



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

Současné trendy optimálního řízení pohonů a energetických úložišť v elektromobilech a městské trakci

Recent Trends of Optimal Control of Drives and Energy Storage
Systems in Electric Vehicles and Urban Traction

Autoreferát disertační práce

Studijní program: P2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612Vo45 – Technická kybernetika

Autor práce: **Ing. Pavel Jandura**

Vedoucí práce: Ing. Josef Černožský, Ph.D.



Abstrakt

Disertační práce je věnována vzájemně provázané problematice návrhu optimálně řízených trakčních pohonů elektrických vozidel a využití moderních úložišť elektrické energie v elektrické trakci. První oblast řešení se zabývá teoretickým rozbohem a simulací vybraných koncepcí hnacích ústrojí s vysokou celkovou účinností při současném respektování dynamiky jízdy vozidla. Dále pak návrhem trakční baterie vozidla, využívající nových poznatků a technologií. Pro experimentální ověření vybraných metod byl na Technické univerzitě v Liberci realizován koncept lehkého bateriového elektromobilu. Druhá oblast řešení popisuje metody pro optimální využití rekuperované energie u vozidel závislé trakce za pomoci úložišť elektrické energie. Diskutovaná jsou jak mobilní, tak stacionární řešení pro reálná data, získaná dlouhodobým měřením tramvajového provozu v Liberci. Práce se zaměřuje především na návrh úložiště na bázi setrvačnicku pro tuto konkrétní aplikaci.

Abstract

Dissertation is focused on the two interconnected issues of designing optimally controlled electric drives in electric vehicles and the use of modern energy storage systems in the electric traction. The first issue deals with theoretical analysis and simulation of modern powertrain concepts with high overall efficiency while respecting the vehicle driving dynamics; consequently the design of vehicle traction battery, using new findings and technologies. At the Technical University of Liberec a concept of lightweight battery electric vehicle was realized in order to experimentally verify chosen methods. The second area of solution describes methods for optimal use of recuperated energy in the rail vehicles of dependent traction using energy storage systems. Mobile and stationary solutions are discussed with respect to data, obtained by a long term measurements of tram traffic in Liberec. The thesis is focused mostly on the design of the storage system based on flywheel for this particular application.

Obsah

Seznam použitých zkratk a výrazů	4
1 Úvod	5
1.1 Cíle disertační práce	5
2 Optimalizace hnacího ústrojí elektrického vozidla	6
2.1 Současný stav dané problematiky	6
2.2 Vlastnosti moderních trakčních elektromotorů	6
2.3 Možnosti uspořádání hnacího ústrojí	8
2.4 Zhodnocení výsledků	16
3 Experimentální elektromobil TUL	17
3.1 První generace vozidla	17
3.2 Druhá generace vozidla	19
3.3 Aktuální stav řešené problematiky	23
4 Energetická bilance provozu městské stejnosměrné trakce	24
4.1 Tramvajový provoz v Liberci	24
4.2 Simulace jízdy tramvaje pro danou trať	27
4.3 Měření na daném úseku trati	28
4.4 Energetická analýza naměřených dat	31
4.5 Statistické údaje tramvajového provozu	33
4.6 Zhodnocení výsledků	34
5 Aplikace energetických úložišť v městské tramvajové trakci	35
5.1 Technologie energetických úložišť	35
5.2 Provozní režim úložiště pro místní podmínky	36
6 Návrh energetického úložiště na bázi setrvačnicku	38
6.1 Setrvačnicku	38
6.2 Projektování setrvačné hmoty	39
6.3 Projektování motor-generátoru setrvačnicku	43
7 Závěr	44
Literatura	45

Seznam použitých zkratk a výrazů

AF	Axial Flux; stroj s axiálním magnetickým tokem
ACIM	AC Induction Motor; asynchronní motor s kotvou na krátko
BEMF	Back Electromotive Force; indukované elektromotorické napětí
BEV	Battery Electric Vehicle; elektromobil poháněný výlučně bateriemi
BESS	Battery ESS; bateriový systém ukládání energie
BLDC	Brushless Direct Current motor; bezkartáčový DC elektromotor
BMS	Battery Management System; management trakční baterie
CAN	Controller Area Network; komunikační sběrnice
DCT	Dual Clutch Transmission; dvouspojkové převodové ústrojí
DMDS	Dual Motor Drive System; hnací ústrojí se dvěma motory
DoD	Depth of Discharge; výraz popisující hloubku vybití článku
ECE 15	(UDC) Urban Driving Cycle; evropský městský jízdní cyklus
EUDC	Extra-Urban Driving Cycle; evropský mimoměstský jízdní cyklus
ESS	Energy Storage System; systém pro ukládání energie
FESS	Flywheel ESS; setrvačnickový systém ukládání energie
FTP 75	Federal Test Procedure; standardizovaný jízdní cyklus USA
HEV	Hybrid Electric Vehicle; vozidlo s více druhy pohonu
HSM	Hybrid Synchronous Machine; hybridní synchronní stroj
IPM	Interior Permanent magnet; rotor stroje s pohřbeným magnety
IWM	In-Wheel Motor; motor uložený přímo v kole vozidla
Li-Ion	Lithium-Ion technology; lithium-iontová technologie elchem. článků
LFP	Lithium Iron Phosphate; aktivní materiál katody Li-Ion článku
LMO	Lithium Manganese Oxide; aktivní materiál katody Li-Ion článku
LTO	Lithium Titanium Oxide; aktivní materiál anody Li-Ion článku
MST	Multi-Speed Transmission; vícerychlostní převodovka
NCA	Nickel Cobalt Aluminium; aktivní materiál katody Li-Ion článku
NEDC	New European Driving Cycle; standardizovaný evropský jízdní cyklus
NMC	Nickel Manganese Cobalt; aktivní materiál katody Li-Ion článku
PCM	Phase Change Material; materiál se změnou fáze
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Machine; synchronní stroj s PM
SCESS	Supercapacitor ESS; superkapacitorový systém ukládání energie
SepExSM	Separate Excited Synchronous Machine; synchronní cize buzený motor
SoC	State of Charge; výraz popisující stupeň nabití článku
SST	Single-Speed Transmission; jednorychlostní převodovka
VCU	Vehicle Control Unit; řídicí jednotka vozidla
xWD	A-all, R-rear, F-front Wheel Drive; pohon přední, zadní a obou náprav

1 Úvod

V podstatě již od prvního návrhu profesora Sibranda Acker Stratingha (Holandsko), z roku 1835, použít elektrický motor pro pohon vozidla, se o elektropohonu mluví jako o pohonu budoucnosti. A to jak pro elektrickou trakci neoddělitelně svázanou s trolejovým vedením, tak pro oblast osobní a nákladní přepravy realizované silničními vozidly. Na počátku dvacátého století byl bateriový elektromobil ve světě poměrně hojně rozšířen. Vozidla se spalovacím motorem se tehdy ještě potýkala s neuspokojivým uživatelským komfortem v podobě problémového řazení a fyzicky náročného startování motoru pomocí kliky. Technická řešení těchto problémů na sebe ale nenechala dlouho čekat a automobil se spalovacím motorem se rychle stal spolehlivým a jednoduše ovladatelným dopravním prostředkem. Proti elektrickému pohonu pak nabízel zásadní výhodu v podobě téměř neomezeného dojezdu díky vysoké specifické hustotě energie uložené ve fosilních palivech. Přitom proces opětovného doplnění palivové nádrže nevyžaduje zvláště technicky náročnou infrastrukturu a trvá jen několik málo minut. Tomuto stavu se vozy nezávislé trakce s čistě elektrickým pohonem nedokázaly až do konce dvacátého století dostatečně přiblížit.

1.1 Cíle disertační práce

Tato práce si klade za cíl nalézt a ověřit nová řešení optimálního řízení pohonů a úložišť elektrické energie s cílem prodloužit dojezd elektrických vozidel nezávislé trakce a maximalizovat zužitkování rekuperované energie u vozidel závislé trakce.

První dva zmíněné přístupy tvoří základní směr výzkumu interního projektu *elektromobilita*¹, řešeného na Technické univerzitě v Liberci (TUL). Třetí přístup pak byl důsledně zkoumán v rámci mezinárodního projektu Ziel 3|Cíl 3 ČR–SAS 100127565/PP1 – *Vývoj komponent a metod vedoucí ke zlepšení energetické účinnosti trakce z hlediska využití energetického setrvačnicku*², jehož výstupem je posouzení možnosti implementace energetického úložiště na bázi setrvačnicku pro provoz městského okruhu tramvajové tratě v Liberci.

Disertační práce shrnuje dosažené výsledky výzkumu v uvedených oblastech.

¹ Autor této práce je hlavním řešitelem a koordinátorem projektu za FMIMS. Řeší problematiku trakčního pohonu, trakční baterie a jejího managementu, dobíjení a ostatních elektrických zařízení.

² Autor této práce byl spoluřešitelem projektu. Řešil oblast získání a zpracování dat energetické bilance provozu a následného návrhu energetického úložiště na bázi setrvačnicku.

2 Optimalizace hnacího ústrojí elektrického vozidla

2.1 Současný stav dané problematiky

V této kapitole jsou diskutována hnací ústrojí, koncipovaná primárně pro nasazení v osobních vozidlech kategorie BEV. Zde lze volit z více typů uspořádání hnacího ústrojí s téměř libovolným principem točivého stroje [1][2]. Tato lze použít pro pohon přední (FWD) nebo zadní nápravy (RWD) automobilu, případně pro pohon všech čtyř kol (AWD). Společnou vlastností většiny sériově vyráběných hnacích ústrojí pro BEV je využití možnosti pevného spojení motoru s převodovkou.

Volba konkrétního uspořádání hnacího ústrojí tak má zásadní vliv na očekávané požadavky, jak na dynamiku jízdy vozidla, tak i celkovou účinnost hnacího ústrojí. V současné době je maximální rychlost elektromobilů obvykle elektronicky omezoována a hranice bývá stanovena okolo rychlosti 150 km h^{-1} (vyjma sportovních vozů). To znamená pro dnes běžně užívané celkové převodové poměry jednorychlostních převodovek v rozsahu $i = 8\text{--}10$ maximální otáčky elektromotoru a tedy i převodovky cca $10\,000\text{--}12\,000 \text{ ot. min}^{-1}$ viz tabulka 2.1. Pro bezpřevodová hnací ústrojí jsou pak zapotřebí maximální otáčky pomaloběžného elektromotoru cca $1000\text{--}1200 \text{ ot. min}^{-1}$. Hlavním důvodem omezení max. rychlosti, bez ohledu na zvolený typ hnacího ústrojí, je stále ještě značně omezená specifická hustota energie v lithiových bateriích a tedy velmi omezený dojezd vozidla při vysokých konstantních rychlostech.

2.2 Vlastnosti moderních trakčních elektromotorů

Točivé stroje, používané v moderních BEV, obvykle představují vrchol současného stavu poznání vědy a techniky v této oblasti. Výrobci moderních BEV vyžadují stroje, kombinující velmi vysokou specifickou hustotu výkonu a trvalý provoz v širokém pásmu provozních otáček při zachování vysoké účinnosti. Aby bylo možno těmto požadavkům vyhovět, bývá motor navržen pro práci v režimu hlubokého odbuzení. Nominální otáčky¹ točivého stroje tak bývají $1/3$ až $1/5$ maximálních provozních otáček, viz následující tabulka 2.2.

¹ Odpovídají pracovnímu bodu stroje, kde dochází k poklesu nominálního točivého momentu o 3 %.

Tabulka 2.1: Přehled parametrů hnacích ústrojí moderních BEV

Vozidlo	Parametry hnacího ústrojí ^a					
	max. moment [Nm]	max. výkon [kW]	max. otáčky [ot. min ⁻¹]	max. rychlost [km h ⁻¹]	princip motoru [-]	přev. poměr [-]
VW e-Golf	270	85	12 000	140	PMSM	9,76
VW e-Up!	210	60	12 000	130	PMSM	8,16
BMW i3	250	125	11 400	150	HSM ^b	9,70
Nissan Leaf	280	80	10 400	145	PMSM	7,94
Renault Zoe	220	65	11 300	135	SepExSM	8,20
Chevrolet Spark EV	542	105	5000	145	PMSM	3,18
Kia Soul EV	285	81,4	10 000	145	PMSM	8,20
Tesla	600	350	16 000	225	ACIM	9,73
Model S P85D	331	165	18 000	250	ACIM	9,73 ^d
Audi R8 e-tron	2×460	2×170	-	200	PMSM	6,00

^a Uvedené hodnoty v některých případech podléhají zaokrouhlení

^b Principiálně se jedná o speciálně upravený typ PMSM

^c Změna ve výrobě zavedená od modelového roku 2015

^d Hodnoty v tomto řádku platí pro přední asistenční pohon vozidla

Tabulka 2.2: Přehled parametrů trakčních pohonů moderních BEV

Vozidlo	Parametry trakčního pohonu ^a					
	nom. otáčky [ot. min ⁻¹]	nom. výkon [kW]	počet pólů [-]	hmotnost motoru [kg]	nom. napětí [V]	princip chlazení [-]
VW e-Golf	3000	50 ^b	4	74	374	kapalina
VW e-Up!	2750	40 ^c	4	61	324	kapalina
BMW i3	4800	75	6	50	360	kapalina
Nissan Leaf	3000	-	4	58	365	kapalina
Renault Zoe	2800	50	4	-	345	vzduch
Chevrolet Spark EV	2000	-	5	-	369	kapalina
Kia Soul EV	2800	-	4	-	355	kapalina
Tesla	5600	-	4	-	345	kapalina
Model S P85D	11 000	-	4	-	345	kapalina
Audi R8 e-tron	3500	-	4	-	374	kapalina

^a Uvedené hodnoty v některých případech podléhají zaokrouhlení

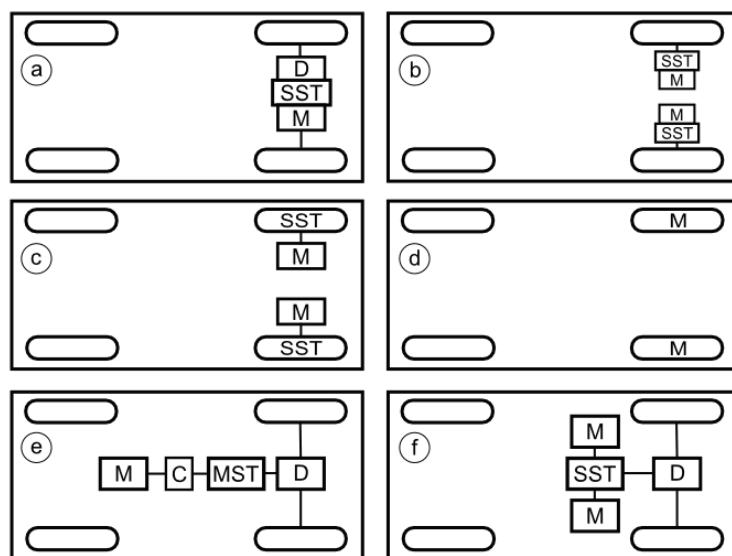
^b Ve voze je dlouhodobý výkon motoru pouze 40 kW kvůli omezení výkonem baterie

^c Ve voze je dlouhodobý výkon motoru pouze 35 kW kvůli omezení výkonem baterie

Z výše uvedených tabulek vyplývá, že majorita moderních BEV kategorie M1 využívá moderní synchronní točivé stroje se sinusovým průběhem BEMF. Nicméně automobilka Tesla Motors dokazuje, že i návrh asynchronního stroje může být konkurenceschopný ve většině sledovaných parametrech. Stejnoseměrné komutátorové stroje v této kategorii vozidel již používány nejsou a v posledním desetiletí se upouští i od využívání bezkartáčového provedení BLDC zcela ve prospěch PMSM.

2.3 Možnosti uspořádání hnacího ústrojí

Příklady základních uspořádání hnacích ústrojí BEV jsou uvedeny na obrázku 2.1. Pokud je vozidlo konstruováno jako zcela nový model, je výrobci obvykle preferováno uspořádání RWD, především kvůli jeho lepším trakčním charakteristikám.



Obrázek 2.1: Přehled hlavních koncepcí uspořádání hnacích ústrojí pro EV. *legenda:* M – elektromotor; SST – jednorychlostní převodovka; MST – vícerychlostní převodovka; C – spojka; D – diferenciál

Při uspořádání hnacího ústrojí dle a)–d) závisí dynamika jízdy i účinnost pohonu zcela na parametrech použitých elektromotorů. Avšak použití velmi výkonného stroje, který je po většinu jízdy zatěžován pouze zlomkem svého jmenovitého výkonu P_n , má obvykle následný dopad na celkovou účinnost hnacího ústrojí během běžného provozu. Při velmi nízkém zatížení, typicky pod $1/10 P_n$, obecně klesá účinnost většiny točivých strojů až k 60%. Jediným řešením v těchto případech je hledání nových návrhů, již tak vysoce sofistikovaného, magnetického obvodu moderních trakčních elektromotorů. To ovšem značně prodražuje vývoj a především produkční cenu takového motoru. Koncepce e) a f) tak využívají vybraná technická řešení pro efektivní využití momentové charakteristiky elektromotoru, respektive jeho mapy účinnosti [3].

2.3.1 Dynamika jízdy motorových vozidel

Simulace dynamiky jízdy vozidla vychází z matematicko–fyzikálního aparátu, využívajícího zejména Newtonových zákonů. Tyto popisují rovnováhu sil a momentů působících na vozidlo v klidu (2.1)(2.2)(2.3) a pohybu (2.4)(2.5)(2.6). Principem superpozice pak lze sestavit fundamentální pohybovou rovnici (2.7), kde na jedné straně vystupuje dostupná hnací síla působící na kolech vozidla, a na druhé straně součet všech působících jízdních odporů². Vlastní rovnováhu sil působících na vozidlo, lze díky moderní výpočetní technice, řešit velmi přesně jak analyticky, tak i numericky. Jedním z komplexních nástrojů je například ADVISOR [4], využívající programovací prostředí MATLAB.

Rovnováha sil a momentů, působících na vozidlo zaparkované na rovině:

$$\sum F_x = 0 \quad (2.1)$$

$$\sum F_z = 0 \quad (2.2)$$

$$\sum M_y = 0 \quad (2.3)$$

Rovnováha sil a momentů, působících na vozidlo v pohybu na rovině:

$$\sum F_x = F_k \quad (2.4)$$

$$\sum F_z = 0 \quad (2.5)$$

$$\sum M_y = 0 \quad (2.6)$$

Vyjádření potřebné hnací síly vozidla pro překonání jízdních odporů:

$$F_k = \sum_i O_i \quad (2.7)$$

a dosazení jízdních odporů, působících na vozidlo:

$$F_k = O_f + O_v + O_s \pm O_a \quad (2.8)$$

Jízdní odpory lze chápat jako síly působící proti pohybu vozidla. Výčet nejvýznamnějších jízdních odporů je uveden v rovnici (2.8). Mezi tyto se ještě zahrnuje odpor přívěsu, se kterým se však běžně u vozidel kategorie BEV nepočítá, a proto není v této rovnici uveden. Dále jsou v textu uvedeny fundamentální rovnice použité pro výpočet jednotlivých jízdních odporů a tabulky koeficientů do nich vstupujících. Další rozbor dané problematiky lze nalézt například v [6][5].

² Na celkovou dynamiku jízdy mají obecně vliv i síly, působící v příčném směru vůči pohybu vozidla. V praxi je však dynamika jízdy a především spotřeba dle normalizovaných jízdních cyklů ověřována v laboratoři, vozidlem umístěným na válcové brzdě. Vliv sil, působících mimo podélnou osu vozidla, je tak obvykle zcela potlačen. Z tohoto důvodu s nimi simulace nepočítá.

Odpor valivý vzniká deformací kol vozidla i vozovky při vzájemném valivém pohybu. Valivý odpor závisí především na povrchu vozovky, ale ovlivňují jej i další veličiny, jako jsou rychlost vozidla a deformace kola. Vliv rychlosti se začíná citelně uplatňovat až od rychlosti cca 80 km h^{-1} pro osobní vozidla [6]. Valivý odpor tak lze pro účely této simulace považovat za nezávislý na rychlosti³.

$$O_f = f \sum_i Z_i = f G \cos \alpha \quad (2.9)$$

Odpor vzdušný je vyvolán působením prostředí, obtékajícího kolem vozidla během jeho pohybu. Celkový vzdušný odpor je určen aerodynamickým vztahem:

$$O_v = \frac{1}{2} \rho_v C_x S_x v_r^2 \quad (2.10)$$

Odpor stoupání vyjadřuje silové působení na těleso na nakloněné rovině. Vozovka svírá s vodorovnou základnou úhel α . V praxi se místo úhlu používá sklon vozovky s , který je definován převýšením vozovky h_v vztaženým na délku jejího průmětu do vodorovné roviny l_v . Výsledek je pak udáván v procentech.

$$O_s = \pm G \sin \alpha \quad (2.11)$$

$$s = \frac{h_v}{l_v} = \tan \alpha \quad (2.12)$$

$$O_s = \pm G \arctan(s) \quad (2.13)$$

Odpor zrychlení lze popsat obecným vztahem (2.14), ve kterém působí složka odporu posuvných částí O_{zp} a složka odporu všech rotačních součástí O_{zr} vozidla. Posuvné složky sil se ve vozidlech obvykle neuplatňují. Mezi nejvýznamnější rotační části ve vozidle pak patří hnací ústrojí a jednotlivá kola.

$$O_a = O_{zp} + O_{zr} \quad (2.14)$$

Dosazením za jednotlivé složky získáme výsledný vztah

$$O_{zr} = \left[1 + \frac{(J_m \dot{v}_c^2 + J_p \dot{v}_r^2) \eta + \sum_i J_{ki}}{r_d^2} \right] m \frac{dv(t)}{dt} \quad (2.15)$$

V praxi se nahrazuje výpočet složky odporu rotačních částí vozidla O_{zr} pomocí součinitele rotačních částí ϑ_i na základě empirických vztahů odvozených např. v [6].

$$O_a = \vartheta_i m \frac{dv(t)}{dt} = \vartheta_i m a \quad (2.16)$$

³ Pro jízdní cyklus NEDC se pouze méně než 5 % z celkového jízdního času uskutečňuje při rychlosti nad 80 km h^{-1} . Cyklus FTP 75 pak počítá s krátkodobou maximální rychlostí vozidla 90 km h^{-1} .

- **Kontrola překročení jízdních mezí vozidla**

V tomto ověření hraje důležitou roli součinitel adheze μ , působící mezi pneumatikou a vozovkou. Koeficient μ_v je závislý jak na povrchu dané vozovky, tak také na rychlosti vozidla, dle rovnice (2.17), odvozené z grafického vyjádření [7].

$$\mu_v = 3e^{-5}\mu^2 - 0,0075\mu + 1,0121 \quad (2.17)$$

Součinitel adheze má největší vliv z hlediska limitace počátečního zrychlení vozu a při strmém stoupání vozidla. V obou případech se pneumatika odvaluje bez prokluzu pokud platí vztah:

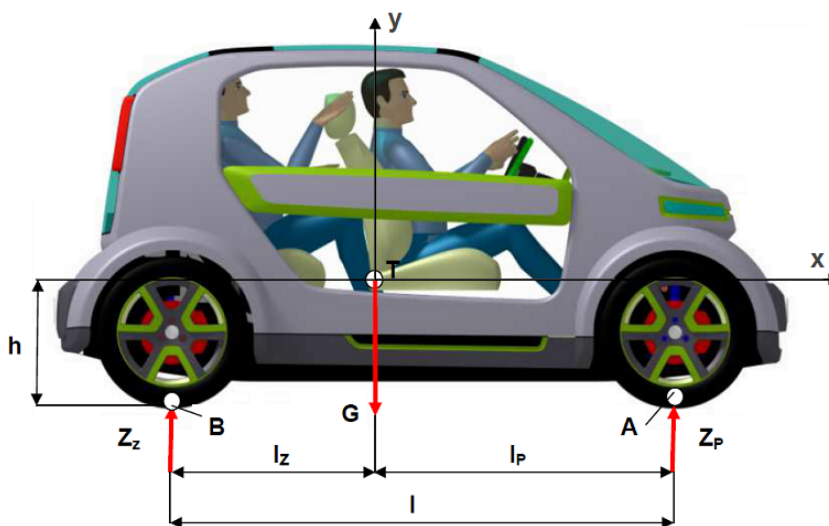
$$H_z = \mu_v Z_k \quad (2.18)$$

Dále do výpočtu vstupuje parametr (xWD), zda-li je hnaná přední (FWD), zadní (RWD), případně obě nápravy (AWD). Pro výpočet maximálního dosažitelného zrychlení vozidla na rovině pak platí přímý výpočet obvodové síly dle vztahu:

$$H_{max(xWD)} = O_f + \frac{G}{g} a = \mu_v Z_{(xWD)} \quad (2.19)$$

$$a_{max(RWD)} \leq \frac{\mu_v \frac{l_p}{l} - f \frac{l_z}{l}}{1 - \frac{h}{l} (f - \mu_v)} g \quad (2.20)$$

$$a_{max(FWD)} \leq \frac{\mu_v \frac{l_z}{l} - f \frac{l_p}{l}}{1 - \frac{h}{l} (f + \mu_v)} g \quad (2.21)$$



Obrázek 2.2: Určení působišť reakce náprav Z a geometrické polohy těžiště

2.3.2 Vliv uspořádání hnacího ústrojí na dynamiku jízdy

Pro simulaci dynamiky jízdy bylo vytvořeno univerzální prostředí. Zde byla vložena data virtuálního elektrického vozidla, inspirovaného technickými parametry moderního elektromobilu BMW i3⁴, disponujícího vysokou jízdní dynamikou.

vozidlo: virtuální vozidlo (BMW i3)

šířka pneu		profil pneu	disk R	poloměr kola	obvod kola	převodovka BW 31-03		souč. rotačních částí v ²⁾	hmotnost NEDC ¹⁾	souč. přílivosti μ _v ²⁾	přední nápravy l _p	zadní nápravy l _z	rozvor náprav l	výška těžiště h
mm	mm	inch	mm	mm	mm	převodový poměr [-]	účinnost převodů [-]	[-]	kg	[-]	m	m	m	m
155 / 70	R 19		349,80	2197,86		7	0,96	1,1	1270	0,95	1,37	1,2	2,57	0,6

g =	9,81	m/s ²
f =	0,01	-
ρ =	1,25	kg/m ³
c _x =	0,29	-
S _x =	2,38	m ^c

převodovka DCT	i _{pl} [-]	η _{pl} [-]	v _{pl} ²⁾ [-]
1. rychlostní stupeň	9,7	0,96	1,2
2. rychlostní stupeň	6	0,96	1,1

1) pro simulaci jízdního cyklu NEDC je počítáno s pohotovostní hmotností + 75 kg
2) empiricky zjištěné hodnoty
3) na rovině, valivý odpor zanedbán

omezení počátečního zrychlení adhezi³⁾		doba řazení:
a _{RWD} ms ⁻²	a _{FWD} ms ⁻²	<input type="text" value="0,1"/> sec
6,23	5,44	otáčky řazení:
		<input type="text" value="7600"/> rpm

Obrázek 2.3: Parametry simulace virtuálního vozidla

Pro konfrontaci jednotlivých koncepcí hnacích ústrojí byly zvoleny tři moderní jednotky motoru a měniče, reprezentující jak PMSM stroje v provedení IPM a IWM, tak i ACIM. Základní parametry vybraných jednotek jsou uvedeny v tabulce 2.3. Momentové charakteristiky jednotek a parametry pro převodovky, jsou převzaty z katalogových údajů výrobců. Simulace byla ohraničena těmito podmínkami:

Hnaná pouze zadní náprava. Maximální točivý moment strojů byl elektronicky omezen na hodnotu 300 Nm. Maximální rychlost jízdy vozidla na 150 km h⁻¹.

Tabulka 2.3: Přehled vybraných trakčních pohonů pro simulaci

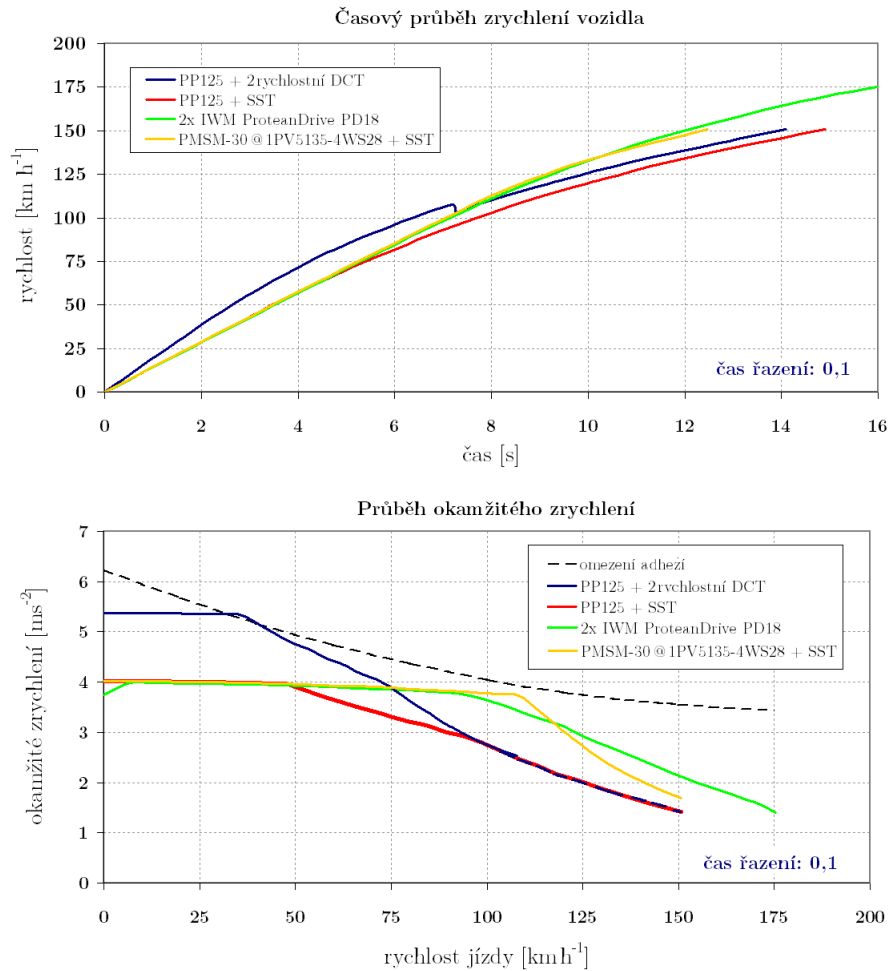
jednotka ^a	parametry točivého stroje					
	max. otáčky [ot. min ⁻¹]	max. výkon [kW]	max. moment [Nm]	specif. ^b výkon [kW kg ⁻¹]	specif. ^b moment [Nm kg ⁻¹]	princip stroje [-]
Siemens 1PV5135	10 000	150	360	0,97	2,32	ACIM
UQM Tech. PP125	8000	125	300	2,20	5,27	IPM
PMSM-30 ^c	8000	30	80	-	-	IPM
ProtenElectric PD18	1600	75	1000	2,20	26	IWM

^a Všechny stroje jsou chlazeny kapalinou

^b Platí pro kompletní jednotku motor+měnič

^c Virtuální PMSM stroj, navržený pro optimální provoz hnacího ústrojí DMDS virtuálního vozidla

⁴ Vozidlo BMW i3 bylo vybráno zejména z důvodu jeho vysoké jízdní dynamiky a dále dostupnosti technických parametrů, získaných z katalogových údajů a vyžádaných informací od BMW ČR.



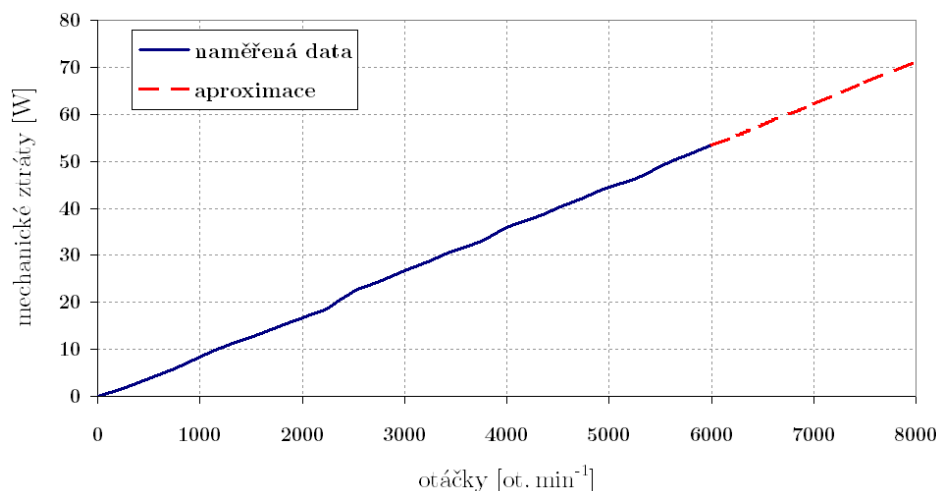
Obrázek 2.4: Grafický výstup simulace dynamiky jízdy virtuálního vozidla

Z výsledků simulace dynamiky jízdy na obr. 2.4 lze vyvodit závěr, že uspořádání e) s vícerychlostní převodovkou (zde dvouspojková převodovka – DCT) nepřináší signifikantní benefit vůči hnacím ústrojím a)–d). Vícerychlostní převodovka sice může zlepšit již tak dobrou dynamiku při nízkých rychlostech, nicméně z principu neřeší omezenou dynamiku jízdy při vyšších rychlostech, neboť ta je omezena výkonem motoru. Typicky ve sledovaném rozsahu 80–120 km h⁻¹, již nabízí stejnou pružnost jako uspořádání se SST. Uspořádání d) s moderními bezpřevodovými IWM mohou dnes plnohodnotně nahradit ústrojí SST i při vysokých požadavkách na dynamiku a rychlost jízdy vozidla. Ani uspořádání f), označované též jako Dual Motor Drive System (DMDS), které využívá v této konfiguraci dva odlišné elektromotory napojené na společnou SST, nepřináší v tomto ohledu významný přínos.

2.3.3 Vliv uspořádání hnacího ústrojí na účinnost pohonu

Zde do simulace vstupují mapy účinnosti vybraných jednotek motor+měníč. Pro simulaci ústrojí DMDS, optimalizovaného pro virtuální vozidlo, byla navržena virtuální jednotka PMSM-30.

Druhým klíčovým parametrem, vstupujícím do simulace účinnosti DMDS, je závislost mechanických ztrát asistenčního pohonu na otáčkách při jeho volném protáčení. Mezi nejvýznamnější patří ztráty v ložiskách a ztráty třením rotoru o vzduch ve vzduchové mezeře stroje a zejména ztráty působené PM. Z tohoto důvodu byl pro virtuální vůz zvolen jako asistenční, stroj typu ACIM. Bohužel tato data nebyla pro vybraný stroj Siemens 1PV5135–4WS28 k dispozici, a proto byla nahrazena aproximací vlastním měřením na dynamometru v laboratořích TUL na průmyslovém ACIM s demontovaným ventilátorem.



Obrázek 2.5: Ztráty při volném protáčení stroje řady 1LA7 s osovou výškou 132 mm

Všechny parametry pak vstupují do simulace spotřeby elektrické energie vozidla dle standardizovaného jízdního cyklu, které jsou uvedeny v následující tabulce 2.4.

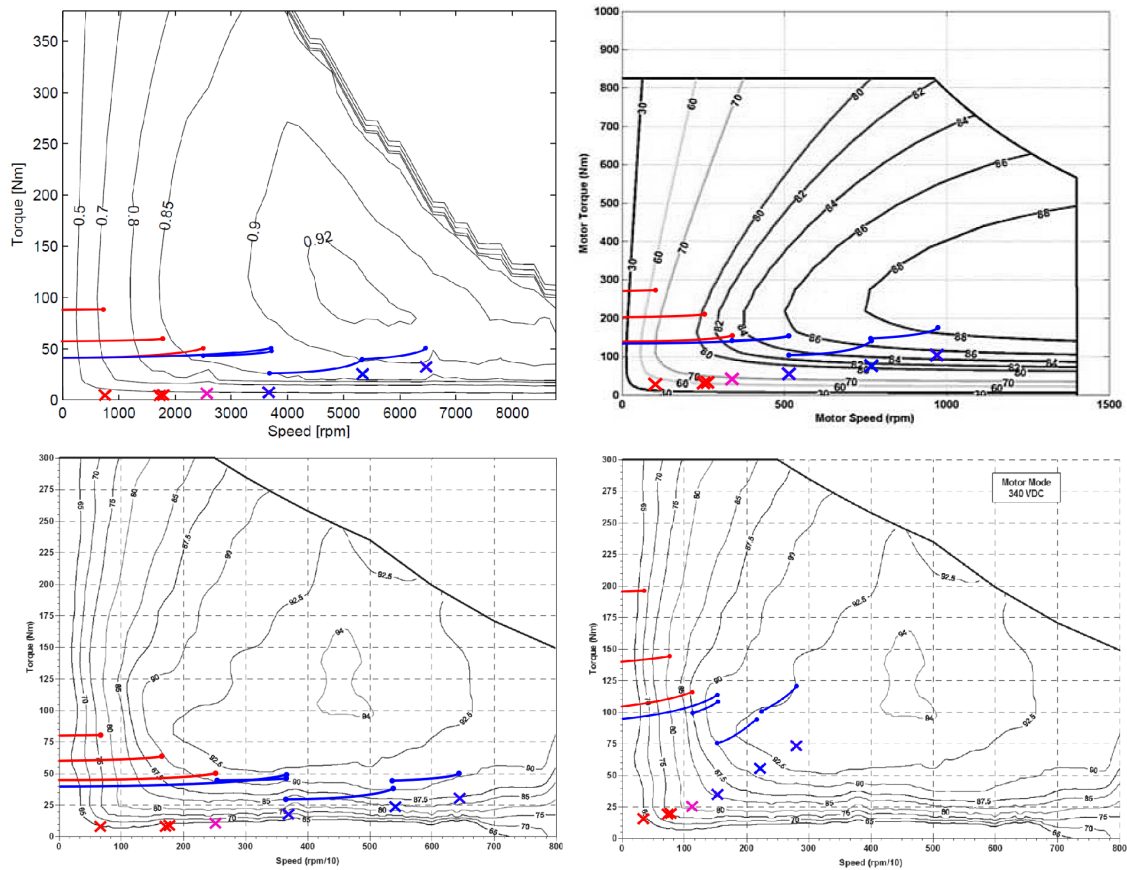
Tabulka 2.4: Přehled výsledků simulace účinnosti vybraných hnacích ústrojí

jednotka	hnací ústrojí		jízdní cyklus			
	koncepce	přev. poměr	ECE 15	EUDC	NEDC	FTP 75
	[-]	[-]	[%]	[%]	[%]	[%]
UQM Tech. PP125	SST	7	69	77	73	64
Siemens 1PV5135	SST	7	59	72	66	-
ProtenElectric 2×PD18	IWM ^a	-	54	73	63	-
UQM Tech. PP125	DCT ^b	3(7)	75	85	80	-
PMSM–30 @ 1PV5135	DMDS ^c	7	80	89	84	-

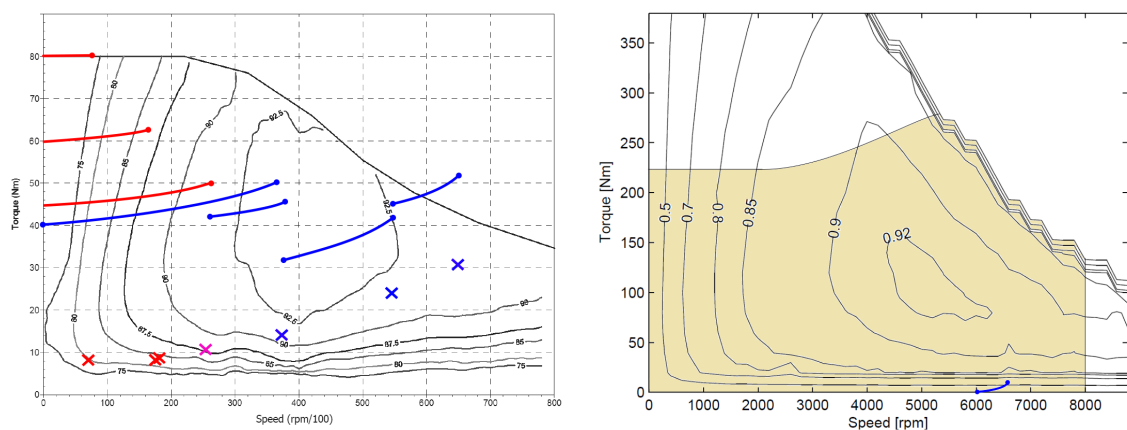
^a Hnací síla je rozdělena rovnoměrně mezi obě jednotky instalované na zadní nápravě

^b DCT je zde navržena pro maximální účinnost. První převodový stupeň $i_1 = 7$ je řazen pouze při akceleraci, druhý převodový stupeň $i_2 = 3$ je zařazen pro jízdu konst. rychlostí pro optimální využití mapy účinnosti jednotky PP125

^c DMDS je nastaven tak, aby hlavní stroj PMSM–30 pracoval trvale a pouze po překročení jeho momentové charakteristiky byl aktivován asistenční stroj 1PV5135–4WS28. Vliv ztrát volným protáčením asistenčního stroje na celkovou účinnost soustrojí viz obr. 2.5 je zanedbatelný



Obrázek 2.6: Mapy účinnosti hnacího ústrojí zatížené dle NEDC. *legenda:* Červená značí část ECE 15, modrá EUDC. Křížky značí zatížení při konst. rychlosti, spojitě čáry zatížení při akceleraci. *vlevo nahoře:* 1PV5135+SST ($i_c = 7$) *vlevo dole:* PP125+SST ($i_c = 7$), zároveň odpovídá prvnímu stupni DCT. *vpravo nahoře:* 2×PD18 IWM (bez převodů) *vpravo dole:* PP125+DCT ($i_c = 3$), odpovídá zařazenému druhému stupni DCT



Obrázek 2.7: Mapy účinnosti hnacího ústrojí DMDS se společnou SST ($i_c = 7$) dle NEDC. *vlevo:* PMSM-30 *vpravo:* 1PV5135, barevná oblast odpovídá omezením dynamiky jízdy deklarovaných na str. 12

2.3.4 Konfrontace výsledků simulace s reálnými daty

Naměřenou spotřebu vozu obecně významně ovlivňuje i trvalý odběr palubních spotřebičů a účinnost trakční baterie, zejména při ukládání rekuperované energie. Pro možnost vzájemného porovnání je dosazen trvalý příkon spotřebičů 380 W. Tato hodnota vychází z provedené studie problematiky [8]. Simulace kalkuluje se střední hodnotou účinnosti trakční baterie 90 %. Výsledky jsou uvedeny v tab. 2.5.

Tabulka 2.5: Simulace spotřeby vozidla s vybraným hnacím ústrojí dle NEDC

jednotka	hací ústrojí		NEDC + palubní spotřebiče ^a			
	koncepte	přev. poměr	W s regen.	W bez regen.	ΔW regen.	ΔW ideál. p.
	[-]	[-]	[kWh/100 km]	[kWh/100 km]	[%]	[%]
ideální pohon	-	-	7,9	11,4	30,3	0
Siemens 1PV5135	SST	7	16,3	18,4	11,8	-51,5
ProtenElectric 2×PD18	IWM	-	16,2	18,1	10,6	-51,2
UQM Tech. PP125	SST	7	14,7	17,0	13,8	-46,3
UQM Tech. PP125	DCT	3(7)	13,4	15,8	15	-41,0
PMSM-30 @ 1PV5135	DMDS	7	12,9	15,4	15,8	-38,8
BMW HSM-125	SST	9,7	12,9	-	-	-38,8

^a Denní osvětlení, posilovač řízení a brzd, infotainment, relé, ztráty v DC-DC měniči a vedení...

2.4 Zhodnocení výsledků

Simulace potvrzují, že koncepce hnacího ústrojí má zásadní vliv na celkovou efektivitu hnacího ústrojí u velmi výkonných točivých strojů. Nejhoršího výsledku dosahují tyto stroje v kombinaci s SST. V této konfiguraci ale dosahují velmi špatných účinností i IWM motory, kterým nepomáhá ani výhoda v podobě absence ztrát mechanických převodů⁵. Lze tedy vyslovit obecný závěr:

- *Pokud je výkon všech současně pracujících točivých strojů vozidla, potřebný pro jízdu konstantní rychlostí 90 km h⁻¹ nižší než 1/10 jejich celkového výkonu, pak bude hací ústrojí s SST a IWM vždy pracovat v oblasti nízké účinnosti daného točivého stroje, bez ohledu na jeho princip.*

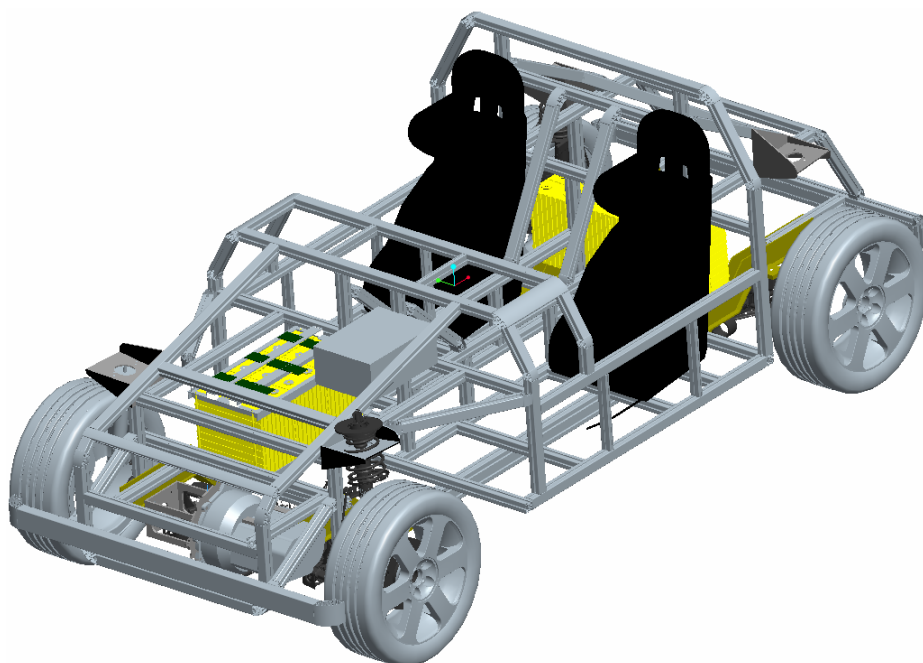
Právě v tomto případě nabízí uspořádání DMDS a MST významný přínos. Zejména pak ústrojí DMDS dosahuje totožné spotřeby jako původní ústrojí vozu BMW i3, využívající SST se strojem HSM-125, který je jedním z nejpropracovanějších trakčních elektromotorů současnosti. Přitom virtuální stroj PMSM-30, použitý jako hlavní stroj DMDS, disponuje dnes již spíše podprůměrnou účinností.

⁵ V laboratoři na válcové brzdě se neprojeví ani potenciální výhoda nižších ztrát elektronického diferenciálu. Průjezd zatáčkami není v NEDC simulován.

3 Experimentální elektromobil TUL

3.1 První generace vozidla

První generace vozidla byla realizována v letech 2012–2013. Konceptně se jedná o dvoumístné dvoustopé vozidlo karoserie typu Roadster s pevným rámem a přední hnanou nápravou viz obrázek 3.1. Konstrukce rámu je smíšená, s převážujícím nasazením dílů ze stavebnicového systému extrudovaných hliníkových profilů. Z tohoto důvodu dostalo vozidlo pracovní název eŠus. V první generaci se s kapotáží vozidla nepočítalo, nicméně modulární konstrukce rámu kapotáž umožňuje. Podvozek vozidla rozměrově vychází z vozu Škoda Fabia II. generace. Rozvor náprav je 2462 mm. Rozchod obou náprav je totožných 1435 mm, kvůli specifickému použití dvojice předních náprav z vozu Fabia se zavěšením typu McPherson. Toto řešení otevírá možnost pro budoucí instalaci systému přiřizování zadní nápravy. Ve stávající verzi je řízení zadní nápravy mechanicky zablokováno. Výška vozidla je 1300 mm a délka 3350 mm. Pohotovostní hmotnost vozidla vč. baterie je cca 550 kg.



Obrázek 3.1: Počítačový model rámu experimentálního elektromobilu TUL

3.1.1 Popis hnacího ústrojí

Elektrickou výzbroj tvořil BLDC elektromotor s rotačním pláštěm Freeair, typ HCS C 40000/2 I Industry s měničem HBC 50063 od společnosti MGM COMPRO. V elektromobilu se počítalo s napájením motoru z trakční baterie s nominálním napětím 55 V. Vzhledem k napěťové konstantě stroje $72 \text{ ot. min}^{-1} \text{ V}^{-1}$ bylo hnací ústrojí zkonstruováno s využitím šestistupňové manuální převodovky VW MQ 200.

3.1.2 Popis trakční baterie

Základ trakční baterie tvořilo zapojení 16(17)s velkoformátových 640 Wh prizmatických článků WB-LYP200AHA(Tall). Kladná elektroda článku je na bázi materiálu LiFe(Y)PO_4 a záporná elektroda je uhlíková. Článek je uložen v pevném plastovém obalu s povrchovým žebrováním. Využitelná energie baterie 10,8 kWh při 17s, odpovídá dojezdu 120 km dle NEDC, při zapojení 16s pak 110 km.

- **Systém BMS** spolu s nově vyvinutou řídicí jednotkou vozidla (VCU) řeší balancování článků decentralizovaně, tedy každý článek má svůj balancer. Ty vycházejí z principu nastavitelné napěťové reference, ovládající výkonové PNP tranzistory. Jedná se tak o metodu pasivního balancování. Každý balancer je připojen na společnou sběrnici a vybaven adresováním pro signalizaci jednotce VCU. Tato ovládá všechna elektrická zařízení ve vozidle, s měničem komunikuje po sběrnici CAN.
- **Systém dobíjení** vozidla neobsahuje zabudovanou palubní nabíječku. Pro nabíjení slouží kompaktní přenosná nabíječka, typ POW48V30A o výkonu 1800 W/30 A. Doba nabíjení zcela vybité baterie vozidla je 8 h. Nabíječ komunikuje se systémem BMS či VCU a umožňuje snížit nabíjecí proud na 2 A pro balancování článků.



Obrázek 3.2: Funkční vzorek elektromobilu TUL, představený na MSV Brno 2013

3.2 Druhá generace vozidla

3.2.1 Změny proti první generaci

Její realizace započala v roce 2014. Nejvýznamnější změnou konstrukce vozidla je realizace nového samonosného rámu, který tvoří v celém prostoru mezi nápravami šachtu bez příčných nosníků, určenou pro instalaci trakční baterie. Vozidlo také dostalo novou kapotáž pro zlepšení aerodynamiky.

3.2.2 Prototyp hnacího ústrojí Dual Motor Drive System

Hnací ústrojí typu DMDS přináší zlepšení celkové účinnosti proti SST pouze za předpokladu požadavku na vysokou jízdní dynamiku vozidla. DMDS vozidla Gen2 bylo koncipováno pro maximální rychlost 150 km h^{-1} a zrychlení $0\text{--}100 \text{ km h}^{-1}$ pod 10 s. Vzhledem k očekávanému navýšení hmotnosti vozidla na 725 kg vychází pro splnění požadavků dynamiky jízdy špičkový mechanický výkon soustrojí $>70 \text{ kW}$.

Tabulka 3.1: Katalogové parametry elektromotorů prototypu DMDS

parametr stroje:	ME1302	AC-20
princip stroje	AF-PMSM	ACIM
provozní napětí ^a	48–120 V	48–144 V
max. otáčky	8000 ot. min ⁻¹	8000 ot. min ⁻¹
max. účinnost ^b	92 %	88 %
max. moment ^c	65 Nm	111 Nm
max. výkon	25 kW	55 kW
trvalý výkon	10 kW	2 kW
max. pracovní teplota	130 °C	130 °C
hmotnost	16,9 kg	27,2 kg

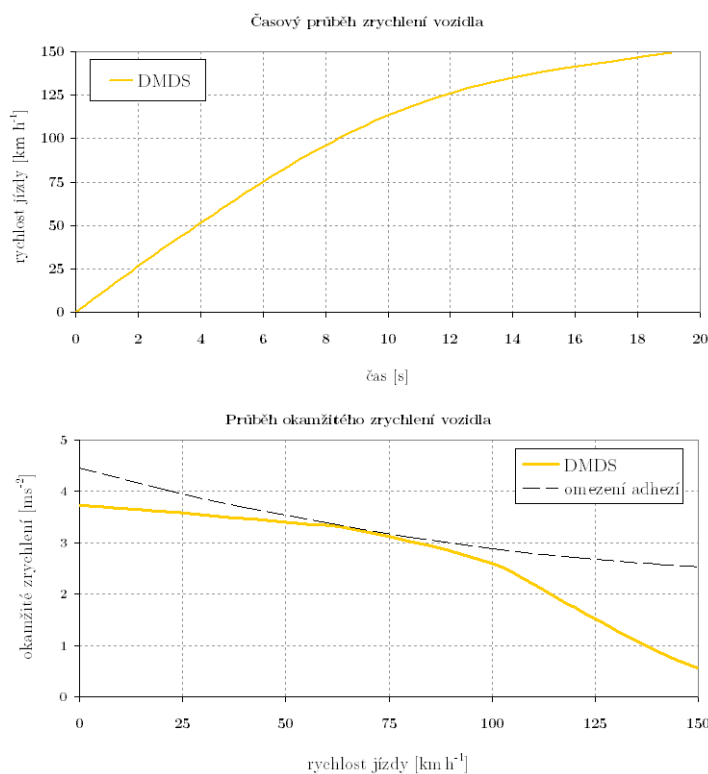
^a DMDS bude napájeno z trakční baterie o jmenovitém napětí 108 V

^b Maximální účinnost jednotky motor+měníč Sevcon Gen4

^c Závisí na limitaci výstupního proudu použitého měniče, ME1302 disponuje $k_m = 0,18 \text{ Nm A}^{-1}$, typ AC-20 pak $k_m = 0,17 \text{ Nm A}^{-1}$

Tabulka 3.2: Parametry prototypu DMDS

parametr hnacího ústrojí:	hodnota
maximální výkon	80 kW při 5500 ot. min ⁻¹
trvalý výkon	10 kW
záběrový moment	176 Nm
maximální otáčky	8000 ot. min ⁻¹
převod. poměr	6
hmotnost	85 kg vč. příslušenství



Obrázek 3.3: Grafický výstup simulace vozidla Gen2 s ústrojím DMDS

3.2.3 Návrh algoritmu řízení a řídicí jednotky

Řídicí jednotka DMDS vychází z původního návrhu VCU, vyvinuté pro Gen1, která disponuje dostatečně výkonným mikrokontrolérem. Jednotka disponuje dvojicí nezávislých sběrnic CAN, kde CAN1 je zde využita pro vlastní řízení hnacího ústrojí DMDS a CAN2 funguje jako gateway pro komunikaci s ostatními jednotkami.

- **Navržený princip činnosti**

V první verzi algoritmu řízení DMDS se nepočítá s interakcí se stabilizačním systémem vozidla. Řídicí veličinou regulace je požadovaný moment DMDS. Tuto veličinu řidič ovlivňuje pomocí pedálu akcelérátoru, jehož signál je v Gen2 zaveden přímo do VCU. Tato pak vypočítá akční zásah a odešle po vyhrazené CAN DMDS požadovaný moment měničům. Následný akční zásah podléhá jak limitům DMDS, nastavených přímo v měničích, tak i limitaci výkonu trakční baterie.

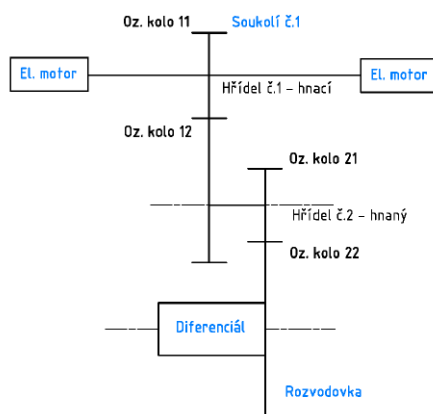
Prvotní návrh předpokládá sledování pouze okamžité hodnoty míry sešlápnutí pedálu akcelérátoru. Tento parametr ihned vstupuje do look-up-table, ve které je uložena momentová charakteristika hlavního pohonu. Pokud je přepočtená hodnota momentu vyšší, než je schopen poskytnout hlavní pohon DMDS při daných otáčkách, je automaticky vydán povel k aktivaci asistenčního pohonu. Po uvolnění akcelérátoru řidičem a poklesu požadovaného momentu na hodnotu v rozsahu hlavního pohonu je asistenční pohon deaktivován.

3.2.4 Návrh jednorychlostní převodovky

Požadovaný maximální vstupní moment je 200 Nm a pracovní otáčky 8000 ot. min⁻¹. Celkový převodový poměr je $i_c = 6$ pro maximální rychlost vozidla 150 km h⁻¹.

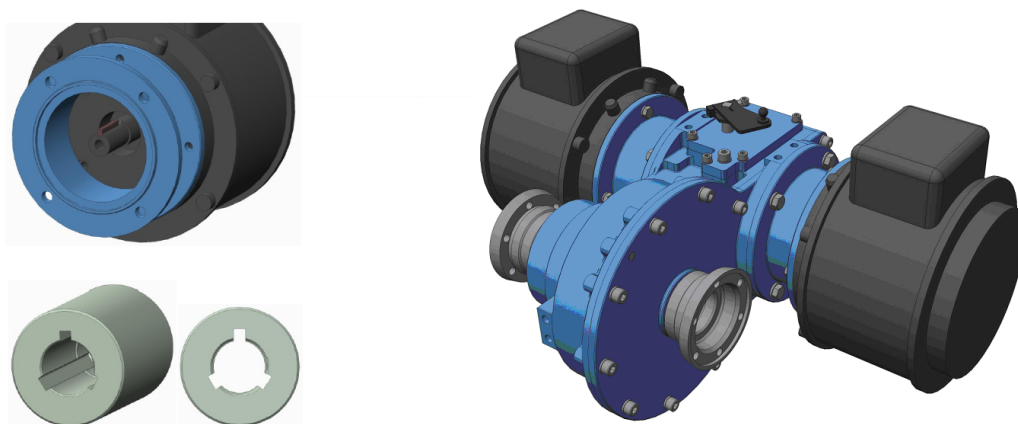
- **Konstrukce převodovky**

Skříň převodovky je zhotovena z hliníkové slitiny¹. Materiál pro výrobu prototypu je EN AW 7021 [AlZn5,5Mg1,5]. Hmotnost skříně převodovky včetně přírub pro připojení elektromotorů je 8 kg. Kompletní převodovka včetně náplně váží 22 kg.



Obrázek 3.4: Návrh vnitřního uspořádání soukolí DMDS převodovky

Motory jsou ke skříni připojeny pomocí standardizované příruby Nema C-face. Spojení s hnací hřídelí převodovky je realizováno pomocí ocelových spojek. Celá sestava DMDS je ve voze uložena před přední nápravou. Zde je zavěšena za skříň převodovky na extrudovaném profilu, který je pružně uložen v silentblocích.



Obrázek 3.5: Návrh připojení motorů k SST. *vlevo*: Elektromotor s přírubou a navržená spojka *vpravo*: Kompletní sestava DMDS s dvojicí motorů ME1302

¹ Hlavní vývojové práce na převodovce vedl kolega Josef Břoušek z KVM [9].

3.2.5 Popis trakční baterie

Bateriová krabice vozu Gen2 vyplňuje celý prostor mezi nápravami a její příčné přepážky se podílí na integrální tuhosti rámu vozidla. Připevnění k rámu vozidla je realizováno přišroubováním přes spodní lem krabice, což otevírá cestu k budoucí implementaci systému automatické výměny trakční baterie. Navržená celohliníková krabice baterie umožňuje osazení moduly s články ve dvou modifikacích.

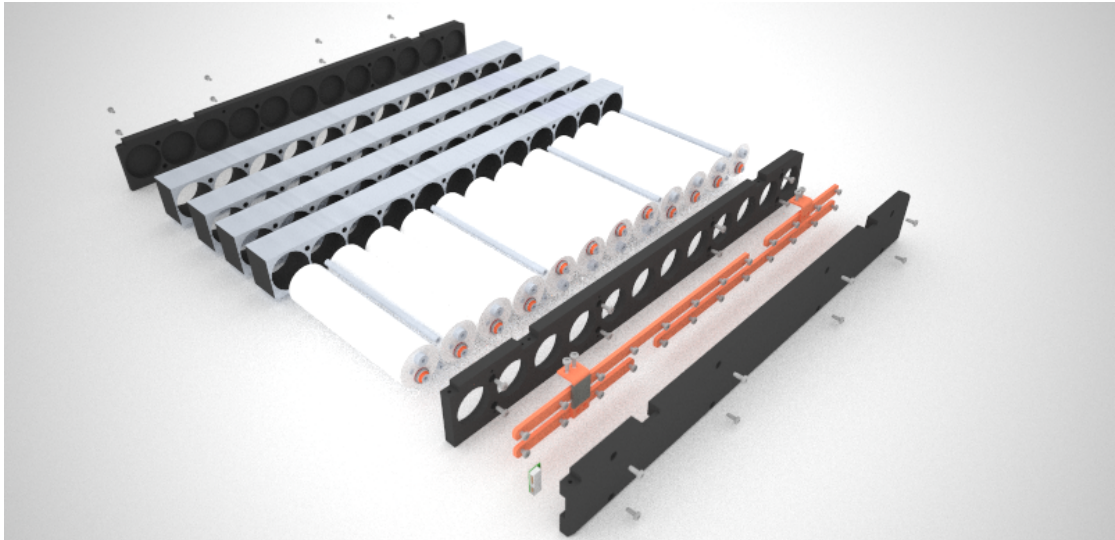
Moduly trakční baterie Gen2 jsou navrženy pro velkoformátové (144 Wh) cylindrické články Saft VL41M [10] technologie NCA–C. Každý se skládá z 12 článků v zapojení 3s4p viz obr. 3.7. Terminály článků jsou propojeny Cu profily s průřezem 70 mm² a následně překryty plastovým víkem. Ke každé čtveřici článků přísluší jeden 10 k termistor. Jejich vývody spolu s vodiči pro snímání napětí článků jsou vyvedeny na společný konektor pro propojení modulu s BMS.

- **Teplotní management** je založen na vlastnosti materiálu PCM [11] okamžitě přeměnit teplo z článků na změnu své fáze. Tento princip je rozšířen o systém roznášecích plechů, které napomáhají rychlému odvodu tepla z PCM do výměníku v podlaze bateriové krabice. Jedná se tak o hybridní management².
- **Systém BMS** vozidla pochází od společnosti Ewert Energy Systems, Inc. Jedná se o centralizovaný systém s hlavní jednotkou. Balancující proud článku je 100 mA.
- **Systém dobíjení** vozidla Gen2 je realizován pomocí tří jednofázových palubních nabíječek, každá o výkonu 2,3 kW. Pokud je k dispozici třífázová zásuvka, lze nabíjet výkonem 7 kW a vůz je tak možné zcela nabít za 3 h.



Obrázek 3.6: Funkční vzorek trakční baterie vozu Gen2

² Návrh managementu byl diskutován s Greg Albrightem ze společnosti AllCell Technologies, LLC.



Obrázek 3.7: Počítačový model rozloženého modulu trakční baterie Gen2. Ve funkčním vzorku baterie jsou použity 3s4p moduly s $U_n = 12\text{V}$ bez PCM a kovových roznašečů tepla. V modelu nejsou zakresleny termistory, snímající zvlášť teplotu každé čtveřice článků

3.3 Aktuální stav řešené problematiky

V současné době byla dokončena příprava vybraných funkčních celků na testování a čeká se na dokončení úprav měřicích stanovišť. Po předpokládaném zprovoznění válcové brzdy 4×2 Froude Consine V 6000 na jaře roku 2016 budou provedeny testy normalizovaných jízdních cyklů na kompletním vozidle Gen2.



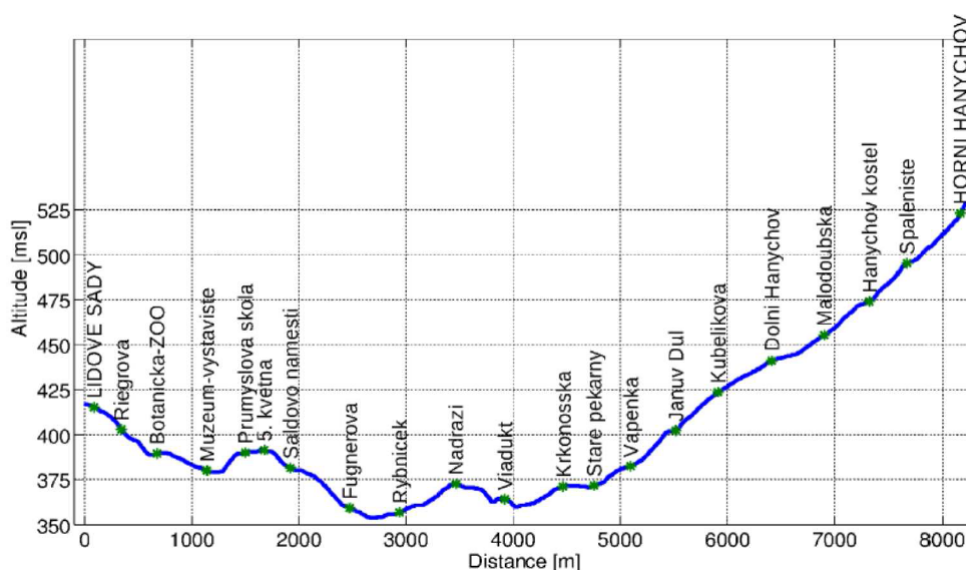
Obrázek 3.8: Elektromobil Gen2 představený na MSV Brno 2015

4 Energetická bilance provozu městské stejnosměrné trakce

Cílem kapitoly je analyzovat přínos instalace systému dočasného ukládání elektrické energie (ESS) pro zefektivnění energetické bilance v reálném tramvajovém provozu.

4.1 Tramvajový provoz v Liberci

V tomto konkrétním případě pak pro trať liberecké linky č.3, propojující městské části Lidové sady – Horní Hanychov¹. Tato trať byla vybrána, díky svému výškovému profilu s vysokým rozdílem nadmořských výšek a minimálnímu podílu rovinné trati viz obrázek 4.1 a údaje v tabulce 4.1.



Obrázek 4.1: Grafické zobrazení výškového profilu tratě linky č.3

Navrhované energetické úložiště by mělo výrazně přispět k celkové efektivnosti při nakládání s elektrickou energií. Ať už formou maximálního využití rekuperované energie, tak kompenzací odběrových špiček, vznikajících během provozu na trati.

¹ Souběžně provozována linka č.2, obsluhuje pouze úsek tratě Lidové sady – Dolní Hanychov. Úsek Fügnerova – Viadukt využívají i linky č.5 a č.11, pokračující ve směru na Jablonec nad Nisou.

Tabulka 4.1: Vybrané parametry tratě

parametr	hodnota
celková délka tratě	8223 m
nejdelší úsek stoupání	201 m
nejdelší úsek klesání	90 m
max. stoupání	100 ‰
max. klesání	78 ‰
podíl rovinné tratě	0 m

4.1.1 Současné řešení napájení tramvajové tratě

Celá trať je ve standardním režimu napájena ze dvou centrálních stanic – trakčních měníren². Zapojení trakční měnírny je obvykle následující. Rozvod vysokého napětí 22 / 35 kV 50 Hz je přiveden do sběrné stanice, odkud dále pokračuje přes samočinný bezpečnostní odpojovač a manuální vypínač do distribučního transformátoru. Zde dochází k transformaci napětí na hodnotu 525 / 650 V a vytvoření napájecí soustavy typu IT. Toto nízké napětí pak vstupuje do usměrňovače, na jehož výstupu je stejnosměrné napětí 660 / 750 V naprázdno³. Finálně je toto napětí rozvedeno přes odpojovače zpětných kabelů a rychlovypínače napájecích kabelů kombinované s odpojovači do trolejového vedení. Vlastní stejnosměrný rozvod je realizován jako jednostopý, kde kladný pól napájecí soustavy je veden v troleji.

- **Měnírna v Dolním Hanychově** napájí trať v úseku od stanice Staré pekárny po konečnou stanici v Horním Hanychově. Tento úsek je dále rozdělen do šesti sekcí, přičemž všechny sekce jsou napájeny ze společné jednotky pro usměrnění proudu, tzv. napaječe. Stanice disponuje dvěma transformátory, každý o jmenovitém výkonu 1100 kVA / 35 kV. Usměrňovač je polovodičový 12–ti pulzní. Měnírna, v době zahájení projektu, již disponovala systémem měření, který umožňuje průběžný monitoring odebíraných proudů a velikosti napětí na troleji. Tento systém pracuje se vzorkovací periodou 1 s a data z databáze tohoto systému byla využita při některých analýzách.
- **Měnírna v ulici Tatranská** je situována ve středu města v blízkosti vozovny a napájí trať v úseku Staré pekárny–Lidové sady. Tento úsek je rozdělen na pět sekcí. Z této měnírny je rovněž napájena jedna sekce pokrývající prostor vozovny a první úsek odbočky trati na Vratislavice nad Nisou. Měnírna Tatranská je generačně starší než měnírna v Dolním Hanychově. Usměrňovač je zde polovodičový diodový v šestipulzním zapojení. Měnírna tak nemůže pracovat v obousměrném provozu a energie, která jednou projde přes distribuční transformátor na stejnosměrnou stranu, již musí být využita, nebo zmařena ve stejnosměrné soustavě DPMLJ. Tato měnírna nedisponovala v okamžiku začátku projektu systémem umožňujícím průběžný monitoring a záznam provozních veličin v elektronické podobě.

² V době řešení projektu nebyly trakční měnírny propojeny. Obě tak napájí pouze svůj úsek tratě.

³ DPMLJ využívá ve svém tramvajovém provozu jmenovité stejnosměrné napětí 600 V.

4.1.2 Současný vozový park provozovaný na trati

Dopravní podnik měst Liberce a Jablonce nad Nisou vlastní 62 tramvajových vozů typu T3. Z celkového počtu jsou již cca $\frac{2}{3}$ modernizovány a zbývající tramvaje jsou postupně modernizovány na moderní tranzistorové řízení. Elektrická výzbroj tramvají je dle typu buď Cegelec nebo Škoda Electric. Nejnovějším typem tramvaje provozované DPMLJ je zcela nízkopodlažní vůz EVO2 s výzbrojí Škoda Electric. Jako základ pro studii o využití energetického úložiště byl zvolen modernizovaný vůz T3 s nízkopodlažní částí s označením T3R.PLF viz obrázek 4.2. Tato tramvaj je vybavena tyristorovým řízením od francouzské společnosti Cegelec.



Obrázek 4.2: Modernizovaný vůz T3R.PLF v barvách DPMLJ

4.1.3 Současný stav využívání rekuperované energie

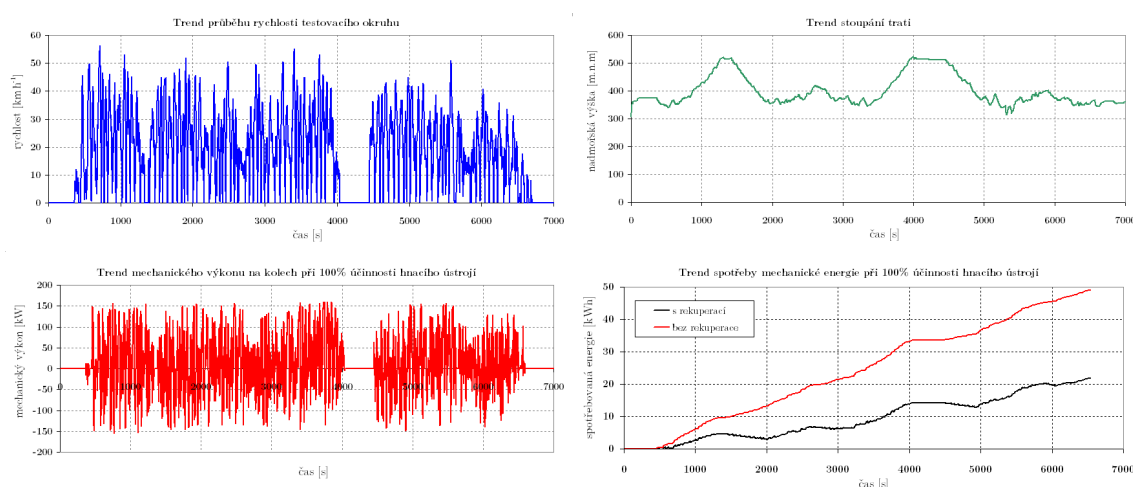
Vzhledem k stávajícímu jízdnímu řádu, který ovlivňuje hustotu provozu a vzájemnou pozici jednotlivých vozů na dané trati, lze předpokládat, že významná část energie získané rekuperací je mařena v odporových trakčních výzbroje. Tento předpoklad platí zejména pro letní období⁴. Během zimního období, při teplotách pod 0 °C, se v Liberci využívá část této energie na technologické účely pro vytápění výhybek, ostrůvků, atd.

⁴ Vozy DPMLJ nejsou vybaveny klimatizací salónu, která obvykle disponuje značným příkonem a tedy by sloužila jako další spotřebič, který by přednostně využíval rekuperované energie. Vozy DPMLJ disponují pouze klimatizací pro kabinu řidiče.

4.2 Simulace jízdy tramvaje pro danou trať

Vlastní simulace se tak zaměřuje na energetickou bilanci daného hnacího ústrojí během jízdy dle profilu konkrétní trati⁵. Princip simulace kolejového vozidla využívá původní simulační prostředí, upravené pro specifika kolejových vozidel.

Pro účely srovnání s dříve naměřenými daty skutečné jízdy byly do upraveného simulačního prostředí zadány průběhy zrychlení a stoupání tramvaje v měřeném úseku. Okamžité zrychlení vozidla a stoupání trati bylo přepočítáno z dat naměřených pomocí GPS modulu a následně filtrovaných. Proto je patrný drobný nesoulad u trendu simulovaného průběhu mechanického výkonu na kolech na obr. 4.3 a naměřeného elektrického příkonu za sběračem na obr. 4.8.



Obrázek 4.3: Simulace tramvajového vozu T3R.PLF pro danou trať

4.2.1 Vyhodnocení výsledků simulace

Pro daný úsek tratě musí pohonná jednotka vykonat práci 24,1 kWh včetně rekuperace nebo 58,8 kWh bez možnosti využití rekuperace. V těchto hodnotách ale úmyslně není započtena mechanická účinnost hnacího ústrojí ani trakčních motorů pro možnost vyšetření poměru rekuperace na trati. Z daných výsledků plyne, že na daném úseku lze získat zpět až 58 % z celkového množství mechanické energie, potřebné pro pohon vozidla.

Měření ve voze na tomto úseku zaznamenalo spotřebu 49,4 kWh včetně rekuperace a přepočtem 75,2 kWh bez rekuperace. Takto bylo získáno zpět 34 % z celkového množství energie. Celková účinnost pohonu na měřené trati vychází po konfrontaci cca 50 %, což odpovídá předpokladům účinnosti převodového ústrojí 90 % a střední účinnosti trakčních elektromotorů 60 % v tomto režimu.

⁵ Vzhledem k naprosto odlišným místním podmínkám jednotlivých tratí se normalizované jízdní cykly pro tramvajový provoz nepoužívají.

4.3 Měření na daném úseku trati

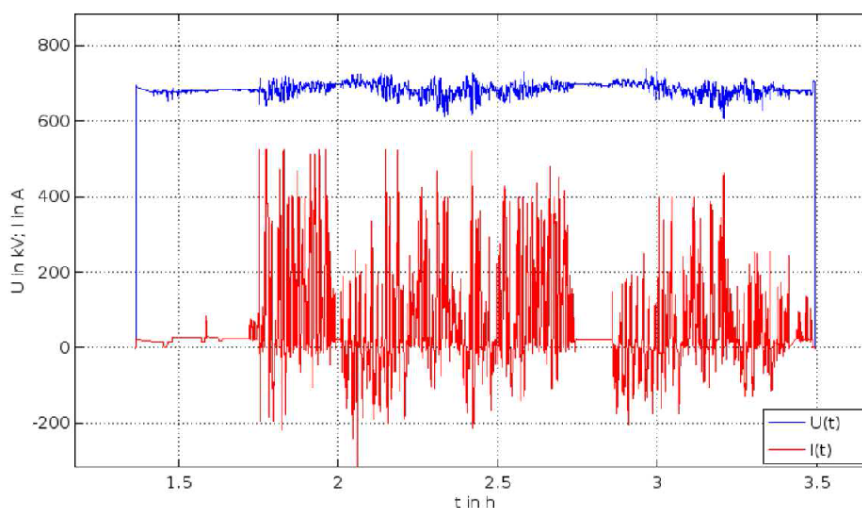
4.3.1 Měření v tramvajovém voze

K měření spotřeby tramvajového vozu byly navrženy dva měřicí systémy. První byl použit při speciálních nočních jízdách a počátečních měřeních spotřeby jednotlivých výbrojů tramvajových vozů, druhý pak na souhrnná provozní měření.

První měřicí systém byl založen na použití měřicí karty National Instrument, typ NI 6212 a přenosného počítače. Trolejové napětí je měřeno pomocí napěťové diferenciální sondy SI-9002. Proud je měřen stejnosměrnou proudovou sondou PAC 12 s rozsahem ± 600 A při výstupním napětí ± 10 V. Nastavení a odečítání dat z měřicí karty National Instruments je realizováno pomocí Data Acquisition Toolboxu, který je součástí prostředí MATLAB, běžícím na přenosném počítači. Tento měřicí systém umožňuje vzorkování s periodou 100 ms.

Druhý měřicí systém na bázi analyzátoru SMC 144, je doplněn sondou pro měření stejnosměrného proudu do ± 500 A a jeho napěťový vstup je upraven pro měření napětí v rozsahu ± 1500 V. Analyzátor měří s nižší vzorkovací periodou 200 ms, která se ukázala být dostatečně vypovídající. Naměřená data jsou ukládána na interní paměťovou kartu analyzátoru o velikosti 512 MB. Paměť vydrží zhruba 4 dny plného provozu tzn., tramvaj je pod napětím min. 12 h denně.

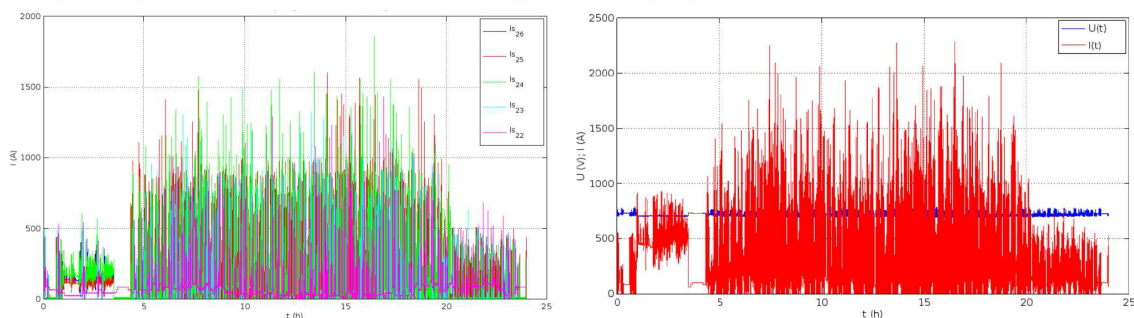
Na následujícím obrázku 4.4 je grafický výstup naměřených dat pořízený měřicím systémem. Data byla zaznamenána během nočních jízd, pro osamocené vůz na trati. Na záznamu ze zimního období lze dobře pozorovat vliv využívání rekuperované energie na vyhřívání vozu i ostatních zařízení provozu.



Obrázek 4.4: Záznam z měření ve voze během zimního období

4.3.2 Měření v měčírně v Dolním Hanychově

Měčírna v Dolním Hanychově byla na počátku projektu jedinou měčírnou, která umožňovala měření přímo na trolejovém vedení. Měčírna je osazena měčícím systémem, který každou sekundu ukládá hodnoty napětí a proudu v jednotlivých trakčních úsecích a proudu z hlavního napaječe.



Obrázek 4.5: *vlevo*: Proudy úseků I_{s22-26} . *vpravo*: Výstup z usměřňovače

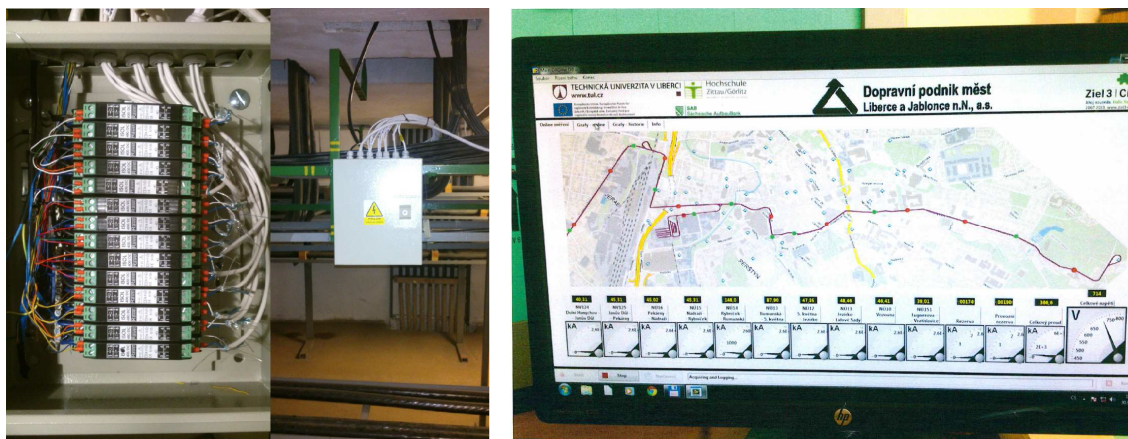
Průběhy okamžitých proudů na jednotlivých trakčních úsecích se vzorkovací periodou 1 s jsou uvedeny na obr. 4.5. Zvolený příklad odběru odpovídá dni 7. 12. 2014. Byl to den, ve kterém probíhalo noční měření ve voze, a proto v době mezi 1:00–3:00 h jsou odběry, které odpovídají právě této jízdě. Hodnoty v době mezi 4:00–24:00 h již odpovídají běžnému provozu. Na témže obrázku je i průběh proudů z napaječe, které prochází do jednotlivých trakčních úseků. Do celkového součtu se promítá aktuální stav na tramvajové trati, který je ovlivněn řadou parametrů, jako je počet projíždějících tramvají, jejich hmotnost, akcelerace a aktuální poloha vozů na trati.

4.3.3 Měření v měčírně v ulici Tatranská

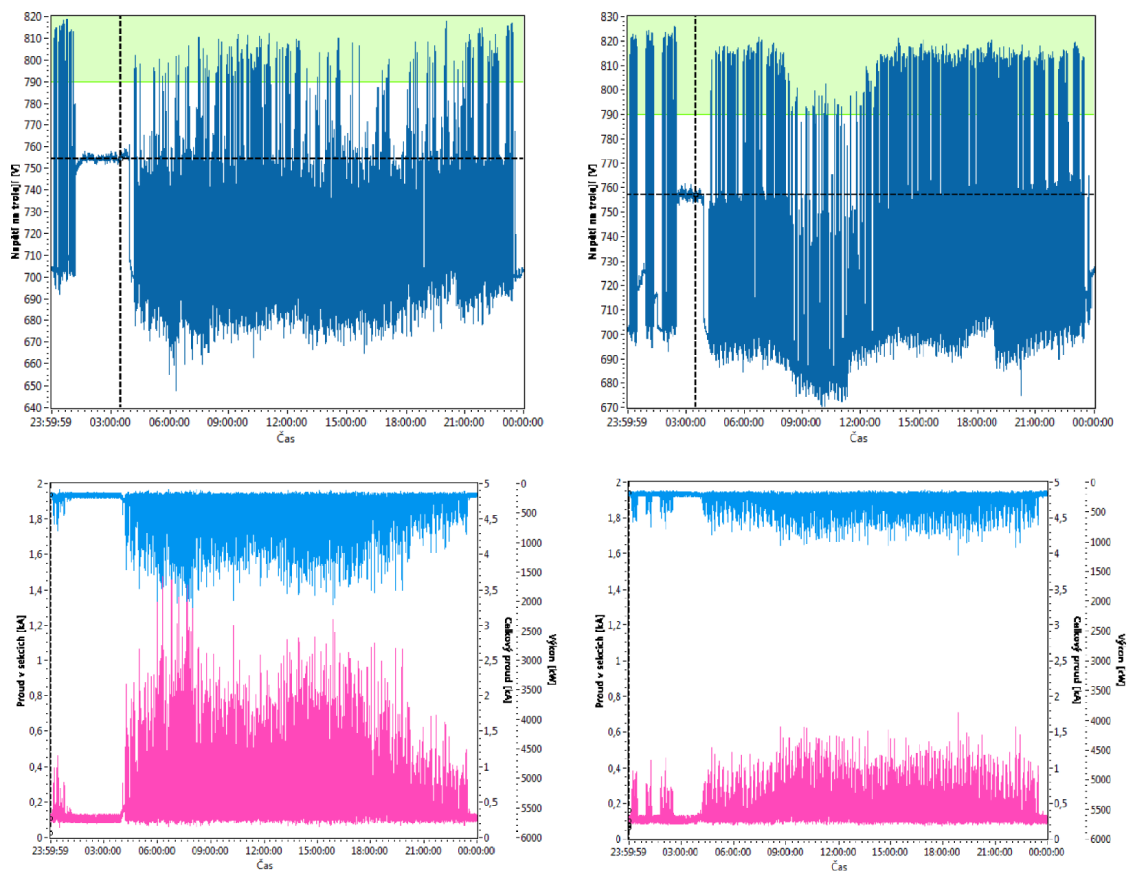
Tato měčírna nedisponovala měčícím systémem se záznamem dat, a proto bylo v rámci řešení projektu Ziel3 realizováno moderní měčící zařízení.

Nový měčící systém umí vizualizovat a archivovat velikosti proudů v jednotlivých napájených sekcích, velikost celkového proudu odcházejícího z měčírny a velikost napětí na troleji. Jako optimální řešení byl vybrán koncept PC vybaveného měčící kartou NI PCI-6281 M-Series, na kterém poběží HMI vizualizace a záznam dat v prostředí LabVIEW. Databáze je realizována programem PostgreSQL. PC je připojen na záložní zdroj napájení, který poskytuje jak zálohu pro případ výpadku elektrické energie, tak i galvanické oddělení PC od rozvodné sítě měčírny. Měčící systém je uložen ve vlastní skříní obsahující převodníky měřených signálů (včetně kabelových rozvodů). Celkem je použito 13 ks I–U převodníků a jeden U–U⁶ převodník typu Rawet ISOL400. Vzorkovací perioda signálu je 0,1 ms. Signál je dále předzpracován funkcí RMS a převzorkován na 200 ms. Fyzická realizace převodníkové skříně a uživatelské prostředí jsou vyobrazeny na obr. 4.6.

⁶ I–U proudovo–napěťový, U–U napěťovo–napěťový převodník.



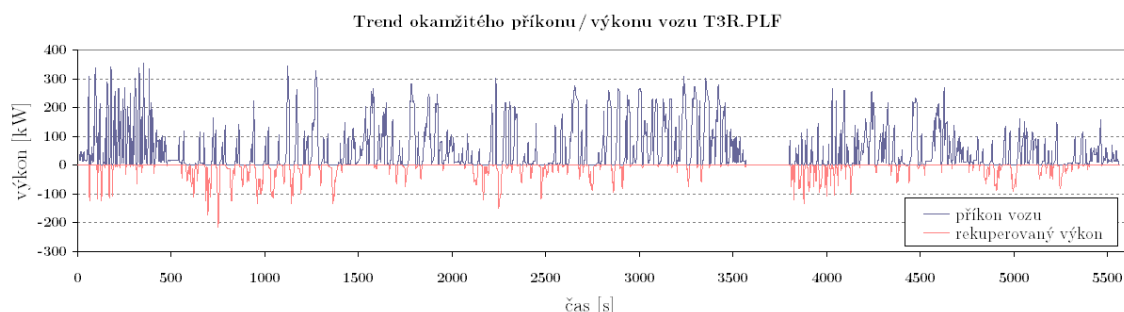
Obrázek 4.6: Měřicí systém v měničce v ulici Tatranská. *vlevo:* Realizace převodníkové skříňe a její umístění v rozvodně. *vpravo:* Uživatelské prostředí pro sběr naměřených dat situované v řídicí místnosti.



Obrázek 4.7: Data z měřiny v ulici Tatranská. *vlevo:* Průběhy U (tmavě modrá), I_{celk} (ružová), P (světle modrá) ze všedního dne 29.10.2014, *vpravo:* Průběhy U , I_{celk} , P z víkendového provozu

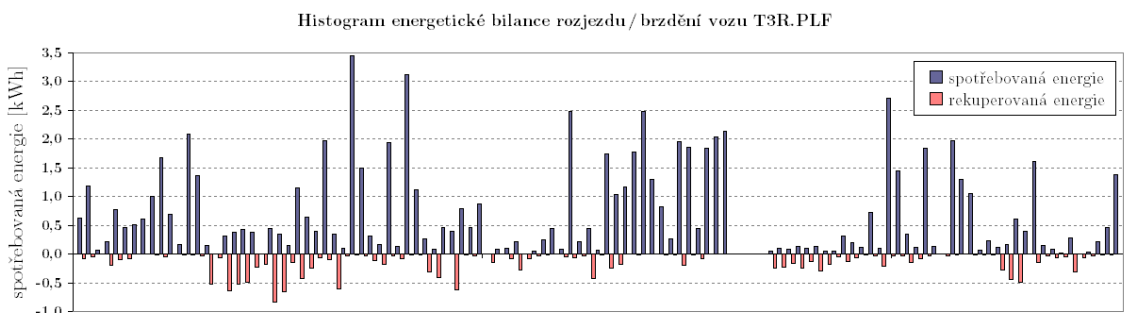
4.4 Energetická analýza naměřených dat

Během měření byl na trati pouze jeden tramvajový vůz T3R.PLF. Měřicí okruh byl záměrně volen tak, aby pokryl trasu obou městských tramvajových linek č.2 a č.3 v obou směrech⁷. Testovací vůz T3R.PLF vykazoval trvalou spotřebu cca 1,25 kW.



Obrázek 4.8: Výkonová bilance vozu na trati s vytápěním salónu 13,5 kW

Při akceleraci dosahuje samotný vůz špičkového příkonu 320 kW. Vyšší odběr vozu již není možný bez ohledu na dynamiku jízdy a profil tratě, neboť při 300 kW dochází k elektronickému proudovému omezení v měniči trakční výzbroje. Nejvyšší rekuperační výkon trakční výzbroje TV Progress pak může dosáhnout cca 250 kW. Střední hodnota odebíraného výkonu během celého jízdního cyklu byla 41,8 kW.



Obrázek 4.9: Energetická bilance vozu na trati s vytápěním salónu 13,5 kW

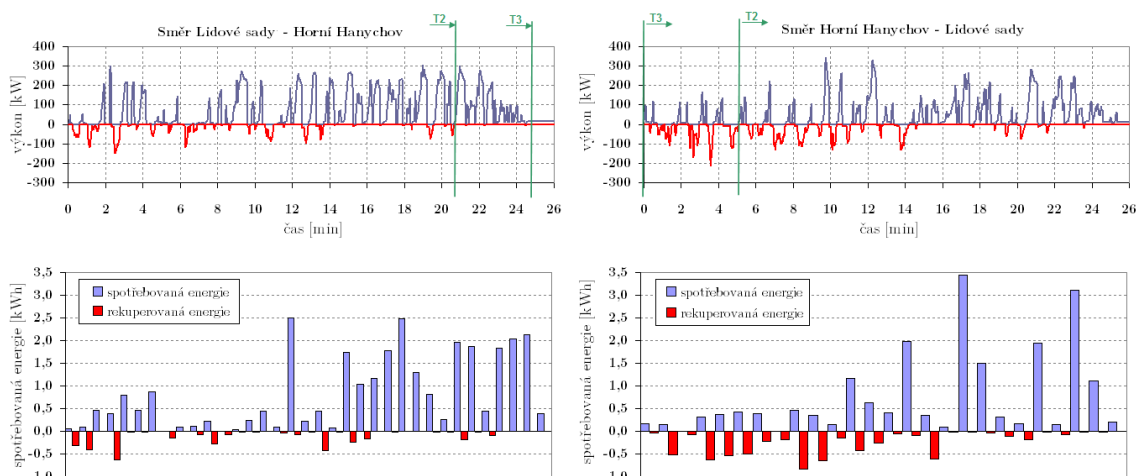
Obrázek 4.9 dává přehled o celkové energetické bilanci během střídajících se cyklů akcelerace, jízdy konst. rychlostí a rekuperačního brzdění. Pro danou trať bylo naměřeno maximální množství rekuperované energie v jednom cyklu 0,83 kWh, spotřebované pak 3,45 kWh. Celkový poměr mezi spotřebovanou a rekuperovanou energií se pohybuje mezi $1/5 - 1/4$, tj. pouze cca 18–25 % energie je rekuperováno⁸.

Pro více vozů na trati není metodicky správné výkonové požadavky kalkulovat jako prostý násobek osamocené vozu. Situace, kdy budou všechny vozy na trati akcelarovat ve stejný okamžik, není pravděpodobná.

⁷ Měření obsahuje i úseky, které vozy absolvují během manipulačních jízd z vozoven.

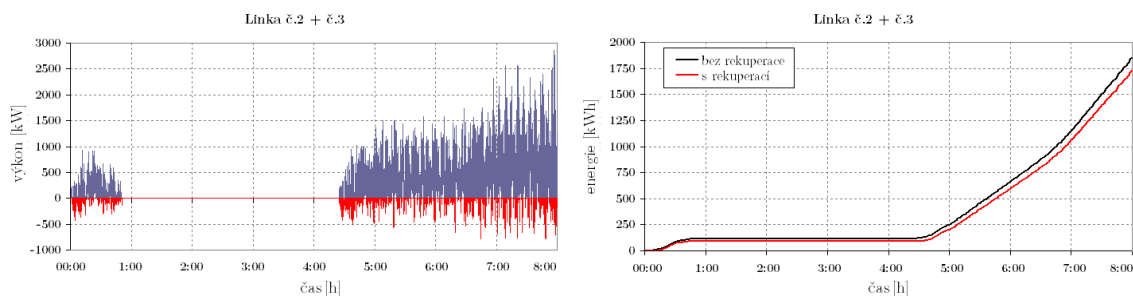
⁸ Rozptyl hodnot kromě rozdílného stylu jízdy a aktuálního obsazení vozu tvoří zejména vytápění při zimmím provozu.

Reálný provoz na tramvajové trati DPMLJ lze metodicky správně popsat pouze vyextrahováním úseků dat platných pro linku č.2 a č.3 v obou směrech⁹ viz obr. 4.10.



Obrázek 4.10: Bilance výkonů a histogramy spotřeby energie pro linky č.2 a č.3

Získané průběhy jednotlivých linek pak byly sestaveny dle jízdního řádu DPMLJ, platného od 31. 8. 2014, v jeden celek, ze kterého je možné popsat očekávané výkonové poměry v trolejovém vedení na trati Lidové sady – Horní Hanychov a zpět¹⁰.



Obrázek 4.11: Simulace provozu na trati s virtuálně propojenými napájecími úseky

Střední hodnota odebíraného výkonu pro běžný provoz se 14 vozy na trati pak vychází na 550 kW, pro dopravní špičku s 18 vozy 700 kW a pro režim omezení dopravy se 4 vozy pak 120 kW. Takto provedený rozbor výkonové a energetické bilance již poskytuje dobrou představu o velikosti a četnosti výkonových špiček, stejně tak jako střední hodnotě výkonu v rámci dané intenzity provozu na celé trati. Největším přínosem takto pojaté syntézy naměřených dat je možnost určit okamžitý rekuperovaný výkon, který v daném okamžiku nebyl spotřebován, a který tak bude uložen v energetickém úložišti. Měření v trakčních měničích DPMLJ se současným uspořádáním tato data nedokáže poskytnout.

⁹ Linku č.2 od linky č.3 odlišuje pouze její ukončení ve stanici Dolní Hanychov (standardní doba jízdy 21 min). Linka č.3 pokračuje až do stanice Horní Hanychov (standardní doba jízdy 26 min).

¹⁰ bez manipulačních jízd

4.5 Statistické údaje tramvajového provozu

Toto hodnocení vychází z rozboru situace tramvajového provozu Dopravního podniku měst Liberce a Jablonce nad Nisou. V březnu 2014 došlo k výluce na jablonecké trati a od tohoto měsíce jednotlivé měsíční odběry trakční energie ukazují pouze hodnoty sledované tramvajové linky Horní Hanychov – Lidové sady. Sběr dat realizovaný v rámci projektu Ziel3 na měnírně v ulici Tatranská měří pouze energii v úseku Lidové sady – Viadukt.

Celkový přehled:

- Celková spotřeba trakční energie provozu DPMLJ v roce 2013 činila 6739 MWh.
- V době řešení projektu k 31. 10. 2014 byla celková spotřeba trakční energie od začátku roku 3056,5 MWh a bylo zapláceno 7,1511 miliónů Kč.
- Za 10 měsíců (březen–říjen) byla na sledovaném úseku Horní Hanychov – Lidové sady celková spotřeba trakční energie 1730 MWh. Za celý rok 2014 je pro daný úsek odhadovaná spotřeba 2400–2500 MWh¹¹.
- Za rok 2014 byla průměrná cena 2,34 Kč/kWh. Tato částka, vysoutěžená na energetické burze, je podstatně nižší než běžná cena pro velkoobdoběratele.

Dílčí energetické poměry:

- Průměrná spotřeba nového typu jedné tramvaje s rekuperací je 2,7 kWh km⁻¹.
- Průměrná spotřeba starého typu jedné tramvaje bez rekuperace je 4,5 kWh km⁻¹.
- V dlouhodobém průměru je 15 % energie rekuperováno, krátkodobě až 30 %.
- V zimním období (listopad–únor) narůstá spotřeba o 30 % kvůli vytápění provozu.

Poměry v měnírně v ulici Tatranská:

- Trvalý klidový odběr měnírny na lince je přibližně 15–25 kW v závislosti na sezóně, zejména pak na klimatických podmínkách.
- Z dlouhodobých měření vychází doba, kdy je potřeba přebytečnou energii rekupeovat v poměrně širokém rozsahu 15–140 min.
- Denní průměr energie k rekuperaci vychází za rok 2014 na cca 160 kWh.
- Dále je nutné zmínit energetické poměry na nejvzdálenějších bodech trolejového napájení, které jsou ve směru ke konečné stanici v Lidových sadech. Ve dvou různých obdobích byla provedena měření při rozjezdech na jedné tramvaji.
- Analýza poukazuje na značné ztráty ve vedení v tomto úseku díky $R_v = 0,3\text{--}0,45 \Omega$.
- Poměr ztrátového výkonu ve vedení k příkonu tramvaje při rozjezdu je cca 20–30 %.

¹¹ Uvedené odběry trakční energie v sobě zahrnují i energii spotřebovanou pro vlastní provoz měnírny.

4.6 Zhodnocení výsledků

Z výsledků získaných v této kapitole je možné vyslovit tyto závěry. Byla provedena měření jak na osamoceném voze, tak v obou trakčních měnících na tramvajové trati. Každý vůz je na dané trati schopen pomocí rekuperačního brzdění navrátit zpět do společného trolejového vedení (dle ročního období a stylu jízdy) cca 18–25 % energie. V současné době není možné takto získanou energii vracet zpět do veřejné rozvodné sítě, a tudíž je hledáno řešení, jak přebytečnou energii efektivně využít v uzavřeném okruhu trolejového vedení. Nabízejí se zejména tyto dvě metody:

1) Propojení napájecích úseků. Již za stávajících podmínek probíhá v případě, že je na trati více vozů, vzájemné přelévání energie mezi rekuperujícími a akcelerujícími vozy. Teprve pokud není na trati jiný vůz, je energie mařena v trakční výzbroji jednotlivých vozů. V případě, že by byly v budoucnu oba úseky propojeny, snížilo by se množství nevyužité energie zhruba na 7–12 %.

2) Instalace přechodného úložiště energie. Pro maximální využití rekuperované energie bez propojení úseků je třeba uvažovat o instalaci minimálně dvou energetických úložišť¹². Z analýzy dat z obou trakčních měření plyne, že zejména v úseku Horní Hanychov – Staré Pekárny, který zajišťuje měnič v Dolním Hanychově, je v současné době mařeno značné množství energie. Toto je způsobeno menším počtem zastávek a tedy i vozů v úseku, kde navíc vozy linky č.2 končí již ve stanici Dolní Hanychov. Zanedbat nelze ani významné stoupání trati v tomto úseku. Naopak v úseku Lidové sady – Staré Pekárny, napájené z měčírny v ulici Tatranská, je provoz intenzivnější (až 12 vozů). I z tohoto důvodu dochází za plného provozu ke znatelně lepšímu využití rekuperované energie. Na záznamech z omezeného provozu a o víkendech je pak již opět patrné významné množství mařené energie.

Na základě provedené analýzy dat lze doporučit takový typ ESS, které bude disponovat velmi vysokým výkonem při relativně malém množství uložené energie. Vzhledem k průměrnému množství denní rekuperované energie 160 kWh a četnosti vzájemného překrývání cyklů akcelerace vozu, lze doporučit jako optimální hodnotu využitelné energie 5 kWh. Trvalý nabíjecí a vybíjecí výkon pak 1000 kW s možností krátkodobého přetížení na dvojnásobek. Tato hodnota umožní snížit špičkový příkon obou měnících o polovinu. Tedy z max. instalované hodnoty 2200 kVA na 1100 kVA.

Tabulka 4.2: Požadavky kladené na ESS

parametr	hodnota
trvalý nabíjecí/ vybíjecí výkon ^a	1000 kW
množství uložené energie	5 kWh

^a S možností krátkodobého přetížení

¹² Jedno pro každý úsek, přičemž tyto úložiště nemusí být výkonově, resp. energeticky stejné.

5 Aplikace energetických úložišť v městské tramvajové trakci

5.1 Technologie energetických úložišť

Technologie současných úložišť energie, ať už jsou založeny na setrvačnicku (FESS), superkapacitorech (SCESS) nebo lithiových bateriích (BESS), stále nedisponuje takovými vlastnostmi, které by umožnily vyřešení optimálního ESS. Mezi kritické vlastnosti patří zejména specifická hustota výkonu a uložené energie, komplexní životnost technologie a samozřejmě stále ještě vysoká cena technologie. Pro vzájemné porovnání vybraných vlastností dané technologie slouží následující tabulka.

Tabulka 5.1: Přehled vybraných technologií ESS

technologie ^{a,e}	parametry ESS					
	spec. energie [Wh l ⁻¹]	spec. výkon [W l ⁻¹]	cyklická ^b životnost [-]	kalendářní ^c životnost [let]	cena ^d energie [\$/kWh]	cena výkonu [\$/kW]
BESS NMC–C	150	150	2000	10–15	350	350
BESS LFP–C	80	160	4000	10–15	500	250
BESS LMO–LTO	60	600	20 000	20	600	60
SCESS	1	800	1 mil.	10	50 000	16
FESS LowSpeed	4	1000	1 mil.	20	2500	350

^a V tabulce jsou uvedeny parametry technologie ESS (vč. elektronického i teplotního managementu, odpojovačů a instalační krabice, resp. rozvaděče) bez přízpusobovacího DC–DC měniče

^b Pro BESS platí hodnoty při 80 % DoD, pro SCESS při vybíjení do $1/2 U_{nom}$ (75 % DoD) při poklesu kapacity na 70 % původní kapacity a nárůstu ESR o 100 % [12]

^c Jedná se o minimální životnost při provozu nebo skladování při jmenovitých podmínkách

^d Ceny jsou uvedeny bez DPH

^e Zdroje dat jsou materiály společností: Tesla Motors, Inc.; Altair Nanotechnologies, Inc.; A123 Systems, LLC.; Sony Corp.; Maxwell Technologies, Inc. a Piller Group GmbH

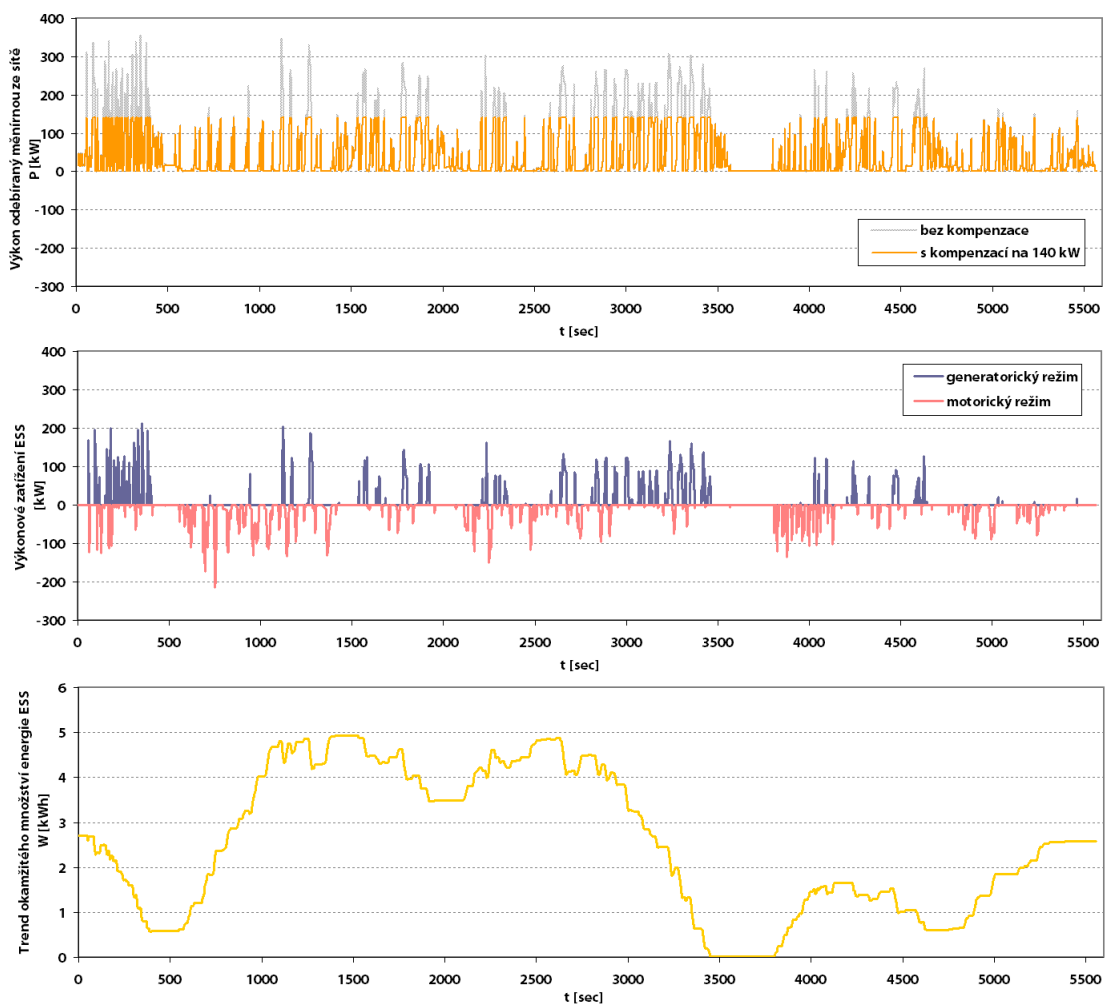
Pro podmínky DPLMJ byla doporučena stacionární varianta nízkootáčkového FESS pro svoji robustnost a praktickou nezávislost provozních parametrů na teplotě. Z hlediska umístění úložiště najde ESS největší uplatnění v úseku měnirny v ulici Tatranská na konečné v Lidových sadech, tj. na nejvzdálenějším místě od měnirny.

5.2 Provozní režim úložiště pro místní podmínky

V následujícím textu jsou popsány dvě základní metody využití ESS. Princip je demonstrován na reálných datech provozu tramvajového vozu T3R.PLF v Liberci.

5.2.1 Metoda omezující akcelerační špičky provozu pouze pomocí energie získané rekuperací

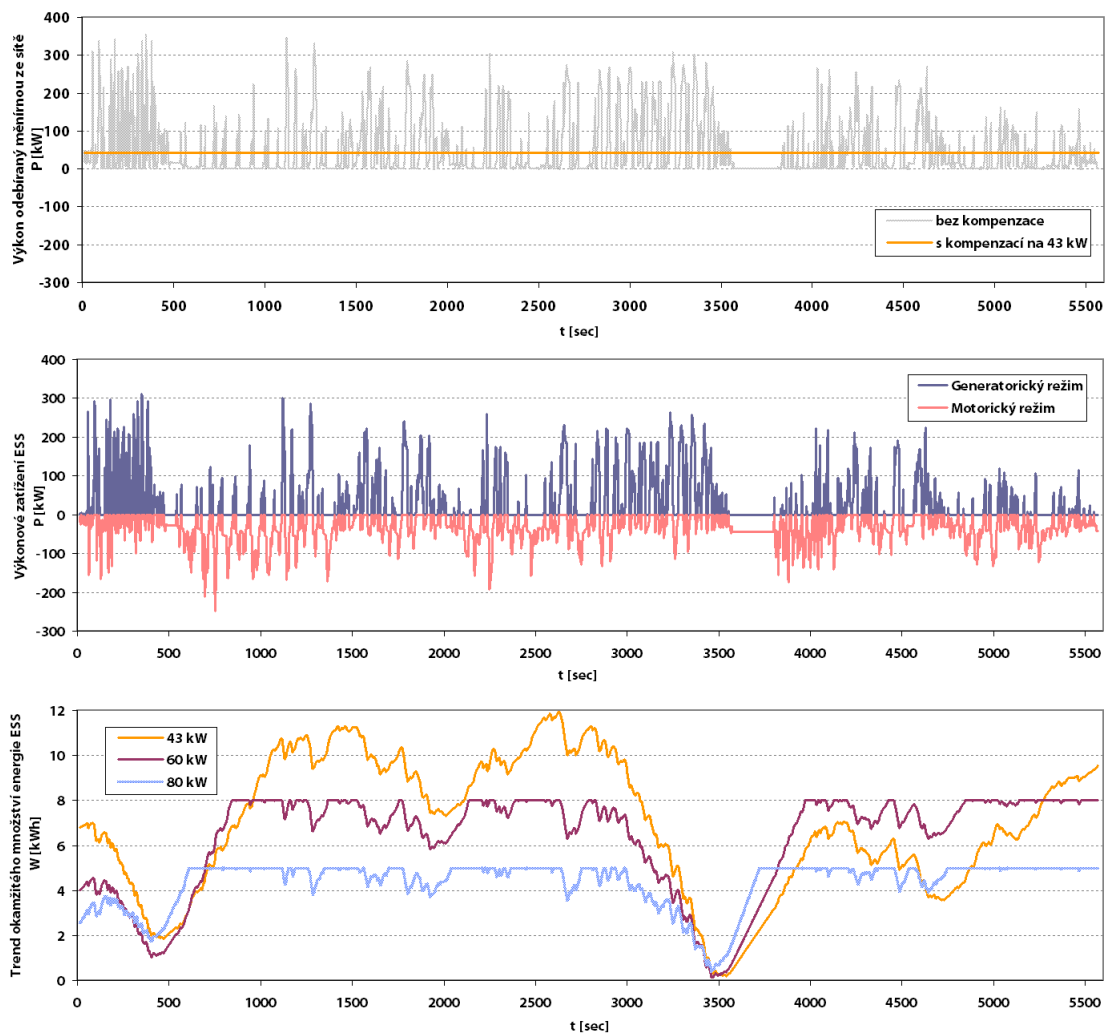
Z obr. 5.1 je názorně vidět, že pouze s využitím rekuperované energie lze významným způsobem snížit proudové špičky odebírané trakční měnírnou z rozvodné sítě. Pro lepší kompenzaci takto získaná energie již nestačí a bylo by nutné významným způsobem navyšovat množství energie v úložišti. K úplnému proudovému vyhlazení lze dospět pouze kontinuálním dobíjením ESS.



Obrázek 5.1: Okamžitý průběh výkonu odebíraného trakční měnírnou ze sítě

5.2.2 Metoda udržující odběr provozu na definované hodnotě pomocí kontinuálního dobíjení úložiště

Tato metoda již dokáže vyhladit a minimalizovat proud odebíraný trakční měnírnou z rozvodné sítě až na střední hodnotu. Na druhou stranu právě s minimalizováním proudu odebíraného měnírnou dochází i k minimalizaci možného dobíjecího proudu. To způsobuje negativní efekt v podobě nutnosti navýšení potřebné kapacity ESS. V tomto konkrétním případě pro kompenzaci odběru měírny na střední hodnotu příkonu 43 kW je třeba úložiště disponující cca 12 kWh energie. Z tohoto důvodu je vhodné zvážit ekonomický přínos pouze částečné kompenzace, kdy pro odběr měírny 60 kW je potřeba již jen 8 kWh úložiště, pro 80 kW pak 5 kWh.



Obrázek 5.2: Okamžitý průběh výkonu odebíraného trakční měnírnou ze sítě. Okamžitý výkon ESS při kompenzaci na 43 kW. Zobrazení průběhu aktuálního množství energie uložené v ESS

6 Návrh energetického úložiště na bázi setrvačnicku

V této kapitole je uveden můj přínos k návrhu technologie energetického úložiště na bázi setrvačnicku (FESS) v rámci projektu Ziel3. Jedná se o ideový návrh nízkootáčkového setrvačnicku a kompletní návrh motor–generátoru setrvačnicku spolu s implementací technologie do stávajícího provozu. Návrh uložení setrvačnicku pomocí aktivních magnetických ložisek (AMB). Stanovení specifických zatížení, návrh hřídele a vyvážení disku řešili kolegové z HS Zittau/Görlitz a jsou uvedeny v závěrečné zprávě projektu [13]. Vlastní design a parametry FESS jsou podřízeny provedené analýze dat z reálného tramvajového provozu DPMLJ, popsané v kapitole 4 a možností jeho nasazení, popsanych v kapitole 5.

6.1 Setrvačnický

Setrvačnick se řadí mezi kinetická úložiště energie¹ založená na principu rotujícího hmotného disku upevněného na hřídeli, který je na obou koncích uložen ve speciálních ložiscích. Na stejné hřídeli je obvykle instalován i elektrický motor–generátor, který zajišťuje obousměrný převod mezi kinetickou a elektrickou energií. Množství energie uložené v setrvačnicku je stanoveno dle následující rovnice

$$E_{K_{FESS}} = \frac{1}{2}J\omega^2 \quad (6.1)$$

a tudíž lze kdykoliv velmi přesně stanovit okamžité SoC setrvačnicku i během zatížení. Z fyzikálního vztahu je rovněž zřejmé, že FESS lze realizovat dvěma přístupy. První je založen na velké hmotě rotujícího disku setrvačnicku, druhý pak na vysokých pracovních otáčkách. Oba přístupy byly v minulosti podrobně rozpracovány. Moderní FESS využívají aktivní magnetická ložiska (AMB) postavená na materiálech supravodivých za vysokých teplot (HTS). Setrvačnick tak v podstatě levituje v magnetickém poli. Pro možnost odstavení setrvačnicku a případ selhání magnetických ložisek je FESS vybaven i sadou mechanických ložisek.

¹V odborné literatuře se lze setkat s obecnou zkratkou KERS, zkratka FESS je používána pro soustrojí setrvačnicku a motor–generátoru, kde na vstupu i výstupu soustrojí je elektrická energie.

6.2 Projektování setrvačné hmoty

Cílem této části je navrhnout design, rozměry a vhodný materiál pro realizaci setrvačnicku, který umožní skladování požadovaného množství energie v daném rozsahu provozních otáček viz tabulka 6.1.

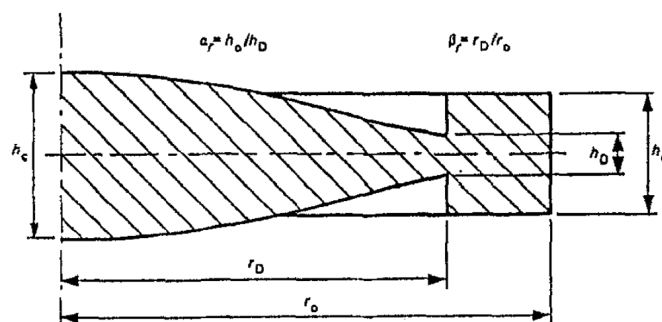
Tabulka 6.1: Požadavky kladené na FESS

parametr	hodnota
množství uložené energie	5 kWh
rozsah provozních otáček	1800–3600 ot. min ⁻¹

K dosažení optimálního návrhu setrvačné hmoty je třeba vycházet z některých obecných závislostí. Specifická hustota energie v rotoru W^M je omezena pouze otáčkami, při kterých dojde k trvalé deformaci materiálu. Tyto otáčky pak závisí pouze na designu rotující hmoty a vlastnostech materiálu, ze kterého je vyrobena,

$$W^M = K \frac{\sigma_p}{\rho_V} \quad (6.2)$$

kde K je bezrozměrný koeficient, který se skládá z tzv. faktoru tvaru a faktoru bezpečnosti pro danou rotující hmotu, σ_p je maximální přípustné normálové napětí a ρ_V je specifická hustota materiálu. Nejvyšší hodnoty $K = 1$ dosahuje koeficient pro tzv. disk s rovnoměrně rozloženým napětím². Tento tvar disku ale vede na nekonečně velký průměr a tedy není ve své ideální podobě prakticky realizovatelný. Proto se návrh upravuje na disk s rovnoměrně rozloženým napětím s obrubou viz obr. 6.1. Tento tvar již umožňuje technologickou realizovatelnost, nicméně zůstává zde další technologický problém v podobě napojení disku na hřídel motor–generátoru, respektive jeho uložení do AMB ložisek. Je možné využít dvou přístupů. První spočívá v připojení hřídele pomocí příruby a šroubových spojů. Druhý pak ve vytvoření unášče disku s požadovaným otvorem, který musí být silnější než vlastní disk v tomto bodě [13]. Tím dojde k omezení namáhání disku v místě otvoru viz obr. 6.3.



Obrázek 6.1: Řez diskem setrvačnicku s rovnoměrným napětím s obrubou [14]

² Jedná se monolitický disk z izotropního materiálu bez otvorů.

6.2.1 Výpočet geometrie setrvačné hmoty

Výpočet vnějšího profilu rotujícího disku daného parametrem $h_{(r)}$ lze optimalizovat volbou koeficientů koeficient B a β_r kde:

B - faktor pro ovlivňování geometrického faktoru a rychlostního faktoru³

β_r - geometrický faktor ovlivňující výpočet axiální délky disku s obrubou

h_c - axiální rozpínání disku v ose rotace

r_0 - maximální vnější průměr disku

α_r - poměr axiálního rozpínání věnce k h_c

α_r - faktor pro určení směrnice obrysu $h_{(r)}$ jako funkce poloměru

$$B = \frac{2\pi\rho r_0^3 h_0}{n m_b r_b} \quad (6.3)$$

$$\beta_r = \sqrt{\frac{2}{B \alpha_r} \left[\alpha_r - 1 + \sqrt{\frac{\alpha_r^2 B (B - 2 + 2v)}{(1 - v)^2} + (\alpha_r + 1)^2 + \frac{2B^2 \alpha_r^2 \sigma_{r_0}}{\rho \omega^2 r_0^2 (1 - v)}} \right] - \frac{1 + v}{1 - v}} \quad (6.4)$$

Zde se objevuje parametr σ_{r_0} pro normálové napětí na poloměru r_0 , ke kterému dochází dodatečným zatížením obruby hustotou ρ . Takové dodatečné zatížení je možné si představit například jako lopatkování turbíny⁴. Návrh profilu setrvačnicku se pak provádí v závislosti na $h_{(r)}$ a je rozdělen do 3 částí:

Pro $r \leq \beta_r r_0$ platí:

$$h_{(r)} = h_c \left\{ e^{-\frac{B}{2} \left(\frac{r}{r_0}\right)^2} + (\alpha_r - 1) e^{-\frac{B}{2} \beta_r^2} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctan \left(\frac{\frac{r}{r_0} - \beta_r}{\alpha_r} \right) \right] \right\} \quad (6.5)$$

Pro $r \geq \beta_r r_0$ platí:

$$h_{(r)} = h_c e^{-\frac{B}{2} \beta_r^2} \left[\frac{1 + \alpha_r}{2} + \left(\frac{\alpha_r - 1}{\pi \alpha_r} - B \beta_r \right) \left(\frac{r}{r_0} - \beta_r \right) \right] \quad (6.6)$$

Jestliže je dosaženo maximálního axiálního prodloužení podle rovnice (6.7), odvodí se věnec od r_0 právě s tímto rozměrem.

$$h_{max} = \alpha_r h_c e^{-\frac{B}{2} \beta_r^2} \quad (6.7)$$

³ Při zvýšení B je potřeba vyšší rychlost pro stejné množství energie.

⁴ Tento člen se při návrhu disku s konstantním napětím bez obruby neuplatní.

6.2.2 Rozměry a design setrvačné hmoty

Pro navrhovaný setrvačník byly použity následující vstupní parametry:

$$h_c = 120 \text{ mm}$$

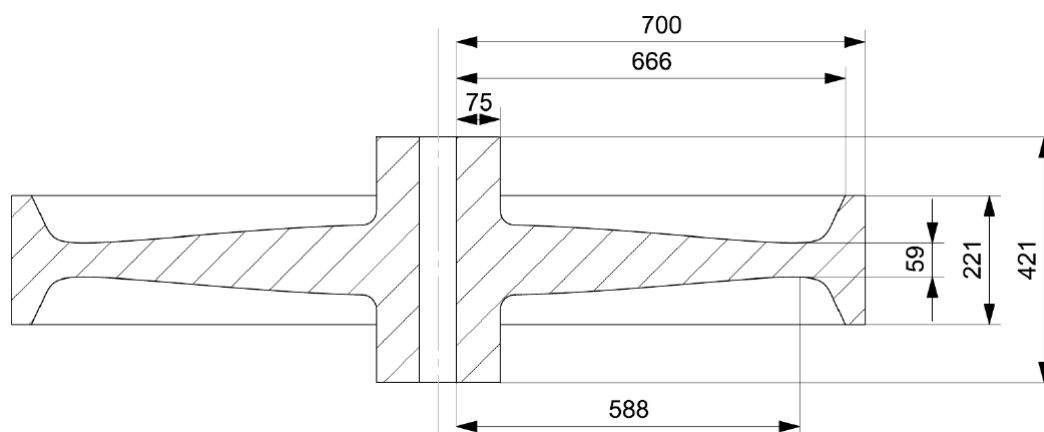
$$r_0 = 700 \text{ mm}$$

$$a_r = 0,02$$

$$\alpha_r = 6$$

$$B = 2,8$$

Řez diskem setrvačníku s konstantním napětím s obrubou a unašечem, navrženým dle daných vstupních parametrů, je uveden na obrázku 6.2.



Obrázek 6.2: Řez diskem setrvačníku dle definovaných kritérií

Jako vhodný materiál byla vybrána ocel 42CrMo4. Geometrii setrvačníku pak odpovídá hmotnost 1245 kg a hmotnostní moment setrvačnosti⁵ 324,5 kg m². Na průchozí hřídel setrvačníku budou po obou stranách umístěny elementy pro AMB ložiska, včetně senzorů pro měření radiálního posunu hřídele. Specifická hmotnostní hustota energie samotného disku setrvačníku je 4 kWh kg⁻¹. Po přičtení hmotnosti motor–generátoru, ochranného kontejneru a ostatních komponent FESS bude výsledná hmotnostní hustota energie méně než poloviční.

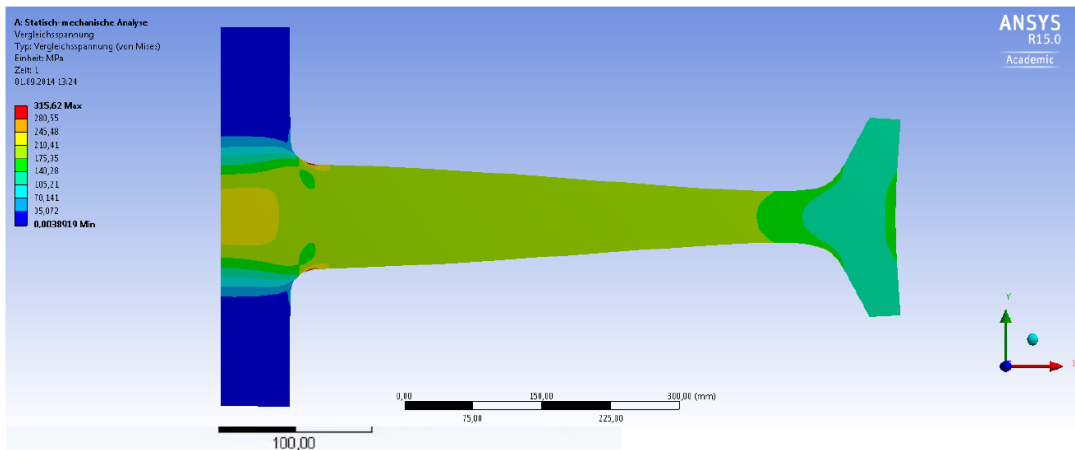
6.2.3 Pevnostní analýza setrvačné hmoty

Pro setrvačník z obrázku 6.2 byl v softwaru ANSYS vytvořen osově souměrný model a následně provedena pevnostní analýza při maximální rychlosti otáčení 3600 ot. min⁻¹. Výsledky analýzy jsou graficky interpretovány na obr. 6.3 a 6.4.

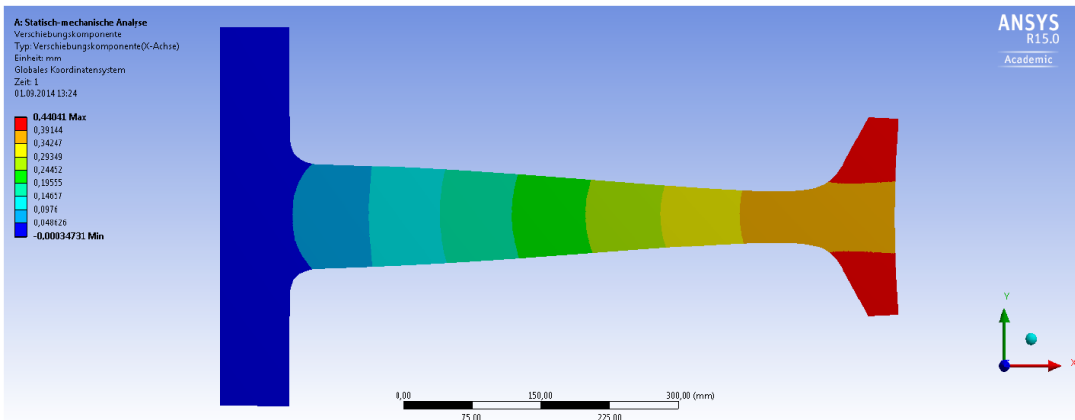
⁵ K této hodnotě se dále přičítá moment setrvačnosti rotoru motor–generátoru.

Meshování bylo provedeno pro maximální velikost prvku 1 mm. Zatížení bylo vztaženo k ose symetrie při otáčkách $3600 \text{ ot. min}^{-1}$.

Výsledné napětí je znázorněno na obrázku 6.3. Napětí dosáhne maximální hodnoty 316 MPa v místě přechodu disku s unašečem. Dovolené namáhání u oceli 42CrMo4 se pohybuje v rozsahu 500–1000 MPa. Vypočtené napětí tak může být označeno jako podkritické. V případě potřeby lze napětí v místě přechodu unašeče a disku dále snížit optimalizací tvaru zaoblění v místě přechodu.



Obrázek 6.3: ANSYS model – porovnání napětí (von Mises)



Obrázek 6.4: ANSYS model – posunutí

Deformace, které patří k rozloženému napětí z obrázku 6.3, jsou zobrazeny na obrázku 6.4. K maximálnímu posunutí dojde na obrubě a toto činí asi 440 μm . Během operace se mohou očekávat rozšíření poloměru do 1 mm.

Pevnostní analýza v ANSYSu ukázala, že pro navržený setrvačnick je možné z hlediska pevnosti uvažovat o fyzické realizaci.

6.3 Projektování motor-generátoru setrvačníku

Hlavním cílem projektování jednotky motor–generátoru, bylo navrhnout takový točivý stroj s měničem, který lze připojit přímo do vlastního trolejového vedení bez nutnosti využít přizpůsobujícího DC–DC měniče.

6.3.1 Volba elektrického stroje

Obecně lze využít jakýkoliv princip točivého stroje s měničem. Vzhledem k předpokládanému režimu činnosti motor–generátoru FESS jsou některé principy strojů technologicky nevhodné. Mezi ně se řadí např. všechny typy kartáčových strojů kvůli nárokům na jejich údržbu. Nicméně i některé bezkartáčové principy točivých strojů byly donedávna problematické. Jednalo se především o reluktanční stroje kvůli dlouhodobě, ne zcela uspokojivě, vyřešenému problému momentových pulsací⁶. V konkrétních aplikacích jsou dnes využívány PMSM, SepExSM a ACIM stroje s frekvenčními měniči s vektorovým řízením točivého momentu.

6.3.2 Konzultace s výrobcem pohonů

Problematiku výběru vhodného pohonu pro setrvačnick jsem konzultoval s renomovaným výrobcem pohonů, společností Siemens Electric Machines Drásov s.r.o., kterou zastupoval Dr. Ing. Jan Podrapský. Diskutována byla optimální řešení stroje pro základní energetické požadavky vzešlé z vyhodnocení získaných dat. Zejména pak tyto body:

Typ točivého stroje, provoz v režimu odbuzování, napájecí napětí jednotky motor–generátoru s měničem, výkon stroje při minimálních provozních otáčkách $1800 \text{ ot. min}^{-1}$, provoz stroje v režimu přetěžování, možnosti chlazení stroje, ztráty stroje naprázdno (stav, kdy strojem točí setrvačnick) a účinnost jednotky motor–generátoru s měničem dle předpokládaného pracovního cyklu FESS.

Z výše uvedeného rozboru je zřejmé, že na motor–generátor FESS jsou kladeny tak specifické požadavky, že pokud má pracovat s maximální účinností a zároveň pokrýt veškeré výkonové i technologické požadavky, je obvykle jediným řešením vyvinout speciální točivý stroj. Katalogové pohony pro tuto aplikaci nabízejí příliš mnoho omezení. Přesto je ale možné vycházet z vhodně zvoleného katalogového stroje, zejména pak z jeho momentové charakteristiky. Pro řešenou aplikaci setrvačnicku DPMLJ jsou využita data 990 kW katalogového ACIM Siemens (katalog D81.1), výchozí typ: **1LL8407-2PD**.

⁶ Momentové pulsace u FESS kladou zvýšené nároky na kvalitu a dynamiku řízení uložení v AMB.

7 Závěr

V této disertační práci jsou shrnuty současné trendy z oblasti optimálního řízení pohonů a aplikaci moderních energetických úložišť v městské trolejové trakci. Tyto jsou ověřovány v experimentálním elektromobilu a v podobě návrhu stacionární aplikace energetického úložiště na bázi setrvačnicku pro tramvajový provoz v Liberci.

Mezi hlavní přínosy disertační práce v oblasti elektromobility patří realizace nového prototypu hnacího ústrojí a trakční baterie elektromobilu TUL.

- Práce obsahuje návrh jednorychlostní převodovky, jednotek střídavých elektromotorů s měniči a návrh řídicí jednotky s popisem činnosti algoritmu řízení.
- Byla provedena měření momentových charakteristik a pasivních odporů jednotek.
- Praktické ověření vlastností realizovaného prototypu hnacího ústrojí se nepodařilo v plném rozsahu kvůli nedodržení plánovaného termínu zprovoznění měřicího zařízení v laboratoři Powertrain 4×4 a laboratoři válcové brzdy TUL. Provedení první série ověřovacích testů je v plánu provést do konce roku 2015.
- Baterie byla navržena s ohledem na optimální využití instalačního prostoru ve voze při maximalizaci vezené energie. Návrh uložení respektuje požadavek na rychlou servisní výměnu celé baterie. Navržená modulární koncepce umožňuje produktivní montáž a servis jednotlivých komponent. Specifická hustota energie baterie je plně srovnatelná s masově produkoványými elektromobily do modelového roku 2015.
- Baterie je dimenzována na pokrytí špičkového mechanického výkonu navrženého prototypu hnacího ústrojí o velikosti 85 kW. K tomuto účelu byl navržen hybridní termální management skládající se z materiálu se změnou fáze – PCM, doplněný o systém roznášecích plechů pro rychlý odvod ztrátového tepla, resp. rychlé natemperování článků baterie pro optimalizaci maximálního výkonu baterie s ohledem na její životnost. Vlastní přívod/odvod tepla z/do bateriové krabice je řešen pomocí tepelného výměníku, využívajícího médium náplně klimatizace.

Nejvíce si cením mezinárodní spolupráce v česko–saském projektu Ziel3. V rámci spolupráce jsem měl možnost podílet se na vypracování podrobné studie: *Vývoj komponent a metod vedoucí ke zlepšení energetické účinnosti trakce z hlediska využití energetického setrvačnicku*. Tento projekt byl úspěšně zakončen a v současné době se připravuje další přeshraniční spolupráce v této oblasti.

Literatura

- [1] EHSANI, Mehrdad, Yimin GAO a Ali EMADI. Configurations of EVs in: *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, c2010, xxii, 534 p. Power electronics and applications series. ISBN 14-200-5398-1.
- [2] FELDEN, Matthias, Patrick BUTTERLING, Peter JECK, Lutz ECKSTEIN a Kay HAMEYER. Electric vehicle drive trains: From the specification sheet to the drive-train concept. In: *Proceedings of 14th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2010*. IEEE, 2010, -. DOI: 10.1109/EPEPEMC.2010.5606531. ISBN 978-1-4244-7856-9.
- [3] REN, Q., D.A. CROLLA a A. MORRIS. Effect of transmission design on Electric Vehicle (EV) performance. In: *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. IEEE, 2009, s. 1260-1265. DOI: 10.1109/VPPC.2009.5289707. ISBN 978-1-4244-2600-3.
- [4] ADVISOR: Advanced vehicle simulator. NREL. *Transportation Research: Vehicle Technology Simulation and Analysis Tools*, 2004
- [5] JAZAR, Reza N. *Vehicle dynamics: theory and application*. 1st ed. New York: Springer, 2008, p. cm. ISBN 978-038-7742-441.
- [6] VLK, František. *Dynamika motorových vozidel*. Vyd. 2. Brno: nakladatelství a vydavatelství, 2006, 432 s. ISBN 80-239-0024-2.
- [7] MIROSLAV VALA, Miroslav Tesař. *Teorie a konstrukce silničních vozidel I*. Vyd. 1. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2003. ISBN 978-807-1945-031.
- [8] TOMSA, Jan. *Elektrická zařízení elektromobilu eTUL*. Liberec, 2014. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií, Ústav mechatroniky a technické informatiky
- [9] Břoušek, Josef. *Převodovka elektromobilu*. Liberec, 2014. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra vozidel a motorů.
- [10] SAFT SA. *Medium power lithium-ion cells: VL 41 M cells*. Francie, 2006. Dostupné také z: www.saftbatteries.com

- [11] AllCell Technologies, LLC. *PCC Thermal Management Material*. Chicago, USA, 2014. Dostupné také z: http://www.allcelltech.com/images/datasheets/pcc/AllCell_PCC.pdf
- [12] MAXWELL TECHNOLOGIES INC. *125V Heavy Transportation Module: Datasheet* [online]. 2014 [cit. 2015-08-12]. Dostupné z: http://www.maxwell.com/images/documents/125vmodule_ds_1014696-7.pdf
- [13] PORTNOV, G., et al. *Informes Técnicos Ciemat 1031: Flywheels for Low-Speed Kinetic Energy Storages Systems*. CIEMAT, 2003. ISSN 1135-9420.
- [14] GENTA, Giancarlo. Some considerations on the constant stress disc profile. In: *Meccanica*. 1989, s. 235-248. DOI: 10.1007/BF01556455. ISSN 0025-6455. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/BF01556455>

Autorovy publikace

- [1] JANDURA, Pavel. Přehled aktuálně dostupných specializovaných obvodů použitelných pro řízení frekvenčních měničů a střídačů. In: *EPVE .: elektrické pohony a výkonová elektronika : sborník příspěvků z celostátní konference*. [CDROM] Brno: FEL, VUT, 2009. ISBN 978-80-214-3974-0.
- [2] JANDURA, Pavel. *Přehled a vlastnosti současných akumulátorů používaných v elektromobilech* [online]. 2010 [cit. 2015-06-23]. Dostupné z: http://skfm2010.tul.cz/postery/Jandura_Pavel.pdf
- [3] JANDURA, Pavel a Martin BUKVIC. Koncept elektromobilu eŠus. In: *XXXIII. celostátní konference o elektrických pohonech*. Plzeň: Česká elektrotechnická společnost ÚOS Elektrické pohony, 2013, s. 40-43. ISBN 978-80-02-02457.
- [4] JANDURA, Pavel a Martin BUKVIC. Lightweight Battery Electric Vehicle for Educational Purposes. In: *Applied Mechanics and Materials*. Switzerland: Trans Tech Publications Inc., 2013, s. 281-285. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.390.281. ISSN 1662-7482. Dostupné z: <http://www.scientific.net/AMM.390.281>
- [5] JANDURA, Pavel a Jiří KUBÍN. Simulace dynamiky jízdy a spotřeby energie elektromobilu eŠus. In: *Mezinárodní konference učitelů elektrotechniky SEKEL 2013, sborník příspěvků z konference*. Pardubice: Tiskařské středisko a vydavatelství Univerzity Pardubice, 2013, s. 41-46. ISBN 978-80-7395-625-7.
- [6] JANDURA, Pavel. Simulace rekuperace energie tramvaje pro danou trať. In: *VLIII. mezinárodní seminář Katedry elektrotechniky VŠB-TU Ostrava*. Ostrava, 2014, s. 9-11. ISBN 978-80-248-3432-0.

- [7] JANDURA, Pavel a Jiří KUBÍN. Energetická úložiště na bázi setrvačnicku pro městskou tramvajovou trať. In: *IL. mezinárodní seminář Katedry elektrotechniky VŠB-TU Ostrava*. Ostrava, 2015, s. 43-47. ISBN 978-80-248-3757-4.
- [8] JANDURA, Pavel. Moderní úložiště energie pro elektrickou trakci. In: *Moderní trakční pohony: sborník semináře Katedry elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě*. [CDROM]. Pardubice: Dopravní fakulta Jana Pernera, UPCE, 2015. ISBN 978-80-7395-893-0.
- [9] JANDURA, Pavel. Technická univerzita v Liberci. *Design of Motor-Generator for Flywheel Energy Storage System: project meeting presentation*. Liberec, 2014.
- [10] JANDURA, Pavel, Josef ČERNOHORSKÝ a Aleš RICHTER. Using a Flywheel Energy Storage System For DC City Railway. In: *Automatizácia a riadenie v teórii a praxi : ARTEP 2015*. Košice : TU, 2015, s. 44–1–44–7. ISBN 978-80-553-1968-1.
- [11] JANDURA, Pavel, Josef BŘOUŠEK a Martin BUKVIC. The Concept of a Highly Efficient Powertrain for an Electric Vehicle with Respect to Vehicle Driving Dynamics. In: *The 18th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics EDPE 2015: The 7th Joint Slovak-Croatian Conference*. Tatranská Lomnica, 2015. s. 422-429. ISBN 978-1-4673-7376-0.

Výzkumné zprávy a funkční vzorky

- [12] NEUMANN, Holger, Sebastian REINICKE, Osvald MODRLÁK, Aleš RICHTER, Jiří KUBÍN, Tomáš NÁHLOVSKÝ, Pavel JANDURA, Filip TREŠL, Lukáš HUBKA, et al. *Vývoj komponent a metod vedoucí ke zlepšení energetické účinnosti trakce z hlediska využití energetického setrvačnicku – závěrečná zpráva*. Technická univerzita v Liberci–Hochschule Zittau/Görlitz, 2014, 113 s.
- [13] ČERNOHORSKÝ, Josef, Pavel JANDURA, Jan KOPRNICKÝ a Petr MRÁZEK. *Studie proveditelnosti mobilního robotu v prostorách přádelny – výzkumná zpráva*. Liberec: Ústav pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace, 2015
- [14] JANDURA, Pavel a Martin BUKVIC. *Elektromobil eŠus : Funkční vzorek*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2013
- [15] JANDURA, Pavel a Martin BUKVIC. *Trakční baterie elektromobilu : Funkční vzorek*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015
- [16] JANDURA, Pavel, Josef BŘOUŠEK a Martin BUKVIC. *Hnací ústrojí elektromobilu se dvěma střídavými pohony : Funkční vzorek*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015

Ing. Pavel Jandura

**Současné trendy optimálního řízení pohonů
a energetických úložišť v elektromobilech
a městské trakci**

Autoreferát disertační práce

Technická univerzita v Liberci
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

47 stran
Náklad: 20 výtisků

říjen 2015