sil potřebných k překonání jízdních odporů a síly potřebné pro zrychlení. V první fázi rozjezdu je tažná síla většinou konstantní, po dosažení trvalého výkonu vozidla klesá podle trakční charakteristiky. Trvalý výkon je nejvyšší výkon,

při kterém mohou trvale pracovat trakční motory z hlediska dovoleného oteplení vinutí. Skutečná tažná síla je v simulaci ještě vynásobena poměrným tahem, který udává procento z využití trakční charakteristiky. Maximální zrychlení je tedy dáno rozdílem mezi maximální možnou tažnou silou danou trakční charakteristikou omezenou koeficientem adheze a silou potřebnou k překonání jízdních odporů. Rychlost v této fázi jízdy roste.

$$F_{adh} = G_{adh} * \varphi_A * \varepsilon \quad (21)$$

kde F_{adh} je tažná síla omezená adhezí, G_{adh} adhezní tíha vozidla, φ_A koeficient adheze a ε koeficient využití adhezní tíhy.

Tažná síla daná trakční charakteristikou je poměr maximálního výkonu a aktuální rychlosti vozidla.

$$F_T = \frac{P_{max}}{v_{akt}} \quad (22)$$

kde F_T je tažná síla, P_{max} maximální výkon a v_{akt} aktuální rychlost.

Skutečně vyvinutá tažná síla závisí na poměrném tahu:

$$F_{Tskut} = pt * F_T \quad (23)$$

kde F_{Tskut} je skutečná tažná síla vyvinutá vozidlem, pt poměrný tah a F_T tažná síla dle trakční charakteristiky.

Výpočet zrychlení:

$$a = \frac{F_{Tskut} - F_o}{m * \xi} \quad (24)$$

kde a je zrychlení, F_{Tskut} skutečná tažná síla, F_o jízdní odpory, m hmotnost vlaku, ξ součinitel rotujících hmot.

Určení rychlosti a ujeté dráhy vozidla:

$$\Delta v = a * t \quad (25)$$

kde Δv je změna rychlosti, a zrychlení a t čas.

$$\Delta s = v * t \quad (26)$$

kde Δs je přírůstek ujeté dráhy, v rychlost a t čas.

Jízda konstantní rychlostí:

V této fázi jízdy vozidlo udržuje konstantní traťovou rychlost. Tažná síla je dána pouze silou potřebnou k překonání jízdnicích odporů.

$$F_{Tskut} = F_o \quad (27)$$

$$a = \frac{F_{Tskut} - F_o}{m * \xi} = 0 \quad (28)$$

$$\Delta v = a * t = 0 \quad (29)$$

$$\Delta s = v * t \quad (30)$$

Jízda výběhem:

Při jízdě výběhem vozidlo nevyvíjí žádnou tažnou ani brzdou sílu. Rychlost se mění na základě působení odporových sil. Celkový výkon, a tedy i spotřeba je rovna nule.

$$F_{Tskut} = 0 \quad (31)$$

$$a_{výběh} = \frac{F_{Tskut} - F_o}{m * \xi} = \frac{-F_o}{m * \xi} \quad (32)$$

$$\Delta v = a_{výběh} * t \quad (33)$$

$$\Delta s = v * t \quad (34)$$

Brzdění:

Při brzdění dochází k cílenému snižování rychlosti. Intenzita brzdění je dána záporným zrychlením, které je dáno brzdou charakteristikou. Ta má podobný význam jako trakční charakteristika při rozjezdu. Stejně jako při rozjezdu promlouvá do brzdění koeficient adheze. Pokud je známo odrychlení vlaku, dokážeme vypočítat jeho brzdou dráhu.

$$s_b = v_0 * t + \frac{1}{2} * \Delta v * t \quad (35)$$

kde s_b je brzdou dráha, v_0 počáteční rychlost, t čas, Δv změna rychlosti

$$s_b = v_{nasl} * t + \frac{1}{2} * (v_{akt} - v_{nasl}) * t \quad (36)$$

$$s_b = v_{nasl} * \frac{v_{akt} - v_{nasl}}{a_b} + \frac{1}{2} * (v_{akt} - v_{nasl}) * \frac{v_{akt} - v_{nasl}}{a_b}$$

$$s_b = \frac{(v_{akt} - v_{nasl})^2}{2 * a_b} + \frac{v_{nasl} * (v_{akt} - v_{nasl})}{a_b}$$

$$t = \frac{v_{akt} - v_{nasl}}{a_b} \quad (37)$$

kde s_b je brzdná dráha, v_{nasl} rychlost na kterou se brzdí, t čas, v_{akt} aktuální rychlost vozidla a a_b brzdné zpomalení

Pokud je naopak známa vzdálenost k místu zastavení (omezení rychlosti), můžeme vypočítat potřebné odrychlení na dané dráze.

$$a_{potreb} = \frac{(v_{akt} - v_{nasl})^2}{2 * (s_{akt} - s_{nasl})} + \frac{v_{nasl} * (v_{akt} - v_{nasl})}{(s_{akt} - s_{nasl})} \quad (38)$$

$$a_{potreb} = \frac{(v_{akt} - v_{nasl})^2 + 2 * v_{nasl} * (v_{akt} - v_{nasl})}{2 * (s_{akt} - s_{nasl})}$$

$$a_{potreb} = \frac{v_{akt}^2 - 2 * v_{akt} * v_{nasl} + v_{nasl}^2 + 2 * v_{akt} * v_{nasl} - 2 * v_{nasl}^2}{2 * (s_{akt} - s_{nasl})}$$

$$a_{potreb} = \frac{v_{akt}^2 - v_{nasl}^2}{2 * (s_{akt} - s_{nasl})}$$

kde a_{potreb} je potřebné odrychlení k tomu, aby se následující rychlosti dosáhlo v daném místě (s_{nasl}).

Brzdění může probíhat dvěma způsoby. Základním způsobem je brzdění pneumatické, které využívá poklesu tlaku v hlavním potrubí. Veškerá pohybová energie se při tom mění v teplo třením mezi koly a brzdovými zdržemi, příp. mezi kotouči a brzdovými destičkami. Další možností je elektrodynamické brzdění, kdy trakční motory pracují v generátorickém režimu a pohybová energie je měněna na elektrickou. Ta může být přeměňována v odpornících na teplo, nebo se rekuperovat zpět do zdroje, tedy do trakčního vedení nebo akumulátoru. Rekuperačního brzdění využívá většina moderních vozidel. Při energetických simulacích se tedy může počítat s maximálním využitím rekuperace, pokud chceme, aby vyšla energetická bilance co nejpříznivěji, případně je počítáno pouze s mechanickou (pneumatickou) brzdou. Pokud se

počítá s maximálním využitím rekuperace, musí se počítat s možnostmi danými brzdou charakteristikou. Brzdá charakteristika je obdobou trakční charakteristiky.

$$F_b = \frac{-P_{max}}{v_{akt}} \quad (39)$$

Pokud je potřebný brzdý účinek vyšší, je nutné ho doplnit mechanickým brzděním.

$$F_{b_mech} = F_{b_potreb} - F_b \quad (40)$$

$$F_{b_potreb} = F_o + a * m * 1000 * \xi \quad (41)$$

kde F_b je brzdá síla určená brzdou charakteristikou, F_{b_mech} brzdá síla mechanické brzdy a F_{b_potreb} potřebná brzdá síla.

2.2 METODY URČOVÁNÍ A MĚŘENÍ SPOTŘEBY

Celková spotřeba vozidla je dána součtem několika složek. Jedná se zejména o spotřebu trakční energie při urychlování vozidla a spotřebu pomocných pohonů. Při brzděním naopak můžeme využívat rekuperace a vracet energii zpět do zdroje, čímž celkovou spotřebu snížíme.

Základní složkou je spotřeba pro trakci. Ta je dána integrací okamžitého výkonu vozidla v čase (rovnice 42). Výkon je dán součinem rychlosti a tažné síly (rovnice 43), která závisí na jízdních odporech. Způsob určení tažné síly vozidla byl popsán v předchozí kapitole. Základní jednotkou spotřebované energie je Ws , pro trakční výpočty používáme jednotku kWh . Platí, že $1 kWh = 3\,600\,000 Ws$.

$$E = \int P * dt \quad (42)$$

$$P = F_T * v \quad (43)$$

kde E je spotřebovaná energie, P výkon na obvodu kol, t čas, F_T tažná síla a v aktuální rychlost vozidla.

Použitím výše uvedených vztahů ale dostaneme pouze spotřebu energie na obvodu kol. Skutečně odebraná energie je ale vyšší, protože na jednotlivých komponentách trakčního obvodu vznikají ztráty. Pro výpočet skutečně odebrané elektrické energie musíme použít skutečně odebraný elektrický výkon. Ten je dán podílem okamžitého výkonu na obvodu kol a celkové účinnosti trakčního obvodu (rovnice 44). V případě, že je energie rekuperována zpět do zdroje, vznikají ztráty v opačném směru, a tak výkon dodaný zpět do zdroje je součinem výkonu na obvodu kol a celkové účinnosti (rovnice 45).

$$P_{el} = \frac{P}{\mu_{celk}} \quad (44)$$

$$P_{rekuperace} = P * \mu_{celk} \quad (45)$$

kde P_{el} je odebraný elektrický výkon, $P_{rekuperace}$ odrekuperovaný výkon, P výkon na obvodu kol a η_{celk} celková účinnost trakčního obvodu.

Celková účinnost trakčního obvodu je součinem účinností jednotlivých komponent. Při napájení z trakčního vedení:

$$\eta_{celk} = \eta_{motor} * \eta_{převodovka} * \eta_{střídač} * \eta_{usm} * \eta_{trafo} \quad (46)$$

Při napájení z akumulátoru:

$$\eta_{celk} = \eta_{motor} * \eta_{převodovka} * \eta_{střídač} * \eta_{baterie} \quad (47)$$

kde η_{celk} je celková účinnost trakčního obvodu, η_{motor} účinnost trakčních motorů, $\eta_{převodovka}$ účinnost nápravové převodovky, $\eta_{střídač}$ účinnost střídače, η_{trafo} účinnost transformátoru, η_{usm} účinnost usměrňovače a $\eta_{baterie}$ účinnost trakčního akumulátoru.

Účinnosti motoru a střídače musíme zohlednit zvlášť pro každé hodnoty napětí meziobvodu, protože není možné zanedbat rozdíl mezi ztrátami na 750 V meziobvodu a na 3000 V meziobvodu. Pokud je akumulátor zapojen přes oddělovací transformátor, je nutné započítat účinnost tohoto transformátoru (η_{trafo_aku}) včetně přilehlých měničů ($\eta_{střídač_aku}$, η_{usm_aku}).

$$\eta_{celk} = \eta_{motor} * \eta_{převodovka} * \eta_{střídač} * \eta_{baterie} * \eta_{střídač_aku} * \eta_{trafo_aku} * \eta_{usm_aku} \quad (48)$$

Velký vliv na spotřebu má způsob jízdy vozidla. Nižší měrné spotřeby je možno dosáhnout využíváním výběhu v co největším možném čase a využíváním maximálního výkonu v co nejkratším čase. Dále je vhodné se pohybovat v oblasti vyšší účinnosti, která je závislá na výkonu, tedy na momentu a otáčkách motoru. V osobní dopravě, zejména u regionální dopravy je z důvodu častých rozjezdů vhodné řešit rozjezd s co nejmenšími ztrátami. Spotřebu také velkou měrou snižuje využívání rekuperace při brzdění EDB, kdy je elektrická energie vracena zpět do zdroje, v tomto případě tedy dochází k dobíjení trakčního akumulátoru. Velký vliv na spotřebu má také jízda výběhem (viz kapitola 2.1.3) v co nejdelším čase. S tím souvisí i omezování poměrného tahu při jízdě z kopce. Není třeba se rozjíždět se 100 % poměrným tahem, když je vozidlo schopno se rozjet i s výběhovým zrychlením. [26]

Další významnou složkou je spotřeba pomocných pohonů.

Celková spotřeba se zjišťuje dvěma způsoby. Buď se přímo na vozidlo instaluje elektroměr a zjišťuje se skutečná spotřeba, nebo se účtuje paušálními sazbami na základě měrné spotřeby energie. [22]

„Měrná spotřeba elektrické energie pro jízdu je ukazatelem energetické náročnosti na provoz jednotlivých druhů kolejové dopravy.“ [22] Uvádí se v jednotkách „kilowatthodina na tisíc hrubých tunokilometrů“ [kWh/1000*hrtkm]. Již z jednotky je jasné, že měrná spotřeba závisí zejména na hmotnosti vlaku. Z důvodu odlišných jízdních odporů a různých způsobů jízdy, rozlišujeme měrnou spotřebu podle druhu vlaku (osobní, nákladní, lokomotivní). Měrná spotřeba závisí také na druhu napájecí soustavy, ale u osobních vlaků také na ročním období z důvodu spotřeby energie k topení vlaku. V tomto případě vždy platilo, že největší měrná spotřeba byla v zimě, nejmenší naopak v létě. To se změnilo s nástupem klimatizovaných vozů, což výrazně zvýšilo spotřebu v letním období. [27]

2.3 SIMULACE V MATLABU

Jízda akumulátorového vozidla je simulována v prostředí Matlab verze R2021b. K tomuto byly vytvořeny 4 skripty: *simulace.m* (viz příloha B), *simulace_zpet.m*, *aku.m*, *aku_zpet.m*. Poslední dva se od prvních dvou liší pouze v hmotnosti vozidla. Pro každou variantu je vždy jeden skript pro cestu do Bechyně, druhý pro cestu zpět. Liší se pouze v umístění zastávek a je do nich nahráván odlišný soubor s parametry tratě. Nejprve musí být spuštěny simulace akumulátorového vozidla, protože výsledná data se pomocí funkcí *save* a *load* překopírují do hlavního simulačního skriptu (*simulace.m*) za účelem zobrazení do grafu. Seznam a popis všech použitých proměnných je uveden v příloze A. Simulace byla prováděna na základě následujících vstupních hodnot (Tabulka 6). Program je popsán v následující kapitole (2.3.1) a v kapitole 2.3.2 je znázorněn pomocí vývojových diagramů.

název proměnné	počáteční hodnota
a_b	-1
clanku_paralelne	8
clanku_seriove	234
dt	0,01
epsilon	1
eta_stridac_aku	0,97
eta_trafo_aku	0,97
eta_usm_aku	0,97
Fb_max	-100 000
Ft_max	150 000
g	9,81
ksi	1,08
M	103,5 (113,5)
P_max	$1,36 \cdot 10^6$
P_pom	60 000
Pb_max	$1,2 \cdot 10^6$
pt	1
R	0,4
Ri	0,002
s_max	24092
U_aku	750

Tabulka 6 vstupní hodnoty proměnných

2.3.1 POPIS PROGRAMU

Nejprve je pomocí příkazu clear all vymazán obsah workspace, poté jsou pomocí funkce load načteny soubory obsahující hodnoty účinností jednotlivých komponent pohonu a tabulka parametrů tratě, která je uložena do proměnné *trat*. Dále jsou načteny vstupní hodnoty.

Proměnná *trat* je dvourozměrné pole typu double. Data, obsažená v této proměnné, jsou načtena z tabulky, vytvořené v tabulkovém editoru Microsoft Excel, obsahující parametry tratě. První sloupec určuje polohu v metrech, druhý sloupec odpovídající traťovou rychlost, třetí sloupec aktuální redukováný sklon a čtvrtý sloupec polohu v kilometrech. Pátý sloupec obsahuje v základu samé nuly, po načtení vstupních hodnot dojde v polohách zastávek k nastavení hodnoty na 1. Tím jsou určeny kilometrické polohy zastávek.

Simulace je prováděna ve smyčce s krokem 10 ms. Ještě předtím, než se dostane program do smyčky, je vypočten celkový vnitřní odpor akumulátoru podle rovnice 2.

$$Ri_{celk} = Ri * \frac{clanku_seriove}{clanku_paralelne} \quad (49)$$

Cyklické opakování smyčky zajišťuje cyklus for. Počet cyklů určuje proměnná *t*, která je s každým opakováním zvýšena o 1. Vzhledem k tomu, že po dojetí vlaku do cíle je cyklus ukončen, mohl by být počet opakování nastaven až do nekonečna, nicméně z důvodu eliminace následků možných chyb ve výpočtech, kdy by simulované vozidlo nedosáhlo svého cíle, je nastaven na hodnotu 300 000. Tato hodnota při kroku 10 ms odpovídá 3 000 s, tedy 50 min, což převyšuje plánovanou dobu jízdy vozidla.

Jako první je nutné vynulovat hodnotu brzdě síly mechanické brzdy, protože v základu je počítáno pouze s brzděním EDB. Aby bylo možné zobrazit zastávky v grafu, je zavedena proměnná *z*. Hodnota této proměnné je při zastavení vozidla nastavena na 1, v ostatních případech je rovna nule. Dále je nutné vypočítat koeficient adheze odpovídající aktuální rychlosti vozidla podle vztahu 8.

$$fi_{adh} = \frac{7500}{v_{akt}(t) + 44} + 161 \quad (50)$$

Potom dojde k přepočtu tažné síly na moment a rychlosti na otáčky, což je později využito pro určení účinností jednotlivých komponent pohonu. Moment je určen vynásobením tažné síly na obvodu kol poloměrem kola (rovnice 51). Poměr otáček motoru a aktuální rychlosti je dán převodovým poměrem. Ten byl určen podle hodnot uvedených v tabulce účinnosti převodovky, jakožto podíl otáček (*uc_prevodovka.n*) a rychlosti (*uc_prevodovka.v*) (rovnice 52).

$$moment(t) = Ft_{skut}(t) * R \quad (51)$$

$$otacky(t) = (v_{akt}(t) * 3,6) * \frac{uc_prevodovka.n(1)}{uc_prevodovka.v(1)} \quad (52)$$

Je zavedeno jednorozměrné pole typu double s názvem *vykon*, do něhož se uloží absolutní hodnota aktuálního výkonu. Vzhledem k tomu, že hodnoty účinností jsou dány pouze v určitých mezích, je nutno ošetřit situaci, kdy je výkon menší nebo větší než dané meze, a to tak, že pro hodnoty menší než minimum a větší než maximum, se bere vždy minimální/maximální hodnota otáček/momentu. Pokud je moment záporný, je uvažována jeho absolutní hodnota. Všechny hodnoty jsou opět vztaženy k hodnotám účinností převodovky. Pro ostatní komponenty jsou totiž dané meze stejné. Účinnost usměrňovače se vztahuje pouze k výkonu, proto je nutné ošetřit meze samotného výkonu u tabulky účinnosti usměrňovače zvlášť.

Poté je možno přistoupit k samotné simulaci jízdy vozidla. V proměnné *trat* se orientuje pomocí proměnné *m*, která se zvyšuje o 1 dokud je hodnota v prvním sloupci tabulky menší, než aktuální poloha vozidla. Aktuální údaje o trati jsou tedy čteny z předchozího řádku. Další podmínkou pro inkrementaci proměnné *m* je, že je její hodnota menší než počet řádků v proměnné *trat*. V případě, že je hodnota *m* větší (vozidlo došlo do cíle), je smyčka ukončena pomocí příkazu *break*. Hodnota traťové rychlosti je uložena do proměnné *v_trat*, hodnota redukovaného sklonu do proměnné *rs*. Poloha následujícího omezení je určována pomocí proměnné *n*, a to tak, že je hodnota inkrementována o 1 za podmínky, že je hodnota rychlosti v *n*-tém řádku rovna hodnotě v *m*-prvním řádku a zároveň je hodnota v posledním řádku *n*-tého sloupce rovna nule, tedy že nenásleduje zastávka. Následující traťová rychlost je uložena do proměnné *v_nasl*, pokud je hodnota v *pátém* sloupci tabulky rovna 1, nastaví se následující rychlost na nulu. Poloha následujícího omezení se uloží do proměnné *s_nasl*. Proměnná *k* zjišťuje polohu následující zastávky, aby mohlo vozidlo dostatečně včas začít brzdit. Dokud je tedy hodnota v posledním sloupci tabulky *trat* rovna nule, inkrementuje se hodnota proměnné *k* o 1, stejně jako tomu bylo v případě proměnné *m*. Stejně tak je nutné ošetřit překročení počtu řádků, jinak dojde k opuštění smyčky. Poloha zastávky je uložena do proměnné *s_zast*. Pro ukončení simulace po dojetí do cíle dojde za podmínky, že ujetá dráha je větší než délka tratě, k opuštění smyčky pomocí příkazu *break*.

V případě, že je následující traťová rychlost menší než aktuální traťová rychlost a zároveň je hodnota proměnné *brzda* rovna *false* (simulace se nenachází v procesu brzdění), je vypočítána brzdná dráha podle vztahu 36.

$$s_b = \frac{(v_{akt}(t) - v_{nasl})^2}{2 * abs(a_b)} + \frac{v_{nasl} * (v_{akt}(t) - v_{nasl})}{abs(a_b)} \quad (53)$$

Následně je vypočtena brzdná dráha do zastavení, tedy do nulové rychlosti, adhezní síla a jízdní odpor vozidla (rovnice 54, 55, 56) na základě vztahů 36, 10 a 18.

$$s_{b_z} = \frac{v_{akt}(t)^2}{2 * abs(a_b)} \quad (54)$$

$$F_{adh} = M_{adh} * g * fi_{adh} * epsilon \quad (55)$$

$$F_o = M * g * ((1 + 0,00038 * (v_{akt}(t) * 3,6)^2) + rs(t)) \quad (56)$$

Pokud je adhezní síla menší než maximální tažná síla vozidla, je jako maximální tažná síla uvažována síla adhezní.

Aktuální rychlost vozidla je známa z předchozího cyklu, při prvním cyklu je aktuální rychlost rovna nule, což je nastaveno jako vstupní hodnota.

Dále je na základě vztahu 32 vypočteno výběhové zrychlení (odrychlení) (rovnice 57), které udává, jak se bude měnit rychlost při jízdě výběhem, a je uloženo do proměnné a_{vybeh} a podle vztahu 38 odrychlení potřebné k zastavení z následující rychlosti na dráze ohraničené změnou traťové rychlosti a místem zastavení (rovnice 58). To je využito k tomu, aby při změně traťové rychlosti v blízkosti zastávky započalo vozidlo brzdit včas, nebo naopak nebrzdilo příliš brzy, pokud je aktuální rychlost nízká a je velký jízdní odpor.

$$a_{vybeh} = \frac{-F_o}{M * 1000 * ksi} \quad (57)$$

$$a_z = \frac{v_{nasl}^2}{2 * (s_{nasl} - s_{zast})} \quad (58)$$

Dále je určena podmínka pro brzdění, která je splněna v případě, že se vozidlo nachází v brzdě dráze. Vypočtená brzdá dráha je prodloužena o 75 %, což je využito pro jízdu výběhem. Pokud se vozidlo nachází v brzdě dráze do zastavení, a zároveň odrychlení a_z vychází větší než stanovené odrychlení a_b (na vstupu programu nastaveno na hodnotu -1), brzdí vozidlo do zastavení. V opačném případě brzdí na následující traťovou rychlost. Pokud je zároveň splněna podmínka, že následující rychlost je menší než aktuální, je splněna podmínka pro brzdění, což je signalizováno nastavením proměnné $brzda$ na true. Zároveň je potřeba nastavit proměnnou $rozjezd$ na false. Pokud podmínka pro brzdění splněna není, je nastavena proměnná $brzda$ na false a pokud je aktuální rychlost nižší než traťová je nastaven $rozjezd$ na true. Tím je zajištěno, že po ukončení brzdění začne vlak opět zrychlovat. Aby nedošlo po zastavení ihned k rozjezdu, nesmí být zároveň aktuální rychlost rovna nule. Rozjezd se uskuteční až po uplynutí 30 s od

zastavení (3 000 cyklů od zaznamenání času zastavení do proměnné $t_{zastaveni}$) a hodnota tohoto času je zapsána v minutách do druhého sloupce proměnné $jizdni_rad$. Nastavením proměnné $rozjezd$ na true je splněna podmínka pro rozjezd.

Fáze rozjezdu:

Pokud je splněna podmínka pro rozjezd a zároveň není splněna podmínka pro brzdění, přejde simulace do fáze rozjezdu. Nejprve je nastavena hodnota poměrného tahu podle velikosti výběhového zrychlení takto:

a_vybeh	pt
≤ 0	1
$(0;0,25>$	0,75
$(0,25;0,5>$	0,5
$(0,5;1>$	0,25
> 1	0

Tabulka 7 závislost poměrného tahu na velikosti výběhového odrychlení

Pokud není aktuální rychlost rovna nule je vypočtena tažná síla podle trakční charakteristiky (viz rovnice 22).

$$F_t = \frac{P_{max}}{v_{akt}(t)} \quad (59)$$

Při rozjezdu z nulové rychlosti nebo při překročení omezení trakční charakteristiky se použije maximální tažná síla. Po vynásobení poměrným tahem je dána skutečně vyvinutá tažná síla, která je použita ve výpočtech. Následně je na základě vztahů 24, 25 a 26 vypočteno zrychlení (rovnice 60), okamžitá rychlost vozidla (rovnice 61) a ujetá dráha v následujícím cyklu (rovnice 62).

$$a(t) = \frac{F_t_{skut}(t) - F_o}{M * 1000 * zeta} \quad (60)$$

$$v_{akt}(t + 1) = v_{akt}(t) + a(t) * dt \quad (61)$$

$$s(t + 1) = (v_{akt}(t + 1) * dt) + s(t) \quad (62)$$

Pokud tato vypočtená rychlost překročí rychlost traťovou, zapíše se hodnota ujeté dráhy v následujícím cyklu do proměnné d (rovnice 63) a $rozjezd$ se nastaví na false. Tím dojde k ukončení fáze rozjezdu a k přechodu do fáze jízdy konstantní rychlostí.

$$d = s(t + 1) \quad (63)$$

Fáze jízdy konstantní rychlostí:

Pokud je aktuálně ujetá dráha rovna d a zároveň je *rozjezd* roven false přechází simulace do fáze jízdy konstantní rychlostí. V tuto chvíli je skutečná tažná síla rovna pouze odporové síle. Dále je postup stejný jako ve fázi rozjezdu.

$$F_t = \frac{P_{max}}{v_{akt}(t)} \quad (64)$$

$$a = \frac{F_t_{skut}(t) - F_o}{M * 1000 * zeta} \quad (65)$$

Vzhledem k tomu, že se obě síly v čitateli rovnají, vychází zrychlení rovno nule. Vozidlo se tedy pohybuje konstantní rychlostí. V případě, že odporová síla překročí trakční charakteristiku, je skutečnou tažnou silou síla daná trakční charakteristikou. Potom vychází zrychlení záporné a vozidlo zpomaluje.

$$v_{akt}(t + 1) = v_{akt}(t) + a(t) * dt \quad (66)$$

$$s(t + 1) = (v_{akt}(t + 1) * dt) + s(t) \quad (67)$$

Při stání vozidla je nutno skutečnou tažnou sílu ručně nastavit na nulu, protože síla překonávající jízdní odpor je způsobena mechanickou brzdou a nemůže se tedy započítávat do výkonu. Při nulové tažné síle, ale vychází záporné zrychlení, což by v reálném případě znamenalo, že se vozidlo rozjede opačným směrem, takže je nutno jej též nastavit na nulu.

Ujetá dráha se opět zapíše do proměnné d (rovnice 68), aby jízda konstantní rychlostí pokračovala do doby, než bude splněna podmínka pro rozjezd nebo brzdění.

$$d = s(t + 1) \quad (68)$$

Fáze brzdění:

Pokud je splněna podmínka brzdění a zároveň je proměnná *rozjezd* nastavena na false přejde simulace do fáze brzdění. Jakmile rychlost klesne pod nulu dojde k vynulování této rychlosti a ukončení brzdění nastavením proměnné *brzda* na false. Dále je podle vztahu 38 vypočteno potřebné odrychlení (rovnice 69), při kterém dojde k přesnému zastavení (snížení rychlosti) v potřebném místě.

$$a_{potreb} = \frac{(v_{akt}(t)^2 - v_{nasl}^2)}{2 * (s(t) - s_{nasl})} \quad (69)$$

Pokud se vozidlo nachází v úseku před počátkem vypočtené brzdné dráhy a výběhové zrychlení je menší nebo rovno nule, jede vozidlo výběhem. To znamená, že tažná síla je rovna nule a vozidlo jede s výběhovým zrychlením (odrychlením). Po dosažení počátku brzdné dráhy brzdí vozidlo potřebným odrychlením. Podle vztahů 41 a 39 je vypočtena potřebná brzdná síla (rovnice 70) a síla daná brzdou charakteristikou (rovnice 71).

$$Fb_{potrebna} = Fo + (a(t) * M * 1000 * dz) \quad (70)$$

$$Fb = \frac{Pb_{max}}{v_{akt}(t)} \quad (71)$$

Pokud je brzdná síla dle trakční charakteristiky větší než maximální, je jako brzdná síla uvažována ta maximální. Tato síla je uložena v proměnné Fb . Za skutečnou tažnou sílu je považována brzdná síla potřebná, pokud není větší než síla Fb . V tomto případě musí být použita mechanická brzda (rovnice 72). Za skutečnou brzdou sílu je ale stále uvažována pouze hodnota elektrické brzdy Fb , protože pouze ta se podílí na spotřebě elektrické energie.

$$Fb_{mech}(t) = Fb_{potrebna} - Fb \quad (72)$$

Poté je vypočítána aktuální rychlost (rovnice 73) a dráha v dalším cyklu (rovnice 74).

$$v_{akt}(t + 1) = v_{akt}(t) + a(t) * dt \quad (73)$$

$$s(t + 1) = \frac{(v_{akt}(t) - v_{akt}(t + 1)) * dt}{2} + v_{akt}(t + 1) * dt + s(t) \quad (74)$$

Pro ukončení brzdění při poklesu rychlosti pod rychlost traťovou dojde k uložení dráhy do proměnné d a tím pádem k přechodu do fáze jízdy konstantní rychlostí. Pokud dojde k zastavení, uloží se jeho čas do proměnné $t_{zastaveni}$ a v minutách je zapsán do prvního sloupce proměnné $jizdni_rad$. Je zrušena podmínka pro brzdění a hodnota v pátém sloupci proměnné $trat$ je nastavena na nulu, jinak by nedošlo k opětovnému splnění podmínek pro rozjezd. Hodnota proměnné $zastavka$ je zvýšena o 1 a určuje pořadí zastávky. Skutečná tažná síla je rovna nule.

V další fázi dojde k výpočtu aktuálního výkonu (rovnice 75) a spotřebované energie na obvodu kol (rovnice 76).

$$P(t) = Ft_{skut}(t) * v_{akt}(t) \quad (75)$$

$$E_{Ws_ok} = E_{Ws_ok} + P(t) * dt \quad (76)$$

Hodnota energie ve Ws je převedena na kilowatthodiny a uložena do jednorozměrného pole E_{ok} (rovnice 77).

$$E_{ok}(t) = \frac{E_{Ws_ok}}{3,6 * 10^6} \quad (77)$$

Dále je podle vztahu 43 vypočten výkon bez využití rekuperace (rovnice 78) a odrekuperovaný výkon (rovnice 79).

$$P_{bezrekuperace}(t) = Ft_skut(t) * v_akt(t) \quad (78)$$

Pokud je tažná síla záporná, je výkon roven nule. Odrekuperovaný výkon se počítá pouze při záporné tažné síle, jinak je také roven nule.

$$P_{rekuperace}(t) = Ft_skut(t) * v_akt(t) \quad (79)$$

Na základě předchozích výpočtů je možno určit energii bez rekuperace (rovnice 80, 82) a odrekuperovanou energii (rovnice 81, 83).

$$E_{Ws_bezrekuperace} = E_{Ws_bezrekuperace} + P_{bezrekuperace}(t) * dt \quad (80)$$

$$E_{Ws_rekuperace} = E_{Ws_rekuperace} + P_{rekuperace}(t) * dt \quad (81)$$

$$E_{bezrekuperace}(t) = \frac{E_{Ws_bezrekuperace}}{3,6 * 10^6} \quad (82)$$

$$E_{rekuperace}(t) = \frac{E_{Ws_rekuperace}}{3,6 * 10^6} \quad (83)$$

Dále je nutné určit proud akumulátoru (rovnice 84), což je následně využito k výpočtu jeho účinnosti (rovnice 85) na základě vztahu 1.

$$I_{aku}(t + 1) = \frac{abs(P(t + 1))}{U_{aku}} \quad (84)$$

$$\eta_{baterie}(t + 1) = \frac{abs(P(t + 1)) - Ri_{celk} * I_{aku}(t + 1)^2}{abs(P(t + 1))} \quad (85)$$

Účinnost je samozřejmě možné vypočítat pouze pro nenulové hodnoty výkonu. Při nulovém výkonu je účinnost rovna nule.

Poté jsou hodnoty ujeté dráhy a času převedeny na kilometry (rovnice 88) a minuty (rovnice 89) za účelem zobrazení v grafech.

$$s1 = s/1000 \quad (86)$$

$$t1(t + 1) = (t + 1)/1000 \quad (87)$$

Po vystoupení ze smyčky je určena celková účinnost pohonu. Na základě tabulek účinností jednotlivých komponent jsou pomocí lineární interpolace (funkce interp2, resp. interp1) nalezeny hodnoty účinností odpovídající všem hodnotám výkonu.

Celková účinnost je dána součinem jednotlivých účinností.

$$\begin{aligned} eta_trolej750 &= eta_motor_750 * eta_prevodovka * eta_stridac_750 * eta_trafo \\ &* eta_usm \end{aligned} \quad (88)$$

$$\begin{aligned} eta_trolej3000 & \\ &= eta_motor_3000 * eta_prevodovka * eta_stridac_3000 \\ &* eta_trafo * eta_usm \end{aligned} \quad (89)$$

$$\begin{aligned} eta_aku_meziobvod & \\ &= eta_motor_750 * eta_prevodovka * eta_stridac_750 \\ &* eta_baterie \end{aligned} \quad (90)$$

$$\begin{aligned} eta_aku_menic & \\ &= eta_motor_3000 * eta_prevodovka * eta_stridac_3000 \\ &* eta_baterie * eta_stridac_aku * eta_trafo_aku * eta_usm_aku \end{aligned} \quad (91)$$

Poté je použit další cyklus for pro výpočet celkově odebraného výkonu. Počet opakování je určen proměnnou i , a je stejný jako počet opakování předchozí smyčky. Pokud není celková účinnost rovna nule je vypočten elektrický výkon odebraný z akumulátoru, popř. trolejového vedení. Pokud je účinnost rovna nule, je i výkon roven nule.

$$P_trolej750(i) = P(i)/eta_trolej750(i) \quad (92)$$

$$P_trolej3000(i) = P(i)/eta_trolej3000(i) \quad (93)$$

$$P_aku_meziobvod(i) = P(i)/eta_aku_meziobvod(i) \quad (94)$$

$$P_aku_menic(i) = P(i)/eta_aku_menic(i) \quad (95)$$

Pokud je výkon záporný dochází k rekuperaci zpět ke zdroji, a tudíž ztrátám v opačném směru.

$$P_trolej750(i) = P(i) * eta_trolej750(i) \quad (96)$$

$$P_trolej3000(i) = P(i) * eta_trolej3000(i) \quad (97)$$

$$P_{aku_meziobvod}(i) = P(i) * eta_aku_meziobvod(i) \quad (98)$$

$$P_{aku_menic}(i) = P(i) * eta_aku_menic(i) \quad (99)$$

Potom je vypočtena celkově spotřebovaná energie. Kromě výše uvedeného odebraného výkonu je nutno započítat i výkon pomocných pohonů.

$$E_{Ws_trolej750} = E_{Ws_trolej750} + ((P_{trolej750}(i) + P_{pom}) * dt) \quad (100)$$

$$E_{Ws_trolej3000} = E_{Ws_trolej3000} + ((P_{trolej3000}(i) + P_{pom}) * dt) \quad (101)$$

$$E_{Ws_aku_meziobvod} \quad (102)$$

$$= E_{Ws_aku_meziobvod} + ((P_{aku_meziobvod}(i) + P_{pom}) * dt)$$

$$E_{Ws_aku_menic} = E_{Ws_aku_menic} + ((P_{aku_menic}(i) + P_{pom}) * dt) \quad (103)$$

Pro nenulové hodnoty účinnosti je vypočtena spotřeba bez rekuperace a odrekuperovaná energie.

$$E_{Ws_bezrekuperace750} \quad (104)$$

$$= E_{Ws_bezrekuperace750} + ((\frac{P_{bezrekuperace}(i)}{eta_trolej750(i)} + P_{pom}) * dt)$$

$$E_{Ws_rekuperace750} \quad (105)$$

$$= E_{Ws_rekuperace750} + (P_{rekuperace}(i) * eta_trolej750(i) * dt)$$

$$E_{Ws_bezrekuperace3000} \quad (106)$$

$$= E_{Ws_bezrekuperace3000} + ((\frac{P_{bezrekuperace}(i)}{eta_trolej3000(i)} + P_{pom}) * dt)$$

$$E_{Ws_rekuperace3000} \quad (107)$$

$$= E_{Ws_rekuperace3000} + (P_{rekuperace}(i) * eta_trolej3000(i) * dt)$$

$$E_{Ws_bezrekuperace_meziobvod} \quad (108)$$

$$= E_{Ws_bezrekuperace_meziobvod} + ((\frac{P_{bezrekuperace}(i)}{eta_aku_meziobvod(i)} + P_{pom}) * dt)$$

$$E_{Ws_rekuperace_meziobvod} \quad (109)$$

$$= E_{Ws_rekuperace_meziobvod} + (P_{rekuperace}(i) * eta_aku_meziobvod(i) * dt)$$

$$E_{Ws_bezrekuperace_menic} \quad (110)$$

$$= E_{Ws_bezrekuperace_menic} + ((\frac{P_{bezrekuperace}(i)}{eta_aku_menic(i)} + P_{pom}) * dt)$$

$$\begin{aligned}
 E_{Ws_rekuperace_menic} & & (111) \\
 &= E_{Ws_rekuperace_menic} + (P_{rekuperace}(i) * \eta_{aku_menic}(i) \\
 & * dt)
 \end{aligned}$$

Při nulové účinnosti:

$$E_{Ws_bezrekuperace750} = E_{Ws_bezrekuperace750} + (P_{pom} * dt) \quad (112)$$

$$E_{Ws_bezrekuperace3000} = E_{Ws_bezrekuperace3000} + (P_{pom} * dt) \quad (113)$$

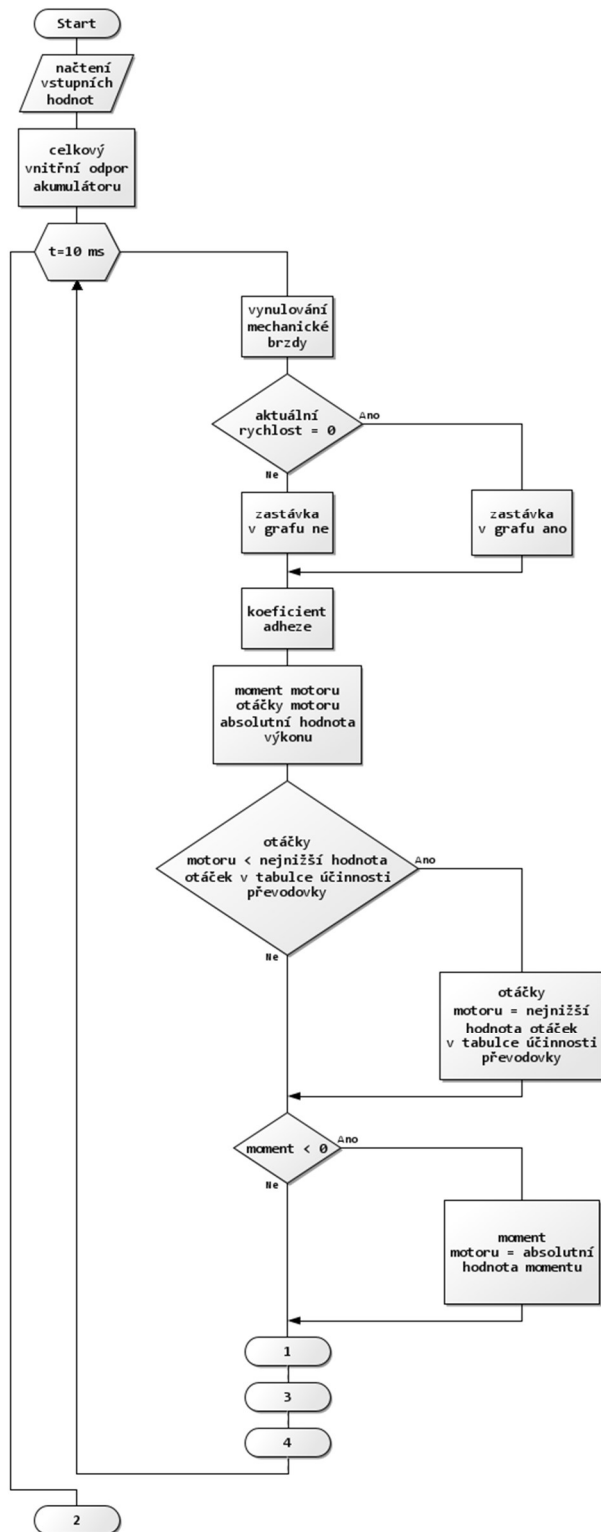
$$E_{Ws_bezrekuperace_meziobvod} = E_{Ws_bezrekuperace_meziobvod} + (P_{pom} * dt) \quad (114)$$

$$E_{Ws_bezrekuperace_menic} = E_{Ws_bezrekuperace_menic} + (P_{pom} * dt) \quad (115)$$

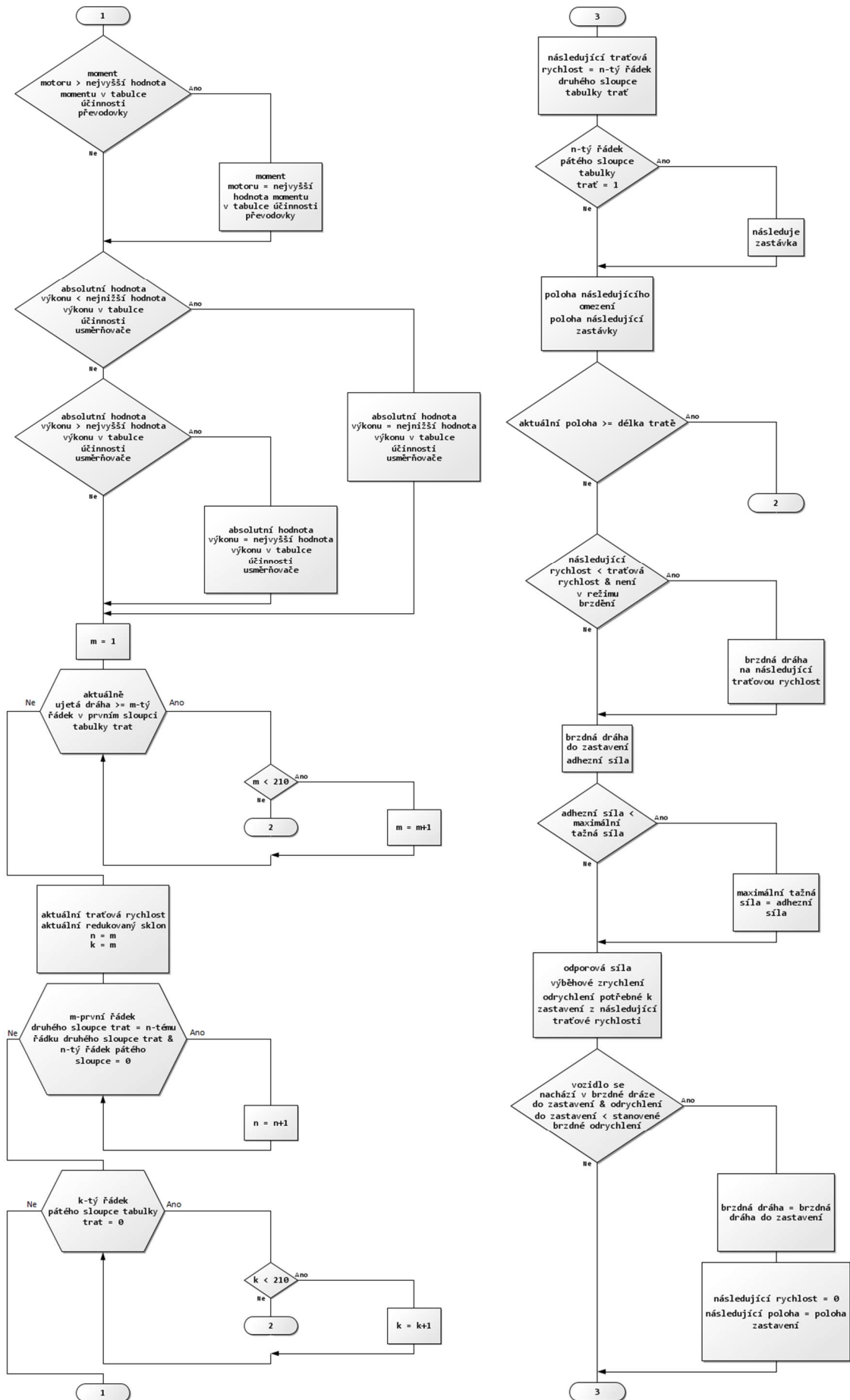
Všechny hodnoty energie jsou pak vydělením hodnotou $3,6 * 10^6$ převedeny na hodnoty v kWh.

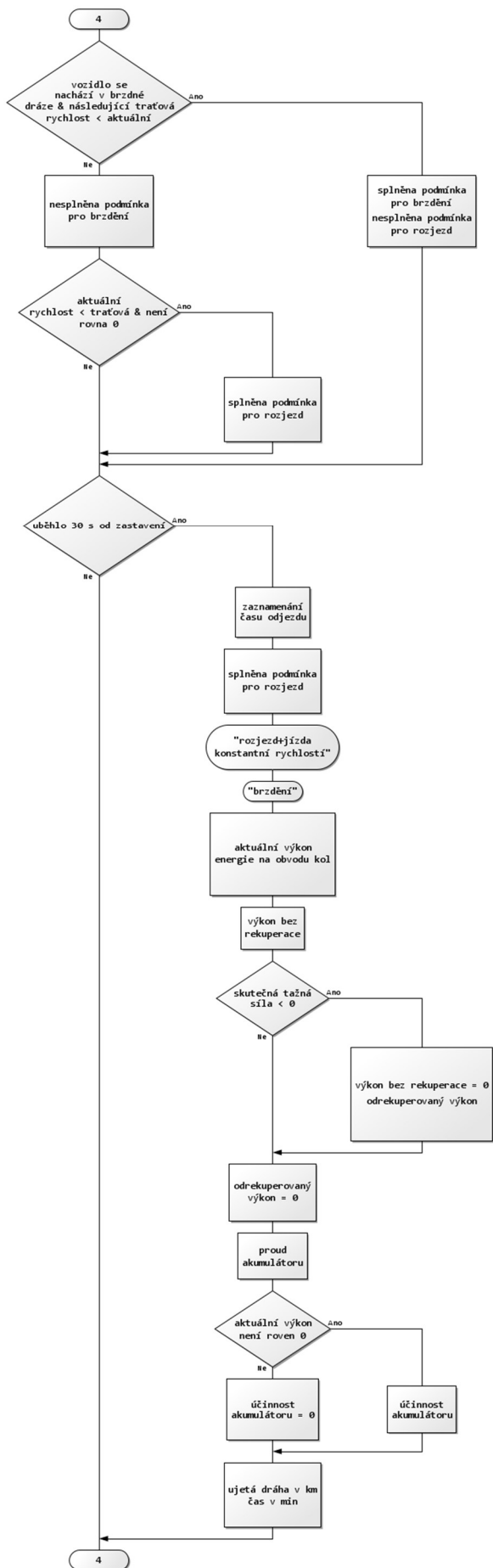
Na závěr dojde k nastavení a vykreslení jednotlivých grafů.

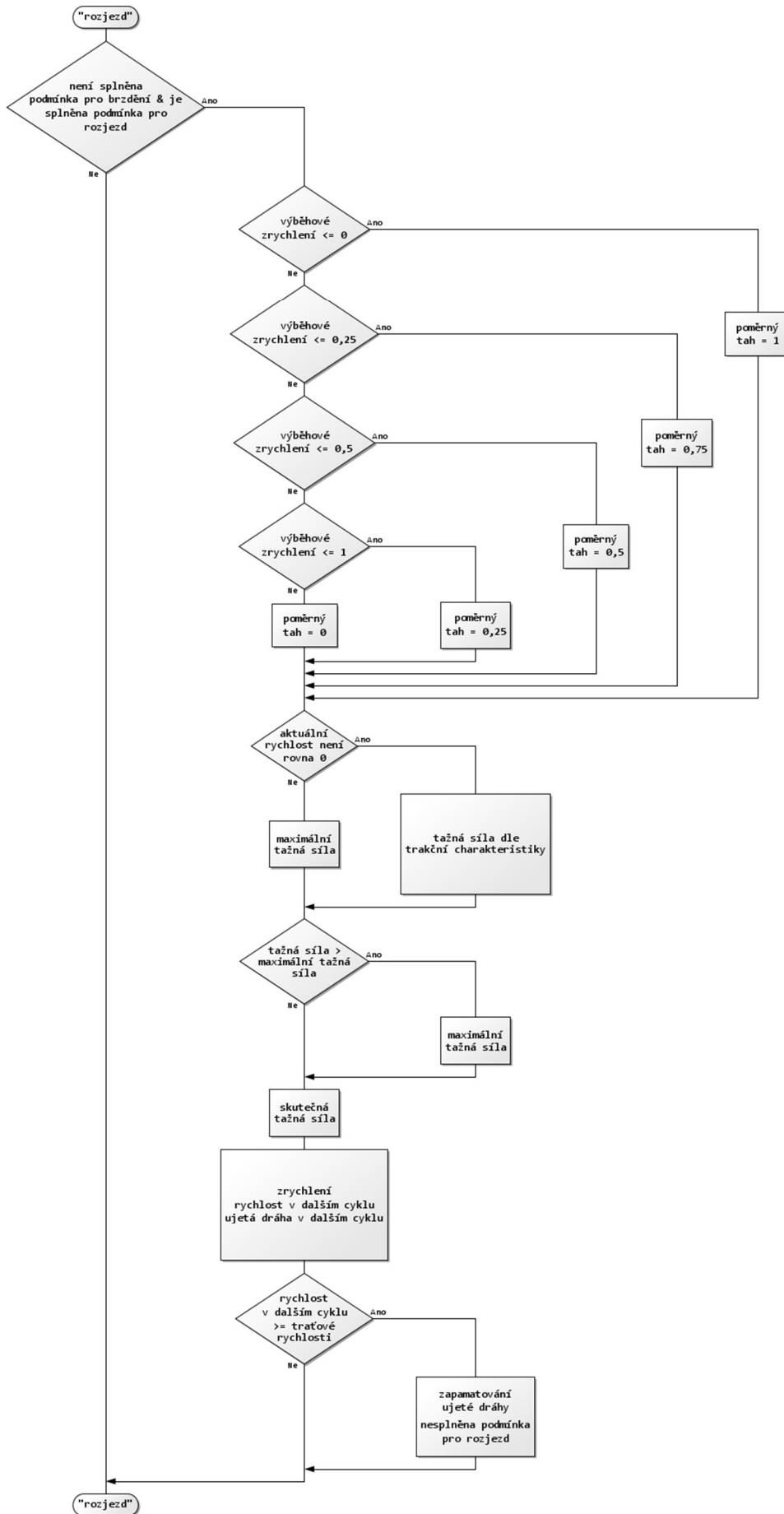
2.3.2 VÝVOJOVÉ DIAGRAMY

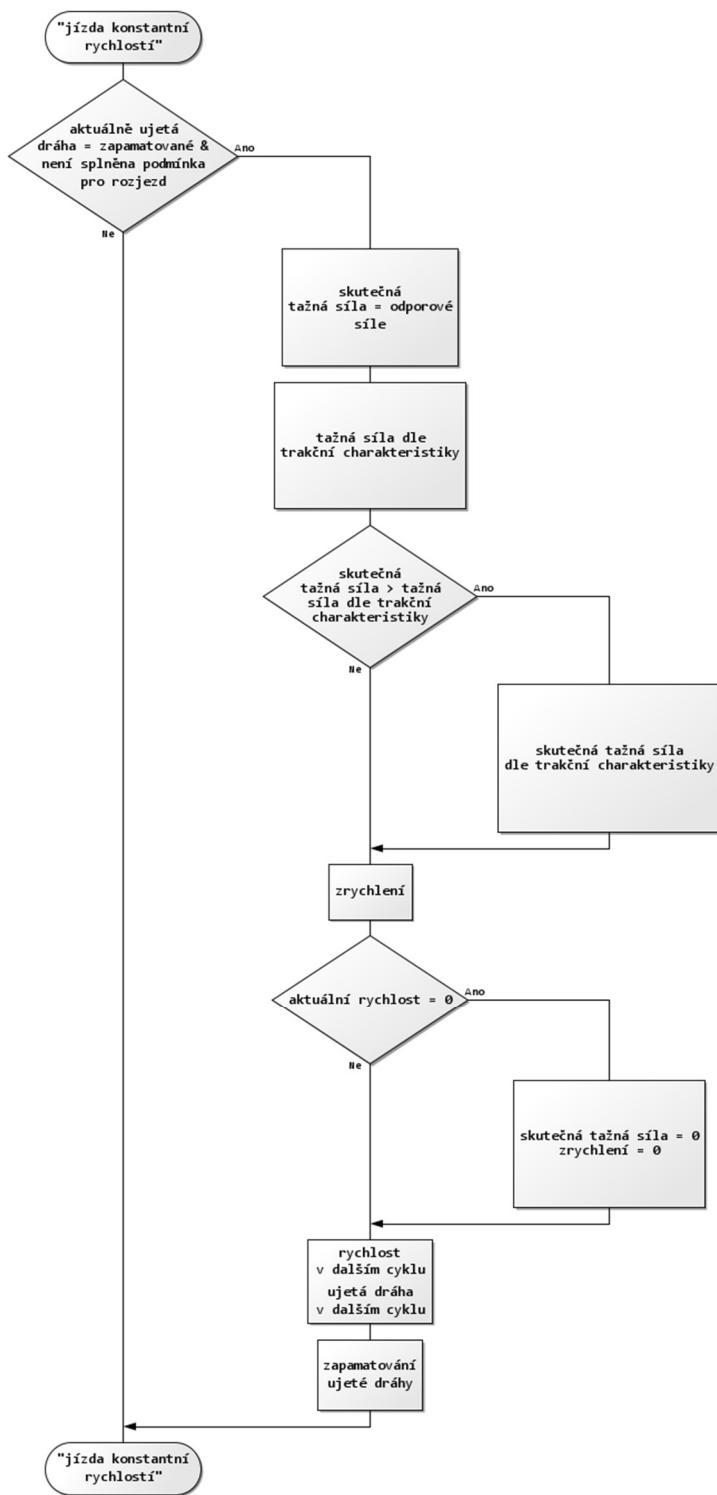


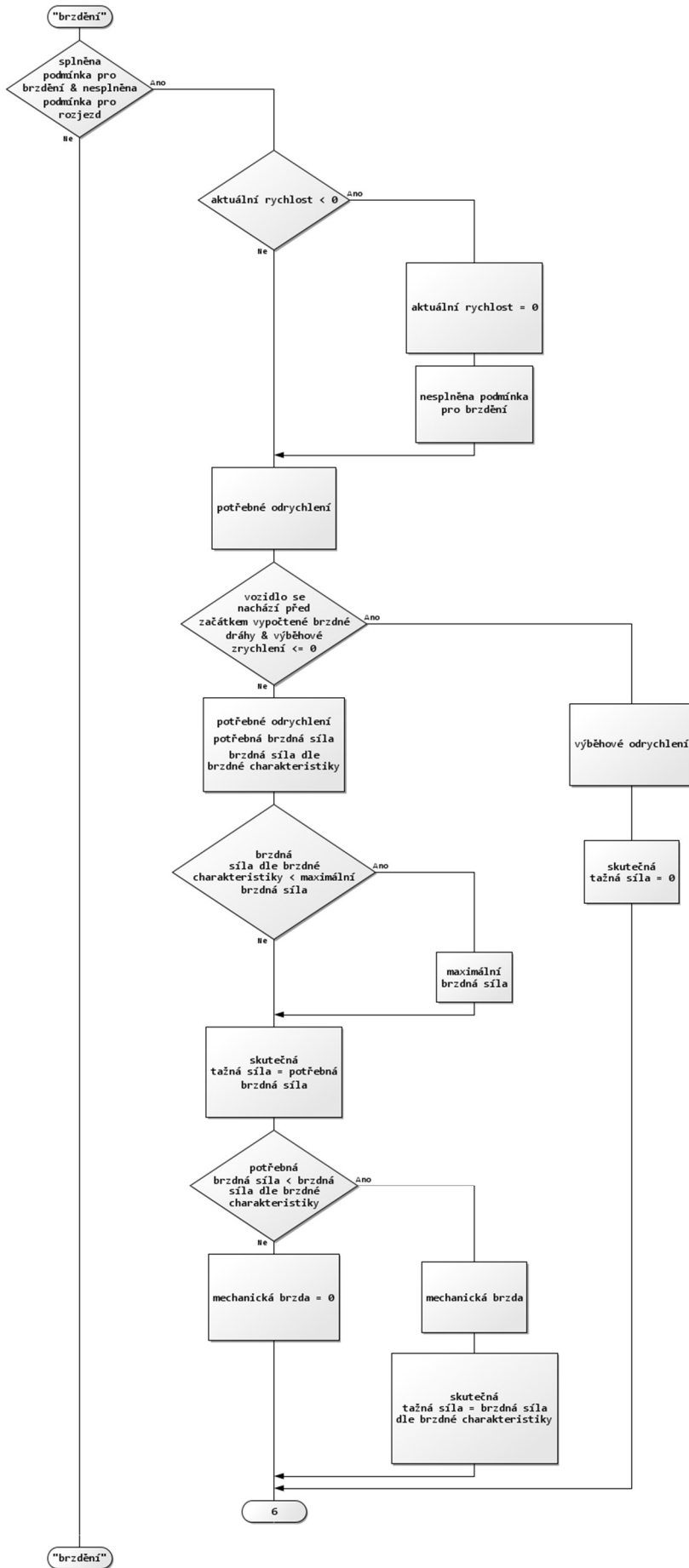


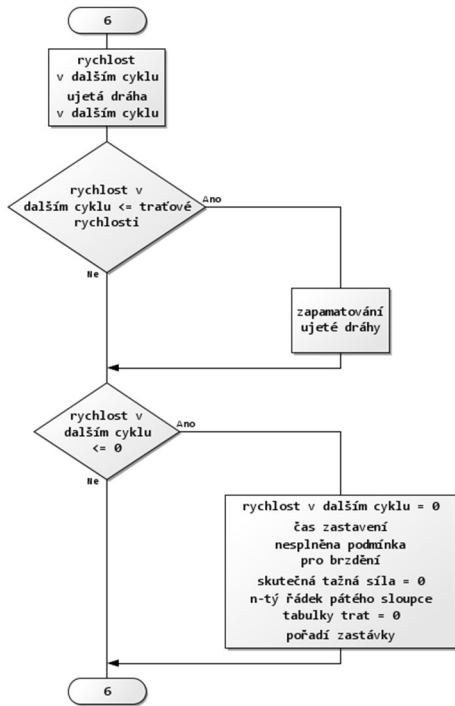








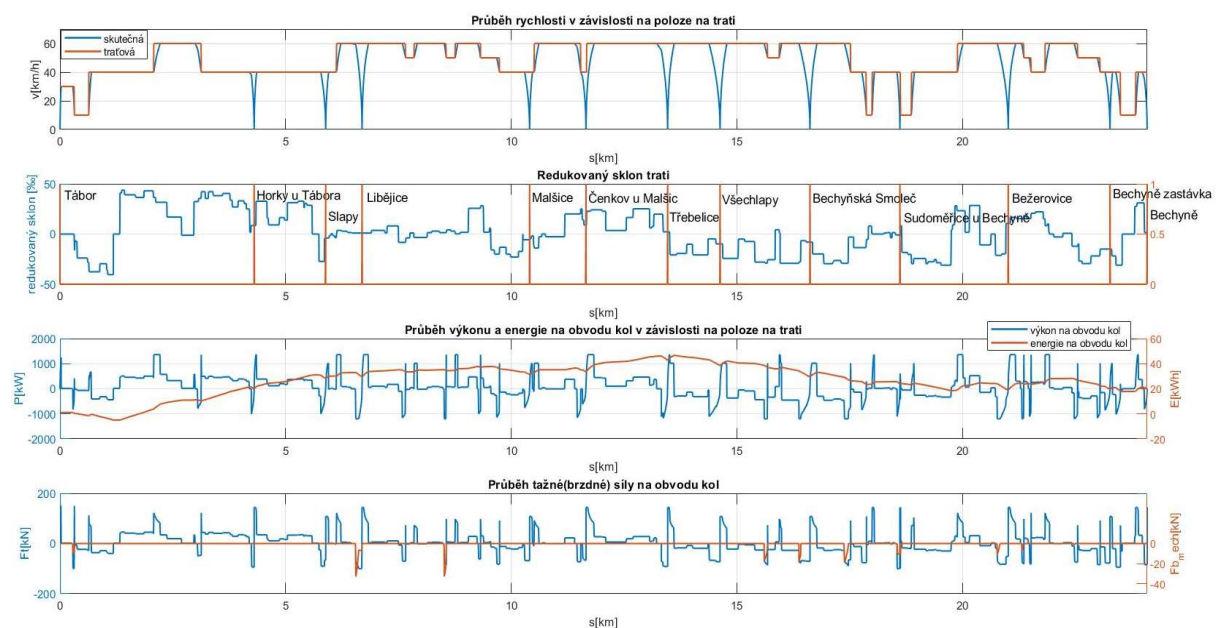




3 VYHODNOCENÍ SIMULACE

Výše popsaný program po spuštění odsimuluje na základě výše uvedených parametrů jízdu vozidla ze stanice Tábor do stanice Bechyně. Po ukončení simulace zobrazí odsimulovaná data v grafech. Jak je vidět ze zobrazeného grafu (Obrázek 13), jízda vozidla probíhá dle předpokladu, dodržuje traťovou rychlost a zastavuje ve všech zastávkách. Cesta trvá 44 minut, což je o 2 minuty méně než jízdní doba osobního vlaku taženého lokomotivou řady 113 v GVD 2022/2023.

Na základě simulace jízdy byl vykreslen průběh výkonu na obvodu kol a z něho vypočtena celkově spotřebovaná energie.



Obrázek 13 průběhy veličin na obvodu kol (zdroj: autor)

	jízda směr Bechyně	jízda směr Tábor	celková spotřeba na jeden obrat
spotřeba bez rekuperace [kWh]	114,26	116,06	230,32
odrekuperovaná energie [kWh]	94,5	83,96	178,46
celková spotřeba na obvodu kol [kWh]	19,76	32,09	51,85

Tabulka 8 spotřeba na obvodu kol

Jak je možno vidět z vypočtených hodnot energie (Tabulka 8), téměř 75% energie na obvodu kol je při brzdění odrekuperováno zpět. Při jízdě ve směru z Bechyně do Tábora je odrekuperováno cca o 10 kWh méně, což zvýší celkovou spotřebu.

3.1 NAPÁJENÍ Z TROLEJOVÉHO VEDENÍ

3.1.1 VOZIDLO S 3000 V MEZIOBVODEM

V reálném případě musí být započítány veškeré ztráty na trakčním obvodu. Nejprve se zaměříme na provoz vozidla v elektrickém režimu. Při napájení z trolejového vedení AC soustavy 25 kV, 50 Hz je zohledněna účinnost transformátoru, usměrňovače, střídače, převodovky a účinnost trakčních motorů. Dále je do celkové spotřeby započítána i spotřeba pomocných pohonů. Do výpočtu celkové spotřeby jednoho obratu je započítána i spotřeba pomocných pohonů při pobytu v Bechyni. Při pobytu 8 minut tato hodnota činí 8 kWh.

	jízda směr Bechyně	jízda směr Tábor	celková spotřeba jednoho obratu
spotřeba bez rekuperace [kWh]	183,18	188,62	379,8
odrekuperovaná energie [kWh]	77,93	69,54	147,47
celková spotřeba na sběrači [kWh]	105,25	119,08	232,33

Tabulka 9 spotřeba elektrického vozidla s 3 kV meziobvodem

3.1.2 VOZIDLO S 750 V MEZIOBVODEM

Účinnost je závislá na napětí meziobvodu. Proto byla vypočtena spotřeba i pro 750 V meziobvod.

	jízda směr Bechyně	jízda směr Tábor	celková spotřeba na jeden obrat
spotřeba bez rekuperace [kWh]	187,46	193,85	389,31
odrekuperovaná energie [kWh]	76,02	67,9	143,92
celková spotřeba na sběrači [kWh]	111,44	125,94	245,38

Tabulka 10 spotřeba elektrického vozidla s 750 V meziobvodem

3.2 NAPÁJENÍ Z AKUMULÁTORU

3.2.1 VOZIDLO S AKUMULÁTOREM PŘES ODDĚLOVACÍ MĚNIČ (NAPĚTÍ MEZIOBVODU 3000 V)

Hlavním úkolem této práce je simulace vozidla v režimu akumulátorovém. Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, simulovány jsou dvě varianty akumulátorového vozidla. První z nich je s akumulátorem zapojeným přes oddělovací měnič. V tomto případě musí být zohledněna účinnost samotné baterie, účinnost oddělovacího měniče, jenž je složen ze střídače, transformátoru a usměrňovače. Vzhledem k tomu, že transformátor pracuje na vyšší frekvenci než 50 Hz, liší se účinnosti od prvků trakčního obvodu. Pro všechny tři prvky oddělovacího měniče byla použita konstantní účinnost 0,97. Dále je započítána účinnost trakčního střídače, převodovky a trakčních motorů. Hodnoty účinností byli zvoleny s ohledem na napětí meziobvodu 3000 V.

	jízda směr Bechyně	jízda směr Tábor	celková spotřeba na jeden obrat
spotřeba bez rekuperace [kWh]	214,42	218,76	441,18
odrekuperovaná energie [kWh]	75,31	66,74	142,05
celková spotřeba na aku [kWh]	139,11	152,02	299,13

Tabulka 11 spotřeba vozidla s aku s oddělovacím měničem

3.2.2 VOZIDLO S AKUMULÁTOREM V MEZIOBVODU (NAPĚTÍ MEZIOBVODU 750 V)

Druhou variantou je vozidlo s akumulátorem zapojeném přímo ve stejnosměrném meziobvodu. V tomto případě stačilo počítat pouze s účinností akumulátoru, střídače, převodovky a trakčních motorů s ohledem na napětí meziobvodu 750 V.

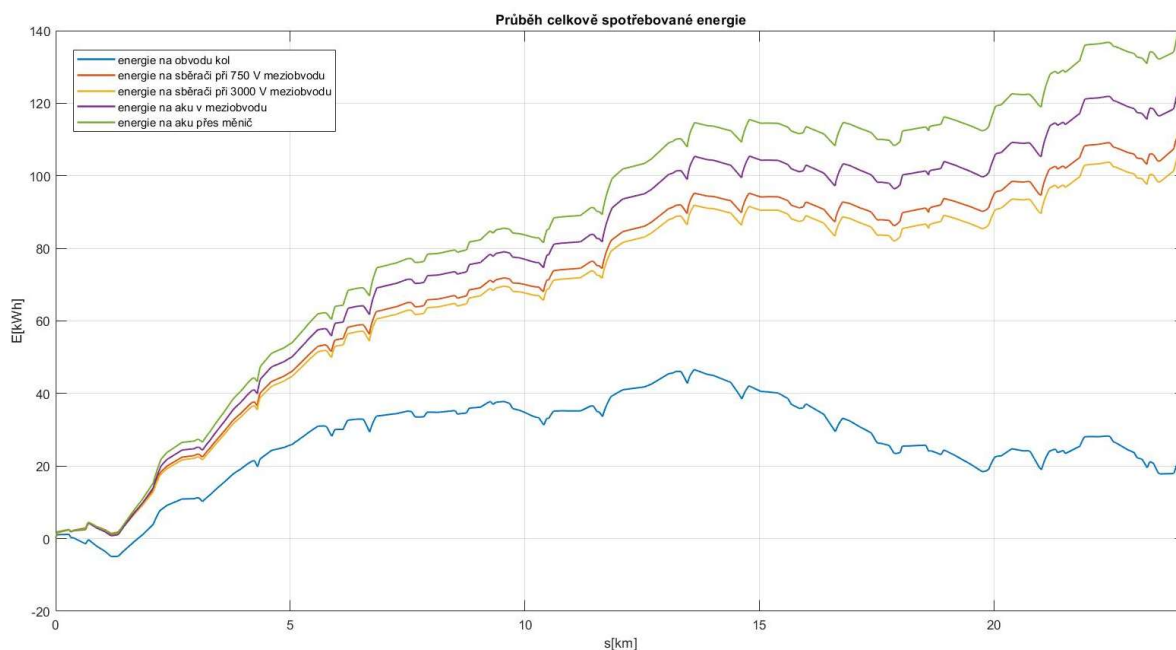
	jízda směr Bechyně	jízda směr Tábor	celková spotřeba na jeden obrat
spotřeba bez rekuperace [kWh]	203,54	208,21	419,75
odrekuperovaná energie [kWh]	80,43	71,38	151,81
celková spotřeba na aku [kWh]	123,11	136,83	267,94

Tabulka 12 spotřeba vozidla s aku v meziobvodu

4 POROVNÁNÍ AKUMULÁTOROVÉHO PROVOZU S ELEKTRICKÝM PROVOZEM

4.1 POROVNÁNÍ SPOTŘEBY

Na obrázku 14 je zobrazen průběh celkové spotřeby jednotlivých variant v závislosti na poloze vozidla na trati pro cestu z Tábora do Bechyně.



Obrázek 14 celková spotřeba jednotlivých variant (zdroj: autor)

Skutečně odebraná energie je přibližně 5x větší než energie vypočtená na obvodu kol, což dokazuje, že ztráty ani spotřebu pomocných pohonů rozhodně nelze zanedbat.

	jízda směr Bechyně	jízda směr Tábor	celková spotřeba na jeden obrat
spotřeba na obvodu kol [kWh]	19,76	32,09	51,85
spotřeba na sběrači při 3000 V meziobvodu[kWh]	101,87	114,9	224,77
spotřeba na sběrači při 750 V meziobvodu[kWh]	107,39	120,82	236,21
spotřeba na akumulátoru umístěném v DC meziobvodu [kWh]	123,11	136,83	267,94
spotřeba na akumulátoru připojeném přes oddělovací měnič [kWh]	139,11	152,02	299,13

Tabulka 13 odsimulovaná spotřeba jednotlivých variant bez započítání ztrát při nabíjení

Nejlépe vychází spotřeba v elektrickém režimu při 3 kV meziobvodu. Při 750 V meziobvodu vychází spotřeba na jeden obrat o 11,5 kWh více, protože při nižším napětí jsou na jednotlivých prvcích trakčního obvodu větší ztráty. Nejvyšší spotřebu má vozidlo s akumulátorem zapojeným přes oddělovací měnič, oproti vozidlu s akumulátorem v meziobvodu je na tom hůře o 30 kWh. To je způsobeno ztrátami na oddělovacím měniči. Pro relevantní porovnání je potřeba započítat ještě ztráty při nabíjení, což řeší následující kapitola.

4.2 PROVOZNÍ ZÁLEŽITOSTI A NABÍJENÍ

Z výše uvedených hodnot lze usoudit, že akumulátorové vozidlo s akumulátorem o kapacitě 600 kWh spolehlivě zvládne jízdu z Tábora do Bechyně a zpět. Na jeden obrat by měla bez problémů vystačit i baterie na konci životnosti, u které se počítá, že má při plném nabití 80 % kapacity baterie nové. To by odpovídalo kapacitě 480 kWh. Životnost baterie se stanovuje pro 80 % DOD, což odpovídá maximálnímu vybití na 120 kWh, proto by nemělo být za provozu běžně počítáno s vybitím na nižší hodnotu. Vybití na větší hloubku vybití totiž výrazně snižuje životnost akumulátoru. Proto není možné, vzhledem k rezervám při různých provozních mimořádnostech, počítat s více jak jedním obratem do Bechyně a zpět bez nabíjení. V současné době stačí pro zajištění provozu na trati Tábor-Bechyně dvě hnací vozidla. Vozidlo po dojezdu

do Tábora ihned přechází na vlak zpět do Bechyně. Pro zajištění co nejplynulejšího oběhu vozidel by bylo vhodné, aby byl pobyt vozidla mezi obraty v Táboře využit k dobíjení. V úvodu byly zmíněny dvě možnosti, a to buď deelektrifikace tratě nebo zachování stávající napájecí soustavy pouze pro historická vozidla. V případě deelektrifikace by mohlo být kolejiště „bechyňky“, které je odděleno od hlavního kolejiště ŽST Tábor, elektrifikováno AC soustavou 25 kV/50 Hz. V tomto případě by se mohlo vozidlo nabíjet přímo u nástupiště. V opačném případě, kdy by zde zůstala DC napájecí soustava, by se muselo vozidlo přesunout na jednu z odstavných kolejí, nacházejících se pod střídavou trolejí. Úplně ideálním řešením, hlavně z hlediska úspory času stráveného posunem, což by vedlo k prodloužení doby nabíjení, by bylo zajíždění osobního vlaku přímo do hlavního kolejiště ŽST Tábor na 3. staniční kolej. To by bylo možné po nezbytné úpravě staničního zabezpečovacího zařízení.

Pro zjištění stavu nabití a následně vlivu na provoz je nutno nejprve určit dobu pobytu, během kterého bude nabíjení probíhat. Podle simulace vychází jízdní doba mezi Táborem a Bechyní 43,47 min. což pro mírnou rezervu zaokrouhlíme na 44 min. Na základě odsimulovaných jízdních dob sestavíme vzorový jízdní řád (Tabulka 14) tak, aby byl pobyt v Táboře pokud možno co nejdelší, a zároveň vycházelo křížování vlaků do dopravní D3 Malšice.

Tábor	xx:10	Bechyně	xx:02
Horky u Tábora	xx:18	Bechyně zastávka	xx:05
Slapy	xx:21	Bežerovice	xx:09
Libějice	xx:23	Sudoměřice u Bechyně	xx:14
Malšice	xx:28	Bechyňská Smoleč	xx:18
Čenkov u Malšic	xx:30	Všechlapy	xx:21
Třebelice	xx:33	Třebelice	xx:23
Všechlapy	xx:35	Čenkov u Malšic	xx:25
Bechyňská Smoleč	xx:38	Malšice	xx:28
Sudoměřice u Bechyně	xx:42	Libějice	xx:33
Bežerovice	xx:47	Slapy	xx:35
Bechyně zastávka	xx:51	Horky u Tábora	xx:38
Bechyně	xx:54	Tábor	xx:46

Tabulka 14 vzorový jízdní řád

Pobyt v Táboře vychází na 24 minut. Po tak dlouhou dobu už nemůžeme nabíjet akumulátor maximálním proudem, ale pouze trvalým nabíjecím, který stanovujeme jako 1C, tedy 100 A. Pro jmenovité napětí akumulátoru 750 V je možné určit nabíjecí výkon.

$$P_{nab} = U_{aku} * I_{nab} * n_{paralelně} = 750 * 100 * 8 = 600 \text{ kW} \quad (116)$$

Na akumulátoru ale vznikají ztráty, takže je výsledný výkon dodaný do baterie menší. Ztráty jsou dány účinností baterie.

$$\eta_{baterie} = \frac{P_{nab} - R_{i_{celk}} * (I_{nab} * n_{paralelně})^2}{P_{nab}} = \frac{600000 - 0,0585 * (100 * 8)^2}{600000} \quad (117)$$

$$= 0,9376$$

$$P_{dod} = P_{nab} * \eta_{baterie} = 600 * 0,9376 = 562,56 \text{ kW} \quad (118)$$

Za 24 minut (=0,4 h) je do akumulátoru dodána energie:

$$E_{dod} = P_{nab} * t = 562,56 * 0,4 = 225,02 \text{ kWh} \quad (119)$$

Nyní je možné přistoupit k výpočtům jednotlivých variant vozidel. Na základě výsledků simulace určíme počet obrátů, které je vozidlo schopno vykonat po dobíjení v Táboře a celkově spotřebovanou energii na jeden obrat.

4.2.1 VOZIDLO S AKUMULÁTOREM V MEZIOBVODU (NAPĚTÍ MEZIOBVODU 750 V)

a) s maximálním využíváním rekuperace

Zůstatek energie po jednom obratu z Tábora do Bechyně a zpět:

$$E_{aku} = 600 - 267,94 = 332,06 \text{ kWh} \quad (120)$$

Energie po dobíjení v Táboře:

$$E_{aku} = 332,06 + 225,02 = 557,08 \text{ kWh} \quad (121)$$

Z výsledků vyplývá, že díky využití pobytu v Táboře k nabíjení je pokles energie v akumulátoru po jednom obratu přibližně 40 kWh. To při možnosti provozu do 80 % DOD vychází i s rezervou na vyježdění současného oběhu vozidel. Potom je vozidlo třeba nabít na plnou kapacitu.

Pokud budeme porovnávat energetickou náročnost akumulátorového vozidla s vozidlem napájeným z trakčního vedení, je nutné uvažovat veškerou energii odebranou z trakčního

vedení. V případě nabíjení z trakčního vedení je tedy nutné započítat účinnosti všech komponent trakčního obvodu. Kromě nabíjení akumulátoru je ještě odebrána energie pro činnost pomocných pohonů. K určení účinnosti využijeme proměnných v simulaci, vzniklých po lineární interpolaci z tabulek účinností. Odtud vyčteme, že účinnost transformátoru je při výkonu 660 kW 0,981, účinnost usměrňovače je 0,987.

Energie odebraná z trakčního vedení v případě dobíjení mezi obraty:

$$E_{TV} = \frac{(P_{nab} + P_{pom}) * t}{\eta_{trafo} * \eta_{usm} * \eta_{baterie}} = \frac{660 * 0,4}{0,981 * 0,987 * 0,9376} = 290,8 \text{ kWh} \quad (122)$$

Energie odebraná z trakčního vedení v případě dobíjení do plné kapacity:

$$E_{TV} = \frac{(P_{nab} + P_{pom}) * \frac{E_{nab}}{P_{nab}}}{\eta_{trafo} * \eta_{usm} * \eta_{baterie}} = \frac{660 * \frac{267,94}{600}}{0,981 * 0,987 * 0,9376} = 324,66 \text{ kWh} \quad (123)$$

b) bez využívání rekuperace

Ve všech výpočtech je počítáno s maximálním využíváním rekuperace. Je dobré určit, jak velký vliv na provoz by mělo její nevyužití. Nejprve je nutné určit zůstatek energie po jednom obratu bez rekuperace.

$$E_{aku} = 600 - 419,75 = 180,25 \text{ kWh} \quad (124)$$

Po dobití v Táboře bez předchozího využívání rekuperace:

$$E_{aku} = 180,25 + 225,02 = 405,27 \text{ kWh} \quad (125)$$

Z výpočtů vyplývá, že bez využívání rekuperace vozidlo není schopno dalšího obratu ani při dobíjení během pobytu v Táboře.

Energie odebraná z trakčního vedení na jeden obrat bez využití rekuperace:

$$E_{TV} = \frac{(P_{nab} + P_{pom}) * \frac{E_{nab}}{P_{nab}}}{\eta_{trafo} * \eta_{usm} * \eta_{baterie}} = \frac{660 * \frac{419,75}{600}}{0,981 * 0,987 * 0,9376} = 508,6 \text{ kWh} \quad (126)$$

4.2.2 VOZIDLO S AKUMULÁTOREM PŘES ODDĚLOVACÍ MĚNIČ (NAPĚTÍ MEZI OBVODU 3000 V)

a) s maximálním využíváním rekuperace

Zůstatek energie po jednom obratu z Tábora do Bechyně a zpět:

$$E_{aku} = 600 - 299,13 = 300,87 \text{ kWh} \quad (127)$$

Energie po dobíjení v Táboře:

$$E_{aku} = 300,87 + 225,02 = 525,89 \text{ kWh} \quad (128)$$

V tomto případě, kdy po každém obratu klesne energie v akumulátoru přibližně o 75 kWh, je vozidlo schopno s rezervou vykonat přibližně 5 obrátů. I to je ale postačující hodnota pro zachování současného oběhu vozidel.

Energie odebraná z trakčního vedení při nabíjení akumulátoru připojeném přes oddělovací měnič během pobytu v Táboře, v případě dobíjení mezi obraty:

$$E_{TV} = \frac{(P_{nab} + P_{pom}) * t}{\eta_{trafo} * \eta_{usm} * \eta_{baterie} * \eta_{střídač_aku} * \eta_{trafo_aku} * \eta_{usm_aku}} \quad (129)$$

$$= \frac{660 * 0,4}{0,981 * 0,987 * 0,9376 * 0,97 * 0,97 * 0,97} = 318,63 \text{ kWh}$$

V případě dobíjení do plné kapacity:

$$E_{TV} = \frac{(P_{nab} + P_{pom}) * \frac{E_{nab}}{P_{nab}}}{\eta_{trafo} * \eta_{usm} * \eta_{baterie} * \eta_{střídač_aku} * \eta_{trafo_aku} * \eta_{usm_aku}} \quad (130)$$

$$= \frac{660 * \frac{299,13}{600}}{0,981 * 0,987 * 0,9376 * 0,97 * 0,97 * 0,97} = 397,13 \text{ kWh}$$

b) bez využívání rekuperace

Zůstatek energie po jednom obratu bez využití rekuperace:

$$E_{aku} = 600 - 441,18 = 158,82 \text{ kWh} \quad (131)$$

V tomto případě je již hloubka vybití téměř na hraně běžného provozování. Je třeba vzít v úvahu, že při jakémkoli dalším prodloužení jízdních dob spotřeba poroste. Proto by v případě tohoto typu vozidla vůbec nemělo být uvažováno o provozu bez rekuperace. Maximální využívání EDB lze podmínit vhodným nastavením řídicího systému vozidla.

Energie odebraná z trakčního vedení na jeden obrat bez využití rekuperace:

$$E_{TV} = \frac{(P_{nab} + P_{pom}) * \frac{E_{nab}}{P_{nab}}}{\eta_{trafo} * \eta_{usm} * \eta_{baterie} * \eta_{střídač_aku} * \eta_{trafo_aku} * \eta_{usm_aku}} \quad (132)$$

$$= \frac{660 * \frac{441,18}{600}}{0,981 * 0,987 * 0,9376 * 0,97 * 0,97 * 0,97} = 585,72 \text{ kWh}$$

Po výše uvedených výpočtech je možno konstatovat, že oba typy akumulátorových vozidel jsou schopny provozu na trati Tábor-Bechyně i v případě zachování oběhů současných, elektrických vozidel. Podmínkou je využívání EDB v maximální možné míře a využití času pobytu v Táboře pro dobíjení. Protože je ale pobyt v Táboře příliš krátký, může i menší narušení grafikonu způsobit problémy s dobíjením. Pro tento případ by mělo být vždy k dispozici minimálně záložní vozidlo, okamžitě připravené k provozu. Ještě lepší přístup by ale byl, střídat pravidelně vozidla po každém obratu, aby byl dostatečný čas k nabíjení i v případě většího zpoždění. To by ale vedlo k nárůstu turnusové potřeby vozidel. Pro sestavení správného oběhu vozidel je vhodné znát potřebný čas k dobití z 80 % DOD.

$$t = \frac{0,8 * E_{aku}}{P_{nab}} = \frac{0,8 * 600}{600} = 0,8 \text{ h} = 48 \text{ min} \quad (133)$$

Velikou výhodou v případě této trati, je možnost dobíjení vozidla ze střídavé napájecí soustavy. Dobíjení vysokým nabíjecím výkonem po takovou dobu ze stejnosměrné soustavy by mohl být značný problém, z důvodu vysokých proudů by mohlo docházet k vypalování troleje. Určitým řešením by v tomto případě mohlo být doplnění druhého sběrače, pro lepší rozložení proudových odběrů.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo ověření spotřeby a možnosti nasazení akumulátorové jednotky na železniční trati z Tábora do Bechyně a zpět. Pro napájení vozidla byl použit 600 kWh akumulátor technologie LFP o hmotnosti 10 t. Vozidlo je možné nabíjet z trakčního vedení AC soustavy 25 kV/50 Hz. Simulováno bylo několik variant, a to vozidlo s akumulátorem umístěným v DC meziobvodu a vozidlo s akumulátorem připojeným přes oddělovací měnič. Odsimulovány byly i varianty napájení přímo z AC trakčního vedení, a to jak pro 750 V DC meziobvod, tak pro 3 kV DC meziobvod.

Za účelem přesného porovnání jednotlivých variant byla na základě odsimulovaných dat vypočítána celková energie odebraná z trakčního vedení na jeden obrat z Tábora do Bechyně a zpět. Výsledky jsou shrnuty v následující tabulce (Tabulka 15). Je počítáno s nabíjením vždy do plné kapacity baterie. Do spotřeby elektrického vozidla je pro relevantní porovnání připočítána (na rozdíl od tabulek výše) i spotřeba pomocných pohonů během pobytu v Táboře, která činí 24 kWh.

	odebraná energie na sběrači/akumulátoru [kWh]		energie odebraná z TV na 1 obrat [kWh]	
	s rekuperací	bez rekuperace	s rekuperací	bez rekuperace
elektrické vozidlo s 750 V meziobvodem	269,38	413,31	269,38	413,31
elektrické vozidlo s 3 kV meziobvodem	256,33	403,8	256,33	403,8
vozidlo s 750 V meziobvodem a akumulátorem v meziobvodu	267,94	419,75	324,66	508,6
vozidlo s 3 kV meziobvodem a akumulátorem zapojeným přes oddělovací měnič	299,13	441,18	397,13	585,72

Tabulka 15 porovnání vozidel

Jako nejúspornější se jeví vozidlo napájené z trakčního vedení s 3 kV meziobvodem. Akumulátorová varianta obecně vychází hůře, nejhůře je na tom vozidlo s akumulátorem zapojeným přes oddělovací měnič. Akumulátorové vozidlo s 3 kV meziobvodem spotřebuje o více jak 50 % energie navíc než elektrické vozidlo s 3 kV meziobvodem. Spotřebu značně zvyšují i ztráty při nabíjení, energie odebraná z trakčního vedení je téměř o 30 % větší než

spotřebovaná energie na akumulátoru. Spotřebu výrazně snižuje využívání rekuperace v maximální možné míře.

Velikou výhodou elektrického vozidla je neomezená možnost provozu, vozidlo je nepřetržitě v kontaktu se zdrojem energie. Akumulátorové vozidlo je schopno vyjet stejný počet obrátů jako elektrické. Podmínkou je maximální využívání rekuperace a dodržení plánované doby pobytu v Táboře, která by byla využita k dobíjení. K zajištění provozní spolehlivosti by bylo nutné držet trvale v pohotovosti plně nabitě záložní vozidlo, v lepším případě udělat oběh pro více jednotek, aby byl vždy k dispozici dostatek času na dobíjení. V tomto případě by bylo ideální nakombinovat provoz s jinou, kompletně elektrifikovanou linkou, aby mohlo být vozidlo využito i během dobíjení, což by výrazně zvýšilo provozní využití vozidel. V případě Tábora se nabízí rameno do Olbramovic nebo Českých Budějovic. Vzhledem k nezanedbatelné hmotnosti, ceně akumulátoru (a i vyšší spotřebě, jak bylo v této práci ověřeno) i nižší životnosti akumulátoru než samotného vozidla, by ovšem bylo lepší ponechat na trati do Bechyně provoz v elektrické trakci, a to buď provést konverzi napájecí soustavy na 25 kV AC, nebo pořídit elektrické jednotky schopné provozu na současných 1,5 kV DC, což by mělo pozitivní vliv i na udržení provozu historických vozidel na trati.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] DVOŘÁK, Jaroslav a Jaroslav KOUDELKA. *80 LET PROVOZU NA TRATI TÁBOR - BECHYNĚ*. Tábor: Jihočeské tiskárny, 1983.
- [2] O městě. *Město Tábor: oficiální portál pro turistiku, kulturu a volný čas* [online]. Tábor: město Tábor, 2017 [cit. 2022-09-15]. Dostupné z: <https://www.visittabor.eu/o-meste>
- [3] Pro návštěvníky. *Město Bechyně* [online]. Bechyně: město Bechyně, 2022 [cit. 2022-09-15]. Dostupné z: <https://www.mestobechyne.cz/cs/pro-navstevniky-2/>
- [4] HARÁK, Martin. *ELEKTRICKÁ DRÁHA TÁBOR - BECHYNĚ*. Praha: Malkus, 2008. ISBN 978-80-87047-09-5.
- [5] SPRÁVA ŽELEZNIC, STÁTNÍ ORGANIZACE. *Příloha č. 2 ZVLÁŠTNÍ TECHNICKÉ PODMÍNKY ZÁMĚR PROJEKTU: „Rekonstrukce trakčního vedení trati Tábor - Bechyně“*. Praha, 2019.
- [6] SPRÁVA ŽELEZNIC, STÁTNÍ ORGANIZACE. *Prováděcí nařízení pro trat' D3 Tábor – Bechyně: změna č. 9*. Plzeň, 2021.
- [7] SPRÁVA ŽELEZNIC, STÁTNÍ ORGANIZACE. *NÁKRESNÝ PŘEHLED ŽELEZNIČNÍHO SVRŠKU*. Plzeň, 2015.
- [8] Popis trati 202 Tábor – Bechyně - Česká republika. *Zelpage.cz* [online]. Želpage, 2022 [cit. 2022-09-17]. Dostupné z: <https://www.zelpage.cz/trate/ceska-republika/trat-202>
- [9] SPRÁVA ŽELEZNIC, STÁTNÍ ORGANIZACE. *TTP 702C*. Plzeň, 2021.
- [10] DANZER, Jiří. *ELEKTRICKÁ TRAKCE 4.: VOZIDLA S ASYNCHRONNÍM TRAKČNÍM MOTOREM* [online]. 2008 [cit. 2022-10-04]. Dostupné z: <https://adoc.pub/elektricka-trakce-4-vozidla-s-asynchronnim-traknim-motorem.html>
- [11] BU-205: Types of Lithium-ion. Battery university [online]. Isidor Buchmann, 2022 [cit. 2022-10-10]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>
- [12] *ELEKTRO: odborný časopis pro elektrotechniku* [online]. 2016. 2016 [cit. 2022-10-10]. Dostupné z:

http://www.odbornecasopisy.cz//flipviewer/Elektro/2016/11/Elektro_11_2016/index.html#p=1

- [13] Everything you need to know about traction batteries. *SIAP* [online]. Minsk: Siap, 2022 [cit. 2022-11-04]. Dostupné z: <https://siap.by/en/articles/everything-you-need-to-know-about-traction-batteries/>
- [14] 224 kilometrů na jedno dobití. S jednotkou FLIRT Akku přepsal Stadler rekord v dojezdu vlaku na baterii. *Zdopravy.cz* [online]. Praha: Avizer Z, 2021 [cit. 2022-11-04]. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/224-kilometru-na-jedno-dobiti-stadler-prepsal-s-jednotkou-flirt-akku-rekord-v-dojezdu-vlak-u-na-baterii-99979/>
- [15] STADLER. *FLIRT AKKU 2-PART UNIT: propagační materiál*. 2022.
- [16] Flirt Akku - Stadler. *Stadler* [online]. Bussnang, 2022 [cit. 2022-10-10]. Dostupné z: <https://www.stadlerrail.com/en/flirt-akku/details/>
- [17] Mireo Plus B Ortenau. *Siemens Mobility* [online]. Munich [cit. 2022-11-04]. Dostupné z: https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:dcf4cd2c-bf4e-4f19-a351-63d2ab76d7cc/siemens-mobility-mireo-plus-b-ortenau-en.pdf?ste_sid=247408c9dbdc76b362cf67dfe6fb9f77
- [18] Mireo Plus B, Mireo Plus H. *Siemens Mobility* [online]. Munich [cit. 2022-11-04]. Dostupné z: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:0a451202-2be4-485d-a736-974d74263e63/siemens-mobility-mireo-plus-b-mireo-plus-h-en.pdf>
- [19] Desiro ML ÖBB Cityjet eco. *Siemens Mobility* [online]. Munich [cit. 2022-11-04]. Dostupné z: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:558069b0-26dc-47ae-a03b-228f968f19fd/siemens-mobility-desiro-ml-oebb-cityjet-eco-en.pdf>
- [20] ŠKODA VAGONKA A.S. *ELEKTRICKÁ JEDNOPODLAŽNÍ JEDNOTKA EJ 650,640,440 RegioPanter: Elektrovýzbroj*. Ostrava, 2012.
- [21] SP-LFP100AHA. *Sinopolybattery.com* [online]. [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: <http://www.sinopolybattery.com/userfiles/files/SP-LFP100AHA.pdf>
- [22] DRÁBEK, Jiří. *Energetické vlastnosti železničních dopravních systémů* [online]. [cit. 2022-09-04]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/4038133-Energeticke-vlastnosti-teleznicnich-dopravnich-systemu.html>

- [23] DRÁBEK, Jiří. *DYNAMIKA A ENERGETIKA ELEKTRICKÉ TRAKCE*. Bratislava: ALFA, 1987.
- [24] DANZER, Jiří. *ELEKTRICKÁ TRAKCE 7.: ADHEZE* [online]. 2008 [cit. 2022-09-10]. Dostupné z: <https://adoc.pub/elektricka-trakce-7-adheze.html>
- [25] FEDERÁLNÍ MINISTERSTVO DOPRAVY. *Předpis ČSD V7* [online]. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1979 [cit. 2022-09-10]. Dostupné z: http://www.iwan.eu07.pl/jw/john_woods2009/predpisy/V/V7.pdf
- [26] DOLEČEK, Radovan. *ENERGETIKA KOLEJOVÉ DOPRAVY: studijní opora* [online]. Pardubice, 2012 [cit. 2022-09-05]. Univerzita Pardubice.
- [27] *Železniční magazín*. 2019. 2019.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 traťová rychlost, redukovaný sklon a zastávky na trati (zdroj: autor).....	14
Obrázek 2 sklonové poměry na trati uvedené v PND3 (zdroj: [6])	15
Obrázek 3 ukázka z tabulky 9 TTP (zdroj: [9])	16
Obrázek 4 část nákrešného přehledu železničního svršku (zdroj: [7])	17
Obrázek 5 jednotka Flirt Akku (zdroj: autor)	22
Obrázek 6 jednotka Mireo plus B (zdroj: autor).....	22
Obrázek 7 jednotka Desiro Cityjet eco (zdroj: [19])	23
Obrázek 8 schéma trakčního obvodu elektrického vozidla pro obě varianty napětí meziobvodu	24
Obrázek 9 schéma trakčního obvodu vozidla s akumulátorem v meziobvodu.....	25
Obrázek 10 schéma trakčního obvodu vozidla s akumulátorem zapojeným přes oddělovací měnič.....	26
Obrázek 11 v simulacích uvažovaná trakční a brzdná charakteristika vozidla (zdroj: autor) ..	29
Obrázek 12 odpor ze sklonu (zdroj: autor)	33
Obrázek 13 průběhy veličin na obvodu kol (zdroj: autor).....	62
Obrázek 14 celková spotřeba jednotlivých variant (zdroj: autor).....	66

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 základní parametry jednotky Flirt Akku (zdroj dat: [15][16]).....	21
Tabulka 2 základní parametry jednotky Mireo plus B (zdroj dat: [18]).....	22
Tabulka 3 základní parametry jednotky Desiro Cityjet eco (zdroj dat: [19]).....	23
Tabulka 4 parametry jednoho článku akumulátoru simulovaného vozidla (zdroj dat: [21])....	27
Tabulka 5 parametry simulovaného vozidla	28
Tabulka 6 vstupní hodnoty proměnných	42
Tabulka 7 závislost poměrného tahu na velikosti výběhového odrychlení	46
Tabulka 8 spotřeba na obvodu kol	63
Tabulka 9 spotřeba elektrického vozidla s 3 kV meziobvodem	63
Tabulka 10 spotřeba elektrického vozidla s 750 V meziobvodem	64
Tabulka 11 spotřeba vozidla s aku s oddělovacím měničem	65
Tabulka 12 spotřeba vozidla s aku v meziobvodu	65
Tabulka 13 odsimulovaná spotřeba jednotlivých variant bez započítání ztrát při nabíjení	67
Tabulka 14 vzorový jízdní řád	68
Tabulka 15 porovnání vozidel	73

SEZNAM ZKRATEK

AC	alternating current (střídavý proud)
ČD	České dráhy
ČR	Česká republika
DB	Deutsche Bahn
DC	direct current (stejnoseměrný proud)
DOD	hloubka vybití
EDB	elektrodynamická brzda
GVD	grafikon vlakové dopravy
NAH.SH	Nahverkehrsverbund Schleswig-Holstein
NTM	Národní technické muzeum
ÖBB	Österreichische Bundesbahnen
PND3	prováděcí nařízení pro trať D3
SFBW	Landesanstalt Schienenfahrzeuge Baden-Württemberg
SOC	stav nabití
TNS	trakční napájecí stanice
TTP	tabulky traťových poměrů
ŽST	železniční stanice

SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN

značka	jednotka	popis
a	$[m/s^2]$	zrychlení
a_b	$[m/s^2]$	brzdné zpomalení
a_{potreb}	$[m/s^2]$	potřebné odrychlení
$a_{výběh}$	$[m/s]$	výběhové zrychlení
E	$[Ws]$	energie
E_{aku}	$[kWh]$	energie v akumulátoru
$E_{článek}$	$[Wh]$	energie jednoho článku
E_{dod}	$[kWh]$	energie dodaná do akumulátoru
E_{TV}	$[kWh]$	energie odebraná z trakčního vedení
F_a	$[N]$	síly urychlující vozidlo
F_{adh}	$[N]$	adhezní síla
F_b	$[N]$	brzdná síla daná brzdou charakteristikou
F_b	$[N]$	brzdná síla EDB daná brzdou charakteristikou
F_{b_mech}	$[N]$	brzdná síla mechanické brzdy
F_{b_potreb}	$[N]$	potřebná brzdná síla
F_o	$[N]$	síly působící proti jízdě vozidla
F_{od}	$[N]$	odstředivá síla
F_T	$[N]$	tažná síla daná trakční charakteristikou
F_{Tskut}	$[N]$	skutečně vyvinutá tažná (brzdná) síla
g	$[m/s^2]$	tíhové zrychlení
G_{adh}	$[kN]$	tíha vozidla
I_{aku}	$[A]$	proud akumulátoru
I_{nab}	$[kW]$	nabíjecí proud
m	$[t]$	hmotnost vozidla
M_{adh}	$[t]$	adhezní hmotnost
m_{aku}	$[kg]$	hmotnost akumulátoru
$m_{článek}$	$[kg]$	hmotnost jednoho článku
n_{celk}	$[článků]$	celkový počet článků
$n_{paralelně}$	$[článků]$	počet paralelně zapojených článků

$n_{\text{sériově}}$	[článků]	počet sériově zapojených článků
P	[W]	výkon na obvodu kol
P_{el}	[W]	elektrický výkon
P_{max}	[W]	maximální výkon vozidla
P_{nab}	[kW]	nabíjecí výkon
P_{pom}	[kW]	výkon pomocných pohonů
$P_{\text{rekuperace}}$	[W]	odrekuperovaný výkon
pt	[-]	poměrný tah
R_{celk}	[Ω]	celkový vnitřní odpor baterie
r_s	[N/kN]	redukovaný sklon
s	[m]	dráha
s_{akt}	[m]	aktuálně ujetá dráha
s_b	[m]	brzdná dráha
s_{nasl}	[m]	poloha následujícího omezení
t	[s]	čas
U_{aku}	[V]	napětí akumulátoru
$U_{\text{článek}}$	[V]	napětí jednoho článku
v	[m/s]	rychlost
v_0	[m/s]	počáteční rychlost
v_{akt}	[m/s]	aktuální rychlost
v_{nasl}	[m/s]	následující rychlost
ε	[-]	koeficient využití adhezní tíhy
η_{baterie}	[-]	účinnost baterie
η_{celk}	[-]	celková účinnost trakčního obvodu
η_{motor}	[-]	účinnost motoru
$\eta_{\text{převodovka}}$	[-]	účinnost převodovky
$\eta_{\text{střídač}}$	[-]	účinnost střídače
$\eta_{\text{střídač_aku}}$	[-]	účinnost střídače v oddělovacím měniči
η_{trafo}	[-]	účinnost transformátoru
$\eta_{\text{trafo_aku}}$	[-]	účinnost transformátoru v oddělovacím měniči
η_{usm}	[-]	účinnost usměrňovače
$\eta_{\text{usm_aku}}$	[-]	účinnost usměrňovače v oddělovacím měniči

ξ	[-]	součinitel rotujících hmot
φ_A	[N/kN]	koeficient adheze

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A – seznam proměnných použitých v simulaci

Příloha B – simulační skript „simulace.m“

Příloha C – CD obsahující simulační skripty (simulace.m, simulace_zpet.m, aku.m, aku_zpet.m) včetně souborů potřebných pro správnou funkčnost programu

Příloha A – seznam proměnných použitých v simulaci

název	jednotka	datový typ	popis
a	m/s ²	double (1D pole)	aktuální zrychlení vozidla
a_b	m/s ²	double	konstantní odrychlení pro výpočet brzdné dráhy
a_potreb	m/s ²	double	potřebné zpomalení pro včasné omezení rychlosti
a_vybeh	m/s ²	double	zrychlení způsobené výběhem
brzda	-	logical	pro určení podmínky pro brzdění
d	m	double	pro zapamatování ujeté dráhy
dt	s	double	časová perioda simulace
E_aku_menic	kWh	double (1D pole)	spotřeba na akumulátoru zapojeném přes oddělovací měnič
E_aku_meziobvod	kWh	double (1D pole)	spotřeba na akumulátoru v meziobvodu
E_bezrekuperace	kWh	double (1D pole)	spotřeba na obvodu kol bez použití rekuperace
E_bezrekuperace_menic	kWh	double (1D pole)	spotřeba na akumulátoru zapojeném přes oddělovací měnič bez použití rekuperace
E_bezrekuperace_meziobvod	kWh	double (1D pole)	spotřeba na akumulátoru v meziobvodu bez použití rekuperace
E_bezrekuperace3000	kWh	double (1D pole)	spotřeba vozidla na sběrači pro 3000 V meziobvod bez použití rekuperace
E_bezrekuperace750	kWh	double (1D pole)	spotřeba vozidla na sběrači pro 750 V meziobvod bez použití rekuperace
E_ok	kWh	double (1D pole)	spotřeba vozidla na obvodu kol
E_rekuperace	kWh	double (1D pole)	energie na obvodu kol navracená při rekuperaci

E_rekuperace_menic	kWh	double (1D pole)	energie na akumulátoru zapojeném přes oddělovací měnič navracená při rekuperaci
E_rekuperace_meziobvod	kWh	double (1D pole)	energie na akumulátoru v meziobvodu navracená při rekuperaci
E_rekuperace3000	kWh	double (1D pole)	energie na sběrači navracená při rekuperaci (3000 V meziobvod)
E_rekuperace750	kWh	double (1D pole)	energie na sběrači navracená při rekuperaci (750 V meziobvod)
E_trolej3000	kWh	double (1D pole)	spotřeba vozidla na sběrači pro 3000 V meziobvod
E_trolej750	kWh	double (1D pole)	spotřeba vozidla na sběrači pro 750 V meziobvod
E_Ws_bezrekuperace	Ws	double	spotřeba na obvodu kol bez použití rekuperace
E_Ws_bezrekuperace_menic	Ws	double	spotřeba na akumulátoru zapojeném přes oddělovací měnič bez použití rekuperace
E_Ws_bezrekuperace_meziobvod	Ws	double	spotřeba na akumulátoru v meziobvodu bez použití rekuperace
E_Ws_bezrekuperace3000	Ws	double	spotřeba vozidla na sběrači pro 3000 V meziobvod bez použití rekuperace
E_Ws_bezrekuperace750	Ws	double	spotřeba vozidla na sběrači pro 750 V meziobvod bez použití rekuperace
E_Ws_ok	Ws	double	spotřeba vozidla na obvodu kol
E_Ws_rekuperace	Ws	double	energie na obvodu kol navracená při rekuperaci
E_Ws_rekuperace_menic	Ws	double	energie na akumulátoru zapojeném přes oddělovací měnič navracená při rekuperaci
E_Ws_rekuperace_meziobvod	Ws	double	energie na akumulátoru v meziobvodu navracená při rekuperaci
E_Ws_rekuperace3000	Ws	double	energie na sběrači navracená při rekuperaci (3000 V meziobvod)

E_Ws_rekuperace750	Ws	double	energie na sběrači navracená při rekuperaci (750 V meziobvod)
E_Ws_trolej3000	Ws	double	spotřeba vozidla na sběrači pro 3000 V meziobvod
E_Ws_trolej750	Ws	double	spotřeba vozidla na sběrači pro 750 V meziobvod
epsilon	-	double	koeficient využití adhezni tíhy
eta_aku_menic	-	double (1D pole)	celková účinnost pohonu s akumulátorem zapojeným přes oddělovací měnič
eta_aku_meziobvod	-	double (1D pole)	celková účinnost pohonu s akumulátorem v meziobvodu
eta_baterie	-	double (1D pole)	účinnost baterie
eta_motor_3000	-	double (1D pole)	účinnost motoru pro 3000 V meziobvod
eta_motor_750			účinnost motoru pro 750 V meziobvod
eta_prevodovka	-	double (1D pole)	účinnost převodovky
eta_stridac_3000	-	double (1D pole)	účinnost střídače pro 3000 V meziobvod
eta_stridac_750	-	double (1D pole)	účinnost střídače pro 750 V meziobvod
eta_stridac_aku	-	double	účinnost střídače v oddělovacím měniči
eta_trafo	-	double (1D pole)	účinnost transformátoru
eta_trafo_aku	-	double	účinnost transformátoru v oddělovacím měniči
eta_trolej3000	-	double (1D pole)	celková účinnost pohonu elektrického vozidla s 3000 V meziobvodem
eta_trolej750	-	double (1D pole)	celková účinnost pohonu elektrického vozidla s 750 V meziobvodem
eta_usm	-	double (1D pole)	účinnost usměrňovače

eta_usm_aku	-	double	účinnost usměřovače v oddělovacím měniči
F_adh	N	double	maximální tažná síla omezená adhezí
Fb	N	double	brzdná síla vozidla daná brzdou charakteristikou
Fb_max	N	double	maximální brzdná síla EDB
Fb_mech	N	double (1D pole)	brzdná síla mechanické brzdy
Fb_potrebna	N	double	potřebná brzdná síla pro včasné omezení rychlosti
f _i _adh	-	double	koeficient adheze
Fo	N/kN	double	odporová síla
Ft	N	double	tažná síla vozidla daná trakční charakteristikou
Ft_max	N	double	maximální tažná síla vozidla
Ft_skut	N	double (1D pole)	aktuálně skutečně vyvinutá tažná (brzdná) síla vozidla (započítaná do výkonu)
g	m/s ²	double	gravitační zrychlení
i	-	double	konstanta opakování smyčky
I_aku	A	double	proud akumulátoru
jizdni_rad	min	double (2D pole)	jízdní řád
k	-	double	pro zjištění polohy následující zastávky
ksi	-	double	součinitel rotujících hmot
M	t	double	hmotnost vozidla
m	-	double	pro hledání polohy vozidla
M_adh	t	double	adhezní hmotnost vozidla
moment	Nm	double (1D pole)	moment motoru
n	-	double	pro hledání následujícího rychlostního omezení
otacky	s ⁻¹	double (1D pole)	otáčky motoru

P	W	double (1D pole)	výkon vozidla na obvodu kol
P_aku_menic	W	double (1D pole)	výkon vozidla s akumulátorem zapojeným přes oddělovací měnič
P_aku_meziobvod	W	double (1D pole)	výkon vozidla s akumulátorem zapojeným přes oddělovací měnič
P_bezrekuperace	W	double (1D pole)	výkon vozidla bez použití rekuperace
P_max	W	double	maximální výkon vozidla
P_pom	W	double	výkon pomocných pohonů
P_rekuperace	W	double (1D pole)	odrekuperovaný výkon
P_trolej3000	W	double (1D pole)	výkon odebraný z troleje při 3000 V meziobvodu
P_trolej750	W	double (1D pole)	výkon odebraný z troleje při 750 V meziobvodu
Pb_max	W	double	maximální výkon EDB
pt	-	double	poměrný tah
R	m	double	poloměr kola
Ri	Ω	double	vnitřní odpor jednoho článku
Ri_celk	Ω	double	vnitřní odpor celého akumulátoru
rozjezd	-	logical	pro určení podmínky pro rozjezd
rs	N/kN	double (1D pole)	aktuální redukovaný sklon trati
s	m	double (1D pole)	ujetá dráha v metrech
s_b	m	double	brzdná dráha
s_b_z	m	double	brzdná dráha do zastavení
s_max	m	double	délka tratě
s_nasl	m	double	poloha následujícího rychlostního omezení
s_zast	m	double	poloha následující zastávky
s1	km	double (1D pole)	ujetá dráha v kilometrech

t	-	double	počet opakování smyčky
t_zastavení	s	double	čas zastavení vlaku v zastávce
tI	min	double (1D pole)	čas v minutách pro zobrazení v grafech
trat	[m, km/h, N/kN, km, -]	double (2D pole)	matice parametrů tratě
uc_elektromotor3000	-	struct	tabulka účinnosti elektromotoru v závislosti na výkonu pro 3000 V meziobvod
uc_elektromotor850	-	struct	tabulka účinnosti elektromotoru v závislosti na výkonu pro 750 V meziobvod
uc_prevodovka	-	struct	tabulka účinnosti převodovky v závislosti na výkonu
uc_stridac3000	-	struct	tabulka účinnosti střídače v závislosti na výkonu pro 3000 V meziobvod
uc_stridac850	-	struct	tabulka účinnosti střídače v závislosti na výkonu pro 750 V meziobvod
uc_trafo	-	struct	tabulka účinnosti transformátoru v závislosti na výkonu
uc_usm	-	struct	tabulka účinnosti usměrňovače v závislosti na výkonu
v_akt	m/s	double (1D pole)	aktuální rychlost vozidla
v_nasl	m/s	double	následující traťová rychlost
v_trat	m/s	double (1D pole)	aktuální traťová rychlost
vykon	W	double (1D pole)	absolutní hodnota výkonu pro určení účinnosti
z	-	double (1D pole)	pro zobrazení zastávek v grafu
zastavka	-	double	pro určení pořadí zastávky

Příloha B – simulační skript „simulace.m“

```
clear all;

% nacteni map ucinnosti
load('ucinnost_elektromotor_varianta_DC850.mat');
load('ucinnost_prevedovka_varianta_EMU_vysocina.mat');
load('ucinnost_stridac_varianta_DC850.mat');
load('ucinnost_trafo_varianta_3.mat');
load('ucinnost_usm_varianta_3.mat');
load('ucinnost_elektromotor_varianta_DC3000.mat');
load('ucinnost_stridac_varianta_DC3000.mat');

%nacteni parametru trate
load('trat.mat');

t = 1;
s_max = 24092; %delka trate
a = zeros(1,t); %skutečné zrychlení vozidla
a_b = -1; %odrychlení pro vypočet brzdné drahy
brzda = false; %podminka brzdění
d = 1; %zapamatování ujeté drahy
dt = 0.01; %krok času
ksi = 1.08; %součinitel rotujících hmot
epsilon = 1; %koeficient využití adhezni tlahy
E_ok=zeros(1,t); %spotřeba vozidla na obvodu kol v kWh
E_trolej750 = zeros(1,t); %skutečná spotřeba vozidla na sberaci v kWh
E_trolej3000 = zeros(1,t); %skutečná spotřeba vozidla na sberaci v kWh
E_aku_meziobvod = zeros(1,t); %skutečná spotřeba vozidla na aku v meziobvodu v kWh
E_aku_menic = zeros(1,t); %skutečná spotřeba vozidla na aku s oddelovacím menicem
v kWh
E_bezrekuperace = zeros(1,t);
E_bezrekuperace750 = zeros(1,t); %spotřeba vozidla bez rekuperace
E_bezrekuperace3000 = zeros(1,t); %spotřeba vozidla bez rekuperace
E_bezrekuperace_menic = zeros(1,t); %spotřeba vozidla bez rekuperace
E_bezrekuperace_meziobvod = zeros(1,t); %spotřeba vozidla bez rekuperace
E_rekuperace = zeros(1,t);
E_rekuperace750 = zeros(1,t); %odrekuperovaná energie
E_rekuperace3000 = zeros(1,t); %odrekuperovaná energie
E_rekuperace_menic = zeros(1,t); %odrekuperovaná energie
E_rekuperace_meziobvod = zeros(1,t); %odrekuperovaná energie
P_pom = 60000; %výkon pomocných pohonů
E_ws_ok=0; %spotřeba vozidla na obvodu kol ve Ws
E_ws_trolej750 = 0; %skutečná spotřeba vozidla na sberaci ve Ws
E_ws_trolej3000 = 0; %skutečná spotřeba vozidla na sberaci ve Ws
E_ws_aku_meziobvod = 0; %skutečná spotřeba vozidla na aku v meziobvodu ve Ws
E_ws_aku_menic = 0; %skutečná spotřeba vozidla na aku s oddelovacím menicem ve Ws
E_ws_bezrekuperace = 0;
E_ws_bezrekuperace750 = 0; %spotřeba vozidla bez rekuperace ve Ws
E_ws_bezrekuperace3000 = 0; %spotřeba vozidla bez rekuperace ve Ws
E_ws_bezrekuperace_menic = 0; %spotřeba vozidla bez rekuperace ve Ws
E_ws_bezrekuperace_meziobvod = 0; %spotřeba vozidla bez rekuperace ve Ws
E_ws_rekuperace = 0;
E_ws_rekuperace750 = 0; %odrekuperovaná energie ve Ws
E_ws_rekuperace3000 = 0; %odrekuperovaná energie ve Ws
E_ws_rekuperace_menic = 0; %odrekuperovaná energie ve Ws
E_ws_rekuperace_meziobvod = 0; %odrekuperovaná energie ve Ws
Fb_max = -100000; %max. brzdná síla EDB
Ft_max = 150000; %max. tázná síla
```

```

Ft_skut = zeros(1,t); %skutečna tážná síla na obvodu kol
g = 9.81; %gravitační zrychlení
jizdni_rad = zeros(13,2); %jíždní rad
M = 103.5; %hmotnost vozidla
M_adh = M/2; %adhezni hmotnost
moment=zeros(1,t); %moment motoru
otacky=zeros(1,t); %otacky motoru
P = zeros(1,t); %vykon
P_max = 1.36*10^6; %max. vykon
Pb_max = -1.2*10^6; %max. vykon brzdy
P_trolej750=zeros(1,t); %odebrany vykon z trolejoveho vedeni
P_trolej3000=zeros(1,t); %odebrany vykon z trolejoveho vedeni
P_aku_meziobvod = zeros(1,t); %odebrany vykon z aku v meziobvodu
P_aku_menic = zeros(1,t); %odebrany vykon z aku s oddeľovacim menicem
pt=1; %pomerny tah
R = 0.4; %polomer kola
rozjezd = true; %podminka pro rozjezd
rs = zeros(1,t); %redukovany sklon trati
s = zeros(1,t); %ujeta draha
s_b = 0; %brzdna draha
t_zastaveni = Inf; %cas zastaveni v zastavce
t1 = zeros(1,t); %cas v minutach pro zobrazeni v grafec
vykon = zeros(1,t); %hodnota vykonu pro urceni ucinnosti
v_akt = zeros(1,t); %aktualni rychlost
v_trat = zeros(1,t); %tratova rychlost
zastavka = 1; %poradi zastavky
P_bezrekuperace = zeros(1,t); %vykon bez rekuperace
P_rekuperace = zeros(1,t); %odrekuperovany vykon
Ri = 0.002; %vnitrni odpor aku
U_aku = 750; %napeti aku
clanku_seriove = 234; %pocet seriove zapojenych clanku aku
clanku_paralelne = 8; %pocet paralelne zapojenych clanku aku
I_aku = zeros(1,t); %proud aku
eta_baterie = zeros(1,t) %ucinnost aku
eta_aku_meziobvod = zeros(1,t); %ucinnost trakcniho obvodu s aku v meziobvodu
eta_aku_menic = zeros(1,t); %ucinnost trakcniho obvodu s aku s oddeľovacim menicem
eta_stridac_aku = 0.97; %ucinnost oddeľovaciho stridace
eta_trafo_aku = 0.97; %ucinnost oddeľovaciho transformatoru
eta_usm_aku = 0.97; %ucinnost oddeľovaciho usmernovace
Fb_mech = zeros(1,t); %brzdna síla mechanicke brzdy
z=zeros(1,t); %zobrazeni zastavek v grafu
stav_aku_meziobvod = zeros(1,t);
stav_aku_menic = zeros(1,t);
%nastaveni polohy zastavek:
trat(38,5) = 1; %Horky u Tabora
trat(53,5) = 1; %Slapy
trat(63,5) = 1; %Libejice
trat(95,5) = 1; %Malsice
trat(107,5) = 1; %Cenkov u Malsic
trat(118,5) = 1; %Trebelice
trat(126,5) = 1; %Vsechlapy
trat(139,5) = 1; %Bechynska Smolec
trat(157,5) = 1; %Sudomerice u Bechyne
trat(180,5) = 1; %Bezerovice
trat(201,5) = 1; %Bechyne zastavka

Ri_celk = Ri*(clanku_seriove/clanku_paralelne); %vypocet celkoveho vnitrniho
odporu aku

```

```

for t = 1:300000

Fb_mech(t)=0;  %nastaveni nulove hodnoty mechanicke brzdy (zaklad je EDB)

if v_akt(t) == 0
    z(t) = 1;  %zobrazeni zastavky v grafu
else
    z(t) = 0;
end

    fi_adh = (7500/(v_akt(t)+44))+161;  %vypocet koeficientu adheze

    moment(t)=Ft_skut(t)*R; %vypocet momentu motoru
    otacky(t)=(v_akt(t)*3.6)*(uc_prevodovka.n(1)/uc_prevodovka.v(1)); %vypocet
otacek motoru
    vykon(t)=abs(P(t)); %absolutni hodnota vykonu pro urceni ucinnosti

    if otacky(t)<uc_prevodovka.n(1) %urceni ucinnosti pro minimalni hodnoty otacek
        otacky(t)=uc_prevodovka.n(1);
    end

    if moment(t)<0
        moment(t)=abs(moment(t));
    end

    if moment(t)>uc_prevodovka.M(11)  %urceni ucinnosti pro vyssi hodnoty
momentu
        moment(t)=uc_prevodovka.M(11);
    end

    if vykon(t)<uc_usm.P(1) %urceni ucinnosti pro nizsi hodnoty vykonu
        vykon(t)=uc_usm.P(1);
    else if vykon(t)>uc_usm.P(11)  %urceni ucinnosti pro vyssi hodnoty vykonu
        vykon(t)=uc_usm.P(11);
    end
end

m = 1; %aktualni poloha v poli

while s(t) >= trat(m,1) %hledani polohy vozidla
    if m < 210
        m = m+1;
    else
        break; %ukonceni smycky po dojeti do cile
    end
end

v_trat(t) = trat(m-1,2)/3.6;  %aktualni tratova rychlost
rs(t) = trat(m-1,3);  %aktualni redukovany sklon
n = m;
k = m;

while trat(m-1,2) == trat(n,2) && trat(n,5) == 0 %urceni polohy nasledujiciho
omezeni
    n = n+1;
end

while trat(k,5) == 0
    if k < 210

```

```

        k = k+1;
    else
        break; %ukonceni smycky po dojeti do cile
    end
end

v_nasl = trat(n,2)/3.6; %nasledujici tratova rychlost

if trat(n,5) == 1 %zastavka
    v_nasl = 0;
end

s_nasl = trat(n,1); %poloha nasledujiciho omezeni
s_zast = trat(k,1);

if s(t) >= s_max %ukonceni programu po dojeti do cile
    break;
end

%vypocet brzdné drahy
if v_nasl < v_trat(t) && brzda == false
    s_b = (((v_akt(t)-v_nasl)^2)/(2*abs(a_b))) + ((v_nasl*(v_akt(t)-
v_nasl))/abs(a_b));
end
s_b_z = ((v_akt(t))^2)/(2*abs(a_b));
F_adh = M_adh * g * fi_adh * epsilon; %vypocet maximalni tazne sily omezene
adhezi

if F_adh < Ft_max
    Ft_max = F_adh;
end

Fo = (M*g*((1+0.00038*((v_akt(t)*3.6)^2))+rs(t))); %vypocet jizdneho odporu
a_vybeh = (-Fo)/(M*1000*ksi); %vypocet zrychleni pri jizde vybehem
a_z = (v_nasl^2)/(2*(s_nasl - s_zast));
if s(t) >= s_zast - (1.75*s_b_z) && a_z < a_b
    s_b = s_b_z;
    v_nasl = 0;
    s_nasl = s_zast;
end

if s(t) >= s_nasl - (1.75*s_b) && v_nasl < v_akt(t)
    brzda = true; %podminka brzdeni
    rozjezd = false;
else
    brzda = false;
    if v_akt(t) < v_trat(t) && v_akt(t) ~= 0 %zrychlovani po ukonceni
brzdeni
        rozjezd = true;
    end
end

if t == t_zastaveni + 3000 %30 s pobyt v zastavce
    jizdni_rad(zastavka,2) = t/6000; %cas odjezdu v minutach
    rozjezd = true;
end

%rozjezd
if brzda == false && rozjezd == true

```

```

%omezovani pomerneho tahu pri jizde z kopce
if a_vybeh <= 0
    pt = 1;
else
    if a_vybeh <= 0.25
        pt = 0.75;
    else
        if a_vybeh <= 0.5
            pt = 0.5;
        else
            if a_vybeh <= 1
                pt = 0.25;
            else
                pt = 0;
            end
        end
    end
end

if v_akt(t) ~= 0
    Ft = P_max/v_akt(t); %vypocet tazne sily dane trakcni charakteristikou
else
    Ft = Ft_max;
end

if Ft > Ft_max %omezeni max. taznou silou
    Ft = Ft_max;
end
Ft_skut (t) = pt*Ft; %vypocet skutečne vyvinute tazne sily
Ft_skut (t+1) = pt*Ft;

a(t) = (Ft_skut(t) - Fo)/(M*1000*ksi); %vypocet zrychleni
a(t+1) = (Ft_skut(t) - Fo)/(M*1000*ksi); %vypocet zrychleni

v_akt (t+1) = v_akt(t) + a(t)*dt; %vypocet rychlosti v dalsim cyklu
s(t+1) = (v_akt(t+1)*dt) + s(t); %vypocet ujete drahy v dalsim cyklu

if v_akt (t+1) >= v_trat(t) %ukonceni zrychlovani po dosazeni tratove
rychlosti
    d = s(t+1);
    rozjezd = false;
end
end

%jizda konstantni rychlosti
if s(t) == d && rozjezd == false
    Ft_skut(t) = Fo;
    Ft_skut(t+1)=Fo;

    Ft=P_max/v_akt(t); %vypocet tazne sily dane trakcni charakteristikou

    if Ft_skut(t)>Ft
        Ft_skut(t)=Ft;
    end

    a(t) = (Ft_skut(t) - Fo)/(M*1000*ksi); %vypocet zrychleni

    if v_akt(t) == 0 %pri stani vozidlo nevyviji zadnou taznou silu
        Ft_skut(t) = 0;
    end
end

```

```

    Ft_skut(t+1)=0;
    a(t)=0; %pri stani by vzniklo zaporne zrychleni
end

v_akt (t+1) = v_akt(t) + a(t)*dt; %vypocet rychlosti v dalsim cyklu
s(t+1) = (v_akt(t+1)*dt) + s(t); %vypocet ujete drahy v dalsim cyklu
d = s(t+1); %zapamatovani ujete drahy
end

%brzdeni
if brzda == true && rozjezd == false

    a_potreb = ((v_akt(t)^2)-(v_nasl^2))/(2*(s(t) - s_nasl)); %vypocet
potrebneho odrychleni

    if s(t) < s_nasl - s_b && a_vybeh <= 0 %jizda vybehem pred dosazenim
pozadovane brzde drahy
        a(t) = a_vybeh;
        Ft_skut(t) = 0;
        Ft_skut(t+1) = 0;
    else
        a(t) = a_potreb;
        Fb_potrebna = Fo + (a(t)*M*1000*ksi); %potrebna brzdná síla pro
včasne zastaveni (snizeni rychlosti na poz. hodnotu)
        Fb = Pb_max/v_akt(t); %vypocet brzde síly dane brzdnou charakteristikou

        if Fb < Fb_max %omezeni max. brzdnou silou
            Fb = Fb_max;
        end

        Ft_skut(t) = Fb_potrebna;
        Ft_skut(t+1) = Fb_potrebna;

        if Fb_potrebna < Fb %brzdeni mechanickou brzdou pri prekroceni brzde
charakteristiky EDB
            Fb_mech(t) = Fb_potrebna - Fb;
            Ft_skut(t) = Fb;
            Ft_skut(t+1) = Fb;
        else
            Fb_mech(t) = 0;
        end
    end

v_akt (t+1) = v_akt(t) + a(t)*dt; %vypocet rychlosti v dalsim cyklu
s(t+1) = (((v_akt(t)-v_akt(t+1))*dt)/2) + (v_akt(t+1)*dt) + s(t);
%vypocet ujete drahy v dalsim cyklu

if v_akt (t+1) <= v_trat %ukonceni brzdeni pri dosazeni poz. rychlosti
    d = s(t+1);
end

if v_akt (t+1) <= 0
    v_akt (t+1) = 0;
    t_zastaveni = t+1; %urceni casu zastaveni
    brzda = false;
    Ft_skut(t+1) = 0;
    trat(n,5) = 0; %podminka pro rozjezd
    zastavka = zastavka + 1; %urceni poradí zastavky
    jizdni_rad(zastavka,1) = (t+1)/6000; %cas zastaveni v minutach
end

```



```

end

end

P(t) = Ft_skut(t)*v_akt(t); %vypocet aktualniho vykonu
P(t+1) = Ft_skut(t)*v_akt(t); %vypocet aktualniho vykonu
E_Ws_ok = E_Ws_ok + (P(t)*dt); %vypocet energie na obvodu kol
E_ok(t) = E_Ws_ok/(3.6*(10^6));
E_ok(t+1) = E_Ws_ok/(3.6*(10^6));

%vypocet vykonu bez rekuperace
P_bezrekuperace (t) = Ft_skut(t)*v_akt(t);
P_bezrekuperace (t+1) = Ft_skut(t)*v_akt(t);
if Ft_skut(t) < 0
    P_bezrekuperace (t) = 0;
    P_bezrekuperace (t+1) = 0;
    P_rekuperace (t) = Ft_skut(t)*v_akt(t); %vypocet odrekuperovaneho vykonu
end
P_rekuperace (t+1) = 0;

E_Ws_bezrekuperace = E_Ws_bezrekuperace + (P_bezrekuperace(t)*dt);
E_Ws_rekuperace = E_Ws_rekuperace + (P_rekuperace(t)*dt);

E_bezrekuperace(t+1) = E_Ws_bezrekuperace/(3.6*(10^6));
E_rekuperace(t+1) = E_Ws_rekuperace/(3.6*(10^6));

I_aku(t+1) = abs(P(t+1))/U_aku; %urceni proudu aku

if P(t) ~= 0
    eta_baterie(t+1)=(abs(P(t+1))-Ri_celk*I_aku(t+1)^2)/abs(P(t+1)); %urceni
ucinnosti aku
else
    eta_baterie(t+1) = 0;
end

s1 = s/1000; %ujeta draha v km
t1(t+1) = (t+1)/6000; %cas v minutach
end

%urceni ucinnosti jednotlivych komponent trakcniho obvodu
eta_prevodovka=interp2(uc_prevodovka.n,uc_prevodovka.M,uc_prevodovka.uc',otacky,abs(moment));
eta_motor_750=interp2(uc_elektromotor850.n,uc_elektromotor850.M,uc_elektromotor850.uc',otacky,abs(moment));
eta_stridac_750=interp2(uc_stridac850.n,uc_stridac850.M,uc_stridac850.uc',otacky,abs(moment));
eta_motor_3000=interp2(uc_elektromotor3000.n,uc_elektromotor3000.M,uc_elektromotor3000.uc',otacky,abs(moment));
eta_stridac_3000=interp2(uc_stridac3000.n,uc_stridac3000.M,uc_stridac3000.uc',otacky,abs(moment));
eta_trafo=interp1(uc_trafo.P,uc_trafo.uc',abs(P));
eta_usm=interp1(uc_usm.P,uc_usm.uc',abs(vykon));

%ucinnost pri napajeni z TV
eta_trolej750 =
eta_motor_750.*eta_prevodovka.*eta_stridac_750.*eta_trafo.*eta_usm;
eta_trolej3000 =
eta_motor_3000.*eta_prevodovka.*eta_stridac_3000.*eta_trafo.*eta_usm;
eta_aku_meziobvod = eta_motor_750.*eta_prevodovka.*eta_stridac_750.*eta_baterie;

```

```

eta_aku_menic =
eta_motor_3000.*eta_prevodovka.*eta_stridac_3000.*eta_baterie.*eta_stridac_aku.*et
a_trafo_aku.*eta_usm_aku;

```

```

%vypocty vykonu jednotlivych variant

```

```

for i = 1:t

```

```

    if eta_trolej750(i) ~= 0
        if P(i) >= 0
            P_trolej750(i)=P(i)/eta_trolej750(i);
        else
            P_trolej750(i)=P(i)*eta_trolej750(i);
        end
    else
        P_trolej750(i)=0;
    end

```

```

    if eta_trolej3000(i) ~= 0
        if P(i) >= 0
            P_trolej3000(i)=P(i)/eta_trolej3000(i);
        else
            P_trolej3000(i)=P(i)*eta_trolej3000(i);
        end
    else
        P_trolej3000(i)=0;
    end

```

```

    if eta_aku_meziobvod(i) ~= 0
        if P(i) >= 0
            P_aku_meziobvod(i) = P(i)/eta_aku_meziobvod(i);
        else
            P_aku_meziobvod(i) = P(i)*eta_aku_meziobvod(i);
        end
    else
        P_aku_meziobvod(i) = 0;
    end

```

```

    if eta_aku_menic(i) ~= 0
        if P(i) >= 0
            P_aku_menic(i) = P(i)/eta_aku_menic(i);
        else
            P_aku_menic(i) = P(i)*eta_aku_menic(i);
        end
    else
        P_aku_menic(i) = 0;
    end

```

```

%vypocet spotreby jednotlivych variant

```

```

E_ws_trolej750 = E_ws_trolej750 + ((P_trolej750(i)+P_pom)*dt);
E_ws_trolej3000 = E_ws_trolej3000 + ((P_trolej3000(i)+P_pom)*dt);
E_ws_aku_meziobvod = E_ws_aku_meziobvod + ((P_aku_meziobvod(i)+P_pom)*dt);
E_ws_aku_menic = E_ws_aku_menic + ((P_aku_menic(i)+P_pom)*dt);

```

```

    if eta_trolej750(i) ~= 0
        E_ws_bezrekuperace750 = E_ws_bezrekuperace750 +
(((P_bezrekuperace(i)/eta_trolej750(i))+P_pom)*dt);
        E_ws_rekuperace750 = E_ws_rekuperace750 +
(((P_rekuperace(i)*eta_trolej750(i)))*dt);
    else

```

```

    E_Ws_bezrekuperace750 = E_Ws_bezrekuperace750 + (P_pom*dt);
end

if eta_trolej3000(i) ~= 0
    E_Ws_bezrekuperace3000 = E_Ws_bezrekuperace3000 +
(((P_bezrekuperace(i)/eta_trolej3000(i))+P_pom)*dt);
    E_Ws_rekuperace3000 = E_Ws_rekuperace3000 +
(((P_rekuperace(i)*eta_trolej3000(i)))*dt);
else
    E_Ws_bezrekuperace3000 = E_Ws_bezrekuperace3000 + (P_pom*dt);
end

if eta_aku_meziobvod(i) ~= 0
    E_Ws_bezrekuperace_meziobvod = E_Ws_bezrekuperace_meziobvod +
(((P_bezrekuperace(i)/eta_aku_meziobvod(i))+P_pom)*dt);
    E_Ws_rekuperace_meziobvod = E_Ws_rekuperace_meziobvod +
(((P_rekuperace(i)*eta_aku_meziobvod(i)))*dt);
else
    E_Ws_bezrekuperace_meziobvod = E_Ws_bezrekuperace_meziobvod + (P_pom*dt);
end

if eta_aku_menic(i) ~= 0
    E_Ws_bezrekuperace_menic = E_Ws_bezrekuperace_menic +
(((P_bezrekuperace(i)/eta_aku_menic(i))+P_pom)*dt);
    E_Ws_rekuperace_menic = E_Ws_rekuperace_menic +
(((P_rekuperace(i)*eta_aku_menic(i)))*dt);
else
    E_Ws_bezrekuperace_menic = E_Ws_bezrekuperace_menic + (P_pom*dt);
end

E_trolej750(i) = E_Ws_trolej750/(3.6*(10^6));
E_trolej3000(i) = E_Ws_trolej3000/(3.6*(10^6));
% E_aku_meziobvod(i) = E_Ws_aku_meziobvod/(3.6*(10^6));
% E_aku_menic(i) = E_Ws_aku_menic/(3.6*(10^6));

E_bezrekuperace750(i) = E_Ws_bezrekuperace750/(3.6*(10^6));
E_rekuperace750(i) = E_Ws_rekuperace750/(3.6*(10^6));

E_bezrekuperace3000(i) = E_Ws_bezrekuperace3000/(3.6*(10^6));
E_rekuperace3000(i) = E_Ws_rekuperace3000/(3.6*(10^6));

E_bezrekuperace_meziobvod(i) = E_Ws_bezrekuperace_meziobvod/(3.6*(10^6));
E_rekuperace_meziobvod(i) = E_Ws_rekuperace_meziobvod/(3.6*(10^6));

E_bezrekuperace_menic(i) = E_Ws_bezrekuperace_menic/(3.6*(10^6));
E_rekuperace_menic(i) = E_Ws_rekuperace_menic/(3.6*(10^6));

end

% grafy

set(0,'DefaultLineWidth',1.5) % tloušťka čar v grafu, v pixelech
set(0,'DefaultAxesFontSize',10) % velikost textu v popiscích grafu
set(0,'DefaultAxesFontWeight','normal') % normální font
set(0,'DefaultTextFontSize',10) % velikost textu v grafu

```

```

%prubehy na obvodu kol
figure;
subplot(4,1,1);
plot(s1,v_akt*3.6,s1,v_trat*3.6);
xlim ([0 s_max/1000]);
ylim ([0 70]);
title('Průběh rychlosti v závislosti na poloze na trati');
xlabel('s[km]');
ylabel('v[km/h]');
legend('skutečná', 'traťová');
grid on;

subplot(4,1,2);
[graf1,H1,H2] = plotyy(s1,rs,s1,z);
set(get(graf1(1), 'Ylabel'), 'String', 'redukovaný sklon [%]');
set(graf1(1), 'XLim', [0 s_max/1000]);
set(graf1(2), 'XLim', [0 s_max/1000]);
title('Redukovaný sklon trati');
xlabel('s[km]');
% gtext('Tábor');
% gtext('Horky u Tábora');
% gtext('Slapy');
% gtext('Libějice');
% gtext('Malšice');
% gtext('Čenkov u Malšic');
% gtext('Třebelice');
% gtext('Všechlapy');
% gtext('Bechyňská Smoleč');
% gtext('Sudoměřice u Bechyně');
% gtext('Bežerovice');
% gtext('Bechyně zastávka');
% gtext('Bechyně');
grid on;

subplot(4,1,3);
[graf2,H1,H2]=plotyy(s1,P/1000,s1,E_ok, 'plot');
set(get(graf2(1), 'Ylabel'), 'String', 'P[kW]');
set(get(graf2(2), 'Ylabel'), 'String', 'E[kWh]');
set(graf2(1), 'XLim', [0 s_max/1000]);
set(graf2(2), 'XLim', [0 s_max/1000]);
xlabel('s[km]');
title('Průběh výkonu a energie na obvodu kol v závislosti na poloze na trati');
legend('výkon na obvodu kol', 'energie na obvodu kol');
grid on;

subplot(4,1,4);
[graf3,H1,H2]=plotyy(s1,Ft_skut/1000,s1,Fb_mech/1000, 'plot');
set(get(graf3(1), 'Ylabel'), 'String', 'Ft[kN]');
set(get(graf3(2), 'Ylabel'), 'String', 'Fb_mech[kN]');
set(graf3(1), 'XLim', [0 s_max/1000]);
set(graf3(2), 'XLim', [0 s_max/1000]);
set(graf3(1), 'YLim', [-200 200]);
set(graf3(2), 'YLim', [-50 50]);
title('Průběh tažné(brzdné) síly na obvodu kol');
xlabel('s[km]');
grid on;

%porovnani spotreby
load('Emeric.mat');

```

```

load('Emeziobvod.mat');
load('s_aku.mat');
figure;
plot(s1,E_ok,s1,E_trolej750,s1,E_trolej3000,s_aku,E_aku_meziobvod,s_aku,E_aku_meni
c);
xlim([0 s_max/1000]);
title('Průběh celkové spotřebované energie');
xlabel('s[km]');
ylabel('E[kWh]');
legend('energie na obvodu kol','energie na sběrači při 750 V meziobvodu','energie
na sběrači při 3000 V meziobvodu','energie na aku v meziobvodu','energie na aku
přes měnič');
grid on;

%rychlost a sklon
figure;
subplot(3,1,1);
plot(s1,v_trat*3.6);
xlim ([0 s_max/1000]);
ylim ([0 70]);
title('Průběh traťové rychlosti');
xlabel('s[km]');
ylabel('v[km/h]');
grid on;

subplot(3,1,2);
[graf1,H1,H2] = plotyy(s1,rs,s1,z);
set(get(graf1(1),'Ylabel'),'String','redukovaný sklon [%]');
set(graf1(1),'XLim',[0 s_max/1000]);
set(graf1(2),'XLim',[0 s_max/1000]);
title('Redukovaný sklon trati');
xlabel('s[km]');
% gtext('Tábor');
% gtext('Horky u Tábora');
% gtext('Slapy');
% gtext('Libějice');
% gtext('Malšice');
% gtext('Čenkov u Malšic');
% gtext('Třebelice');
% gtext('Všechlapy');
% gtext('Bechyňská Smoleč');
% gtext('Sudoměřice u Bechyně');
% gtext('Bežerovice');
% gtext('Bechyně zastávka');
% gtext('Bechyně');
grid on;

%energie na obvodu kol
figure;
subplot(4,1,1);
[graf1,H1,H2] = plotyy(s1,rs,s1,z);
set(get(graf1(1),'Ylabel'),'String','redukovaný sklon [%]');
set(graf1(1),'XLim',[0 s_max/1000]);
set(graf1(2),'XLim',[0 s_max/1000]);
title('Redukovaný sklon trati');
xlabel('s[km]');
grid on;

subplot(4,1,2);

```

```

plot(s1,P/1000);
xlim([0 s_max/1000]);
title('Průběh výkonu v závislosti na poloze na trati');
xlabel('s[km]');
ylabel('P[kW]');
legend('výkon na sběrači');
grid on;

subplot(4,1,3);
[graf2,H1,H2]=plotyy(s1,Ft_skut/1000,s1,Fb_mech/1000,'plot');
set(get(graf2(1),'Ylabel'),'String','Ft[kN]');
set(get(graf2(2),'Ylabel'),'String','Fb_mech[kN]');
set(graf2(1),'XLim',[0 s_max/1000]);
set(graf2(2),'XLim',[0 s_max/1000]);
title('Průběh tažné(brzdné) síly na obvodu kol');
xlabel('s[km]');
grid on;

subplot(4,1,4);
plot(s1,E_ok,s1,E_bezrekuperace,s1,E_rekuperace);
xlim([0 s_max/1000]);
title('Průběh celkové spotřebované energie');
xlabel('s[km]');
ylabel('E[kWh]');
legend('energie na obvodu kol','energie bez rekuperace','odrekuperovaná energie');
grid on;

%energie na sberaci 3 kV meziobvod
figure;
subplot(4,1,1);
[graf1,H1,H2] = plotyy(s1,rs,s1,z);
set(get(graf1(1),'Ylabel'),'String','redukovaný sklon [%]');
set(graf1(1),'XLim',[0 s_max/1000]);
set(graf1(2),'XLim',[0 s_max/1000]);
title('Redukovaný sklon trati');
xlabel('s[km]');
grid on;

subplot(4,1,2);
plot(s1,P_trolej3000/1000);
xlim([0 s_max/1000]);
title('Průběh výkonu v závislosti na poloze na trati');
xlabel('s[km]');
ylabel('P[kW]');
legend('výkon na sběrači');
grid on;

subplot(4,1,3);
[graf2,H1,H2]=plotyy(s1,Ft_skut/1000,s1,Fb_mech/1000,'plot');
set(get(graf2(1),'Ylabel'),'String','Ft[kN]');
set(get(graf2(2),'Ylabel'),'String','Fb_mech[kN]');
set(graf2(1),'XLim',[0 s_max/1000]);
set(graf2(2),'XLim',[0 s_max/1000]);
title('Průběh tažné(brzdné) síly na obvodu kol');
xlabel('s[km]');
grid on;

```

```

subplot(4,1,4);
plot(s1,E_trolej3000,s1,E_bezrekuperace3000,s1,E_rekuperace3000);
xlim([0 s_max/1000]);
title('Průběh celkově spotřebované energie');
xlabel('s[km]');
ylabel('E[kWh]');
legend('energie na sběrači','energie bez rekuperace','odrekuperovaná energie');
grid on;

%energie na sberaci 750 V meziobvod
figure;
subplot(4,1,1);
[graf1,H1,H2] = plotyy(s1,rs,s1,z);
set(get(graf1(1),'Ylabel'),'String','redukovaný sklon [%]');
set(graf1(1),'XLim',[0 s_max/1000]);
set(graf1(2),'XLim',[0 s_max/1000]);
title('Redukovaný sklon trati');
xlabel('s[km]');
grid on;

subplot(4,1,2);
plot(s1,P_trolej750/1000);
xlim([0 s_max/1000]);
title('Průběh výkonu v závislosti na poloze na trati');
xlabel('s[km]');
ylabel('P[kW]');
legend('výkon na sběrači');
grid on;

subplot(4,1,3);
[graf2,H1,H2]=plotyy(s1,Ft_skut/1000,s1,Fb_mech/1000,'plot');
set(get(graf2(1),'Ylabel'),'String','Ft[kN]');
set(get(graf2(2),'Ylabel'),'String','Fb_mech[kN]');
set(graf2(1),'XLim',[0 s_max/1000]);
set(graf2(2),'XLim',[0 s_max/1000]);
title('Průběh tažné(brzdné) síly na obvodu kol');
xlabel('s[km]');
grid on;

subplot(4,1,4);
plot(s1,E_trolej750,s1,E_bezrekuperace750,s1,E_rekuperace750);
xlim([0 s_max/1000]);
title('Průběh celkově spotřebované energie');
xlabel('s[km]');
ylabel('E[kWh]');
legend('energie na sběrači','energie bez rekuperace','odrekuperovaná energie');
grid on;

```