

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Návrh a hodnocení kolejových vozidel s hybridními pohony

Ing. Tomáš Lelek

Disertační práce

2017

Studijní program:

P3710 Technika a technologie v dopravě a spojích

Studijní obor:

3706V005 Dopravní prostředky a infrastruktura

Školitel: prof. Ing. Jaroslav Novák, CSc.

Disertační práce vznikla na školícím pracovišti:

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 12. 1. 2017

Ing. Tomáš Lelek

Rád bych poděkoval školiteli prof. Ing. Jaroslavu Novákovi, CSc. za jeho velice přínosné rady a připomínky k práci a za jeho neskonalou ochotu během zpracování práce.

ANOTACE

Tato práce se zabývá problematikou návrhu a hodnocení hybridních kolejových vozidel v souvislosti s možností jejich budoucího nasazení na železniční síti ČR. Podrobněji se práce věnuje detailní rešerši současného využití hybridních pohonů kolejových vozidel a problematik s tím souvisejících, strukturami hybridních vozidel, analýzou využitelnosti hybridních kolejových vozidel, optimalizací pohonného řetězce, optimalizací algoritmizace řízení pohonu. Pro ověření navržených algoritmů je v poslední části práce popsán a vyhodnocen průběh experimentálního výzkumu v oblasti řízení hybridních kolejových vozidel.

KLÍČOVÁ SLOVA

hybridní kolejové vozidlo, regulátor, optimalizace, pohonný řetězec, transformátor

DESIGN AND CLASSIFICATION OF HYBRID RAILWAY VEHICLES

ANNOTATION

This thesis deals with proposal and classification of hybrid railway vehicles in relation with future possibility of their deployment in Czech Republic. In the complex is thesis focused to problematic of: the detail bibliographic research of hybrid drives current utilization and other relevant problematics, hybrid vehicles structures, analyses of possible utilization of hybrid vehicles, electric drives components optimizations and electric drives top level control software optimization. In the last section is described and analyzed progress in experimental research. It was done for vehicle control loop design verification.

KEYWORDS

The hybrid railway vehicle, the controller, the optimization, the drive chain, the transformer

OBSAH

ÚVOD	12
1 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	15
2 ZHODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU V UPLATŇOVÁNÍ HYBRIDNÍCH VOZIDEL V KOLEJOVÉ DOPRAVĚ A TECHNOLOGIE AUTOMATICKÉHO VEDENÍ VLAKU.....	16
2.1 Hybridní kolejová vozidla současnosti	16
2.2 Hybridní jednotka Class 379 25 kV EMU	16
2.2.1 Hybridní jednotka EV-E301	18
2.2.2 Hybridní jednotka 817-1000	19
2.2.3 Hybridní lokomotiva Class 1063.....	20
2.2.4 Hybridní lokomotiva MT-S-600-BE	21
2.2.5 Hybridní tramvaj 28T2.....	22
2.2.6 Hybridní trolejbus 26 Tr Solaris	22
2.3 Automatické vedení vlaku v podmínkách ČR.....	22
2.4 Rešerše využití hybridních pohonů v kolejové dopravě	24
2.4.1 Nerelevantní přístupy pro řešení problematiky hybridních kolejových vozidel typu sběrač-akumulátor	24
2.4.2 Příklady uspořádání pohonného řetězce u již existujících hybridních jednotek	26
2.4.3 Příklady návrhů algoritmů pro optimalizaci spotřeby trakční energie	28
3 METODY ZPRACOVÁNÍ A ZPŮSOB ŘEŠENÍ.....	30
3.1 Návrh pohonného řetězce hybridního kolejového vozidla typu sběrač-akumulátor	30
3.1.1 Popis běžné dvousystémové jednotky třetí generace	30
3.1.2 Hybridní kolejové vozidlo s 3kilovoltovým stejnosměrným meziobvodem.....	32
3.1.3 Vozidlo se 750voltovým stejnosměrným meziobvodem	33
3.2 Analýza využitelnosti hybridních kolejových vozidel	37
3.2.1 Výzkum vytipované koncepce hybridního kolejového vozidla na úrovni simulačního modelu	37
3.2.2 Popis vybraných tratí a vozidla pro simulace.....	43
3.2.3 Energetická analýza jízdy hybridního vozidla a dieselového vozidla po jednotlivých tratích na základě simulačních výstupů.....	44
3.2.4 Ekonomická analýza hybridního a dieselového vozidla	48
3.3 Optimalizace komponent pohonného řetězce hybridního vozidla	54
3.3.1 Optimalizace trakčního transformátoru.....	54

3.3.2	Optimální využívání počtu trakčních motorů během jízdy vozidla	55
3.3.3	Optimální akumulátorový systém	57
3.4	Návrh metod pro energetickou optimalizaci jízdy vlaku	59
3.4.1	Charakteristika experimentálního vozidla.....	59
3.4.2	Optimalizace jízdní trajektorie akumulátorového kolejového vozidla.....	61
3.4.3	PSD regulátor rychlosti	77
3.4.4	PSD regulátor s dopřednou větví	78
3.5	Návrh a implementace systému pro experimentální hodnocení hybridního pohonu	79
3.5.1	Popis funkce nadřazeného řídicího systému vozidla.....	79
3.5.2	Popis Měřicího a řídicího systému automatického vedení vlaku	81
3.6	Vyhodnocení experimentálních měření	85
4	DOSAŽENÉ VÝSLEDKY ŘEŠENÍ	88
5	PŘÍNOS PRO ROZVOJ VĚDNÍ DISCIPLÍNY A PRAXI	89
6	ZÁVĚR	90
7	POUŽITÁ LITERATURA.....	92
8	PUBLIKAČNÍ ČINNOST DOKTORANDA	96
8.1	Příspěvky na českých konferencích	96
8.2	Příspěvky na mezinárodních konferencích	97
8.3	Příspěvky v recenzovaných periodikách	97
8.4	Výzkumné zprávy	98
9	PŘÍLOHY	99
9.1	Optimalizace transformátoru.....	99
9.1.1	Trať Plzeň – Planá u Mariánských lázní - Tachov	99
9.1.2	Trať Plzeň – Pňovany – Bezručice.....	102
9.1.3	Trať Brno – Střelice – Ivančice (budoucí traťové rychlosti).....	105
9.2	Optimalizace využití počtu trakčních motorů	108
9.2.1	Trať Plzeň – Planá u Mariánských lázní - Tachov	108
9.2.2	Trať Plzeň – Pňovany - Bezručice	111
9.2.3	Trať Brno – Střelice - Ivančice	114

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Základní parametry hybridní jednotky Class 379 [10, s. 3].....	18
Tabulka 2 – Základní parametry hybridní jednotky EV-E301 [5, s. 5].....	19
Tabulka 3 – Základní parametry hybridní jednotky 817-1000.....	19
Tabulka 4 - Porovnání spotřeb energií mezi hybridním vozidlem a vozidlem s diesellovým motorem.....	47
Tabulka 5 – Servisní intervaly preventivních prohlídek	50
Tabulka 6 - Porovnání nákladů mezi hybridním vozidlem a vozidlem s diesellovým motorem	52
Tabulka 7 – Vliv sníženého výkonu transformátoru na jízdní dobu či dobíjení, dle dané preference (tabulka platí pro transformátor s maximálním výkonem 2 200 kW)	55
Tabulka 8 – Úspory energie pro jednotlivé tratě při uvažování odpojování poloviny trakčních motorů.....	56
Tabulka 9 – Základní parametry experimentálního vozidla.....	60
Tabulka 10 – Hlavní parametry pohonu experimentálního vozidla	61
Tabulka 11 – Ztrátové výkony akumulátorové baterie.....	70
Tabulka 12 - Porovnání spotřeb při jízdě z Mladějova do Nové Vsi	87

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 – Hybridní jednotka 379 na testovací trati vedoucí ze stanice Harwich International do stanice Manningtree [8].....	17
Obrázek 2 - Sestava baterie ve výrobě a umístění baterie na vozidle [10, s. 3].....	17
Obrázek 3 – Testovací trať pro hybridní jednotku EV-E301 ve středozápadním Japonsku ...	18
Obrázek 4 – Testovací tratě pro jednotku 817-1000 v jihovýchodním Japonsku	20
Obrázek 5 – Lokomotiva MT-S-600-BE na veletrhu InnoTrans 2016 v Berlíně [14].....	21
Obrázek 6 - Uspořádání pohonu hybridního kolejového vozidla EV-E301[11].....	27
Obrázek 7 - Uspořádání pohonu hybridního kolejového vozidla 817-1000 [12].....	28
Obrázek 8 - Blokové schéma běžné dvousystémové lokomotivy třetí generace	31
Obrázek 9 - Vozidlo s 3 kV stejnosměrným meziobvodem; baterie připojena pomocí oddělovacího transformátoru	33
Obrázek 10 - Vozidlo se 750 V stejnosměrným meziobvodem; baterie je připojena přímo do stejnosměrného meziobvodu; stejnosměrný systém je připojen nepřímým stejnosměrným měničem.....	34
Obrázek 11 - Vozidlo se 750 V stejnosměrným meziobvodem; baterie je přímo připojena do meziobvodu; stejnosměrný systém je připojen pomocí střídače	35
Obrázek 12 - Struktura simulačního modelu kolejového vozidla	38
Obrázek 13 - Jízdní řád pro hybridní vozidlo pro směr Brno - Hrušovany nad Jevišovkou...45	
Obrázek 14 - Průběh aktuální a traťové rychlosti; redukovaného sklonu trati; polohy zastávek; výkonu, tažné síly a energie na obvodu kol; výkonu ve stejnosměrném meziobvodu; spotřeby nafty u srovnatelného vozidla s dieselelektrickým přenosem výkonu; energie v akumulátoru vozidla a energie na sběrači vozidla v závislosti na poloze na trati mezi Brnem hl.n. a Hrušovany nad Jevišovkou	46
Obrázek 15 - Porovnání jednotlivých typů drážních vozidel dle ceny vztažené na ujetý kilometr.....	53
Obrázek 16 - Experimentální vozidlo na experimentální trati	59
Obrázek 17 - Funkční schéma experimentálního vozidla	60
Obrázek 18 – Dynamický rychlostní profil vozidla; P – interval s výrazným uplatněním ryvu, A – zrychlování, K – jízda konstantní rychlostí, V – výběh, B – brzdění	62
Obrázek 19 - Průběh relativní chyby určení ztrátového výkonu akumulátorové baterie	70
Obrázek 20 - Závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 16 km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu	72
Obrázek 21 - Závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 8km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu	73

Obrázek 22 - Závislost energie na rozjezd vozidla z 8 na 16km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu	73
Obrázek 23 - Závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 16km/h na tažné síle na přímé trati na sklonu 12%	74
Obrázek 24 - Závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 16km/h na tažné síle na přímé trati na sklonu 24%	74
Obrázek 25 - Srovnání vypočtených (modře) a naměřených (červeně) hodnot energie při rozjezdu experimentálního vozidla na stoupání 3 %	76
Obrázek 26 - Srovnání vypočtených (modře) a naměřených (červeně) hodnot energie při rozjezdu experimentálního vozidla na stoupání 24%	76
Obrázek 27 - Blokové schéma PID regulátoru rychlosti	78
Obrázek 28 - Blokové schéma regulátoru s dopřednou větví	78
Obrázek 29 - Blokové schéma architektury nadřazeného řídicího počítače CompactRIO	80
Obrázek 30 – Obrazovka uživatelského počítače určená pro logování dat	81
Obrázek 31 - Blokové schéma měřícího a řídicího systému vozidla	83
Obrázek 32 - Podprogram Permission to ride.vi	84
Obrázek 33 – Experimentální trať v Mladějově na Moravě	85
Obrázek 34 - Ukázkový průběh naměřené energie a rychlostního profilu při jízdě z Mladějova do Nové Vsi	86

SEZNAM ZKRATEK

AVV	Automatické vedení vlaku
ATO	Automatic train operation (AVV anglicky)
DC-DC	Konverze stejnosměrné veličiny na stejnosměrnou veličinu
HV	High Voltage (vysoké napětí)
AC	Alternate Current (střídavý elektrický proud)
DC	Direct current (stejnosměrný elektrický proud)
DSP	Digital Signal Processor (Digitálně signálový procesor)
FPGA	Field Programmable Gate Array (Programovatelná hradlová pole)
HIL	Hardware In the Loop (Hardware ve smyčce)
LAN	Local Area Network (Lokální počítačová síť)
GPS	Global Positioning System (Globální navigační systém)
GNSS	Global Navigation Satellite System (Globální navigační satelitní systém)
GLONASS	Globální ruský navigační systém
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Motor (Synchronní motor s permanentními magnety)
PSD	Proporcionálně-sumačně-derivační regulátor
TDMS	Datový formát firmy National Instruments
LIFEPO	Lithium-železo-fosfátová

ÚVOD

Fosilní paliva se začala tvořit před miliony let. Již první lidé měli potřebu pohybu, přemýšleli nad tím, jak si usnadnit svou přepravu napříč svým teritoriem. Během existence lidstva došlo k řadě významných objevů, které lidem pomohly lépe se pohybovat. Prvním významným vynálezem v oblasti dopravy byl vynález kola, na nějž bezprostředně navázalo využívání práce zvířat vhodných pro tah břemene. Zvířecí pohon lidstvu vydržel přes neuvěřitelných 6 000 let, vlastně až do průmyslové revoluce, tedy do 18. století našeho letopočtu. Až po nástupu parního stroje (1765) se začíná masivně využívat fosilních paliv pro pohon výrobních a dopravních strojů. Spotřebu fosilních paliv dále umocnil vynález spalovacího motoru v 19. století, od kdy spotřeba fosilních paliv roste také v souvislosti s rozvojem automobilismu. Je jisté, že fosilní palivo, jakožto neobnovitelná substance, jednoho dne dojde. Dnes se můžeme jen domnívat, kdy k tomu dojde, ale jisté je, že se to s vysokou pravděpodobností dotkne dalších generací. Již dnes máme však nástroje, jak ropné krizi předejít, či ji alespoň zmírnit. Během minulých dvou staletí totiž lidstvo neposunulo dál jen technologie využívající ke své činnosti pouze fosilií, ale také technologie využívající elektrickou energii, kterou je možno vyrábět z obnovitelných zdrojů, a kterou je možno skladovat pro pozdější využití. Během posledních dvou desetiletí také lidstvo podstatně zdokonalilo technologii trakčních akumulátorů. Oproti olověným předchůdcům mají totiž dnešní akumulátory na bázi lithia zhruba třikrát až pětkrát větší objemovou a hmotnostní hustou. Nabízí se tedy jejich použití ve spojení s elektromotory, které mají podstatně větší účinnost oproti spalovacím motorům. V posledních letech se automobilky snaží prorazit na trh s elektromobily a hybridními automobily. Díky ropné lobby a zakořeněné tradici ve využívání pohonu na bázi spalovacího motoru se zatím elektrická vozidla moc nerozšířila. Na železnici by však mohl být opačný trend, vždyť je na ní nástup komplexní elektromobility dlouhodobě připravován v rámci elektrifikace tratí, navíc má více předpokladů pro hybridizaci oproti dopravě silniční.

Hybridní pohon lze definovat jako pohon s více zdroji energie, které se přímo či nepřímo podílejí na vyvození tažné síly vozidla.

V silniční dopravě se uplatňuje zejména hybrid na bázi spalovacího motoru a zásobníku elektrické energie. Tento hybridní pohon je nejčastěji koncipován dvojitým způsobem. První variantou – tzv. sériový hybridní pohon – je pohon, kde spalovací motor pohání generátor napájející stejnosměrnou sběrnici, na kterou je dále připojen akumulátor a trakční měnič. Tato koncepce se využívá hlavně pro čistě elektrický provoz na kratší vzdálenosti. V případě potřeby většího výkonu může být spotřeba trakčního motoru kryta jak

z generátoru, tak s baterie. Výhodou toho systému je, že spalovací motor může být provozován v optimálních otáčkách. Druhou variantou je paralelní hybridní pohon. V tomto případě je spalovací motor připojen přes spojku na převodovku, jejíž výstup je mechanicky spojen s trakčním motorem. V tomto případě vozidlo jede primárně na spalovací motor, přičemž elektromotor kryje potřebu velkého výkonu při akceleraci. Výhodou je možnost rekuperace do baterie a jízda na dlouhé vzdálenosti.

V kolejové dopravě připadá v úvahu převážně varianta sériového hybridního pohonu, pokud se jedná o hybridní pohon se spalovacím motorem. Dále lze v kolejové dopravě uvažovat hybridní vozidlo s kombinovaným napájením z akumulátoru a troleje, vozidlo s kombinovaným napájením z troleje a z generátoru poháněného spalovacím motorem a vozidlo s napájením z akumulátoru a obnovitelného zdroje energie.

Jak již bylo zmíněno výše, železnice má lepší předpoklady pro provoz hybridních vozidel s akumulátory. Má totiž významně nižší valivý odpor oproti silničním vozidlům, díky čemuž není zásadní překážkou vyšší hmotnost vozidla vlivem přidaného akumulátoru. Konstrukce vozidla je lépe připravena nést hmotnost akumulátorů. Při studiu kritérií pro efektivní uplatnění takovýchto vozidel s hybridním pohonem v regionální drážní dopravě lze dojít k zajímavým závěrům. V ČR jezdí mnoho regionálních spojů vedených jednotkou osazenou čistě spalovacím motorem, a to po tratích s částečnou elektrizací. Pokud by došlo k nasazení vozidel s hybridním pohonem založeným na napájení z akumulátoru a troleje, tak by se koncepce vyplatila nejen ekonomicky, ale i efektivitou dopravy. Na řadě zkoumaných míst by totiž odpadly přestupy, protože vlak napájený z troleje by mohl pokračovat dál po trase bez trakčního vedení. Dále by odpadly doby pro nabíjení vozidla, jelikož by bylo možné vozidlo nabíjet během průjezdu úsekem s trolejí. Dalším podstatným argumentem pro využívání takového vozidla je jeho vyšší životnost, neboť po elektrizaci trati může vozidlo dále tuto trať obsluhovat jen jako vozidlo závislé trakce – akumulátor se dále neuplatňuje a nemusí se tedy obnovovat, čímž dojde k dalším provozním úsporám. S tím souvisí i připravenost výrobců kolejových vozidel, neboť rozšíření stávajících jednotek o akumulátor je poměrně snadno realizovatelné.

Životaschopnost výše nastíněného konceptu potvrzuje pohled do historie výroby akumulátorových kolejových vozidel. Již v roce 1899 František Křižík prováděl pokusy na tramvajových vozech, které osazoval akumulátory elektrické energie [1, s. 84-89]. Akumulátory se osvědčily i pro železniční provoz, ale nakonec zvítězila trakce parní. Přesto bylo firmou Brietfeld-Daněk v letech 1926 – 1959 vyrobeno čtrnáct posunovacích akumulátorových vozidel [2]. V roce 1993 byla potom firmou ČKD vyrobena akumulátorová

posunovací lokomotiva A219.0, která při brzdění rekuperuje energii zpět do akumulátoru [3, s.19]. Co se týče zahraničí, tak v londýnském metru jsou s úspěchem provozovány pracovní akumulátorové lokomotivy již od roku 1905 [4].

V současné době se hybridní vozidla typu trolej – akumulátor uplatňují v zahraničí. Důkazem toho je provoz hybridní jednotky EV-E301 v japonské Karasuyami [5, s.5]. Tramvaj 28T2, jež byla vyrobena ve Škodě Plzeň, našla uplatnění v turecké Konyi [6]. V Anglii v současné době provozují dvouzdrojovou jednotku Class 379 v okolí Cambridge [7]. Detailnější informace o zmíněných a dalších vozidlech podává navazující kapitola.

Pro potvrzení použitelnosti hybridních kolejových vozidel jsou v dalších kapitolách navrženy a hodnoceny koncepce hybridních kolejových vozidel typu sběrač – akumulátor. Konkrétně v kapitole č. 3 jsou rozebrány jednotlivé koncepce hybridních kolejových vozidel, jejichž stavba v dnešní době připadá do úvahy. Kapitola č. 3 analyzuje možnosti využití hybridních pohonů. Na tuto kapitolu navazuje kapitola pojednávající o možnostech optimalizace komponent pohonného řetězce hybridního pohonu. Kapitola řeší optimální využití trakčních motorů a dimenzování vozidlového transformátoru. U vozidla, jež je napájené z akumulátorů, je velice sledovaným parametrem kapacita akumulátoru, s níž souvisí i spotřeba vozidla. Pokud dojde ke snížení spotřeby vozidla, tak je možné zmenšit akumulátor. Další z přístupů, jak zmenšit kapacitu akumulátoru, nebo jak zvýšit dojezd vozidla, lze najít v koncepční změně algoritmu rychlostního regulátoru nebo v uplatnění výběhu, což jde ruku v ruce s použitím automatického vedení vlaku. Ověřením tohoto přístupu se zabývá experimentální část práce.

1 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

- Rešerše využití hybridních pohonů a pohonů s akumulátorovým napájením v kolejové dopravě.
- Návrh struktury pohonného řetězce pro kolejové vozidlo pro regionální osobní dopravu v podmínkách ČR.
- Tvorba metodiky pro energetické a ekonomické hodnocení hybridního pohonu kolejového vozidla a jeho dílčích komponent.
- Optimalizace komponent pohonného řetězce kolejového hybridního vozidla.
- Analýza využitelnosti hybridních vozidel v podmínkách železniční sítě ČR.
- Analytické výpočty pro zjištění optimální jízdní trajektorie vozidla.
- Návrh a realizace systému pro komplexní experimentální hodnocení hybridního pohonu.
- Ověření funkce systému pro experimentální hodnocení hybridního pohonu na experimentálním kolejovém vozidle, provedení a vyhodnocení testovacích měření.

2 ZHODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU V UPLATŇOVÁNÍ HYBRIDNÍCH VOZIDEL V KOLEJOVÉ DOPRAVĚ A TECHNOLOGIE AUTOMATICKÉHO VEDENÍ VLAKU

Hybridní kolejová vozidla typu sběrač – akumulátor se v dnešní době začínají uplatňovat hlavně u lehčích drážních vozidel určených pro osobní dopravu. Typicky se jedná o ucelené železniční jednotky a tramvaje. Na železnici se začala zmíněná vozidla používat hlavně z důvodu možnosti provozu elektrických jednotek na návazných relativně krátkých úsecích bez trakčního vedení. Takovéto vozidlo dobije svou akumulátorovou baterii během jízdy po úseku s trakčním vedením a uskladněnou energii následně použije pro napájení pohonu při jízdě na úseku bez trolejového vedení. U tramvají se jedná hlavně o překlenutí krátkých úseků bez trolejových vedení nacházejících se v místech, kde nebylo možno z nějakého důvodu trolejové vedení vybudovat. Zmíněná vozidla jsou v podmínkách železničního provozu používána ve Velké Británii, Rakousku a Japonsku.

Automatické vedení vlaku, dále AVV, je důležité z hlediska úspor trakční energie a přímo souvisí s dojezdem vozidla při jízdě na akumulátorovou baterii. V samostatné kapitole se proto zaměřím na používání AVV v podmínkách ČR, neboť tato práce mimo jiné zkoumá možnosti optimalizace řízení pohonných systémů u hybridních kolejových vozidel založených na vozidlech již používaných v ČR.

2.1 Hybridní kolejová vozidla současnosti

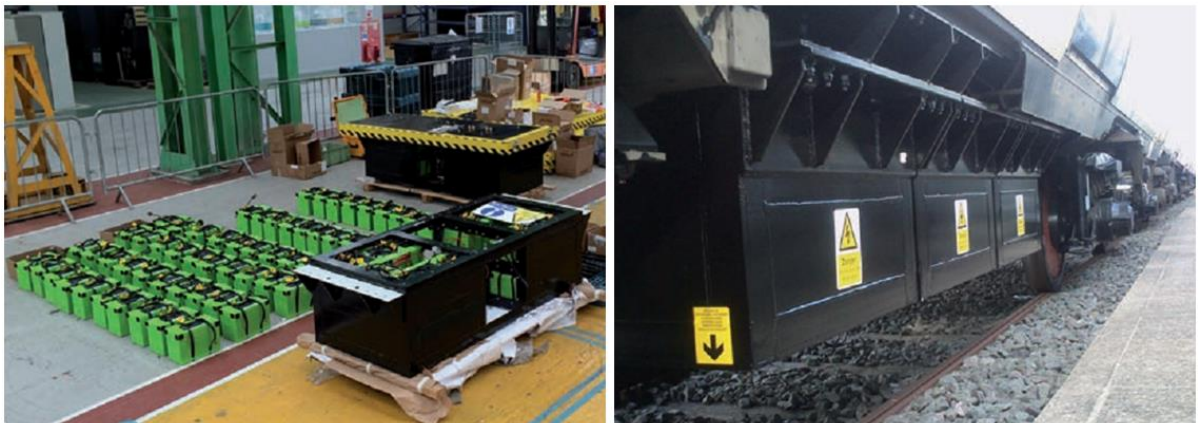
2.2 Hybridní jednotka Class 379 25 kV EMU

Již v roce 2014 bylo možno v zářijovém vydání měsíčníku Railway Gazette International spatřit článek [7] zabývající se testováním hybridní jednotky Class 379. Jedná se o čtyřvozovou hybridní jednotku s šesticí kontejnerů naplněných bateriovým packem, balančním zařízením, řídicí jednotkou, rychlo vypínačem a nabíječem. Vozidlo bylo sestaveno firmou Bombardier ve spolupráci s železničním výzkumným centrem (Network Rail's Rail Innovation & Development Centre), jež sídlí v anglickém Merhamu. A právě na testovací trati v Merhamu proběhlo testování již zmiňovaného vozidla. Během testů došlo k výměně minimálně dvou typů akumulátorů, mezi něž patří: lithium-železo-hořčík-fosfátový akumulátor a „horký“ akumulátor (provoz akumulátoru okolo 200 °C) fungující na bázi soli, sodíku a niklu. Během zkušebních jízd se rovněž testovala možnost dobíjení akumulátorů z trolejového vedení se jmenovitým napětím 25 kV. Tyto zkušební jízdy byly realizovány na vytipovaných tratích, kde je část trati osazena trakčním vedením a část nikoli.



Obrázek 1 – Hybridní jednotka 379 na testovací trati vedoucí ze stanice Harwich International do stanice Manningtree [8]

Po vyhodnocení celého výzkumu, je zřejmé, že se v anglických poměrech vyplatí konstruovat a provozovat hybridní jednotky. To ostatně dokazuje i studie proveditelnosti [9 s. 103], kterou zpracovala britská správa železniční dopravní cesty (Network Rail). Ve studii se píše [9], že nasazení hybridního vozidla typu sběrač-akumulátor může výrazným způsobem zlepšit komfort cestování při minimální investici do infrastruktury, a to konkrétně na neelektrifikovaném úseku z Wrexhemu do Bidstonu, který je součástí trati Wrexhem – Liverpool. Při jízdě z Bidstonu do Liverpoolu, respektive při jízdě opačným směrem, by se trakční baterie nabíjela a na již zmíněném úseku bez elektrifikace by byla energie z akumulátoru použita pro další jízdu vlaku.



Obrázek 2 - Sestava baterie ve výrobě a umístění baterie na vozidle [10, s. 3]

Poslední zmínku o uvedeném hybridním vozidle lze dohledat v roce 2015 [8], kdy bylo vozidlo testováno na trati vedoucí ze stanice Harwich International do stanice Manningtree.

Dle dostupných zdrojů bylo vozidlo zkonstruováno pro dojezd do 50 km. Podrobnější informace o vozidle udává dále uvedená tabulka.

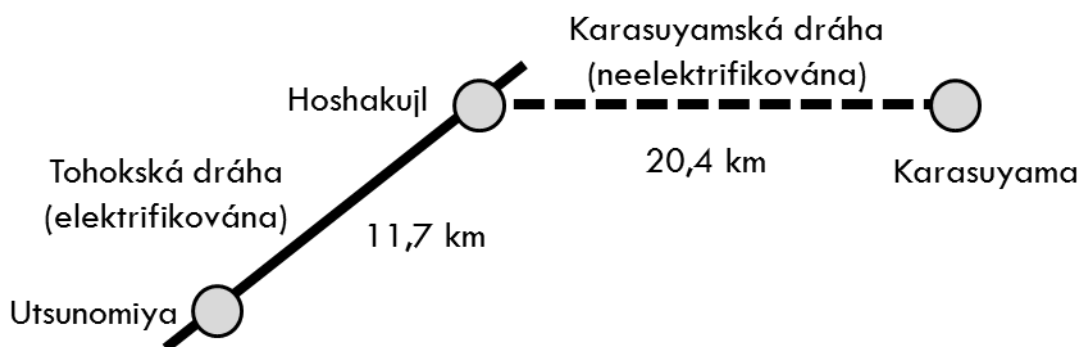
Tabulka 1 - Základní parametry hybridní jednotky Class 379 [10, s. 3]

Parametr	Hodnota
m [t]	185
v_{\max} [km/h]	120
Typ trakční baterie	Lithium-ion
E_{aku} [kWh]	500
Dojezd na jedno nabití [km]	50
Počet vozů	4

2.2.1 Hybridní jednotka EV-E301

Podobně, jako je tomu v Anglii, tak i v středozápadním Japonsku nyní prochází testy hybridní jednotka EV-E301 vyvinutá společností Japan Railway's East [5, s. 5]. Kromě napájecího napětí, které je v Japonsku mimo jiné na stejnosměrné hladině 1,5 kV, se jednotka liší i počtem vozů, skládá se jen ze dvou. Jednotka sestavená ze dvou vozů o hmotnosti 40 tun je vybavena baterií o kapacitě 95 kWh. Japonští inženýři jednotku testují, stejně jako jejich britští kolegové, na úsecích bez a s trolejovým vedením. Od celého výzkumu si slibují, že testované hybridní jednotky nahradí diesellové jednotky, jež jsou v současnosti provozovány na trati z Utsonomiya do Karasuyami [11, s. 0-7].

Délka zmíněné trati činí 32,1 km s tím, že 20,4 km od stanice Karasuyama se nachází stanice Hoshakujl, kde začíná elektrifikace. Tuto skutečnost demonstruje obrázek 3.



Obrázek 3 – Testovací trať pro hybridní jednotku EV-E301 ve středozápadním Japonsku

Japonští inženýři na trati provedli několik testů. Jednak zkoušeli, jaký bude rozdíl ve spotřebě u simulace a reálné jízdy vozidla. Zde došli ke zjištění, že jsou při reálných měřeních v téměř 97 % shodě se simulací. Dále zkoušeli svůj rychlonabíjecí systém ve stanici Karasuyama, kde u nástupiště vybudovali nabíjecí trolej. Vozidlo nabíjeli 10 minut, přičemž zjistili, že za tuto dobu jsou schopni do baterie dostat 17 % energie a to za zhoršených zimních podmínek, kdy je baterie studená. Třetím testem bylo měření pomocných spotřeb

ve stanici Ogane. Zde zjistili, že pomocné spotřeby jejich jednotky jsou 28 kW/vůz. Pro úplnost je dále uvedena tabulka s celkovými parametry vozidla.

Tabulka 2 – Základní parametry hybridní jednotky EV-E301 [5, s. 5]

Parametr	Hodnota
m [t]	78
v_{max} [km/h]	100
Typ trakční baterie	Lithium-ion
E_{aku} [kWh]	190
Dojezd dojezd na jedno nabití [km]	50
Počet vozů	2

2.2.2 Hybridní jednotka 817-1000

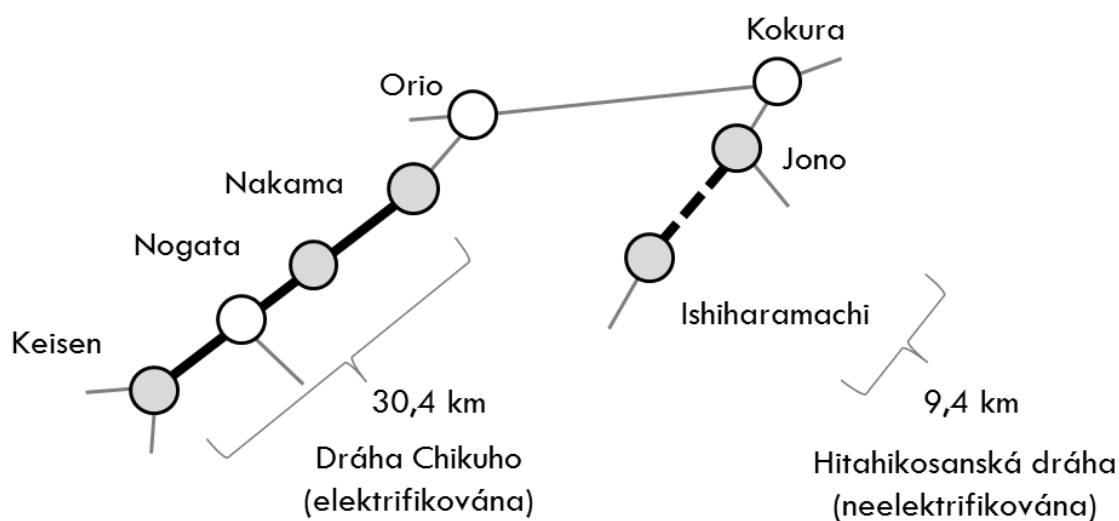
Jako v předcházejícím případě se jedná o japonskou jednotku testovanou a provozovanou na vedlejších tratích. Tentokrát se ovšem jedná o jihovýchodního japonského dopravce Kyushu railway company, který vozidlo uvedl do provozu ve spolupráci s firmou Railway Technical Research Institute Japan [12, s. 98-104]. Samotné vozidlo bylo vytvořeno přestavbou klasické elektrické jednotky 817 a oproti jednotce EV-E301 se konstrukčně podstatně liší, zejména v napájecí části, neboť používá střídavé napájecí napětí o hodnotě 20 kV a 60 Hz. Toto napětí je nutné přetransformovat a usměrnit. Napětí na sekundární straně transformátoru pak dosahuje jmenovité hodnoty 1000 V, nicméně akumulátor o kapacitě 83 kWh je přímo připojen do meziobvodu a je dimenzován na napětí 1800 V. Souhrnně jsou informace o vozidle uvedeny v tabulce 3.

Tabulka 3 – Základní parametry hybridní jednotky 817-1000

Parametr	Hodnota
m [t]	67,1
v_{max} [km/h]	120
Typ trakční baterie	Lithium-ion
E_{aku} [kWh]	83
Dojezd dojezd na jedno nabití [km]	20-30
Počet vozů	2

Testování jednotky bylo pojato velice komplexně, probíhalo během všech ročních období. V součtu testování trvalo 46 dní, z čehož se 40 dní jezdilo na trati z Keisenu do

Nakamy a zbývajících 6 dní z Ishiharmachi do Jona, viz ilustrace 4. Během jízd výzkumníci zjistili, že daný vlak ujede na jedno nabití 20 km v období, kdy je nutné klimatizovat. Pokud se klimatizuje minimálně, tak je vlak schopen na baterii s kapacitou 83 kWh ujet vzdálenost 30 km. Během testů byla teplota baterií držena pod úrovní 51,5 °C. Při zimním měření bylo zjištěno, že je nízká teplota nepříznivá pro chod akumulátorů, respektive, že by měla být minimalizována diference teplot mezi jednotlivými bateriovými kontejnery. Při testování rychlonabíjení se prokázal podstatný vliv vnitřního odporu akumulátoru, kdy při měření na zahřátém akumulátoru s menším vnitřním odporem, nabíjení trvalo podstatně kratší dobu, než při měření na studeném akumulátoru s větším vnitřním odporem. Dle týmu výzkumníků je provoz takového vozidla rentabilní a výzkum by měl dále posloužit jako podklad pro masovou výrobu hybridních kolejových vozidel typu sběrač-akumulátor. Dále se bude výzkum v Japonsku ubírat cestou snížení spotřeby kolejových vozidel, čehož lze dle výzkumníků dosáhnout například optimalizací řízení pohonu. Výsledky této práce jejich domněnky veskrze potvrzují.



Obrázek 4 – Testovací tratě pro jednotku 817-1000 v jihovýchodním Japonsku

2.2.3 Hybridní lokomotiva Class 1063

Jedná se o hybridní lokomotivu rakouských drah ÖBB, jež vychází z elektrické lokomotivy řady 1063. Lokomotiva byla poprvé prezentována na veletrhu InnoTrans 2016, který se již tradičně uskutečnil na berlínském výstavišti. Hybridní lokomotiva, mající základ v čisté elektrické lokomotivě řady 1063, byla vyrobena firmou TecSol. Hybridní lokomotiva vznikla rošířením původní lokomotivy o akumulátory a superkapacity. Příkladnou technologii dodala čínská firmou CRRC Zhuzou.

Lokomotiva pracuje tak, že při jízdě pod trolejí se jmenovitým napětím 15 kV a 16,7 Hz dodává energii do pohonu a superkapacitorů, jež následně energii zprostředkovávají baterii s menším nabíjecím výkonem.

Lokomotiva je určena pro posun na staničních kolejích bez troleje, což dle materiálu [13] eliminuje cenu dieselové lokomotivy. Lokomotiva má souhrnnou kapacitu 155 kWh a akumulční jednotka disponuje výkonem 800 kW. Maximální rychlost lokomotivy je 100 km/h a dokáže přepravit 400 t nákladu po dráze dlouhé 30 až 35 km. Nyní je lokomotiva na testech ve Vídni. Pokud testy dopadnou dobře, nastane dle manažera vozového parku ÖBB Klause Rongeho rekonstrukce celé šedesáti vozové flotily [13].

2.2.4 Hybridní lokomotiva MT-S-600-BE

Dle příspěvku [14] na internetových stránkách časopisu Railway Gazette se jedná o lokomotivu postavenou firmou Schalke pro vídeňský dopravní podnik, který ji využije pro posun na linkách vídeňského metra U-bahn. Dohromady bude mít vídeňské metro pět těchto lokomotiv, z nichž byla jedna představena na veletrhu InnoTrans 2016, viz obrázek 5. Pohon lokomotivy může být napájen jak ze třetí kolejnice, tak i z akumulátorů.



Obrázek 5 – Lokomotiva MT-S-600-BE na veletrhu InnoTrans 2016 v Berlíně [14]

V roce 2017 by měla firma Schalke dodat další dvě lokomotivy do metra v Mnichově. Firma Schalke se ale především specializuje na výrobu lokomotiv pro doly. Na veletrhu InnoTrans 2016 byla rovněž ukázaná jedna z důlních lokomotiv s označením MMT-M-270-BDE, jež

bude dále sloužit v měděných a zlatých dolech v Indonésii. Dle výrobce mají důlní hybridní lokomotivy vysokou spolehlivost a pohotovost, neboť jsou primárně napájeny z troleje a při výpadku elektrické energie lokomotiva dále koná službu díky zabudovaným trakčním akumulátorům. Pokud by byl výpadek energie delší a lokomotivní baterie by se vybila, tak lze velice operativně vyměnit akumulátorový kontejner za kontejner s dieselaagregátem. Celá operace údajně netrvá déle než jednu hodinu.

2.2.5 Hybridní tramvaj 28T2

Dle článku [15, s. 1] z Hospodářských novin se jedná o hybridní tramvaj typu sběrač-akumulátor vyrobenou firmou Škoda Transportation v počtu dvanácti kusů pro turecké město Konya. Tramvaj musí překonat 1,8 km dlouhý nezatrolejovaný úsek vedoucí historickým centrem města. Za nejhorsích uvažovaných podmínek pak tramvaj překoná úsek dlouhý 3 km, a to až rychlostí 30 km/h.

2.2.6 Hybridní trolejbus 26 Tr Solaris

Nejen na zahraničních drahách se začínají prosazovat hybridní vozidla, ale i na českých trolejbusových drahách se lze setkat s vozidly typu sběrač-akumulátor. Příkladem může být Dopravní společnost Zlín – Otrokovice, která ve své tiskové zprávě [16, s. 1] z 22. 9. 2016 uvedla, že firma Škoda Plzeň do dopravní společnosti dodala dva bateriové trolejbusy, jež nesou označení Škoda 26 Tr Solaris.

Jedná se o trolejbusy s klasickou elektrickou výzbrojí doplněnou o akumulátorovou technologii. Jmenovité napájecí napětí trolejbusu se nachází na hladině 600 V stejnosměrných. Trolejbus dokáže ujet mimo troleje jednorázově 12 km s tím, že poměr jízdy na trolej a na baterii je 2:1. Předpokládá se denní výkon s 15 cykly jízdy mimo trolej o délce 8 km pro jeden cyklus.

2.3 Automatické vedení vlaku v podmínkách ČR

Obecně představuje automatické vedení vlaku (dále jen AVV) automatizovaný systém zasahující do jízdy vlaku tak, aby vlak autonomně zrychlil, zpomalil či zastavil dle předem daných traťových dispozic, a to s cílem zajistit co možná nejnižší spotřebu trakční energie, a s cílem dodržet jízdní řád. To znamená, že AVV reaguje na traťové podněty bez větších zásahů od strojvedoucího. V nejjednodušším provedení strojvedoucí pouze dohlíží na správnou funkci zařízení a potvrzuje odjezdy ze zastávek. Důležité je si ovšem uvědomit, že se v žádném případě nejedná o systém zabezpečující jízdu vlaku (zařízení fail-safe), neplní bezpečnostně relevantní funkce, které jsou od zabezpečovacího zařízení, jako

například od systému ETCS (European Train Control System), vyžadovány. Zmíněný systém evropského zabezpečovače ETCS plní bezpečnostně relevantní funkce a dohlíží, zda vlak nepřekračuje brzdné křivky, respektive sleduje, zda je dodržena zábrzdná vzdálenost. Pokud vlak překročí brzdnou křivku v místě tolerance, dojde k zastavení vlaku tak, aby nepřekročil zábrzdnou vzdálenost k následujícímu bodu, jenž působí restriktivně proti jízdě vlaku. Do značné míry tedy zabezpečuje jízdu vlaku při použití AVV [17, s. 1-6].

Na našem území bylo AVV zrealizováno hlavně z důvodu energetických úspor na železnici, kterých je dosaženo, co možná nejhospodárnější jízdou vozidla. Dle aktuálního zpoždění dojde v počítačovém systému AVV k výpočtu ideální jízdní trajektorie na základě rychlostního profilu a stavu návěstidel před vlakem. Neproměnné informace systém získává z mapy tratě, jež je jeho součástí. Informace o stavech návěstidel systém získává z vlakového zabezpečovače. Pro orientaci systému na trati se používají magnetické identifikační body MIBy, jež jsou podélně umístěny v kolejovém kanálu ve formě trámců. Nadjetím identifikačního bodu dojde k sejmutí jedinečného identifikačního čísla MIBu lokomotivou, což vede k zorientování vozidla na trati. Pro provoz na méně frekventovaných tratích se používá polohový systém GPS, potom se identifikačním bodů říká geodetické informační body GIBy [18, s. 1-20].

Pokud jede vlak s předstihem, lze použít dva nástroje pro uspoření energie. Jedna z možností spočívá v tom, že se vlak nerozjede na maximální rychlost, ale na rychlost nižší, čímž se zmenší kinetická energie vlaku. Druhá možnost spočívá ve využití výběhu. Vlak jede předem vypočtenou rychlostí a na vhodném místě se do jízdy vlaku zařadí výběh, kterým jede vlak až do místa, kde je třeba zastavit, pak systém přechází do režimu cílového brzdění. Vlak zastaví na předem definovaném místě [19, s. 116-120].

Dle Binka [18, s. 3-8] jsou kromě energetiky přínosy AVV i v oblasti bezpečnosti a při výstavbě, modernizaci a provozu infrastruktury. Z hlediska bezpečnosti spočívá přínos v interakci strojvedoucího s vozidlem. Jelikož AVV přebírá od vlakového zabezpečovače pouze kód žlutého světla a žlutého mezikruží, tak je třeba, aby strojvedoucí do systému zadal přesnou návěst. Pokud tak neučiní, systém AVV upraví jízdu vlaku bezpečným směrem, což znamená, že vlak zastaví nebo sníží svou rychlost na 40 km/h, dle přijatého kódu vlakovým zabezpečovačem. Dále se systém AVV stará o dodržení dovolené rychlosti, vylučuje projetí stanice s plánovaným zastavením a stará se o zastavení vlaku na stanoveném místě, což podstatně snižuje psychické zatížení strojvedoucího. Při výstavbě, modernizaci a provozu infrastruktury jsou benefity AVV následující. Délky nových nástupišť lze definovat pouze

na délku vlaku, jinak je nutné při ručním brzdění počítat s rezervou. Systém AVV také brání předčasnému brzdění na zhlaví stanice, čímž je zhlaví dřív uvolněno a může být tak využito pro postavení další vlakové cesty, což v konečném důsledku vede ke zvýšení propustnosti stanice. Celkově tak systém AVV přispívá k lepšímu dodržování jízdního řádu na železnici.

Jedna ze stěžejních částí této práce se věnuje automatickému vedení vlaku při experimentálních měřeních v Mladějově na Moravě. V této práci však jde o vyšetření energetické optimalizace jízdy vlaku, nikoliv vlivů AVV na jízdní řád, bezpečnost a stavební úspory v dopravní infrastruktuře. Automatické vedení vlaku pro experimentální vozidlo Dopravní fakulty Jana Pernera je založeno na GPS, čili veškeré průjezdné body a zastávky jsou ve výpočetním systému charakterizovány geodetickými souřadnicemi. Díky AVV lze zajistit velice dobrou opakovatelnost měření, bez které by byly výsledky bezcenné.

2.4 Rešerše využití hybridních pohonů v kolejové dopravě

Jak již bylo řečeno, práce se zaměřuje na energetickou optimalizaci jízdy kolejových vozidel, při použití hybridního kolejového vozidla typu sběrač-akumulátor. S tímto souvisí i ekonomická stránka problému nasazení hybridního kolejového vozidla v podmínkách ČR. Problematika ekonomiky provozu daného vozidla je v práci rovněž řešena.

Využití samotných hybridních kolejových vozidel typu sběrač-akumulátor ve světě je rozebráno v předcházející kapitole. Pro další práci je ovšem nezbytné se zaměřit na problematiku návrhu uspořádání samotného hybridního pohonu a návrhu algoritmů pro optimalizaci jízdy vozidla z hlediska snížení spotřeby energie. Návrh algoritmů pro snížení spotřeby trakční energie samozřejmě úzce souvisí s použitým matematickým modelem. Další podkapitoly rozebírají, jak řeší výše uvedené problémy zahraniční vědecké týmy a předepisují, jak bude daná problematika řešena touto prací, která utváří podklad pro aplikaci hybridního kolejového vozidla do podmínek ČR.

2.4.1 Nerelevantní přístupy pro řešení problematiky hybridních kolejových vozidel typu sběrač-akumulátor

Obecně s tématem hybridních vozidel souvisí spousta výzkumných aktivit, které ovšem nejsou relevantní pro zde řešený typ hybridních pohonů, nicméně jsou velice inspirativní a stojí za to se s nimi dále krátce zabývat a poukázat na jejich existenci.

Zmíněné nerelevantní přístupy lze rozdělit do dvou kategorií – výzkum silničních hybridních vozidel a výzkum na poli kolejových vozidel s hybridním systémem tvořeným spalovacím motorem a baterií.

2.4.1.1 Výzkum silničních hybridních vozidel

Během posledních let lze zaznamenat rostoucí zájem výrobců vyvíjet osobní hybridní automobily. Toto dokumentuje i snaha italských výzkumníků [20, s. 2214-2219] z Univerzity Salento, kteří se zabývají optimalizací řízení sériového hybridního pohonu u svého experimentálního silničního vozidla ITAN500, tak aby vozidlo mělo co nejnižší emise CO₂. Využívají k tomu simulačních modelů, experimentálních měření a moderní metody testování řídicího hardwaru HIL (Hardware In the Loop), kde jsou senzory a aktuátory emulovány v reálném čase. Během výzkumu popsali metody, jak snížení CO₂ dosáhnout. Tento výzkum se ovšem dotýká problematiky kolejového hybridního vozidla typu sběrač-akumulátor jen velice vzdáleně, neboť emise CO₂ jsou produkovány v elektrárně, která je součástí elektrárenského mixu napájecího železnici. U kolejového vozidla lze jít cestou obecného snížení odebírané energie při zachování dynamiky vozidla.

Velice zajímavé pojednání ohledně optimální jízdy osobního automobilu napsali výzkumníci univerzity RWTH z Aachenu [21, s. 68-75]. Zabývali se v něm výzkumem metodiky, která by řidiči hybridního vozidla pomáhala šetřit palivo. Během výzkumu se rovněž museli potýkat s problematičtým chováním řidičů z hlediska dosažení úspory energie. Například při výběhu vozidla řidič většinou psychicky nevydrží ujet značnou vzdálenost, během níž vozidlo zpomaluje na nižší rychlost, což vede k neoptimální jízdě. Tyto problémy ovšem při uplatnění AVV odpadají, navíc se v případě kolejového hybridního vozidla nejedná o vozidlo se spalovacím motorem.

2.4.1.2 Výzkum na poli kolejových vozidel s hybridním systémem tvořeným spalovacím motorem a baterií

Východní japonská dráha řešila problematiku hybridních jednotek vybavených akumulátorem a diesलगregátem v sériovém uspořádání [22, s. 49-56]. V příspěvku předložili metodiku pro stanovení kapacity akumulátoru a výstupního výkonu dieslového motoru. Testování následně ukázalo, že vozidlo disponuje dostatečným výkonem spalovacího motoru i kapacitou akumulátoru pro provoz na tamních tratích.

Na univerzitě v anglickém Birminghamu zkoumali hybridní systém kolejového vozidla s hydrodynamickou převodovkou [23, s. 406-420]. Zkoumaná jednotka sestává ze tří vozů, kde každý má svůj vlastní dieslový motor. Výzkum se ubíral cestou tvorby algoritmu pro optimální využití motorů. Například na sklonově nenáročném trati běžel v simulaci jen jeden motor, což mělo kladný dopad na celkovou spotřebu paliva, která se zmenšila až o 7%.

Hybridní lokomotivu s pohonem na bázi sériového uspořádání akumulátoru a dieselaagregátu představila americká firma RailPower Technologies Corporation na železniční konferenci v Baltimoru v roce 2004 [24, s. 113-117]. Výsledky z testování vypadaly slibně, lokomotiva uspořila 20 – 30% paliva oproti lokomotivě podobné konstrukce vybavené pouze dielelektrickým přenosem výkonu.

Ani jeden z výše uvedených výstupů nemůže tvořit podpůrný materiál pro návrh hybridního kolejového vozidla v podmínkách ČR, neboť se jedná o vozidla s dieselaagregátem, což odporuje filosofii vozidla s kombinací sběrače a akumulátoru.

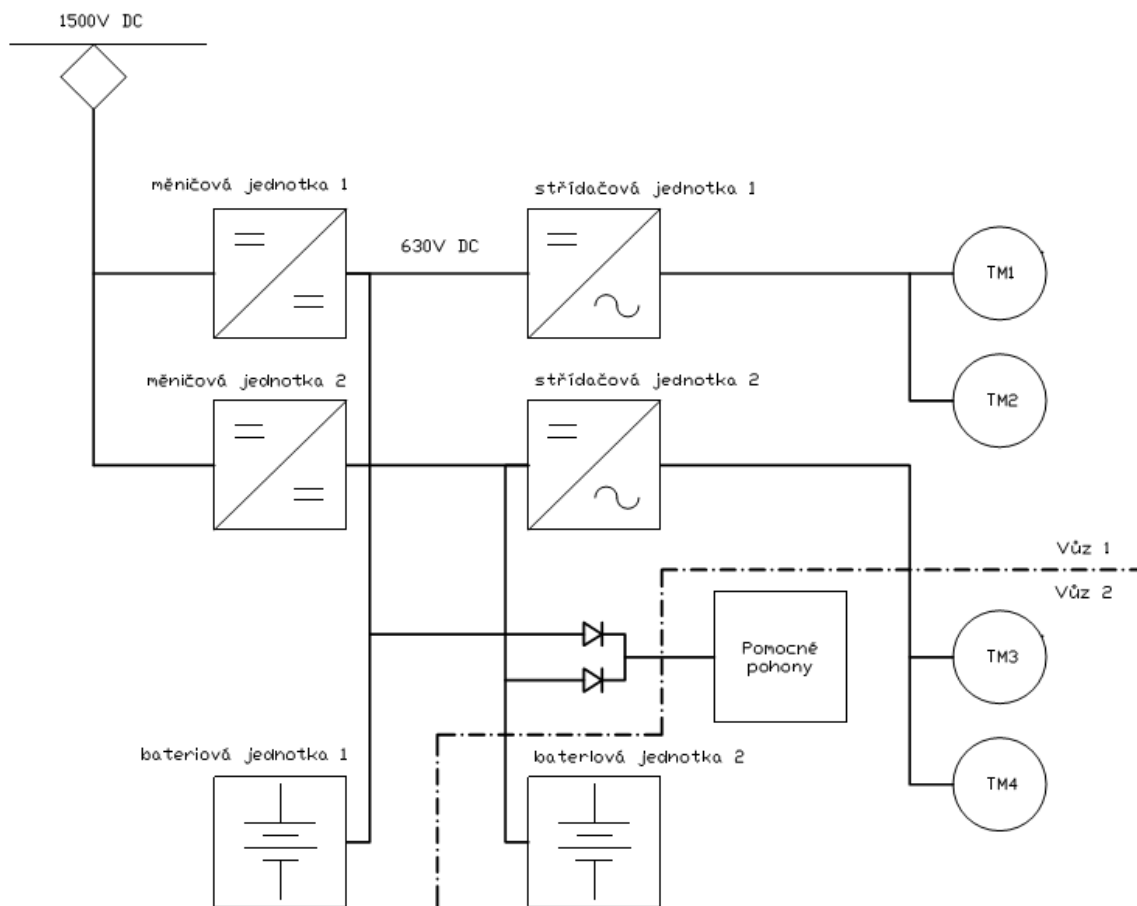
2.4.2 Příklady uspořádání pohonného řetězce u již existujících hybridních jednotek

2.4.2.1 Uspořádání pohonu hybridní jednotky EV-E301

Jedná se o japonskou hybridní jednotku typu sběrač-akumulátor, jež byla postavena a otestována japonskými drahami Japan Railway's East [11, s. 0-7]. Účel jednotky a nasazení v provozu řeší kapitola 2.1.2.

Z hlediska redundance má dvouvozová jednotka dva stejnosměrné meziobvody, pro každý vůz jeden. Akumulátorová baterie je rovněž rozdělena na dvě části, kde každá z částí napájí jeden stejnosměrný meziobvod, což dokumentuje obrázek 6. Napájecí napětí vozidla se nachází na úrovni 1 500 V a do stejnosměrných obvodů se dostává přes dvojici DC-DC měničů, jejichž výstupní napětí dosahuje úrovně 630 V, což je zároveň jmenovité napětí stejnosměrného meziobvodu. Z každého stejnosměrného meziobvodu je napájena střídačová jednotka. Střídačové jednotky dále napájí čtveřici trakčních asynchronních motorů, kde každý má výkon 95 kW. Napájení pomocných spotřeb se uskutečňuje z obou stejnosměrných meziobvodů pomocí oddělovacích diod. V prvním voze se nachází měničová technika, akumulátorová baterie a dvojice trakčních motorů. Ve druhém voze se nacházejí pomocné spotřebiče a další dvojice trakčních motorů.

Výhoda u tohoto uspořádání pohonného řetězce spočívá v redundanci a přímém připojení akumulátorové baterie přímo do stejnosměrného meziobvodu bez dodatečného měniče. Pokud se například vyskytne porucha na stejnosměrném měniči 1, nebo na střídači 1, tak může vozidlo pokračovat v jízdě v režimu sníženého výkonu za pomoci trakčních motorů 3 a 4. Připojení akumulátorové baterie do stejnosměrného meziobvodu bez přídavného měniče potom zlepšuje účinnost jízdy na baterii, neboť tu nejsou dodatečné ztráty na měniči.



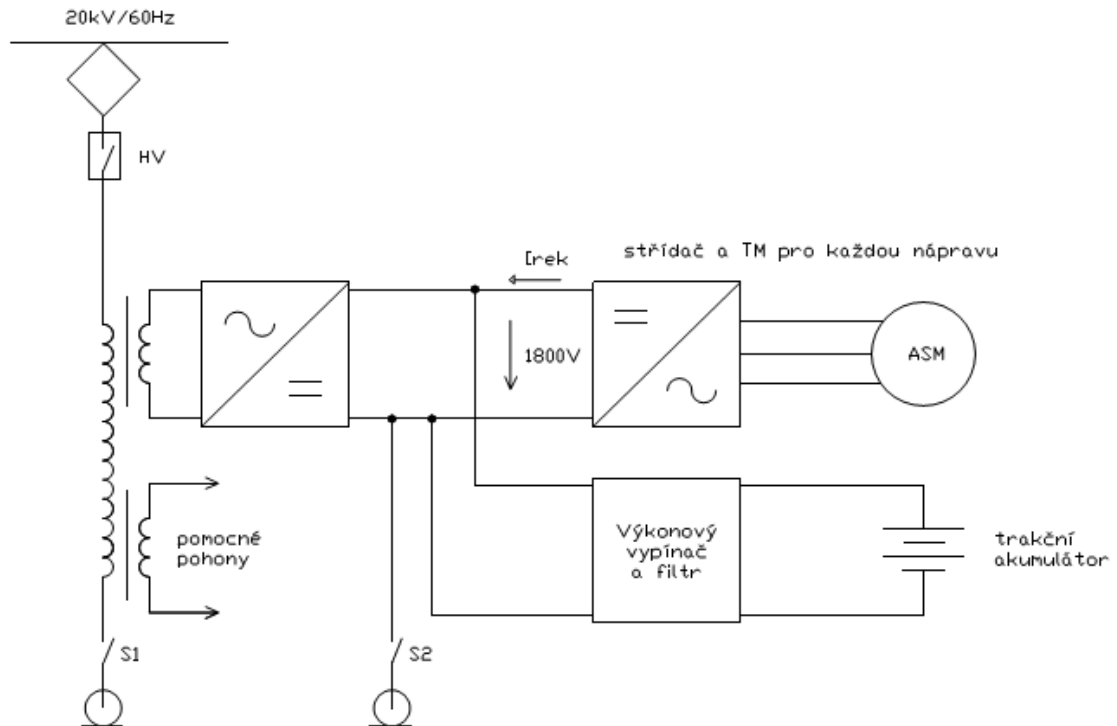
Obrázek 6 - Uspořádání pohonu hybridního kolejového vozidla EV-E301[11]

2.4.2.2 Uspořádání pohonu hybridní jednotky 817-1000

Rovněž se jedná o japonskou hybridní jednotku typu sběrač-akumulátor, jež byla ovšem postavena a otestována japonskou výzkumnou organizací Railway Technical Research Institute ve spolupráci s Kyushu Railway Company [12, s. 98-104]. Účel jednotky a nasazení v provozu řeší kapitola 2.1.3.

Z obrázku 7 vyplývá, že se jedná o podobnou koncepci jako v předcházejícím případě. Jen s tím rozdílem, že na vstupu je transformátor, neboť daná jednotka obsluhuje trať se střídavým napájecím systémem 20 kV a 60 Hz. Další rozdíl se skrývá v hodnotě napětí meziobvodu, kde se používá jmenovité napětí 1 800 V. Trakční baterie napájí meziobvod opět přímo, bez dodatečného mezilehlého DC-DC měniče.

Oproti předešlé jednotce tomuto uspořádání chybí redundance, což lze považovat za nevýhodu. Ovšem výhodou zůstává připojení trakční baterie přímo do stejnosměrného meziobvodu, čímž odpadají ztráty na absentujícím mezilehlém měniči.



Obrázek 7 - Uspořádání pohonu hybridního kolejového vozidla 817-1000 [12]

2.4.3 Příklady návrhů algoritmů pro optimalizaci spotřeby trakční energie

V současnosti se řeší po celém světě, jak vylepšit pohonný řetězec, respektive jak vylepšit řízení pohonného řetězce drážních vozidel z hlediska spotřeby elektrické energie. Téměř ve všech případech se jako základ pro řešení uvažuje nějaký typ automatického vedení vlaku, v zahraniční literatuře označovaného jako ATO (z anglického Automatic Train Operation). Problematika spotřeby energie je palčivým tématem hlavně u vysokorychlostních vlaků, kde spotřeba elektrické energie roste s třetí mocninou rychlosti. Samozřejmě, je-li tato problematika vyřešena, lze ji uplatnit i na konvenční železnici při řádově nižší rychlosti, vždyť na základě dnešních úspor budou pravděpodobně nepřímo profitovat další generace. Dnešní úspory se snad projeví v zachovalejším přírodním bohatství.

Existuje mnoho příspěvků pojednávajících o optimalizaci spotřeby elektrické energie u kolejových vozidel, ale jen některé výzkumné aktivity ověřovaly simulační závěry v praxi. Například čínský příspěvek ze Státní laboratoře pro klíčový výzkum v oblasti řízení železniční dopravy a bezpečnosti Univerzity Beijing Jiaotong pojednává o energeticky výhodném řešení pro provoz vlaku s AVV [25, s. 2580-2586]. Systém AVV funguje na iterativním principu hledání energetického optima ve fázi rozjezdu, ustálené rychlosti, výběhu a ve fázi brzdy. Výpočetní čas algoritmu je roven 1 s, což je dle autorů dostatečně krátký časový úsek pro možnost implementace do vlaku. Dle autorů lze tímto způsobem ušetřit

až 8 % energie oproti stavu bez nasazení daného algoritmu. Z příspěvku není bohužel zcela zřejmé, zda došlo k nasazení algoritmu přímo na vozidlo, nebo zda se jednalo pouze o simulaci s reálnými traťovými podklady a modelem vozidla.

Velice zajímavý aplikovaný výzkum týkající se vylepšení spotřeby energie kolejového vozidla v součinnosti s AVV prezentoval výzkumný tým tvořený členy madridské Univerzity Comillas Pontifical a tokijské Sophia University v příspěvku publikovaném v databázi IEEE [26]. Příspěvek se zabývá meta-heuristickým přístupem při hledání energeticky optimální jízdní trajektorie. Výsledkem je vygenerování řady optimálních jízdních trajektorií v závislosti na hmotnosti vozidla a zpožděních. Řídicí systém vozidla si potom z těchto trajektorií vybírá tu nejlepší vzhledem k aktuální situaci na trati a zatížení vozidla. Trakční úspory se potom pohybují v rozmezí od 3 – 14 % oproti stavu bez nasazení daného algoritmu.

V literatuře lze dohledat i další příspěvky [27], [28], [29] týkající se simulačních výpočtů na bázi heuristických metod použitých při vylepšování spotřeby kolejových vozidel, nicméně jsou filosoficky velice podobné výše uvedeným a nebudu je dále rozebírat. Tato práce předkládá takové metody pro dosažení energetických úspor u kolejových vozidel, které jsou založeny na analytickém modelu v sobě zahrnujícím i jednotlivé komponenty pohonného řetězce.

3 METODY ZPRACOVÁNÍ A ZPŮSOB ŘEŠENÍ

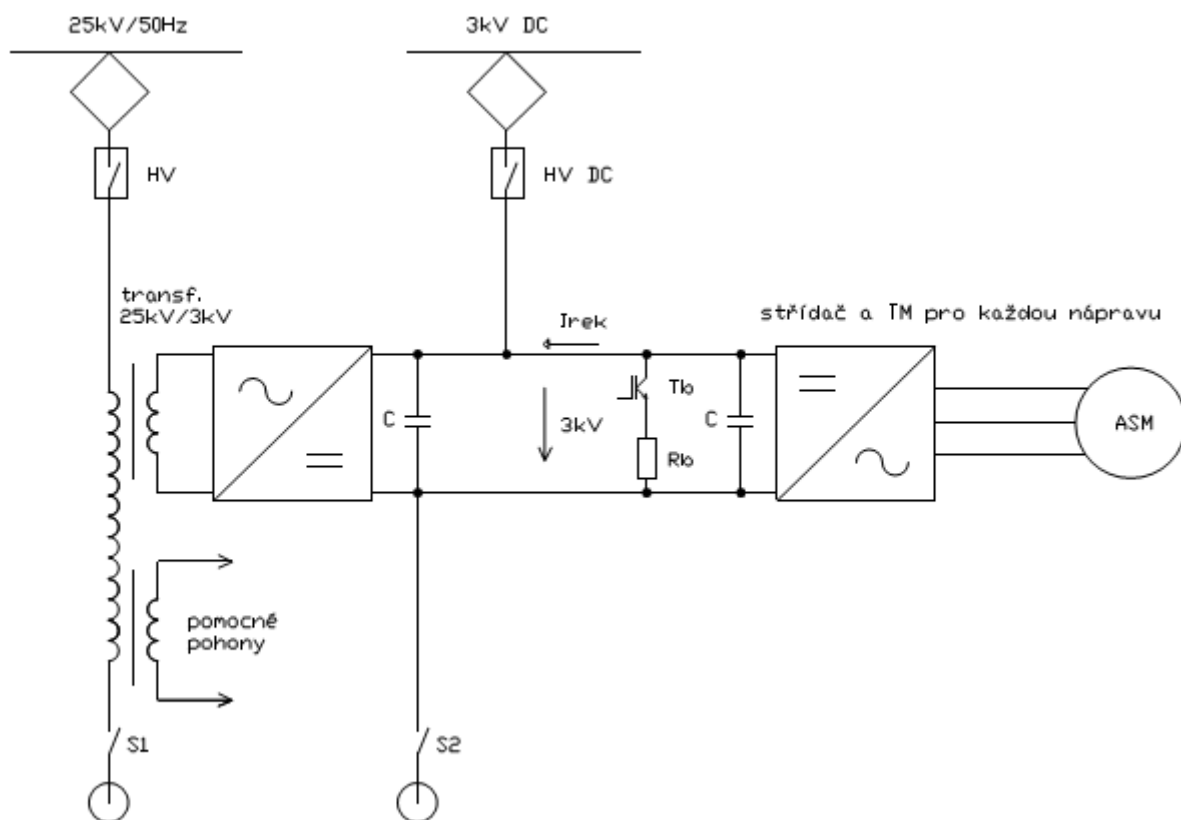
Výsledkem práce by mělo být zejména zjištění, zda je koncept hybridního kolejového vozidla typu sběrač-akumulátor životaschopný, jaké mohou být jeho přínosy a jaké jsou cesty k optimalizaci spotřeby energie. Pro vyřčení závěrů je však nutné jednak důkladně prověřit jednotlivé koncepce možných elektrických výbrojí, a potom danou koncepci simulačně otestovat pro provoz na vybraných tratích. Na základě simulace je následně provedena energetická analýza, se kterou je úzce spojena i analýza rentability pořízení daného vozidla. Tato analýza je založena na porovnání hybridního vozidla s vozidlem diesellovým.

Jelikož je koncepce hybridního kolejového vozidla inovativní koncepcí, tak se práce dále zabývá problematikou optimalizace vozidlového transformátoru, akumulátoru a předkládá a simulačně ověřuje metodiku odpojování trakčních motorů na základě právě potřebného trakčního výkonu. S pohonným řetězcem také úzce souvisí problematika řízení jízdy vozidla, pročež se práce dále věnuje problematice návrhu optimální jízdní trajektorie. Pro vylepšení spotřeby vozidla v souvislosti s řízením jízdy vozidla jsou dále navrženy algoritmy pro energetickou optimalizaci jízdy vozidla. Otestováním daných algoritmů se zabývá experimentální část práce.

3.1 Návrh pohonného řetězce hybridního kolejového vozidla typu sběrač-akumulátor

3.1.1 Popis běžné dvousystémové jednotky třetí generace

Jelikož se v České republice ani jinde v Evropě běžně neprovozují dvouzdrojová železniční vozidla, tak při koncepčním návrhu vozidla nelze vycházet z již existujícího vozidla. Na základě této skutečnosti se musí návrh vozidla ubírat cestou úpravy již stávajících železničních vozidel, respektive obousměrných ucelených souprav neboli jednotek. Tyto jednotky navíc dnes nabízí řada výrobců drážní techniky, tudíž dojde k značné úspoře prostředků při vývoji nového vozidla. Na obrázku č. 8 je vyobrazeno typické blokové schéma elektrické výbroje běžné dvousystémové lokomotivy, které bude dále podrobněji rozebráno a popsáno.



Obrázek 8 - Blokové schéma běžné dvousystémové lokomotivy třetí generace

Stěžejním prvkem elektrické výzbroje je stejnosměrný meziobvod, do kterého jsou zaústěny všechny zdroje a spotřebiče elektrické energie. Jelikož česká železnice používá dva napájecí systémy¹, tak je dobré již od začátku ve vozidle uvažovat oba dva. Na obrázku č. 8 je znázorněn 3kilovoltový stejnosměrný meziobvod, do něž lze přímo zavést stejnosměrné napětí z troleje. To je z energetického hlediska obrovská výhoda, neboť absence měniče vede na menší celkové ztráty v pohonu vozidla. U střídavého systému však musí nutně dojít k transformaci napětí na hodnotu 3 kV, následně k jeho usměrnění a zavedení do stejnosměrného meziobvodu. Na stejnosměrný meziobvod jsou dále připojeny pohony pro individuální řízení trakce jednotlivých náprav. Počet pohonů tedy závisí na počtu hnaných náprav, což úzce souvisí s délkou a hmotností vozidla. Každý elementární pohon běžně utváří střídač ve spojení s asynchronním motorem. Střídač má jednak za úkol vytvořit vhodné třífázové napětí pro napájení motoru, dále musí umět energii vracet zpět do meziobvodu,

¹ V ČR se výhradně používají dva napájecí systémy. Jednak jde o jednofázový střídavý systém 25 kV a 50 Hz, kterým jsou elektrifikovány tratě na jihu republiky, dalším pak je systém stejnosměrný se jmenovitou hodnotou napětí 3 kV, jímž je elektrifikován sever republiky.

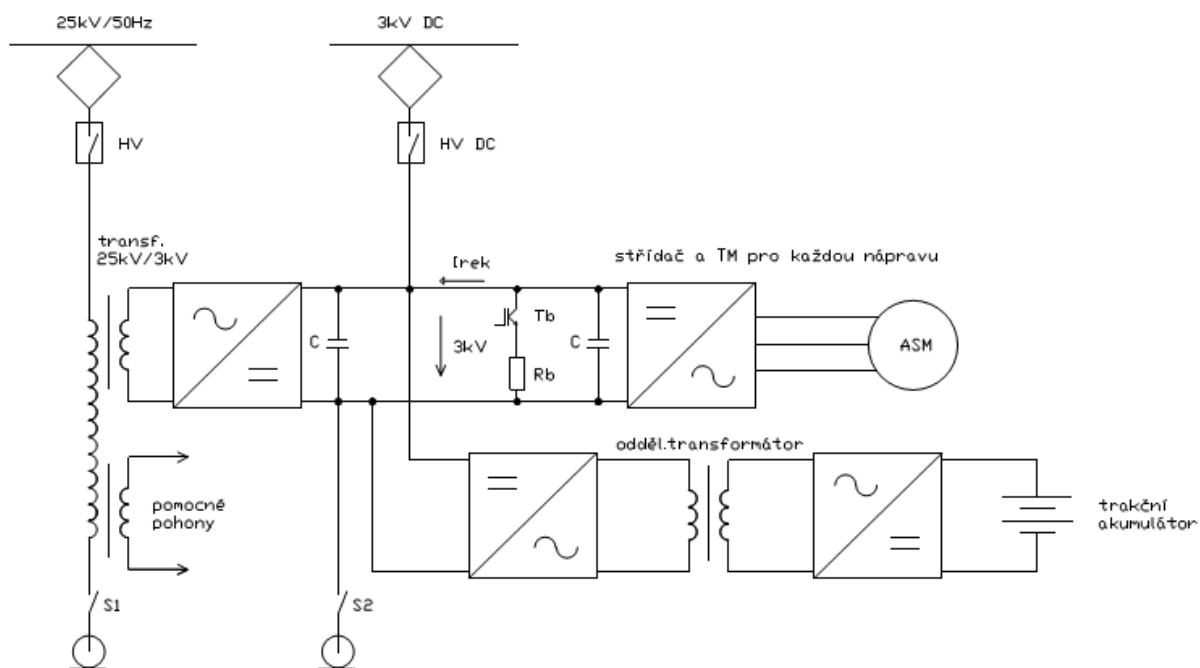
a to v případě, když se motor dostane do generátorické oblasti momentové charakteristiky. Obecně se předpokládá, že všechny měniče uvedené na obrázku umožňují zprostředkovat tok energie oběma směry. Vozidlo tak dokáže rekuperovat svou kinetickou energii do daného napájecího systému.

Přepínání jednotlivých napájecích systémů se provádí pomocí vysokonapěťových vypínačů HV a HV DC, respektive pomocí odpojovačů S1 a S2. Na obrázku je rovněž uveden princip napájení pomocných spotřeb, které jsou připojeny na další sekundární vinutí transformátoru. Pokud je jednotka napájena ze stejnosměrné troleje, dojde k přepojení pomocných spotřeb na stejnosměrný meziobvod. V případě, že se vozidlo nachází v režimu elektrického brzdění a stejnosměrná trolej má stejný napěťový potenciál jako meziobvod, tak vozidlo nemůže rekuperovat. Z tohoto důvodu se v meziobvodu vozidla nachází brzdný odpor R_b, ve kterém se maří energie generovaná elektrickým pohonem v případě, kdy není možno rekuperovat do napájecí troleje.

3.1.2 Hybridní kolejové vozidlo s 3kilovoltovým stejnosměrným meziobvodem

V případě připojení akumulátorové baterie na meziobvod 3 kV musí být z důvodu bezpečnosti zajištěno její galvanické oddělení a její provoz na napětí nanejvýše v okolí 1000 V.

Na obrázku č. 9 je znázorněn návrh dvouzdrojového drážního vozidla, do jehož stejnosměrného meziobvodu je, na rozdíl od běžné dvousystémové jednotky, jejíž funkce byly vysvětleny v kapitole č. 3.1.1, připojen akumulátor elektrické energie. Pokud má akumulátor na svých svorkách nižší napětí, nežli se nachází ve stejnosměrném meziobvodu, tak je třeba akumulátor od stejnosměrného meziobvodu galvanicky oddělit. Důvod nutnosti galvanického oddělení je následující: Představme si, že je trakční akumulátor k stejnosměrnému meziobvodu připojen pouze přes DC/DC měnič, který dokáže napětí zvyšovat i snižovat. Pokud pak dojde k porušení některého z výkonových tranzistorů, dostane se na akumulátorovou baterii vyšší napětí, jež minimálně zapříčiní zničení baterie. V případě, že se jedná o baterii typu Lithium-ion, dokonce dojde k destrukci baterie, z čehož vyplývá obrovské riziko pro osoby pohybující se v blízkém okolí elektrické jednotky. Z uvedených skutečností je zřejmá nutnost galvanického oddělení akumulátoru od stejnosměrného 3kV meziobvodu nepřímým stejnosměrným měničem s vloženým transformátorem.



Obrázek 9 - Vozidlo s 3 kV stejnosměrným meziobvodem; baterie připojena pomocí oddělovacího transformátoru

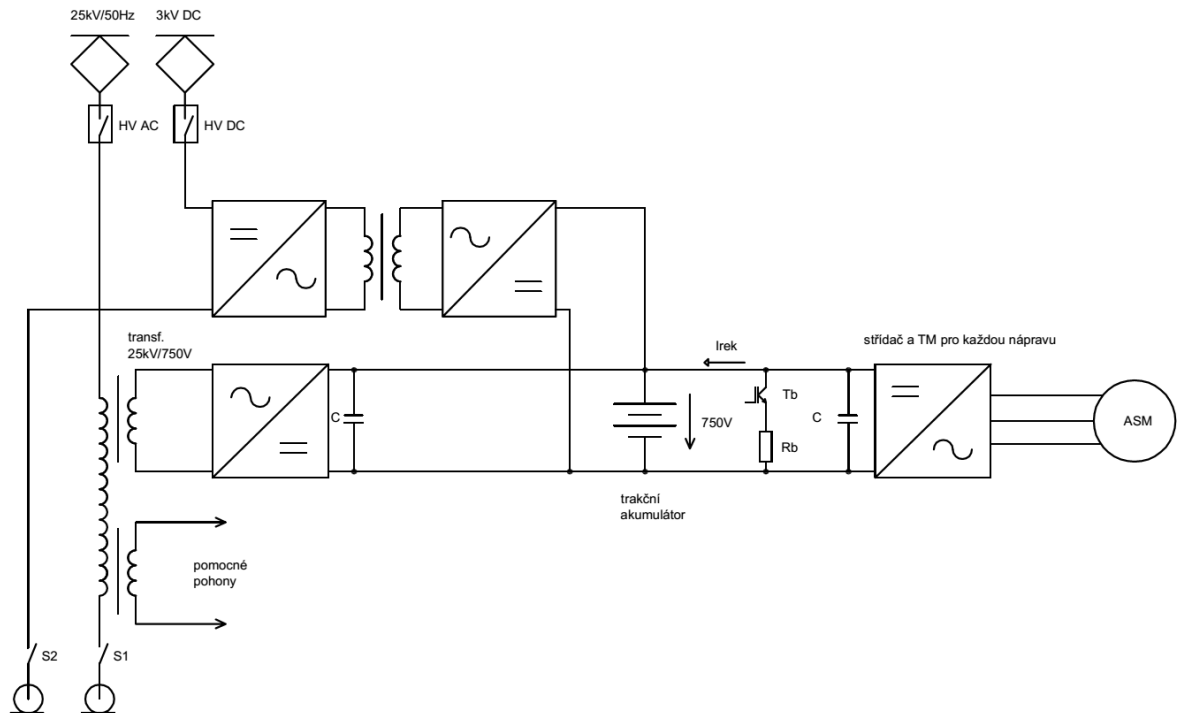
Z výše uvedeného schématu je jistě zřejmé, že umožňuje dobíjení baterií z troleje i rekuperaci nashromážděné kinetické energie zpět do baterií, případně do troleje, pokud pod ní vlak jede a v baterii již není volná kapacita. Nevýhodou tohoto schématu je nutnost instalace oddělovacího transformátoru, na němž vzniká významná energetická ztráta. Jinak řečeno, v tomto zapojení významně klesá účinnost řetězce zdroj – trakční motor, což přímo koreluje s cenou trakční výzbroje. Volba napětí meziobvodu 3 kV každopádně přináší zvýšení pořizovacích nákladů na vysokonapětovou elektrickou instalaci a měničovou techniku.

3.1.3 Vozidlo se 750 voltovým stejnosměrným meziobvodem

3.1.3.1 Varianta A

Měnič je v této variantě mezi stejnosměrným meziobvodem a 3 kilovoltovou trolejí. Z důvodu bezpečného oddělení akumulátoru od vysokého napětí musí být měnič nepřímý s galvanickým oddělením transformátorem. Akumulátorová baterie je tak přímo připojena do stejnosměrného meziobvodu. Nabíjení a vybití akumulátoru se v tomto zapojení realizuje provozem dvojice měničů, která je znázorněna na obrázku č. 10. Kupříkladu, pokud jede vozidlo pod stejnosměrnou trolejí a akumulátorová baterie je vybita, tak je jednak napájen motor vozidla prostřednictvím trakčního střídače, přičemž je regulováno napětí ve stejnosměrném meziobvodu tak, aby docházelo k nabíjení baterie přesně dle stanovené

nabíjecí charakteristiky baterie. Regulační systém tedy musí pomocí stejnosměrného měniče mezi trolejí a meziobvodem držet definovaný proud a výkon, jinak by nutně docházelo k přetěžování baterie, respektive ke zkracování její životnosti. Pokud bude baterie odebírat menší proud, než je požadován pro brzdění, tak může dojít k rekuperaci do napájecího systému prostřednictvím daného napájecího měniče. Jestliže nepůjde hypoteticky rekuperovat do napájecího systému, tak se aktivuje brzdny odpor, čímž dojde k nevratné ztrátě kinetické energie vlaku.

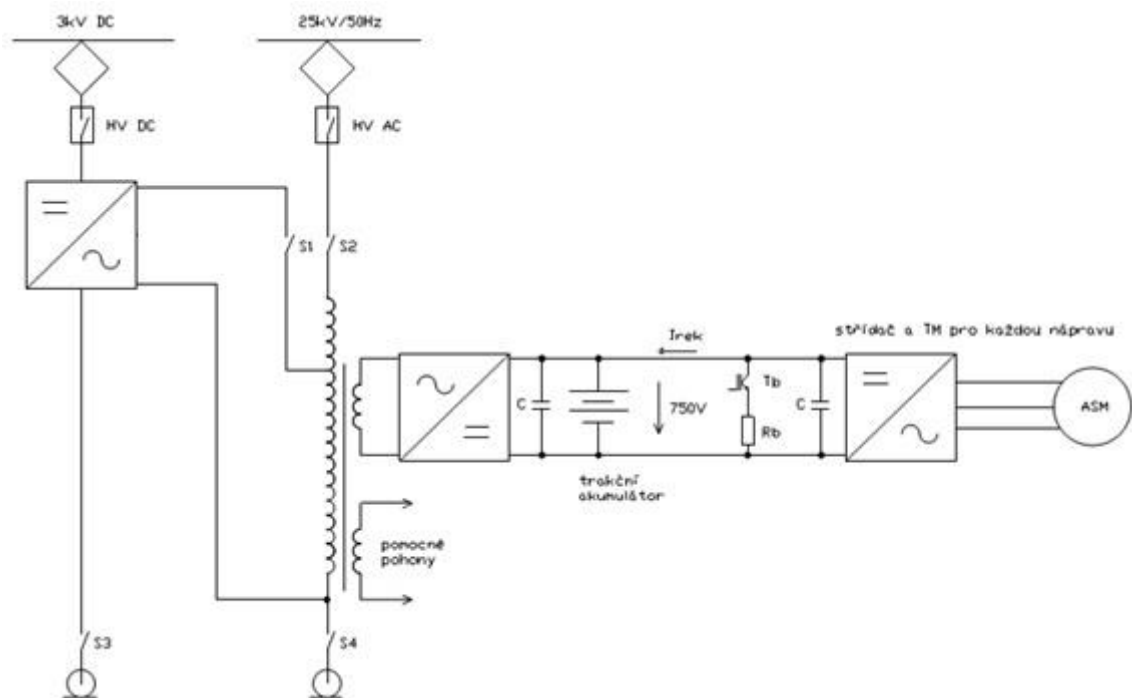


Obrázek 10 - Vozidlo se 750 V stejnosměrným meziobvodem; baterie je připojena přímo do stejnosměrného meziobvodu; stejnosměrný systém je připojen nepřímým stejnosměrným měničem

3.1.3.2 Varianta B

Velmi perspektivní variantu tvoří takové uspořádání trakčního obvodu, kde je akumulátorová baterie opět umístěna do stejnosměrného meziobvodu, ale napětí ze stejnosměrného napájecího systému je tentokrát rozstředáno, a takto upravené je přivedeno na primární vinutí trakčního transformátoru, viz obrázek výše. Jelikož střídač vygeneruje modifikované sinusové napětí ze stejnosměrného napětí nabývajícího hodnoty 3 kV, tak se na primárním vinutí transformátoru využije pouze část závitů, které jsou k dispozici pro transformaci napětí 25 kV. Řízený pulsní usměrňovač potom reguluje proud do stejnosměrného meziobvodu tak, aby docházelo k efektivnímu nabíjení akumulátoru. Pokud jednotka pojedje pod stejnosměrnou trolejí, dojde k sepnutí vypínače HV DC, odpojovačů S1, S3. V tomto režimu musí být rozpojen vypínač HV AC a odpojovač S2 a S4. V případě, že vlak pojedje pod trolejí

napájenou střídavým napětím, tak musí být rozpojen vypínač HV DC, odpojovač S1 a S3. Zapojen bude odpojovač S4, současně s ním musí sepnout vypínač HV AC a odpojovač S2. Dále při čisté akumulátorové jízdě vozidla jsou všechny mechanické kontakty rozpojeny.



Obrázek 11 - Vozidlo se 750 V stejnosměrným meziobvodem; baterie je přímo připojena do meziobvodu; stejnosměrný systém je připojen pomocí střídače

Vozidlo samozřejmě může rekuperovat svou kinetickou energii, neboť budou veškeré měniče, co do toku energie, navrženy obousměrně. Nebude-li během rekuperace plně nabit trakční akumulátor, tak se kinetická energie přesune právě do něho. Tento přesun energie vyreguluje trakční střídač, který tak udrží efektivní brzdny moment motoru. V případě téměř nabité baterie bude možno rekuperovat do napájecího systému jen za předpokladu, že pod ním vlak v tu chvíli pojede. Brzdny rezistor R_b na níže uvedeném obrázku bude možné, vzhledem k vysoké pravděpodobnosti možnosti rekuperace do akumulátorové baterie, dimenzovat jen na velmi malý výkon, rezistor se v podstatě uplatní jen jako vybíjecí odpor kapacity vstupního filtru střídače.

Co se týče výhod a nevýhod tohoto zapojení, tak má oproti předchozím variantám řadu předností. Baterie je umístěna přímo do stejnosměrného meziobvodu, čímž odpadají ztráty na přídavném měniči. Dále je meziobvod velice dobře zabezpečen proti přepětí, a to z obou napájecích systémů. Za provozu mohou být na trolejích vyšší napětí, než jsou napětí jmenovitá, proto musí být plně řízený trakční usměrňovač konstruován tak, aby dokázal stabilizovat napětí ve stejnosměrném meziobvodu elektrické jednotky.

V dalším rozboru bude nadále uvažována pro hybridní vozidlo se jmenovitým napětím meziobvodu 750V, pouze poslední varianta elektrické výzbroje podle obr. 11. Kromě výše uvedených výhod se jedná o modulární koncepci. Modulární koncepce je podporována všemi renomovanými výrobci drážní techniky a umožňuje operativně a s malými náklady modifikovat výzbroj vozidla podle aktuálních podmínek jeho nasazení. Struktura na obr. 11 představuje maximální variantu pro dvousystémové vozidlo určené pro provoz s trolejovým napájením 3kV stejnosměrných, 25kV 50Hz střídavých nebo provoz akumulátorový.

Vynecháním trakčního transformátoru, pulsního usměrňovače a stejnosměrné trakční výzbroje je získáno vozidlo pro čistě akumulátorový provoz. Prostor uvolněný absencí trakčního transformátoru a napájecích měničů je potom možno využít k navýšení kapacity akumulátorové baterie. Též je možno volný prostor osadit dieselaagregátem, z něhož by byla baterie dobíjena. Vzniklo by tak vozidlo podobné klasickému automobilovému hybridu se sériovým uspořádáním hybridního pohonu. Do meziobvodu by mohly být rovněž zavedeny fotovoltaické panely. Navržená modulární koncepce je tedy atraktivní jak pro výrobce, který bude schopen nabízet flexibilní stavebnici širšímu okruhu potenciálních zákazníků, tak pro provozovatele dopravy vzhledem k unifikaci jeho vozidlového parku. Ve výsledku se tyto skutečnosti promítnou příznivě i pro objednavatele veřejné dopravy nutným snížením finanční náročnosti veřejné dopravy a zvýšením její spolehlivosti a komfortu.

Reálnou výhodnost zde navržených koncepcí lze posuzovat pomocí simulačního softwaru, jehož popisem a použitím se zabývají další kapitoly.

3.2 Analýza využitelnosti hybridních kolejových vozidel

Nasazení hybridních kolejových vozidel se předpokládá na tratích, kde jsou v současné době provozována vozidla se spalovacím motorem (např. jednotka řady 854). Přesněji řečeno se jedná o tratě, kde je vozidlo částečně vedeno pod trolejovým vedením a částečně po trati bez trolejového vedení.

Samotné hodnocení využitelnosti hybridního vozidla typu sběrač – akumulátor, lze založit na základním a kvantitativním hodnocení. Z hlediska základního hodnocení se vozidlo posuzuje dle:

- schopnosti vozidla projíždět danou trasu v pravidelném provozu z hlediska výdrže akumulátorové baterie. Velice tedy záleží na návrhu kapacity akumulátorové baterie vozidla. Do úvahy musí být vzata energie, která napájí celý pohonný řetězec, tedy včetně pomocných pohonů.
- Schopnosti vozidla dodržovat jízdní řád. Například při volbě malého transformátoru vozidlo nedodá potřebný výkon pro udržení traťové rychlosti, což v konečném důsledku povede k nedodržení jízdního řádu.

Z kvantitativního hlediska je nutné u hybridního vozidla prošetřit jeho energetické úspory v porovnání s vozidlem dieselovým. Energetické úspory samozřejmě jdou ruku v ruce s úsporami finančními.

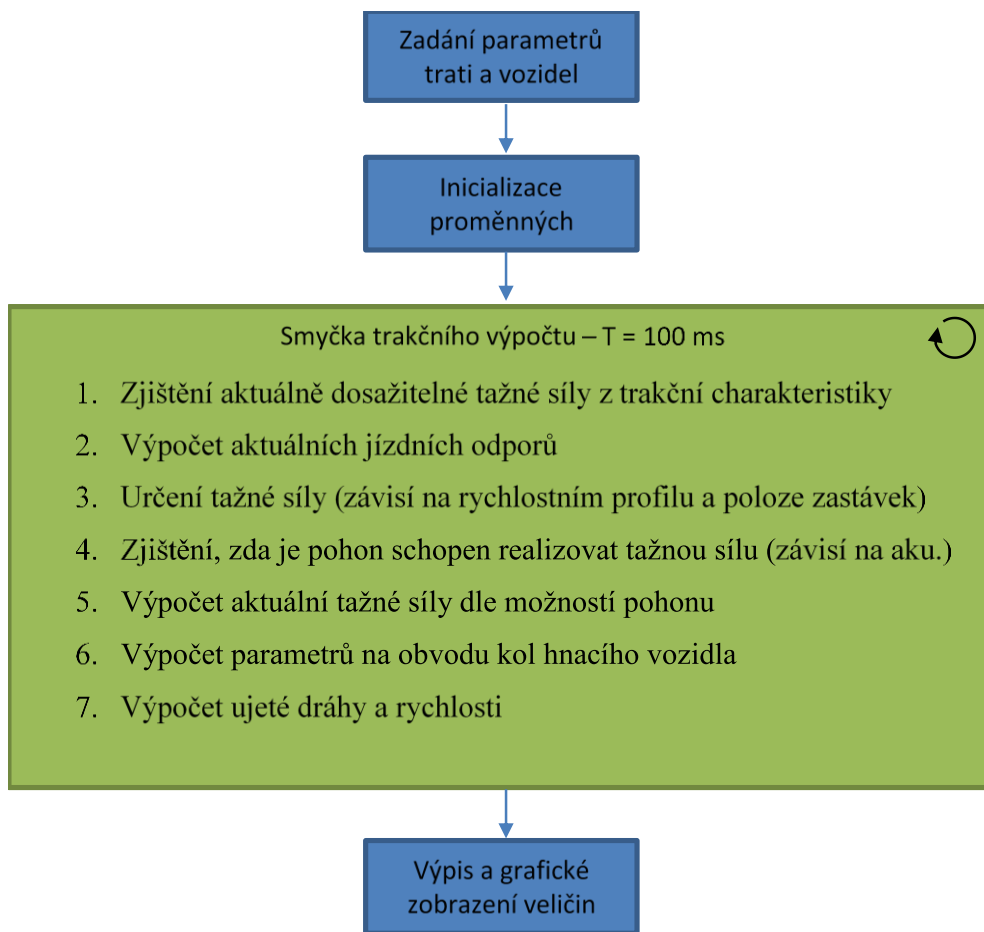
Pro posouzení využitelnosti hybridních vozidel byl použit simulační program sestavený na KEEZ Dopravní fakulty Jana Pernera. Další podkapitola se zabývá stručným popisem tohoto programu. Podrobnosti o daném simulačním programu podává literatura [30].

3.2.1 Výzkum vytipované koncepce hybridního kolejového vozidla na úrovni simulačního modelu

S nástupem moderních počítačových technologií na konci 20. století se stala nezbytnou součástí výzkumu počítačová simulace. Díky ní je možné posuzovat nejrůznější navrhovaná zařízení ještě před stavbou funkčního prototypu, což značně urychluje, zefektivňuje a zlevňuje výzkum dané problematiky. A právě z tohoto důvodu se na katedře KEEZ stále rozvíjí komplexní simulační model [30] vhodný pro posuzování budoucího uplatnění hybridních kolejových vozidel v rámci ČR. V současné době je již hotové výpočetní jádro modelu, které je možno do budoucna dále rozšiřovat a přizpůsobovat novým výzkumným aktivitám, například při zefektivňování funkce pohonného řetězce vozidla, kterým se právě tato práce dále zabývá.

3.2.1.1 Koncepce simulačního modelu

Zjednodušeně lze strukturu modelu znázornit pomocí následujícího schématu.



Obrázek 12 - Struktura simulačního modelu kolejového vozidla

Prvním blokem ve schématu je *Zadání parametrů trati a vozidel*. Tyto parametry se zadávají ručně a vycházejí z reálných parametrů poskytnutých železniční správou a výrobcí vozidel. Pokud se jedná o parametry tratí, tak se zadávají sklony, rychlosti, polohy zastávek, názvy zastávek a poloha změny akumulátorové trakce na elektrickou. Všechny proměnné jsou dvourozměrná pole, s výjimkou změny trakce, která je tvořena proměnnou typu char. Co se týče parametrů vozidel, jedná se o soubor elementárních parametrů, které vozidlo popisují. Například lze jmenovat hmotnost vlaku, adhézní hmotnost vozidla, vozidlové odpory, trakční charakteristiku vozidla, brzdnu charakteristiku a součtový výkon pomocných spotřeb. Celkový výčet parametrů je uveden v příloze této práce, neb nejsou nezbytné pro základní nastínění funkce simulačního programu.

V bloku *Inicializace proměnných* dojde jednak k vytvoření všech proměnných v operační paměti počítače, dále pak k zapsání počátečních hodnot do proměnných

Blok *Smyčka trakčního výpočtu* z principiálního hlediska utváří nejdůležitější součást programu, neboť se v ní periodicky počítají nejrůznější trakční veličiny. Tomuto bloku je tudíž věnována samostatná podkapitola.

Pakliže simulovaný vlak projede celou trať, program vykreslí průběhy veličin charakterizující simulované vozidlo. Tato procedura je v obrázku 12 charakterizována blokem *Výpis a grafické zobrazení veličin*.

3.2.1.2 Princip funkce podprogramu realizujícího trakční výpočty

Velmi důležitým parametrem simulace jízdy obecného kolejového vozidla je perioda, po jejímž uplynutí se počítají veškeré trakční veličiny. V případě simulačního modelu kolejových vozidel se osvědčila perioda 100 ms. Elementární funkci periody a funkci celého programu lze vysvětlit následovně. Po inicializaci proměnných, kdy dojde k načtení redukovaného sklonu, dovolené traťové rychlosti, budoucí dovolené traťové rychlosti, polohy budoucí zastávky a všech parametrů vozidla, se simulovaný vlak nachází v nulové poloze na začátku trati. Program na základě aktuální rychlosti vypočte jízdní odpory vlaku a hnacího vozidla. Na základě vypočtených jízdních odporů, aktuálních parametrů trati a dostupné tažné síly program určí, s jakým zrychlením se vlak uvede do pohybu. Po uplynutí doby 100 ms od rozjezdu dojde primárně k výpočtu ujeté dráhy právě za tuto dobu. Dále například dojde k odečtení energie z akumulátoru, která se spotřebovala na ujetí dílčí vzdálenosti.

Z důvodu plynulého přiblížení se k traťové rychlosti je zrychlení omezeno v devíti krocích.

Dále program hledá místo, kde dojde ke zpomalování či zastavování vozidla. Místo zjistí tak, že porovná dráhu do zpomalení se vztahem:

$$dráha = \frac{cílová\ rychlost^2 - akt.rychlost^2}{-2 \cdot a_{záporné}} \quad (1)$$

Kde $a_{záporné}$ představuje maximální záporné zrychlení vozidla. Jestliže je dráha do zpomalení či zastavení (prodloužená o 25 %) menší nebo rovna pravé straně rovnice, dojde k přepsání hodnoty v proměnné zrychlení a na hodnotu rovnou $a_{záporné}$. Takto simulovaný vlak začne brzdit.

Prodloužením dráhy o 25 % lze uplatnit princip povolení brzdy před zastavením, který strojvedoucí požívá pro dosažení větší plynulosti při zastavování.

Pro zvýšení realističnosti se také v simulaci používá dvoustavové odbrzdění, a to v situaci, kdy rychlost poklesne pod 20% z rozdílu počáteční a koncové rychlosti. Původní

zpomalení je vynásobeno koeficientem 0,3. Pokud rychlost poklesne pod 10 % z rozdílu počáteční a koncové rychlosti, původní zpomalení je vynásobeno koeficientem 0,2. Pokud program zjistí, že vlak nezastaví včas s nastaveným sníženým zpomalením, tak se do proměnné pro zrychlení a zapíše maximální dosažitelné zpomalení.

Nastane-li případ, že by aktuální rychlost překročila traťovou rychlost, tak se proměnná obsahující zrychlení vynuluje. K vynulování rovněž dojde v případě, že by aktuální rychlost byla menší než nula.

Z aktuálního zrychlení nebo zpomalení program spočítá tažnou sílu, jež platí v periodě T dle vztahu:

$$F_T = G_{lok}(r_{vlok} + r_{slok} + r_{olok} + r_{dlok}) + G_{vlak}(r_{vvlak} + r_{svlak} + r_{ovlak} + r_{dlok}) [N] \quad (2)$$

Kde je G tího vozidla, r_v poměrný vozidlový odpor, r_s poměrný odpor ve stoupání, r_o odpor z oblouku a r_d poměrný odpor ze zrychlení. Členy s indexem $xvlak$ platí pro nehnaná vozidla a členy s indexem $xlok$ platí pro lokomotivu.

Ze známé tažné sily je vypočten výkon na obvodu kol. Tento výkon je přepočten přes komponenty pohonného řetězce na výkon zdroje, což může být výkon dodávaný napájecím systémem, výkon dodávaný akumulátorem, či výkon spalovacího motoru. Pomocné spotřeby jsou k celkovému potřebnému výkonu připočteny ve fázi, kdy je znám výkon odebíraný střídačem. V době opačného toku energie, tedy při rekuperaci, jsou pomocné spotřeby kryty střídačem.

Je-li modelované vozidlo napájeno z troleje, tak jeho pohonný systém dostane plný požadovaný výkon, neboť trolej lze považovat za tvrdý zdroj napětí. Přírůstek energie je dán součinem aktuálně odebíraného výkonu z troleje a periody T.

Pokud dojde k přepnutí trakce, vozidlo je dále napájeno z akumulátoru, u kterého se uvažuje maximální proudové zatížení rovné kapacitě akumulátoru v Ah. Samozřejmě lze nastavit jinou maximální proudovou zatížitelnost akumulátoru při nabíjení i vybíjení. Pro co nejdělejší výpočet maximálního vybíjecího výkonu je rovněž uvažován vnitřní odpor akumulátoru a pokles napětí vlivem klesající kapacity.

Součin svorkového napětí a proudu a periody T je přírůstkem energie odebrané (vrácené) z akumulátoru v dané periodě T.

V okamžiku znalosti výkonu zdroje energie je tento výkon přepočítán přes účinnosti pohonného řetězce zpět na obvod kol. Od celkového výkonu jsou na meziobvodu odečteny

pomocné spotřeby, které se ve srovnání s trakční spotřebou napájí přednostně. Tažná síla na obvodu kol F_{pohonu} se určí na základě aktuálního výkonu P_{aktual} dle vztahu:

$$P_{\text{aktual}} = v \cdot F_{\text{pohonu}} \quad (3)$$

Během brzdění dochází k rozdělení brzdné síly na sílu vyvíjenou trakčním pohonem a na sílu vyvíjenou mechanickou brzdou. Brzdná síla od trakčního pohonu je aktivní pouze do minimální rychlosti pro elektrodynamické brzdění, kterou lze v programu nastavit. Při poklesu rychlosti pod minimální mez modelovaný vlak brzdí pouze mechanickou brzdou.

Na základě rovnice (2) je stanoven dynamický odpor vozidla, z něhož je stanoveno aktuální dostupné zrychlení dle vztahu:

$$r_d = 102\xi a \left[\frac{N}{kN} \right] \quad (4)$$

Kde je ξ součinitel rotujících hmot.

Při znalosti skutečného dosažitelného zrychlení je určena nová rychlost dle vztahu:

$$v = v + (a \cdot T). \quad (5)$$

Celková ujetá dráha je pak dána přírůstkem dráhy k dráze doposud ujeté dle vztahu:

$$\text{dráha} = \text{dráha} + (v \cdot T). \quad (6)$$

Ze známého výkonu na obvodu kol je rovněž vypočtem přírůstek energie spotřebované na obvodu kol za danou časovou periodu:

$$E = E + (P_{\text{aktual}} \cdot T). \quad (7)$$

Po proběhnutí celé výpočetní smyčky programu jsou zjištěné velikosti veličin uloženy do polí, jejichž obsah je nakonec vyneseno do grafů viz blok *Výpis a grafické vynesení veličin* na obrázku 12.

3.2.1.3 Algoritmus určení spotřeby nafty u srovnatelného dieselelektrického vozidla

Tento algoritmus byl vytvořen na základě potřeby porovnání hybridního vozidla s trakčně ekvivalentním vozidlem s dieselelektrickým přenosem výkonu. Je nasnadě, že hybridní vozidlo dokáže rekuperovat do trakčního akumulátoru. Naproti tomu vozidlo s dieselelektrickým přenosem, u něhož je pohonný řetězec tvořen spalovacím motorem, alternátorem, usměrňovačem, stejnosměrným meziobvodem a trakčním motorem, může

rekuperovat jen do pomocných spotřeb, které jsou uvažovány na úrovni 40 kW. Pokud brzdný výkon generovaný trakčními motory excituje úroveň 40 kW, musí být zbylá energie nenávratně zmařena na brzděném odporu.

Výkon na obvodu kol daného vozidla je uvažován 1 000 kW. Zohledněním účinnosti trakčního pohonu 0,8 a připočtením příkonu pomocných spotřeb 40 kW vychází maximální výkon ve stejnosměrné sběrnici 1 290 kW.

Pro obdržení výkonu spalovacího motoru je třeba zohlednit uvažovanou účinnost trakčního alternátoru 94 %, účinnost usměrňovače 98 % a pomocné spotřeby spalovacího motoru, které odpovídají 3 % primárního výkonu motoru. Po zohlednění výše uvedených účinností vychází výkon spalovacího motoru na úrovni 1 450 kW, což odpovídá běžně dostupným motorům se jmenovitým výkonem 1 500 kW.

Spotřeba motoru je uvažována 0,8 % výkonu spalovacího motoru, tedy 12 l/h. Gradient spotřeby je uvažován 0,231 l/kWh. Ve výpočetním programu odpovídá závislost spotřeby na odebíraném výkonu následovně:

$$\text{spotřeba} \left[\frac{l}{hod} \right] = (P_{DC} \cdot 0,233) + 12 \quad (8)$$

Kde P_{DC} [kW] je aktuální výkon v meziobvodu.

V každé iteraci programu dojde k výpočtu množství nafty spotřebované ekvivalentním dieselelektrickým vozidlem. Jednotlivé iterační přírůstky spotřeby jsou v průběhu programu sčítány a po simulaci graficky interpretovány.

3.2.2 Popis vybraných tratí a vozidla pro simulace

Pro analýzu využitelnosti byly vybrány tratě na střídavé napájecí soustavě 25 kV a 50 Hz, neboť bude dále také řešena optimalizace transformátoru. Česká republika má jednu z nejhustších železničních sítí v Evropě. S tím se pojí i množství vlakových tras vedených po tratích, kde se stýká závislá trakce s trakcí nezávislou. Pro zanalyzování využitelnosti hybridních kolejových vozidel v podmínkách ČR došlo k simulaci provozu hybridního vozidla a vozidla se spalovacím motorem na následujících tratích:

- Trať Brno – Hrušovany nad Jevišovkou
 1. Úsek Brno – Hrušovany nad Jevišovkou s uvažovanou elektrizací Brno – Moravské Bránice
 2. Úsek Brno – Ivančice a zpět s uvažovanou elektrizací Brno – Střelice
 3. Úsek Brno – Moravský Krumlov a zpět s uvažovanou elektrizací Brno – Střelice
 4. Úsek Brno – Miroslav a zpět s uvažovanou elektrizací Brno – Střelice
- Trať Brno – Jihlava
 1. Úsek Brno – Náměšť nad oslavou a zpět s uvažovanou elektrizací Brno – Zastávka u Brna
 2. Úsek Brno – Třebíč a zpět s uvažovanou elektrizací Brno – Zastávka u Brna
 3. Úsek Brno – Třebíč a zpět s uvažovanou elektrizací Brno – Rapotice
 4. Úsek Brno – Třebíč a zpět s uvažovanou elektrizací Brno – Náměšť nad Oslavou
- Trať Brno – Uherské hradiště
 1. Úsek Brno – Uherské Hradiště a zpět s uvažovanou elektrizací Brno – Blažovice a Veselí nad Moravou – Uherské Hradiště
 2. Úsek Brno – Uherské hradiště a zpět s uvažovanou elektrizací Brno – Slavkov u Brna a Bzenec – Uherské hradiště
 3. Úsek Brno – Uherské Hradiště a zpět s uvažovanou elektrizací Brno – Bučovice a Kyjov – Uherské Hradiště
 4. Úsek Brno – Kyjov a zpět s uvažovanou elektrizací Brno – Blažovic

Některé z výše uvedených tras jsou stejné, ale uvažuje se jiný předěl závislé a nezávislé trakce, čímž vznikne jiný poměr jízdy, respektive doby dobíjení, pod trolejí, a jízdy mimo trolej. Tato rozvaha vznikla na základě výzkumu prováděného pro Jihomoravský kraj [30]. V současné době totiž na některých úsecích u výše uvedených tratí elektrizace chybí, nicméně do budoucna se s elektrizací uvažuje.

Před samotnou simulací bylo nutno na základě traťových parametrů poskytnutých správou železniční dopravní cesty (někdy jen ve formátu pdf) sestavit pro jednotlivé tratě

soubory, jež obsahují profil redukovaného sklonu, rychlostní profil a polohy zastávek. Sestavení takto komplexní databáze bylo časově velice náročné a zhruba z devadesáti procent se sestavováním souboru zabýval autor této práce.

V rámci simulací bylo nutné dané trať projíždět definovaným vozidlem. Pro simulace se jako nejvýhodnější jevila dvouvozová trakční jednotka. Použití více vozové jednotky na daných tratích by neodpovídalo počtu přepravovaných cestujících a neúměrně by tak zvýšilo pořizovací náklady. V případě vyššího počtu cestujících se již vyplatí danou trať elektrifikovat, viz [30]. Parametry vozidla použitého při simulacích jsou následující:

- Dvouvozová souprava
- Maximální rychlost 160 km/h
- Hmotnost 110 t (55 t adhezních)
- Trakční výkon 1600kW
- Uspořádání Bo' 2' + 2' Bo '
- Napájecí systém 25kV/50Hz, 3kVDC, aku
- Kapacita akumulátoru 750kWh
- Typ a uspořádání akumulátoru KOKAM LIPOL SLPB80460330H;
0,55mΩ na článek, 203 článků/10 paralelních větví
- Nejnižší rychlost el. brzdění 5km/h
- Trvalý příkon pomocných spotřeb 50kW
- Součinitel rotujících hmot 1,045
- Průměr kol 0,81m
- Převod nápravové převodovky 3,875
- Jízdní odpor vlaku $0.752 + 0.0022 v + 0.0003 v^2$

Uspořádáním pohonu vozidla odpovídá hybridnímu vozidlu s optimální konfigurací pohonného řetězce, jenž je znázorněn na obrázku 11 v kapitole 3.1.3.2.

3.2.3 Energetická analýza jízdy hybridního vozidla a dieselového vozidla po jednotlivých tratích na základě simulačních výstupů

Ve výchozí studii pro Jihomoravský kraj [31], kterou zpracovávala KEEZ Dopravní fakulty Jana Pernera, byl zvolen akumulátor s kapacitou 750 kWh a tento akumulátor je dále v simulacích používán. Velikost akumulátoru byla stanovena na základě provedených simulací, kde byly zohledněny jak obrat vozidla, tak i čekání vozidla ve stanici závislé trakce z důvodu dobíjení akumulátoru, tak i ztráty na akumulátoru. Kromě navrženého akumulátoru

z výsledků šetření vyplynulo, že je možné z hlediska obratu ve stanici závislé trakce sestavit jízdní řád tak, aby bylo možno akumulátor dobít před dalším obratem.

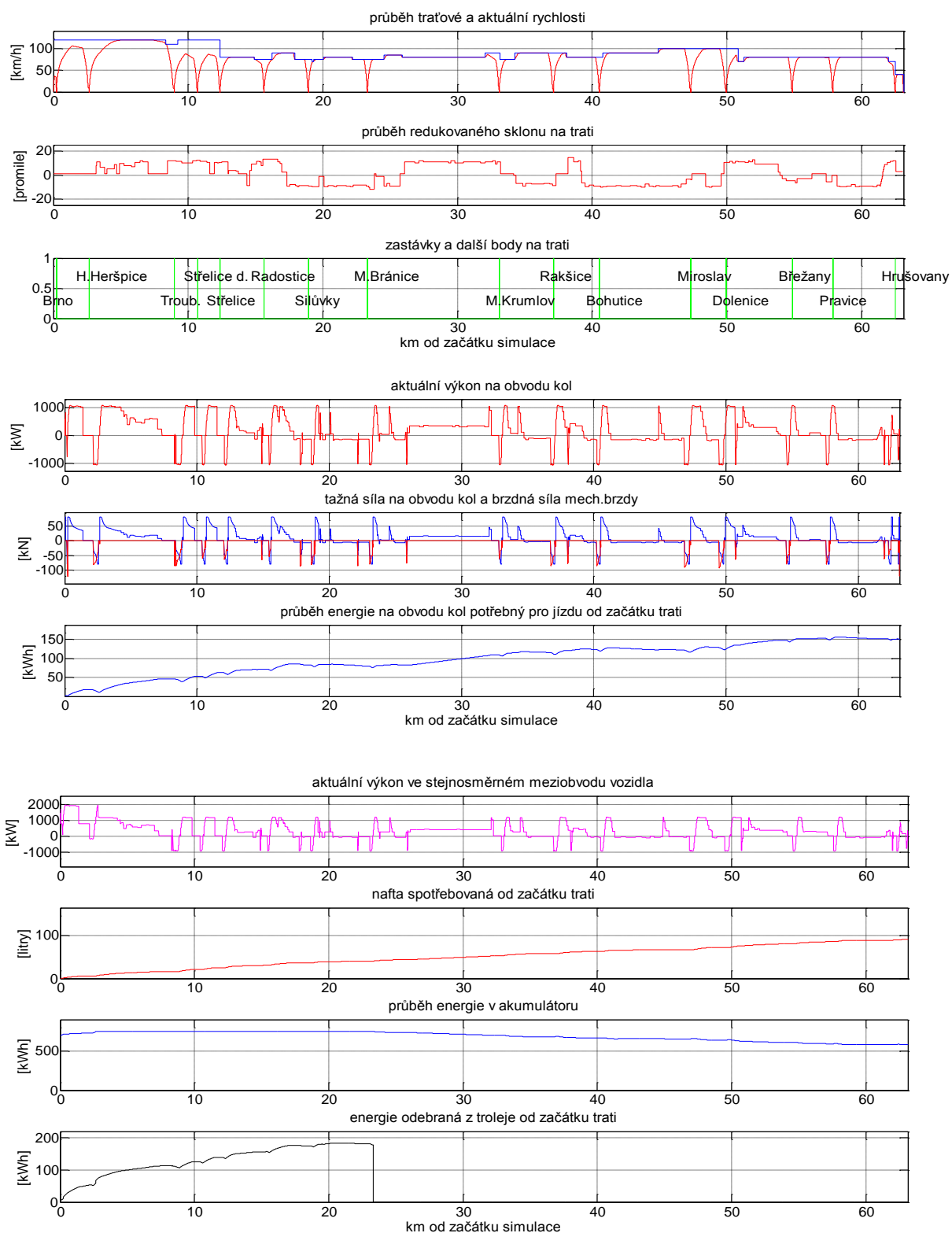
Pro každou trať uvedenou v kapitole 3.2.2 byly provedeny dvě simulace, vždy jedna pro cestu jedním a druhým směrem. Mezi průběhy, které vznikly z jednotlivých simulací, patří:

- vypočtený jízdní řád
- průběh aktuální a traťové rychlosti v závislosti na poloze na trati
- průběh redukovaného sklonu trati v závislosti na poloze na trati
- rozmístění zastávek v závislosti na poloze na trati
- průběh výkonu a tažné síly na obvodu kol v závislosti na poloze na trati
- průběh energie spotřebované na obvodu kol v závislosti na poloze na trati
- průběh výkonu stejnosměrné trakční sběrnice (stejnosměrného meziobvodu) v závislosti na poloze na trati
- průběh vnitřní energie v akumulátoru vozidla v závislosti na poloze na trati
- průběh energie na sběrači vozidla v závislosti na poloze na trati
- průběh spotřeby nafty u ekvivalentního dieselového vozidla

Dále jsou uvedeny příklady výstupů ze simulace, konkrétně se jedná o výstupy pro trať Brno – Hrušovany n. J. s elektrizací Brno – M. Bránice. Obrázek 13 uvádí výsledný jízdní řád a na obrázku 14 se pak nachází jednotlivé průběhy ve formě grafického výstupu ze simulace.

JÍZDNÍ ŘÁD		
traťový km	jméno zastávky	min od začátku jízdy
0.226	Brno	0.8
2.657	H.heršpice	3.6
8.967	Troubsko	8.4
10.692	Střelice dolní	10.8
12.373	Střelice	13.2
15.637	Radostice	16.7
18.923	Silůvky	20.2
23.321	M.Bránice	24.6
33.097	M.Krumlov	32.9
37.121	Rakšice	37
40.542	Bohutice	40.5
47.322	Mirotav	46.1
49.941	Dolenice	49.1
54.851	Břežany	54
57.863	Pravice	57.3
62.49	Hrušovany n. J.	61.8

Obrázek 13 - Jízdní řád pro hybridní vozidlo pro směr Brno - Hrušovany nad Jevišovkou



Obrázek 14 - Průběh aktuální a traťové rychlosti; redukovaného sklonu trati; polohy zastávek; výkonu, tažné síly a energie na obvodu kol; výkonu ve stejnosměrném meziobvodu, spotřeby nafty u srovnatelného vozidla s dieselelektrickým přenosem výkonu; energie v akumulátoru vozidla a energie na sběrači vozidla v závislosti na poloze na trati mezi Brnem hl.n. a Hrušovany nad Jevišovkou

Tabulka 4 - Porovnání spotřeb energií mezi hybridním vozidlem a vozidlem s dieslovým motorem

Trat' *	Zbývající energie v akumulátoru na konci akumulátorového obratu [kWh]	Spotřeba energie z akumulátoru na jeden obrat [kWh]	Celková energie odebraná z troleje (pro jízdu pod trolejí i na dobíjení akumulátoru) [kWh]	Energie v akumulátoru po dojetí zpět do Brna [kWh]	Spotřeba nafty u srovnatelného vozidla na jeden obrat [l]
1	391,7	357,3	630,3	700,2	186
2	591	159	328,3	750	99,1
3	567	183	331	743	102l
4	436,3	313,7	476	608	141
5	588	162	388	750	127,6
6	395	355	602	662	191
7	462	288	588	750	191
8	552,9	197,1	578	750	191
9	329 (v Blaž.), 362 (ve Veselí)	717	1198	566 (v U. Hrad. 570 kWh)	351
10	436 (v Bzenci), 431 (ve Slavkově)	633	1195	750 (v U. Hrad. 727 kWh)	351
11	584 (v Kyjově), 573 (v Bučovicích)	336	1146	750 (v U. Hrad. 750 kWh)	351
12	202	548	617	446	225

Legenda:

- (Celková délka trasy; Délka uvažované elektrizace)
- Trať Brno – Hrušovany nad Jevišovkou
 1. Úsek Brno – Hrušovany nad Jevišovkou s uvažovanou elektrizací Brno – Moravské Bránice (62,5 km; 23,3 km)
 2. Úsek Brno – Ivančice a zpět s uvažovanou elektrizací Brno – Střelice (29,1 km; 12,4 km)
 3. Úsek Brno – Moravský Krumlov a zpět s uvažovanou elektrizací Brno – Střelice (33,1 km; 12,4 km)
 4. Úsek Brno – Miroslav a zpět s uvažovanou elektrizací Brno – Střelice (47,3 km; 12,4 km)
- Trať Brno – Jihlava
 5. Úsek Brno – Náměšť nad oslavou a zpět s uvažovanou elektrizací Brno – Zastávka u Brna (42,1 km; 23,1 km)
 6. Úsek Brno – Třebíč a zpět s uvažovanou elektrizací Brno – Zastávka u Brna (62,5 km; 23,1 km)
 7. Úsek Brno – Třebíč a zpět s uvažovanou elektrizací Brno – Rapotice (62,5 km; 31,2 km)
 8. Úsek Brno – Třebíč a zpět s uvažovanou elektrizací Brno – Náměšť nad Oslavou (62,5 km; 42,1 km)
- Trať Brno – Uherské hradiště
 9. Úsek Brno – Uherské Hradiště a zpět s uvažovanou elektrizací Brno – Blažovice a Veselí nad Moravou – Uherské Hradiště (105,2 km; 35,4 km)
 10. Úsek Brno – Uherské hradiště a zpět s uvažovanou elektrizací Brno – Slavkov u Brna a Bzenec – Uherské hradiště (105,2 km; 52,9 km)
 11. Úsek Brno – Uherské Hradiště a zpět s uvažovanou elektrizací Brno – Bučovice a Kyjov – Uherské Hradiště (105,2 km; 76 km)
 12. Úsek Brno – Kyjov a zpět s uvažovanou elektrizací Brno – Blažovice (66,4 km; 20,4 km)

Na základě odsimulování daných obrátů hybridního vozidla na jednotlivých tratích dostaneme tabulku 4, kde jsou souhrnně uvedeny výsledky simulací. Z výsledků vyplývá, že ve všech případech zvolená baterie s kapacitou 750 kWh dostačovala, a to s dost značnou rezervou, hloubka vybití nepřekročila hodnotu 75 %, což je z hlediska životnosti akumulátoru naprosto dostačující. V případě simulace na trati č. 12 bylo po příjezdu do Brna nutno do baterie dočerpávat hodnotu energie odpovídající 60 kWh, což znamená, že se pobyt ve stanici před dalším obratem prodlouží o přibližně 10 minut. Takové prodloužení by jistě bylo z hlediska tvorby jízdného řádu akceptovatelné a dopravce by se s ním snadno vyrovnal. Dobití baterie na úroveň 100procentního nabití před odjezdem do nového obratu je vhodné z důvodu získání rezervní energie pro případ mimořádností na neelektrifikované trati. Při obratu na tratích č. 9, 10 a 11 došlo k velkému odběru energie z akumulátorové baterie. U tratě č. 9 byla hodnota odebrané energie z akumulátorové baterie za jeden obrat 717 kWh. Čerpání této energie však probíhá ve dvou intervalech, mezi kterými jede vozidlo značnou část trasy pod trolejí a energii do akumulátorové baterie z větší části dorovná.

Simulace byla provedena pro jízdu plným trakčním výkonem, což znamená, že jízdní časy byly dodrženy.

3.2.4 Ekonomická analýza hybridního a dieselelého vozidla

Při ekonomické analýze jsou kvantitativně hodnoceny přínosy vznikající nákupem a provozem hybridního vozidla typu sběrač – akumulátor. Podklad pro ekonomickou analýzu utváří energetická analýza, neboť ta řeší veškeré energetické toky vozidlem. Pro dobré porovnání hybridního vozidla s vozidlem dieselelétrickým musí být samozřejmě primárně porovnána spotřeba energie těchto vozidel. Navíc však musí nutně dojít ke kalkulaci opotřebení akumulátorů vlivem provozu hybridního vozidla, což znamená, že je třeba počítat s pozdější výměnou akumulátorové baterie. V případě dieselelétrického vozidla je třeba počítat s údržbou spalovacího motoru, jakožto primárního zdroje energie. Dále je problematika nastíněná metodikou hodnocení ekonomického přínosu hybridního vozidla podrobněji rozpracována.

Před samotným výpočtem nákladů na provoz hybridního vozidla je třeba znát parametry akumulátorové baterie, cenu jednoho článku baterie a cenu za 1kWh energie odebranou na sběrači vozidla. Přičemž jednotlivé parametry jsou podrobně definovány v literatuře [30]. Podrobný výčet nutných údajů je následující:

- Cena 1ks akumulátorového článku c_e [Kč]
- Počet článků akumulátorové baterie k

- Účinnost nabíjení akumulátoru η_{nab}
- Účinnost vybíjení akumulátoru η_{vyb}
- Hloubka periodického vybíjení akumulátorové baterie DOD [%]
- Celková kapacita akumulátorové baterie A_{AKU} [kWh]
- Závislost počtu cyklů akumulátorového článku na hloubce vybíjení
- Počet cyklů akumulátorové baterie n
- Cena za 1kWh energie odebrané na sběrači vozidla c_{ES} [Kč]

Pro měrnou cenu akumulátorů v Kč/kWh platí c_{en} :

$$c_{en} = \frac{c_e \cdot k}{A_{AKU}} \quad (8)$$

Cenu opotřebení akumulátorové baterie u v Kč na prošlou kWh lze vypočítat dle vztahu:

$$u = \frac{c_{en}}{n \cdot \frac{DOD}{100}} \quad (9)$$

Při jízdě hybridního vozidla se akumulátorová baterie periodicky vybíjí a nabíjí, čímž se na vnitřním odporu akumulátoru ztrácí energie. Tyto ztráty je nutné započítat do ceny akumulované energie. Celkové náklady v Kč na 1 kWh energie odebrané z akumulátoru lze vyčíslit dle vztahu:

$$c_{enAKU} = \frac{c_{ES}}{\eta_{nab} \cdot \eta_{vyb}} + u \quad (10)$$

Například při uvažování ceny energie odebrané na sběrači $c_{ES} = 2,60$ Kč a hloubky vybíjení 40% až 80%, vyjde dle [30] cena jedné kilowatthodiny energie pro články LFP při započtení opotřebení článků přibližně 6,50 Kč až 7,30 Kč. Cena se však různí pro jednotlivé tratě, neboť se různí i hodnota DOD .

Na základě simulačního programu, jenž poskytne hodnotu energie odebrané z troleje W_{ES} [kWh] a hodnotu energie dodané akumulátorem W_{AKU} [kWh], lze vypočítat celkovou cenu energie c_{celk} [Kč] dle vztahu:

$$c_{celk} = W_{ES} \cdot c_{ES} + u \cdot W_{AKU} \quad (11)$$

Z hlediska porovnání hybridního vozidla s vozidlem dieselelektrickým je v tuto chvíli třeba zjistit množství spotřebované nafty spalovacím motorem dieselelektrického vozidla za jeden obrat, z čehož lze následně jednoduše dopočítat cenu za spotřebovanou naftu. Problematiku algoritmizace spalovacího motoru pro simulaci řeší kapitola 3.2.1.3.

Stejně jako u akumulátorů, tak i u spalovacího motoru, je třeba zohlednit cenu za údržbu motoru. Samotnou údržbu lze rozdělit na:

- Preventivní
- Korektivní

Preventivní údržba se zakládá na servisních intervalech udaných výrobcem konkrétního motoru. Jedná se například o pravidelné výměny motorového oleje, filtrů, těsnění a rozvodů. Do nákladů na preventivní údržbu je nutno rovněž započítat náklady na rozbor oleje a nemrznoucí směsi. Příklady preventivních prohlídek a jejich intervalů jsou uvedeny dále v tabulce 5.

Tabulka 5 – Servisní intervaly preventivních prohlídek

Název prohlídky	Servisní interval [km]
Provozní ošetření	2000
Periodická oprava malá	16 000
Periodická oprava velká	150 000
Periodická oprava vyvazovací	350 000
Periodická oprava hlavní	800 000

Ke korektivní údržbě dojde, pokud dojde k poruše na motoru v pravidelném provozu. Mezi nejčastější závady, jež řeší korektivní údržba, patří:

- Zadření či přidření některého z válců
- Závada mazací soustavy
- Zadření ložiska
- Defekty gumových dílů (hadice, řemeny)
- Závady palivové soustavy (nizkotlaké palivové čerpadlo, palivové potrubí)
- Závady na vysokotlaké větvi palivového systému (vstřikovací ventily)
- Závady na vstřikovacím čerpadle
- Závady trakčního alternátoru
- Závady konstrukčních částí motoru
- Závady sensorové techniky
- Závady přepínání

Zanedbání preventivní údržby samozřejmě vede k větší poruchovosti spalovacího motoru a tím pádem k větším nákladům za zvýšenou korektivní údržbu.

Udržovací náklady spalovacího motoru byly dle literatury [33] vyčísleny na hodnotu 0,8 Kč/kWh. Udržovací náklady lze při znalosti energetické vydatnosti paliva 200g/kWh a jeho hustoty 0,83kg/l přepočítat na jeden litr paliva. Cena údržby na jeden litr paliva potom činí 3,3 Kč/l.

Výsledná cena za provoz spalovacího motoru c_{celk_obrat} je tedy dána cenou pohonných hmot a cenou za údržbu vozidla, což se dá pro jeden traťový úsek projížděný jednotkou se spalovacím motorem vyjádřit vztahem:

$$c_{celk_obrat} = V_{obrat} \cdot (c_{nafta_litr} + c_{udrzba_litr}) \quad (12)$$

Kde je:

V_{obrat} [l] – množství spotřebované nafty na jeden obrat,

c_{nafta_litr} [Kč/l] – cena jednoho litru nafty (uvažováno 28 Kč/l),

c_{udrzba_litr} [Kč/l] – cena za údržbu (uvažováno 3,3 Kč/l).

Na základě výše uvedené metodiky je dále uvedena tabulka s náklady na provoz a údržbu porovnávaných vozidel, jež vychází z výsledků simulací uvedených v kapitole 3.2.3.

Tabulka 6 - Porovnání nákladů mezi hybridním vozidlem a vozidlem s diesellovým motorem

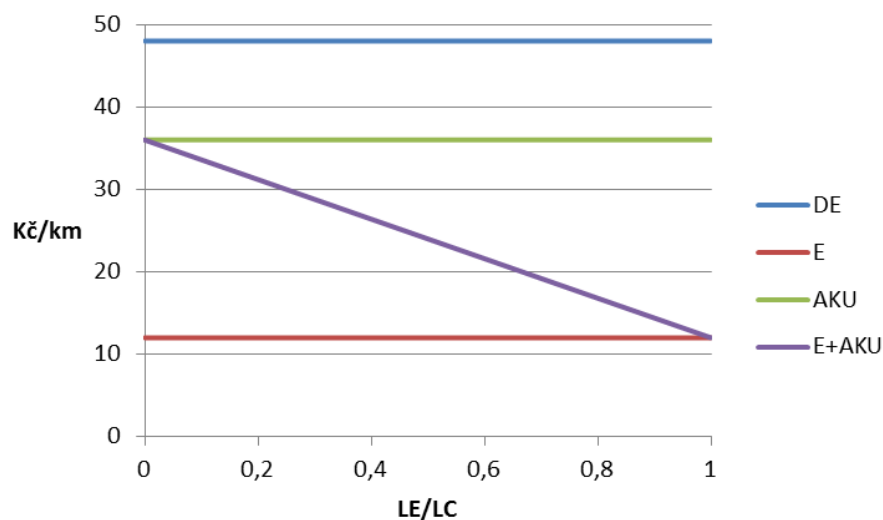
Trat' *	Spotřeba energie z akumulátoru u na jeden obrat [kWh]	Celková energie odebraná z troleje (pro jízdu pod trolejí i na dobíjení akumulátoru) [kWh]	Spotřeba nafty u srovnatelného vozidla na jeden obrat [l]	Celková cena za energii u hybridního vozidla (cena při průměrné hloubce vybití 37,7%/cena při jmenovité hloubce vybití 80%) [Kč]	Cena za provoz srovnatelného vozidla s dieselelektrickým přenosem výkonu [Kč]
1	357,3	630,3	186	3064 / 3275	5822
2	159	328,3	99,1	1487 / 1581	3102
3	183	331	1021	1590 / 1698	3192
4	313,7	476	141	2489 / 2674	4413
5	162	388	127,6	1655 / 1750	3993
6	355	602	191	2981 / 3191	5978
7	288	588	191	2678 / 2847	5978
8	197,1	578	191	2289 / 2405	5978
9	717	1198	351	5975 / 6398	10986
10	633	1195	351	5632 / 6006	10986
11	336	1146	351	4320 / 4518	10986
12	548	617	225	3946 / 4270	7042

Legenda:

- (Celková délka trasy; Délka uvažované elektrizace)
- Trať Brno – Hrušovany nad Jevišovkou
 1. Úsek Brno – Hrušovany nad Jevišovkou s uvažovanou elektrizací Brno – Moravské Bránice (62,5 km; 23,3 km)
 2. Úsek Brno – Ivančice a zpět s uvažovanou elektrizací Brno – Střelice (29,1 km; 12,4 km)
 3. Úsek Brno – Moravský Krumlov a zpět s uvažovanou elektrizací Brno – Střelice (33,1 km; 12,4 km)
 4. Úsek Brno – Miroslav a zpět s uvažovanou elektrizací Brno – Střelice (47,3 km; 12,4 km)
- Trať Brno – Jihlava
 5. Úsek Brno – Náměšť nad oslavou a zpět s uvažovanou elektrizací Brno – Zastávka u Brna (42,1 km; 23,1 km)
 6. Úsek Brno – Třebíč a zpět s uvažovanou elektrizací Brno – Zastávka u Brna (62,5 km; 23,1 km)
 7. Úsek Brno – Třebíč a zpět s uvažovanou elektrizací Brno – Rapotice (62,5 km; 31,2 km)
 8. Úsek Brno – Třebíč a zpět s uvažovanou elektrizací Brno – Náměšť nad Oslavou (62,5 km; 42,1 km)
- Trať Brno – Uherské hradiště
 9. Úsek Brno – Uherské Hradiště a zpět s uvažovanou elektrizací Brno – Blažovice a Veselí nad Moravou – Uherské Hradiště (105,2 km; 35,4 km)
 10. Úsek Brno – Uherské hradiště a zpět s uvažovanou elektrizací Brno – Slavkov u Brna a Bzenec – Uherské hradiště (105,2 km; 52,9 km)
 11. Úsek Brno – Uherské Hradiště a zpět s uvažovanou elektrizací Brno – Bučovice a Kyjov – Uherské Hradiště (105,2 km; 76 km)
 12. Úsek Brno – Kyjov a zpět s uvažovanou elektrizací Brno – Blažovice (66,4 km; 20,4 km)

Na základě tabulky 6 shrnující výsledky simulací pro jednotlivé tratě lze konstatovat, že je provoz hybridních vozidel výhodnější oproti provozu vozidel dieselelektrických. S tímto konstatováním souvisí i obrázek 15, jež ukazuje principiální porovnání nákladů na kilometr trati mezi vozidlem dieselelektrickým DE, čistě elektrickým E, akumulátorovým A a hybridním E+AKU. Poměr LE/LC vyjadřuje poměr délky elektrifikace k délce celé trasy.

Obrázek vyplývá z výše popsané metodiky výpočtu nákladů na provoz hybridního kolejového vozidla typu sběrač – akumulátor a rovněž koresponduje s tabulkou 6. Z obrázku je patrné, že provoz akumulátorových vozidel by byl výhodnější oproti provozu vozidel dieselelektrických. Problémem však je velikost akumulátoru, jenž by se do vozidla nezávislé trakce sice vešel, ale jistě by jeho kapacita nestačila pro pokrytí stávajících obrátů, na něž u dieselelektrických vozidel vystačí jedna nádrž nafty. Ještě výhodnější je provoz vozidla elektrického, tedy za předpokladu, že je celý úsek elektrifikován. Na tratích s částečnou elektrifikací nejlépe vychází vozidlo hybridní, a to hlavně na tratích, kde délka elektrifikace převažuje nad délkou neelektrifikované tratě. Hybridní vozidlo má ale ještě jednu výhodu. Po celkové elektrifikaci tratě by vozidlo zbavené akumulátorů mohlo být dál v provozu jen s trolejovým napájením.



Obrázek 15 - Porovnání jednotlivých typů drážních vozidel dle ceny vztažené na ujetý kilometr

3.3 Optimalizace komponent pohonného řetězce hybridního vozidla

V této části se práce zabývá optimalizací transformátoru a akumulátorové baterie. Dále je popsána metodika redukce ztrátové energie pomocí odpojování trakčních motorů. Veškeré optimalizace jsou provedeny na základě již zmíněného simulačního softwaru.

3.3.1 Optimalizace trakčního transformátoru

Potřeba optimalizace trakčního transformátoru zaprvé vychází ze současného trendu, kdy se prosazuje umístění trakčních komponent na střechu vozidla s cílem dosáhnout co největší nízkopodlažnosti a obsaditelnosti jednotlivých vozů. Druhou motivací je zjištění, zda transformátor s nižším výkonem dokáže současně uspokojovat potřebu pohonu a dobíjet akumulátorovou baterii.

Cílem optimalizace tedy je ověřit, zda relativně malý transformátor dokáže uspokojit trakční potřeby vozidla a ostatní pomocné potřeby, včetně nabíjení akumulátoru. Pokud bude transformátor dimenzován na nižší výkon, než je maximální součtový výkon odebíraný z transformátoru, tak bude nutně docházet k přetěžování transformátoru. K tomuto přetěžování však bude prakticky docházet jen při současném nabíjení a jízdě výkonem pod trolejí. Předpoklad je tedy takový, že bude střední hodnota přenášeného výkonu transformátorem relativně nízká a transformátor se bude dát přetěžovat.

Simulace pro tyto testy byly provedeny na následujících tratích:

1. Trať Plzeň – Tachov, kde je elektrizován úsek Plzeň – Planá u Mariánských lázní
2. Trať Plzeň – Bezručice, kde je elektrizován úsek Plzeň – Pňovany
3. Trať Brno – Ivančice, kde je uvažována elektrizace úseku Brno – Střelice

Optimalizační hypotézy potvrzuje tabulka 7, jejíž hodnoty byly sestaveny na základě simulace daného vozidla osazeného transformátorem s maximálním výkonem 2 200 kW. Při simulaci bylo opět využito vozidlo s uspořádáním pojezdu Bo' 2' + 2' Bo' a trakčním výkonem 1 600 kW. Podrobné parametry vozidla jsou uvedeny v kapitole 3.2.2. Byly uvažovány dva typy transformátorů, jednak transformátor se jmenovitým výkonem 1 650 kW a transformátor s výkonem 2 500 kW, oba transformátory je možno krátkodobě přetížit o 33 %. Samotné simulační jízdy byly tedy pro každou trať vždy čtyři. Vždy byly provedeny dvě simulace pro jeden typ transformátoru. U prvního typu simulace byla preferována trakce a u druhého typu simulace bylo preferováno dobíjení trakčního akumulátoru.

Tabulka 7 – Vliv sníženého výkonu transformátoru na jízdní dobu či dobíjení, dle dané preference (tabulka platí pro transformátor s maximálním výkonem 2 200 kW)

Trať	Poměrná doba zatížení transformátoru (max. výkon 2200kW) na více než 75%	Maximální výkon transformátoru 2200kW	
		Prodloužení nabíjení z důvodu preference trakce	Prodloužení jízdní doby z důvodu preference dobíjení
Plzeň - Tachov-Plzeň	7%	0,4min	není
Plzeň - Bezručovice - Plzeň	23%	0,1min	1 min
Brno - Ivančice - Brno	20,1%	1,1min	1 min

Z tabulky 7 zcela jednoznačně vyplývá, že snížení výkonu transformátoru o 2/3 nepůsobí větší problémy při splňování stávajícího jízdního řádu. Pokud je preferována trakce, tak je nabíjení v nejhorším případě prodlouženo o 1,1 minuty, což se dá naprosto s přehledem zapracovat do obratu vozidla. To samé platí při preferenci dobíjení, kde došlo k prodloužení jízdní doby o minutu. Z výsledků simulací vyplývá, že transformátor s nižším výkonem dokáže spolehlivě napájet trakci i dobíjet akumulátorovou baterii, neboť procentuálně byl transformátor přetěžován jen 20,1 % jízdní doby. Podrobné výsledky simulací jsou uvedeny v příloze.

3.3.2 Optimální využívání počtu trakčních motorů během jízdy vozidla

Známou vlastností asynchronního motoru je, že jeho účinnost dosahuje svého maxima, pokud motor odebírá výkon blízký jmenovitému. S klesajícím výkonem potom klesá i účinnost motoru. A právě tento fakt utváří podstatu myšlenky, kdy se u vozidla řídí počet zúčastňujících se motorů na trakci vozidla.

Při sledování jízdy uvažované jednotky, například na obrázku 14, je zřejmé, že je maximální výkon na obvodu kol ve chvíli, kdy vlak ukončuje rozjezd. Při jízdě ustálenou rychlostí po rovinaté trati potom motorem odebíraný výkon dosahuje pouze desítek procent jmenovitého výkonu. Lze předpokládat, že pokud by v situaci, kdy je nízká potřeba výkonu pro trakci vozidla, došlo k odpojení například poloviny motorů, tak by vlivem absence ztrát naprázdno odpojených motorů a lepšího využití zbývajících motorů poklesla spotřeba energie. A právě spotřeba energie je kritická pro prodloužení dojezdu akumulátorového vozidla. Jakákoliv úspora drahé energie v trakčním akumulátoru prodlužuje dojezd vozidla, nebo alespoň zvyšuje kapacitní rezervu pro případ mimořádností vzniklých na trati.

Tato kapitola si klade za cíl potvrdit výše uvedené předpoklady opět na základě simulací. Samotná simulace byla tentokrát nastavena tak, aby při poloviční až maximální požadované tažné síle pokrývaly trakci všechny motory. Pokud tažná síla klesne pod polovinu, tak se trakce účastní pouze polovina motorů. Do simulace vstupují opět parametry uvažovaného vozidla v kapitole 3.2.2. Projížděné tratě jsou následující:

1. Trať Plzeň – Tachov, kde je elektrizován úsek Plzeň – Planá u Mariánských lázní
2. Trať Plzeň – Bezručice, kde je elektrizován úsek Plzeň – Pňovany
3. Trať Brno – Ivančice, kde je uvažována elektrizace úseku Brno – Střelice.”

Výsledky simulací jsou shrnuty v tabulce 8. Detailní výstupy z jednotlivých simulací jsou umístěny v příloze.

Tabulka 8 – Úspory energie pro jednotlivé tratě při uvažování odpojování poloviny trakčních motorů

Trať	Úspora energie při jízdě s možností odpojení ½ TM
Plzeň-Tachov	11kWh / 3,8%
Tachov-Plzeň	24kWh / 8,4%
Plzeň – Bezručice	3kWh / 2%
Bezručice - Plzeň	26kWh / 8,1%
Brno – Ivančice	2kWh / 2,5%
Ivančice - Brno	15kWh / 7,7%
Doba jízdy na ½ TM	78,7%
Průměrná úspora energie při jízdě s možností odpojení ½ TM	5,4%

Na základě výsledků simulací uvedených v tabulce 8 lze říci, že vozidlo se schopností odpinání poloviny trakčních motorů při poloviční zátěži dokáže uspořit průměrně 5,4 % energie oproti vozidlu bez této funkcionality. V dalších kapitolách jsou popsány a experimentálně ověřeny i jiné možnosti, jak uspořit trakční energii. V součtu se pak jedná o velice zajímavou výši úspor, na základě, které by šel buď konstruovat menší a tedy i levnější akumulátor, nebo vozidlo s delším dojezdem. Každopádně lze metodiku odpojování trakčních motorů doporučit do běžného provozu, neboť v konečném důsledku přispěje k lepšímu životnímu prostředí.

3.3.3 Optimální akumulátorový systém

Základním údajem pro stavbu jakéhokoliv bateriového systému je nesporně požadovaná kapacita baterie definovaná ve watthodinách či ampérhodinách. Baterii jako takovou utváří obecně sériově, paralelně, či sérioparalelně řazené elementární akumulátorové články. V dobách minulých se jednalo o články na bázi olova, nicméně dnes se v trakční technice začínají uplatňovat baterie sestavené z lithiových článků, neboť tyto jsou výhodné svým měrným výkonem a kapacitou. Pro hybridní vozidlo popsané v této práci je rovněž uvažován lithiový akumulátor. Návrh optimální baterie ovšem má i svá problematická místa, o nichž pojednává další text, jenž vychází z literatury [34], kde je problematika rozebrána nanejvýše podrobně.

Při návrhu akumulátorové baterie na bázi lithia je třeba věnovat pozornost teplotě, v níž bude daný akumulátor provozován. Teplotní interval, v němž může akumulátor pracovat, je sice poměrně široký, nicméně ideální teplota se pohybuje v okolí 20 °C. Při záporných hodnotách může být sice akumulátor vybíjen, ale pokles jeho kapacity je razantní, nicméně vratný. Pokud se akumulátor vyskytuje v záporných teplotách, tak se nedoporučuje jej vůbec nabíjet, neboť dochází k nevratnému snížení kapacity. Životnost akumulátoru však klesá i s rostoucí teplotou. Například pokud na nezatížený akumulátor působí teplota 60 °C, jeho životnost se zkrátí na jednotky let. Z těchto důvodů je třeba teplotu baterie udržovat v intervalu 20 – 30 °C, což znamená, že daný akumulátorový systém musí být vybaven klimatizační jednotkou, jež se v zimě bude starat o předehřev akumulátoru a v letních měsících nedovolí nárůst teploty nad 30 °C.

Životnost akumulátoru jako taková nezávisí pouze na teplotě, v níž akumulátor pracuje, ale i na počtu vybíjecích a nabíjecích cyklů. Výrobci pro své akumulátorové články definují, při jakém počtu cyklů dojde k poklesu kapacity na 80 %. Počtem cyklů se rozumí úplné vybití a nabití baterie. Životnost je také vysoce závislá na hloubce vybití daného akumulátoru, což znamená, že čím méně je akumulátor vybíjen, tím více se prodlužuje jeho životnost. Rovněž hodnota vybíjecího a nabíjecího proudu ovlivňuje životnost akumulátoru. Nadměrné nabíjení a vybíjení akumulátoru vede k snížení životnosti. Proto, pokud je zvolena vyšší kapacita akumulátoru při totožném odebíraném výkonu, dochází k prodloužení životnosti akumulátoru. V automobilovém průmyslu se dnes uvažuje životnost automobilu pět let, což tedy znamená, že životnost baterie se uvažuje na tuto dobu. Proto při použití akumulátoru na hybridním kolejovém vozidle, lze předpokládat, že po zhruba pěti letech bude nutno akumulátor obnovit.

Lithiové články jsou dnes založeny na několika technologiích. Z hlediska hybridních kolejových vozidel je zajímavá technologie LFP a Li-pol. Technologie LFP je jednak lacinější a potom také bezpečnější ve srovnání s technologií Li-pol. Technologie Li-pol má však oproti LFP větší měrnou energetickou hmotnostní a objemovou kapacitu, což tuto technologii předurčuje pro nasazení v drážní technice.

Z hlediska svorkového napětí při sériovém uspořádání článků v baterii se doporučuje systémové napětí maximálně v okolí 1000 V, protože se u hybridních kolejových vozidel uvažuje napětí ve stejnosměrném meziobvodu na úrovni 750 V.

Komplexní návrh baterie je tedy kompromisem mezi životností, kapacitou a dalšími aspekty. Navíc baterie na bázi lithia potřebují pro jednotlivé články dohlížecí a balanční obvody, které musí být zapojeny do nadřazeného řídicího systému, jež vyhodnotí například překročení teploty, či překročení napětí na některém z článků a patřičně na tento podnět reaguje, například odpojením baterie. Díky podpůrné technice, která je tvořena navíc technologií klimatizace, se v celém systému snižuje hustota uložení energie na řádově 50 - 70 % oproti hustotě uložení energie v samotných člancích akumulátoru.

3.4 Návrh metod pro energetickou optimalizaci jízdy vlaku

V předchozích kapitolách byly rozebrány a simulačně ověřeny metody pro optimalizaci jednotlivých komponent tvořících pohonný řetězec hybridního kolejového vozidla typu sběrač-akumulátor. Tato kapitola si klade za cíl navrhnout metody, které povedou zejména k minimalizaci spotřeby trakční energie vlivem optimalizace jízdní trajektorie vozidla. První část kapitoly se věnuje analytickému popisu ideální jízdní trajektorie kolejového vozidla, s čímž úzce souvisí popis algoritmu pro úspornou jízdu. Druhá část kapitoly pak rozebírá možnosti, jak vylepšit standardní regulační struktury vozidla při zohlednění jízdních odporů. Veškeré zde popsané regulační struktury byly otestovány na reálném kolejovém vozidle za použití systému automatického vedení vlaku, o němž se detailně hovoří v kapitole 3.5.

3.4.1 Charakteristika experimentálního vozidla

Dále uvedené analytické výpočty a formy regulace pro minimalizaci trakční energie se zakládají na technologii experimentálního akumulátorového kolejového vozidla, které má KEEZ k dispozici, a které je velice vhodné pro provádění výzkumu na poli energetického měření. Jedná se o unikátní úzkokolejné vozidlo, jež bylo postaveno v rámci projektu TAČR „Výzkum jízdních vlastností a řízení pohonů trakčních kolejových vozidel s nezávisle otáčivými koly“ v roce 2013. [35] Samotné vozidlo je zachyceno na obrázku 16.

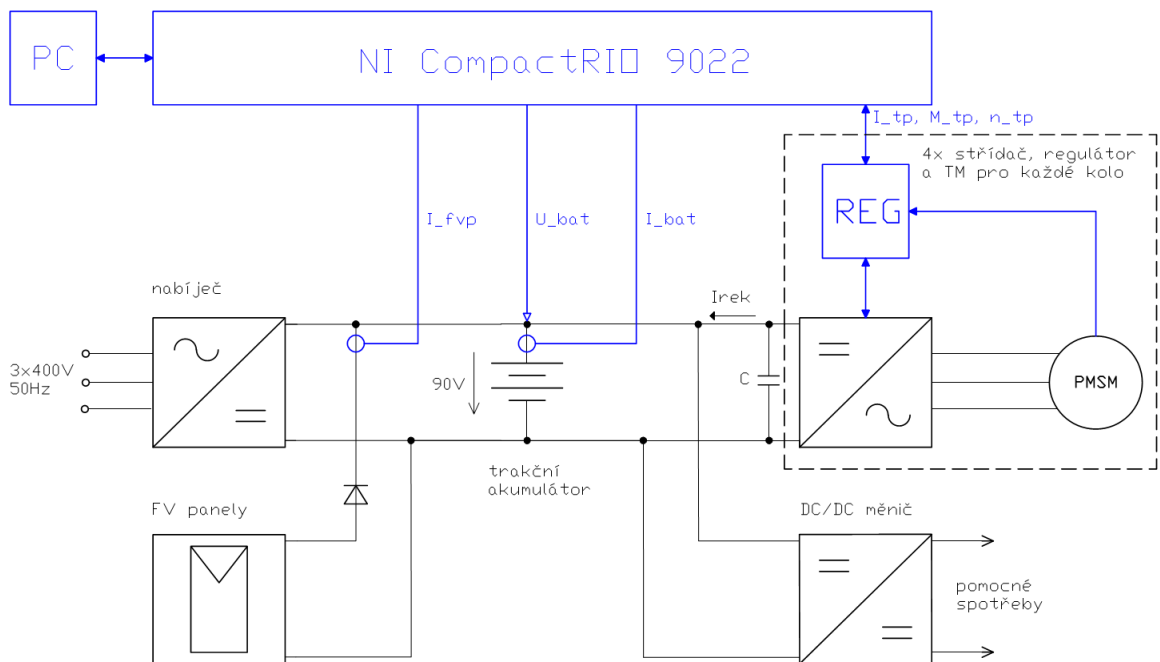


Obrázek 16 - Experimentální vozidlo na experimentální trati

Jedná se o třínápravové vozidlo, kde jsou dvě nápravy hnané, a jedna je běžná. Hnané nápravy jsou rozdělené, čímž je zajištěno individuální otáčení kol. Vozidlo má hmotnost 2200 kg a disponuje výkonem 5 kW. Hlavní zdroj pro pohon utváří 28čláňková baterie typu LIFEP0 s kapacitou 100 Ah a jmenovitým napětím 90 V. Na stejnosměrnou sběrnici jsou

dále napojeny čtyři fotovoltaické panely o součtovém maximálním výkonu 1000 W. Dále je na stejnosměrnou sběrnici napojena čtveřice střídačů pro čtveřici PMSM motorů, měniče pro napájení pomocných spotřeb, jako jsou řídicí a měřicí systém, osvětlení, měniče pro napájení osobních počítačů a nabíječ trakční akumulátorové baterie, viz schéma na obrázku 17.

O řízení pohonu se v základní vrstvě stará čtveřice DSP regulátorů od firmy Škoda. Tyto regulátory ovládají skrze trakční střídače chod motorů typu PMSM.. V nejvyšší vrstvě se pak o celkový chod vozidla stará nadřazený řídicí systém typu CompactRIO 9022 od firmy National Instrumens.



Obrázek 17 - Funkční schéma experimentálního vozidla

Pro popis ideální trajektorie vozidla je nutné znát parametry motoru, respektive základní fyzikální parametry celého vozidla. Všechny potřebné parametry vozidla jsou z tohoto důvodu shrnuty v tabulce 9 a parametry pohonu v tabulce 10.

Tabulka 9 – Základní parametry experimentálního vozidla

Rozchod	600 mm
Uspořádání dvojkolí	Bo'1
Délka	3 000 mm
Šířka	1 900 mm
Rozvor podvozku	800 mm
Hmotnost včetně akumulátorové baterie	1 710 kg
Uvažovaná hmotnost včetně posádky	2 200 kg
Průměr kol	450 mm

Tabulka 10 – Hlavní parametry pohonu experimentálního vozidla

Napětí stejnosměrné silové sběrnice	89,6 V
Jmenovité napětí jednoho článku akumulátorové baterie	3,2 V
Počet článků akumulátorové baterie	28
Kapacita akumulátorové baterie	100 Ah
Odpor článku akumulátorové baterie	0,0015 Ω
Celkový odpor akumulátorové baterie	0,042 Ω
Trvalý moment motoru	52,5 Nm
Maximální moment motoru	80,6 Nm
Trvalý proud motoru	18,5 A
Maximální proud motoru	28,4A
Výkon motoru při 20km/h a 52,5Nm	1297 W
Momentová konstanta motoru	2,8 Nm/A
Napěťová konstanta motoru	183,1 V/1000ot/min
Počet pólpárů motoru	5
Indukčnost fáze statorového vinutí	4 mH
Odpor fáze statorového vinutí za studena	0,24 Ω
Otáčky motoru při 20km/h	236 ot/min
Frekvence napětí statoru při 20km/h	19,7 Hz
Tažná síla na jednom kole při momentu 52,5Nm a proudu 18,5A	233 N
Celková tahná síla vozidla při momentu 52,5Nm a proudu	932 N
Maximální celková tahná síla na kolech při momentu 80,6Nm	1431 N
Konstanta úměrnosti mezi proudem motoru a celk. tahnou silou	50,4 N/A

3.4.2 Optimalizace jízdní trajektorie akumulátorového kolejového vozidla

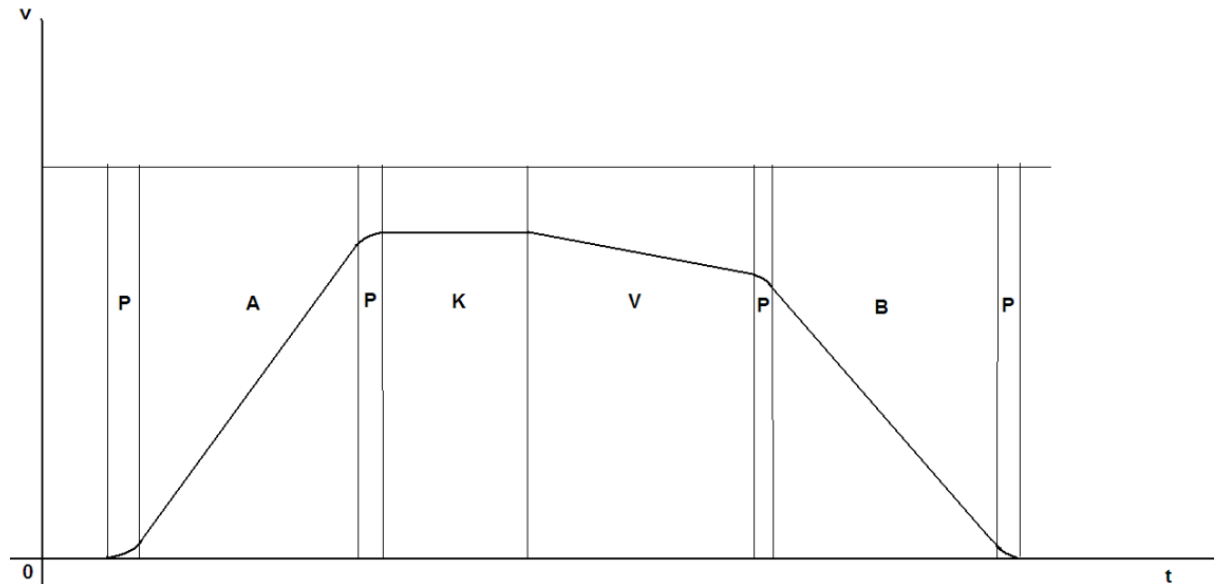
3.4.2.1 Koncepce jízdní trajektorie vozidla

Tato kapitola se zabývá nalezením optimálního rychlostního profilu vozidla. Optimalizaci rychlostního profilu však nelze provádět jen s cílem uspořit energii. Je nutno se zaměřit i na další aspekty, které jsou s optimalizací spojené. Mezi další důležité aspekty patří:

- Minimální spotřeba energie,
- Minimální jízdní doba, tedy dodržení jízdního řádu,
- Pohodlí cestujících, které nezávisí jen na mechanickém stavu vozidla, respektive tratě, ale i na ryvu, třetí derivaci dráhy, s jakou je vozidlo uváděno do pohybu.

Většina metod, které se zabývají návrhem optimální jízdní trajektorie, je postavena na heuristických metodách, jejichž použití závisí na enormní potřebě výpočetního výkonu. Jednotlivé heuristické metody totiž numericky hledají optimum v kombinaci spotřeby energie a dodržení jízdního řádu, přičemž samozřejmě zohledňují i pohodlí cestujících. Tyto přístupy byly představeny v rešeršní části práce a konkrétně je lze dohledat v literatuře [27], [28], [29].

Priorita samozřejmě nemůže být pouze na minimalizaci energie, a tak regulační systém vozidla musí zajišťovat dodržování rychlostního profilu a tím pádem i dodržování jízdového řádu.



Obrázek 18 – Dynamický rychlostní profil vozidla; P – interval s výrazným uplatněním ryvu, A – zrychlování, K – jízda konstantní rychlostí, V – výběh, B – brzdění

Obrázek 18 ukazuje rychlostní profil vozidla rozdělený na významné etapy z hlediska optimalizace a tedy i regulace. Z obrázku je zřejmé, že pro optimální řízení pohonu vozidla, kde bude jedním z kritérií energetická úspora, nelze použít lineární PI regulátor, jako tomu je u průmyslových pohonů, kde se klade důraz na dodržení trajektorie pohybu. Z tohoto důvodu je dobré v jednotlivých částech rychlostního profilu preferovat jiná kritéria.

V intervalu P se významným způsobem mění zrychlení, což znamená, že se zde uplatňuje ryv. Nadměrný ryv může vést v extrémních případech, například při nehodách, k vážnému poškození zdraví vlivem rázové změny pohybu vozidla. V normálních případech ovšem významná změna zrychlení vede ke snížení komfortu cestujících, což není přípustné. V této fázi tedy není možné zohledňovat spotřebu energie, ale komfortní uvedení vozidla do fáze konstantního zrychlování.

Interval A představuje urychlování vozidla, kdy vozidlo získává kinetickou energii, což se pojí s velkými požadavky na výkon, ovšem během relativně krátkého intervalu. Nicméně v této fázi dochází k velkým energetickým odběrům a lze předpokládat, že zde bude prostor pro energetické úspory, protože byl na tento interval brán zřetel při energetické optimalizaci u experimentálního vozidla.

V intervalu K jede vozidlo ustálenou traťovou rychlostí, které se zpravidla využívá pro dodržení jízdní doby. Zde lze uplatňovat různé regulační postupy, nicméně by měla být brán zřetel na minimalizaci energie.

Interval výběhu je vhodný v tom, že pohon nespotřebovává žádnou energii z energetického zásobníku. Ve výběhu dochází k brzdění vozidla vlivem odporových sil působících proti vozidlu, což je velice účinné. Z pohledu jízdního řádu bude výběh aplikován při jízdě s náskokem. Samozřejmě je nutno stanovit místo, kde dojde k aplikaci výběhu z důvodu, aby vlak nakonec nejel se zpožděním. Pokud má vlak zpoždění již ve fázi rozjezdu, tak výběh nemusí být aplikován vůbec.

Posledním intervalem je interval brzdy, kde je jistě nejvýhodnější maximalizovat rekuperaci.

V případě experimentálního akumulátorového vozidla byla navržena energetická optimalizace při rozjezdu vozidla, neboť jak bylo řečeno výše, při rozjezdu je možno očekávat největší úspory. Pročež následující kapitola ukazuje analytický rozbor pro minimalizaci spotřeby energie ve fázi rozjezdu experimentálního vozidla.

3.4.2.2 Analytická optimalizace rozjezdu vozidla

Analytický výpočet optimalizace rozjezdu vozidla je poměrně náročný, a proto z důvodu absolutní řešitelnosti musí být jednotlivé složky výpočtu jednoznačně definovány.

Samotná analýza se tedy zakládá na následujících předpokladech:

- **Výkon ztrát v železe trakčních motorů P_{Fe} [W]** je dán Steinmetzovým vztahem:

$$P_{Fe} = k_{Fe} \cdot B^2 \cdot f^{1,3} \quad (13)$$

Kde je:

k_{Fe} [-] – konstanta úměrnosti,

B [T] – magnetická indukce,

f [Hz] – frekvence magnetického toku.

Magnetický indukční tok a magnetickou indukci lze uvažovat konstantní, neboť u experimentálního vozidla není uvažován režim odbuzování. Pro řešitelnost výpočtu bude dále uvažována první mocnina frekvence. Pro synchronní motor, jež je řízen frekvencí, lze uvažovat úměru mezi napájecí frekvencí a rychlostí vozidla $v \approx f$. Pro výkon ztrát v železe lze tedy psát:

$$P_{Fe} = F_{Fe} \cdot v \quad (14)$$

Kde F_{Fe} [N] představuje část konstantních jízdních odporů zohledňujících stálý magnetický tok a lineární závislost mezi rychlostí vozidla, ztrátovým výkonem a napájecí frekvencí trakčních motorů.

- **Charakter konstantního jízdního odporu – síly**, má rovněž odpor ze stoupání F_s [N]
- **Za těchto předpokladů lze do jednoho členu F_{SK} [N] sloučit konstantní složky jízdních odporů:**

$$F_{SK} = F_K + F_S + F_{Fe} \quad (15)$$

Kde je F_K [N] – konstantní mechanický jízdní odpor vozidla.

Konstantním složkám jízdního odporu odpovídá složka výkonu vozidla P_{SK} [W] dle následujícího vztahu:

$$P_{SK} = F_{SK} \cdot v \quad (16)$$

Kde je v [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] – rychlost vozidla.

- **Odpor vzduchu F_{VZD} [N]** je závislý na druhé mocnině vozidla:

$$F_{VZD} = k_{VZD} \cdot v^2 \quad (17)$$

Kde konstanta vzduchu k_{VZD} [-] v sobě slučuje součinitel tvaru čela, čelní plochu a hustotu vzduchu.

Pro odpovídající výkon P_{VZD} [W] potom platí:

$$P_{VZD} = F_{VZD} \cdot v^3 \quad (18)$$

Při jízdě experimentálního vozidla lze tuto složku zanedbat, neboť maximální rychlost nepřekračuje hodnotu 20 km/h. Při jízdě reálných vozidel je však nutno tuto složku zohlednit.

- **Výkon pro akceleraci P_a [W]** je dán vztahem:

$$P_a = (m + m_{rk}) \cdot a \cdot v \quad (19)$$

Kde je:

m [kg] – hmotnost vozidla,

a [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$] – zrychlení vozidla,

v [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] – rychlost vozidla,

m_{rk} [kg] – redukovaná hmotnost respektující rotující setrvačné hmoty. Vzhledem k relativně malé hodnotě redukované hmotnosti, řádově jednotky %, oproti hmotnosti vozidla, může být redukovaná hmotnost zanedbána. Potom pro akcelerační výkon platí:

$$P_a = m \cdot a \cdot v \quad (20)$$

V případě uvažování pouze konstantních jízdních odporů F_{SK} je při konstantní tažné síle vozidla F_t konstantní i zrychlení a . V případě započtení nekonstantního odporu toto neplatí.

- **Výkon potřebný pro pokrytí Jouleových ztrát ve vinutí motoru P_j** je úměrný druhé mocnině protékajícího proudu I_M [A] a odporu vinutí R_M [Ω], viz vztah:

$$P_j \approx R_M \cdot I_M^2 \quad (21)$$

Pro experimentální vozidlo osazené čtveřicí typově stejných třífázových synchronních motorů s permanentními magnety pro Jouleovy ztráty platí:

$$P_j = 4 \cdot 3 \cdot R_M \cdot I_M^2 \quad (22)$$

Pro případ synchronního motoru je odpor R_M pouze odporem jeho statorového vinutí. V případě asynchronních motorů by bylo navíc třeba uvažovat přepočtený odpor rotorového vinutí. V případě synchronního trakčního motoru provozovaného pouze v oblasti s plným magnetickým tokem je možné uvažovat lineární závislost mezi proudem motoru I_M , jeho momentem M a tažnou silou F_t . Tato úvaha vyplývá z literatury [36]. Pro trakční vozidlo osazené čtveřicí synchronních motorů je tedy možno uvažovat konstantu úměrnosti K_R mezi proudem motoru a tažnou silou vozidla, což reprezentuje vztah:

$$F_t = K_R \cdot I_M \quad (23)$$

Celkově jsou pak Jouleovy ztráty dány vztahem:

$$P_j = 4 \cdot 3 \cdot R_M \cdot \left(\frac{F_t}{K_R}\right)^2 \quad (24)$$

- **Ztrátový výkon v trakčním střídači $P_{DC/AC}$ [W]** je relativně malý, což způsobuje poměrně vysoká účinnost konverze – přes 95 %. Z tohoto důvodu bude v dalších úvahách uvažován nulový ztrátový výkon v trakčním střídači.

- **Pro určení ztrátového výkonu v akumulátoru P_{AKU}** je uvažováno náhradní schéma akumulátorové baterie jako sériová kombinace ideálního zdroje vnitřního napětí U_0 [V] a sériově řazeného vnitřního odporu akumulátorové baterie R_0 [Ω]. Při odběru proudu I_{DC} [A] z akumulátorové baterie vzniká na vnitřním odporu R_0 úbytek napětí a klesá svorkové napětí.
- **Při určení síly odporu v oblouku F_O [N]**, se obvykle vychází z empirického vztahu:

$$F_O = \frac{6500000}{r - 55} \quad (25)$$

Výše uvedený vztah je navržen pro vozidla jezdící na trati s normálním rozchodem. U experimentálního vozidla bude tento odpor minimální, neboť má vozidlo nezávisle otáčivá kola. U klasického drážního vozidla by byl tento odpor zahrnut do odporů nezávislých na rychlosti, tedy do F_{SK} .

Na základě výše uvedených bodů lze sestavit výkonovou rovnici tak, jak ji uvádí následující vztah:

$$P_{CELK} = P_{SK} + P_{VZD} + P_a + P_j + P_{AKU} \quad (26)$$

Vzhledem k malým rychlostem experimentálního vozidla do 20km/h nebude uvažován odpor vzduchu, $P_{VZD} = 0$. Experimentální vozidlo je vybaveno synchronními trakčními motory, relace mezi ztrátovým výkonem ve vinutí motorů a tažnou silou vozidla je dána vztahem (24). Pro experimentální vozidlo lze potom pro celkový výkon P_{CELK} psát:

$$P_{CELK} = P_{SK} + P_a + P_j + P_{AKU} = F_{SK} \cdot v + m \cdot a \cdot v + R_M \cdot \left(\frac{F_t}{K_R} \right)^2 + R_0 \cdot I_{DC}^2 \quad (27)$$

Na základě uvedeného rozboru v kapitole 3.4.2.1 se při rozjezdu vyplatí optimalizovat odběr trakční energie. Pro minimální energii W_a [Wh] odebranou vozidlem během rozjezdu, tedy odebranou za čas rozjezdu t_a lze psát:

$$W_a = \int_0^{t_a} P_{CELK} \cdot dt = \int_0^{t_a} (P_{SK} + P_a + P_j + P_{AKU}) \cdot dt = \min . \quad (28)$$

Pro přehlednost analytického výpočtu bude nejprve situace analyzována pro energii odebranou pohonem W_{apoh} [Wh], bez zahrnutí ztrátového výkonu ve vnitřním odporu akumulátoru P_{AKU} :

$$W_{apoh} = \int_0^{t_a} (P_{SK} + P_a + P_j) \cdot dt = \min. \quad (29)$$

Úkolem je tedy nalezení takové tažné síly vozidla F_t , aby energie při zrychlení z rychlosti v_1 na rychlost v_2 byla minimální. Postupuje se zde ve třech krocích:

1. Analytické vyjádření energie W_{apoh} podle vztahu (29)
2. Nalezení derivace této energie podle tažné síly F_t
3. Položení derivace nule a řešení algebraické rovnice s vyjádřením tažné síly F_t , při které je energie W_{apoh} minimální.

Prvním krokem je úprava výrazu (29) pro změnu integračních mezí:

$$\begin{aligned} W_{apoh} &= \int_0^{t_a} \left(F_{SK} \cdot v + m \cdot a \cdot v + 4 \cdot 3 \cdot R_M \cdot \left(\frac{F_t}{K_R} \right)^2 \right) \cdot dt = \\ &= \int_{v_1}^{v_2} \left(F_{SK} \cdot v + m \cdot a \cdot v + 4 \cdot 3 \cdot R_M \cdot \left(\frac{F_t}{K_R} \right)^2 \right) \cdot \frac{m}{F_t - F_{SK}} \cdot dv \end{aligned} \quad (30)$$

Změna integračních mezí vychází z pohybové rovnice vozidla a z urychlující síly F_a :

$$F_a = F_t - F_{SK} = m \cdot a = m \cdot \frac{dv}{dt} \Rightarrow dt = \frac{m}{F_t - F_{SK}} \cdot dv \quad (31)$$

Po integraci výrazu v (30) se pro konstantní tažnou sílu F_t a konstantní zrychlení a získá výraz pro energii odebranou pohonem W_{apoh} při zrychlení vozidla z počáteční rychlosti v_1 na konečnou rychlost vozidla v_2 :

$$W_{apoh} = \frac{F_{SK} \cdot m}{2 \cdot (F_t - F_{SK})} \cdot (v_2^2 - v_1^2) + \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_2^2 - v_1^2) + 4 \cdot 3 \cdot R_M \cdot \frac{m}{F_t - F_{SK}} \cdot \left(\frac{F_t}{K_R} \right)^2 \cdot (v_2 - v_1) \quad (32)$$

Úkolem je nyní nalezení takové tažné síly F_t při rozjezdu v daném intervalu rychlostí, kdy je celková energie pohonu odebraná během rozjezdu minimální - $W_{apoh} \rightarrow \min$. Tato hodnota tažné síly se získá řešením rovnice:

$$\frac{dW_{apoh}}{dF_t} = 0 \quad (33)$$

Tuto rovnici lze po provedení derivace rozepsat ve tvaru:

$$\frac{dW_{apoh}}{dF_t} = -\frac{F_{SK} \cdot m}{2 \cdot (F_t - F_{SK})^2} \cdot (v_2^2 - v_1^2) + 4 \cdot 3 \cdot R_M \cdot \frac{m \cdot (v_2 - v_1)}{K_R^2} \cdot \left(1 - \frac{F_{SK}^2}{(F_t - F_{SK})^2}\right) = 0 \quad (34)$$

Rovnici (34) lze upravit do tvaru:

$$\left(\frac{F_{SK} \cdot m}{2} \cdot (v_2^2 - v_1^2) + 4 \cdot 3 \cdot R_M \cdot \frac{m \cdot (v_2 - v_1) \cdot F_{SK}^2}{K_R^2}\right) \cdot \frac{1}{(F_t - F_{SK})^2} = 4 \cdot 3 \cdot R_M \cdot \frac{m \cdot (v_2 - v_1)}{K_R^2} \quad (35)$$

Úpravou rovnice (35) získáváme:

$$(F_t - F_{SK})^2 = \frac{F_{SK} \cdot m \cdot K_R^2 \cdot (v_2^2 - v_1^2)}{8 \cdot R_M \cdot m \cdot (v_2 - v_1)} \quad (36)$$

Jedná se o kvadratickou rovnici, jejíž řešení lze psát ve tvaru:

$$F_t = \sqrt{\frac{K_R^2 \cdot F_{SK} \cdot (v_1 + v_2)}{24 \cdot R_M} + F_{SK}^2} + F_{SK} \quad (37)$$

Výraz (37) určuje tažnou sílu vozidla F_t , při níž pohon vozidla s hmotností m s konstantními jízdními odpory F_{SK} a odporem vinutí statoru trakčního motoru R_M zrychlí z rychlosti v_1 na rychlost v_2 s minimální spotřebou energie W_{apoh} .

Pro ztrátovou energii W_{AKU} ve vnitřním odporu R_0 akumulátorové baterie se svorkovým napětím U_{DC} lze při odběru proudu I_{DC} psát vztah:

$$W_{AKU} = \int_0^{t_a} R_0 \cdot I_{DC}^2 \cdot dt \quad (38)$$

V souladu s [34] lze v případě lithiových akumulátorů uvažovat hodnotu vnitřního odporu R_0 konstantní. Vztah (38) lze potom dále upravit:

$$W_{AKU} = R_0 \cdot \int_0^{t_a} I_{DC}^2 \cdot dt \quad (39)$$

Proud I_{DC} odebíraný z akumulátorové baterie závisí, při zanedbání pomocných spotřeb experimentálního vozidla, které činí přibližně 100 W, na velikosti výkonu P_{DC} , který odebírá trakční pohon a na okamžité hodnotě svorkového napětí akumulátorové baterie U_{DC} , které obecně není konstantní a mění se vlivem úbytku napětí na vnitřním odporu R_0 . Za těchto okolností lze pro akumulátorovou baterii psát výkonovou bilanci:

$$U_0 \cdot I_{DC} = P_{DC} + R_0 \cdot I_{DC}^2 \quad (40)$$

Po úpravě výrazu (40) získáváme kvadratickou rovnici pro výpočet proudu I_{DC} :

$$R_0 \cdot I_{DC}^2 - U_0 \cdot I_{DC} + P_{DC} = 0 \quad (41)$$

Řešení této kvadratické rovnice lze psát ve tvaru:

$$I_{DC} = \frac{U_0 \pm \sqrt{U_0^2 - 4 \cdot R_0 \cdot P_{DC}}}{2 \cdot R_0} \quad (42)$$

Výkon P_{DC} odebíraný trakčním pohonem je, vzhledem k rozboru, provedenému výše, tvořen v podstatě mechanickým výkonem, tedy součinem tažné síly F_t a rychlosti vozidla v , a výkonem Jouleových ztrát pohonu P_j :

$$P_{DC} = F_t \cdot v + 4 \cdot 3 \cdot R_M \cdot \left(\frac{F_t}{K_R} \right)^2 \quad (43)$$

Ve vztahu (42) je pro získání relevantního výsledku potřeba použít znaménko -. Pro tento případ lze pro energii zmařenou ve vnitřním odporu akumulátoru R_0 při rozjezdu psát:

$$W_{AKU} = R_0 \cdot \int_0^{t_a} \left(\frac{U_0 - \sqrt{U_0^2 - 4 \cdot R_0 \cdot P_{DC}}}{2 \cdot R_0} \right)^2 \cdot dt \quad (44)$$

Integrál ve vztahu (44) vede na komplikovaný výraz, který je jen stěží řešitelný. Dříve, než se přistoupí k případnému řešení tohoto výkonového integrálu, je na místě ověřit numericky, jaký má zahrnutí vlivu kolísání napětí U_{DC} akumulátorové baterie v závislosti na odebíraném proudu I_{DC} dopad na přesnost výpočtu. Proto byly porovnány vypočtené hodnoty ztrátových výkonů akumulátorové baterie bez zohlednění vlivu kolísání napětí akumulátorové baterie a se zohledněním tohoto vlivu. Ztrátový výkon P_{AKU} v odporu R_0 akumulátorové baterie je vždy vyčíslen ze vztahu:

$$P_{AKU} = R_0 \cdot I_{DC}^2 \quad (45)$$

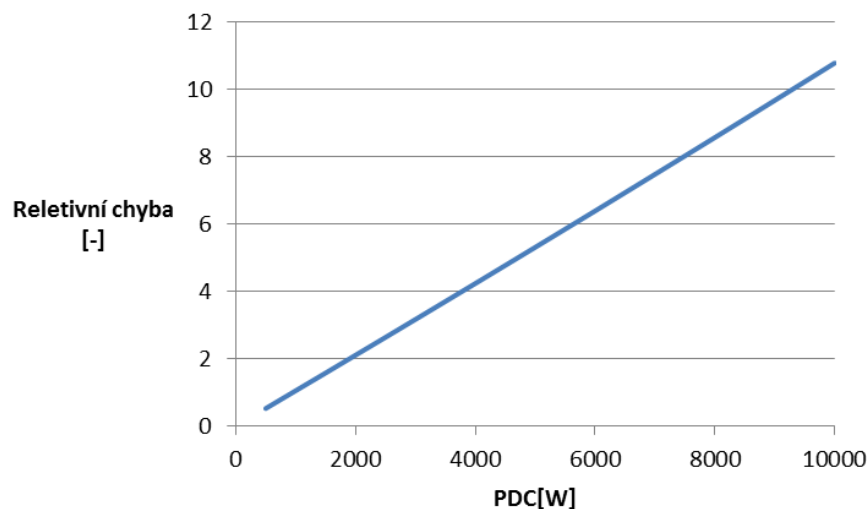
V případě, že se nezohledňuje kolísání napětí U_{DC} , je proud I_{DC} dán:

$$I_{DC} = \frac{U_{DC}}{R_0} = \frac{U_0}{R_0} \quad (46)$$

V případě, že se vliv kolísání napětí baterie zohledňuje, je proud I_{DC} určen podle vztahu (42) se znaménkem -. Pro experimentální vozidlo jsou uvažovány výše uvedené hodnoty $U_0 = 89,6 \text{ V}$, $R_0 = 0,042 \text{ } \Omega$. V Tab. 11 jsou uvedeny vybrané vypočtené ztrátové výkony akumulátorové baterie bez uvažování kolísání napětí U_{DC} a s uvažováním kolísání tohoto napětí pro jednotlivé hodnoty příkonu trakčního pohonu P_{DC} . Na obr. 19 je závislost relativní chyby údaje výkonu s konstantní hodnotou U_{DC} na výkonu P_{DC} .

Tabulka 11 – Ztrátové výkony akumulátorové baterie

$P_{DC} [\text{W}]$	2000	4000	6000	8000	10000
$P_{AKU} [\text{W}], U_{DC} = \text{konst.}$	20,9	83,7	188,3	334,8	523,2
$P_{AKU} [\text{W}], U_{DC} \neq \text{konst.}$	21,4	87,4	201,2	366,2	586,3



Obrázek 19 - Průběh relativní chyby určení ztrátového výkonu akumulátorové baterie

Z Tab. 11 a z obr. 19 je zřejmé, že relativní chyba zjednodušeného výpočtu ztrát v akumulátorové baterii lineárně vzrůstá s výkonem P_{DC} , při hodnotě $P_{DC} = 10\text{kW}$ dosahuje relativní chyba hodnoty přibližně 10,8%. Tato hodnota relativní chyby není sama o sobě zanedbatelná, zásadní však není samotná velikost relativní chyby, ale její vliv na výpočet optimální tažné síly F_t , při které vozidlo při rozjezdu odebere minimální energii. Při dalším

postupu je tedy posuzován vliv ztrátového výkonu v odporu R_0 akumulátorové baterie na velikost optimální tažné síly při rozjezdu vozidla při uvažování $U_{DC} = \text{konst.}$

Při uvažování ztrátového výkonu v akumulátorové baterii P_{AKU} a $U_{DC} = \text{konst.}$ lze pro celkovou energii W_a odebranou při rozjezdu experimentálního vozidla z rychlosti v_1 na rychlost v_2 psát:

$$W_a = \int_0^{t_a} (P_{DC} + P_{AKU}) \cdot dt = W_{apoh} + W_{AKU} \quad (47)$$

Energie odebraná při rozjezdu pohonem byla odvozena ve vztahu (32). Pro energii W_{AKU} při $U_{DC} = \text{konst.}$ lze psát:

$$W_{AKU} = R_0 \cdot \int_0^{t_a} I_{DC}^2 \cdot dt = \frac{R_0}{U_{DC}^2} \int_0^{t_a} P_{DC}^2 \cdot dt = \frac{R_0}{U_{DC}^2} \int_0^{t_a} \left(F_t \cdot v + 4 \cdot 3 \cdot R_M \cdot \left(\frac{F_t}{K_R} \right)^2 \right)^2 \cdot dt \quad (48)$$

Pro výpočet integrálu ve vztahu (48) je vhodné zavést nové integrační meze ze vztahu:

$$F_t - F_{SK} = m \cdot a = m \cdot \frac{dv}{dt} \Rightarrow dt = \frac{m}{F_t - F_{SK}} \cdot dv \quad (49)$$

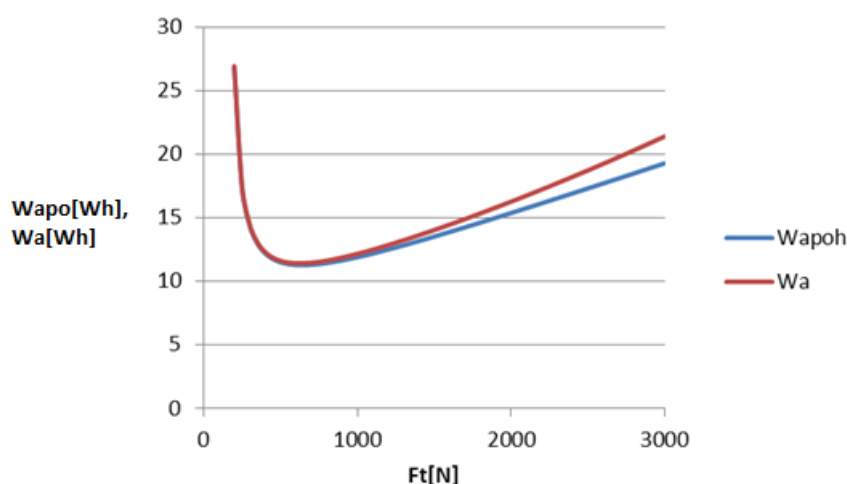
Pro energii W_{AKU} lze dále psát:

$$\begin{aligned} W_{AKU} &= \frac{R_0}{U_{DC}^2} \int_{v_1}^{v_2} \left(F_t \cdot v + 4 \cdot 3 \cdot R_M \cdot \left(\frac{F_t}{K_R} \right)^2 \right)^2 \cdot \frac{m}{F_t - F_{SK}} \cdot dv = \\ &= \frac{R_0}{U_{DC}^2} \int_{v_1}^{v_2} \left(F_t^2 \cdot v^2 + 24 \cdot R_M \cdot \left(\frac{1}{K_R} \right)^2 \cdot F_t^3 \cdot v + 144 \cdot R_M^2 \cdot \left(\frac{F_t}{K_R} \right)^4 \right) \cdot \frac{m}{F_t - F_{SK}} \cdot dv = \\ &= \frac{R_0 \cdot m}{U_{DC}^2 \cdot (F_t - F_{SK})} \cdot \left(\frac{F_t^2}{3} \cdot (v_2^3 - v_1^3) + \frac{12 \cdot R_M \cdot F_t^3}{K_R^2} \cdot (v_2^2 - v_1^2) + 144 \cdot R_M^2 \cdot \left(\frac{F_t}{K_R} \right)^4 \cdot (v_2 - v_1) \right) \end{aligned} \quad (50)$$

Optimální tažnou sílu F_t při rozjezdu, při které je minimální odebraná energie W_a , lze určit ze vztahu:

$$\frac{dW_a}{dF_t} = \frac{d(W_{apoh} + W_{AKU})}{dF_t} = 0 \quad (51)$$

Z vyjádření energie W_{AKU} ve vztahu (50) je zřejmé, že po jeho derivaci bude algebraická rovnice (51) vyššího řádu a tudíž problematicky řešitelná obecně. Z toho důvodu bylo upřednostněno numerické vyšetření vlivu ztrát v akumulátorové baterii na hodnotu optimální tažné síly F_t , při které je spotřebována minimální energie při rozjezdu experimentálního vozidla z rychlosti v_1 na rychlost v_2 . Při výpočtech byla vyčíslována energie na rozjezd vozidla odebraná pohonem W_{apoh} , energie potřebná pro krytí ztrát v akumulátoru W_{AKU} při rozjezdu a celková energie W_a v závislosti na tažné síle. Výsledky výpočtů jsou reprezentovány zejména následujícími grafy.

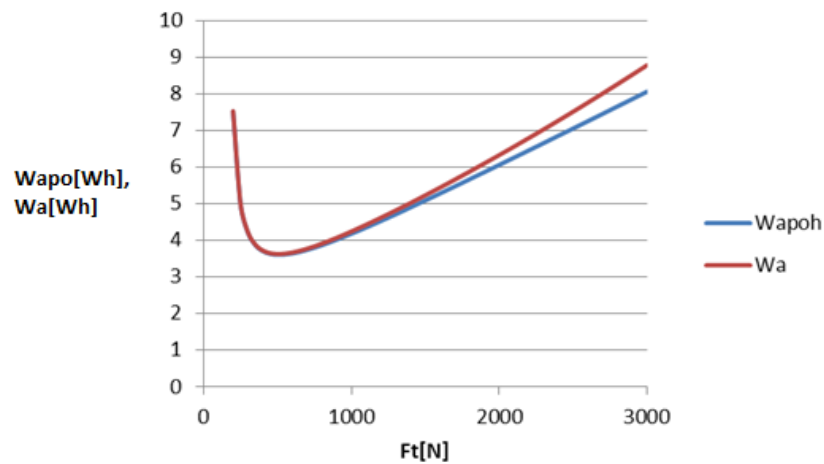


Obrázek 20 - Závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 16 km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu

Obr. 20 prezentuje závislost spotřebované energie na tažné síle vozidla při rozjezdu vozidla z 0 na 16 km/h na přímé trati bez sklonu, a to jak pro energii se započtenými ztrátami v pohonu, tak i pro energii se započtenými ztrátami pohonu a akumulátoru.

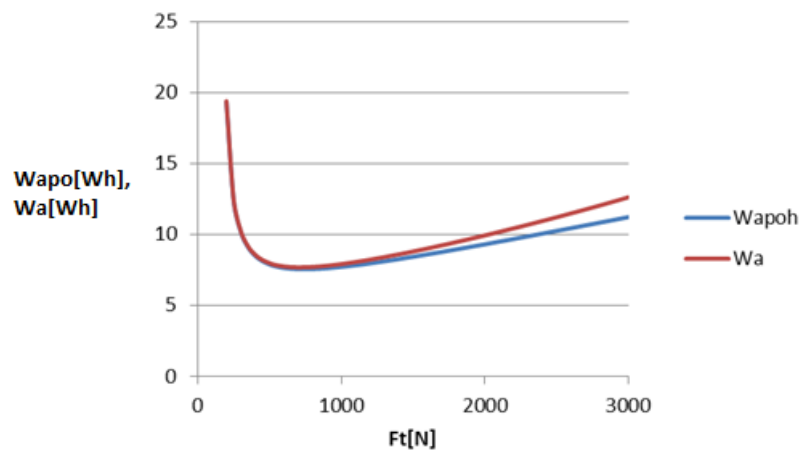
- Tažná síla při minimu energie spotřebované na rozjezd je téměř totožná pro případ vyšetřování energie samotného pohonu (modrá křivka) a pro případ se zahrnutím ztrátové energie v akumulátorové baterii (červená křivka)
- Navýšení energie spotřebované na rozjezd vlivem ztrát v akumulátorové baterii je při minimu odebrané energie velmi malé – při optimální tažné síle $F_t = 639,9$ N z $W_{apoh} = 11,27$ Wh na $W_a = 11,41$ Wh, tj. o 1,25 %
- S rostoucí tažnou silou se zvyšuje přírůstek energie ztrát v akumulátorové baterii
- Vzhledem k velmi malému navýšení spotřebované energie v oblasti optimální tažné síly vlivem ztrát v akumulátorové baterii je možno uvažovat konstantní napětí akumulátorové baterie U_{DC}

- Pro daný případ je možno pro vyhledání optimální tažné síly pro daný rozjezd použít vztahu (37)

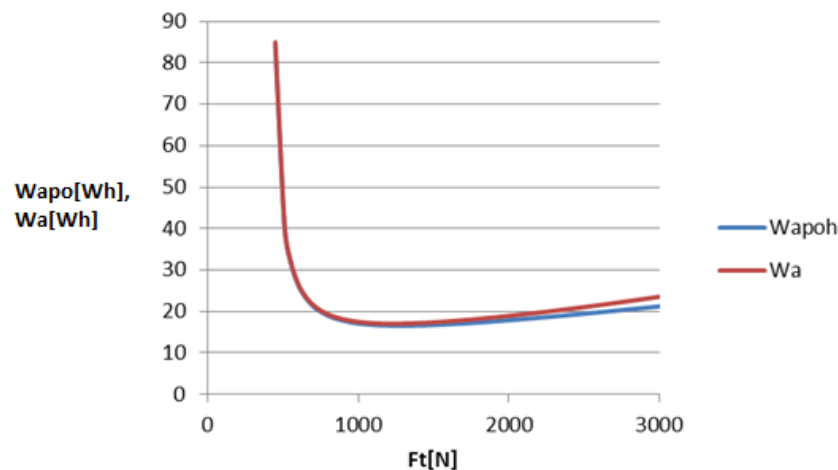


Obrázek 21 - Závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 8km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu

Obr. 21 prezentuje závislost spotřebované energie na tažné síle vozidla při rozjezdu vozidla z 0 na 8 km/h na přímé trati bez sklonu, a to jak pro energii se započtenými ztrátami v pohonu, tak i pro energii se započtenými ztrátami pohonu a akumulátoru. Při snížení rozsahu rychlosti došlo k posunu optimální tažné síly k nižší hodnotě 511,8 N, spotřebovaná energie se při této tažné síle při zohlednění ztrát v akumulátorové baterii zvýšila z 3,61 Wh na 3,63 Wh, tj. o 0,55 %.

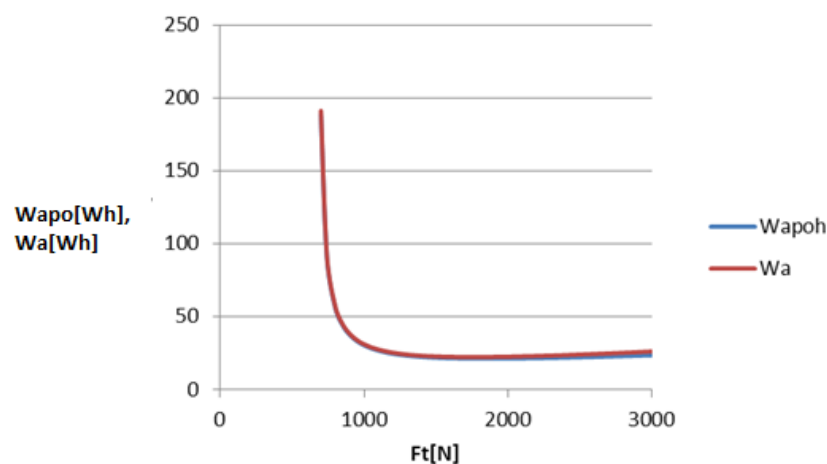


Obrázek 22 - Závislost energie na rozjezd vozidla z 8 na 16km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu



Obrázek 23 - Závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 16km/h na tažné síle na přímé trati na sklonu 12%

Obr. 23 prezentuje závislost spotřebované energie na tažné síle vozidla při rozjezdu vozidla z 0 na 16 km/h na přímé trati na sklonu 12%, a to jak pro energii se započtenými ztrátami v pohonu, tak i pro energii se započtenými ztrátami pohonu a akumulátoru. Při zvýšení sklonu trati došlo k posunu optimální tažné síly k vyšší hodnotě 1282,9 N, spotřebovaná energie se při této tažné síle při zohlednění ztrát v akumulátorové baterii zvýšila z 16,55 Wh na 17,05 Wh, tj. o 3,02 %.



Obrázek 24 - Závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 16km/h na tažné síle na přímé trati na sklonu 24%

Obr. 24 prezentuje závislost spotřebované energie na tažné síle vozidla při rozjezdu vozidla z 0 na 16 km/h na přímé trati na sklonu 24%, a to jak pro energii se započtenými ztrátami v pohonu, tak i pro energii se započtenými ztrátami pohonu a akumulátoru. Při dalším zvýšení sklonu trati došlo k posunu optimální tažné síly k vyšší hodnotě 1860,4 N, spotřebovaná

energie se při této tažné síle při zohlednění ztrát v akumulátorové baterii zvýšila z 21,29 Wh na 22,39 Wh, tj. o 5,17 %.

3.4.2.3 Měření energie pro rozjezd na experimentálním vozidle

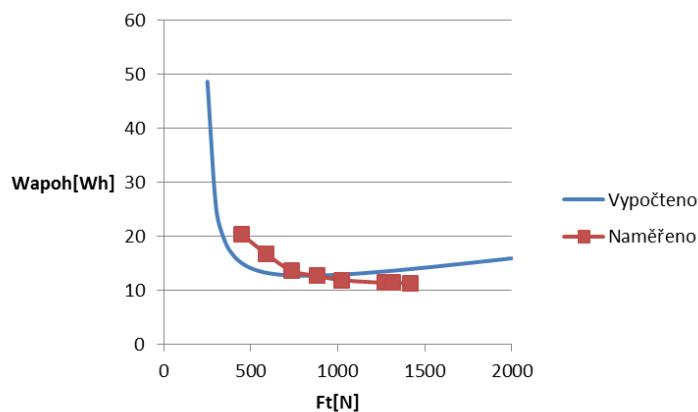
Výše uvedené výsledky výpočtů energie pro rozjezd vozidla podle vztahu (32) byly porovnávány s výsledky získanými při měření energie při rozjezdu experimentálního kolejového vozidla. Byly měřeny případy rozjezdu vozidla z 0 na 16 km/h na trati se sklonem 3 ‰ a se sklonem 24 ‰. Energie spotřebovaná při rozjezdu vozidla byla určena z měřených vzorků napětí trakční baterie U_{DC} a odebíraného stejnosměrného trakčního proudu I_{DC} podle vztahu:

$$W_{apoh} = \sum U_{DC} \cdot I_{DC} \cdot \Delta t_i \quad (52)$$

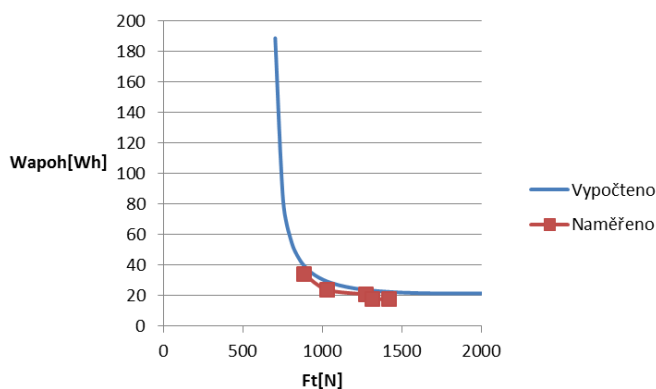
Při měření byla vzorkovací perioda Δt_i 100 ms. Tažná síla vozidla F_t byla nastavována podle proudu trakčního motoru prostřednictvím přepočítávací konstanty $K_R = 50,4 \text{ N/A}$. Při srovnávacím výpočtu byly u vozidla uvažovány tyto hodnoty parametrů:

- konstantní složka mechanických jízdnicích odporů $F_K = 149 \text{ N}$,
- stoupání $s = 3 \text{ ‰}$ resp. 24 ‰ ,
- hmotnost vozidla s posádkou $m = 2200 \text{ kg}$,
- Odpor vinutí statoru trakčního motoru $R_M = 0,32 \text{ } \Omega$.

Na obr. 25 je uvedeno srovnání vypočtených a naměřených hodnot energie pro rozjezd vozidla W_{apoh} z rychlosti 0 km/h na 16 km/h na stoupání 3 ‰, na obr. 26 je uvedeno obdobné srovnání, avšak pro rozjezd na stoupání 24‰. Rozsah experimentů byl omezen poměrně malou maximální tažnou silou vozidla 1431 N vůči jeho hmotnosti přes 2 t.



Obrázek 25 - Srovnání vypočtených (modře) a naměřených (červeně) hodnot energie při rozjezdu experimentálního vozidla na stoupání 3 ‰



Obrázek 26 - Srovnání vypočtených (modře) a naměřených (červeně) hodnot energie při rozjezdu experimentálního vozidla na stoupání 24 ‰

V obr. 25 a 26 jsou zřejmé určité odchylky mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami, zejména při rozjezdech na menším stoupání, tzn. v případě, kdy je menší míra přesného definování mechanických jízdních odporů vlivem malého jízdního odporu F_s – ze stoupání. Nepřesnosti jsou dány ne zcela přesnou znalostí sklonu trati, nepřesnou hodnotou odporu vinutí trakčního motoru zejména díky neznalosti aktuální teploty motoru, nepřesností přepočtu mezi proudem motoru a tažnou silou vozidla a nepřesností konstantní složky jízdních odporů F_K .

3.4.2.4 Závěry plynoucí z provedené analýzy úspor energie při rozjezdu

Jeden z nejdůležitějších závěrů lze spatřovat v tom, že závislost energie spotřebované na rozjezd vozidla na tažné síle při rozjezdu vozidla při konstantním zrychlení a zanedbání odporu vzduchu vykazuje minimum. Poloha minima se mění v závislosti na sklonu trati a na

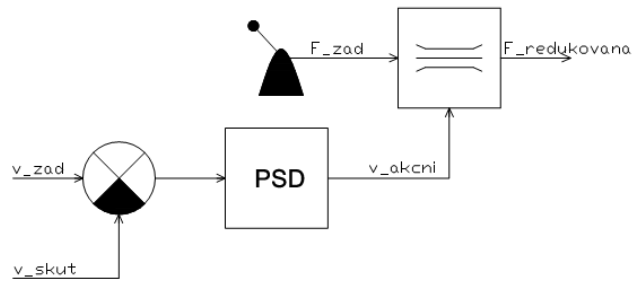
diferenci rychlostí. Při zvyšování sklonu trati se optimální tažná síla zvyšuje. Při malém rozdílu rychlostí v nízkých rychlostech je optimální tažná síla nižší. Při malém rozdílu rychlostí ve vyšších rychlostech se optimální tažná síla zvyšuje. Při zohlednění ztrátové energie v akumulátorové baterii se hodnota optimální tažné síly téměř nemění. Pro výpočet optimální tažné síly při rozjezdu s minimem odebrané energie je možno použít vztah (37), jež sice nezohledňuje ztráty na odporu akumulátorové baterie, ale jak vyplynulo z výše uvedeného rozboru, tak je poloha minima při neuvažování ztrát na akumulátorové baterii takřka neměnná. Pro zohlednění nepřesností vzniklých zjednodušením výpočtu optimální tažné síly dle vztahu (37) je vhodné nastavovat hodnoty tažné síly větší. Pokud se vozidlo rozjíždí do stoupání, tak je záhodno nastavovat sílu co možná největší. Na základě těchto závěrů byl sestaven algoritmus pro optimální jízdní trajektorii vozidla, jenž je specifikovaný dále.

3.4.2.5 Algoritmus pro optimální jízdní trajektorii vozidla

Algoritmus je založen na jednotlivých fázích jízdy vozidla tak, jak je prezentuje kapitola 3.4.1. Interval změny zrychlení je implementován pomocí hyperbolické tangenty, která se z hlediska třetí derivace dráhy podle času jeví jako dostačující pro pohodlné cestování. Fáze rozjezdu je implementována v souladu se závěry v kapitole 3.4.2.4 tak, že je navolena maximální tažná síla vozidla. Jízda konstantní rychlostí je realizována pomocí PS rychlostního regulátoru implementovaného jakožto omezovače tažné síly. Fáze výběhu byla v souladu s traťovými proporcemi navržena na konstantní délku 10 m. Brzdná fáze je do řídicího systému implementována požadavkem na maximální elektrodynamickou brzdou sílu s maximalizací rekuperace. Implementaci algoritmu se věnuje kapitola 3.5. V dalších podkapitolách jsou navrženy regulační struktury pro vylepšení energetické bilance při použití klasického PS regulátoru rychlosti. Vzájemné srovnání optimalizačních přístupů je uvedeno v kapitole Experimentální měření na akumulátorovém kolejovém vozidle.

3.4.3 PSD regulátor rychlosti

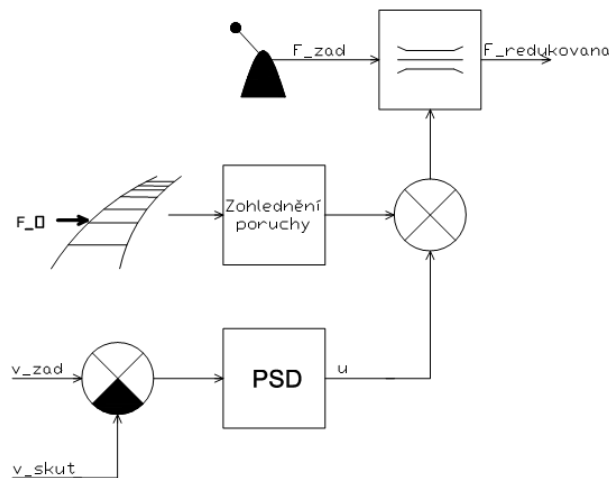
Jedná se o klasický rychlostní regulátor, respektive omezovač tažné síly, jehož struktura je uvedena na obrázku 27. Regulovanou veličinou je rychlost vozidla a akční veličinou je tažná síla vozidla. Z obrázku je vidět, že nadřazenou veličinou je tažná síla zadaná pákou. Takovéto provedení regulátoru bylo zvoleno, aby systém rychle reagoval na změnu žádosti na tah.



Obrázek 27 - Blokové schéma PID regulátoru rychlosti

3.4.4 PSD regulátor s dopřednou větví

Jedná se opět o regulátor, jehož základem je člen PSD. Ovšem za tímto členem je tentokrát navázána dopředná větev, která koriguje akční hodnotu, viz obrázek 28. Dojde tak k „vyhlazení“ akční veličiny, což v konečném důsledku vede ke snížení odebírané energie. Během experimentů byly vyzkoušeny dva typy dopředných větví těchto regulátorů, jež jsou uvedeny dále.



Obrázek 28 - Blokové schéma regulátoru s dopřednou větví

Dopředná větev zohledňující tažnou sílu v daných místech na trati

Korekce žádané hodnoty tažné síly v tomto případě spočívá v přičtení předem nalogované tažné síly k aktuálně žádané tažné síle. Předpokládá se, že akční veličina, tedy tažná síla, bude klidnější, což se příznivě projeví na hodnotě spotřebované energie, která bude menší.

Dopředná větev zohledňující sklon trati

Korekce žádané hodnoty tažné síly v tomto případě spočívá v jejím navýšení o hodnotu takové tažné síly, která odpovídá odporu ze sklonu trati. Předpokládá se, že akční veličina, tedy tažná síla, bude klidnější, což se příznivě projeví na hodnotě spotřebované energie, která bude menší.

3.5 Návrh a implementace systému pro experimentální hodnocení hybridního pohonu

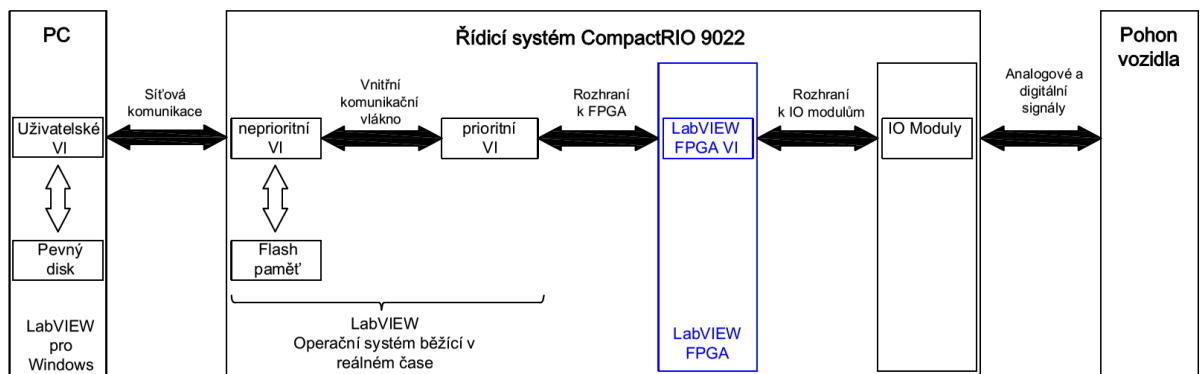
Pro měření byl použit systém automatického vedení vlaku, kterému se podrobněji věnují další kapitoly. Hlavní význam automatického vedení vlaku spočívá v dosažení opakovatelnosti měření. Pokud by měření probíhala jen jízdou s ručním řízením, tak by nebylo možné daná místa na trati projíždět identickou rychlostí, což použití automatického vedení vlaku v rámci tolerancí umožňuje. Automaticky vedený vlak projíždí daná místa na trati předem nastavenou rychlostí a zastavuje na předem stanovených místech. Během jednoho oběhu vozidla je naměřen průběh spotřebované energie, kterou je možno porovnávat se spotřebovanou energií naměřenou v rámci dalších oběhů. Na základě automatického vedení vlaku, tak mohlo být zkoumáno, jaký vliv bude mít změna regulační struktury pohonu na spotřebu vlaku. Z tohoto důvodu byly sestaveny čtyři typy regulačních struktur, jež byly naladěny tak, aby nebylo narušeno pohodlí cestujícího, a aby nedocházelo k mechanickým rázům v pohonu. Jednotlivé struktury regulátorů byly energeticky prověřeny, tato měření jsou vyhodnocena v kapitole č. 3.6.

3.5.1 Popis funkce nadřazeného řídicího systému vozidla

Komplexní regulaci vozidla zajišťuje nadřazený řídicí systém, jehož základem je průmyslový počítač CompactRIO dodávaný americkou firmou National Instruments [37]. Hlavním úkolem systému CompactRIO je provádět regulaci vozidla na základě dat získaných přímo z pohonu vozidla, respektive z uživatelského počítače. Dalším úkolem systému CompactRIO je měření význačných veličin, jež se vyskytují v pohonu vozidla. O měření a generování regulačních signálů se starají karty zastrčené do šasi řídicího počítače. Například pomocí čtveřice proudových analogových výstupů je předáván požadavek na moment do podřízených DSP procesorů, které pomocí vektorové regulace řídí momenty jednotlivých motorů PMSM.

Obrázek 29 znázorňuje architekturu řídicího počítače CompactRIO a její napojení na uživatelský počítač, respektive na pohon vozidla. Řídicí počítač je rozdělen na tři hlavní části, procesor pro výpočetní systém běžící v reálném čase, hradlové pole FPGA určené

k paralelizaci časově kritických výpočtů a již zmíněné vstupně-výstupní karty starající se o vytváření číslicové reprezentace vstupních signálů, respektive o vytváření analogové reprezentace výstupních signálů. Vyjmenované hlavní části jsou navzájem propojeny tak, jak je naznačeno na obrázku xx. Pro bezproblémový chod celého systému bylo nutno vytvořit tři programové moduly v grafickém programovacím jazyku LabVIEW [38]. Jedním z nich je program na uživatelském počítači, jenž jednak zajišťuje zpracování a grafickou reprezentaci naměřených dat, dále je určen pro ovládání řídicího systému. Uživatelský počítač fyzicky komunikuje s řídicím systémem prostřednictvím lokální sítě LAN. V operačním systému reálného času řídicího počítače potom běží druhý programový modul, ve kterém se nacházejí regulační algoritmy, a který si předává data mezi uživatelským počítačem a hradlovým polem FPGA. Předávání dat je mezi moduly řešeno pomocí datových streamů a síťových proměnných. V rámci jednotlivých programových modulů se pak data předávají a uchovávají pomocí nejrůznějších technik. Příkladem může být použití globálních, respektive lokálních proměnných, nebo datových front. Třetí programový modul je sestaven pro hradlové pole. Skládá se z jednotlivých oddělených smyček tak, aby každá smyčka mohla pracovat v rámci hradlového pole nezávisle na ostatních. Data jsou z hradlového pole předávána datovými clustery do programového modulu pro operační systém reálného času.



Obrázek 29 - Blokové schéma architektury nadřazeného řídicího počítače CompactRIO

Regulační systém vozidla umožňuje uživateli použít dva základní režimy jízdy. Jedná se o manuální režim a automatické vedení vlaku. Pokud je zapnut manuální režim jízdy, tak je ovládání vozidla v kompetenci strojvedoucího, který vozidlo řídí prostřednictvím ovládacího pultu. V tomto režimu jízdy je žádanou hodnotou na silové páce poměrný tah v jízdě i brzdě. Pokud strojvedoucí silovou páku odpoutá ve směru od sebe, tak vozidlo táhne, v opačném případě se aktivuje elektrodynamická rekuperační brzda. Je-li vozidlo v klidu, tak může strojvedoucí měnit směr vozidla na ovládacím pultu. V manuálním režimu jízdy řídicí systém registruje veškeré proměnné potřebné pro pohon vozidla i pro měření a předává je do

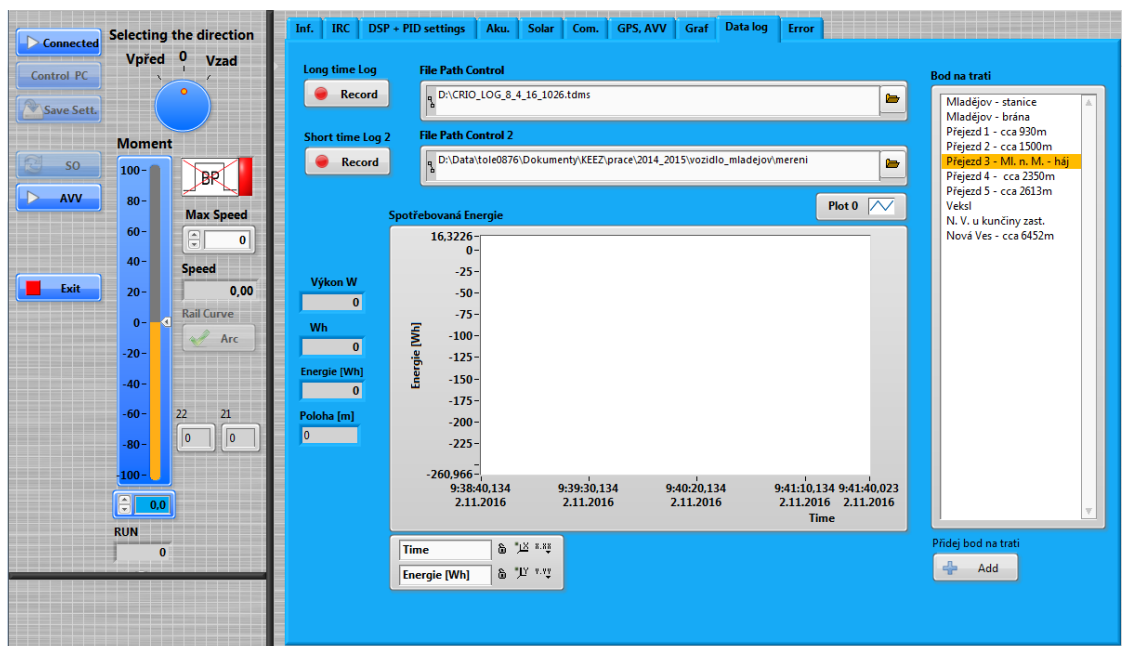
uživatelského počítače, kde dochází k jejich logování, respektive k vyobrazování na obrazovce. V případě, že je na uživatelském počítači navolen režim automatického vedení vlaku a je zvolena trať, tak vozidlo jede po uděleném souhlasu autonomně, bez zásahu strojvedoucího, což dále podrobně rozebírá další kapitola.

3.5.2 Popis Měřicího a řídicího systému automatického vedení vlaku

Vozidlo je řízeno výše rozebraným nadřazeným řídicím systémem CompactRIO 9022 od firmy National Instruments, jehož firmware byl naprogramován v prostředí LabVIEW. Uživatelský počítač neslouží jen pro měření, ale jeho neméně důležitou úlohou je ovládání řídicího systému, potažmo celého vozidla. Vozidlo má nezměrné množství funkcionalit jak pro měření, tak i pro regulaci pohonu. Tato kapitola se bude dále zabývat algoritmem pro automatické vedení vlaku a jeho využitím pro automatizované měření.

3.5.2.1 Popis měřicího algoritmu a logování dat pro automatické vedení vlaku

Jak již bylo řečeno výše, měření se odehrává na uživatelském počítači. Obrazovka pro logování dat sejmutá z uživatelského počítače je na obrázku 30. Měřicí smyčka se vykonává s periodou 100 ms. V první fázi dojde k vyčtení přenesených dat ze síťových proměnných a k jejich zpracování. Například z naměřeného napětí a proudu je vypočten výkon, respektive odebraná energie během jedné periody měřicí smyčky. Změřená a upravená data jsou uložena do souboru tdms. v tabulkovém formátu.



Obrázek 30 – Obrazovka uživatelského počítače určená pro logování dat

Automatické vedení vlaku je založeno na využití nalogovaných parametrů tratě vždy pro dané místo na trati. Poloha vlaku na trati je zjišťována pomocí globálního družicového polohového systému GNSS, přesněji řečeno pomocí přijímače signálu systému GPS, respektive GLONASS s opakovací frekvencí poskytování polohy 10 Hz (přijímač Navilock NL-8002). Samotné logování dat probíhalo tak, že byla celá trať několikrát projeta tam i zpět s cílem získat nejrepresentativnější data. S měřicí periodou 100 ms tedy došlo k nalogování polohy, rychlosti, tažné síly a dalších dat, které ovšem nejsou podstatné z hlediska automatického vedení vlaku.

3.5.2.2 Příprava dat pro automatické vedení vlaku

Po naměření dat je třeba data upravit, neboť naměřená data nevyhovují pro zavedení do algoritmu automatického vedení vlaku. Zejména je třeba upravit rychlostní profil tratě, kde je třeba vložit místa, kde má vlak zpomalit, respektive zastavit, z technických nebo technologických důvodů.

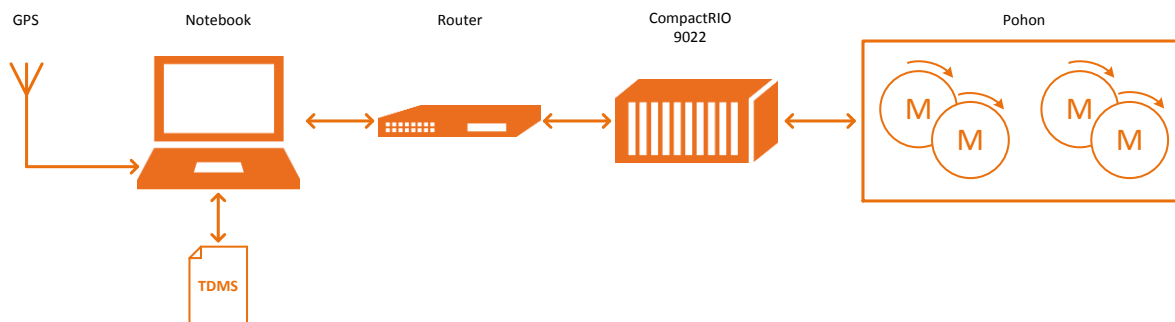
Mezi technické důvody patří snížení rychlosti na místech, kde stav trati nedovoluje vyšší rychlost vozidla. Proto je do mapy tratě na těchto místech zavedeno zpomalení na hodnotu rychlosti rovnou 10 km/h. Dalšími zpomalovacími body jsou výhybky, a to hlavně ty, které se projíždí proti hrotu. Zde je nastavena rychlost na 5 km/h. Dále se jedná o místa se špatnými rozhledovými poměry. Na těchto místech je rychlost snížena rovněž na 5 km/h. Nejkritičtější místem je však přejezd za Novou Vsí zastávkou, při jízdě ve směru z Nové Vsi. Zde je poškozena přídržnice na kraji přejezdového pole, a nesmí se jet rychlostí vyšší 3 km/h. Každý úsek pomalé jízdy je doplněn pojistnou vzdáleností na začátku i konci úseku, která se ovšem liší místem daného zpomalení, což souvisí s rozhledovými poměry. Průměrně se pojistná vzdálenost uvažuje v délce pěti metrů.

Mezi technologické důvody patří zastavování na zastávkách a na konci trati. Zastavování na zastávkách je řešeno z důvodu lepší porovnatelnosti energetických měření. K největší spotřebě trakční energie totiž dochází právě při rozjezdu ze zastávek. Jelikož se dá spotřeba ovlivnit i stylem rozjezdu, tak je třeba mít pro porovnání dostatečný počet zastávek. V případě experimentů na mladějovské úzkorozchodné dráze to je 10 zastávek v jednom směru. Poslední zastávka je vždy na konci tratě, který ovšem není skutečným koncem, ale koncem, jenž technicky vyhovuje experimentům - trať má optimální délku a je zčásti vedena do sklonu.

Podklad pro automatické vedení vlaku je dále třeba vybavit polohou, kde se výrazně mění sklon. V případě mladějovské trati to je odbočka Veksl. Toho se využívá při jedné z variant regulace, kde je sklon korekční hodnotou.

3.5.2.3 Popis algoritmů automatického vedení vlaku

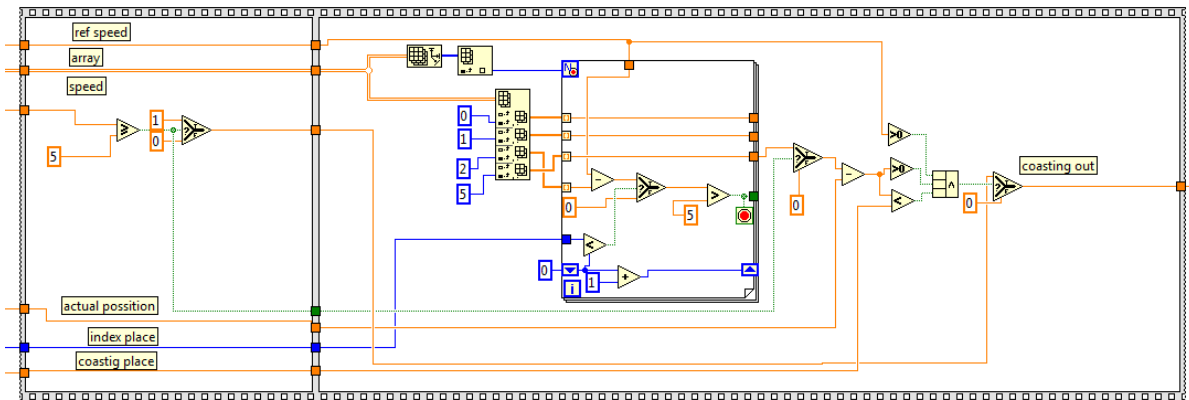
Algoritmus automatického vedení vlaku AVV je na experimentálním vozidle řešen částečně na řídicím počítači CompactRIO 9022 a částečně na uživatelském počítači. Hardwarové propojení jednotlivých komponent je zřetelné z níže uvedeného obrázku 31.



Obrázek 31 - Blokové schéma měřicího a řídicího systému vozidla

Na uživatelském počítači (v obrázku komponenta označená jako notebook) probíhá vyčítání polohy z GPS přijímače. Dále počítač zpracovává traťové podklady z předem připraveného souboru TDMS, kde ke každé předem nalogované poloze náleží určitá traťová rychlost, viz kapitola 3.5.2.2. Při jízdě na automatické vedení vlaku se porovná aktuální hodnota polohy přijatá z GPS s polohou zaznamenanou v tabulce. Pokud je metodou nejmenších čtverců vyhodnocena přibližná shoda, tak se aktuální hodnota rychlosti pošle do rychlostního regulátoru, který je ale již součástí programu v řídicím počítači CompactRIO. Rychlostní regulátor se pak postará buď o zrychlení, nebo zpomalení vozidla. Rychlostní regulátory jsou naprogramovány dle kapitoly 3.4.3, respektive kapitoly 3.4.4. Regulátoru s optimálním využitím pohonu je věnována samostatná podkapitola. Aby bylo možné počítat s výběhem, tak je třeba, aby algoritmus v počítači uměl predikovat nadcházející nulovou rychlost. O to se stará podprogram, respektive subVI s názvem *Coasting.vi*. Opět zde dochází k procházení tabulky s údaji o poloze a rychlosti. Pokud je před vozidlem predikována nulová rychlost, tak se v okamžiku dosažení předem nastavené vzdálenosti před nulovou rychlostí odešle do řídicího počítače požadavek na výběh, načež řídicí počítač zadá nulovou tažnou sílu. Jakmile vozidlo najede do místa s nulovou traťovou rychlostí, dojde k zadání záporné tažné síly a vozidlo zastaví. Pro další jízdu vozidla je třeba zmáčknout tlačítko *Permission to ride*, které je umístěno na ovládacím panelu v obslužném programu vozidla. Po zmačknutí

tlačítka se spustí podprogram *Permission to ride.vi*, jenž vyhledá další nenulovou rychlost, která se odešle do regulátoru rychlosti. Vozidlo se tak ještě může nacházet v poli s nulovou rychlostí, která však nezasahuje do řízení vozidla. Další údaj o nulové rychlosti je brán v potaz až po překonání předem vyhledané navazující nenulové rychlosti. Na obrázku 32 je zachycen podprogram *Permission to ride.vi*.



Obrázek 32 - Podprogram *Permission to ride.vi*

3.5.2.4 Regulátoru postihujícího optimální využití pohonného řetězce na úrovni programového modulu

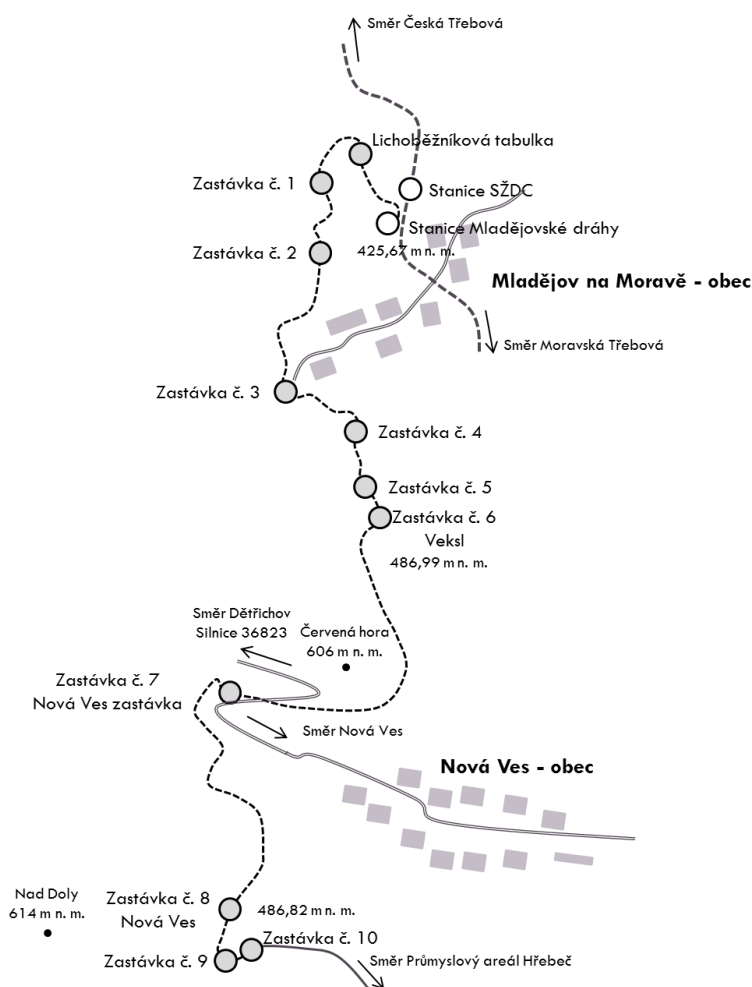
Z rozboru jízdy vozidla a z rozboru pohonného řetězce vozidla uvedeného v kapitole 3.4.2 vyplývá, že nejmenší spotřeby elektrické energie vozidlem je dosaženo při uplatnění maximální tažné síly pro rozjezd vozidla a maximální brzdné síly pro brzdění vozidla. Ke zmenšení energie při jízdě vozidla dále dojde při uplatnění výběhu. Z tohoto důvodu byl realizován takový regulátor rychlosti, který by uvedené předpoklady využíval.

Základ daného regulátoru tvoří stavový automat mající pět na sobě závislých stavů. První stav reprezentuje stojící vozidlo. Pokud v tomto stavu přijde podnět k jízdě vozidla, což znamená stisknutí již zmíněného tlačítka *Permission to ride*, vozidlo přechází do druhého stavu, který se používá pro rozjezd vozidla. V prvním stavu musí být samozřejmě splněna podmínka na nulovou rychlost, jinak se vozidlo nachází ve stavu brzděném. V druhém stavu, tedy ve stavu rozjezdu, se vozidlo rozjíždí na žádanou rychlost, která je vozidlu předána z nadřazeného počítače, a která závisí na poloze vozidla. Na počátku rozjezdu se tažná síla mění s trendem funkce \tanh , což zajistí pro posádku pohodlnou změnu zrychlení vozidla. Dále je pak uplatněna maximální tažná síla. Pokud má vozidlo o dva kilometry v hodině nižší rychlost, než je rychlost žádaná, tak se začne měnit zrychlení, opět po \tanh , čímž dojde k plynulému najetí na žádanou rychlost. V této fázi regulátor přechází do svého třetího stavu, kde je dál regulace rychlosti ponechána PSD regulátoru – vozidlo jede ustálenou rychlostí. Při požadavku na snížení rychlosti regulátor přechází do čtvrtého brzděného stavu, který je

v podstatě invertovaný druhý stav. Jestliže je rozdíl žádaných rychlostí menší nebo roven 5 km/h, tak se snížení rychlosti, nebo zvýšení rychlosti, realizuje PSD regulátorem. Jestliže je rozdíl rychlostí kladný a větší než 5 km/h a jestliže z uživatelského počítače přijde požadavek na výběh, regulátor přejde do výběhu, což je pátý a zároveň poslední stav regulátoru. V tomto stavu je po pohonu žádána nulová tažná síla. Ze stavu výběh se přechází do stavu brzda v době, kdy je detekováno najetí vozidla do pole s nulovou rychlostí. Vozidlo zastaví a regulátor přechází do prvního stavu. Po zmáčknutí tlačítka *Permission to ride* se uvedený algoritmus opakuje.

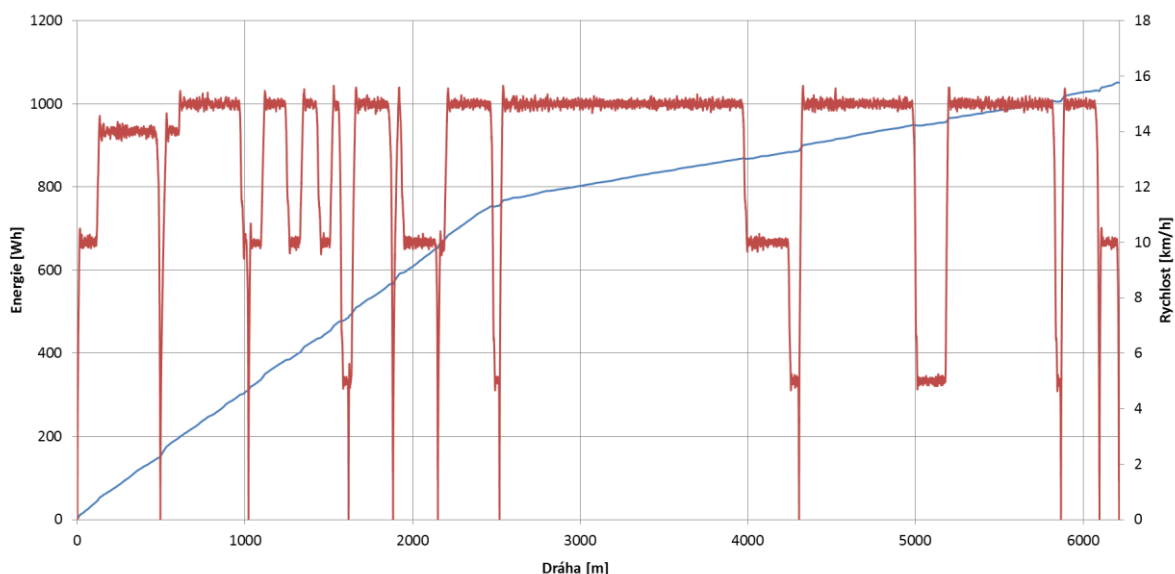
3.6 Vyhodnocení experimentálních měření

Samotné měření se odehrálo na úzkokolejné trati v Mladějově na Moravě. Experimentální trať začíná lichoběžníkovou tabulkou, která je na místě, kde začíná stanice Mladějov na Moravě a končí za přejezdem (Zastávka č. 10 na obrázku 33) za stanicí Nová Ves. Při měření byla projeta 6 280 m dlouhá trasa, jež je vynesena na obrázku 33 včetně nadmořských výšek významných zastávek.



Obrázek 33 – Experimentální trať v Mladějově na Moravě

Takto dlouhá trať byla zvolena z několika důvodů. Jednak bylo třeba projíždět trať dostatečně dlouhou na to, aby byla jednotlivá měření mezi sebou dobře porovnatelná. Dalším důvodem byly časové nároky na měření. Zde se jednalo hlavně o dobu testování softwaru a o dobu měření. Jeden oběh vozidla na trati dlouhé 6 280 m zabral 1,5 hodiny. Nejpodstatnějším důvodem volby takovéto tratě ale bylo to, že třetinu trati tvořilo stoupání 26 %, na kterém má pohon přirozeně největší spotřebu, a to hlavně při rozjezdech vozidla. Během měření byly testovány všechny typy regulace, o nichž pojednávají předchozí kapitoly.



Obrázek 34 - Ukázkový průběh naměřené energie a rychlostního profilu při jízdě z Mladějova do Nové Vsi

Na obrázku 34 je ukázán průběh naměřené energie (modrý průběh) a rychlosti (červený průběh) v závislosti na ujeté dráze při jízdě z Mladějova na Moravě do Nové Vsi. Konkrétně se jedná o jeden z průběhů při měření se zapnutým PSD regulátorem s dopřednou regulací s predikcí podle odporu ze sklonu.

Za nejvíce vypovídající lze považovat pouze data naměřená při jízdě do stoupání. Při jízdě po spádu se uplatňuje rekuperace. Jelikož při měření dochází ke sčítání chyb, tak právě jízda po spádu je zatížena vlivem rekuperace větší chybou. Navíc je celková naměřená hodnota energie podstatně menší než při jízdě do stoupání, což znamená, že se mezi sebou jednotlivá měření hůře porovnávají. Z těchto důvodů jsou dále v tabulce 12 prezentována data jen při jízdě ve směru z Mladějova na Moravě do Nové Vsi. V tabulce nejsou uvedeny spotřeby jen pro jednotlivé regulátory, ale i pro různá nastavení regulátorů.

Tabulka 12 - Porovnání spotřeb při jízdě z Mladějova do Nové Vsi

typ regulátoru	nastavení regulátoru	spotřeba [Wh]
		Mladějov - Nová Ves
PSD	0.5; 0.01	1087.82
	1; 0.005	1089.57
PSD + dopředná regulace s predikcí podle referenční jízdy	1; 0.005; intervence 80 %	1070.68
	1; 0.005; int 100%	1076.94
	0.5; 0.01; int 100%	1081
	0.5; 0.01; int 80%	1062
	0.5; 0.01; int 60%	1075
PSD + dopředná regulace s predikcí podle odporu stoupání	0.5; 0.01; int 80%	1051
	0.5; 0.01; int 100%	1043
Trajektorie podle stavového automatu	1; 0.005; výběh 10 m	1064

Legenda:

Nastavení regulátoru – proporcionální složka; integrační časová konstanta; hodnota intervence do akční veličiny (tažné síly) nebo výběh v metrech

 – nejhorší naměřená hodnota

 – nejlepší naměřená hodnota

Z provedených měření vyplývá, že typ regulátoru má vliv na spotřebu energie v jednotkách %. Při použití klasického PSD regulátoru je spotřeba největší. Nejmenší spotřeba byla naměřena při použití regulátoru s dopřednou větví, která respektuje sklon trati. Regulátor se stavovým automatem vycházející z fyzikálních vlastností vozidla měl srovnatelnou spotřebu s regulátorem s dopřednou větví, což potvrzuje, že výběh přinese úsporu energie. Z provedených experimentů je zřejmé, že jen volbou regulátoru lze ušetřit až 4 % trakční energie, což by u běžného drážního vozidla znamenalo nezanedbatelnou finanční úsporu při zhodnocení ročního provozu vozidla.

4 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY ŘEŠENÍ

Disertační práce se zabývá návrhem a hodnocením hybridního kolejového vozidla typu sběrač-akumulátor.

V první části práce je zpracována rozsáhlá rešerše současného stavu vědy a techniky v dané oblasti. Z rešerše vyplývá, že jsou ve světě hybridní kolejová vozidla typu sběrač-akumulátor úspěšně testována, například v Japonsku a Anglii jsou dokonce provozována v běžném provozu s cestujícími. Rešerše tedy posloužila k prvotnímu náhledu do problematiky a udala směr pro rozvoj prací v oblasti hybridizace drážních vozidel na českém území.

První řešenou problematikou v této práci je návrh pohonného řetězce pro hybridní kolejové vozidlo typu sběrač-akumulátor. Bylo zjištěno, že pro provoz v podmínkách ČR je nejvýhodnější použít dvou systémové vozidlo se 750voltovým meziobvodem a přímo připojenou akumulátorovou baterií do stejnosměrného meziobvodu.

Na základě zvolené koncepce vozidla bylo v další části práce provedeno porovnání hybridního vozidla s dieselovým vozidlem na vytypovaných českých tratích. Byla provedena bilance nákladů, z níž jednoznačně vyplynulo, že je hybridní vozidlo provozně výhodnější na daných tratích se smíšenou elektrickou a nezávislou trakcí.

Dále byla provedena optimalizační rozvaha u trakčního transformátoru a trakční akumulátorové baterie. Rovněž byla představena metodika pro odpojování trakčních motorů s cílem redukce spotřeby elektrické energie vlivem redukce ztrát na nevyužitých motorech. Ukázalo se, že dimenzování transformátoru má významný vliv pro dimenzování akumulátorové baterie. Odpojování trakčních motorů rovněž významně zlepšuje využití naakumulované energie.

Dojezd vozidla úzce souvisí se spotřebovanou energií, pročež byl v práci zhodnocen vliv regulace jízdy vozidla na spotřebu. Byla navržena optimální jízdní strategie vozidla, která byla formou tří regulačních struktur implementována do experimentálního akumulátorového kolejového vozidla Doprvaní fakulty Jana Pernera. Z výsledků vyplývá, že změnou regulační struktury lze uspořit až jednotky % trakční energie.

5 PŘÍNOS PRO ROZVOJ VĚDNÍ DISCIPLÍNY A PRAXI

Z pohledu dalšího využití provedených výzkumů je zřejmé, že použití zde řešených systémů a metod by mělo velice příznivý dopad na provoz a údržbu kolejových vozidel.

Zde řešené hybridní vozidlo není v současné době provozováno žádným z dopravců operujících na síti SŽDC, přičemž lze říci, že dané vozidlo by vyřešilo řadu problémů vznikajících při provozu dieselových jednotek. Použití navrženého vozidla by jednoznačně zlepšilo využití stávajícího trolejového vedení a značně by snížilo provozní náklady v porovnání se stávajícími vozidly. Při použití optimálního pohonného řetězce a vhodné algoritmizaci nadřazeného řídicího systému by navíc významně klesla spotřeba energie. Z technologického hlediska by pak odpadly přestupy na řadě míst, kde přechází elektrická trakce na trakci nezávislou, s čímž souvisí lepší využití vozidel nasazených v provozu.

6 ZÁVĚR

Disertační práce se zabývá návrhem a hodnocením hybridních kolejových vozidel. Jak bylo uvedeno v druhé kapitole, tak akumulátorová a hybridní kolejová vozidla získávají čím dál větší význam pro provoz, což jde ruku v ruce se snahou o omezování závislosti lidstva na fosilních palivech. K této snaze se doufejme, připojí i Česká republika, neboť tato práce představuje vhodnou koncepci vozidla, která byla ověřena simulačně.

Prvním z cílů disertační práce bylo zhodnotit současný stav formou rešerše, první část práce se zabývá vsutku komplexním zhodnocením současného stavu. Ze zhodnocení současného stavu vyplynulo, že se v Evropě, ale i ve státech mimo evropský kontinent začínají v poměrně hojné míře uplatňovat hybridní vozidla typu sběrač – akumulátor. Rovněž byly zhodnoceny v současné době používané přístupy pro optimalizaci jízdy vozidla a s tím souvisící přístupy pro automatické vedení vlaku v rámci České republiky.

Dalším z cílů disertační práce bylo najít vhodnou koncepci hybridního vozidla typu sběrač-akumulátor. Z tohoto důvodu byly navrženy a porovnány různé koncepce hybridních vozidel typu sběrač akumulátor z hlediska uspořádání pohonu. Po důkladném rozboru všech variant byla vybrána ta s nejlepšími parametry, konkrétně se jedná o variantu s napětím 750 V ve stejnosměrném meziobvodu. V této variantě je akumulátor zapojen do meziobvodu bez mezilehlého měniče, což přispěje k minimalizaci ztrát.

Se stanovenou strukturou pohonu byly následně provedeny simulační výpočty, při kterých se zkoumala výhodnost využití vozidla při provozu na předem definovaných tratích, kde je v běžném provozu nasazeno vozidlo se spalovacím motorem. Po porovnání energetiky bylo zjištěno, že hybridní vozidlo může dané tratě obsloužit ve stejné kvalitě, jako vozidlo se spalovacím motorem, přičemž cena za provoz hybridního vozidla nepřevyšuje náklady spojené s provozem vozidla se spalovacím motorem. Tímto byl naplněn cíl tvorby metodiky pro energetické a ekonomické hodnocení hybridního pohonu a cíl, jehož předmětem byla analýza využitelnosti hybridních vozidel v podmínkách ČR

Další část práce se potom zabývala splněním cíle optimalizovat komponenty pohonného řetězce hybridního kolejového vozidla. Zde byly představeny a na základě simulačních výpočtů ověřeny koncepty dimenzování trakčního transformátoru, akumulátoru a byla zde uvedena metodika na odpojování trakčních motorů dle zatížení vozidla.

Následující kapitoly se zabývaly analytickými výpočty pro zjištění optimální jízdní trajektorie vozidla. Na základě analytických výpočtů byl sestaven algoritmus pro optimální řízení pohonu z pohledu minimalizace spotřeby energie. Dále byly navrženy doplňující

algoritmy, rovněž pro minimalizaci spotřeby energie, čímž byl splněn cíl tvorby analytických výpočtů pro optimální jízdu vozidla.

Poslední část práce se věnuje návrhu optimálního algoritmického řešení nadřazeného řídicího systému vozidla, jehož ověření proběhlo při jízdách experimentálního kolejového vozidla na trati v Mladějově na Moravě. Z naměřených výsledků vyplývá, že při vylepšení řídicích algoritmů má vozidlo nižší spotřebu energie, a to řádově až o 4%.

Z hlediska doporučení dalšího postupu v řešené problematice lze říci, že není oblast optimalizací pohonných řetězců a řídicích algoritmů kolejových vozidel stále ještě zcela zdokumentovanou problematikou. Z tohoto důvodu by se měl další výzkum ubírat cestou hledání nových možností, jak uspořit a lépe využít tolik drahocennou energii pro pohánění dopravních prostředků.

7 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] KOHUTKA, Jiří. František Křížík: průkopnická osobnost české elektrotechniky. *Elektro*. Praha, 2007, 17(8-9), 84-89. ISSN 1210-0889.
- [2] BITTNER, Jaromír, KŘENEK, Jaroslav, SKÁLA, Bohumil, ŠRÁMEK, Milan. *Malý atlas lokomotiv 2003*. Praha: GRADIS Bohemia, s.r.o., 2003. ISBN 80-902791-6-3.
- [3] BOSÁČEK, Josef. Unikátní lokomotivy z ČKD (1. část) Akumulátorová lokomotiva 704.201. *Dráha, 2014*, č. 4, s. 10, s. 19. Praha: NADATUR, 2014. ISSN 1211-1260.
- [4] London Underground battery-electric locomotives. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-09-10]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/London_Underground_battery-electric_locomotives
- [5] KONO, Y., N. SHIRAKI a H. YOKOYAMA. Catenary and Storage Battery Hybrid System for Electric Railcar Series EV-E301. In: *The 2014 International Power Electronics Conference*. s. 5. ISBN 978-1-4799-2705-0.
- [6] interní materiály a dokumentace ŠKODA TRANSPORTATION, SIEMENS
- [7] JACKSON, Christopher. Battery EMU on test. *Railway Gazette Internationl*. Sutton: Railway Gazette Internationl, 2014(September).
- [8] Batteries included: Prototype battery-powered train carries passengers for first time. In: *NetworkRail* [online]. London: NetworkRail, 2015 [cit. 2017-01-03]. Dostupné z: <http://www.networkrailmediacentre.co.uk/news/batteries-included-prototype-battery-powered-train-carries-passengers-for-first-time>
- [9] KAYE, Jo a Paul MCMAHON. Welsh Route study. London: Network Rail, 2016. Dostupné také z: <http://www.networkrail.co.uk/long-term-planning-process/Welsh-Route-Study.pdf>
- [10] BATTERY-DRIVEN BOMBARDIER ELECTROSTAR [online]. Zurich: Bombardier Transportation, 2015, s. 3 [cit. 2017-01-03]. Dostupné z: http://www.bombardier.com/content/dam/Websites/bombardiercom/Projects/supporting-documents/BT_Battery-Driven-Bombardier-Electrostar_LowRes.pdf
- [11] SHIRAKI, Naoki, Kosuke TOKITO a Ryo YOKOZUTSUMI. Propulsion system for catenary and storage battery hybrid electric railcar series EV-E301. In: *2015 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS)*. Aachen: IEEE Computer Society, 2015, s. 0-7. ISBN 978-1-4799-7401-6. ISSN 2165-9400.

- [12] TAGUCHI, Yoshiaki, Satoshi KADOWAKI, Takayuki NAKAMURA, Masaki MIKI, Kenji HATAKEDA a Yoshimasa ARITA. Development of a Traction Circuit for Battery-powered and AC-fed Dual Source EMU and Running Test Evaluation of the On-board Battery Performance. *Quarterly Report of RTRI*. Railway Technical Research Institute, 2015, 2015(56), 98-104. DOI: <http://doi.org/10.2219/rtriqr.56.98>. ISSN 1880-1765.
- [13] Supercapacitor-battery loco. *Railway Gazette*. 2016, 176(11), 65. ISSN 0373-5346.
- [14] Modular metro locomotive under development. In: *Railway Gazette* [online]. 2016, s. 1 [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: <http://www.railwaygazette.com/news/single-view/view/modular-metro-locomotive-under-development.html>
- [15] Škoda dodala do Turecka 12 tramvají na baterie, ujedou minimálně tři kilometry mimo trakční vedení. *Hospodářské Noviny*. Praha, 2015, s. 1. ISSN 1213-7693. Dostupné také z: <http://byznys.ihned.cz/c1-64470440-skoda-dodala-do-turecka-12-tramvaji-na-baterie-ujedou-minimalne-tri-kilometry-mimo-trackni-vedeni>
- [16] Ve Zlíně se zkouší první bateriový trolejbus. In: *Tisková zpráva města Zlína* [online]. Zlín, 2016, s. 1 [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: <https://www.zlin.eu/ve-zline-se-zkousi-prvni-bateriovy-trolejbus-aktuality-3229.html>
- [17] LIESKOVSKÝ, Aleš, Ivo MYSLIVEC a Pavel ŠPAČEK. ETCS a AVV - spolupráce, nikoliv konkurence. In: *Vědeckotechnický sborník ČD. 21*. Praha: Generální ředitelství ČD, 2006, s. 1-6. ISSN 1214-9047. Dostupné také z: <https://vts.cd.cz/documents/51448/51688/2105.pdf/6964df80-c2be-4de7-8a76-0bbd694dfd76>
- [18] BINKO, Marek. Automatické vedení vlaku na síti SŽDC. In: <http://binko.wz.cz/> [online]. 2015, s. 1-20. [cit. 2017-01-07]. Dostupné z: <http://binko.webzdarma.cz/2015-1b.pdf>
- [19] Automatické vedení vlaku. VYSOKÝ, Petr a Ivo MYSLIVEC. *Systémy řízení dopravních prostředků*. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004, s. 116-120. ISBN 80-01-03115-2.
- [20] PAGLIARA, Enrico, Gianfranco PARLANGELI, Teresa DONATEO a Francesco ADAMO. Real Time implementation of an optimal power management strategy for a Plug-In Hybrid Electric Vehicle. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*. Florence: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013, s. 2214-2219. DOI: 10.1109/CDC.2013.6760210. ISSN 01912216.

- [21] ZLOCKI, Adrian a Philipp THEMANN. Methodology for quantification of fuel reduction potential for adaptive cruise control relevant driving strategies. In: *IET Intelligent Transport Systems*. 8. The institution of Engineering and Technology, 2014, s. 68-75. DOI: 10.1049/iet-its.2012.0095. ISSN 1751956X.
- [22] SHIRAKI, Naoki a Keiichiro KONDO. Evaluation of design method for engine output power and battery energy capacity for lithium-ion battery hybrid diesel railway vehicles. In: *Electrical Engineering in Japan*. 185. 2013, s. 49-56. DOI: 10.1002/ej.22396. ISSN 04247760.
- [23] SHAOFENG, Lu, Stuart HILLMANSEN a Clive ROBERTS. A power-management strategy for multiple-unit railroad vehicles. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011, s. 406-420. DOI: 10.1109/TVT.2010.2093911. ISSN 00189545.
- [24] DONNELLY, Frank W., Raymond L. COUSINEAU a R.N.M. HORSLEY. Hybrid technology for the rail industry. In: *Proceedings of the 2004 ASME/IEEE Joint Rail Conference*. Baltimore: American Society of Mechanical Engineers, Rail Transportation Division, 2004, s. 113-117. DOI: 10.1115/RTD2004-66041.
- [25] LIU, Shuqi, Fang CAO, Jing XUN a Yihui WANG. Energy-Efficient Operation of Single Train Based on the Control Strategy of ATO. In: *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*. Gran Canaria: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015, s. 2580-2586. DOI: 10.1109/ITSC.2015.415. ISBN 978-146736595-6.
- [26] FERNANDEZ-RODRIGUEZ, Adrian, Antonio FERNDANDEZ-CARDADOR, Asuncion P. CULA, Maria DOMINIGUEZ a Tad GONSALVES. Design of Robust and Energy-Efficient ATO Speed Profiles of Metropolitan Lines Considering Train Load Variations and Delays. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015, s. 2061-2071. DOI: 10.1109/TITS.2015.2391831. ISSN 15249050.
- [27] CHEVRIER, Remy. An evolutionary multi-objective approach for speed tuning optimization with energy saving in railway management. In: *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*. Funchal: 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 2010, s. 279-284. DOI: 10.1109/ITSC.2010.5625026. ISBN 978-142447657-2.

- [28] SHANGGUAN, Wei, Xi-Hui YAN, Bai-Gen CAI a Jian WANG. Multiobjective Optimization for Train Speed Trajectory in CTCS High-Speed Railway with Hybrid Evolutionary Algorithm. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 16. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015, s. 2215-2225. DOI: 10.1109/TITS.2015.2402160. ISSN 15249050.
- [29] XIAJUAN, Lu, Qi GUO, Haiyng DONG a Ma BAOFENG. The research and application of NMPC in automatic train operation. In: *WSEAS Transactions on Systems and Control*. 10. World Scientific and Engineering Academy and Society, 2015, s. 228-236. ISSN 19918763.
- [30] MLYNAŘÍK, L., NOVÁK, J., LELEK, T., SADÍLEK, O., DOLEČEK, R., MAŠEK, Z. *Studie možnosti provozu dvouzdrojových vozidel v Jihomoravském kraji*. KORDIS JMK, a.s., 2014.140 s.
- [31] MLYNAŘÍK, L., NOVÁK, J., LELEK, T., SADÍLEK, O., DOLEČEK, R., SÝKORA, P. *Výchozí studie provozu dvouzdrojových kolejových vozidel v Jihomoravském kraji*. 2013.
- [32] interní materiály ČD
- [33] JANÍK, BC, Jiří. Náklady na provoz kolejových vozidel: Diplomová práce. Pardubice, 2008. Dostupné z: <http://dspace.upce.cz/bitstream/10195/29590/1/text.pdf>
- [34] NOVÁK, J., SADILEK, O., SYKORA, P. Lithiové trakční akumulátory pro elektromobilitu. *Elektro*, 2016, roč. 2016, č. 11, s. 8-12. ISSN 1210-0889.
- [35] NOVÁK, J., ČERNÝ, O., LENOCH, V., SÝKORA, P., LATA, M. Vlastnosti a řízení kolejových vozidel s nezávisle otáčivými koly – teoretické a simulační práce, stavba experimentálního vozidla. Pardubice : TAČR, 2012.118 s.
- [36] NOVÁK, J. – ČERNÝ, O. – ŠIMÁNEK, J.: Regulace synchronního motoru pro lehkou kolejovou trakci, *ELEKTRO*. 2008, roč. 18, č.6 , s. 4-10. ISSN 1210-0889.
- [37] materiály firmy NI
- [38] PECHOUŠEK, Jiří. *Základy programování v prostředí LabVIEW*. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého, 2004, 84 s. ISBN 80-244-0800-7.

8 PUBLIKAČNÍ ČINNOST DOKTORANDA

8.1 Příspěvky na českých konferencích

MLYNAŘÍK, L., LELEK, T., SADÍLEK, O., ČERMÁK, D., NOVÁK, J. Energetické přínosy jízdy dvouzdrojového vozidla s proměnným počtem trakčních motorů. In *SEKEL 2016*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2016, ISBN 978-80-214-5395-1.

NOVÁK, J., KOŘÍNEK, J., LELEK, T., SADÍLEK, O. Vlastnosti a odrušení výstupu frekvenčního měniče s dlouhým kabelem k motoru. In *Elektrotechnická zařízení v dopravě*. Pardubice : Univerzita Pardubice, 2016, s. 59-67. ISBN 978-80-7395-970-8.

SÝKORA, P., SADÍLEK, O., LELEK, T. VÝZKUM V OBLASTI APLIKACE ALTERNATIVNÍCH ENERGETICKÝCH ZDROJŮ NA DRÁŽNÍ VOZIDLA. In *Elektrotechnická zařízení v dopravě*. Pardubice : Univerzita Pardubice, 2016, s. 1-10. ISBN 978-80-7395-970-8.

NOVÁK, J., MLYNAŘÍK, L., LELEK, T. Návrh, možnosti využití a simulace drážních vozidel s kombinovaným napájením. In *XXXIV. Celostátní konference o elektrických pohonech*. Praha : Česká elektrotechnická společnost, 2015, s. 10-22. ISBN 978-80-02-02592-4.

MLYNAŘÍK, L., LELEK, T. Využití programovacího prostředí MATLAB pro simulace jízdy a spotřeby energie kolejového vozidla. In *Elektrotechnická zařízení v dopravě 2015*. Pardubice : Univerzita Pardubice, 2015, s. 1-8. ISBN 978-80-7395-878-7.

SADÍLEK, O., LELEK, T., SÝKORA, P. Možnosti nabíjení trakčních akumulátorových baterií pomocí fotovoltaických panelů. In *Elektrotechnická zařízení v dopravě 2015*. Pardubice : Univerzita Pardubice, 2015, s. 1-10. ISBN 978-80-7395-878-7.

NOVÁK, J., MLYNAŘÍK, L., LELEK, T. Vybrané problémy implementace simulačních modelů elektrických strojů v hnacích vozidlech. In *Elektrotechnická zařízení v dopravě 2015*. Pardubice : Univerzita Pardubice, 2015, s. 1-8. ISBN 978-80-7395-878-7.

LELEK, T., MAŠEK, Z., SÝKORA, P., NOVÁK, J. Analýza účinnosti pohonného řetězce pro dvouzdrojové kolejové vozidlo. In *Elektrotechnická zařízení v dopravě 2014*. Pardubice : Univerzita Pardubice, 2014, s. 1-13. ISBN 978-80-7395-749-0.

SADÍLEK, O., LELEK, T., SÝKORA, P. Aktivita v oblasti akumulátorového napájení dopravních prostředků. In *SEKEL 2014 mezinárodní konference učitelů elektrotechniky*. Praha : Česká zemědělská univerzita v Praze, 2014, s. 60-71. ISBN 978-80-213-2480-0.

8.2 Příspěvky na mezinárodních konferencích

SADÍLEK, O., LELEK, T., KOŘÍNEK, J. Interfering Influences on Electrical Cable between Frequency Converter and Electric Motor. In *Radioelektronika 2016 : conference proceedings*. New York : IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), 2016, s. 150-155. ISBN 978-1-5090-1674-7.

SADÍLEK, O., LELEK, T., SÝKORA, P., DOLEČEK, R. Research of Alternative Energy Sources for Railway Vehicles. In *Radioelektronika 2016 : conference proceedings*. New York : IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), 2016, s. 156-161. ISBN 978-1-5090-1674-7.

LELEK, T. Filtering of the electromagnetic interference at using pulse width modulation techniques by Finite impulse response. In *6th International Scientific Conference: Conference Proceedings*. Pardubice : Univerzita Pardubice, 2015, s. 283-289. ISBN 978-80-7395-924-1.

LELEK, T., SADÍLEK, O., DOLEČEK, R., MLYNAŘÍK, L., SÝKORA, P. Dual source railway vehicles. In *Proceedings of 25th International Conference Radioelektronika, RADIOELEKTRONIKA 2015*. New York : IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), 2015, s. 56-60. ISBN 978-1-4799-8117-5.

LELEK, T., LENOCH, V., LETTL, J., SADÍLEK, O., SCHEJBAL, V., SÝKORA, P. Windowing effect on electromagnetic interference and efficiency at using pulse width modulation techniques. In *PIERS 2015 Prague: Proceedings*. Cambridge : The Electromagnetics Academy, 2015, s. 2731-2735. ISBN 9781934142301. ISSN 1559-9450.

8.3 Příspěvky v recenzovaných periodikách

MAŠEK, Z., LENOCH, V., LELEK, T. Simulation Model of Hybrid Shunting Locomotive. *Transactions on Electrical Engineering*, 2016, roč. 5, č. 3, s. 75-90. ISSN 1805-3386.

NOVÁK, J., MLYNAŘÍK, L., LELEK, T. Možnosti využití kolejových vozidel s kombinovaným napájením v regionální osobní dopravě. *Elektro*, 2015, roč. 2015, č. 6, s. 6-11. ISSN 1210-0889.

8.4 Výzkumné zprávy

NOVÁK, J., MLYNAŘÍK, L., SADÍLEK, O., LELEK, T. *Možnosti využití hybridizovaných jednotek ř. 440 a ř. 640 s akumulátory High Energy*. 2015.

MLYNAŘÍK, L., NOVÁK, J., LELEK, T., SADÍLEK, O., DOLEČEK, R., SÝKORA, P. *Výchozí studie provozu dvouzdrojových kolejových vozidel v Jihomoravském kraji*. 2013.

NOVÁK, J., MLYNAŘÍK, L., SADÍLEK, O., LELEK, T. *Analýza využitelnosti hybridizovaných jednotek ř. 440 a ř. 640 v podmínkách železniční sítě ČR*. 2015.

MLYNAŘÍK, L., NOVÁK, J., LELEK, T., SADÍLEK, O., DOLEČEK, R., MAŠEK, Z. *Studie možnosti provozu dvouzdrojových vozidel v Jihomoravském kraji*. KORDIS JMK, a.s., 2014.140 s.

DRDLA, P., BULÍČEK, J., CEMPÍREK, V., ČERNÝ, O., DOLEČEK, R., DVOŘÁK, K., HÁBA, A., HRUBAN, I., JEŽEK, J., KUČERA, T., KUDLÁČKOVÁ, N., LATA, M., LELEK, T., MACHALÍK, S., MATUŠKA, J., MICHÁLEK, T., MLYNAŘÍK, L., NACHTIGALL, P., NOVÁK, J., NOVÁK, P., SADÍLEK, O., ŠIROKÝ, J., ŠVADLENKA, L. *Názvoslovná norma pro oblast provozování dráhy. Správa železniční dopravní cesty, státní organizace*, 2016.145 s.

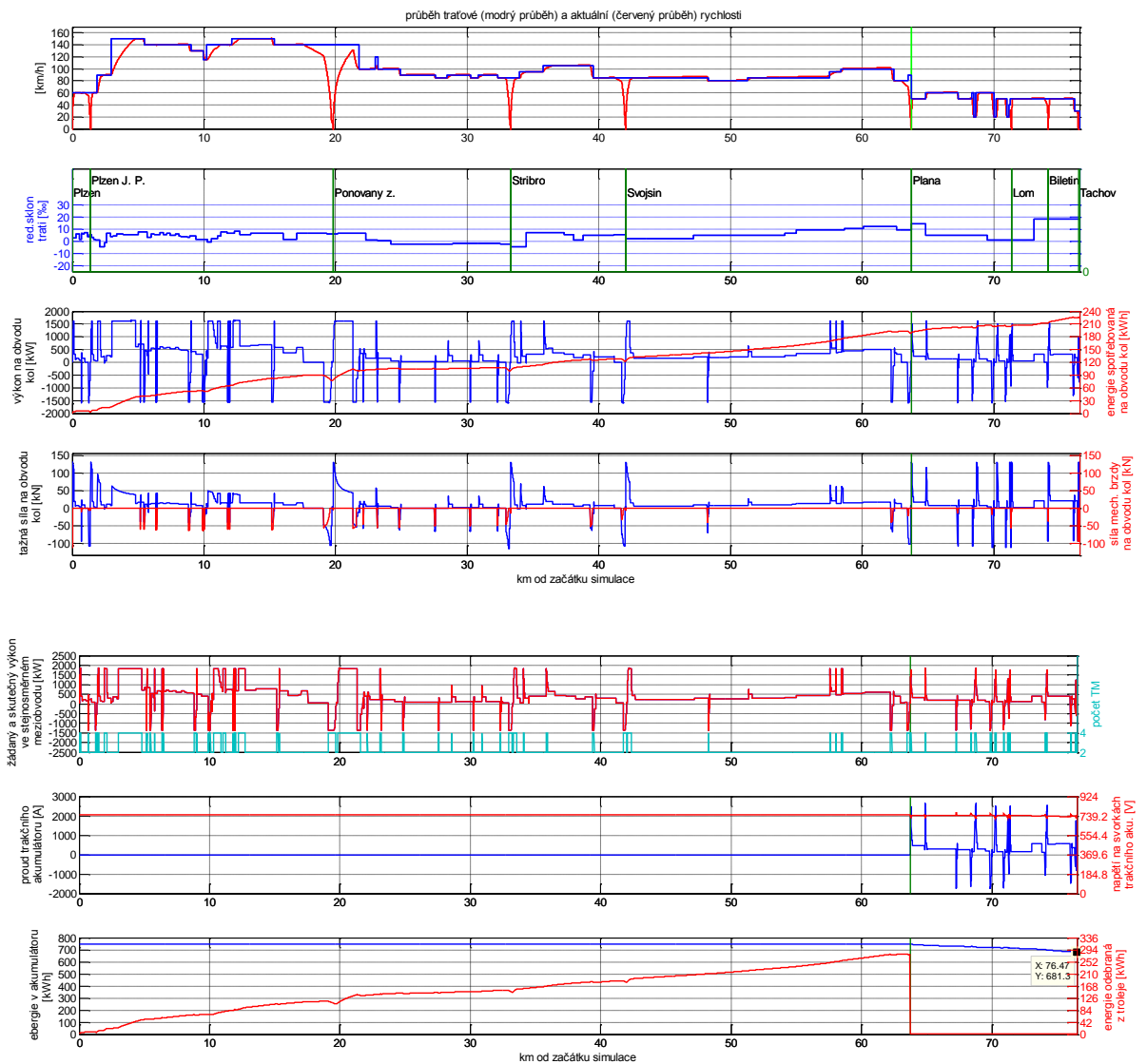
9 PŘÍLOHY

9.1 Optimalizace transformátoru

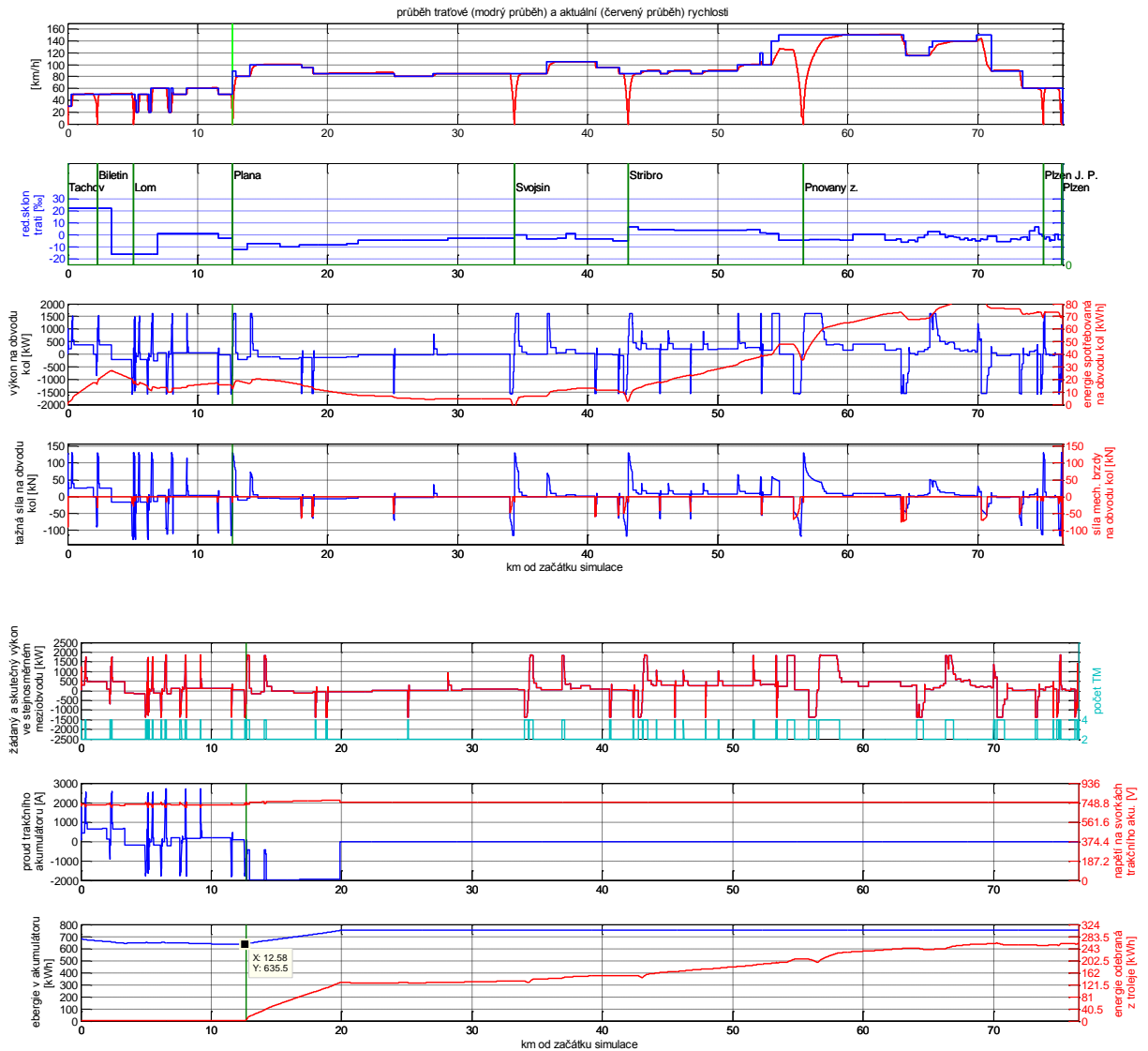
9.1.1 Trať Plzeň – Planá u Mariánských lázní - Tachov

	<u>Maximální výkon transformátoru 3333kW</u>	<u>Maximální výkon transformátoru 2200kW</u>	
		Preference trakce	Preference dobíjení
Spotřeba energie v obou směrech pro jízdu i dobíjení aku (jeden/druhý směr)	278/259kWh	277/258kWh	276/260kWh
Čas dobíjení akumulátoru (jeden/druhý směr)	0/4,8min	0/5,2min	0/4,8min
Prodloužení jízdní doby z důvodu nedostatku trakčního výkonu (jeden/druhý směr)	Není (62min)/ není (64min)	Není (62min)/ není (64min)	Není (62min)/ není (64min)
Poměrná doba cesty, kdy je transformátor přetěžován (jeden/druhý směr)	-	7,4/6,1%	7,4/7,4%

Tab. 1 shrnutí nejdůležitějších energetických veličin při jízdě dvouzdrojového vozidla z Plzně do Tachova a zpět



Obr. 1 Průběh aktuální a traťové rychlosti, redukováného sklonu trati a polohy zastávek; výkonu, tažné síly a energie na obvodu kol; žádaného a skutečného výkonu ve stejnosměrném meziobvodu, využití trakčních motorů; svorkového napětí trakčního akumulátoru, proudu trakčním akumulátorem, energie v akumulátoru a energie odebrané z troleje v závislosti na poloze vozidla na trati v úseku Plzeň – Tachov při jízdě s preferencí trakce a jmenovitým výkonu transformátoru 2200kW

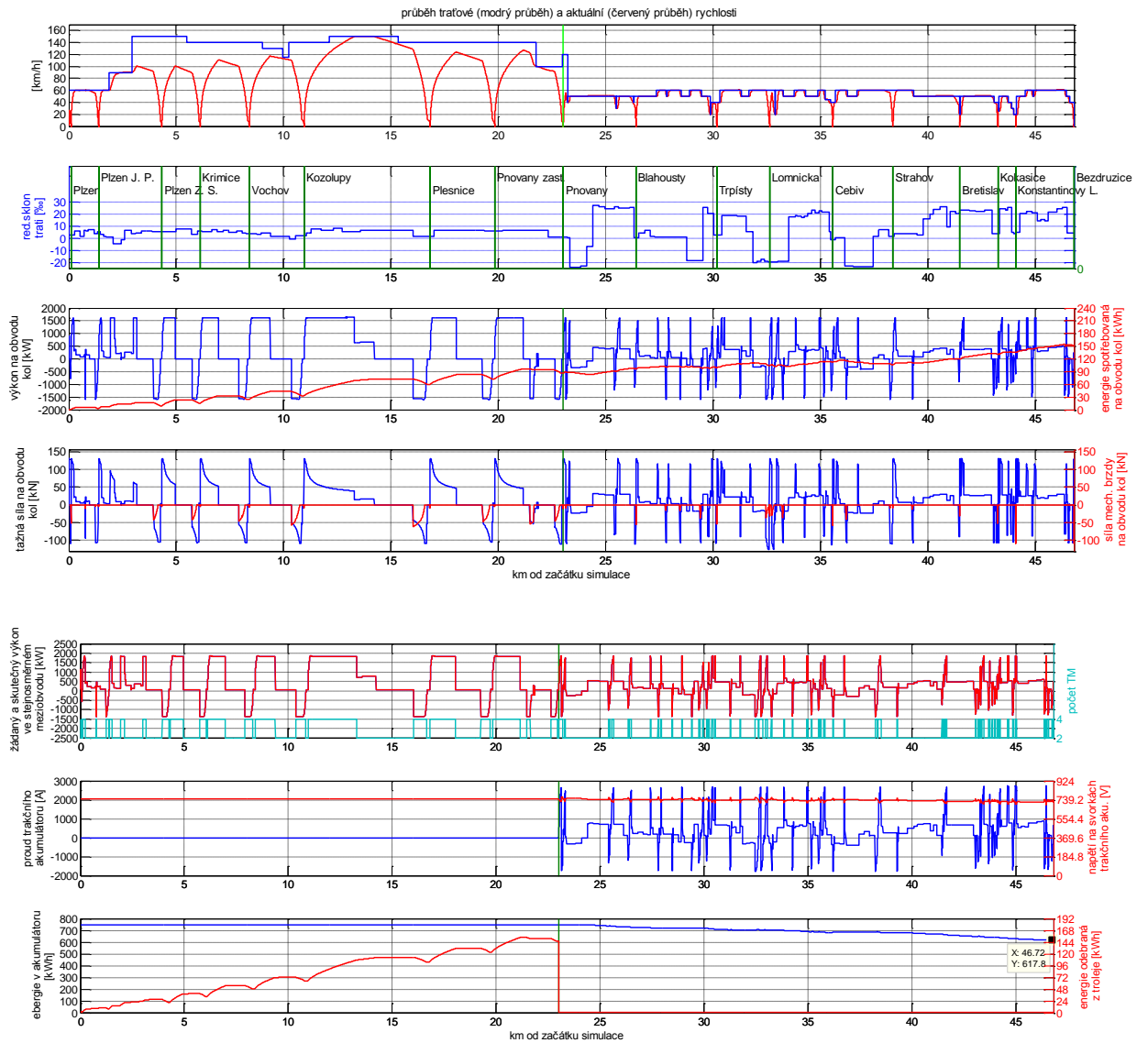


Obr. 2 Průběh aktuální a traťové rychlosti, redukováného sklonu trati a polohy zastávek; výkonu, tažné síly a energie na obvodu kol; žádaného a skutečného výkonu ve stejnosměrném meziobvodu, využití trakčních motorů; svorkového napětí trakčního akumulátoru, proudu trakčním akumulátorem, energie v akumulátoru a energie odebrané z troleje v závislosti na poloze vozidla na trati v úseku Tachov - Plzeň při jízdě s preferencí trakce a jmenovitým výkonu transformátoru 2200kW

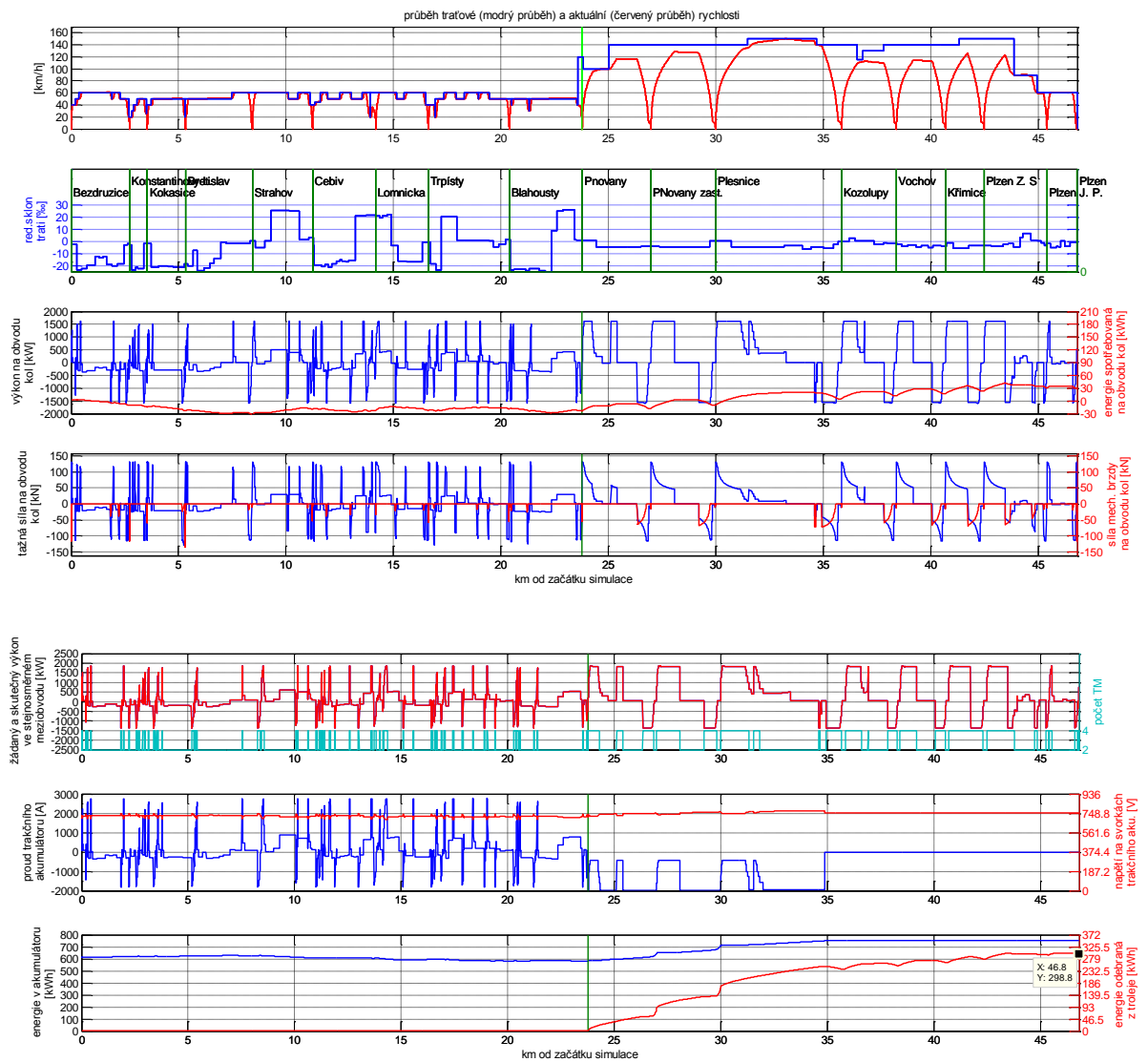
9.1.2 Trať Plzeň – Pňovany – Bezručice

	<u>Maximální výkon transformátoru 3333kW</u>	<u>Maximální výkon transformátoru 2200kW</u>	
		Preference trakce	Preference dobíjení
Spotřeba energie v obou směrech pro jízdu i dobíjení aku (jeden/druhý směr)	146kWh/300kWh	146kWh/299kWh	146kWh/293kWh
Čas dobíjení akumulátoru (jeden/druhý směr)	0min/7,8min	0min/7,9min	0min/7,8min
Prodloužení jízdní doby z důvodu nedostatku trakčního výkonu (jeden/druhý směr)	Není (57min)/ není (57min)	Není (57min)/ není (57min)	Není (57min)/ 1min (58min)
Poměrná doba cesty, kdy je transformátor přetěžován (jeden/druhý směr)	-	20,3%/24,4%	20,3%/27,2%

Tab. 2 shrnutí nejdůležitějších energetických veličin při jízdě dvouzdrojového vozidla z Plzně do Bezručic a zpět



Obr. 3 Průběh aktuální a tratové rychlosti, redukovaného sklonu trati a polohy zastávek; výkonu, tažné síly a energie na obvodu kol; žádaného a skutečného výkonu ve stejnosměrném meziobvodu, využití trakčních motorů; svorkového napětí trakčního akumulátoru, proudu trakčním akumulátorem, energie v akumulátoru a energie odebrané z troleje v závislosti na poloze vozidla na trati v úseku Plzeň – Bezdrůžice při jízdě s preferencí trakce a jmenovitým výkonu transformátoru 2200kW



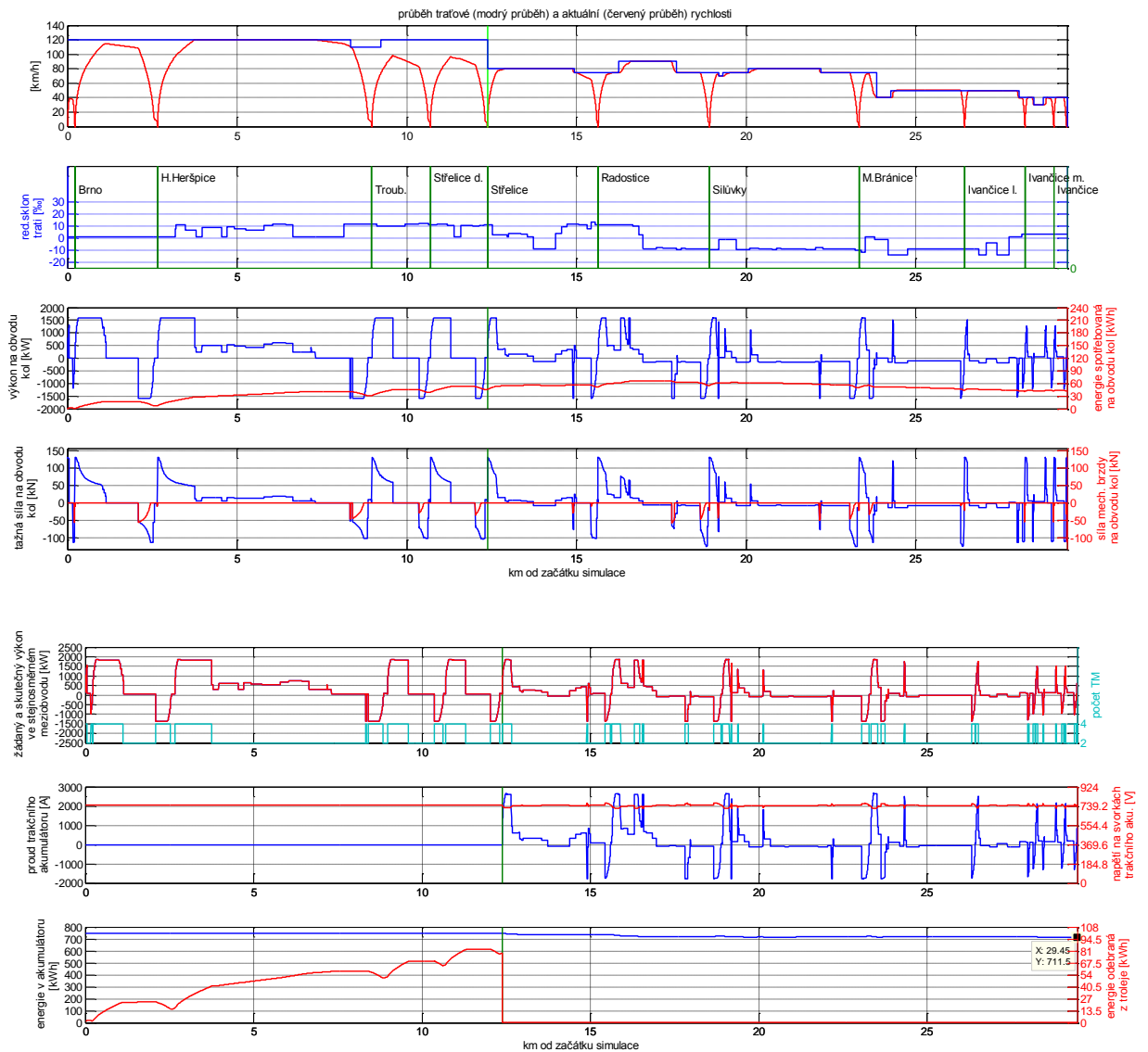
Obr. 4 Průběh aktuální a traťové rychlosti, redukováného sklonu trati a polohy zastávek; výkonu, tažné síly a energie na obvodu kol; žádaného a skutečného výkonu ve stejnosměrném meziobvodu, využití trakčních motorů; svorkového napětí trakčního akumulátoru, proudu trakčním akumulátorem, energie v akumulátoru a energie odebrané z troleje v závislosti na poloze vozidla na trati v úseku Bezdružice - Plzeň při jízdě s preferencí trakce a jmenovitým výkonu transformátoru 2200kW

9.1.3 Trať Brno – Střelice – Ivančice (budoucí traťové rychlosti)

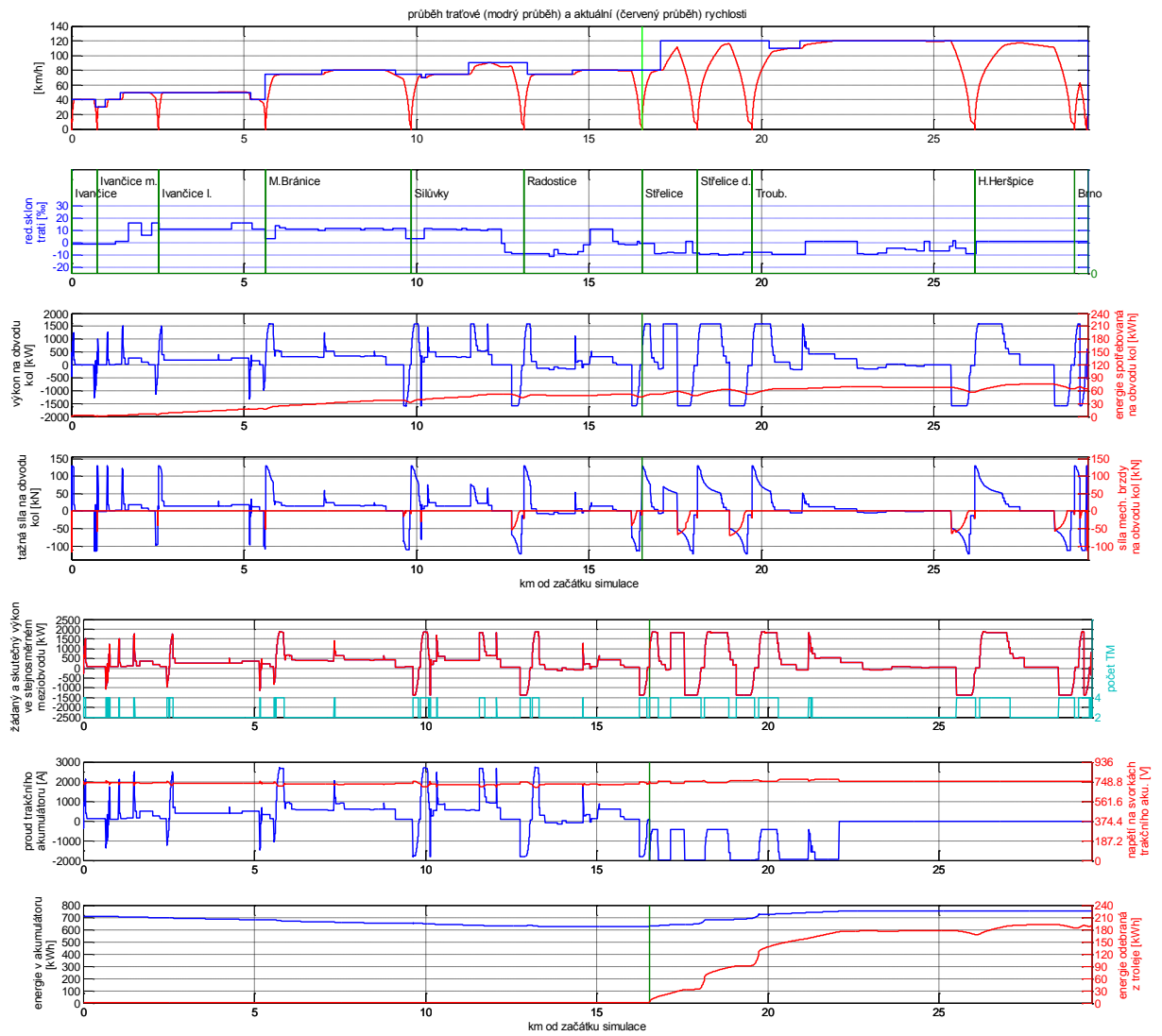
V této simulaci je uvažována budoucí rekonstruovaná a elektrizovaná trať z Brna do Střelic.

	<u>Maximální výkon transformátoru 3333kW</u>	<u>Maximální výkon transformátoru 2200kW</u>	
		Preference trakce	Preference dobíjení
Spotřeba energie v obou směrech pro jízdu i dobíjení aku (jeden/druhý směr)	78kWh/188kWh	78kWh/189kWh	78kWh/180kWh
Čas dobíjení akumulátoru (jeden/druhý směr)	0min/5,4min	0min/6,5min	0min/5,3min
Prodloužení jízdní doby z důvodu nedostatku trakčního výkonu (jeden/druhý směr)	Není (33min)/ není (33min)	Není (33min)/ není (33min)	Není (33min)/ 1min (34min)
Poměrná doba cesty, kdy je transformátor přetěžován (jeden/druhý směr)	-	16,6%/24,5%	16,3%/23%

Tab. 3 shrnutí nejdůležitějších energetických veličin při jízdě dvouzdrojového vozidla z Brna do Ivančic a zpět



Obr. 5 Průběh aktuální a traťové rychlosti, redukovaného sklonu trati a polohy zastávek; výkonu, tažné síly a energie na obvodu kol; žádaného a skutečného výkonu ve stejnosměrném meziobvodu, využití trakčních motorů; svorkového napětí trakčního akumulátoru, proudu trakčním akumulátorem, energie v akumulátoru a energie odebrané z troleje v závislosti na poloze vozidla na trati v úseku Brno – Ivančice při jízdě s preferencí trakce a jmenovitém výkonu transformátoru 2200kW



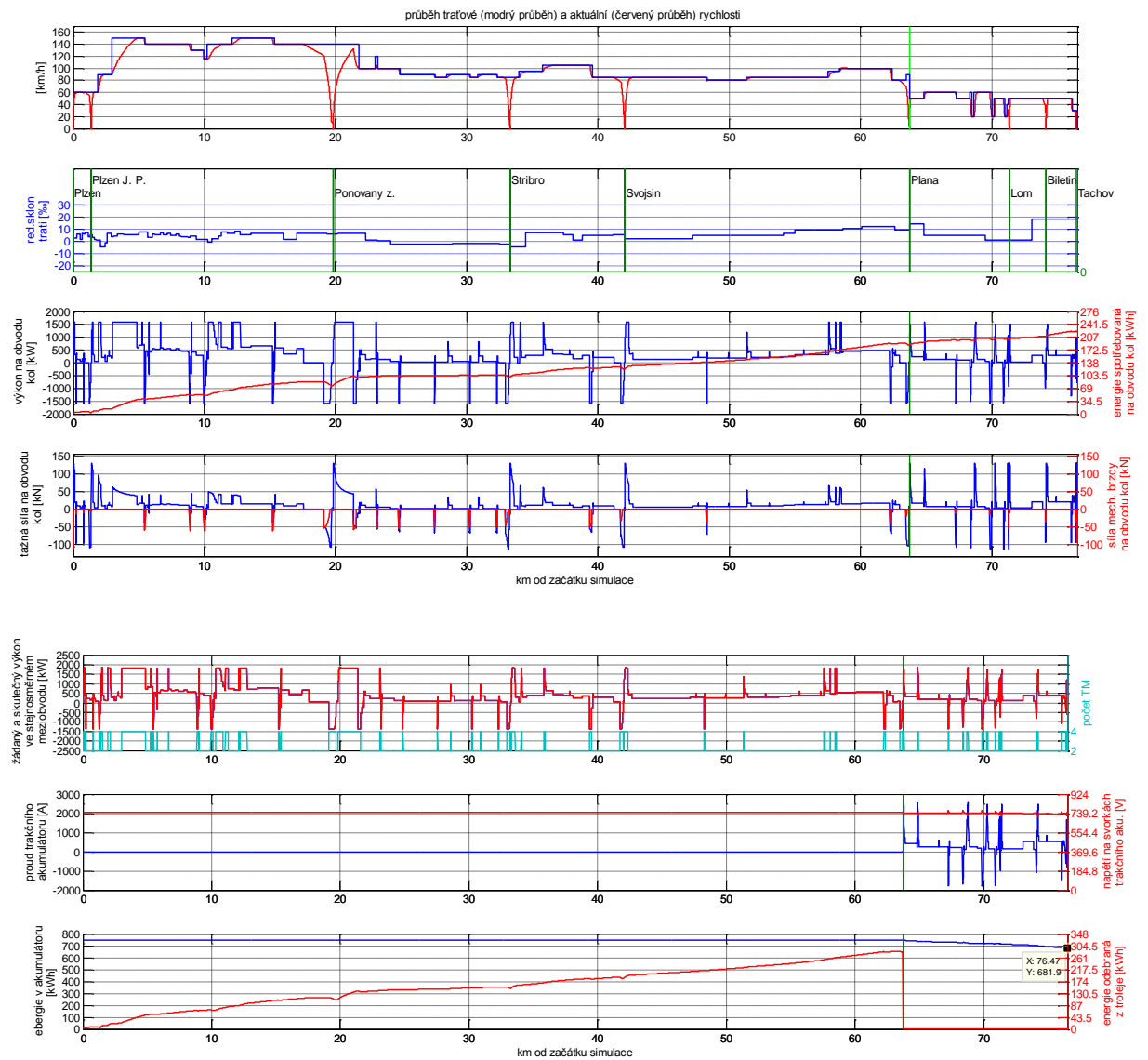
Obr. 6 Průběh aktuální a traťové rychlosti, redukováného sklonu trati a polohy zastávek; výkonu, tažné síly a energie na obvodu kol; žádaného a skutečného výkonu ve stejnosměrném meziobvodu, využití trakčních motorů; svorkového napětí trakčního akumulátoru, proudu trakčním akumulátorem, energie v akumulátoru a energie odebrané z troleje v závislosti na poloze vozidla na trati v úseku Ivančice - Brno při jízdě s preferencí trakce a jmenovitým výkonu transformátoru 2200kW

9.2 Optimalizace využití počtu trakčních motorů

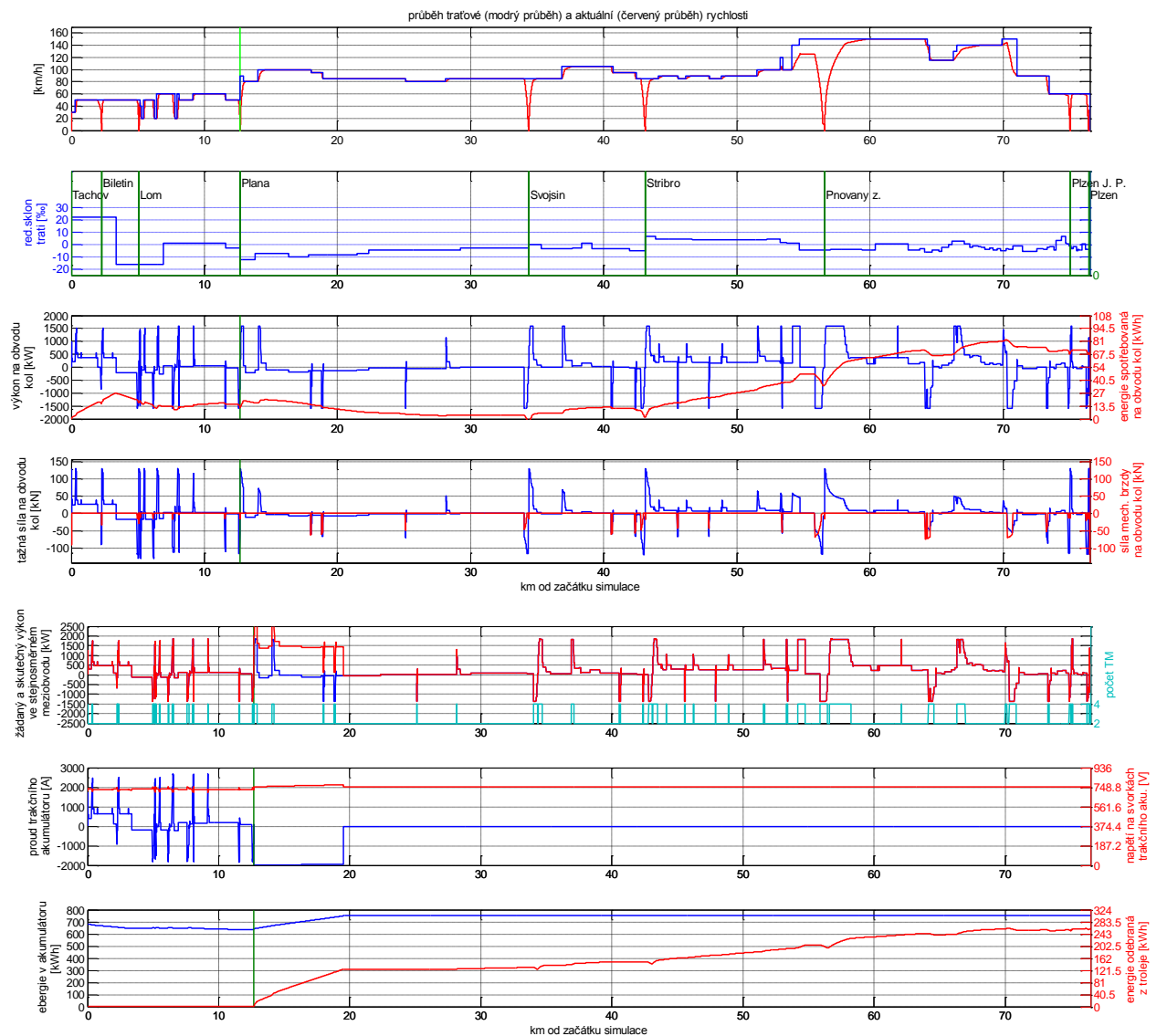
9.2.1 Trať Plzeň – Planá u Mariánských lázní - Tachov

	<u>Plzeň-Tachov</u>		<u>Tachov-Plzeň</u>	
	el [kWh]	aku [kWh]	el [kWh] (včetně dobíjení aku.)	aku [kWh]
Spotřeba energie při jízdě se všemi TM	292 kWh	74 kWh	284 kWh	51 kWh
Spotřeba energie při jízdě při odpojování ½ TM	281 kWh	68 kWh	260 kWh	37 kWh
Úspora odebrané energie z trakčního vedení vlivem možnosti odpojení TM	<u>11kWh / 3,8%</u>		<u>24kWh / 8,4%</u>	
Četnost využití všech 4 TM	15%		13%	
Četnost využití ½ (2) TM	85%		87%	

Tab. 4 shrnutí nejdůležitějších energetických veličin při jízdě dvouzdrojového vozidla z Plzně do Tachova a zpět



Obr. 7 Průběh aktuální a traťové rychlosti, redukovaného sklonu trati a polohy zastávek; výkonu, tažné síly a energie na obvodu kol; žádaného a skutečného výkonu ve stejnosměrném meziobvodu, využití trakčních motorů; svorkového napětí trakčního akumulátoru, proudu trakčním akumulátorem, energie v akumulátoru a energie odebrané z troleje v závislosti na poloze vozidla na trati v úseku Plzeň – Tachov při jízdě s možností odpojování ½ trakčních motorů

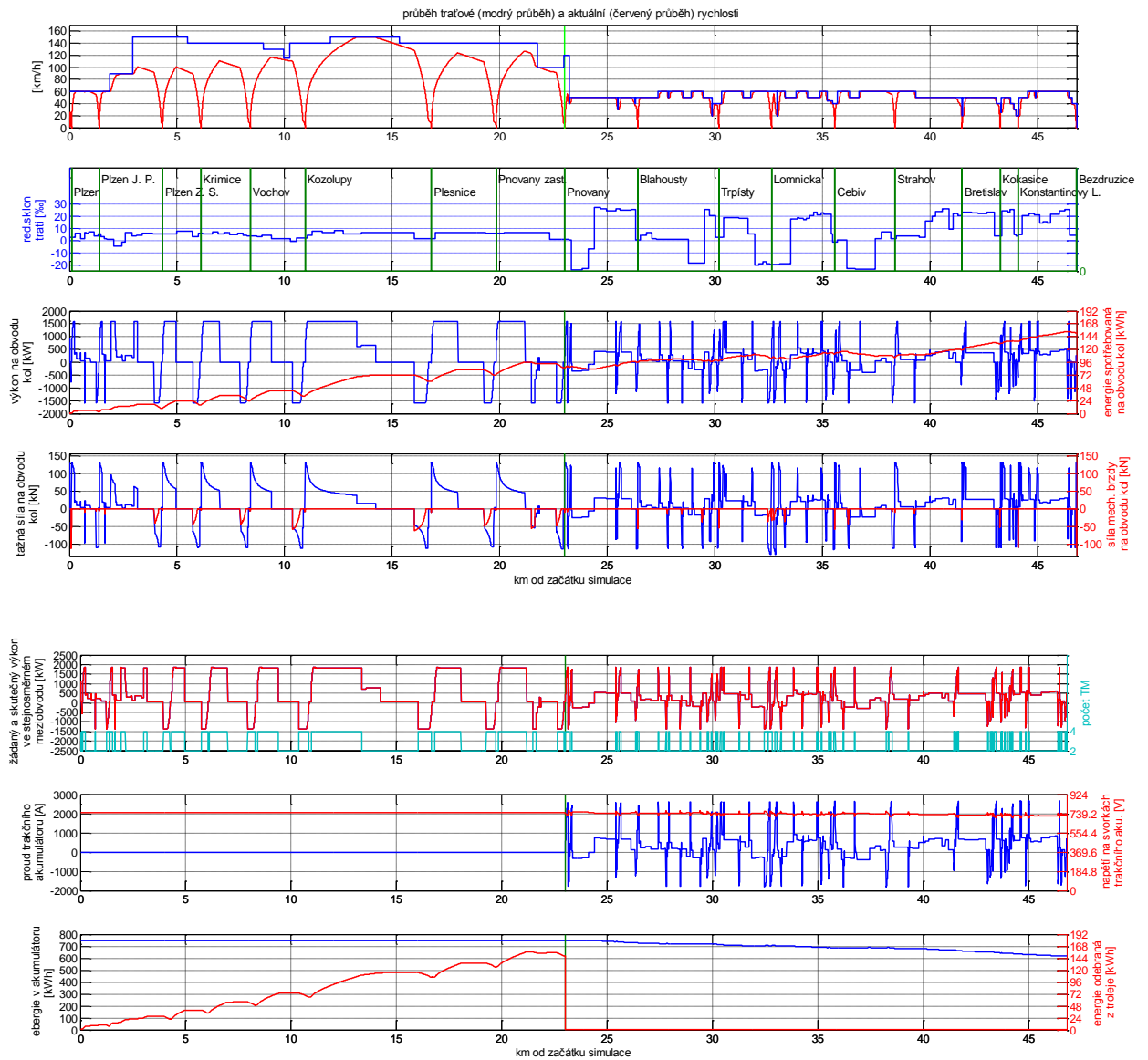


Obr. 8 Průběh aktuální a traťové rychlosti, redukovaného sklonu trati a polohy zastávek; výkonu, tažné síly a energie na obvodu kol; žádaného a skutečného výkonu ve stejnosměrném meziobvodu, využití trakčních motorů; svorkového napětí trakčního akumulátoru, proudu trakčním akumulátorem, energie v akumulátoru a energie odebrané z troleje v závislosti na poloze vozidla na trati v úseku Tachov - Plzeň při jízdě s možností odpojování ½ trakčních motorů

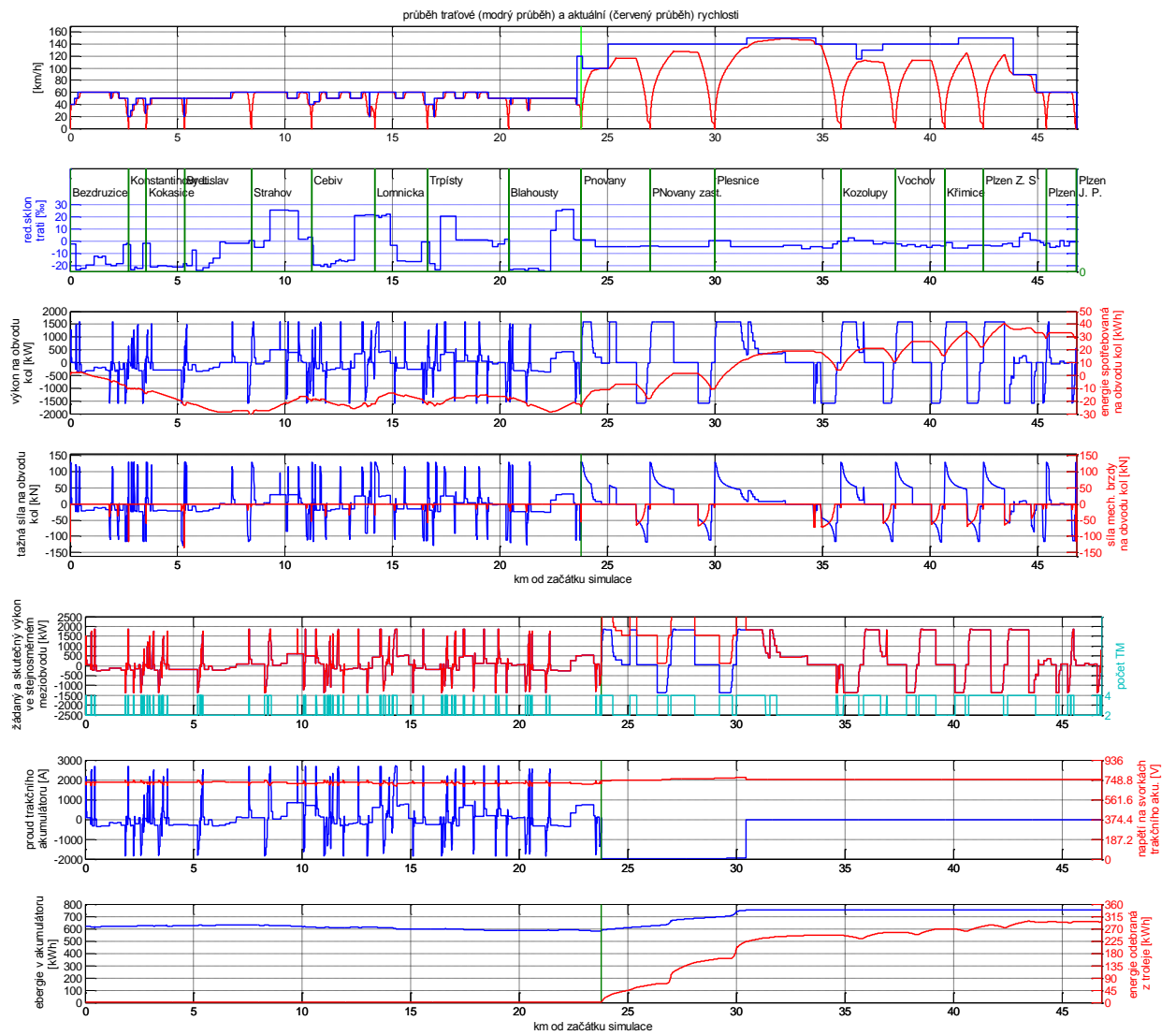
9.2.2 Trať Plzeň – Pňovany - Bezručice

	<u>Plzeň-Bezručice</u>		<u>Bezručice-Plzeň</u>	
	el [kWh]	aku [kWh]	el [kWh] (včetně dobíjení aku.)	aku [kWh]
Spotřeba energie při jízdě se všemi TM	152 kWh	140 kWh	320 kWh	47 kWh
Spotřeba energie při jízdě při odpojování ½ TM	149 kWh	130 kWh	294 kWh	29 kWh
Úspora odebrané energie z trakčního vedení vlivem možnosti odpojení TM	<u>3kWh / 2%</u>		<u>26kWh / 8,1%</u>	
Četnost využití všech 4 TM	26%		25%	
Četnost využití ½ (2) TM	74%		75%	

Tab. 5 shrnutí nejdůležitějších energetických veličin při jízdě dvouzdrojového vozidla z Plzně do Bezručic a zpět



Obr. 9 Průběh aktuální a traťové rychlosti, redukovaného sklonu trati a polohy zastávek; výkonu, tažné síly a energie na obvodu kol; žádaného a skutečného výkonu ve stejnosměrném meziobvodu, využití trakčních motorů; svorkového napětí trakčního akumulátoru, proudu trakčním akumulátorem, energie v akumulátoru a energie odebrané z troleje v závislosti na poloze vozidla na trati v úseku Plzeň – Bezdruzice při jízdě s možností odpojování ½ trakčních motorů

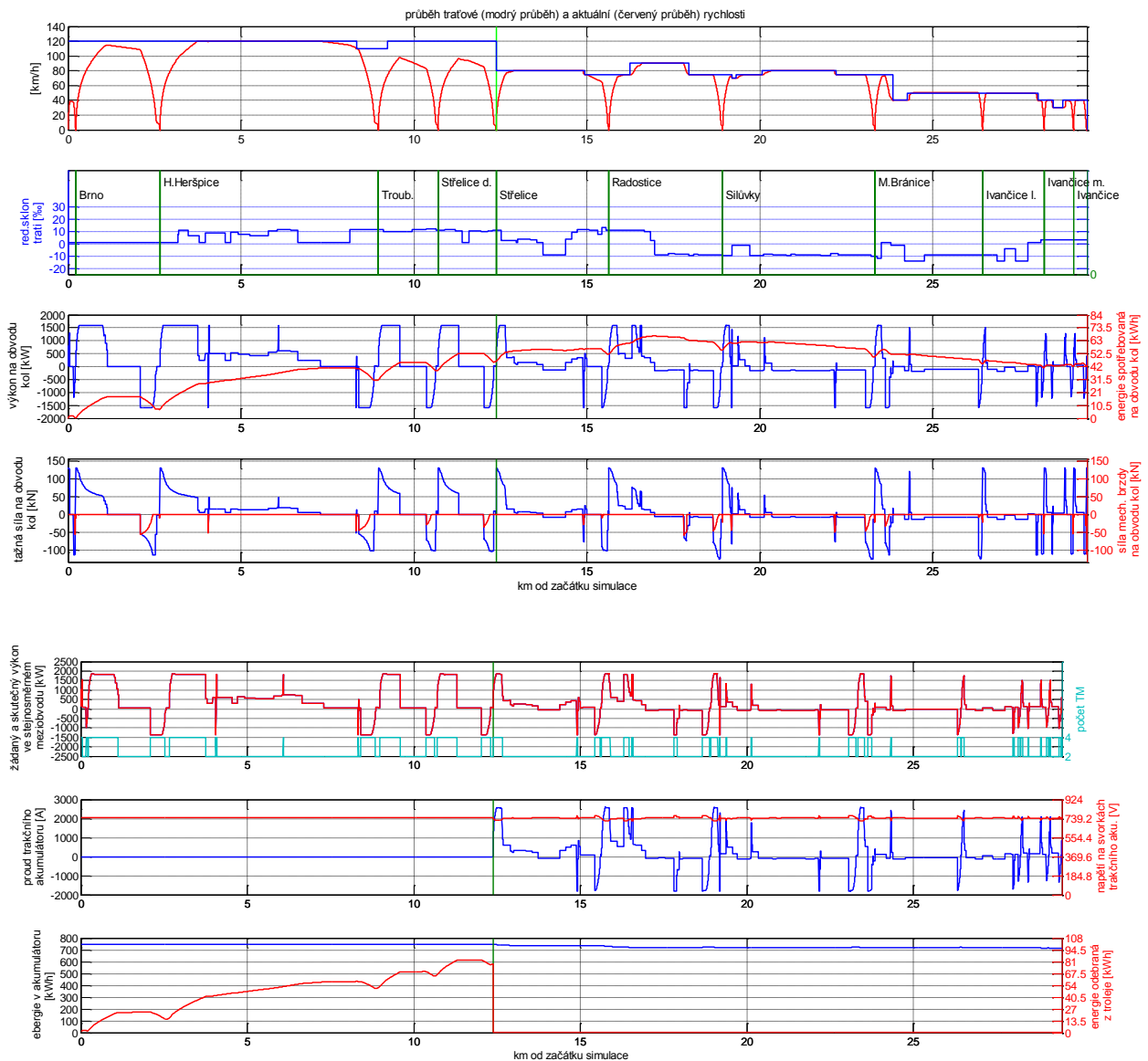


Obr. 10 Průběh aktuální a traťové rychlosti, redukovaného sklonu trati a polohy zastávek; výkonu, tažné síly a energie na obvodu kol; žádaného a skutečného výkonu ve stejnosměrném meziobvodu, využití trakčních motorů; svorkového napětí trakčního akumulátoru, proudu trakčním akumulátorem, energie v akumulátoru a energie odebrané z troleje v závislosti na poloze vozidla na trati v úseku Bezdružice - Plzeň při jízdě s možností odpojování 1/2 trakčních motorů

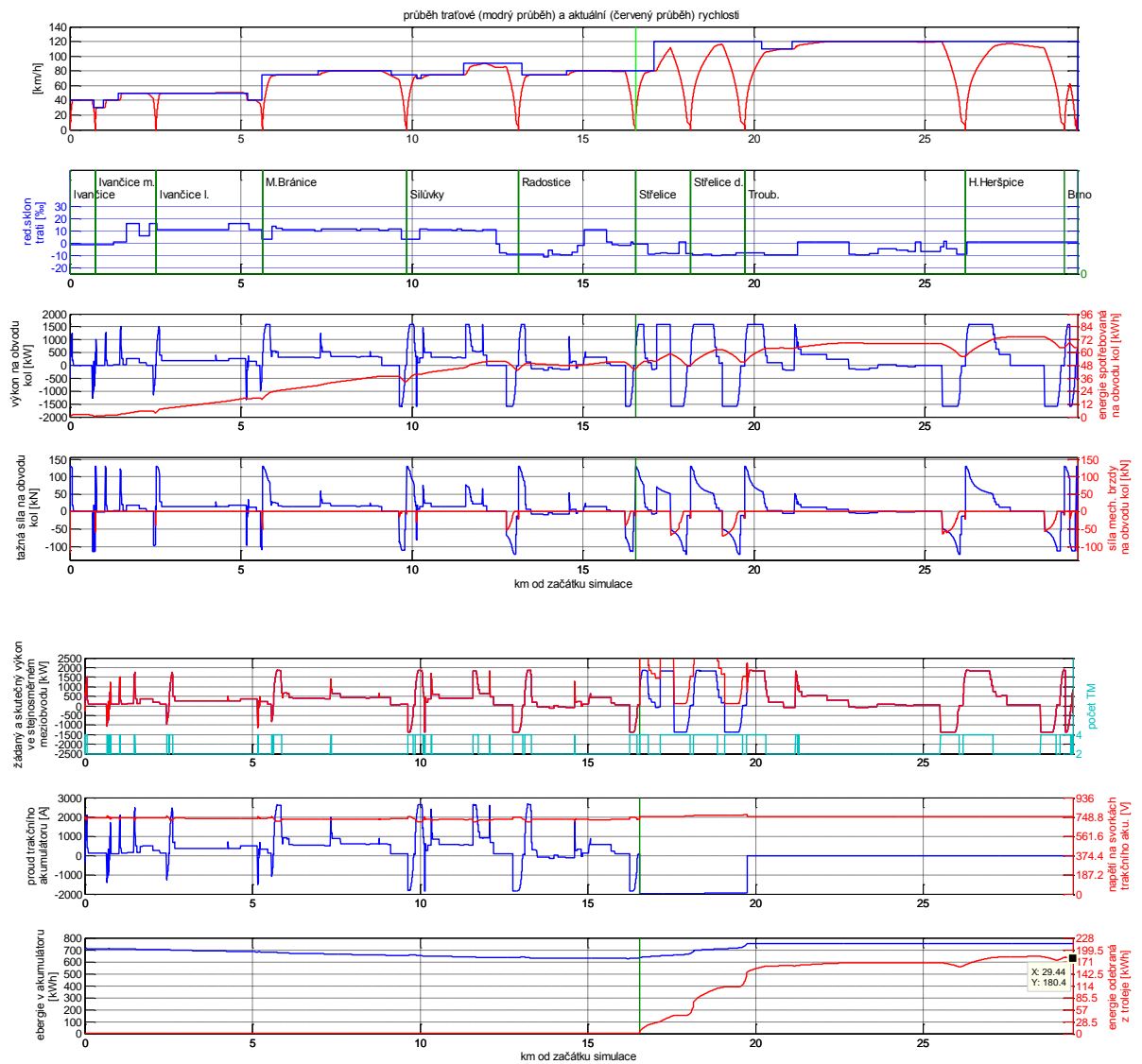
9.2.3 Trať Brno – Střelice - Ivančice

	Brno-Ivančice		Ivančice-Brno	
	el [kWh]	aku [kWh]	el [kWh] (včetně dobíjení aku.)	aku [kWh]
Spotřeba energie při jízdě se všemi TM	80 kWh	42 kWh	195 kWh	78 kWh
Spotřeba energie při jízdě při odpojování ½ TM	78 kWh	36 kWh	180 kWh	73 kWh
Úspora odebrané energie z trakčního vedení vlivem možnosti odpojení TM	<u>2kWh / 2,5%</u>		<u>15kWh / 7,7%</u>	
Četnost využití všech 4 TM	24%		25%	
Četnost využití ½ (2) TM	76%		75%	

Tab. 6 shrnutí nejdůležitějších energetických veličin při jízdě dvouzdrojového vozidla z Brna do Ivančic a zpět



Obr. 11 Průběh aktuální a traťové rychlosti, redukovaného sklonu trati a polohy zastávek; výkonu, tažné síly a energie na obvodu kol; žádaného a skutečného výkonu ve stejnosměrném meziobvodu, využití trakčních motorů; svorkového napětí trakčního akumulátoru, proudu trakčním akumulátorem, energie v akumulátoru a energie odebrané z troleje v závislosti na poloze vozidla na trati v úseku Brno – Ivančice při jízdě s možností odpojování ½ trakčních motorů



Obr. 12 Průběh aktuální a trat'ové rychlosti, redukovaného sklonu trati a polohy zastávek; výkonu, tažné síly a energie na obvodu kol; žádaného a skutečného výkonu ve stejnosměrném meziobvodu, využití trakčních motorů; svorkového napětí trakčního akumulátoru, proudu trakčním akumulátorem, energie v akumulátoru a energie odebrané z troleje v závislosti na poloze vozidla na trati v úseku Ivančice - Brno při jízdě s možností odpojování 1/2 trakčních motorů