

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

**ELEKTRONICKÁ OPTIMALIZACE
JÍZDY KOLEJOVÉHO VOZIDLA
S NEZÁVISLE OTÁČIVÝMI KOLY**

DISERTAČNÍ PRÁCE

2015

Ing. Václav Lenoč

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

KATEDRA ELEKTROTECHNIKY, ELEKTRONIKY
A ZABEZPEČOVACÍ TECHNIKY V DOPRAVĚ

ELEKTRONICKÁ OPTIMALIZACE
JÍZDY KOLEJOVÉHO VOZIDLA
S NEZÁVISLE OTÁČIVÝMI KOLY

DISERTAČNÍ PRÁCE

AUTOR: **Ing. Václav Lenoč**

ŠKOLITEL: **prof. Ing. Jaroslav Novák, CSc.**

2015

UNIVERSITY OF PARDUBICE
JAN PERNER TRANSPORT FACULTY

**DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING AND SIGNALLING IN TRANSPORT**

**OPTIMIZATION OF ELECTRONIC
RAIL VEHICLE WITH INDEPENDENT
ROTATING WHEELS**

DOCTORAL DISSERTATION

AUTHOR: **Ing. Václav Lenoč**

SUPERVISOR: **prof. Ing. Jaroslav Novák, CSc.**

2015

Prohlášení autora

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 14. 1. 2015

Ing. Václav Lenoč

Poděkování

Rád bych poděkoval svému školiteli panu prof. Ing. Jaroslavu Novákovi, CSc. za vznik tohoto zajímavého projektu, rady, pomoc a věcné připomínky v průběhu zpracování této práce, ale také za celkovou podporu během doktorského studia. Dále poděkování patří Ing. Janu Čapkovi, Ph.D. z firmy VÚKV a.s. za předání poznatků z oblasti vedení kolejového podvozku v kolejové dráze a spolupráci.

V neposlední řadě patří můj dík všem, kteří mě během studia podpořili a vytvořili vhodné podmínky pro napsání disertační práce a také děkuji rodině a přítelkyni.

V Pardubicích dne 14. 1. 2015

Ing. Václav Lench

ANOTACE

Disertační práce popisuje problematiku řízení a chování kolejového vozidla s nezávisle otáčivými koly zejména se zaměřením na chodové vlastnosti tramvaje 15T. Jsou zde popsány rozdíly mezi chováním dvojkolí a nezávisle otáčivými koly a metody optimalizace jízdy vozidla s nezávisle otáčivými koly. Dále je popsán postup výzkumu, vývoje, implementace a ověřování metody optimalizace pomocí experimentálního kolejového vozidla a sledované a měřené veličiny během experimentálního ověřování, včetně dosažených výsledků. Je řešen způsob rozpoznání polohy podvozku v kolejové dráze a její využití pro algoritmus optimalizace řízení. Cílem optimalizace řízení je snížení opotřebení v kontaktu kolo-kolejnice a zvýšení bezpečnosti proti vykolejení. Závěr je věnován porovnání výsledků zkoušek a měření na experimentálním vozidle s měřením na tramvaji 15T, která disponuje volně otáčivými koly.

KLÍČOVÁ SLOVA

Trakční pohon, PMSM, kolejové vozidlo, nezávisle otáčivá kola, individuální elektrický pohon, experimentální kolejové vozidlo, optimalizace řízení.

ABSTRACT

The dissertation describes the problem of conducting and behavior of the rail vehicles with independently rotary wheels with a focus on the course properties trams 15T. There are described differences between the behavior wheel sets and freely rotary wheels and methods of drive optimization of vehicles with independently rotary wheels. The following describes it is about procedure for verifying optimization methods using experimental rail vehicle, observed and measured variables during experimental testing, including the results achieved. There is also solved the way of chassis position in rail track and its using for algorithm optimization procedure. The aim of the optimization control is to reduce wear on the wheel-rail contact and increase the safety against derailment. The conclusion is devoted to the comparing of measurements on a tram 15T, which has a freely rotary wheels.

KEYWORDS

Traction drive, PMSM, rail vehicle, independent rotated wheels, individual electric drive, experimental rail vehicle, management optimization.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ.....	8
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	11
1 CÍLE PRÁCE.....	12
1.1 STRUKTURA PRÁCE.....	13
2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	15
2.1 OBECNĚ	15
2.2 DVOJKOLÍ A NEZÁVISLE OTÁČIVÁ KOLA	15
2.2.1 Jízda v přímé trati	15
2.2.2 Jízda v oblouku	17
2.3 SOUČASNÝ STAV ŘÍZENÍ TRAMVAJE 15T.....	19
2.3.1 Popis trakčního pohonu se synchronními motory s permanentními magnety	19
2.3.2 Způsob řízení pohonu	20
2.3.3 Experimenty s řízením pohonu	21
2.4 SIMULACE A NÁVRHY OPTIMALIZACE ŘÍZENÍ.....	22
2.4.1 Metody pro optimalizaci jízdy vozidla s nezávisle otáčivými koly.....	22
2.4.2 Velikost přídatného momentu.....	23
2.4.3 Varianta řízení 1.....	24
2.4.4 Varianta řízení 2.....	25
2.4.5 Simulace jízdy v přímé trati za reálných podmínek	29
2.4.6 Simulace jízdy v oblouku	31
2.4.7 Shrnutí.....	32
3 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ.....	33
3.1 SIMULACE POHONU	33
3.2 VÝZKUMNÁ ČÁST NA EXPERIMENTÁLNÍM KOLEJOVÉM VOZIDLE.....	33
3.2.1 Mechanická konstrukce vozidla.....	34
3.2.2 Elektrická výzbroj vozidla	36
3.3 TESTY V REÁLNÝCH PODMÍNKÁCH NA TRAMVAJI 15T	44
4 POPIS IMPLEMENTACE ALGORITMU REGULACE V NADŘAZENÉM ŘÍZENÍ EXPERIMENTÁLNÍHO VOZIDLA	45
4.1 NADŘAZENÝ REGULÁTOR	45
4.2 OVLÁDÁNÍ A MONITOROVÁNÍ POMOCÍ PC	46
4.3 INTERFEJS	47
4.4 CHYBOVÉ STAVY REGULÁTORU	49
4.5 MĚŘENÍ ÚHLOVÉ RYCHLOSTI	49
4.6 TCP KOMUNIKACE.....	55
4.6.1 Komunikační protokol VÚKV a.s.	55

4.7	ZADÁVÁNÍ MOMENTU	57
4.7.1	Blokace pulzů	57
4.7.2	Načtení vstupu	57
4.8	OMEZOVAČ DOSTUPNÉHO MOMENTU	57
4.9	RAMPA.....	58
4.10	OMEZOVAČ RYCHLOSTI	58
4.11	ZPŮSOB VÝPOČTU PŘÍDAVNÉHO MOMENTU.....	59
4.12	PŘÍČTENÍ PŘÍDAVNÉHO MOMENTU	60
4.12.1	Ovlivnění energetické náročnosti	61
4.13	PROTISKLUZOVÁ OCHRANA	62
4.14	AUTOMATICKÉ PŘEPÍNÁNÍ VÝPOČTU PŘÍDAVNÉHO MOMENTU	64
5	POPIS MĚŘENÍ NA EXPERIMENTÁLNÍM VOZIDLE	67
5.1	ZAPOJENÍ MĚŘÍCÍHO APARÁTU	67
5.2	SENZORICKÁ ČÁST	68
5.2.1	Měření silových účinků - tenzometry	71
5.3	POSTUP EXPERIMENTÁLNÍCH JÍZD	73
5.3.1	Měření vlivu optimalizovaného řízení v oblouku.....	75
5.3.2	Měření vlivu optimalizovaného řízení v přímé trati	76
5.3.3	Měření vlivu optimalizovaného řízení s automatickou detekcí oblouk/přímá trať 77	
5.3.4	Vliv parametrů optimalizovaného řízení na spotřebu trakční energie	77
6	VÝSLEDKY MĚŘENÍ NA EXPERIMENTÁLNÍM KOLEJOVÉM VOZIDLE ...	78
6.1	VÝSLEDKY MĚŘENÍ INDIKOVANÉ NADŘAZENÝM ŘÍDICÍM SYSTÉMEM	78
6.1.1	Ověření indikace oblouku pomocí regulační odchylky u koeficientu c_3	78
6.1.2	Ověření indikace příčné polohy podvozku pomocí regulační odchylky u koeficientu c_1	79
6.1.3	Vliv přídatného momentu v přímé trati	80
6.1.4	Vliv přídatného momentu v oblouku	82
6.1.5	Automatické přepínání algoritmů	83
6.2	VÝSLEDKY MĚŘENÍ INDIKOVANÉ SENZORY MECHANICKÝCH VELIČIN	85
6.3	VÝSLEDKY VLIVU SYNCHRONIZOVANÉHO ŘÍZENÍ NA ODBĚR TRAKČNÍ ENERGIE	88
7	SROVNÁVACÍ MĚŘENÍ NA TRAMVAJI 15T.....	92
7.1	POPIS	92
7.2	VÝSLEDKY	95
7.3	VLIV OPTIMALIZOVANÉHO ŘÍZENÍ NA SPOTŘEBU TRAKČNÍ ENERGIE 15T.....	99
8	DOSAŽENÉ VÝSLEDKY A PŘÍNOS DISERTACE.....	102
	ZÁVĚR	106

SEZNAM OBRÁZKŮ	108
SEZNAM TABULEK.....	112
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	113
SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA	116

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

$2S$	vzdálenost styčných kružnic
aq	nedostatek převýšení [mm]
$ay_1^+, ay_2^+, ay_3^+, az_3^+$	zrychlení na rámu podvozku [m/s^2]
ay_i	příčné zrychlení na nápravnicích [m/s^2]
az_{11}	svislé zrychlení na čepu kola [m/s^2]
c_1	koeficient příčné polohy podvozku v kolejové dráze
c_2	koeficient vzpříčené polohy podvozku v kolejové dráze
c_3	koeficient integrační konstanty pro těživou polohu podvozku v kolejové dráze
C_D	konstanta pro výpočet přídavného momentu
dy_{nl}	příčná poloha kol v koleji [mm]
f	frekvence [Hz]
F_f	magnetický tok permanentních magnetů [Wb]
F_d a F_q	spřažený magnetický tok statoru v ose d a q [Wb]
I_c	Continue Collector Current [A]
i_d a i_q	složky statorového proudu [A]
$I_{outPEAK}$	Output peak current (Výstupní špičkový proud) [A]
J	moment setrvačnosti [$kg \cdot cm^2$]
k_E	napět'ová konstanta [$V/1000 \text{ min}^{-1}$]
L_d a L_q	indukčnost statoru v ose d a q [H]
L_f	indukčnost fáze statorového vinutí motoru [H]
M	moment motoru [Nm]
$M_{11}, M_{12}, M_{22}, M_{12}$	– hnací moment [Nm]
M_i	moment na jednom kole [Nm]
$M_{\text{Ř}}$	hodnota momentu dána polohou voliče [Nm]

M_Z	moment kolem svislé osy (na jednu nápravnici) [Nm]
ΔM	rozdílný moment pro pravé a levé kolo s navzájem opačnými znaménky [Nm]
p_p	počet pólpárů stroje
q	kvantovací krok
Q	kolový tlak [N]
$Q_{11}, Q_{12}, Q_{22}, Q_{12}$	kolový tlak [kN]
r_L a r_R	poloměry kol – valivé kružnice [m]
R_f	odpor fáze statorového vinutí [Ω]
R_s	odpor statorového vinutí [Wb]
R_o	poloměr oblouků [m]
r_{voz}	poloměr kola [m]
s	polovina vzdálenost styčných kružnic [m]
T	tangenciální síla [N]
t_1	počátek oblouku [s]
t_2	konec oblouku [s]
t_w	velikost časového okna pro výpočet rychlosti [s]
T_{cs}	trvalý klidový moment [Nm]
T_{cr}	trvalý moment při jmenovitých otáčkách [Nm]
T_{ps}	maximální moment po dobu 5 s [Nm]
u_d a u_q	složky svorkového napětí [V]
v	rychlost vozidla [m/s]
v_A a v_B	valivé rychlost [m/s]
v_{AO} a v_{BO}	dopředné rychlosti bodů A, B [m/s]
V_{CE}	Collector emitter voltage sense across [V]
V_{CED}	Collector – Emitter Breakdown Voltige [V]
Y	příčné vodící síly na kole [kN]

$Y_{11}, Y_{12}, Y_{22}, Y_{12}$ – vodící síly v kontaktu kolo-kolejnice [kN] – značí příslušné kolo

α	úhel natočení podvozku vůči rámu [°]
α_{n1}	úhel náběhu první nápravnice [°]
γ	kuželovitost kola [°]
λ	délka vlny vlnícího pohybu dvojkolí [m]
μ	součinitel adheze
ω	úhlová rychlost [rad/s]
Ω	úhlová rychlost kolem svislé osy [rad/s]
ω_{11}	úhlová rychlost pravého předního kola [rad/s]
ω_{12}	úhlová rychlost levého předního kola [rad/s]
ω_{22}	úhlová rychlost levého zadního [rad/s]
ω_{21}	úhlová rychlost pravého zadního kola [rad/s]
ω_k	max. momentové přetížení do otáček [rad/s]
ω_m	mechanická úhlová rychlost rotoru [rad/s]
ω_r	jmenovité otáčky motoru [rad/s]
ω_{max}	maximální otáčky

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

cRIO	(CompactRIO Systém) real-time průmyslový regulátor
DD	varianta podvozku s dvojkolím
DFJP	Dopravní fakulta Jana Pernera
DN	varianta podvozku, kdy první dvojce kol je volně otáčivá a druhá dvojce je tvořena dvojkolím
DSP	(Digital Signal Processing) digitální signální procesor
FPGA	(Field Programmable Gate Array) programovatelné hradlové pole
HMI	(Human Machine Interface) uživatelské rozhraní
I/O	(In/Out) vstupy/výstupy
KEEZ	Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě
LabVIEW	(Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) Laboratorní virtuální nástroj inženýrství pracovní stůl
MM	varianta podvozku s nezávisle otáčivými koly s aktivním režimem optimalizace.
NN	varianta podvozku s nezávisle otáčivými koly
PMSM	(Permanent Magnet Synchronous Motor) synchronní motor s permanentními magnety
Real-Time	deterministické časování SW
TAČR	technologická agentura České republiky
VI	(Virtual Instrument) virtuální nástroj - soubory programu LabVIEW
VÚKV a.s.	Výzkumný ústav kolejových vozidel

1 CÍLE PRÁCE

Hlavním cílem prací byl výzkum, vývoj, implementace a odladění vhodných algoritmů optimalizovaného řízení individuálních pohonů nezávisle otáčivých kol v podvozku kolejového vozidla tak, aby se dosáhlo snížení vodících sil v kontaktu kolo-kolejnice, snížení opotřebení kol a kolejnic, snížení namáhání podvozku a zvýšení bezpečnosti proti vykolejení. Individuální pohon kol má svým technickým řešením potenciál k optimalizaci řízení pohonů, to již bylo prokázáno pomocí simulací. Cíl práce je rozdělen na jednotlivé dílčí cíle:

- Vyvinout metodu detekce polohy podvozku v kolejové dráze, bez nutnosti instalace dodatečných snímačů v souladu se stávajícím technickým provedením tramvaje 15T
 - Detekce vzpříčené polohy podvozku vůči kolejové dráze v oblouku
 - Detekce příčné polohy podvozku vůči kolejové dráze
- Výzkum vhodných algoritmů a jejich odladění pro snížení vodících sil při průjezdu obloukem prostřednictvím rozdílných momentů pohonů na levé a pravé straně podvozku. Výsledkem vhodného rozvážení je pokles vodících sil
- Výzkum vhodných algoritmů a jejich odladění pro eliminaci stavu, kdy při jízdě v přímé trati dochází za jistých podmínek u podvozku s nezávisle otáčivými koly k trvalému naléhání okolku ke kolejnici a tím i k nárůstu opotřebení nejen kola ale i kolejového svršku
- V návaznosti na předchozí cíle je nutné nalezení vhodné metody pro indikaci charakteru trati, která je zapotřebí pro přepínání mezi algoritmem pro přímou trať a oblouk bez použití nových senzorů s ohledem na konstrukci tramvaje 15T
- Výzkum vlivu algoritmu synchronizovaného řízení na velikost spotřeby trakční energie pro různé modifikace algoritmu řízení přidavného momentu

Práce byla zpracována ve vazbě na řešení projektu TAČR, Výzkum jízdních vlastností a řízení pohonů trakčních kolejových vozidel s nezávisle otáčivými koly TA01030391 [1], [2], [3].

Projekt TAČR TA01030391 se skládá ze čtyř etap výzkumu. Rozdělení je následující:

- Teoretické práce – popisují chování dvojkolí a individuálně poháněných kol v kolejové dráze – oblouk/přímá trať

- Výzkum pomocí simulačních modelů – simulace chování experimentálního kolejového vozidla na experimentální kolejové dráze, možnosti optimalizace řízení individuálně poháněných kol
- Experimentální výzkum na experimentálním kolejovém vozidle – výzkum algoritmů synchronizovaného řízení, testování a srovnání se simulačními výpočty
- Výzkum na tramvaji 15T – ověřování přínosu algoritmů testovaných na experimentálním kolejovém vozidle.

Cíle disertační práce navazují na úvodní etapy projektu, kde byla problematika řešena na teoretické úrovni a na simulační úrovni ve firmě VÚKV a.s. panem Ing. Janem Čapkem, Ph.D. Ten se již ve své disertační práci zabýval problematikou „Optimalizace jízdních vlastností nízkopodlažních tramvají“ [8]. [1], [2]

1.1 Struktura práce

Práce je rozdělena do 9 kapitol:

1. Cíle práce
2. Současný stav problematiky
3. Zvolené metody zpracování
4. Popis implementace algoritmů regulace v nadřazeném řízení experimentálního vozidla
5. Popis měření na experimentálním vozidle
6. Výsledky měření na experimentálním vozidle
7. Srovnávací měření na tramvaji 15T
8. Dosažené výsledky a přínosy disertace
9. Závěr

V kapitole 1 jsou vytyčeny cíle disertační práce.

Kapitola 2 obsahuje současný stav problematiky, popisuje chování dvojkolí s nezávisle otáčivých kol v kolejové dráze, při jízdě v přímé trati a oblouku, popis tramvaje ForCity 15T s nezávisle otáčivými koly a popis simulace včetně návrhu řízení.

V kapitole 3, je uvedena metoda zpracování výzkumu a její ověřování. Výzkum byl zahájen na poli teoretickém, přes simulace, ověření na experimentálním kolejovém vozidle až po samotné ověření na tramvaji 15T v ulicích města Prahy.

Kapitola 4 je jádrem této práce. Je zde popis výzkumu, vývoje a implementace algoritmu regulace na experimentálním kolejovém vozidle. Včetně popisů možností nastavení a provádění experimentů.

Kapitola 5 obsahuje popis a výčet komponent sensorové části použitých při výzkumu na experimentálním kolejovém vozidle. Jsou to jak měřiče silových účinků v podvozku experimentálního vozidla tak, i měřiče elektrických veličin logované pomocí nadřazeného řídicího systému vozidla.

Kapitola 6 obsahuje výsledky z měření na experimentálním kolejovém vozidle nejen ze strany silových účinků v podvozku, ale i z pozice energetické náročnosti příslušných algoritmů optimalizace individuálně poháněných kol.

Kapitola 7 obsahuje srovnání výsledků měření na tramvaji 15T s výsledky dosaženými při měření na experimentálním kolejovém vozidle.

V kapitole 8 jsou shrnuty dosažené výsledky a přínos disertace.

Kapitola 9 je závěr, zde jsou shrnuty a diskutovány dosažené výsledky a je navrhnut směr dalšího výzkumu.

2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

2.1 Obecně

Současný stav výzkumu problematiky nezávisle otáčivých kol kolejových vozidel lze rozdělit na následující oblasti: popis chodových vlastností individuálně poháněných kol a simulace chodových vlastností podvozku tramvaje 15T ForCity provedené Ing. Čapkem, Ph.D. z VÚKV a.s. Nejdůležitější oblastí této kapitoly jsou chodové vlastnosti dvojkolí a nezávisle otáčivých kol v kolejové dráze v přímé trati a oblouku. Dle teoretických znalostí chodových vlastností individuálně poháněných kol a znalostí z konstrukce tramvaje 15T byly provedeny simulace, na které práce navazuje [8].

2.2 Dvojkolí a nezávisle otáčivá kola

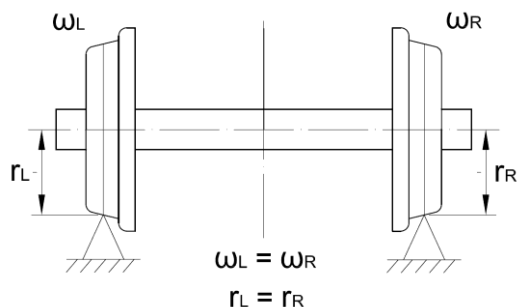
Mezi chováním podvozku s pevným dvojkolím a podvozku s nezávisle otáčivými koly je při jízdě v kolejové dráze značný rozdíl. Oproti pevnému dvojkolí není dvojice nezávisle otáčivých kol navzájem torzně spojena. Zatímco u dvojkolí se obě jeho kola vždy otáčejí shodnou úhlovou rychlostí, nezávisle otáčivá kola se mohou volně otáčet různou úhlovou rychlostí. Pokud jsou uvažována kola, na která nepůsobí vnější hnací moment a která zaujímají v koleji polohu s nulovým úhlem náběhu, odvalují se tato kola po kolejnicích bez podélného skluzu a tedy bez působení podélných skluzových sil [1], [8].

Kolejovou dráhu můžeme rozdělit z hlediska chování vozidla na dvě oblasti:

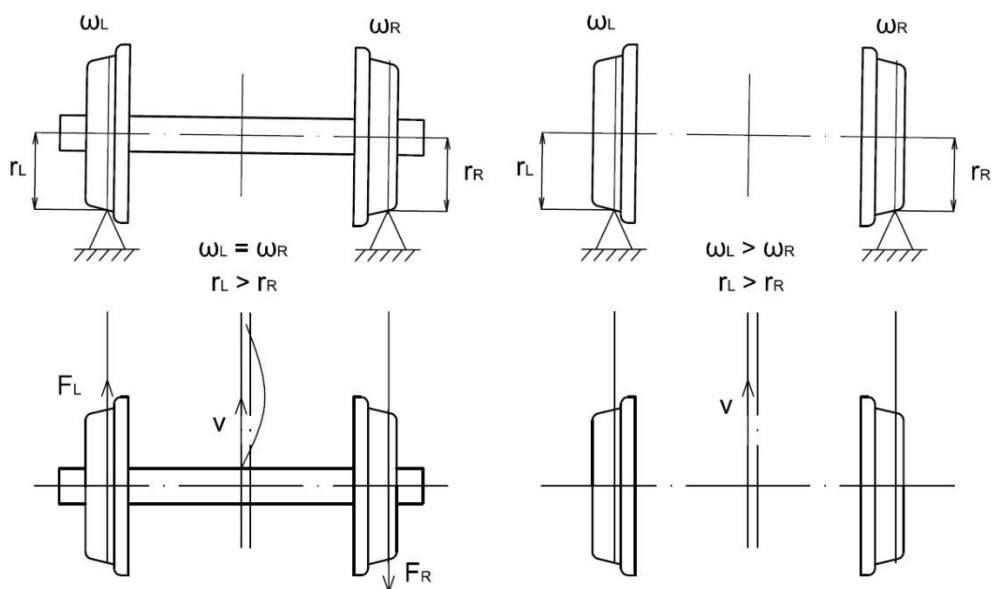
- Jízda v přímé trati
- Jízda v oblouku

2.2.1 Jízda v přímé trati

Na Obr. 2.1 je zobrazeno zjednodušené dvojkolí, kolejnice jsou nahrazeny jehlany a kolo kuželem. Při vystředění dvojkolí v kolejové dráze se poloměry styku kolo - kolejnice rovnají ($r_L = r_R$), tudíž i obvodové rychlosti se rovnají ($\omega_L = \omega_R$). V tomto případě se kolo odvaluje bez skluzů – na kola nepůsobí podélné skluzové síly. Zde není rozdíl mezi pevným dvojkolím a nezávisle otáčivými koly.


Obr. 2.1 – Dvojkolí v koleji – přímá trať

Na následujícím obrázku (Obr. 2.2) je zobrazeno chování dvojkolí (vlevo) a dvojice nezávisle otáčivých kol (vpravo) při příčném vychýlení v přímé trati. Z nákresu jsou znatelné rozdíly v chování. Při příčném posunutí dvojkolí je vlivem kuželového jízdního obrysu valivý poloměr levého a pravého kola rozdílný. Protože u dvojkolí se kola otáčejí shodnou úlovou rychlostí, dochází k podélným skluzům (F_L a F_R). Tyto podélné skluzové síly vytvářejí moment kolem svislé osy, ta nutí dvojkolí zaujmout polohu ve středu kolejové cesty. V případě absence tlumicích vazeb vykonává dvojkolí sinusový pohyb. U reálných vozidel dochází k zapojení tlumicích vazeb a tím se sinusový pohyb postupně utlumí. Teoretická délka vlny λ vychází z Klingelovy teorie (2.1), ta vychází pouze z kinematických poměrů.


Obr. 2.2 – Příčné posunutí dvojkolí (vlevo) a dvojice nezávisle otáčivých kol (vpravo) v přímé koleji

$$\lambda = 2\pi \sqrt{\frac{r \times s}{\gamma}} \quad (2.1)$$

Kde: λ – délka vlny pohybu dvojkolí [m]
 r – valivé poloměry kol [m]
 s – polovina vzdálenosti styčných kružnic [m]
 γ – kuželovitost kola [°]

V pravé polovině na Obr. 2.2 je zobrazeno chování nezávisle otáčivých kol, ta se mohou volně otáčet rozdílnou úhlovou rychlostí. Při jejich příčném vychýlení a rozdílných poloměrech otáčení levého a pravého kola se odvalují bez podélných skluzů [1]. Na dvojici nezávisle otáčivých kol nepůsobí žádné podélné skluzové síly, které by nutily dvojici kol zaujmout polohu v ose kolejové cesty.

2.2.2 Jízda v oblouku

Obrázek Obr. 2.3 zobrazuje dvojkolí pohybující se v oblouku. Rychlost na obvodu levého kola (A) a rychlost na obvodu pravého kola (B) jsou dány vztahem:

$$v_A = r_L \cdot \omega \quad (2.2)$$

$$v_B = r_R \cdot \omega \quad (2.3)$$

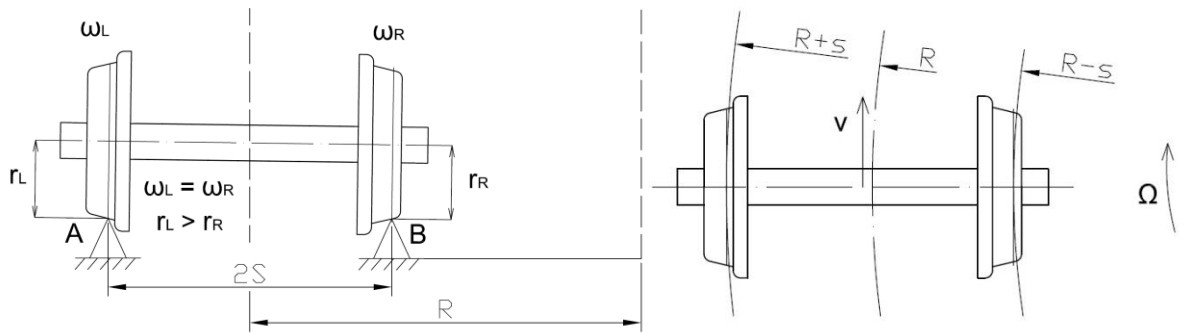
Kde: v_A a v_B – valivé rychlosti [m/s]
 r_L a r_R – valivé poloměry kol [m]
 ω – úhlová rychlost dvojkolí kolem své osy [rad/s]

Dopředné rychlosti bodů A a B na temeni kolejnice, vykonávající pohyb úhlovou rychlostí kolem svislé osy procházející středem projížděného oblouku, jsou dány vztahy [1]:

$$v_{AO} = \Omega \cdot (R + s) \quad (2.4)$$

$$v_{BO} = \Omega \cdot (R + s) \quad (2.5)$$

Kde: R – poloměr [m]
 s – polovina vzdálenosti styčných kružnic [m]
 Ω – úhlová rychlost kolem svislé osy [rad/s]



Obr. 2.3 – Příčný pohyb dvojkolí v oblouku [1]

V praxi při průjezdu dvojkolí obloukem mohou nastat následující stavy chování:

- 1) U dvojkolí dochází k čistému odvalování kol po kolejnicích bez podélných skluzů ($v_A = v_{AO}$, $v_B = v_{BO}$).

$$\frac{r_A}{r_B} = \frac{R+s}{R-s} \quad (2.6)$$

- 2) U dvojkolí dochází k podélným skluzům, síla působí na vnější kolo ve směru pohybu dvojkolí (na vnitřním kole je situace opačná) ($v_A > v_{AO}$, $v_B < v_{BO}$).

$$\frac{r_A}{r_B} > \frac{R+s}{R-s} \quad (2.7)$$

- 3) U dvojkolí dochází k podélným skluzům, síla působí na vnější kolo proti směru pohybu dvojkolí (na vnitřním kole je situace opačná) ($v_A < v_{AO}$, $v_B > v_{BO}$).

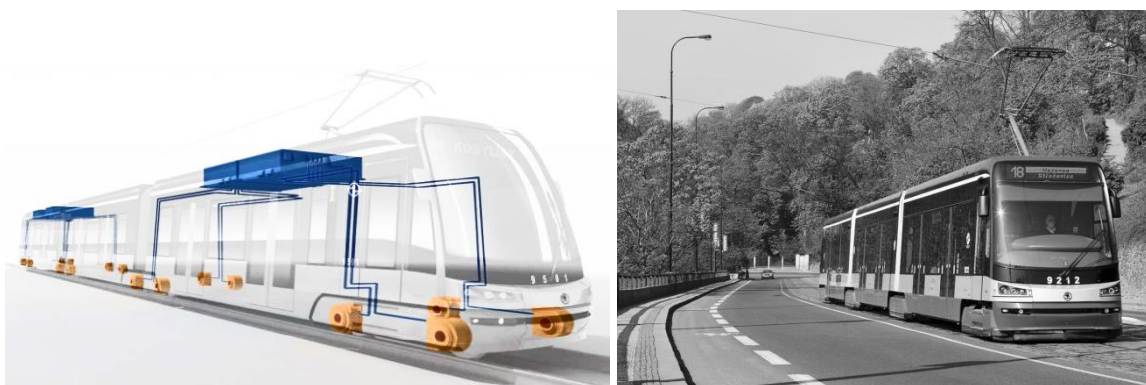
$$\frac{r_A}{r_B} < \frac{R+s}{R-s} \quad (2.8)$$

Kde: R – poloměr oblouku [m]
 s – polovina vzdálenost styčných kružnic [m]
 r_A, r_B – valivé poloměry kol [m]

O tom, která ze situací při průjezdu dvojkolí obloukem nastane, rozhoduje příčné posunutí dvojkolí v koleji. V případě nezávisle otáčivých kol nepůsobí podélné skluzové síly. Z provedených simulací ve firmě VÚKV a.s. vyplývá, že pro malé poloměry (cca 50 m) je opotřebení dvojkolí oproti nezávisle otáčivým kolům dvojnásobné.

2.3 Současný stav řízení tramvaje 15T

Tramvaj 15T, veřejnosti známá pod obchodním názvem ForCity, byla zkonstruována na základě technických požadavků Dopravního podniku hlavního města Prahy. Jedním z požadavků byla stoprocentně nízkopodlažní tramvaj. Verze pro Prahu je koncipovaná jako plně adhezní vozidlo, to znamená, že všechna kola jsou hnací. Tramvaj 15T ForCity pro Prahu je tedy vybavena 16 trakčními PMSM, které jsou naprosto individuálně řízeny viz. Obr. 2.4 [1]



Obr. 2.4 – Uspořádání trakce tramvaje 15T ForCity pro Prahu 0

Vozidlo je koncipováno jako tříčlánkové se čtyřmi otočnými podvozky, z toho dva vnitřní podvozky jsou typu Jakobiho. Takové koncepční řešení má příznivý vliv na adhezní tíhu vnějších podvozků. Na střeše se nachází čtyři trakční kontejnery, z nichž každý zabezpečuje napájení a zároveň chlazení čtyř trakčních motorů v podvozku. Při průjezdu obloukem jsou rozdílné otáčky kol levé a pravé strany vozidla. Pohon kola je přímý, tedy bez převodovky, což znamená malé otáčky motoru a pohon kola pouze přes spojku. Celý mechanický pohon je velmi tichý. Vozidlo nemá pevnou nápravu, ale jednotlivé polonápravy s individuálním řízením momentu každého kola.

2.3.1 Popis trakčního pohonu se synchronními motory s permanentními magnety

Tramvaj 15T představuje první aplikaci synchronních motorů s permanentními magnety od ŠKODY TRANSPORTATION, a.s.. Použitím synchronních motorů s permanentními magnety a absencí dvojkolí bylo možné realizovat 100 % nízkopodlažní vozidlo, při dosažení požadované trakční charakteristiky, která byla obsažena v zadání od objednavatele. [1]

Synchronní motor s permanentními magnety (PMSM) typu 1 HLU 3436 P/44-VA má výkon 47 kW a disponuje maximálním momentem 2270 Nm. Chlazení je realizováno pomocí kapaliny. Vzhledem k absenci převodového ústrojí jsou maximální otáčky motoru pouze 704 ot/min. Ložiskové jednotky jsou hybridní - s keramickými valivými elementy. Jedna ložisková jednotka je řešena jako sensorová. Obsahuje dva senzory - čidlo pro řízení motoru (čidlo polohy stator-rotor) a čidlo otáček pro mechanický brzdový systém. Snímač otáček disponuje 5632 pulzy na otáčku. [1], [3]

Další důležitou součástí trakčního pohonu, která zásadně ovlivňuje jízdní vlastnosti vozidla, je výkonová a řídicí elektronika, která zajišťuje řízení a napájení PMSM trakčních motorů. Každý z PMSM je napájen z individuálního IGBT střídače. Trakční kontejner je umístěn na střeše vozidla. [1]

Trakční kontejner, napájející PMSM jednoho podvozku, se skládá z jedné vstupní tlumivky, dvou stejnosměrných meziobvodů a čtyř nezávislých IGBT střídačů, které jsou řízeny dvěma mikroprocesorovými kartami (DSP). Toto zapojení umožňuje individuálně řídit pohony kol jak v jízdě, tak v brzdě. Z toho plyne, že každý trakční motor může mít individuální moment a otáčky.

Trakční kontejner také obsahuje:

- brzdový odporník, který je rozdělen na dvě shodné části
- pulzní měniče brzdového odporníku
- vstupní IGBT tranzistory
- kontaktní prvky
- blok chlazení pro trakční motory jednoho podvozku, ten obsahuje čerpadlo a výměník voda vzduch.

2.3.2 Způsob řízení pohonu

V současné době se řízení pohonu na tramvaji 15T provádí momentově. Z nadřazeného řídicího systému obdrží informaci o požadavku na moment trakční kontejner, respektive jednotlivé DSP. Žádost na moment je stejná, pouze na krajních podvozcích je omezena vzhledem k menší adhezní tíže. Moment může být korigován skluzovou ochranou.

Jedná se o individuální řízení PMSM pro jednotlivá kola. Pro plně adhezní vozidlo (15T pro Prahu) se využívá 16 PMSM, které jsou napájeny 16 trakčními střídači, které individuálně řídí trakční motory, tedy tažné síly jednotlivých kol. Výhodou jsou možnosti využití elektronického diferenciálu při průjezdu obloukem, individuální reakce na prokluz každého kola a velmi dobré jízdní vlastnosti vozidla.

Tramvaje 15T ForCity byly nasazeny do provozu v Praze a Rize, avšak bez algoritmů pro synchronizované řízení pohonů nezávisle otáčivých kol. [1], [2]

2.3.3 Experimenty s řízením pohonu

V oblasti chodových vlastností nezávisle otáčivých kol na tramvaji 15T bylo provedeno měření. Při instalaci kamer a monitorování bodu styku kolo-kolejnice, bylo zjištěno, že vozidlo s nezávisle otáčivými koly má tendenci k jednostrannému naléhání okolku k hlavě kolejnice. U nezávisle otáčivých kol byla zjištěna absence tzv. sinusování, která je známá u vozidel s klasickým dvojkolím. Takové to chování má nepříznivý vliv na opotřebení jak kola, tak i kolejové dráhy.

Na základě těchto skutečností byla snaha o eliminaci jednostranného nabíhání a to tzv. vnučeným sinusováním, jako k tomu dochází u klasického dvojkolí. Vnučené sinusování bylo vytvořeno rozvážením momentu mezi pohony na levé a pravé straně podvozku (viz. Příloha A). Moment měl konstantní amplitudu a frekvenci. Takováto metoda rozvážení kol má své omezení, je zapotřebí relativně velkého rozdílového momentu, aby jednotlivá kola podvozku realizovala tento sinusový pohyb a tím rovnoměrně zatěžovala plochu odvalovaného kola. Při maximálním momentu pohonu není možné tento princip využívat vzhledem k nedostatku momentu pro sinusování. Jisté problémy mohou nastávat při prokluzu kol, toto je závislé na okamžité přenášené síle v kontaktu kolo-kolejnice, tedy na okamžité velikosti momentu motoru. Je patrné, že vozidlo bude náchylnější k prokluzu i při menších tažných silách a bude mít horší využití adheze. Chování vozidla bylo opět ověřeno instalovanými kamerami. Software byl instalován pro dlouhodobé ověřování na pěti tramvajích 15T v Praze. Vyhodnocení bylo provedeno po absolvování cca 30 000 km. Závěrem experimentu bylo konstatováno, že není znatelný rozdíl mezi opotřebením kol tramvají s původním softwarem trakčního pohonu v porovnání s umělým vybuzením vlnivého sinusového pohybu nezávisle otáčivých kol. Tento závěr je překvapující, vzhledem ke skutečnosti, že kamery prokázaly, že při jízdě vozidla s nově

nainstalovaným software je vnučené sinusování pohybu pevné nápravy velmi blízké. Způsob vnučeného sinusování se dále nevyužívá. [1], [2]

2.4 Simulace a návrhy optimalizace řízení

Ve firmě VÚKV a.s. byl vytvořen simulační model jízdy vozidla s nezávisle otáčivými koly. Autorem simulačního modelu a návrhu algoritmu pro optimalizaci řízení je Ing. Jan Čápek, Ph.D. Ten se problematikou nezávisle otáčivých kol zabýval i ve své doktorské práci s názvem Optimalizace jízdních vlastností nízkopodlažních tramvají [8].

Následující podkapitoly obsahují návrh synchronizovaného řízení pohonu s nezávisle otáčivými koly a výsledky některých simulací.

2.4.1 Metody pro optimalizaci jízdy vozidla s nezávisle otáčivými koly

U vozidel s individuálním pohonem kol je možné vhodným řízením zlepšit jízdní vlastnosti v oblastech, ve kterých dochází ke značnému opotřebení profilů kolejnic a jízdních obrysů kol v porovnání s klasickým dvojkolím. Zároveň se jedná i o zvýšení bezpečnosti proti vykolejení a to snížením příčných vodících sil.

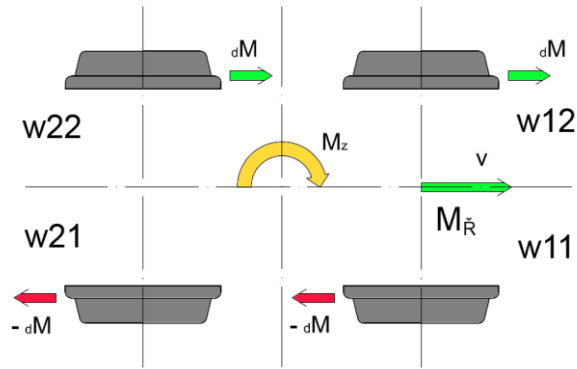
Celkový moment motoru individuálně poháněného kola je obecně při optimálním řízení dán vztahem:

$$M_i = M_{\bar{R}} \pm \Delta M \quad (2.9)$$

Kde: M_i – moment na jednom kole [Nm]

$M_{\bar{R}}$ – hodnota momentu dána polohou voliče (obsluhou) [Nm]

ΔM – přídatný moment (pravé a levé kolo s navzájem opačnými znaménky) [Nm]



Obr. 2.5 – Značení kol v podvozku a přídavný moment

Přídavný moment ΔM vytváří moment M_z viz. (2.10), který působí na dvojici kol kolem svislé osy. Z toho vychází, že řízením velikosti přídavného momentu ΔM můžeme docílit změny polohy volně otáčivých kol v příčném směru, tím i velikost příčných vodících sil působících na kolo a tedy i změny jízdních vlastností vozidla. Snížení příčných sil má pozitivní dopad na bezpečnost proti vykolejení. Rozvážením momentů můžeme dosáhnout sinusování i u vozidla s nezávisle otáčivými koly.

$$M_z = 2 \cdot \frac{\Delta M \cdot 4 \cdot s}{r_{voz}} \quad (2.10)$$

Kde: M_z – moment kolem svislé osy (na jednu nápravnici) [Nm]
 ΔM – přídavný moment (pravé a levé kolo s navzájem opačnými znamínky) [Nm]
 r_{voz} – poloměr kola [m]
 s – polovina vzdálenost styčných kružnic [m]

2.4.2 Velikost přídavného momentu

Při výpočtu velikosti přídavného momentu musí být zohledněno i to, že výsledný moment nesmí ovlivnit výslednou hnací sílu působící na vozidlo. Proto musí platit následující vztah:

$$\sum \Delta M_i = 0 \quad (2.11)$$

Ze vztahu (2.11) plyne i určité omezení použití optimalizace řízení. Při jízdě např. maximálním momentem je rezerva pro přídavný moment nulová. Spodní limit je závislý na variantě řízení, zda bude limitem nulový moment či bude limitem maximální brzda. Velikost potřebného přídavného momentu je také do značné míry ovlivněna adhezí.

Pro určování potřebného přídatného momentu bylo uvažováno s následujícími veličinami: otáčky kol, poloha na trati, poloměr oblouku, příčná poloha, zrychlení (v podélném a příčném směru).

Na základě rozdílného chování podvozku v oblouku a v přímé trati je nutné rozdělit algoritmus výpočtu přídatného momentu na dvě části. Tím je zajištěno adekvátní řízení pro danou polohu na trati. Ing. Jan Čapek, Ph.D., z firmy VÚKV a.s. uvedl dvě navrhovaná řešení řízení. Ta jsou v následujících kapitolách popsána.

2.4.3 Varianta řízení 1

První varianta řízení se zakládá na tzv. elektronické nápravě. Pomocí přídatného momentu ΔM_i vytváříme pevnou vazbu mezi protilehlými koly v podvozku. Snahou je vyrovnání otáček pravého a levého kola. Tím to předpokladem je dána závislost výpočtu přídatného momentu na přesné informaci o úhlové rychlosti kol. Výpočet přídatného momentu, pro jednotlivé dvojice kol je nezávislá. Dále je nutná indikace charakteru trati, zda se jedná o jízdu obloukem či přímou tratí.

Řízení s vazbou

Následující vzorce popisují variantu řízení s vazbou. Index úhlové rychlosti vychází ze značení dle Obr. 2.5. (první číslo indexu značí nápravu, druhé potom konkrétní kolo).

$$\text{Výchozí stav:} \quad \omega_{11} \neq \omega_{12}, \omega_{21} \neq \omega_{22} \quad (2.12)$$

$$\text{Požadovaný stav:} \quad \omega_{11} = \omega_{12}, \omega_{21} = \omega_{22} \quad (2.13)$$

$$\text{Dále platí:} \quad \Delta M_{11} = -\Delta M_{12} = \Delta M_1, \Delta M_{21} = -\Delta M_{22} = \Delta M_2 \quad (2.14)$$

$$\text{Obecně platí:} \quad \Delta M_1 \neq \Delta M_2 \quad (2.15)$$

Řízení bez vazby

Režim bez vazby umožňuje volné otáčení bez přídatného momentu. Matematické vyjádření (2.12) a (2.16).

$$\Delta M_{11} = \Delta M_{12} = \Delta M_{21} = -\Delta M_{22} = 0 \quad (2.16)$$

Výpočet přidavného momentu

K výpočtu přidavného momentu slouží vztah:

$$\Delta M_i = c_D \cdot (\omega_{i2} - \omega_{i1}) \quad (2.17)$$

Kde: i – přední kola ($i = 1$) a zadní kola ($i = 2$)

c_D – konstanta [Nm.s/rad]

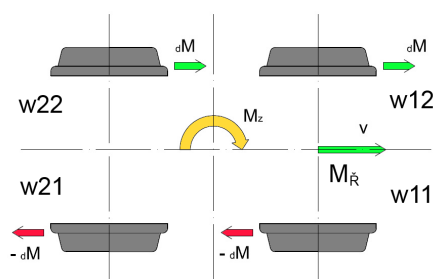
ω_{i1}, ω_{i2} – úhlová rychlost kol [rad/s]

Volba elektronické vazby je volena v závislosti na poloze vozidla, zda se nachází v přímé trati či oblouku. V přímé trati je řízení vykonáváno s elektronickou vazbou. Naproti tomu při průjezdu malým obloukem je voleno mezi režimem v návaznosti na znaménko rozdílu úhlové rychlosti kol $\Delta\omega$. Z toho plyne, že při průjezdu oblouku o malém poloměru jsou všechna kola řízena v režimu bez vazby. U větších poloměrů nastává situace, kdy první dvojice kol je řízena v režimu s vazbou a zadní bez vazby.

Přechod mezi řízením s vazbou a bez vazby je realizován v návaznosti na informaci o projížděném poloměru oblouku. Hodnota konstant poloměrů pro přechod řízení byla stanovena dle simulací na hodnotu 150 až 200 m. Pro daný režim není přesnost kritická. Není na závadu, pokud je oblouk o velkém poloměru detekován jako přímá trať.

2.4.4 Varianta řízení 2

Druhá varianta řízení individuálně poháněných kol pohlíží na podvozek jako na celek. Tato varianta řízení ve výpočtu přidavného momentu ΔM využívá informaci o rychlosti všech kol v podvozku.



Obr. 2.6 – Působení přidavného momentu ΔM a vytváření momentu M_z

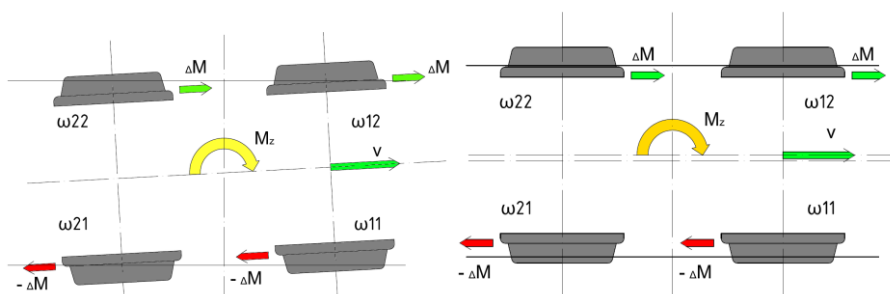
Moment působící na kolo vytváří podélné skluzové síly, které se podílí na vytvoření momentu M_z . V případě tohoto řízení přídatný moment působí na všech kolech stejnou velikostí, takové to řešení umožní rozložení skluzových sil, to povede k menšímu opotřebení oproti předchozí variantě řízení. Zde platí:

$$|\Delta M_{11}| = |\Delta M_{12}| = |\Delta M_{21}| = |\Delta M_{22}| = \Delta M \quad (2.18)$$

$$(\Delta M_{11} + \Delta M_{21}) = (\Delta M_{12} + \Delta M_{22}) \quad (2.19)$$

Přímá trať

V přímé trati může dojít k tzv. vzpříčené poloze, viz.: Obr. 2.7, kdy osa podvozku je odkloněna od osy přímé koleje. Obrázek dále obsahuje i přídatný moment na jednotlivých kolech, potažmo výsledný moment kolem svislé osy, který se snaží dostat podvozek do ideální polohy v kolejové dráze. Druhá a více častá poloha podvozku v kolejové dráze je tzv. tětiová poloha. Tou rozumíme příčné posunutí proti ose kolejové dráhy. To může vést až k trvalému naléhání okolku o hlavu kolejnice a tím ke značnému nárůstu opotřebení kol a kolejové dráhy. Způsob středění podvozku v kolejové dráze je na Obr. 2.7 vpravo.



Obr. 2.7 – Vzpříčená poloha podvozku v přímé trati (vlevo) a příčný posun podvozku (vpravo)

Ze stavů uvedených na Obr. 2.7 vychází následující vztahy:

Vzpříčená poloha: $\omega_{11} + \omega_{22} \neq \omega_{12} + \omega_{21}$ (2.20)

V tětiové poloze: $\omega_{11} + \omega_{21} \neq \omega_{12} + \omega_{22}$ (2.21)

Ze vztahu (2.20) a (2.21) lze odvodit vztah pro ideální polohu v kolejové dráze. Výsledkem jsou dva vztahy (2.22) a (2.23). Pro správný pohyb podvozku v kolejové dráze (ve středu koleje) musí platit následující vztah:

$$\omega_{11} + \omega_{22} = \omega_{12} + \omega_{21} \Rightarrow \frac{\omega_{11} + \omega_{22}}{\omega_{12} + \omega_{21}} = 1 \quad (2.22)$$

$$\omega_{11} + \omega_{21} = \omega_{12} + \omega_{22} \Rightarrow \frac{\omega_{11} + \omega_{21}}{\omega_{12} + \omega_{22}} = 1 \quad (2.23)$$

Výpočet rozdílového momentu pohonů na levé a pravé straně podvozku – momentového rozvážení ΔM je realizován na základě vztahů (2.22) a (2.23)

tím je dosaženo ideální polohy podvozku v kolejové dráze. Vztah pro výpočet přídatného momentu (2.24) je pouze doplněn o proporcionalní zesílení dané koeficienty c_1 a c_2 .

$$\Delta M = c_1 \cdot \left(\frac{\omega_{11} + \omega_{21}}{\omega_{12} + \omega_{22}} - 1 \right) + c_2 \cdot \left(\frac{\omega_{11} + \omega_{22}}{\omega_{12} + \omega_{21}} - 1 \right) \quad (2.24)$$

Kde: c_1 – proporcionalní koeficient pro příčné posunutí podvozku
 c_2 – proporcionalní koeficient pro vzpříčenou polohu podvozku
 ω – úhlová rychlost kol (dle Obr. 2.7)

Velikosti koeficientů c_1 a c_2 byly navrženy v simulačním výpočtu, kde byl pozorován vliv velikosti koeficientů na velikost opotřebení. Výsledky těchto simulací jsou uvedeny v následujících kapitolách.

Oblouk

Při průjezdu podvozku obloukem podvozek zaujímá vzpříčenou polohu. Oproti přímé trati je v oblouku výhodnější porovnávat ne součty ale poměry otáček kol. Přední dvojice nezávisle otáčivých kol zaujímá místo s daleko větším vychýlením v příčném směru oproti dvojici zadních kol. Ideální poloha podvozku v oblouku je tětivová, kdy je příčné posunutí předních a zadních volných kol shodné.

V oblouku při rozdílném příčném posunutí dvojic kol v podvozku je rozdíl rychlostí otáčení na jednotlivých stranách nízký. Tudíž je výhodnější počítat s poměrem otáčení pravého a levého kola. Výchozí vztah bez přídatného momentu je následující:

$$\frac{\omega_{11}}{\omega_{12}} \neq \frac{\omega_{21}}{\omega_{22}} \quad (2.25)$$

Zadaný stav polohy podvozku v oblouku je dán vztahem:

$$\frac{\omega_{11}}{\omega_{12}} = \frac{\omega_{21}}{\omega_{22}} \rightarrow \frac{\omega_{11}}{\omega_{12}} - \frac{\omega_{21}}{\omega_{22}} = 0 \quad (2.26)$$

Rozdílový moment ΔM (2.27) je počítán tak, aby byla splněna podmínka dle vztahu (2.26) a tím se bude podvozek nacházet v tzv. těživové poloze. Velikost potřebného momentu ΔM je výrazně větší, než je tomu v přímé trati. Důvodem je nutnost překonání vysokých příčných skluzových sil, které při průjezdu obloukem působí v kontaktu mezi kolem a kolejnicí. V případě použití pouze proporcionální složky zpětné vazby by konstanta musela být daleko větší, tím by docházelo k velkým a rychlým změnám přídavného momentu ΔM . Pro výpočet rozdílového momentu ΔM je použit integrační regulátor. Integrace regulační odchylky začíná při vjetí vozidla do oblouku. [2]

Vztah pro výpočet přídavného momentu v oblouku je následující:

$$\Delta M = c_3 \cdot \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{\omega_{11}}{\omega_{12}} - \frac{\omega_{21}}{\omega_{22}} \right) dt \quad (2.27)$$

Kde: c_3 – koeficient integračního regulátoru

t_1 – počátek oblouku

t_2 – konec oblouku

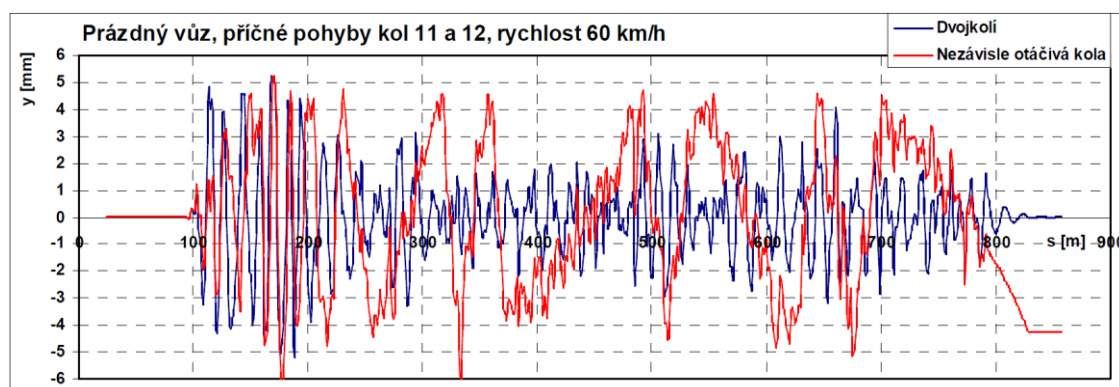
ω – úhlová rychlost kol (dle Obr. 2.7)

I tato varianta řízení, stejně jako předchozí způsob řízení je rozdílná pro přímou trať a oblouk. Detekce směrových parametrů trati není nutné realizovat s vysokou přesností, pouze jde o detekci přímé trati či oblouku. K přechodu mezi hodnotou přídavného momentu v přímé trati a oblouku slouží přechod po rampě v závislosti na vzájemné velikosti obou konstant. Tímto způsobem je zajištěno, aby nedocházelo ke skokovým změnám při přepínání ve způsobu výpočtu přídavného momentu.

Následující kapitoly obsahují simulace příslušných variant řízení včetně jednotlivých variant nastavení konstant.

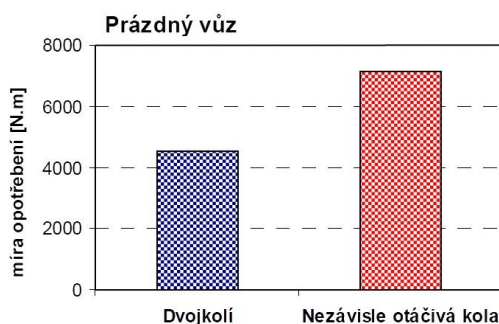
2.4.5 Simulace jízdy v přímé trati za reálných podmínek

Ze simulací jízdy tramvaje v přímé trati za reálných podmínek (trať s nerovnostmi $v = 60$ km/h) vychází (Obr. 2.8), že míra opotřebení (Obr. 2.9) u provedení s nezávisle otáčivými koly je téměř dvojnásobná oproti pevnému dvojkolí. To je způsobeno větší příčnou výchylkou dvojic kol vůči ose kolejové cesty oproti dvojkolí, která zapříčiňuje tření okolku o kolejnici a tím dochází k vysoké míře opotřebení [1]. Simulační výpočty byly provedeny v programu MSC.Software.



Obr. 2.8 – Simulace příčného pohybu dvojkolí (dvojkolí/nezávisle otáčivá kola) [4]

Na Obr. 2.8 jsou uvedeny průběhy příčného pohybu kola v koleji pro vozidlo s dvojkolím (modrá) a nezávisle otáčivými koly (červená). Z grafu je patrné, pro nezávisle otáčivá kola, že po vymizení podélných skluzových sil dochází k poklesu frekvence sinusování a k nárůstu velikosti příčné výchylky. Velikost výchylky je limitována kontaktem okolku o kolejnici, tudíž se jedná o druhé místo dotyku. Druhý bod dotyku má nepříznivý vliv na velikost opotřebení. Velikost míry opotřebení je uvedena na Obr. 2.9.



Obr. 2.9 – Simulace míry opotřebení dvojkolí (dvojkolí/nezávisle otáčivá kola) [1]

Simulační výpočet byl proveden s ideálně symetrickým vozidlem. Jakákoliv nesymetrie (hmotnosti, geometrická) může způsobit v případě nezávisle otáčivých kol tendenci jet trvale

s nalehlými koly k jedné straně kolejové dráhy. To je opět spojeno s vyšší mírou opotřebení kol i kolejnic [1].

Větší počet simulací, který byl na příslušnou problematiku simulován včetně jednotlivých variant řízení a příslušné parametry konstant, jsou uvedeny v příloze - Příloha B. V uvedených simulacích jsou vidět velikosti opotřebení pro nastavení dvou rychlostí (10 a 30 km/h) a dvou parametrů adheze (0,2 a 0,4). Z grafů uvedených v příloze - Příloha B je patrné, že v přímé trati je ve 3. ze 4. případů vidět větší opotřebení u podvozku s nezávisle otáčivými koly. To je možné vysvětlit při bližším prozkoumání grafu níže, zde je uveden příčný posun podvozku vůči ose kolejové dráhy. Vidíme zde, že příčná výchylka u podvozku s nezávisle otáčivými koly se pohybuje ve větších hodnotách a perioda sinusování je daleko větší. Vysokou hodnotou příčného posunutí dochází k druhému dotyku a tím i k neúměrnému nárůstu opotřebení. Na závěr k těmto simulacím lze říci, že se vzrůstající rychlostí a adhezí narůstá i míra opotřebení.

Simulace varianty řízení 1

Provedené simulace na základě teoretického návrhu optimalizace řízení individuálně poháněných kol z kapitoly 2.4.3 pro přímou trať ukazují zlepšení jízdních vlastností dvojic kol v kolejové dráze. Výsledky simulace v přímé trati jsou uvedeny v příloze - Příloha C.

V příloze jsou uvedeny dva grafy, první graf znázorňuje vliv konstanty c_D na míru opotřebení. Zde je zobrazeno sedm simulací pro jednotlivá nastavení od nezávislých kol přes různá nastavení konstanty c_D až po klasické dvojkolí. Ze simulací vychází, že nejmenší míra opotřebení je pro konstantu $c_D = 10 \text{ Nm.s/rad}$. Pod grafem je uveden výsledek simulace chování v přímé trati pro nastavenou konstantu c_D . Když provedeme porovnání se stejným průběhem bez varianty řízení 1 uvedeného v příloze - Příloha B, je patrné značné zlepšení průběhu příčné výchylky volně otáčivých kol.

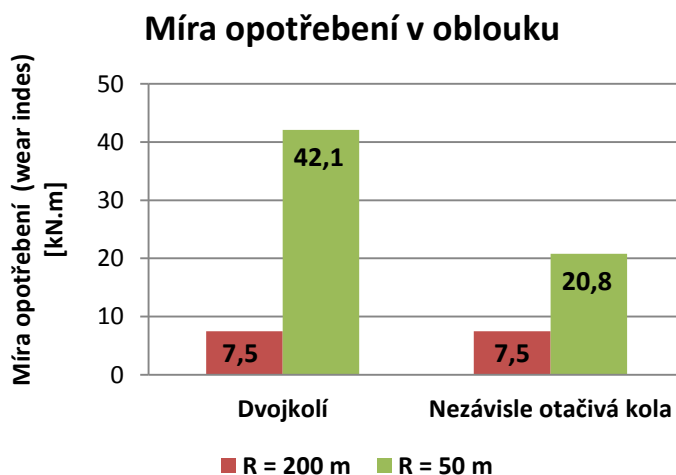
Simulace varianty řízení 2

Druhá varianta řízení výpočtu přídatného momentu je o něco složitější, ale stále využívá základní dostupné informace pro výpočet přídatného momentu, které jsou dostupné i na tramvaji 15T. Simulace varianty 2 byly provedeny dle teoretických předpokladů uvedených v kapitole 2.4.4. Tato varianta optimalizace obsahuje ve výpočtu přídatného momentu dva koeficienty (c_1 a c_2). Koeficient c_1 je pro výpočet přídatného momentu při příčném posunutí,

je potom koeficient pro vzpříčenou polohu podvozku v kolejové dráze. Proto před simulací opotřebení v přímé trati bylo nezbytné nejdříve provést simulace vlivu konstanty c_1 na výsledek opotřebení. Výsledky simulace jsou uvedeny v příloze - Příloha D. Z těch vychází, že nejmenší opotřebení bylo dosaženo při simulaci s koeficientem $c_1 = 400 \text{ Nm/rad}$. Zde došlo k poklesu opotřebení cca 10x. Stejný postup byl proveden pro koeficient c_2 s výsledkem $4\,000 \text{ Nm/rad}$ uvedený ve druhém grafu. V příloze - Příloha D je zobrazen výsledek simulace v přímé trati s nastavenými koeficienty. Je viditelné zmenšení příčné výchylky nezávisle otáčivých kol a nárůst frekvence sinusování.

2.4.6 Simulace jízdy v oblouku

Druhá část simulací obsahuje chování podvozku při průjezdu obloukem. Na Obr. 2.10 jsou uvedeny výsledky ze simulačních výpočtů tramvaje typu T6. První simulační výpočet byl proveden pro oblouk o poloměru 200 m. Z výsledku vychází, že není rozdíl v míře opotřebení mezi dvojkolím a nezávisle otáčivými koly. Pro druhou provedenou simulaci byl zvolen poloměr 50 m. Menší poloměry vykazují značné rozdíly opotřebení. Nezávisle otáčivá kola mají více jak o polovinu menší míru opotřebení. [2]



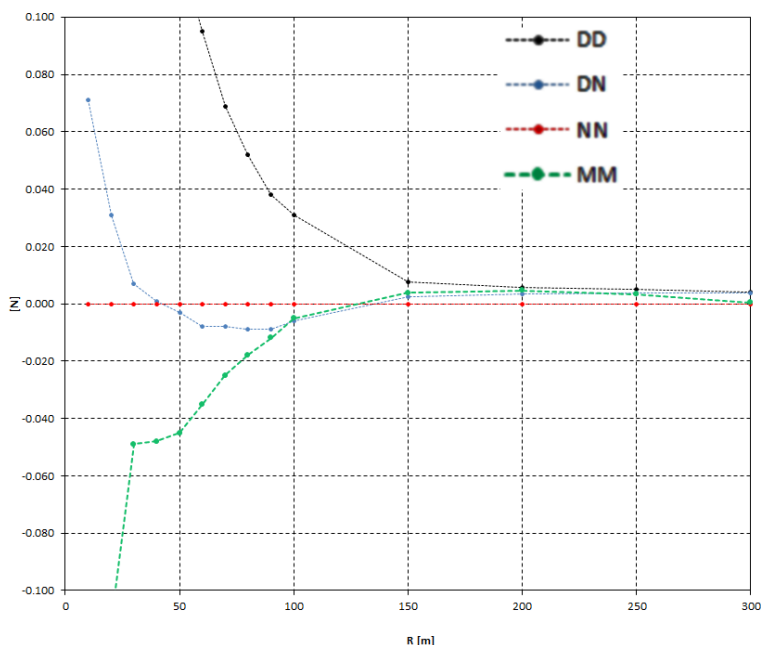
Obr. 2.10 - Opotřebení jízdních ploch kol a kolejnic při průjezdu obloukem [12]

Simulace varianty 2

Výsledky simulace jízdy obloukem jsou uvedeny v příloze - Příloha E. Simulace byla provedena při rychlosti 1 m/s s koeficientem adheze $\mu = 0,4$. První graf znázorňuje závislost přídatného momentu na dráze. Zde jsou uvedeny dva průběhy, jedná se o přídatný moment

na první dvojici kol. Níže je uveden graf, který obsahuje čtyři průběhy vodících sil pro jednotlivá kola. Každý obsahuje dva průběhy, černý průběh je vodící síla v případě aplikace přídatného momentu. Z výsledků simulace lze říci, že vhodným způsobem řízení individuálních pohonů je možné snížit vodící síly. Míra snížení vodících sil je dána celou řadou dalších faktorů, jako je například, poloměr projížděného oblouku, koeficient adheze, rychlost, či míra opotřebení kolejového svršku.

Jednou ze simulací byla závislost celkového opotřebení vztažená k hodnotě opotřebení nezávisle otáčivých kol na velikosti projížděného poloměru viz. Obr. 2.11. V grafu na ose x je vidět rozsah od 0 do 300 m, jsou zde vidět čtyři průběhy kde: DD – dvojkolí, NN – nezávisle otáčivá kola a MM – nezávisle otáčivá kola s aktivní optimalizací řízení momentu. Od hodnoty poloměru cca 150 m vidíme, že celková míra opotřebení je téměř stejná pro jednotlivá uspořádání podvozku. Je zde vidět enormní nárůst opotřebení u varianty DD pro průjezd oblouku s malým poloměrem ve srovnání s nezávisle otáčivými koly (NN). Při aktivaci optimalizovaného řízení (MM) vidíme pokles opotřebení.



Obr. 2.11 – Výsledky simulace celkové míry opotřebení vztažená k nezávisle otáčivým kolům ($v = 1 \text{ m/s}$, $\mu = 0,4$) [12]

2.4.7 Shrnutí

Simulace potvrdily, že vhodným způsobem řízení individuálně poháněných kol lze snížit vodící síly a tím zlepšit chování a jízdní vlastnosti podvozku s nezávisle otáčivými koly.

3 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

Vzhledem ke složitosti projektu zabývajících se elektrickou optimalizací jízdy kolejového vozidla s nezávisle otáčivými koly, bylo nutné výzkum v této oblasti rozdělit na tři části, které jsou:

- Teoretické práce a simulace pohonu
- Výzkumná část na experimentálním kolejovém vozidle
- Testy v reálných podmínkách na tramvaji 15T

Těžištěm disertační práce je v druhé etapě výzkumu na experimentálním kolejovém vozidle. Ta navazuje na část teoretickou a simulační, tou se zabýval Ing. Jan Čapek, Ph.D. z firmy VÚKV a.s. a uvedl dvě navrhovaná řešení řízení individuálně poháněných kol (viz. kapitola 2.4.3 a 2.4.4).

3.1 Simulace pohonu

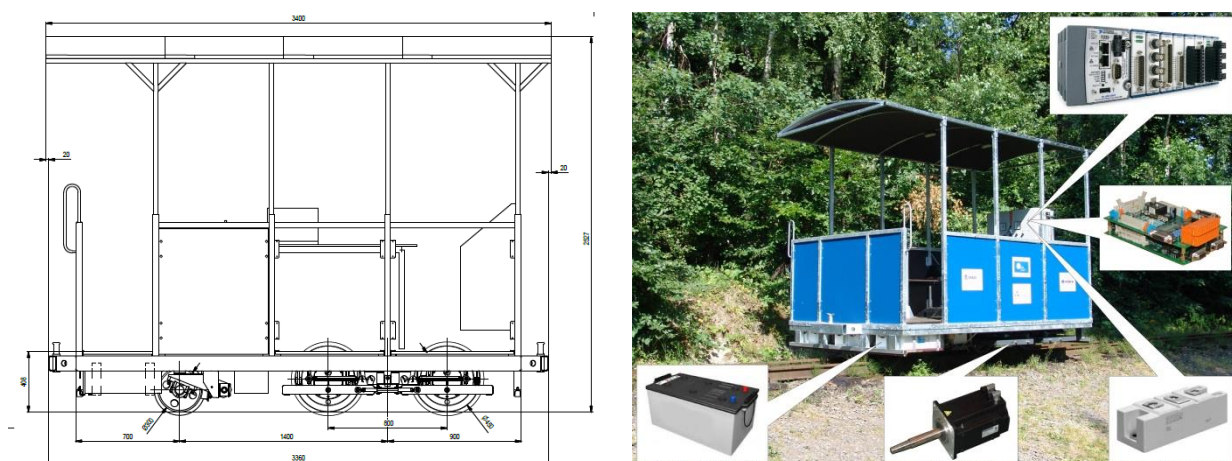
Simulace byly zaměřeny jak na chování tramvaje s nezávisle otáčivými koly, tak na chování experimentálního vozidla a na chování navrhované metody řízení. Metody byly od simulovány, část simulací je popsána v kapitole 2.4.5 a 2.4.6.. Část výsledků z příslušných simulací je uvedena v příloze pro svojí rozsáhlost (viz. příloha: Příloha B až Příloha E). Simulace prokázaly možný přínos navržených metod řízení pro zlepšení jízdních vlastností vozidla s nezávisle otáčivými koly. Detailní ověření algoritmů na reálném vozidle v podmínkách městského provozu v Praze by bylo prakticky neproveditelné. Hlavním aspektem byla finanční nákladnost a časové omezení vzhledem k možnostem testování pouze v nočních hodinách cca od 22 – 6 h. Tudíž bylo rozhodnuto o stavbě experimentálního kolejového vozidla za účelem ověření simulací a možnosti odladění algoritmů.

3.2 Výzkumná část na experimentálním kolejovém vozidle

Klíčovou etapou projektu byla stavba experimentálního kolejového vozidla s nezávisle otáčivými koly pro ověření a zkoumání na experimentální úrovni. Jedním z cílů bylo potvrzení výsledků z oblasti simulace.

Vozidlo bylo navrženo a realizováno ve spolupráci řešitelů projektu TAČR TA01030391. Vzhledem k odlišnému zaměření jednotlivých partnerů projektu byly práce při návrhu a stavbě experimentálního vozidla rozděleny takto:

- VÚKV a.s. - návrh mechanického provedení vozidla provedl Ing. Jan Malinský, VÚKV a.s. dále vytvořil výrobní dokumentaci a návrh a instalaci senzorické části (viz. Příloha F).
- Na Katedře elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě Dopravní fakulty Jana Pernera Univerzity Pardubice byl proveden návrh a realizace elektrické výzbroje vozidla, stavba vozidla byla provedena v dílnách DFJP Univerzity Pardubice.
- Škoda Electric a.s. přispěla dodávkou komponentů řídicího systému a zkušenostmi z výroby elektrických výzbrojí standardních kolejových vozidel [5].



Obr. 3.1 – Návrh a konečná podoba experimentálního kolejového vozidla (více viz. Příloha F) [2]

3.2.1 Mechanická konstrukce vozidla

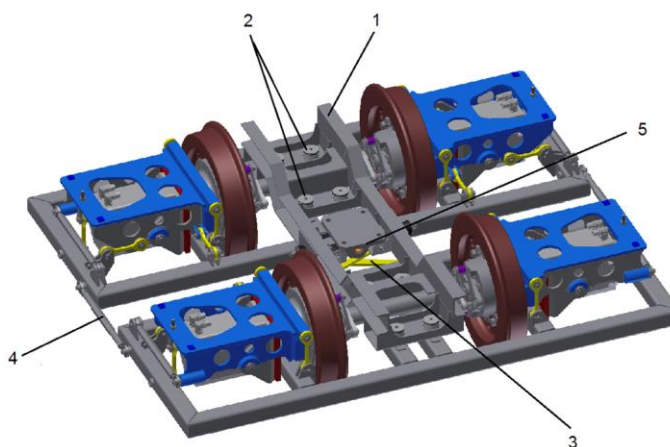
Základní parametry experimentálního kolejového vozidla jsou:

- třínápravové experimentální vozidlo s rozchodem 600 mm
- otočný hnací podvozek speciální konstrukce s nezávisle otáčivými koly a nezávislým pohonem každého kola
- uspořádání pojezdu Bo' 1

- délka přes čelníky 3 000 mm
- celková šířka 1 900 mm
- celková délka podvozku 1 900 mm
- rozvor podvozku 800 mm
- celkový rozvor 1 800 mm
- nápravové zatížení, hnací podvozek: 3,195 kN
- průměr hnacích kol 450 mm
- průměr kol běžného dvojkolí 300 mm
- elektrodynamická rekuperační brzda působící na kola hnacího podvozku
- mechanická špalíková brzda jednostranně působící na běžné dvojkolí
- hmotnost celého vozidla 2 140 kg (včetně osmi trakčních baterií 96 V, 185 Ah)

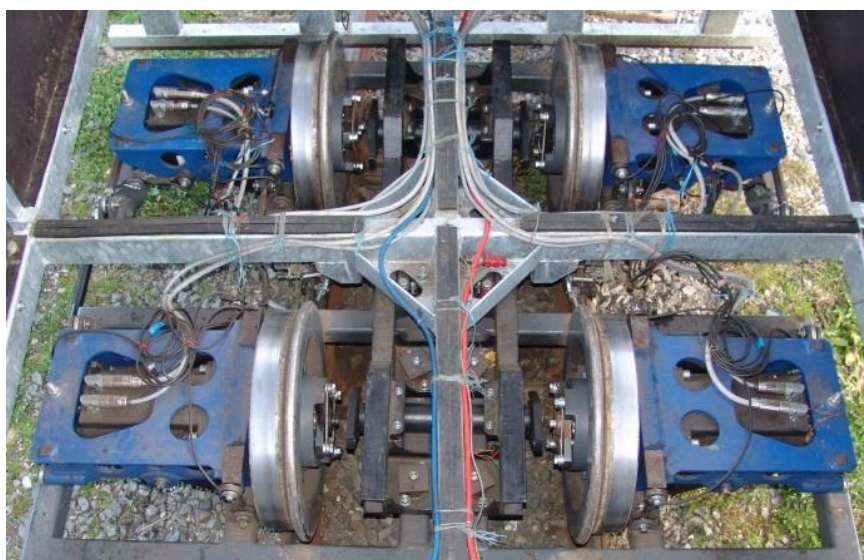
Popis experimentálního kolejového vozidla

Koncepční uspořádání pojezdu experimentálního vozidla dle značení je Bo' 1 (Obr. 3.1). Plně vyzbrojené vozidlo (včetně osmi olovených akumulátorů) disponuje celkovou hmotností 2 140 kg. Při návrhu konstrukce podvozku byla snaha co nejvíce se přiblížit poměrem rozměrů podvozku úzkorozchodného experimentálního vozidla a tramvaje 15T. Poměr rozchodů je 600 : 1 435 mm. Pouze u poloměrů hnacích kol nemohl být poměr dodržen vzhledem k nutnosti implementace samotného motoru. Ten by v případě menších kol nebylo možné připojit přímo. Podvozek obsahuje čtveřici individuálních pohonů, kde kolo je spojeno přímo se synchronním motorem s permanentními magnety (PSMS) s absencí převodového ústrojí, viz. Obr. 3.2. a Obr. 3.4.



Obr. 3.2 – Konstrukční řešení podvozku experimentálního vozidla [2]

Rám podvozku pos. (1) je navržen univerzálně, umožňuje jak pohon s nezávisle otáčivými koly tak i provedení s pevným dvojkolím. Spojení pravého a levého kola je realizováno pomocí hřídele, který je spojen s kolem přes pružnou spojku. Toto konstrukční provedení umožňuje provádět měření jak v oblasti nezávisle otáčivých kol tak dvojkolí a tyto výsledky komparovat. Konstrukční provedení umožňuje dosáhnout lepší vypovídající schopnost a možnost porovnání. Druhým parametrem, který lze měnit je mezinápravová vazba. Možné provedení vazby je křížová vazba viz. Obr. 3.2 pos. (3). Druhá možnost provedení je podélná vazba mechanického spojení pos. (4). Deaktivace nápravové vazby se provádí kombinací jak podélné tak křížové vazby, v tom to provedení se podvozek chová jako pevný. [1]

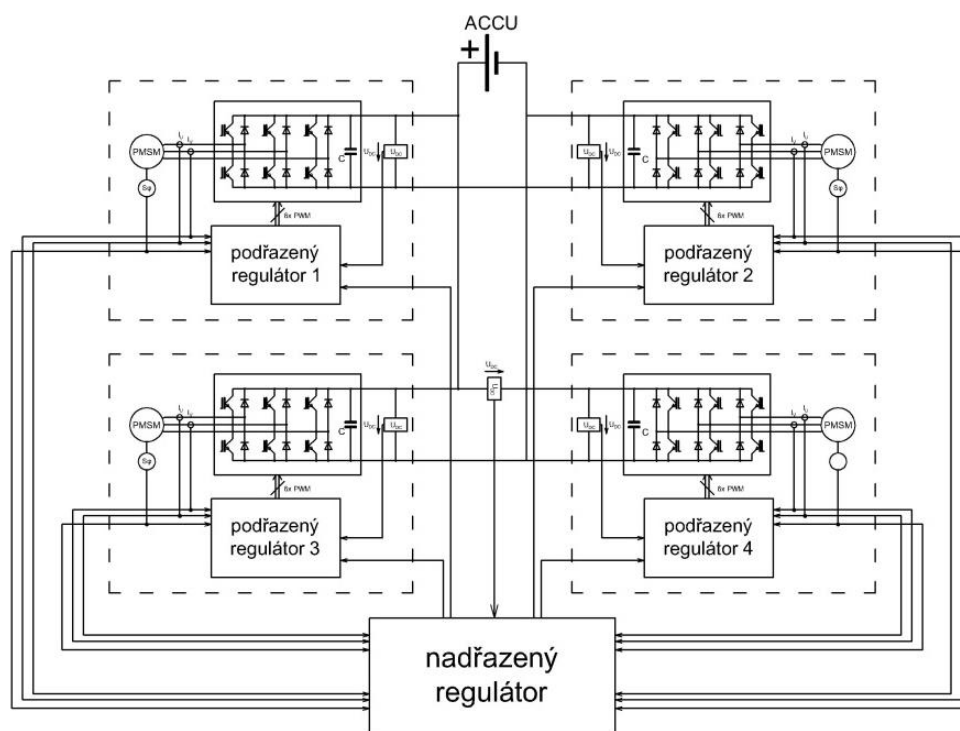


Obr. 3.3 – Podvozek experimentálního vozidla

Podvozek je vybaven jednoduchým primárním i sekundárním vypružením, tvořeným pryžokovovými prvky pos. (2). Všechny síly mezi podvozkem a spodkem vozidla jsou přenášeny sférickým kloubem, který tvoří otočné spojení podvozku, tedy v jednom bodě – pos. (5). [1]

3.2.2 Elektrická výzbroj vozidla

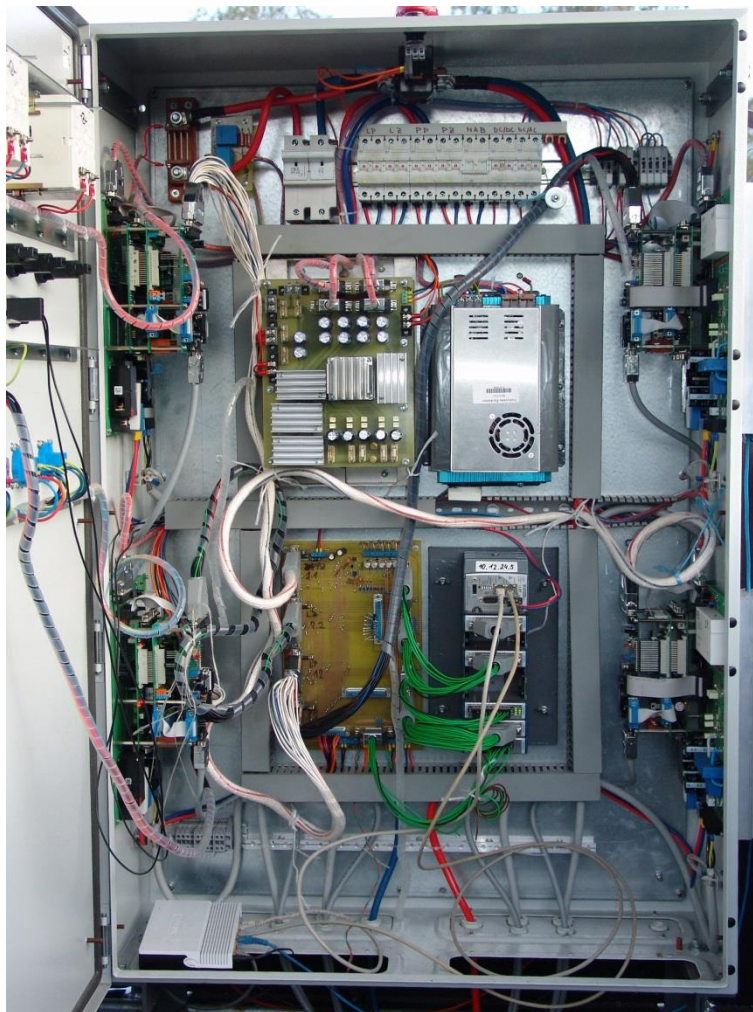
Návrh elektro výzbroje experimentálního kolejového vozidla realizovala Univerzita Pardubice - Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě. Obr. 3.4 zobrazuje blokové schéma trakční elektrovýzbroje. Rozšířené schéma je obsaženo v příloze - Příloha G.



Obr. 3.4 – Blokové schéma elektrické trakce [1]

Hlavní komponenty elektro výzbroje vozidla:

- trakční akumulátor Pb 8x 12 V =, celkově 96 V, kapacita 150 Ah, trubičkové elektrody, hmotnost jednoho akumulátoru 53 kg
- nadřazený řídicí systém – CompactRIO od firmy National Instrument viz. kapitola 4.1
- podřazený regulátor – regulátor pohonu D8213C1 od firmy ŠKODA Electric (Texas Instrument TMS320F2812)
- budič – Semikron SKHI 61
- výkonové spínací prvky - Semikron typ SK 75 GD 066 T
- trakční motor – Danaher/Kollmorgen AKM74P



Obr. 3.5 – Rozvaděč experimentálního vozidla

Obrázek Obr. 3.4 dále obsahuje stejnosměrnou sběrnici s napětím 96 V DC, včetně pěti snímačů napětí. Zdrojem palubní sítě je osm olověných trakčních akumulátorů umístěných pod podlahou experimentálního vozidla. Součástí motoru je snímač úhlového natočení, resolver. Úplné schéma je uvedené v příloze - Příloha G, obsahuje celou řadu dalších komponentů. Jedná se o jistící a spínací prvky, měřicí přístroje a snímače, měnič pomocné spotřeby pro řídicí elektroniku (-12, 12, 5 a 24 V DC), nabíječ trakčních baterií. Skutečná podoba hlavního rozvaděče je zobrazena na Obr. 3.5. Měnič napětí z 96 V DC na 230 V AC je zobrazen na Obr. 3.5 vpravo nahoře. Po stranách rozvaděče jsou umístěny čtyři trakční střídače. Uprostřed dole nalezneme nadřazený řídicí systém cRIO. Horní část rozvaděče zaujímají jistící prvky.

Hlavní rozvaděč obsahuje hlavní odpojovač, který slouží k odpojení akumulátorů od hlavního rozvaděče. Jedná se o dvoupólový hlavní vypínač ED252LB-1 (250 A při 96 V DC), ten je možné uzamknout a slouží jako havarijní vypínač. [12]

Pro orientační měření hlavní rozvaděč disponuje dvojicí analogových přístrojů. Voltmetr METRA Ma96c [14] slouží k orientačnímu měření napětí trakční baterie. Spojení se stejnosměrnou sběrnicí je řešeno, přes dvojici miniaturních pojistkových odpojovačů Elektro Bečov RSP4 [15] osazených trubičkovými pojistkami 5x 20 0,1 A/F sloužícími jako ochrana před zkratem uvnitř voltmetru. Druhým analogovým přístrojem je ampérmetr METRA Ma96c [14] s rozsahem 60 mV / 150 A a nulou uprostřed stupnice, tím je umožněno i měření obráceného směru proudu během rekuperace. Ampérmetr využívá proudový bočník 150A/60mV. [1]

Rozšířené schéma v příloze - Příloha G obsahuje dále i nabíjecí obvod (v levé horní části), který je připojen přes jistič FA nabíječe (16 A/C). Nabíječ trakční baterie – použit je typ AXIstand 96-25 od fy. AXIMA [18], což je plně automatický procesorově řízený nabíječ, jehož nabíjecí charakteristiku je možné uživatelem softwarově modifikovat. Napájení nabíječe je realizováno z běžné sítě 3x400 VDC / 50 Hz. [5]

Trakční akumulátor

Akumulátor byl vybrán od firmy GNB typu Classic FT 12 150. Jedná se o trakční olověný akumulátor 12 V s kapacitou 150 Ah. Elektrody mají konstrukci trubičkovou, hmotnost akumulátoru činí 53 kg. Při počtu 8x 12 V DC \approx 96 V, na tuto hladinu je dimenzován



Obr. 3.6 – Trakční baterie Pb 12 V/ 150 Ah

meziobvod. Celková hmotnost baterií činí 424 kg, proto bylo nutné vhodné rozmístění akumulátorů se zřetelem na těžiště vozidla a zatížení jednotlivých kol vozidla. Umístění bylo

vybráno v zadní části pod podlahou, kde se nachází pevné dvojkolí, které určuje stabilitu vozidla.

Nadřazený řídicí systém

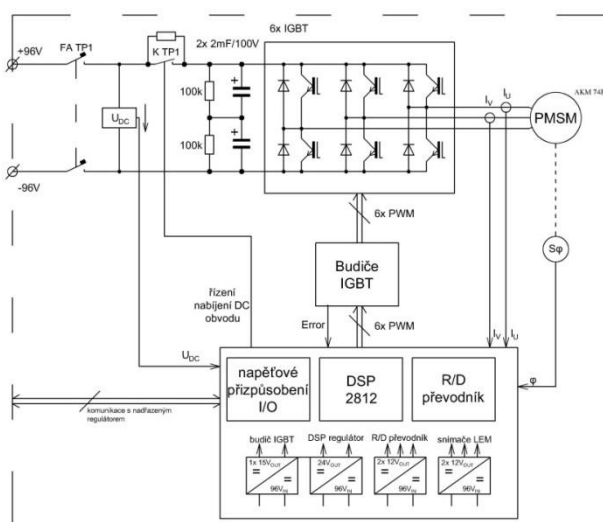
Nadřazený řídicí systém zajišťuje CompactRIO od firmy National Instrument řídí podřazené regulátory. Podrobnějšímu popisu se věnuje samostatná kapitola 4.1.

Trakční střídač

Složení trakčního střídače:

- regulátor pohonu D8213C1 od firmy ŠKODA Electric (Texas Instrument TMS320F2812)
- budič – Semikron SKHI 61
- výkonové spínací prvky – Semikron typ SK 75 GD 066 T

Schéma zapojení jednoho trakčního střídače je zobrazeno na Obr. 3.7, konstrukční provedení bloku pohonu je zobrazeno na Obr. 3.8. Ve schématu vidíme na vstupu napájení stykač, který ovládá DSP. Následuje čidlo LEM pro snímání napětí, relé pro nabíjení vstupních

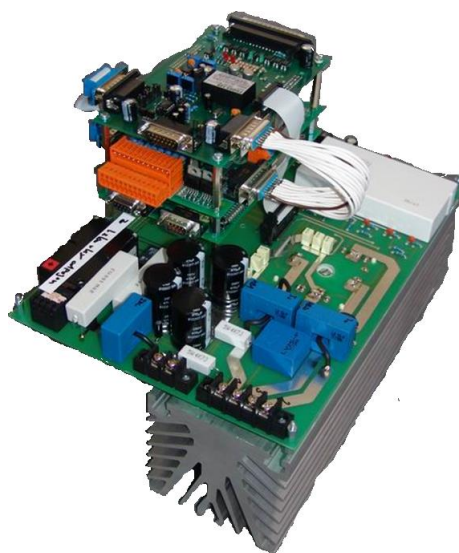


Obr. 3.7 – Trakční střídač (jeden individuální pohon) [2]

kondenzátorů (2x 2 mF/100V). Následuje výkonový modul IGBT od firmy Semikron typ SK 75 GD 066 T řady SEMITOP® 4 [16]. Parametry výkonového modulu jsou $V_{CES} = 600 \text{ V}$, $I_c = 83 \text{ A}$ / $T_s = 25 \text{ °C}$, včetně implementovaných zpětných diod. Výkonový modul IGBT je

spojen s hliníkovým chladičem viz. Obr. 3.8. Výkonová část je umístěna na spodní desce plošných spojů. Na výstupu střídače jsou umístěny ve dvou fázích snímače proudu. Tato skutečnost je dána metodou vektorové regulace momentu trakčního motoru, která je použita, informace zpracovává DSP.

Spodní část dále obsahuje i budicí obvod (bílý blok vzadu) od firmy Semikron, typ SKHI 61, SEMIDRIVER™, Sixpack IGBT and MOSFET Driver, $V_{CE} = 900 \text{ V}$, $I_{outPEAK} = 2 \text{ A}$. Obvod zajišťuje, mimo definovaného řízení tranzistorů, galvanické oddělení silové a řídicí části a ochranné funkce. V případě detekce chybného stavu tento budič uzavře jím řízené tranzistory a informaci pošle do DSP regulátoru, který bezpečným (definovaným) způsobem zabezpečí své řídicí signály. [17]



Obr. 3.8 – Trakční střídač

Regulátor pohonu D8213C1 od firmy ŠKODA Electric se nachází v prvním a druhém patře (Obr. 3.8) [20]. Je tvořen mikroprocesorem DSP TMS320F2812 z produkce firmy Texas Instrument [19] umístěným v prvním patře regulátoru, slouží pro řízení elektrických pohonů. Obsahuje dvaatřicetibitové výpočetní jádro, které vykonává zřetězené zpracování instrukcí. Typický kmitočet taktovacího obvodu je 150 MHz, tj. doba instrukčního cyklu 6,67 ns. Procesorová jednotka je akumulátorového typu s dvaatřicetibitovým akumulátorem a pracuje s pevnou řádovou čárkou. Je integrována násobička pro násobení dvou dvaatřicetibitových čísel. Obvod obsahuje v základním jádře 6 paralelních portů, tři dvaatřicetibitové časovače, watchdog, čtyři sériové linky, A/D převodník se šestnácti vstupy s rozlišením na 12 bitů. Nejkratší nastavitelná doba převodu je 80 ns.

Druhé patro regulátoru obsahuje interfejsovou kartu umožňující připojení pomocí následujících bran:

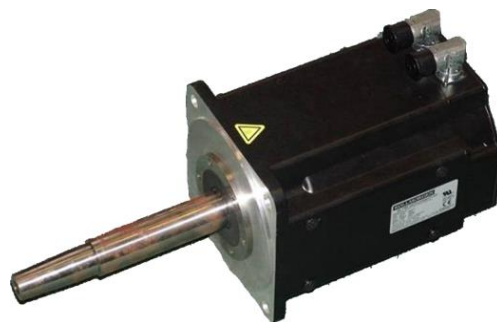
- 8x logický vstup 24 V galvanicky oddělený, 4x logický výstup 24 V galvanicky oddělený
- 6x logický výstup 15 V pro výstup signálů pro spínání tranzistorů střídače – připojení na vstup budičového modulu, 5x analogový vstup pro připojení signálů z čidel napětí a proudů, 4x logický vstup 15 V pro připojení chybových hlášek budičového modulu
- Brána pro řízení spínání brzdného odporu
- 5 diferenciálních vstupů 5 – 15 V pro připojení signálů dvou pulsních čidel otáček nebo polohy – čítačové vstupy
- Brána pro připojení ovládacího panelu ručního ovládání – 1x analogový vstup 0-15 V, 1x logický výstup 15 V, 4x logický vstup 3,3 V

Regulátor obsahuje algoritmy momentového řízení trakčního motoru, kdy každý regulátor zajišťuje řízení jednoho z motorů. Žádost na moment do regulátoru vstupuje v analogové formě, žádaná hodnota momentu motoru a logický signál blokace pulzů jsou generovány nadřazeným řídicím systémem vozidla. Dále výstupem regulátoru jsou řídicí pulzy pro řízení IGBT prvků střídače. Šířková pulzní modulace pracuje s frekvencí 5 kHz.

Poslední třetí patro regulátoru tvoří obvod pro zpracování informace o úhlové rychlosti/poloze rotoru trakčního motoru. Obvod AD2S1200 od firmy Analog Devices zajišťuje konverzi mezi resolverovým snímačem implementovaným v motorech a DSP. Tento obvod převádí analogové signály na digitální (R/D). Výsledkem je rozlišení 4096 poloh na mechanickou otáčku, tím je zajištěna dostatečná přesnost pro tvorbu příslušných algoritmů optimalizace řízení individuálně poháněných kol.

Trakční motor

Trakční motory byly dodány firmou Danaher/Kollmorgen. Nejedná se přímo o pomaloběžné trakční motory jako tomu je u tramvaje 15T. Konkrétně se jedná o synchronní servomotor s upravenou hřídelí pro konstrukční řešení tohoto experimentálního vozidla.



Obr. 3.9 – Synchronní motor s permanentními magnety - AKM 74P

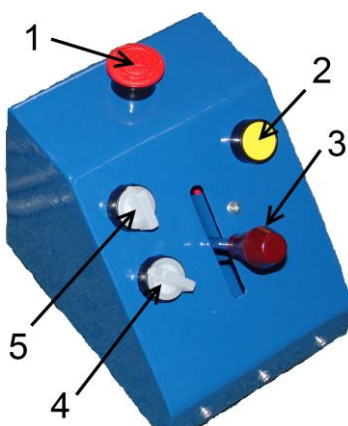
Hlavní nevýhodou motoru AKM 74P jsou maximální otáčky, ty činí $2\,120\text{ min}^{-1}$. U experimentálního kolejového vozidla se otáčky řádově pohybují ve stovkách za minutu. Tím je ovlivněna účinnost pohonu a rekuperace. Více informací viz. [21].

Parametry synchronního motoru s permanentními magnety:

- typ Danaher/Kollmorgen AKM 74P
- počet pólpárů $p_p = 5$
- trvalý klidový moment $T_{cs} = 52,5\text{ Nm}$
- trvalý moment při jmenovitých otáčkách $T_{cr} = 37,6\text{ Nm}$
- maximální moment po dobu 5 s $T_{ps} = 106\text{ Nm}$
- max. momentové přetížení do otáček $\omega_k = 1\,680\text{ min}^{-1}$
- jmenovité otáčky $\omega_r = 1\,800\text{ min}^{-1}$
- maximální otáčky $\omega_{max} = 2\,120\text{ min}^{-1}$
- trvalý proud $I = 18,5\text{ A}$
- maximální proud po dobu 5 s $I_{max} = 40\text{ A}$
- moment setrvačnosti $J = 120\text{ kg cm}^2$
- napěťová konstanta $k_E = 178,6\text{ V/1\,000 min}^{-1}$
- indukčnost fáze statorového vinutí $L_f = 4\text{ mH}$
- odpor fáze statorového vinutí $R_f = 0,215\ \Omega$
- výkon při rychlosti vozidla 20 km/h a momentu 52,5 Nm činí 1 297 W
- jmenovité stejnosměrné napětí na vstupu střídače 560 V

Ovládací pult experimentálního kolejového vozidla

Ovládací pult experimentálního kolejového vozidla je koncipován jako přenosná ovládací skříňka viz. Obr. 3.10. Na ovládacím panelu jsou umístěny základní ovládací prvky vozidla umožňující jeho bezpečné řízení. Zbylé ovládací prvky, které nejsou nezbytné pro řízení vozidla jsou umístěny na skříně rozvaděče umístěného na čele vozidla. [2]



Obr. 3.10 – Ovládací pult experimentálního kolejového vozidla

Ovládací pult obsahuje havarijní vypínač linkových stykačů *pos.* (1) pro odpojení měničů. Na pravé straně se nachází žluté tlačítko elektrické houkačky *pos.* (2). V prostřední části se nachází ovládací potenciometr *pos.* (3) pro zadávání požadavků momentu. Potenciometr disponuje samovratnou aretací uprostřed odporové dráhy pomocí pružiny, tím je zajištěna funkce sdruženého ovladače jízda-elektrodynamická brzda. V levé části se nachází přepínač *pos.* (5) pro volbu směru jízdy vozidla. Níže se nachází přepínač blokování pulzů trakčních měničů *pos.* (6). [2], [3]

3.3 Testy v reálných podmínkách na tramvaji 15T

V závěru výzkumného projektu bylo nutné zkoumané a odladěné algoritmy ověřit na skutečném tramvajovém vozidle. Za tímto účelem byla vyčleněna tramvaj 15T s číslem 9223. Má jeden z největších kilometrových náběhů a proto se jevila jako ideální na experimentální měření přímo na vozidle v reálných podmínkách v ulicích města Prahy.

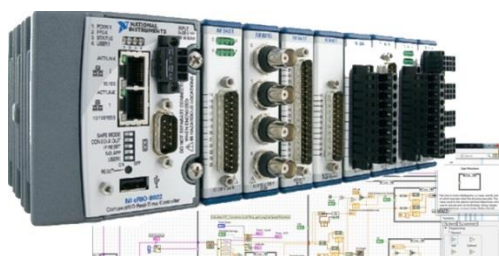
Tato práce se tímto měřením primárně nezabývá. I přesto Univerzita Pardubice byla přítomna měření. Odladěné a vyzkoušené algoritmy z experimentálního kolejového vozidla, byly naprogramovány firmou ŠKODA Electric do hlavního řízení pohonu jednoho podvozku na tramvaji 15T.

4 POPIS IMPLEMENTACE ALGORITMU REGULACE V NADŘAZENÉM ŘÍZENÍ EXPERIMENTÁLNÍHO VOZIDLA

4.1 Nadřazený regulátor

Nadřazený řídicí systém řídí podřazené regulátory a vykonává optimalizaci řízení individuálně poháněných kol. Zajišťuje i další funkce, například protiskluzovou ochranu, regulaci rychlosti vozidla, komunikaci se systémem pro měření mechanických veličin, automatické vedení vozidla, energetickou analýzu jízdy a diagnostiku. Jako nadřazený řídicí systém je použit programovatelný automat CompactRIO systém od firmy National Instrument. Byl zvolen typ cRIO 9022 (Obr. 4.1)

Zařízení cRIO-9022 obsahuje RT procesor 533 MHz, interní paměť 2GB a operační paměť 256 MB DRAM. Výhoda je v modulární koncepci, kdy je možné využít až 8 pozic pro zásuvné moduly. Pomocí zásuvných modulů bylo docíleno požadovaného počtu a typů I/O. Ke komunikaci s počítačem slouží dvě zásuvky s rozhraním Ethernet. Zařízení obsahuje i UART sériovou linku (RS-232).



Obr. 4.1 – Nadřazený řídicí systém cRIO-9022 od firmy National Instrument [8]

Použité moduly v cRIO:

- NI 9264 - 16bitový analogový výstupy ± 10 V s rychlostí 25 ks/s/Ch
- NI 9203 - 8 kanálový, 16 bitový proudový vstup ± 20 mA
- NI 9425 - 32 kanálový digitální vstupy kompatibilní s napětíovou úrovní 12 a 24V, rychlost 7us
- NI 9423 - 8 kanálový digitální vstup pro zpracování IRC čidel, High Speed rychlost 1us
- NI 9423 - 32 kanálový digitální výstup s rozsahem 5 až 60V, rychlost 8us

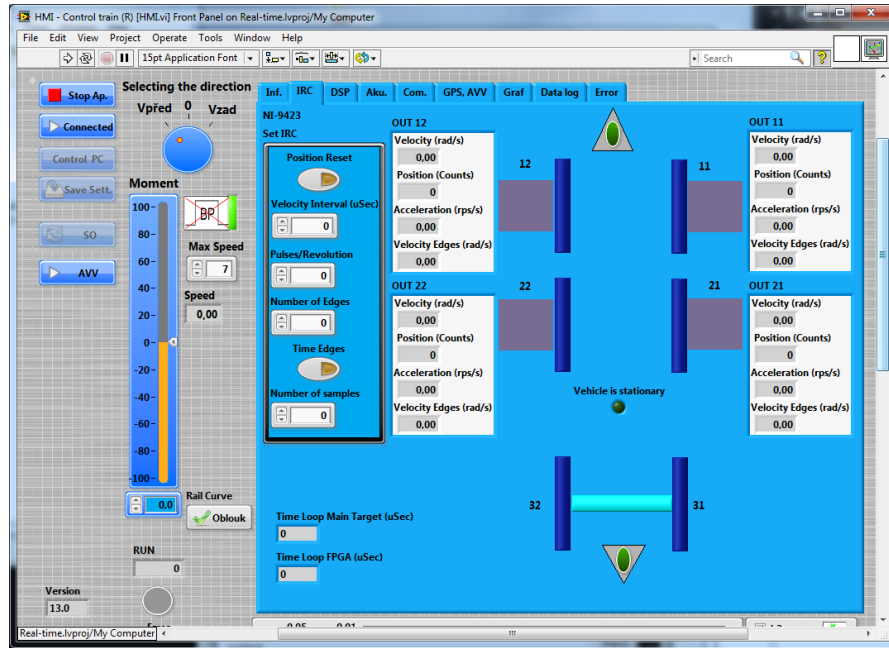
Zařízení je programováno pomocí LabVIEW od firmy National Instrument. Jedná se o grafický programovací jazyk. Tím je zajištěno přívětivé uživatelské rozhraní pro tvorbu programu a tím i urychlení vývoje SW. Programovací prostředí umožňuje provádět debugging režim při spuštění programu na Real-Time zařízení. Nespornou výhodou je možnost programování hradlového pole (FPGA) pomocí grafického prostředí bez nutnosti znalosti DHL.

Mojí hlavní pracovní náplní v rámci tohoto projektu je především realizace teoretických návrhů v nadřazeném řízení a experimentální práce. Dále se budu zabývat detekcí polohy kolejového vozidla s vazbou výsledků na řízení samotného vozidla.

4.2 Ovládání a monitorování pomocí PC

Pro komunikaci mezi uživatelem a nadřazeným řízením slouží část programu implementovaná v PC. Hlavní okno aplikace programu je zobrazeno na Obr. 4.2. Hlavním účelem této aplikace je možnost ladění programu v reálném čase bez nutnosti přehrávat SW v nadřazeném řízení. Tím se dosáhne časových i finančních úspor při experimentech. V levé části okna se nachází zobrazení žádosti z ovládacího panelu experimentálního kolejového vozidla. Zde je zobrazen navolený směr, žádost o moment a blokace pulzů. Zobrazení je možné přepnout i do ovládacího modu, poté je možné přes tyto prvky vozidlo ovládat z PC.

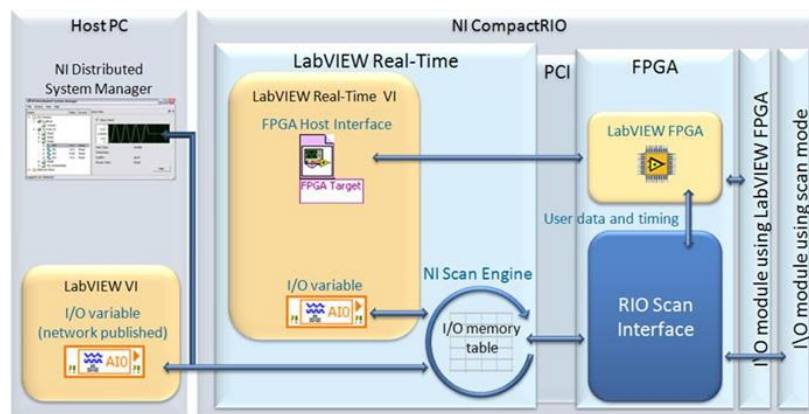
V pravé části je několik záložek. První obsahuje základní informace, například rychlost jízdy a aktuální žádost o moment na jednotlivých podřazených regulátorech. Následující složka je zobrazena na obrázku, zde jsou informace a nastavení pro zpracování informace o úhlové rychlosti. Je zde možné měnit časové okno pro měření rychlosti a způsob filtrování. Záložka DSP poskytuje informace z podřazených regulátorů, zobrazuje chybové stavy a stav elektrického obvodu (poloha relé). Další v řadě je záložka pro zobrazení energetických toků. Zde jsou ukazatele proudu odebírané jednotlivými střídači ze stejnosměrného meziobvodu, celkový proud a napětí meziobvodu. Z těchto měřených hodnot je pak počítán výkon a spotřebované energie, ta je logována do souboru stejně tak i úhlová rychlost jednotlivých kol na vozidle. Nejdůležitější je záložka pro možnost nastavování a zvolení výpočtu přídatného momentu. Zde je možné měnit momenty, či přesouvat rozdělení momentů pro jednotlivé podřazené regulátory dle právě probíhajícího experimentu.



Obr. 4.2 – Ovládací a informační panel – PC

4.3 Interfejs

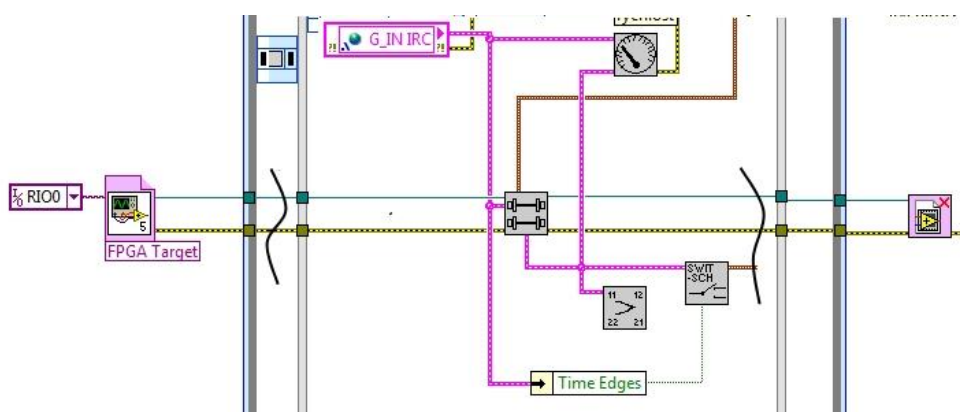
V kapitole Obr. 4.3 bylo uvedeno, že při nadřazeném řízení se jedná o tři části programu, které mezi sebou musí komunikovat. Blokové schéma komunikace SW LabVIEW je uvedeno na Obr. 4.3. Schéma je rozděleno na tři části podle bloků. Zleva od nejvyšší úrovně je PC, tato část zajišťuje uživatelské rozhraní a logování dat. V pravé části je blok LabVIEW Real-Time, reprezentující zařízení cRIO. V této části se nachází největší část programu, který zajišťuje algoritmus synchronizovaného řízení individuálně poháněných kol. Poslední oblastí je hradlové pole FPGA. Zde byla umístěna část programu pro čtení a zpracování úhlové rychlosti kol a zápis a čtení z I/O.



Obr. 4.3 – Blokové schéma komunikace LabVIEW [8]

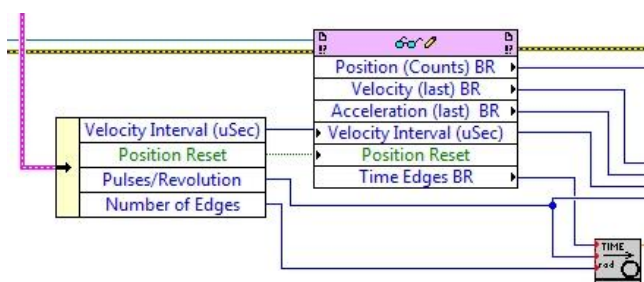
SW pro nadřazené řízení obsahuje několik paralelních smyček s rozdílnou periodou. Hlavní smyčka realizuje řízení (Obr. 4.15) a výpočet přídatného momentu. Následuje výpočet polohy na trati, respektive zpracování dat z GPS modulu. Nezbytnou součástí jsou smyčky pro komunikaci s PC (Obr. 4.6) a měřícím zařízením firmy VÚKV a.s. (viz. kapitola 4.6).

Zařízení cRIO může fungovat ve dvou režimech dle přístupu k I/O. Jedná se o tzv. Scan Engine a FPGA Interface Mode (viz. Obr. 4.3). Scan Engin umožňuje přistupovat přímo k I/O z aplikace na real-time zařízení, bez nutnosti programovat přístup k I/O v FPGA. Nevýhodou je vzorkovací frekvence $f = 100$ Hz. Frekvence Scan Engin modu je pro vyhodnocení úhlové rychlosti nedostatečná. Na základě těchto informací byl zvolen mod přístupu k I/O přes FPGA. To znamená, že moduly I/O byly přesunuty v projektu do oblasti FPGA. Tím je zajištěna vysoká vzorkovací frekvence potřebná primárně pro čtení informace o úhlové rychlosti.



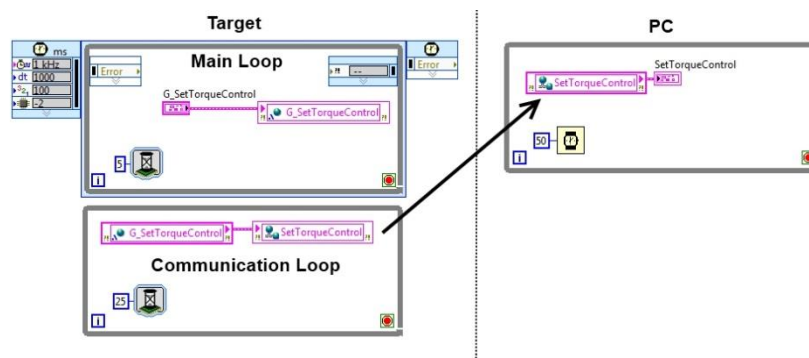
Obr. 4.4 – Otevření komunikace s FPGA - Block diagram target

Komunikace Real-Time aplikace s FPGA je realizována dle Obr. 4.4. V levé části je otevření FPGA aplikace. Z aplikace vystupuje reference, která je v pravé části uzavřena. Uprostřed je blok pro čtení a zápis do FPGA. Otevřená část tohoto bloku je zobrazena na Obr. 4.5.



Obr. 4.5 – Zápis a čtení z FPGA - Block diagram target

Komunikace mezi PC a nadřazeným řízením systémem je řešena pomocí síťových proměnných. Ukázka komunikace je zobrazena na Obr. 4.6. Na obrázku se nachází tři smyčky, v levé části se jedná o samotný řídicí systém a vpravo o PC, kde data z hlavní smyčky jsou předána do sdílené proměnné. Tím dojde k přenosu dat do spodní smyčky, ta má delší čas periody a předává data ze sdílené proměnné do síťové proměnné, která je vyčítána na PC. Pomocí mezismyčky pro komunikaci můžeme řídit vytížení přenosové linky.



Obr. 4.6 – Příklad komunikace mezi zařízením a počítačem

4.4 Chybové stavy regulátoru

Podřazené regulátory (DSP) předávají pomocí dvou digitálních výstupů chybový stav v binární podobě. Tyto informace jsou pomocí cR1a zpracovány a interpretovány uživatelským rozhraním na počítači (HMI). Níže je uveden krátký výčet nejdůležitějších chybových stavů:

- 00 – žádná chyba nenastala
- 01 – nadproud
- 10 – nadotáčky
- 11 – ostatní chyby

V případě detekování chybového stavu od podřazených regulátorů je na ně reagováno blokadí pulzů měničů.

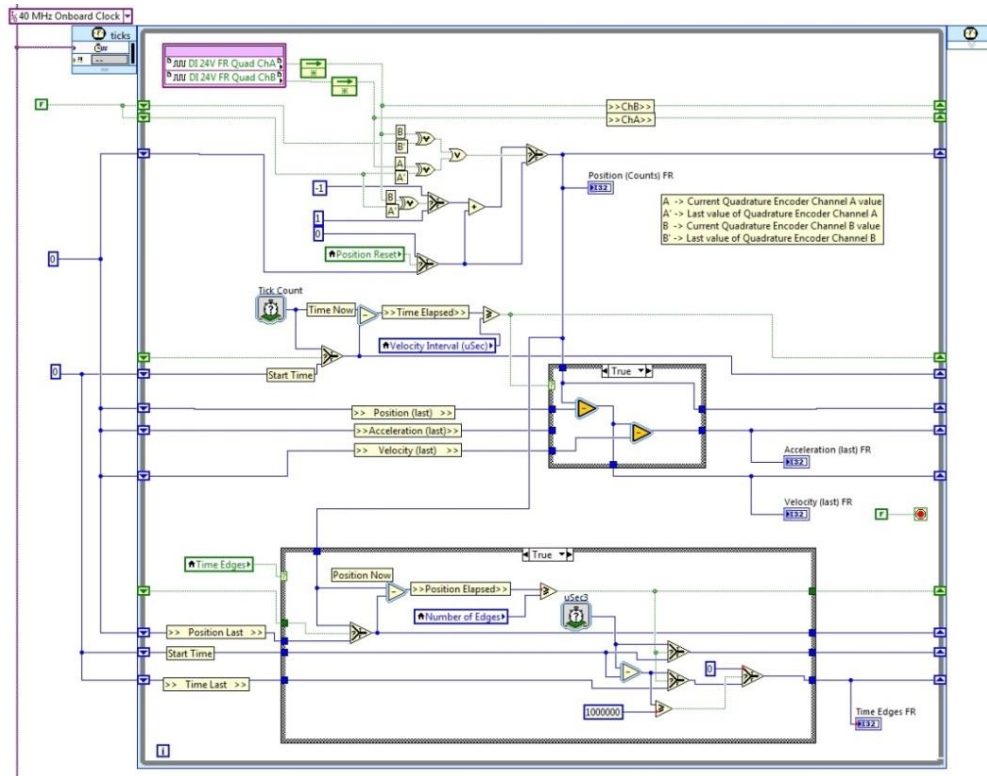
4.5 Měření úhlové rychlosti

Pro snímání úhlové rychlosti byl použit resolverový snímač. Signál resolveru je nutno zpracovat a převést na digitální podobu. K tomuto účelu slouží převodník AD2S1200.

Převodník signálu resolveru umožňuje rozlišit 4096 poloh na jednu mechanickou otáčku. Signál je přiveden na vstupy podřazených regulátorů v podobě IRC signálů. Z tohoto typu signálu je možné rozlišit i směr otáčení kola respektive směr jízdy vozidla. Informace o úhlové rychlosti jednotlivých kol je nutnou informací i pro nadřazené řízení.

Při rychlosti 25 km/h a průměru hnacích kol 450 mm je frekvence otáčení kol 4,912 Hz. Pro frekvenci jednoho kanálu platí $4,912 \times 4096/2 = 10,059$ kHz. Z vypočtené hodnoty vidíme, že je nutné mít dostatečnou vzorkovací frekvenci pro správné vyhodnocení úhlové rychlosti jednotlivých kol, jak bylo uvedeno v kapitole 4.3, kde byla řešena komunikace a uvedeno, že vstupní modul použitý v režimu Scan Engine přistupuje ke vstupní hodnotě s $f = 100$ Hz. Tato frekvence je pro zpracování úhlové rychlosti nedostatečná. Z těchto důvodů byl modul NI 9423 s 8 kanály přesunut do režimu FPGA. Tímto řešením je možné využít maximální rychlost modulu 1 us.

Část programu pro zpracování úhlové rychlosti kol je uvedena na Obr. 4.7. Zde je vidět pouze zpracování úhlové rychlosti pro jedno kolo. Horní část obsahuje zpracování dat pomocí časového okna, kde jsou čítány jednotlivé hrany vstupních signálů. Dolní část obsahuje režim, který umožňuje výpočet úhlové rychlosti z měřeného času, kdy se měří perioda vybraného počtu pulsů.



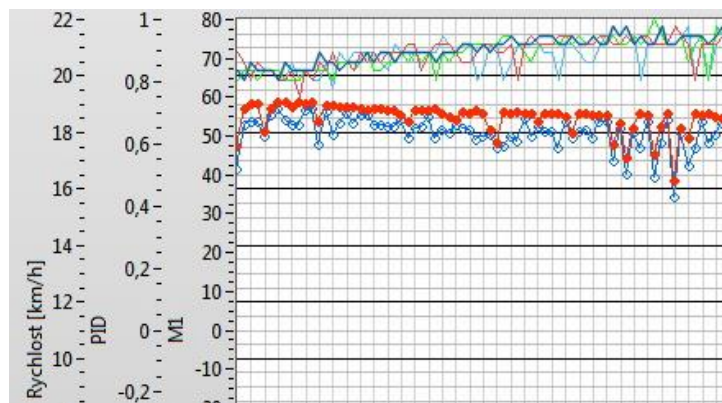
Obr. 4.7 – Měření úhlové rychlosti v FPGA - Block diagram

Během ožiování části programu pro měření úhlové rychlosti se ukázalo, že z hlediska přesnosti je vyhovující čítání pulzů s pevným časovým rámcem. Při časovém oknu 5 ms, které koresponduje s časováním hlavní smyčky a rychlosti 5,089 km/h je přesnost rozlišení následující:

$$q = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{t_w} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \frac{1}{4096}}{0,005} = 0,306\ 796\ rad / s \quad (2.28)$$

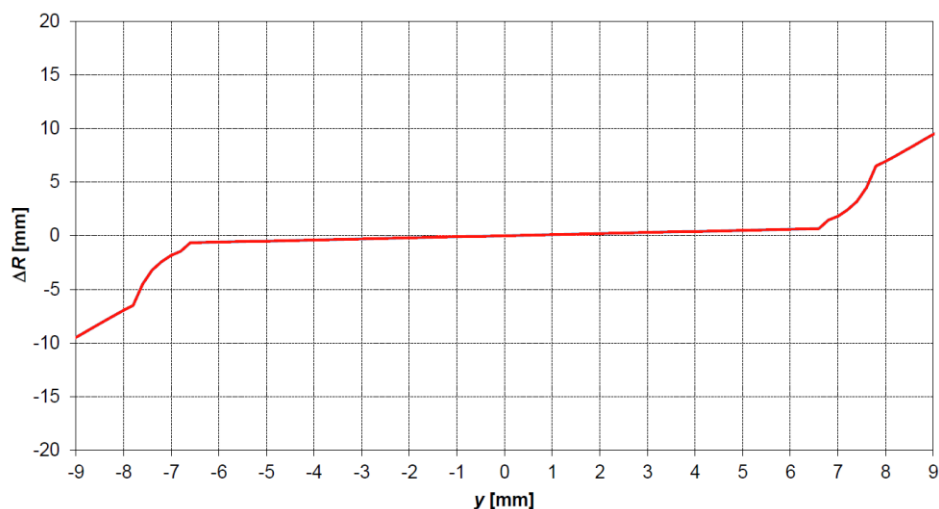
Kde: q – kvantovací krok
 f – frekvence informace o poloze [Hz]
 t_w – časové okno měření [s]

Tato hodnota odpovídá kroku $v = 0,2485$ km/h při rychlosti $v = 5,089$ km/h.



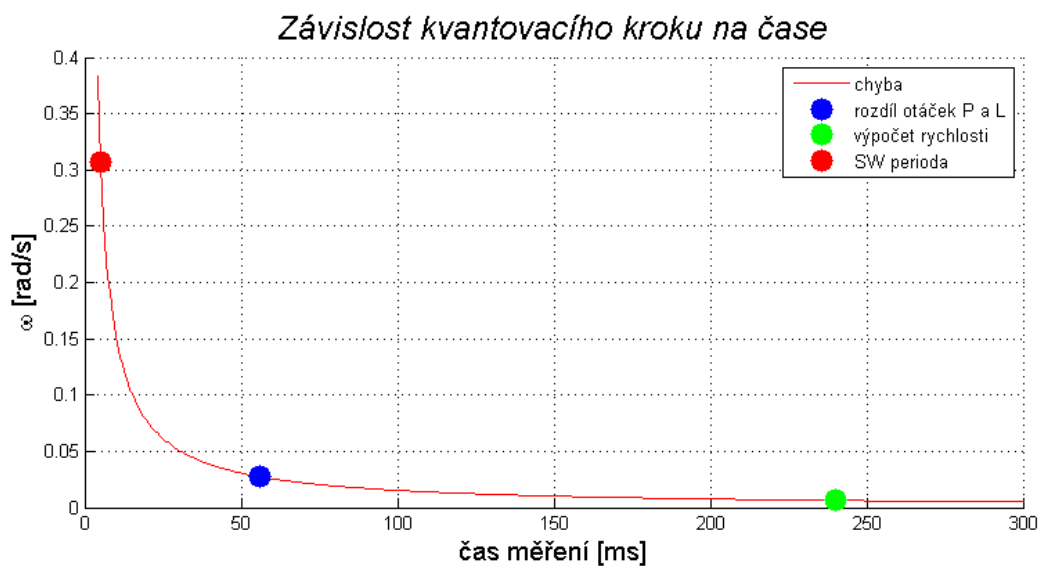
Obr. 4.8 – Záznam rychlosti v horní části při 5 ms (velké kvantovací kroky)

Kuželovitost kola činí 1:10 (šíře kola od středu ven 46 mm). Při příčném posunu v kolejové dráze dochází k rozdílům styčných poloměrů přibližně o 1 mm viz závislost rozdílu poloměrů valení na příčné poloze podvozku v kolejové dráze - Obr. 4.9



Obr. 4.9 – Závislost rozdílu poloměrů valení na příčné poloze podvozku v kolejové dráze (kolejnice 93/18) [2]

Na obrázku Obr. 4.10 je zobrazena závislost kroku na časovém okně pro měření, uvažovaná pro rychlost $v = 5 \text{ km/h}$. První vyznačená hodnota je pro $t_w = 5 \text{ ms}$ dle vztahu (2.28), druhá v pořadí je rozdíl otáček pravého a levého kola při uvažovaném příčném posunutí a dané kuželovitosti. Posledním bodem v grafu je uvažované prodloužení času t_w pro dostatečnou přesnost potřebou pro detekci příčného posunutí v kolejové dráze, výpočet (2.29).



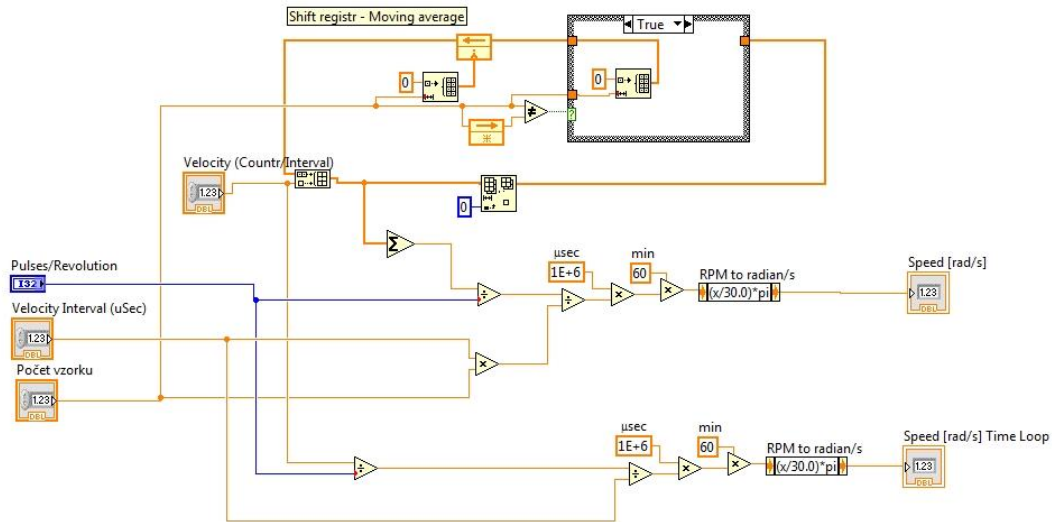
Obr. 4.10 – Závislost kroku na měřícím časovém okně ($v = 5 \text{ km/h}$)

Zvýšení přesnosti bylo dosaženo prodloužením časového intervalu pro výpočet úhlové rychlosti. Nutné bylo zachovat časování 5 ms z důvodu nutné informace pro nadřazené řízení, kdy hlavní rychlost je vypočtena z počtu 48 vzorků jdoucích po sobě. V každé iteraci dojde ke čtení nového vzorku. Schéma výpočtu je na Obr. 4.11 a záznam z jízdy je na Obr. 4.12 při 240 ms.

$$q_{240} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{n_w \cdot t_w} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \frac{1}{4096}}{48 \cdot 0,005} = 0,006392 \text{ rad / s} \quad (2.29)$$

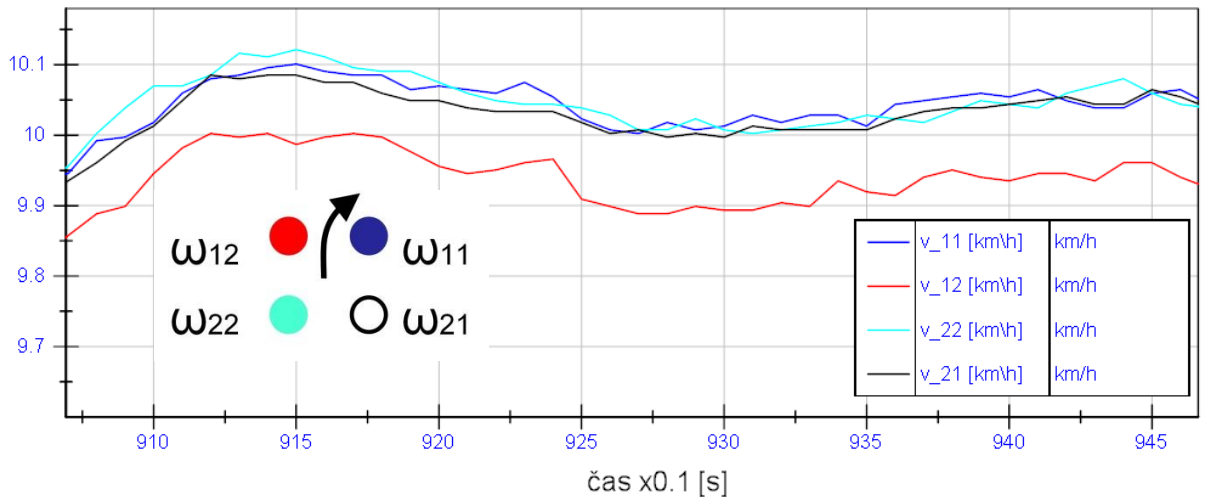
Kde: q – kvantovací krok
 f – frekvence informace o poloze [Hz]
 n_w – počet časových oken pro výpočet rychlosti [-]
 t_w – časové okno měření [s]

Přepočet rad/s na km/h činí 0,81 pro průměr hnacích kol 450 mm. Krok pro časové okno 240 ms je 0,005 178 km/h.



Obr. 4.11 – Výpočet rychlosti individuálně poháněného kola

Obrázek Obr. 4.12 zachycuje záznam z jízdy, jsou již patrné rozdíly v rychlostech jednotlivých kol v podvozku. Na uvedeném obrázku v levé části je zobrazen směr jízdy a rozmístění jednotlivých kol. Z obrázku je vidět že kolo 12 (červené) je nabíhající a vzhledem ke vzpříčené poloze podvozku dochází k poklesu rychlosti proti zbývajícím rychlostem jednotlivých kol. Rozlišovací schopnost otáček pro algoritmus optimalizace řízení je dostačující.



Obr. 4.12 – Záznam z jízdy, na ose y rychlost jednotlivých kol [km/h] (R =60 m)

4.6 TCP komunikace

Předávání dat z nadřazeného řídicího systému do měřicího zařízení firmy VÚKV a.s. pro měření v mechanické části vozidla, bylo zvoleno pomocí TCP protokolu. Požadované veličiny pro přenos jsou úhlová rychlost [rad/s] a žádost o moment [Nm] u všech čtyř poháněných kol. Z toho vychází požadavek na přenos 8. kanálů. Při každém odesílání jednoho kanálu se odesílá 40 vzorků. Přenášena data logovaná VÚKV a.s. se odesílají každých 10 ms. Při uvažované periodě hlavní smyčky 5 ms se odesílají dva vzorky. Zbylých 38 vzorků musí být doplněno, aby byla zachována délka paketu.

Přenášena data, při uvažované periodě hlavní smyčky 5 ms.

- 4 x otáčky $40 \text{ sampl} \times 2\text{B} \times 4 = 320$
- 4 x moment $40 \text{ sampl} \times 2\text{B} \times 4 = 320$

Odesílání se uskutečňuje každých 10 ms. Délka paketu činí $80+320+320+6 = 726 \text{ B}$. Vzhledem k tomu, že data pro logování firmou VÚKV a.s. jsou posílána ve tvaru signed int, jedná se o celočíselné číslo, proto je nutné informace o otáčkách jednotlivých kol vynásobit 10 000.

4.6.1 Komunikační protokol VÚKV a.s.

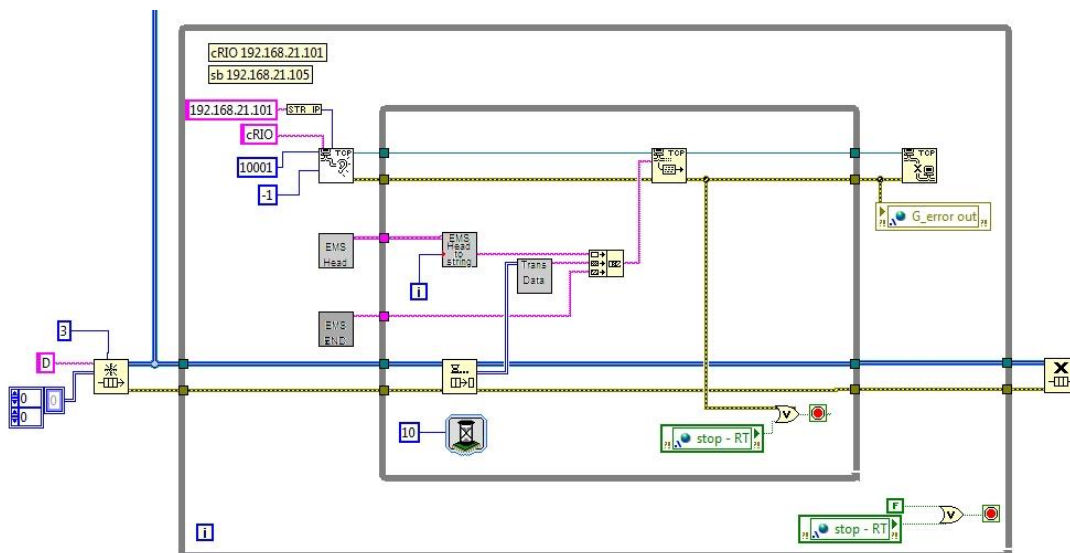
Specifikace datového paketu distribuovaného měřicího systému. Každé měřicí zařízení distribuovaného měřicího systému (např. měřicí kolo) představuje TCP/IP server, který má vlastní IP adresu (IPv4) a komunikuje na přednastaveném čísle portu (obvykle 10001). Server může být realizován jako jednoúčelové HW zařízení nebo jako softwarová aplikace na PC (ADserver). Každý server může mít maximálně 32 kanálů a 32 tzv. subkanálů. [12]

Měřicí software ADclient (aplikace na PC) představuje TCP/IP client, který se připojuje k serverům. ADclient se může současně připojit maximálně ke 32 serverům. ADclient slouží ke sběru, grafickému zobrazení, matematickému zpracování a uložení dat, které servery poskytují. [12]

Datový proud ze serverů je rozdělen do paketů s definovanou datovou strukturou. Z každého serveru jsou pakety vyslány typicky každých 10 ms. Každý paket se skládá z definované hlavičky, dat ze všech kanálů a subkanálů a ukončovacího řetězce. Vzorkovací frekvence

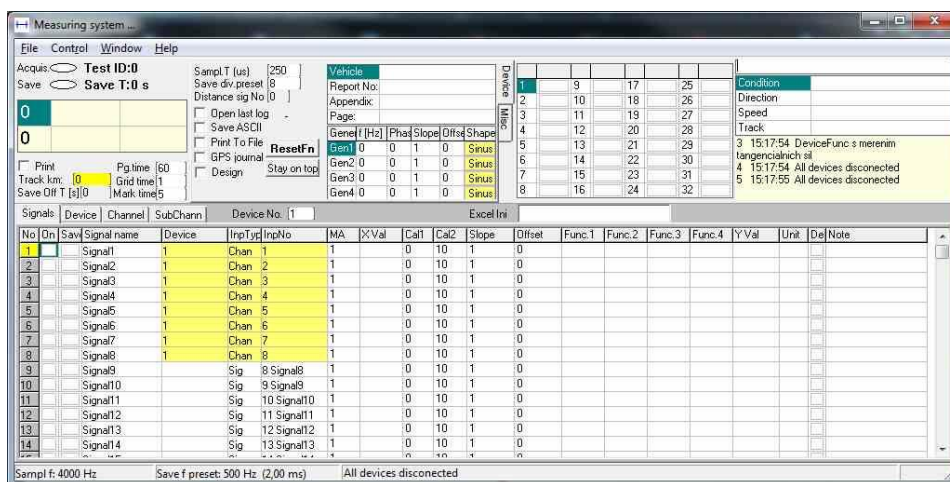
každého kanálu je typicky 4000 sample/s, subkanálu 100 sample/s. Data jsou ze serverů vysílána ihned po připojení klienta. [12]

Komunikace je řešena po ethernetu 2 s IP 192.168.21.101 a portu 10001 s časovou smyčkou 10 ms, Obr. 4.13.



Obr. 4.13 – Komunikace po TCP s VÚKV - Block diagram

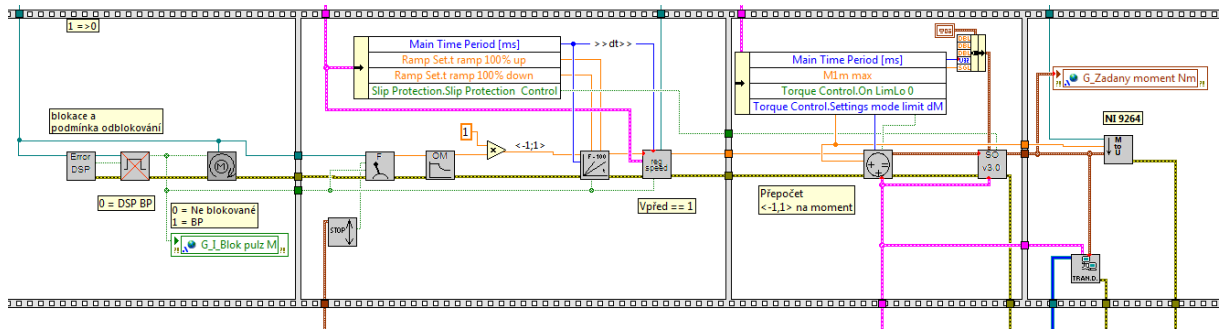
Následující Obr. 4.14 zobrazuje vizualizaci měřicí ústředny, do které jsou předávána data. Program umožňuje vykreslování přijímaných dat do grafů.



Obr. 4.14 – Panel ADclient VÚKV

4.7 Zadávání momentu

Žádost o moment je z ovládacího panelu přivedena do nadřazeného řízení. Struktura programu pro zpracování žádosti o moment je dle Obr. 4.15. V levé části je blok pro načtení a přepočtení žádaného momentu, následuje blok respektování trakční charakteristiky, blok ramp pro omezení nárůstu momentu, omezení maximální rychlosti (regulace rychlosti), přičtení vypočteného přídatného momentu dM a posledním blokem je skluzová ochrana.



Obr. 4.15 – Řízení momentu - Block diagram

4.7.1 Blokace pulzů

Blokace pulzů zajišťuje blokování střídačů. Pro změnu směru jízdy musí být blokovány pulzy na ovládacím panelu. Stejně tak je hlídána informace o chybě z podřazených regulátorů. V případě, kdy dojde k výskytu chyby na jednom z podřazených regulátorů, neprodleně dojde k zablokování pulzů ostatních. Pro odblokování je nutné na ovládacím panelu nejdříve zablokovat pulzy a následně odblokovat.

4.7.2 Načtení vstupu

Při načtení vstupních hodnot z žádosti o moment je nejdříve zjištěno, zda hodnota proudu je v požadovaných mezích. Poté je proveden přepočet hodnoty proudu z rozsahu $-9,8$ až $+9,8$ mA na -1 až 1 . Výstup žádaného momentu z tohoto bloku je dále v návaznosti na tom, zda je navolen směr jízdy a odblokovány pulzy.

4.8 Omezovač dostupného momentu

Při zadávání požadovaného momentu pro podřazený regulátor je zadání analogové v rozsahu $-7,5$ až $7,5$ V. Tato hodnota odpovídá 150 % momentu motoru ($52,5 \times 1,5 = 78$ Nm). Z toho plyne, že při zadání řídicí páky na 100 % je výstupní hodnota z nadřazeného

řízení 7,5 V. Protože experimentální kolejové vozidlo využívá i oblast odbuzování, dochází k poklesu dostupného momentu na trakčním motoru. To má za následek, že hodnota na výstupu nadřazeného řízení není totožná s momentem na trakčním motoru v režimu odbuzování.

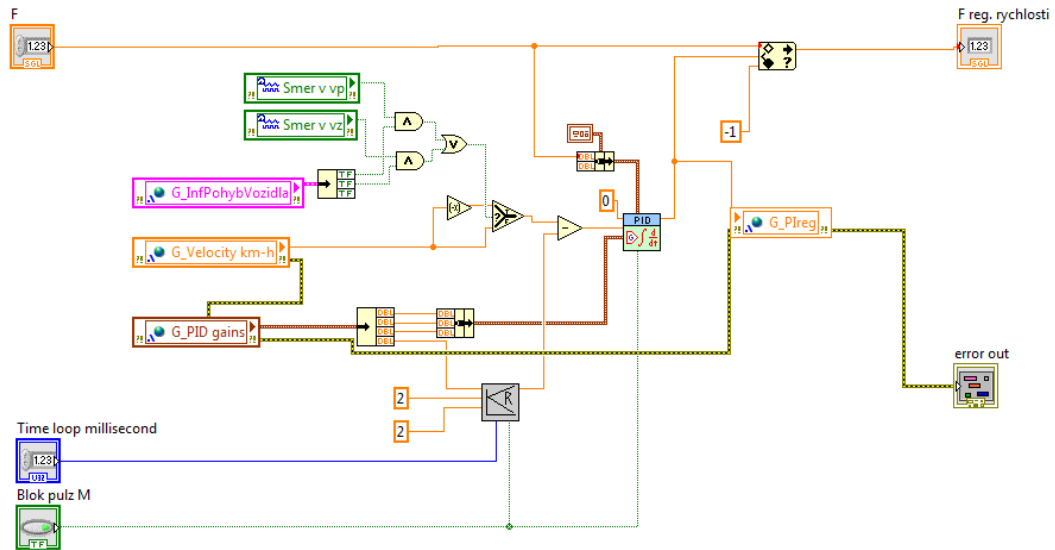
Z těchto důvodů je nutné respektovat trakční křivku momentu v režimu odbuzování. Dle této křivky je nutné omezit dostupný moment zadávaný pákou v návaznosti na velikost rychlosti, které odpovídá daný dostupný moment. Filozofie zadávání požadovaného momentu řídicí pákou je tedy na experimentálním vozidle stejná, jako na běžných drážních vozidlech, zadání z páky představuje požadavek na poměrný tah vztahovaný k maximálnímu dostupnému tahu při aktuální rychlosti vozidla. Rychlost, při které dochází k přechodu z režimu konstantní tažné síly do režimu konstantního výkonu, kdy začíná klesat s rostoucí rychlostí dosažitelná tažná síla, koresponduje s přechodem pohonu do režimu odbuzování a pohybuje se v rozmezí 17 až 18 km/h v závislosti na stavu nabití akumulátorů, tj. v závislosti na napětí stejnosměrné sběrnice vozidla.

4.9 Rampa

Blok s rampou pro žádaný moment slouží k eliminaci rychlých změn žádosti z ovládacího panelu. Je možné nastavit jak rychlost nárůstu, tak poklesu. Při testování se ukázalo, že tato rampa není zapotřebí vzhledem k tomu, že nedochází k rázům v regulaci ani při rychlých změnách polohy řídicí páky.

4.10 Omezovač rychlosti

I přesto, že v podřazených regulátorech je implementováno omezení rychlosti, byl i do nadřazeného řízení zařazen tento blok a to jak z důvodu možnosti nastavovat maximální rychlost pomocí PC během jízdy vozidla, tak i z důvodů provádění experimentů při definované rychlosti.



Obr. 4.16 – Schéma omezení rychlosti

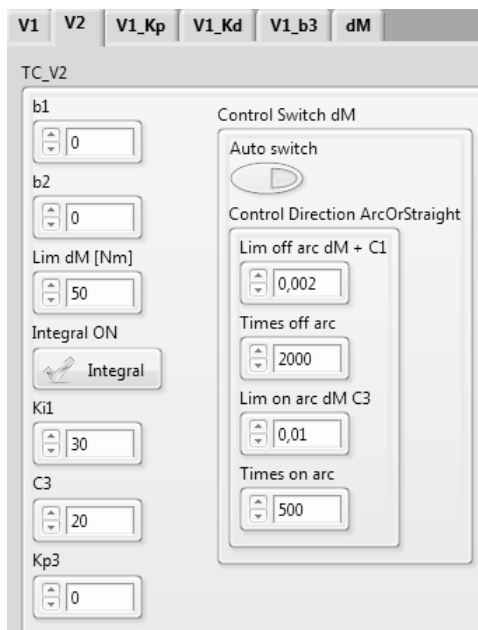
Obr. 4.16 zachycuje blokový diagram omezení rychlosti vozidla. V horní části vlevo vstupuje žádost momentu z ovládacího panelu, ta vstupuje do horní limitace výstupu PID regulátoru a do bloku omezení shora. To znamená, že výstupní hodnota z bloku regulátoru rychlosti nemůže být větší, než žádaná hodnota momentu z ovládacího panelu. Při zadání žádosti o maximální moment je na vstupu PID regulátoru regulační odchylka, na výstupu je maximální výstupní hodnota PID regulátoru limitovaná vstupní hodnotou momentu z ovládacího panelu. Během poklesu regulační odchylky dochází k poklesu žádosti o moment i přesto, že páka na ovládacím pultu je v maximální poloze. V případě jízdy z kopce a překročení maximální nastavené hodnoty rychlosti na PID regulátoru je výstupem požadavek na moment záporný. Tím vozidlo přechází do rekuperačního brzdění.

4.11 Způsob výpočtu přídatného momentu

Oblasti výpočtu přídatného momentu po stránce teoretické byla věnována kapitola 2.4. Na vozidle byla postupně implementována a odladěna varianta dvě, ta je popsána v kapitole 2.4.4.

Obr. 4.23 zachycuje HMI panel sloužící pro výběr a možnost parametrování výpočtu přídatného momentu. Zde je zachyceno okno pro aktivní variantu výpočtu dva. Odladěné hodnoty nastavení jsou následující $c_1 = 7000$, $c_2 = 0$, $Lim dM = 50$, Integral On, $K_{i1} = 30$, $c_3 = 60$. Vidíme, že $c_2 = 0$ tj. nepoužívá se, je to dáno skutečností, že během jízdy v přímé trati nedochází ke vzpříčené poloze. Další hodnotu je limitace maximálního přídatného momentu,

zde je možné nastavit omezení a tím i vhodně provádět korekce. Hodnota K_{i1} je integrační konstanta složky s proporcionálním koeficientem c_1 . Složka s koeficientem c_3 je pouze integrační.

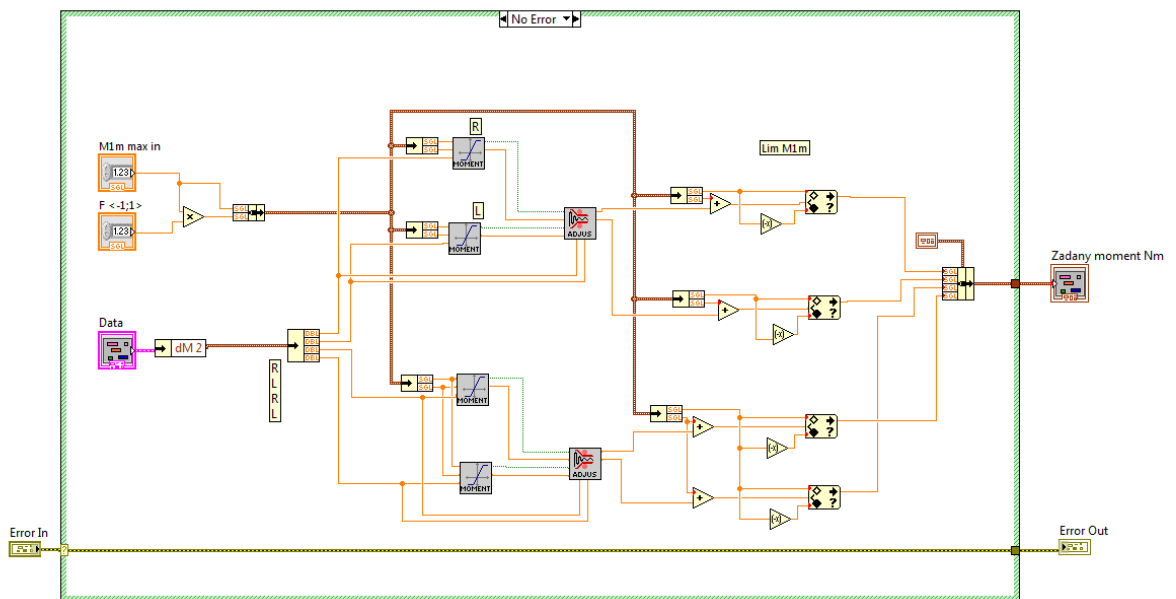


Obr. 4.17 – Blok ovládání výpočtu přídavného momentu

Pravá část obrázku obsahuje možnosti nastavení automatického přepínání algoritmů mezi přímou trati a obloukem. Zde je možné nastavit citlivost pro přepínání z přímé trati na oblouk. Horní záložky obsahují dále ještě variantu výpočtu algoritmu verze 1 a její možné modifikace, které ale nebyly použity. Poslední záložka označena dM umožňuje manuální rozrovnávání momentů za účelem provádění experimentů s jednostranným nabíháním podvozku.

4.12 Přičtení přídavného momentu

Jedná se o blok pro součet momentu žádaného z ovládacího pultu a vypočteného dM . Nejdříve je nutné přepočítat bezrozměrnou veličinu na jednotky Nm. K tomuto přepočtu je nutné znát hodnotu maximálního dostupného momentu synchronního motoru s permanentními magnety. Poté je možné řešit přičítání a odečítání od žádaného momentu tak, aby byla zachována konstantní tažná síla. Proto v případě, kdy na jedné straně moment zvětšíme, musí dojít ke stejnému snížení momentu na protější straně.



Obr. 4.18 – Limitace přídavného momentu

V situaci kdy přídavný moment je větší, než moment dostupný, nastává problém. V případě součtu je limitace provedena ošetřením výstupní hodnoty. Tento případ je v pořádku. Problém nastává na protilehlém pohonu, kde dojde k odečtení momentu. Zde nastává nerovnováha v tažné síle a výsledná tažná síla bude menší.

Proto tento blok musí řešit i omezení přídavného momentu, aby nedocházelo k ovlivňování celkové požadované tažné síly. V případě, kdy součet požadavku na zadaný moment s momentem přídavným převyšuje dostupný moment, je nutné na protilehlém pohonu odečíst pouze skutečně přidanou hodnotu momentu. Tímto řešením nedojde k ovlivnění požadované tažné síly. Výsledkem tohoto řízení je, že optimalizace řízení pohonu je realizována pouze v možnostech dostupného momentu a požadavek na tažnou sílu má vyšší prioritu.

4.12.1 Ovlivnění energetické náročnosti

Za účelem zkoumání vlivu algoritmu optimalizace na energetickou náročnost jízdy byly vytvořeny čtyři varianty omezení přídavného momentu v návaznosti na polohu řídicí páky. Polohu řídicí páky můžeme rozdělit na tři oblasti: jízda (J), výběh (V) a brzda (B). Algoritmus limitace přídavného momentu je realizován v subVI *Setpoint torque sum d torque v2*.

Var. omezení 1 (aktivní ΔM)

První varianta řízení limitace přídavného momentu ΔM má pouze omezení maximálního dostupného momentu v jízdě a maximálního brzdného momentu. Tento režim nerozlišuje polohu řídicí páky. Režim umožňuje použít největší hodnotu přídavného momentu ΔM . Aby nedocházelo k používání velkých rozdílů přídavného momentu, je možné nastavit limitaci maximálního přídavného momentu ΔM .

Var. 2 omezení (aktivní ΔM v J)

Druhá varianta omezení přídavného momentu ΔM je ze všech variant nejvíce omezující. Tím je i značně omezeno využití optimalizace řízení. Aktivní oblastí je pouze režim jízda (J). Velikost přídavného momentu je zde limitována maximálním momentem či adhezí a zespoda pak nulovým momentem motorů. Během režimu brždění (B) je přídavný moment deaktivován a momenty na pravé a levé straně podvozku jsou shodné.

Var. omezení 3 (aktivní ΔM v J a B)

Je to varianta řízení přídavného momentu, která nejvíce odpovídá chování algoritmu tramvaje 15T. U tramvaje 15T v SW nemůže nastat požadavek v jeden okamžik na tah a brzdu. Z těchto skutečností plyne, že přídavný moment je aktivní při jízdě (J) s omezením z vrchu dostupným momentem. Ten je omezen skluzovou ochranou. Ze zdola je omezení nulovým momentem. V režimu výběh (V) není algoritmus výpočtu přídavného momentu aktivní a optimalizace se nerealizuje. Při režimu brždění (B) je algoritmus stejný jako při režimu jízda (J). Zde je moment omezen maximálním brzdným momentem adhezními podmínkami a zdola nulovým brzdným momentem.

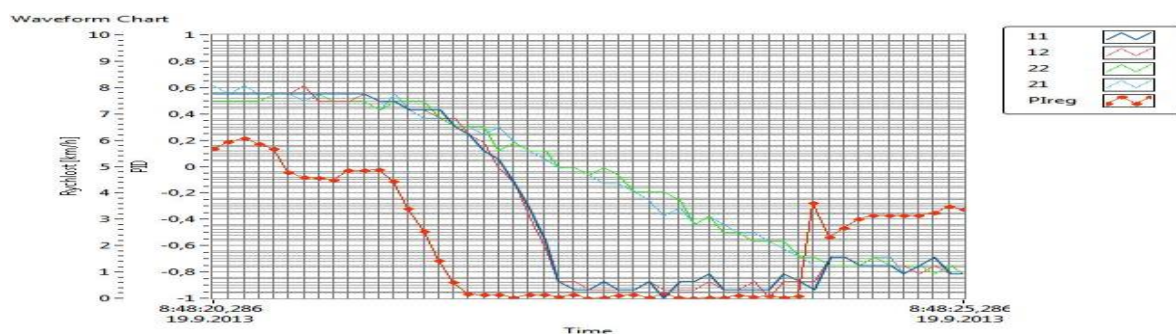
Var. omezení 4 (aktivní ΔM v J, B a V)

Varianta navazuje na předchozí variantu omezení přídavného momentu, která byla rozšířena o režim výběh. Při nulové poloze řídicí páky a pohybu vozidla je aktivní přídavný moment ΔM .

4.13 Protiskluzová ochrana

Požadavek na protiskluzovou ochranu i u experimentálního vozidla vzešel až v průběhu testování na dráze. Ukázalo se, že za běžných podmínek ke skluzu nedojde. Skluzu bylo

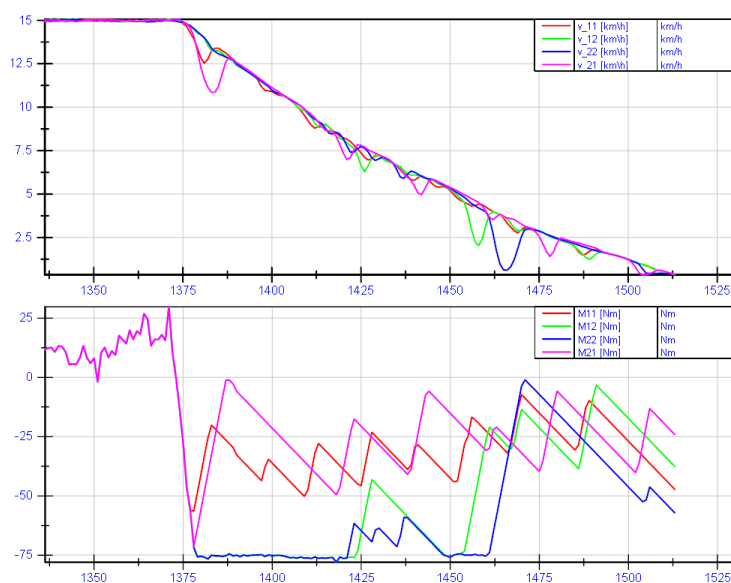
dosaženo pouze za nepříznivých povětrnostních vlivů, jako je rosa či mrholení. Za deště k problémům nedocházelo.



Obr. 4.19 – Skluz dvojkolí

Obr. 4.19 zachycuje skluz dvojkolí při zastavování vozidla, ke kterému došlo při oživování v ranních hodinách. V režimu rozrovnání momentů je systém náchylnější na skluz, především v případě, kdy bude požadavek na velký přídavný moment ΔM . Proto došlo k doplnění o blok skluzové ochrany (SO).

Verze 3.0 skluzové ochrany obsahuje individuální regulaci jednotlivých pohonů. V režimu elektrodynamické brzdy (EDB) je nutné porovnání s maximální rychlostí, aby nedošlo ke skluzu při brždění vozidla. Obrázek Obr. 4.20 zachycuje skluz při režimu EDB a následnou eliminaci pomocí skluzové ochrany. V dolní části vidíme zásah do momentu a zamezení skluzu.

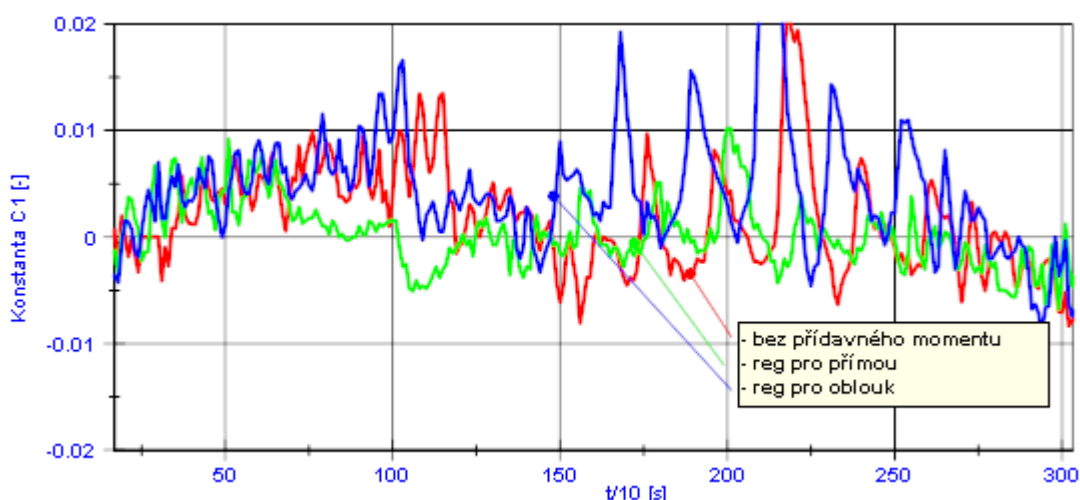


Obr. 4.20 – Skluz se zapnutou SO v3.0 nastavení 100 % EDB

4.14 Automatické přepínání výpočtu přidavného momentu

Nejdříve bylo nutné analyzovat závislost chování vozidla při nájezdu do oblouku a z výjezdu oblouku. Snahou bylo analyzovat závislost přepínání algoritmů pro přímou trať a oblouk tak, aby nebylo nutné experimentálně vozidlo ani tramvaj 15T dodatečně osazovat některým ze snímacích senzorů. Proto bylo rozhodnuto, že přepínání pomocí GPS bude brána jako další možnost. Snahou bylo získat potřebné informace pomocí úhlových rychlostí jednotlivých kol a z nich počítané výrazy u koeficientů c_1 a c_3 .

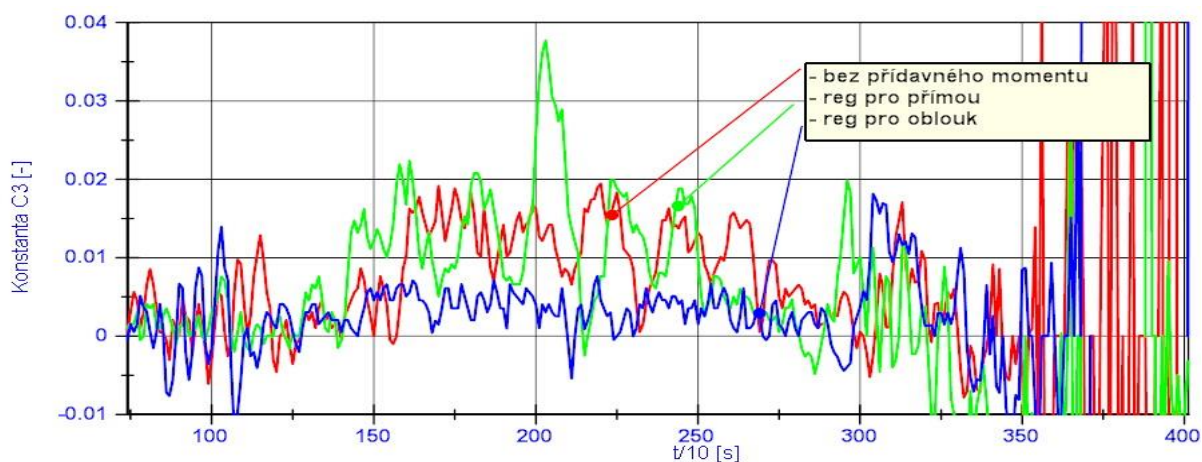
V následujících grafech jsou zaznamenány tři průběhy. První graf obsahuje výraz u koeficientu c_1 , následující výraz u koeficientu c_3 , které jsou uplatňovány v řízení V2 (kapitola 2.4.4). Jedná se o jízdu přímá trať, oblouk a přímá trať a zpátky. Tento záznam byl opakován pro tři různé výpočty ΔM . První záznam (červený) je průjezd bez přidavného momentu, kde v čase $t = 15$ s vjíždí vozidlo do oblouku. Následuje jízda s aktivním výpočtem přidavného momentu ΔM pro přímou trať (zelená). Při poslední jízdě byl použit režim výpočtu pro oblouk (modrá).



Obr. 4.21 – Vypočtené regulační odchylky u koeficientu c_1 při průjezdu obloukem ($t = 15$ s)

Z průběhu na Obr. 4.22 vidíme, že při jízdě s aktivním výpočtem pro přímou trať regulační odchylka – výraz u koeficientu c_3 v čase $t = 15$ s detekuje nájezd do oblouku (zelený). Je zde patrný značný nárůst regulační odchylky u koeficientu c_3 , která dosahuje hodnoty výrazně přes 0,01 s časem převyšující $t_{onarc} = 500$ ms nutný pro aktivaci algoritmů optimalizovaného řízení pro oblouk. V tomto okamžiku uvažujeme přepnutí na výpočet pro oblouk (modrý). Pro

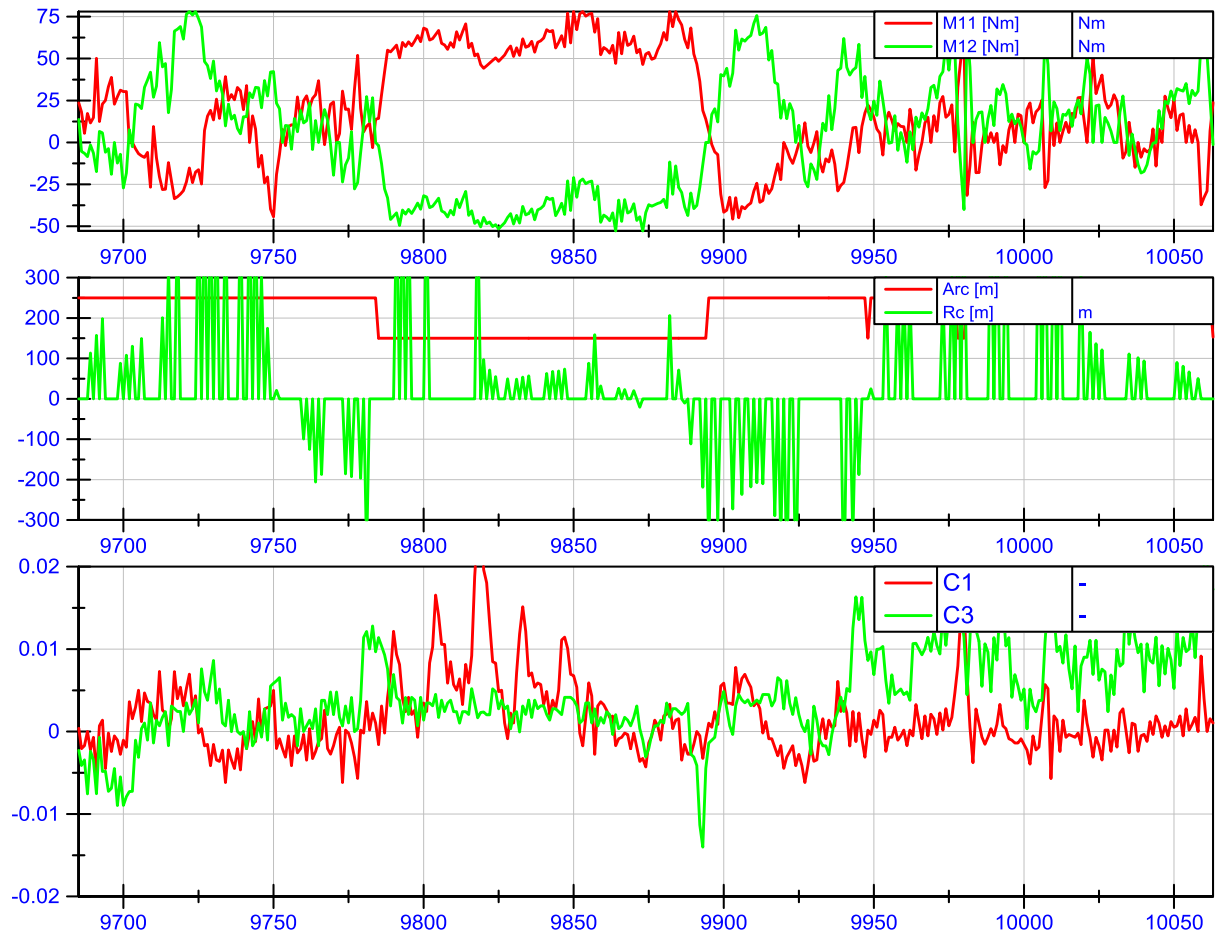
indikaci vjezdu do oblouku je tedy využita informace o velikosti regulační odchylky u koeficientu c_3 .



Obr. 4.22 – Vypočtené regulační odchylky u koeficientu c_3 při průjezdu obloukem ($t = 15$ s) – tři režimy řízení pohonů

Za účelem vyladění automatického přepínání režimů přímá trať/oblouk bylo možné parametrovat řadu veličin vztahujících se k zapnutí aktuálního režimu včetně filtrování regulačních odchylek u koeficientů c_1 a c_3 . Později z chování regulační odchylky se zjistilo, že na výjezdu z oblouku dochází k překmitnutí přídavných momentů do opačné polarity oproti přídavným momentům při průjezdu obloukem.

Na základě testování automatického přepínání byla vyladěna varianta, kdy je vypnutí algoritmu výpočtu pro oblouk je realizováno v návaznosti na vypočítaný přídavný moment $\Delta M < 5$ Nm. Obrázek Obr. 4.23 zachycuje průjezd části tratě. Časová osa má měřítko index x $0,1 = t$ v s. Z průběhu regulační odchylky u koeficientu c_3 (vzpříčená poloha) vidíme místo přepnutí z režimu přímé trati do oblouku (index 9775). Zde došlo k překročení hodnoty regulační odchylky u koeficientu c_3 nad hodnotu 0,01 po dobu větší než 500 ms. Po přepnutí režimu výpočtu vidíme následný pokles regulační odchylky u koeficientu c_3 na hodnotu kolem 0,005. Po vyrovnání momentů M_{11} a M_{12} (index 9900) vidíme přepnutí výpočtu přídavného momentu ΔM na přímou trať.



Obr. 4.23 – Auto switch, set param toff $\Delta M < 5$ Nm

s počítačem PC UPCE přes ethernet, zde jsou logovány příslušné veličiny (I_{TRA} – proud odebíraný trakcí, U – napětí akumulátorů, v_{11} – rychlost pravého předního kola, v_{12} – rychlost levého předního kola, v_{22} – rychlost levého zadního kola, v_{21} – rychlost pravého zadního kola, M_{11} – žádost o moment pravého předního trakčního motoru, M_{12} – žádost o moment levého předního trakčního motoru, M_{22} – žádost o moment levého zadního trakčního motoru, M_{21} – žádost o moment pravého zadního trakčního motoru, PI_{reg} – výstup z regulátoru omezení rychlosti, výkon, energie atd.).

Mechanické veličiny (s výjimkou okamžitých rychlostí kol) jsou měřeny prostředky firmy VÚKV a.s., kdy jednotlivé snímače jsou připojeny přes rozhraní ethernet k průmyslovému počítači. Ten dále v sobě sdružuje i data o úhlových rychlostech a momentech na jednotlivých kolech, která jsou posílána z nadřazeného řídicího systému vozidla přes ethernet.



Obr. 5.2 – Měřící vybavení VÚKV a.s., průmyslový počítač a UTP kabely pro připojení snímací techniky

5.2 Senzorická část

Experimentální kolejové vozidlo je vybaveno celou řadou snímačů sloužících ke komplexní indikaci vlastností podvozku v kolejové dráze a zjištění vlivu optimalizačních algoritmů nadřazeného řízení na vedení podvozku v kolejové dráze. Hlavní výčet snímaných mechanických veličin je následující:

- rychlost, ujetá dráha,
- natočení podvozku vůči hlavnímu rámu,
- poloha podvozku v koleji (příčná poloha, úhel náběhu),

- síly v kontaktu kolo-kolejnice (příčné a svislé),
- zrychlení na čepu kola,
- zrychlení na nápravnicích,
- zrychlení na rámu podvozku,
- nedostatek převýšení.

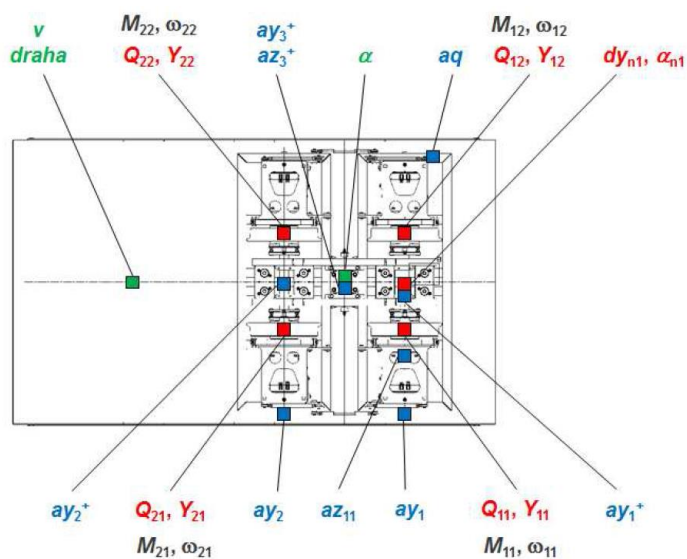
Pro měření zmiňovaných veličin jsou použity snímače uvedené v Tab. 5.1 Rozmístění snímačů na vozidle zobrazuje Obr. 5.3

Tab. 5.1 - Výčet senzorů umístěných na experimentálním kolejovém vozidle [2]

Veličina	Způsob měření	Typ snímače, výrobce	Umístění
Síly v kontaktu kolo - kolejnice (příčné, svislé)(všechna 4 kola) Y_{ij}, Q_{ij} [kN]	ojnice polepené tenzometry	Foliový tenzometr 1-LY11-6/120 HBM	Tenzometry na ojnicích
Poloha nápravnice v koleji (posunutí v příčném směru, úhle náběhu), $d_{y_{n1}}$ [mm], α_{n1} [rad]	snímač úhlu náběhu: = přípravek + snímače polohy měřící polohu nápravnice vůči kolejnicím na 4 místech $Y_{11,1}, Y_{11,2}, Y_{12,1}, Y_{12,2}$ [mm]	Snímač polohy TR 50 Novotechnik (Orbit Merret)	Na nápravnici
Natočení podvozku α [rad]	prostřednictvím relativních pohybů podvozku vůči hlavnímu rámu měřených na 2 místech d_{y1}, d_{y2} [mm]	Lankový snímač polohy PT1A 0030 DN 10K M6 Novotechnik (Orbit Merret)	Na rámu vozu/ rámu podvozku
Poloha GPS, rychlost v [km/h]	samotný snímač	GPS Garmin 18x - 5 Hz Garmin	Na rámu vozu
Rychlost (druhý způsob měření, v případě výpadku příjmu GPS) v [km/h]	snímač na třetí (běžné) nápravě	Inkrementální magnetický snímač ISP 130 S Zlatokov	Na nápravě/ rámu vozu
Zrychlení na čepu kola (svislý směr) az_{11} [m/s^2]	samotný snímač	Akcelerometr 2220-025 Silicon Designs	Na čepu kola
Zrychlení na nápravnicích (příčný směr) ay_1, ay_2 [m/s^2]	samotný snímač	Akcelerometr 2220-025 Silicon Designs	Na nápravnicích

Veličina	Způsob měření	Typ snímače, výrobce	Umístění
Zrychlení na rámu podvozku (příčný, svislý směr) $ay_{1+}, ay_{2+}, ay_{3+}, az_{3+}$ [m/s^2]	samotný snímač	Akcelerometr 2220-025 Silicon Designs	Na rámu podvozku
Nedostatek převýšení aq [mm]	samotný snímač	Inklinoměr PMP-10HTL Midori (Pewatron)	Na nápravnici
Otáčky kol ω_{ij} [s^{-1}]	přebírání ze systému pro regulaci pohonu		
Hnací moment M_{ij} [Nm]	přebírání ze systému pro regulaci pohonu		

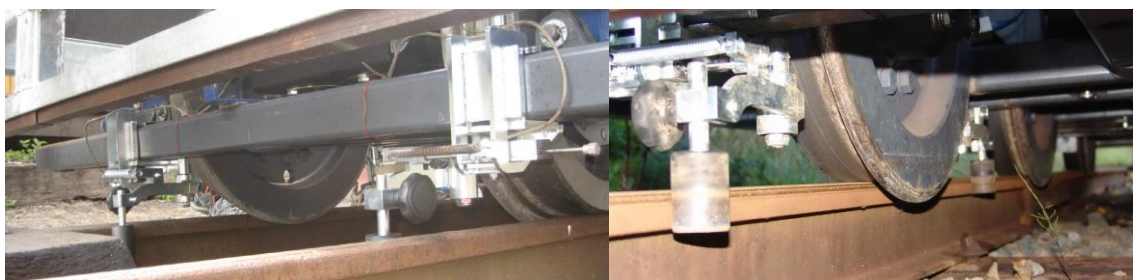
Instalaci a kalibraci měřicí techniky prováděla firma VÚKV a.s., která pomocí vlastního SW zpracovává a loguje příslušné výše zmiňované veličiny.



Kde: aq – nedostatek převýšení [mm]; $ay_{1+}, ay_{2+}, ay_{3+}, az_{3+}$ – zrychlení na rámu podvozku [m/s^2]; ay_i – příčné zrychlení na nápravnicích [m/s^2]; az_{11} – svislé zrychlení na čepu kola [m/s^2]; dy_{n1} – příčná poloha kol v koleji [mm]; $M_{11}, M_{12}, M_{21}, M_{22}$ – hnací moment [Nm]; $Q_{11}, Q_{12}, Q_{21}, Q_{22}$ – kolový tlak [kN]; v – rychlost [km/h]; $Y_{11}, Y_{12}, Y_{21}, Y_{22}$ – vodící síly v kontaktu kolo-kolejnice [kN]; α – úhel natočení podvozku vůči rámu [$^\circ$]; α_{n1} – úhel náběhu první nápravnice [$^\circ$] a $\omega_{11}, \omega_{12}, \omega_{21}, \omega_{22}$ – úhlová rychlost kol [rad/s].

Obr. 5.3 – Půdorys rozmístěním snímačů na experimentálním vozidle [3]

Vozidlo je dále vybaveno kladkami pro snímání polohy podvozku v kolejové dráze. Kladky jsou použity čtyři na první nápravnici, ta je zobrazena na Obr. 5.4. Obrázek zachycuje pouze první pár snímačů. Pomocí těchto snímačů je možné pozorovat příčnou polohu podvozku v kolejové dráze vůči kolejnicím. Dále je možné vyhodnotit vzpříčenou polohu a nabíhání podvozku v oblouku. Kladkami je měřen i rozchod kolejnic, který se v průběhu trasy v určitých mezích mění. Konstrukce kladkového snímače je řešena válečkem, ten je přitahován pružinou a tím je zajištěno jeho odvalování po kolejnici. Poloha ramene kladkového snímače je snímána lineárním potenciometrem.



Obr. 5.4 – Kladky pro snímání úhlu náběhu a příčné polohy podvozku [3]

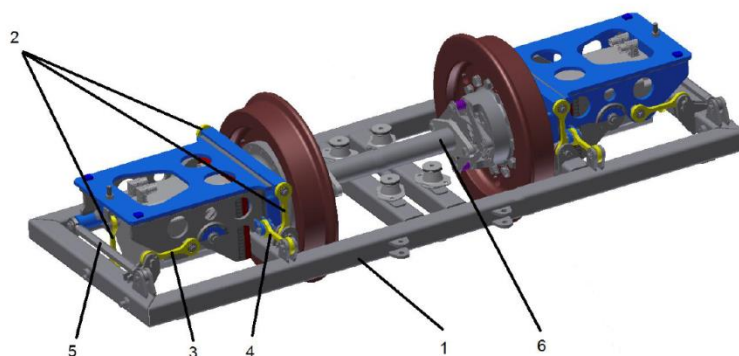
Snímání úhlu natočení podvozku vůči skříni vozidla je realizováno pomocí dvou lankových potenciometrických snímačů, které jsou umístěny na dvou různých místech. Snímač je uchycen k rámu vozidla a lanko pak příčně k ose podvozku. Teoreticky by pro měření dostačoval pouze jeden snímač. Ze znalosti vzájemné vzdálenosti těchto dvou míst je pak určen úhel natočení. [3]

Snímač zrychlení, nedostatku převýšení a rychlosti jízdy jsou měřeny přímo příslušným snímačem.

5.2.1 Měření silových účinků - tenzometry

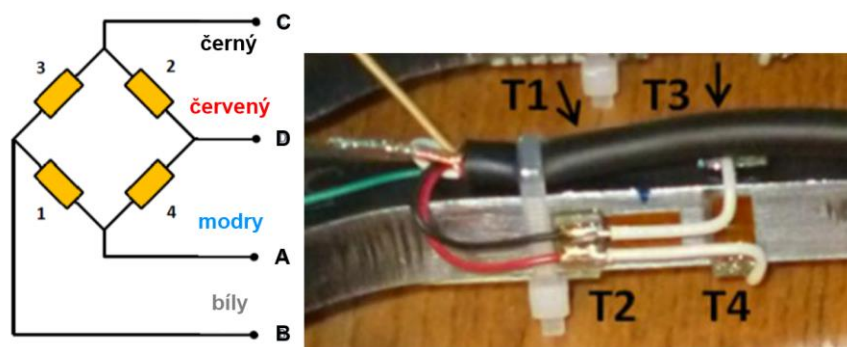
Jedněmi z klíčových veličin, které je nutné měřit pro ověření metody optimalizovaného řízení individuálně poháněných kol, jsou síly působící na jednotlivá kola. Silové účinky vznikají v kontaktu kolo-kolejnice. Měřící body byly vytipovány při návrhu vozidla pracovníky VÚKV a.s.. Jedná se o body, ve kterých bude možné snímat silové účinky v jednotlivých částech podvozku experimentálního vozidla. Za tímto účelem bylo i navrženo uložení motoru, který je uložen tzv. v kleci (Obr. 5.5 modře). Na kleci je zavěšena nápravnice poz. (1) pomocí tenzometrických ojnicěk (žlutě vyznačeno), poz. (2) jsou tři svislé ojničky. Fixaci v podélném směru zajišťuje tenzometrická ojnička poz. (4) ve spojení se stavitelným šroubovým spojením

poz. (5) s absencí tenzometrického snímače. K měření příčných vodících sil slouží tenzometrická ojniceka poz. (3), ta zajišťuje fixaci v příčném směru. Klec je celkově uchycena k nápravnici přes pět tenzometrických ojnickek pro zmapování silových účinků působících v bodě styku kolo-kolejnice. Uložení ojnickek je realizováno pomocí kloubových ložisek, tím je dosaženo lepšího přenosu sil, tímto uložením jsou eliminovány všechny síly kromě měřených. Obr. 5.5 zachycuje provedení jedné nápravnice včetně propojovací hřídele poz. (6).



Obr. 5.5 – Nápravnice experimentálního vozidla s rozmístěním měřících ojnickek (2),(3) a (4) [2]

Měření silových účinků vychází z deformace ojnickek, které jsou osazeny tenzometry. Osazení ojnickek tenzometrickými snímači bylo provedeno na DFJP v místních laboratorních podmínkách. Na každou ojnicčku byly nalepeny čtyři snímače, které jsou zapojeny do plného měřícího můstku. Zapojení tenzometrického můstku ojnicčky je uvedeno na Obr. 5.6.



Obr. 5.6 – Detail zapojení tenzometryckých snímačů (2),(3) a (4) [2]

Pro dosažení lineárního převodu měřené síly na elektrický signál jsou tyto ojniccky polepeny tenzometry uprostřed. Tenzometry jsou umístěny vždy dva na protilehlých stranách, z toho dva tenzometry jsou instalovány horizontálně a dva vertikálně viz. Obr. 5.6 vpravo.

Tenzometrický můstek je zapojen pomocí čtyř vodičů do zesilovače, ten provede zesílení a transformaci na komunikaci po ethernetu.



Obr. 5.7 – Ojničky osazené tenzometry před kalibrací (2),(3) a (4) [2]

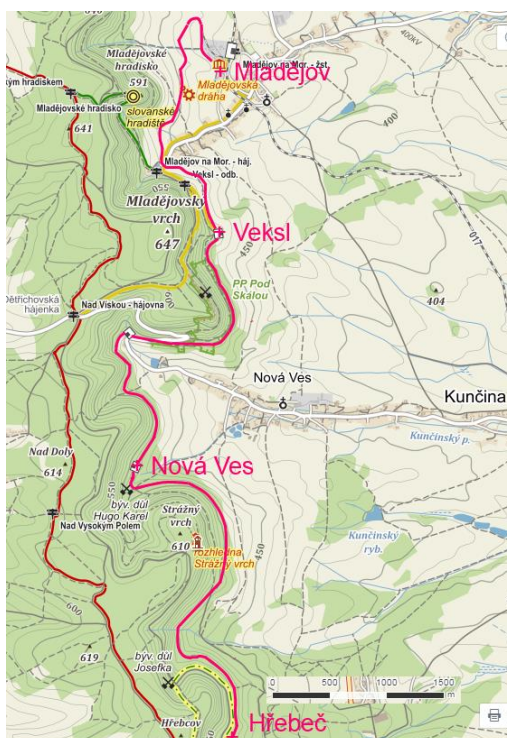
Kalibrace tenzometrů

U polepených ojnicí tenzometry bylo nutné před vlastní montáží provést kalibrační měření, aby byla známá převodní charakteristika napětí/síla. Kalibrace byla provedena na akreditovaném zkušebním pracovišti Dopravní fakulty Jana Pernera v Pardubicích. Zkušební pracoviště disponuje hydraulickým válcem, tím je možné vytvářet jak kladnou tak zápornou sílu. Během tohoto měření došlo ke střídavému namáhání a současně byla měřena hodnota síly z tenzometrického snímače pro každou ojnicí. Příklad kalibračního protokolu je uveden v příloze - Příloha H. Výstupem z kalibrace je průběh měření v čase, uvedený ve spodní části. Červený průběh znázorňuje sílu, jaké byla ojnicí vystavena, modře potom napětí z tenzometrů. Horní část protokolu obsahuje stanovenou převodní rovnici mezi působící silou a výstupním napětím. Výstupní rovnice dává informaci o převodu kN působící síly na mV/V měřeného napětí. [2]

5.3 Postup experimentálních jízd

Vozidlo již od počátku bylo koncipováno jako úzkorozchodné pro Mladějovskou průmyslovou dráhu o rozchodu 600 mm. Výhodou je dostupnost této dráhy a skutečnost, že zde neprobíhá pravidelný provoz. Dalším aspektem je charakteristický tvar této tratě v terénu a s tím související i velmi rozdílný stav profilu tratě – obsahuje množství oblouků o malém poloměru a i velký rozptyl sklonových poměrů (maximální sklon tratě okolo 25 ‰). Délka Mladějovské průmyslové dráhy čítá 11 km. Snímek mapy tratě je uveden na Obr. 5.8, v horní

části se nachází Mladějov na Moravě a konečná stanice Hřebeč je dole. Charakteristika tratě je součástí přílohy (viz. Příloha I).



Obr. 5.8 – Mladějovská průmyslová dráha

Za účelem měření byly vytipovány úseky vhodné pro měření přímé tratě a oblouku včetně zahrnutí sklonových poměrů. Nejnáročnější úseky se nacházejí na počátku trati, zde se nachází i úsek, jenž obsahuje jak prudké stoupání 25 %, tak i oblouk o poloměru 60 m (viz. Obr. 6.14).

Při počátečních jízdách v Mladějově bylo vozidlo provozováno se spojenými koly, tj. bylo spojeno pravé kolo s levým pomocí hřídele. Pomocí tohoto řešení bylo možné provést měření na vozidle s dvojkolím. To je nezbytné pro účely komparace chování podvozků, které obsahují dvojkolí a které obsahují nezávisle otáčivá kola. Po tomto měření byla hřídel pro ostatní měření odpojena a tím zrušena pevná vazba mezi koly.

Postup měření na experimentálním kolejovém vozidle s nezávisle otáčivými koly lze rozdělit do několika částí v návaznosti na řešenou oblast. Ty jsou řazeny chronologicky podle sekvence realizování, která vychází z vývoje příslušných algoritmů:

- měření vlivu optimalizovaného řízení v oblouku

- měření vlivu optimalizovaného řízení v přímé trati
- měření vlivu optimalizovaného řízení s automatickou detekcí oblouk/přímá trať
- vliv parametrů optimalizovaného řízení na spotřebu trakční energie

Z rozdělení postupu experimentálních jízd je nutné definovat oblouk a přímou trať pro účely měření. Již ze simulací bylo patrné, že hranice mezi tratí, kterou můžeme uvažovat za přímou či oblouk, není jasně vymezena. V teoretické části se uvažuje jako zlomová hranice poloměr mezi 150 a 200 m. Chování podvozku v kolejové dráze však ovlivňuje i celá řada dalších faktorů, mezi hlavní patří: adheze, zatížení a sklonové poměry.

Možné způsoby detekování projížděného oblouku jsou:

- Z otáček jednotlivých kol podvozku
- Pomocí výpočtu z GPS dat
- Z natočení podvozku
- Ze znalostí traťové cesty, kdy pomocí informace o poloze z GPS jsou vybrána data o projížděném traťovém úseku (nutnost znát profil tratě).

V současné době tramvaj 15T umožňuje výpočet poloměru projížděného oblouku z rozdílů otáček jednotlivých kol. Jistým problémem této detekce je problematika falešných žlábků, ta nejenom ovlivní výpočet projížděného poloměru, ale z příslušných výpočtů vychází v některých případech opotřebení kolejnic opačný směr oblouku.

V konečné fázi realizace na experimentálním kolejovém vozidle je automatické přepínání mezi přímou tratí a obloukem řešeno v návaznosti na regulační odchylku u koeficientu c_3 – ta udává míru vzpříčení podvozku v kolejové dráze. Této problematice se podrobněji věnuje kapitola 4.14.

5.3.1 Měření vlivu optimalizovaného řízení v oblouku

Z celé řady měření, která byla za účelem uvedení vozidla do provozu a validování jednotlivých částí SW a HW provedena, se největší přínos optimalizovaného řízení očekával v jízdě obloukem. Při optimalizovaném řízení v oblouku se předpokládá největší snížení vodících sil v kontaktu kolo-kolejnice, ty mají největší vliv na míru opotřebení kol a kolejnic.

Pro měření byl vybrán úsek trati mezi areálem Mladějovské průmyslové dráhy a přejezdem. V tomto úseku se nachází značný počet oblouků jak pravých tak levých o malém poloměru (cca 60 m, viz. Příloha I – Parametry Mladějovské průmyslové dráhy).

Při vjetí do oblouku byl aktivován algoritmus pro optimalizované řízení individuálně poháněných kol. Po opuštění oblouku deaktivován. Takovým to způsobem bylo v první fázi jasně definováno, kde bude použit příslušný algoritmus. V přímé trati se algoritmus zatím neužíval, tím byla i zaručena jednoduší orientace v nalogovaných datech.

Postupně s každou jízdou byla provedena korekce parametrů nastavení výpočtů přídatného momentu. Snahou algoritmu výpočtu je dosažení nulové hodnoty regulační odchylky u koeficientu c_3 . Během měření docházelo ke změně jak proporcionální tak integrační konstanty. Později byla data analyzována firmou VÚKV a.s. dle silových účinků v kontaktu kolo-kolejnice. Tímto způsobem byl postupně nastaven a odladěn algoritmus pro optimalizované řízení v oblouku.

Posledním proměnným parametrem měření byla rychlost, zde docházelo k měření s krokem 5 km/h a byl pozorován vliv rychlosti vozidla na chování podvozku v kolejové dráze. Samozřejmostí bylo odměření vždy referenčních hodnot bez jakékoli regulace, aby bylo možné výsledky komparovat a stanovit závěry.

5.3.2 Měření vlivu optimalizovaného řízení v přímé trati

Měření je do jisté míry podobné s měřením pro oblouk. Navíc však v počátku byla snaha zjistit vliv přídatného momentu na příčnou polohu v kolejové dráze. Vybraný úsek se projel bez jakéhokoli přídatného momentu či řízení, aby byly získány referenční hodnoty. Následně byl nastaven jasně definovaný přídatný moment, kdy takové to měření bylo opakováno pro různou velikost přídatného momentu. Primární sledovanou veličinou byla příčná poloha podvozku vůči kolejové dráze, ta je snímána mechanicky pomocí kladek (Obr. 5.4). Z výsledků mechanických měření příčné polohy a hodnot regulační odchylky u koeficientu c_1 se prokázala shoda mezi zjišťovanými veličinami a stejně tak i očekávaný vliv přídatného momentu na příčnou polohu v kolejové dráze.

Již v teoretickém úvodu byl uveden algoritmus pro optimalizované řízení nezávisle otáčivých kol v přímé trati, zde je výpočet přídatného momentu koncipován v návaznosti na regulační odchylku u koeficientu c_1 respektive na příčnou polohu podvozku v kolejové dráze. Bylo

provedeno postupně měření pro různé modifikace nastavení proporcionálně integračního regulátoru příčného posunutí podvozku v kolejové dráze při různých rychlostech vozidla. Po provedení analýzy výsledků bylo zvoleno nejvhodnější nastavení regulátoru.

Zajímavým pokusem v přímé trati bylo zjišťování, zda optimalizované řízení je schopné eliminovat trvalé nabíhání, které může být způsobeno například špatnou geometrií podvozku či zvýšeným mechanickým odporem ložiska. To bylo simulováno uměle vytvořeným rozdílem momentů mezi pravou a levou stranou, a to takovým, aby byl patrný rozdíl v příčné poloze podvozku. Následná jízda byla provedena s aktivní optimalizací řízení. Z chování optimalizovaného řízení bylo patrné, že algoritmus je schopný eliminovat jednostranné nabíhání.

5.3.3 Měření vlivu optimalizovaného řízení s automatickou detekcí oblouk/přímá trať

Po separátním odladění algoritmů optimalizace vedení podvozku v kolejové dráze pro oblouk a pro přímou trať bylo nutné realizovat automatické přepínání algoritmů. Této problematice se věnovala kapitola 4.14. Realizace algoritmu byla řešena bez nutnosti použití znalosti trati i informace z GPS modulu. Měření bylo prováděno převážně v prvním úseku trati za areálem Mladějovské průmyslové dráhy, zde je množství malých oblouků a krátkých rovných úseků. Tyto parametry byly ideální pro část testování automatického přepínání algoritmů. Logována byla stále všechna data, za účelem vyhodnocení přínosu optimalizovaného řízení.

5.3.4 Vliv parametrů optimalizovaného řízení na spotřebu trakční energie

Poté, co bylo provedeno měření optimalizovaného řízení a jeho přínosu z hlediska snížení vodících sil, bylo rozhodnuto o poslední etapě měření. Poslední etapa měření, byla cílena na vliv optimalizovaného řízení individuálně poháněných kol na spotřebu trakční energie v návaznosti na režim, ve kterém je optimalizace řízení aktivní. Podrobnější popis jednotlivých variant řízení je uveden v kapitole 4.11, v této kapitole je uveden popis, jak je moment limitován. Byly proměřovány vlivy všech čtyř variant a porovnávány s případem měření bez optimalizovaného řízení při různých rychlostech. Konkrétními výsledky měření energetické náročnosti optimalizovaného řízení se zabývá kapitola 6.3.

6 VÝSLEDKY MĚŘENÍ NA EXPERIMENTÁLNÍM KOLEJOVÉM VOZIDLE

Předchozí kapitola byla věnovaná postupu měření na experimentálním kolejovém vozidle. Výsledky z prováděných experimentů na experimentálním vozidle lze rozdělit na několik částí, podle způsobu snímání a vypovídající schopnosti. Výsledky z měření jsou rozděleny do třech kapitol:

- Výsledky měření indikované nadřazeným řídicím systémem
- Výsledky měření indikované senzory mechanických veličin
- Výsledky vlivu synchronizovaného řízení na odběr trakční energie

6.1 Výsledky měření indikované nadřazeným řídicím systémem

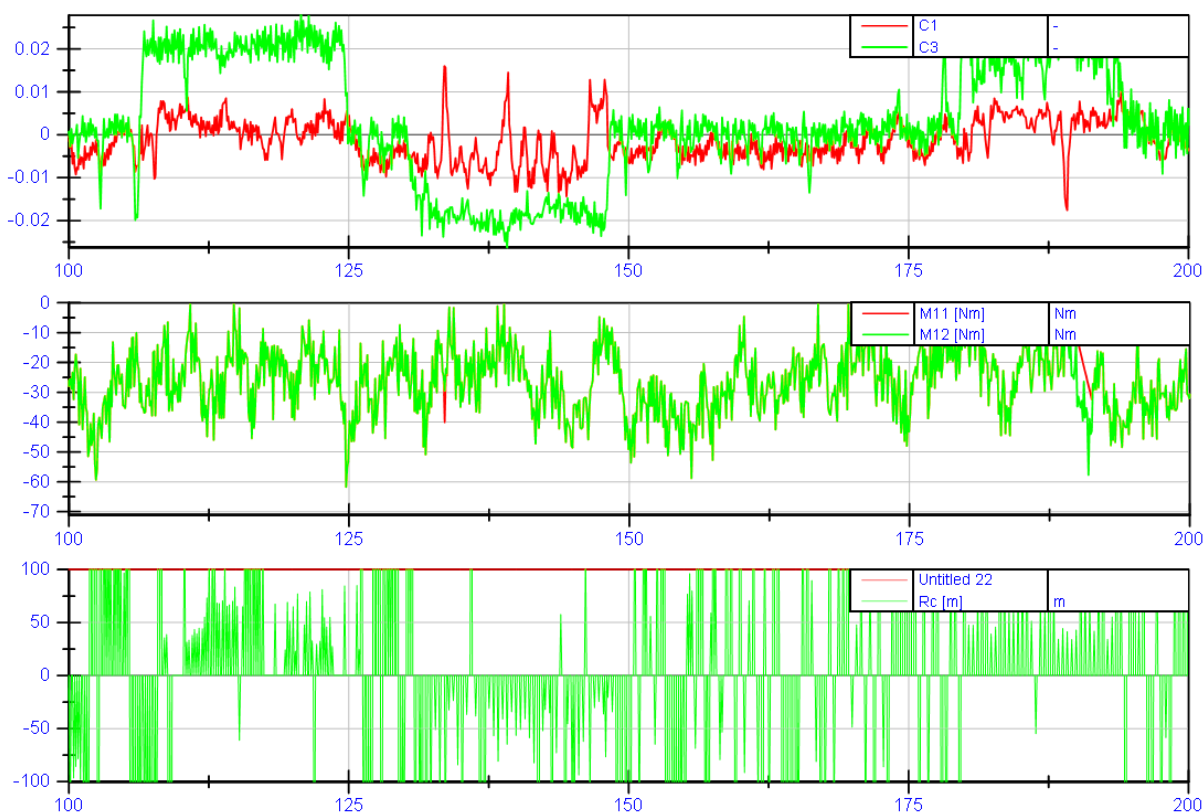
Měřená data byla získána pomocí nadřazeného řídicího systému a byla logována pomocí uživatelského rozhraní na PC. Jedná pouze o veličiny získané z měření v elektrické části experimentálního vozidla a z měření úhlových rychlostí kol. Z hlediska SW pro optimalizované řízení se jedná o nejdůležitější data.

Nejsledovanější informací v počátku experimentů byla informace o úhlových rychlostech jednotlivých kol. Při průjezdu obloukem je patrná diference rychlostí kol mezi pravou a levou stranou vozidla. Po odladění metody pro vyhodnocení úhlové rychlosti bylo dosaženo spolehlivé indikace rozdílů úhlové rychlosti kol v oblouku, což zachycuje obrázek Obr. 4.12.

6.1.1 Ověření indikace oblouku pomocí regulační odchylky u koeficientu c_3

Ukázkou výsledků ověřování indikace oblouku je průběh uvedený na Obr. 6.1. Zde je uveden záznam pěti veličin, první graf zobrazuje vypočtenou hodnotu regulačních odchylek u koeficientů c_1 a c_3 . Hodnoty jsou vypočteny z úhlových rychlostí kol na základě kapitoly 2.4.4. Červený průběh odpovídá příčné poloze podvozku v kolejové dráze a zelený c_3 vzpříčené poloze. Zajímavý průběh regulační odchylky u koeficientu c_3 nám svojí hodnotou cca 0,02 indikuje jízdu obloukem. Tomu odpovídá i průběh ve třetím grafu, kterým je vypočítaný oblouk z GPS s indikovaným poloměrem cca kolem 60 m. Prostřední graf nám zobrazuje žádost o moment na pravém a levém kole. V čase 130 s dochází k indikaci jízdy obloukem na opačnou stranu. Opět je patrný nárůst regulační odchylky u koeficientu c_3 na

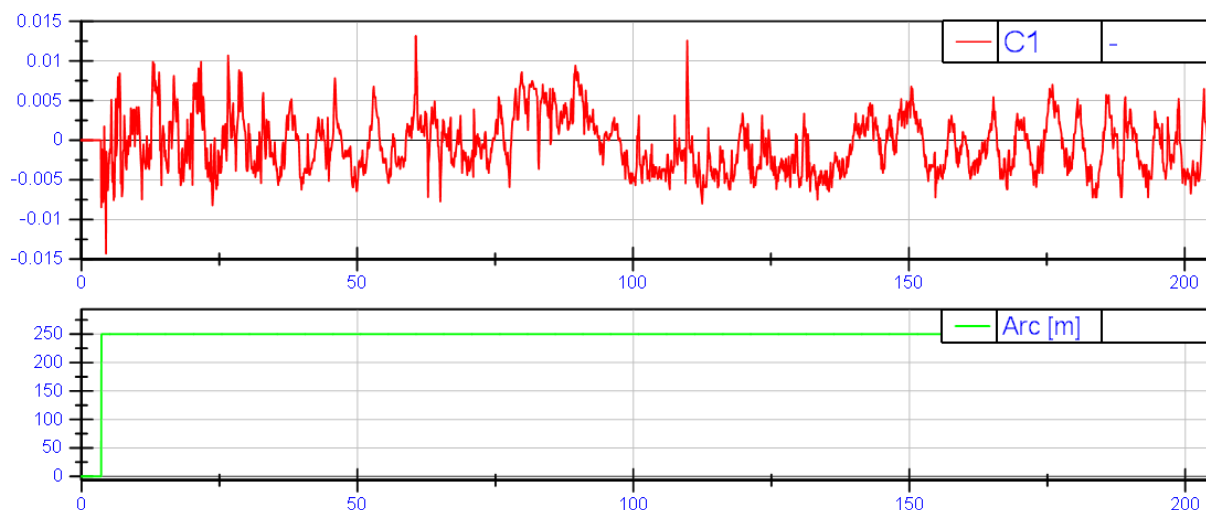
hodnotu cca $-0,02$. Je patrné, že je možné indikovat projížděný poloměr výpočtem z úhlových rychlostí kol. Velikost regulační odchyly u koeficientu c_3 je závislá na poloměru projížděného oblouku, adhezních podmínkách a stavu kolejového svršku. Na základě těchto výsledků bylo rozhodnuto, že velikost regulační odchyly u koeficientu c_3 je možné použít pro algoritmus rozpoznání vjezdu podvozku do oblouku.



Obr. 6.1 – Jízda bez přídavného momentu: přímá trať a oblouk

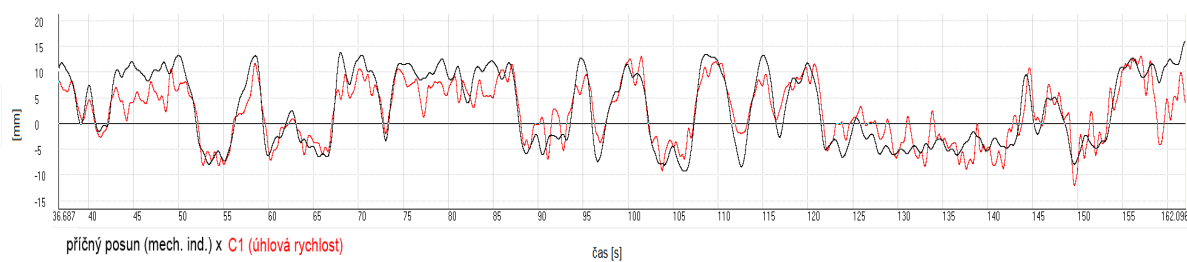
6.1.2 Ověření indikace příčné polohy podvozku pomocí regulační odchyly u koeficientu c_1

Graf na Obr. 6.2 znázorňuje velikost vypočtené regulační odchyly u koeficientu c_1 v závislosti na čase. Zelený průběh indikuje poloměr, kde pro hodnotu 250 m se jedná o přímou trať. Z vypočtené regulační odchyly u koeficientu c_1 vidíme, že hodnota regulační odchyly se pohybuje kolem střední hodnoty, kterou je nulová hodnota. Ze záznamu se dá říci, že vozidlo sínusuje a podvozek zaujímá polohu ve středu kolejové dráhy. Není zde patrné jednostranné nabíhání. Na to má znatelný vliv geometrie podvozku a velikost odporu v ložiscích.



Obr. 6.2 – Jízda v přímé trati a výpočet regulační odchylky u koeficientu c_1 – poloha podvozku v příčném směru

Bylo nezbytné ověřit shodu výpočtu příčné polohy podvozku v kolejové dráze s výsledky měření pomocí válečkových kladkových snímačů (viz. Obr. 6.3). Na Obr. 6.3 jsou zachyceny průběhy v čase, kde na ose Y jsou hodnoty indikované výpočtem úhlových rychlostí kol přepočítány pro lepší porovnání do měřítka výsledků měření pomocí válečkových kladkových snímačů. Červený průběh je vypočten z úhlových rychlostí kol a mechanicky indikovaná poloha má černý průběh. Z překrývání průběhů vidíme dobrou shodu hodnot příčné polohy podvozku získaných výpočtem a měřením v mechanické části.

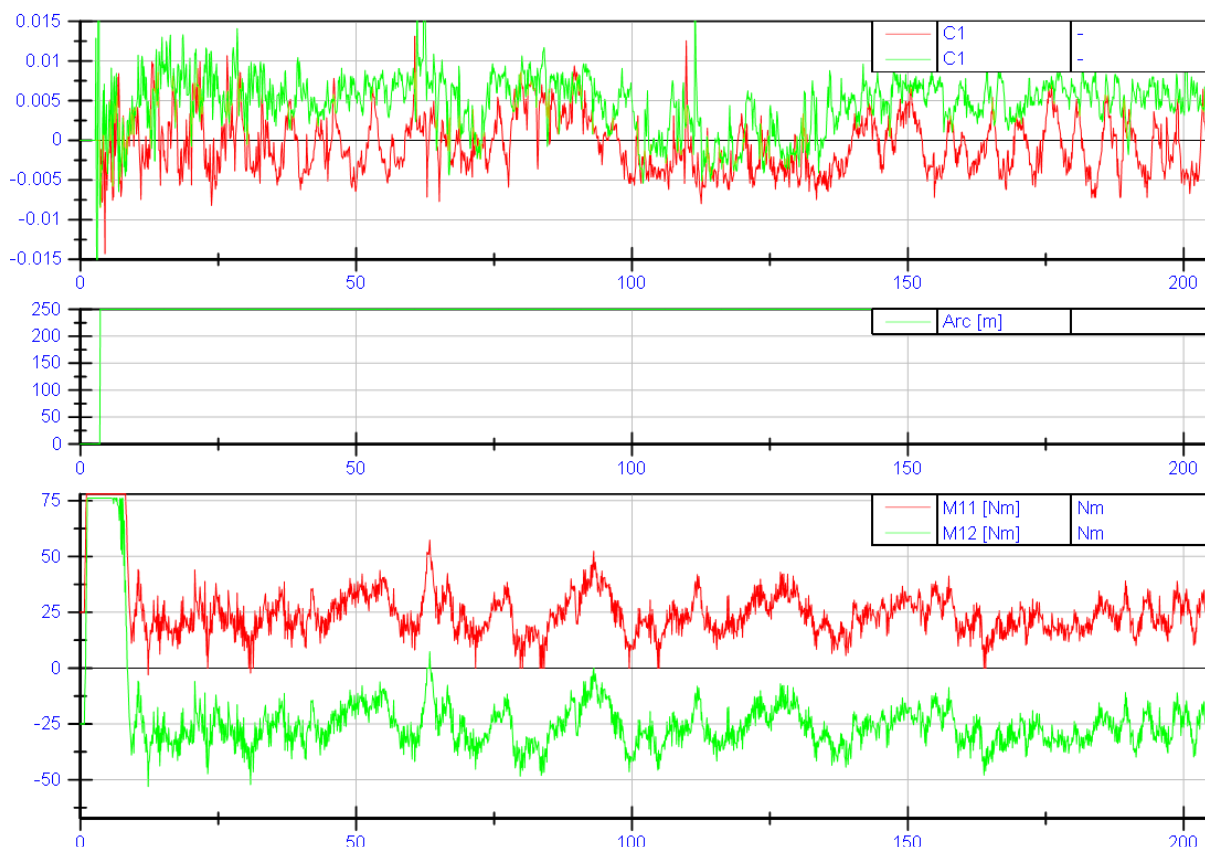


Obr. 6.3 – Příčná poloha podvozku v kolejové dráze snímána mechanicky a vypočtena z otáček kol [12]

6.1.3 Vliv přidavného momentu v přímé trati

Tato podkapitola se věnuje vlivu přidavného momentu na příčnou polohu podvozku v kolejové dráze. U podvozku nedochází k jednostrannému nabíhání – příčná poloha podvozku – Obr. 6.4 (červený průběh c_1). Vnucením přidavného momentu 25 Nm mezi pravou a levou stranou (spodní graf) bylo docíleno jednostrannému nabíhání podvozku. Vliv přidavného momentu je indikován regulační odchylkou u koeficientu c_1 (zelený průběh), ta se

pro stejný úsek tratě pohybuje nad hodnotou 0,005. Tímto experimentem bylo prokázáno, že vhodným rozdílovým hnacím momentem můžeme změnit příčnou polohu podvozku v kolejové dráze a tím i dosáhnout jednostranného nabíhání. Experiment byl prováděn v přímém úseku, jak je indikováno v prostředním grafu. Byla tady úspěšně otestována funkčnost akčního zásahu.

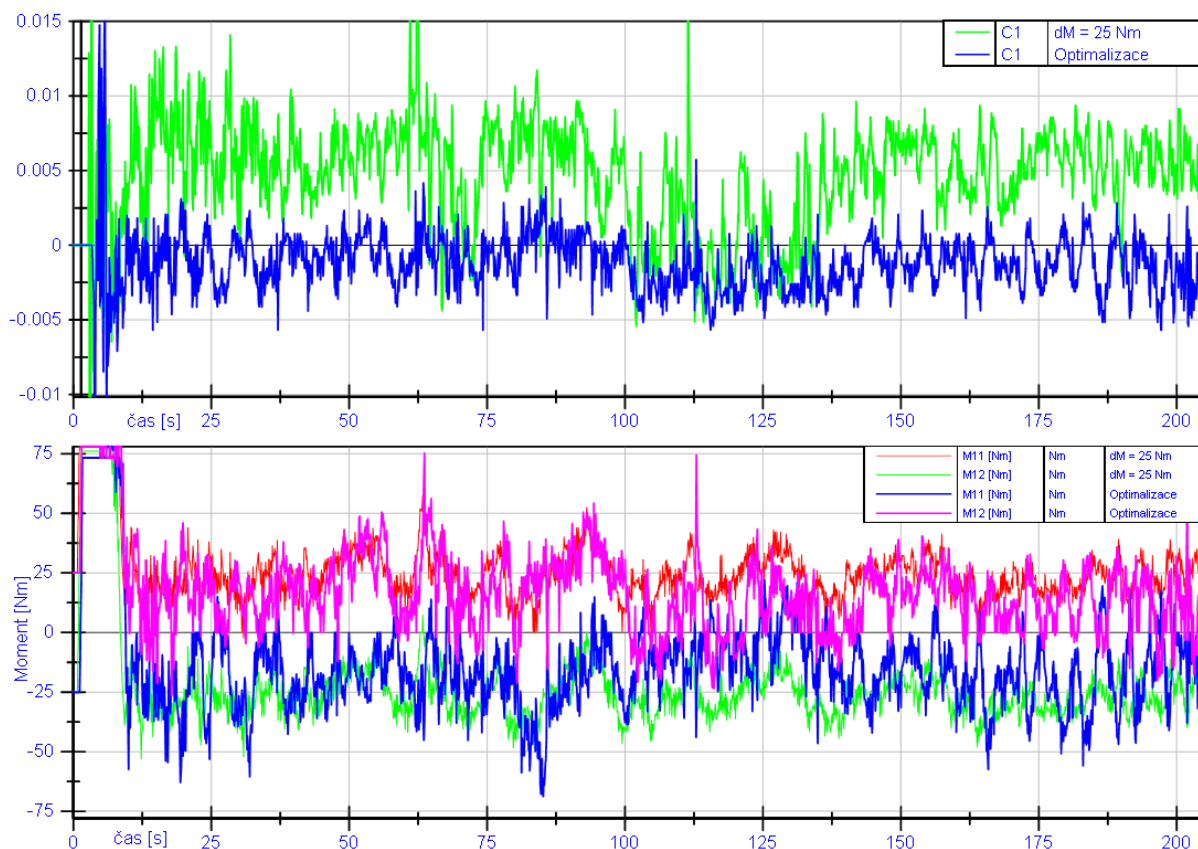


Obr. 6.4 – Vliv přídavného momentu $\Delta M = 25$ Nm na příčnou polohu podvozku

Při aktivaci optimalizovaného řízení přináší přídavné momenty zmenšení vodících sil, které jsou indikovány tenzometrickými snímači i v případě, kdy není vliv řízení zcela patrný na průběhu příčné polohy podvozku v kolejové dráze. Analýzou vodících sil se zabývá kapitola 6.2.

Na Obr. 6.5 je znázorněno porovnání průběhů regulačních odchylek příčné polohy v kolejové dráze u koeficientu c_l při vnučené pevné hodnoty přídavného momentu 25 Nm (zelený průběh v prvním grafu, červený a zelený průběh momentů na protilehlých kolech ve druhém grafu) a při aktivaci optimalizačních algoritmů (modrý průběh v prvním grafu, modrý a fialový průběh momentu na protilehlých kolech na druhém grafu). V prvním grafu můžeme

pozorovat, že regulační odchylka příčné polohy podvozku u koeficientu c_1 (modrý průběh) se při optimalizovaném řízení pohybuje kolem nulové hodnoty a tím je dosaženo ideální příčné polohy podvozku v kolejové dráze. Je zřejmé, že algoritmus dokáže eliminovat či snížit tendenci jednostranného nabíhání podvozků. Spodní část obrázku znázorňuje momenty na protilehlých kolech. Pro přehlednost se jedná o první pár kol 11 a 12.

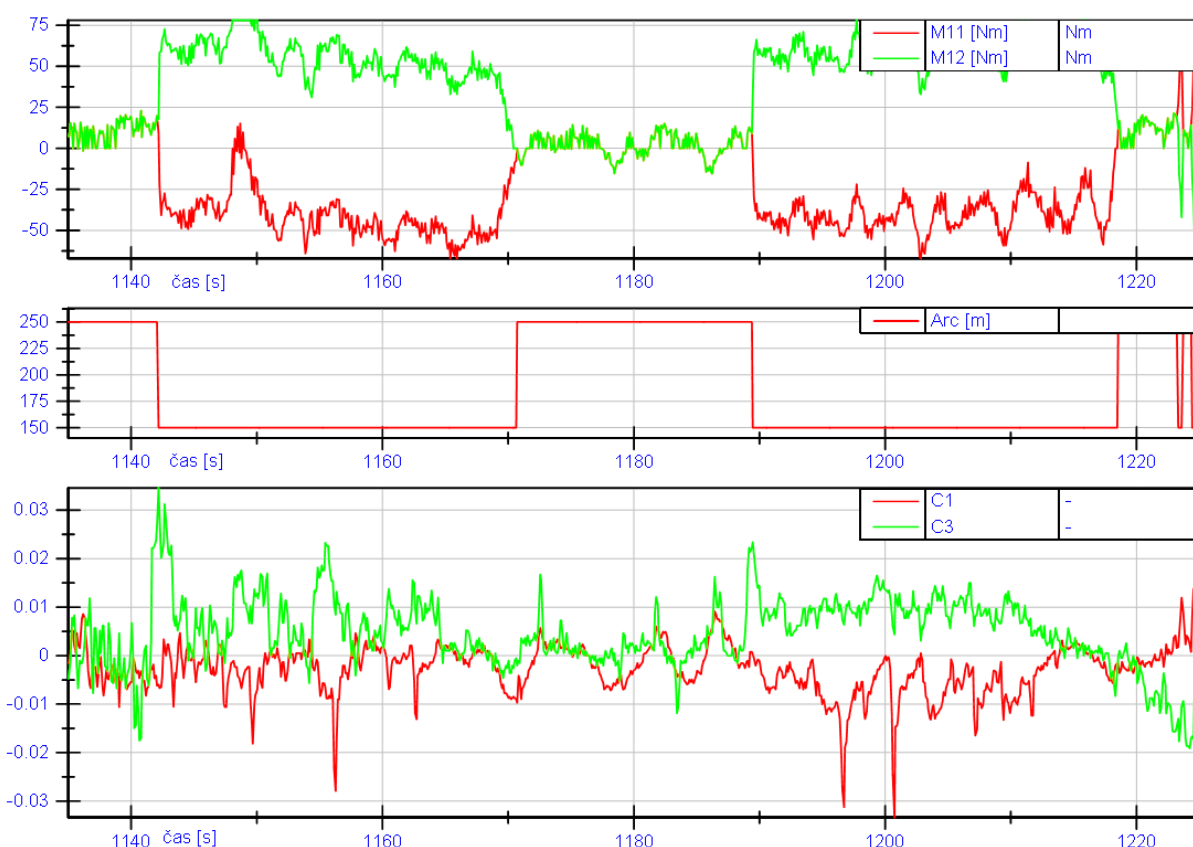


Obr. 6.5 – Funkce optimalizovaného řízení při jednostranném nabíhání (moment 25 Nm)

6.1.4 Vliv přídavného momentu v oblouku

Tato kapitola jistou měrou navazuje na kapitolu 6.1.1, zde šlo o možnost detekce regulační odchylky polohy podvozku v kolejové dráze v oblouku (u koeficientu c_3). Uvedené měření na Obr. 6.9 je cíleno na zjišťování přínosu optimalizovaného řízení v oblouku. Trať byla projížďena s nastavením, aktivní optimalizace řízení pouze v oblouku. To je patrné z prvního grafu, kde jsou uvedeny momenty na první dvojici kol. Druhý graf indikuje stav, ve kterém se algoritmus nachází. Hodnota 250 značí, že se vozidlo nachází v přímé trati a hodnota 150 indikuje oblouk. Při přepnutí stavu/aktivaci optimalizace v oblouku vidíme nárůst přídavného momentu v návaznosti na regulační odchylku polohy podvozku v koleji u koeficientu c_3 .

Regulační odchylky u koeficientů c_1 a c_3 jsou uvedeny ve spodním grafu. V čase 1140 s vjíždí vozidlo do oblouku, dochází k nárůstu regulační odchylky vzpříčené polohy u koeficientu c_3 až přes hodnotu 0,003. Následkem je aktivace algoritmu pro optimalizované řízení v oblouku a k integraci přídatného momentu, to vede k poklesu regulační odchylky vzpříčené polohy u koeficientu c_3 na hodnotu cca 0,01. Obdobná situace se opakuje v čase 1190 s. Z grafu je patrný vliv přídatného momentu na vzpříčenou polohu (regulační odchylka u koeficientu c_3). Větší přínos je patrný z výsledků měření vodicích sil pomocí tenzometrických ojniček.

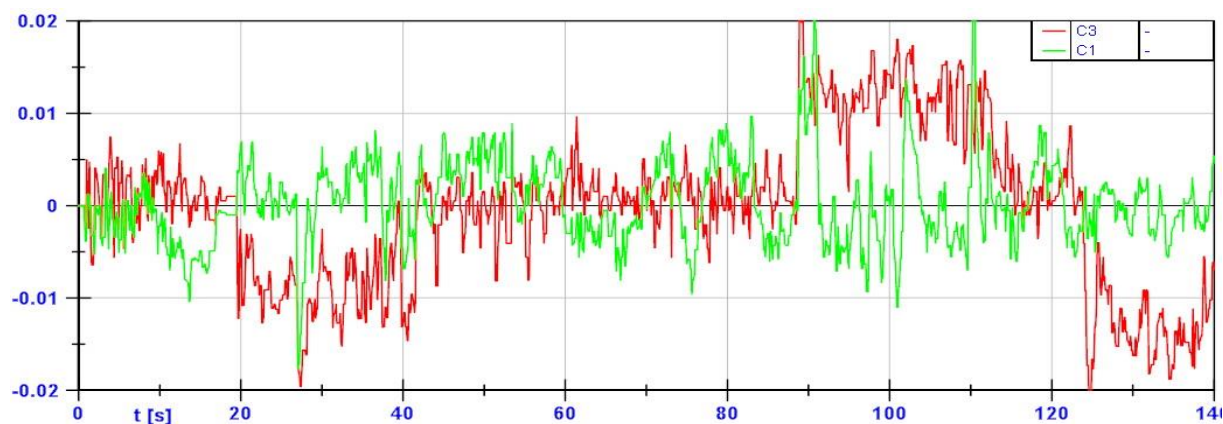


Obr. 6.6 – Vliv optimalizovaného řízení při jízdě obloukem na polohu podvozku v kolejové dráze reprezentovanou regulační odchylkou u koeficientu c_3

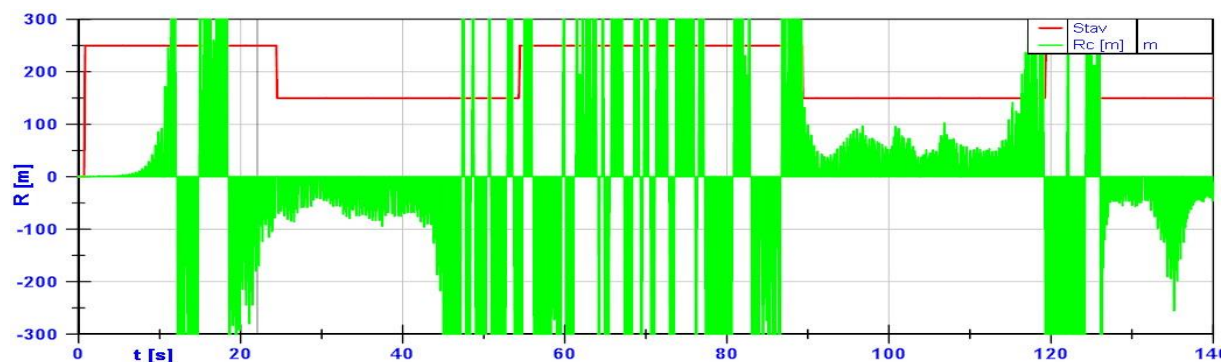
6.1.5 Automatické přepínání algoritmů

Záznam zachycuje automatické přepínání algoritmů mezi přímou tratí a obloukem. Následné grafy uvedené na Obr. 6.7, Obr. 6.8 a Obr. 6.9 jsou navzájem časově synchronizovány a zobrazují plnou funkci optimalizovaného řízení. První graf na Obr. 6.7 zobrazuje regulační odchylky pro příčnou polohu u koeficientu c_1 (zelený průběh) a vzpříčenou polohu (červený průběh), tj. poměry a rozdíly rychlostí kol v podvozku podle vztahů (2.26) a (2.29). Vyskytují

se zde dvě oblasti, ve kterých se vozidlo nachází v oblouku, indikované nenulovou hodnotou červeného průběhu na Obr. 6.7 převyšující hodnotu 0,01 či -0,01.

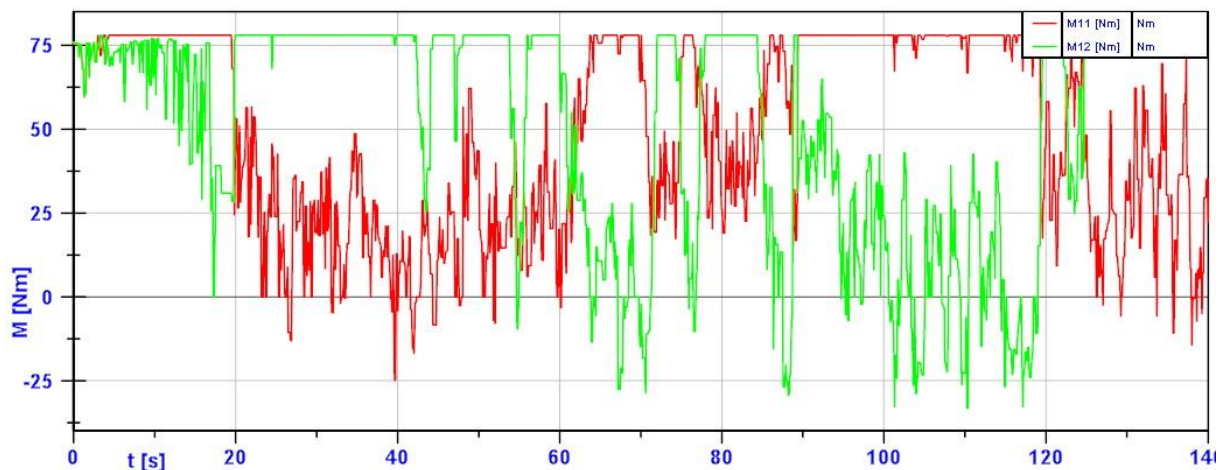


Obr. 6.7 – Automatické přepínání optimalizace – regulační veličina u koeficientu c_1 (příčná poloha) a koeficientu c_3 (tětivová poloha)



Obr. 6.8 – Automatické přepínání optimalizace – stav režimu výpočtu a vypočítaný poloměr

V návaznosti na velikost regulační odchylky u koeficientu c_3 dochází k přepínání algoritmů viz. kapitola 4.14. Stav, ve kterém se optimalizované řízení nachází, je indikován v Obr. 6.8 červeným průběhem. Algoritmus pro přímou trať je indikován hodnotou 250 a pro oblouk 150. K této informaci je také připojena informace o vypočteném poloměru pomocí GPS signálů, tato hodnota je v grafu uvedena zeleně. Znaménko poloměru určuje, zda se jedná o oblouk pravý či levý. Z regulačních odchylek je vypočítán přídatný moment, který je přičten/odečten k žádanému momentu motoru. Zadaný moment pro první dvojici kol je uveden na Obr. 6.9, za povšimnutí stojí limitace momentu na maximální možný. Tím je limitován přídatný moment, v případě větší hodnoty součtu požadovaného a přídatného momentu proti dostupnému je nutné odečítat pouze takový moment, který byl přičten pro zachování konstantní tažné síly.



Obr. 6.9 – Automatické přepínání optimalizace – moment levého kola M_{12} a pravého M_{11}

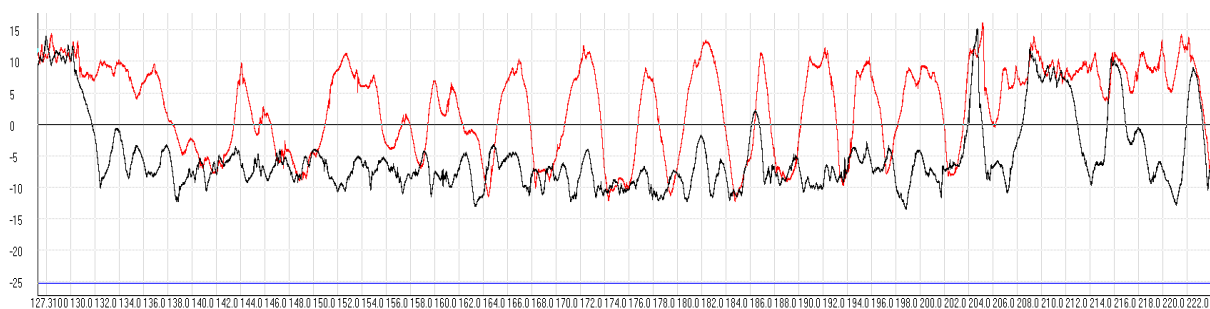
6.2 Výsledky měření indikované senzory mechanických veličin

Již dříve bylo uvedeno rozdělení měření na experimentálním kolejovém vozidle na dvě části. Na Obr. 5.1 je znázorněno rozdělení. Tato kapitola je zaměřena na výsledky indikované senzory mechanických veličin. Jedná se převážně o výsledky měření získané pomocí tenzometrických ojnic, snímání polohy a chování podvozku v kolejové dráze. Snímání a vyhodnocování dat zajišťovala firma VÚKV a.s.

První z uvedených výsledků je znázorněn na Obr. 6.3. Jedná se o ověření příčné polohy podvozku v kolejové dráze indikované pomocí regulační odchylky příčné polohy podvozku u koeficientu c_1 a pomocí mechanických kladek. V uvedeném grafu byl průběh regulační odchylky příčné polohy u koeficientu c_1 pro osu Y přeškálován pro lepší porovnání. Průběhy jsou téměř totožné, na základě vypočtené regulační odchylky je možné provádět regulaci v přímém směru.

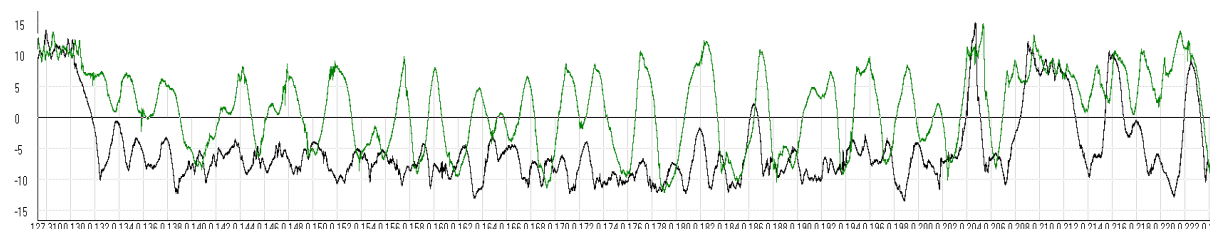
Dalším z experimentů, bylo ověřování účinků přídavného momentu na příčnou polohu v kolejové dráze. Na Obr. 6.10. vidíme závislost příčné polohy podvozku na dráze. Jsou zde uvedeny dva průběhy, které jsou ze dvou jízd navzájem synchronizované. Červený průběh zobrazuje jízdu bez optimalizovaného řízení. Druhý, černý průběh zobrazuje jízdu s uměle vytvořeným naléháním k jedné straně, tento stav byl vytvořen navýšením momentů jedné strany o 25 Nm a druhá strana byla stejnou mírou snížena. Při porovnání průběhů vidíme, že přidáním momentu jsme byli schopni vytvořit jednostranné nabíhání. Závěrem tohoto

experimentu lze konstatovat, že přidavným momentem lze ovlivnit polohu podvozku v kolejové dráze. Mechanická měření tedy rovněž potvrdila očekávaný efekt akčních zásahů.



Obr. 6.10 – Vliv přidavného momentu $\Delta M = 25$ Nm na příčnou polohu (černý průběh) [12]

Při vytvoření jednostranného nabíhání bylo aktivováno optimalizované řízení pro přímou trať. Průběh je zobrazen na Obr. 6.11, černý průběh odpovídá jednostrannému nabíhání. Zelený průběh potom jízdě s optimalizovaným řízením. Výsledkem je, že nedochází k jednostrannému nabíhání podvozku. U průběhu s optimalizací dochází opět k sinusování, při porovnání s jízdou uvedenou na Obr. 6.10 s červeným průběhem dochází ke značné shodě chování podvozku v příčném směru. Optimalizované řízení je schopné eliminovat trvalé jednostranné nabíhání, i v případě kdy nedochází vlivem optimalizovaného řízení ke změně příčné polohy, dochází ke snížení vodících sil.

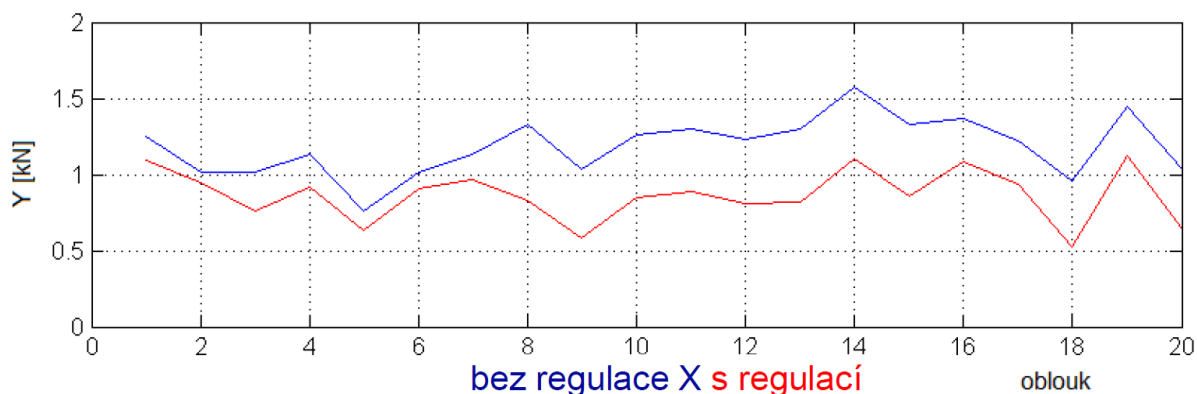


Obr. 6.11 – Vliv optimalizovaného řízení na příčnou polohu podvozku (zelený) při uměle vyvolaném nabíhání (černý průběh $\Delta M = 25$ Nm) [12]

Největší očekávání bylo v předpokladu snížení vodících sil při jízdě obloukem s malým poloměrem. Za tímto účelem byl pro provádění měření vybrán úsek začínající za průmyslovým objektem Mladějovské průmyslové dráhy a končící u přejezdu s délkou 1,5 km. Tento úsek vyniká značným počtem oblouků malých poloměrů ($r_{min} = 60$ m) a stoupáním dosahujících 25 %.

Měření bylo prováděno pro řadu nastavení parametrů regulace a podmínek zkoušek, jedním z parametrů podmínek zkoušek byla rychlost (5, 10 a 15 km/h) a dalším parametrem

integrační konstanta regulátoru pro regulaci v oblouku. Během měření při jízdě v oblouku byla sledována regulační odchylka vzpříčené polohy podvozku u koeficientu c_3 , která při průjezdu některých oblouků klesla, v některých případech k tomu nedošlo. Nicméně adekvátní vypovídající schopnost mají vodící síly, protože i při nesnížení regulační odchylky vzpříčené polohy dochází ke snížení vodících sil v kontaktu kolo-kolejnice, tudíž i ke snížení opotřebení. Výsledky z této části měření jsou uvedeny na Obr. 6.12, zde se nachází dva průběhy závislosti střední vodící síly na konkrétním oblouku (na vodorovné ose grafu je pořadové číslo projížděného oblouku). Modrý průběh představuje vodící síly bez optimalizovaného řízení, červená křivka potom s optimalizovaným řízením. Grafické vyjádření ukazuje značné snížení střední velikosti vodících sil. Je zde i patrná skutečnost, že snížení vodících sil je pro jednotlivé oblouky rozdílné, jednak je to dáno geometrií oblouku a také dostupným momentem pro možnosti optimalizovaného řízení. Pro lepší zobrazení jsou jednotlivé hodnoty spojeny.



Obr. 6.12 – Vliv optimalizovaného řízení na snížení vodících sil Y na nabíhajícím kole (červený průběh)

[12]

Je zřejmé, že při synchronizovaném řízení se vodící síly sníží a to o desítky %, což je významný příspěvek ke snížení opotřebení kol a kolejnic v oblouku. Dosažení vysoké míry snížení vodících sil, bylo dáno nastavením, to umožňovalo v tahu přechod až do záporného momentu (brzdy) u jednoho z dvojice motorů protilehlých kol.

Zjištěné skutečnosti během experimentů

- Bylo zjištěno, že informace 4096 poloh na otáčku kola je dostatečná pro vyhodnocení rychlosti pro optimalizované řízení: schopnost detekovat příčnou polohu podvozku v kolejové dráze.

- Rozdílovým hnacím momentem na jednotlivých stranách podvozku je možné ovlivnit příčnou polohu podvozku v kolejové dráze.
- V případě kdy dochází, u podvozku k jednostrannému nabíhání vlivem rozdílných hnacích momentů, pomocí optimalizovaného řízení dojde k eliminaci jednostranného nabíhání a zároveň ke snížení vodících sil způsobující opotřebení.
- Vozidlo je schopné detekovat oblouk/přímou trať na základě výpočtu z úhlových rychlostí pro přepínání algoritmů optimalizovaného řízení.
- Bylo dosaženo snížení vodících sil v oblouku o desítky %

6.3 Výsledky vlivu synchronizovaného řízení na odběr trakční energie

Z grafů uvedených již dříve jsme viděli, že dochází vlivem přídavného momentu k rozdílným momentům mezi jednou a druhou stranou podvozku. Tím může nastat i situace, kdy se jedna strana dostává do brzdy a druhá strana se nachází v tahu. Z těchto skutečností vyvstala otázka, jaký vliv má optimalizované řízení na spotřebu trakční energie a jak lze optimalizovaným řízením ovlivnit výslednou spotřebu dle režimu řízení. Optimalizované řízení je vymezeno do několika režimů, kde je vymezen jejich rozsah, ve kterém je optimalizace aktivní. Jednotlivé režimy vymezení optimalizovaného řízení jsou popsány podrobně v kapitole 4.12.1.

Bylo nutné ověřit tyto skutečnosti experimentálním měřením odebírané trakční energie. Pro měření byly zvoleny čtyři režimy, ve kterých bylo prováděno měření. Prvním z nich byla měřena referenční hodnota bez optimalizovaného řízení. Druhé měření proběhlo s aktivní optimalizací řízení, tentokrát bez omezení, tj. včetně možností, že jedna strana se může pohybovat v tahu a druhá může být v brzdě. Třetí režim je omezen pouze na optimalizaci v jízdě (J) a brzdě (B), to znamená, že při kladné žádosti momentů může být moment optimalizován v mezích od 0 do 100 %. Při žádosti o brzdu potom -100 až 0 %. Posledním z měřených režimů je aktivní optimalizované řízení pouze při jízdě vozidla. Měření bylo provedeno s proměnným parametrem rychlosti pro 10, 15 a 20 km/h.

Pro měření spotřeby trakční energie byly vybrány čtyři traťové úseky. Vždy ke každému měření je uvedena tabulka a mapa měřeného úseku.

První měření probíhalo na trati za stanicí Nová Ves. Jedná se úsek se sklonem 2 až 3 ‰ o délce obratu 1 580 m (Obr. 6.13). Výsledky jsou uvedeny v tabulce Tab. 6.1. Jsou zde značné rozdíly mezi nejmenší a maximální spotřebou. Nejmenší spotřeba je pro jízdu bez optimalizovaného řízení a protikladem je jízda bez omezení optimalizovaného řízení. To je dáno velkou měrou přechodem jednoho z dvojice motorů u protilehlých kol do brzdy. Výsledky měření s omezením na J či J a B se nachází energeticky uprostřed.

Tab. 6.1 - Přímá trať za Novou Vsí [Wh]

oblouk i přímá	10 km/h	15 km/h	20 km/h
bez regulace	103,28	x	143,90
bez omezení	127,74	x	162,78
J a B	102,10	x	149,55
J	102,94	x	149,41



Obr. 6.13 – $l = 1580$ m

Druhé měření v řadě proběhlo pouze pro měření spotřeby trakční energie optimalizovaného řízení v oblouku. Ideální volbou pro dané měření je oblouk nad areálem Mladějovské průmyslové dráhy. Jedná se o táhlý oblouk s poloměrem 60 m, který se nachází ve stoupání cca 26 ‰.

Tab. 6.2 - Oblouk nad průmyslovým areálem [Wh]

jen oblouk	10km/h	15km/h	20km/h
bez regulace	55,92	64,19	76,10
bez omezení	80,42	79,82	86,93
J a B	69,27	70,21	81,69
J	64,26	66,72	81,97



Obr. 6.14 – $l = 457$ m

Z výsledku měření jízdy v oblouku a do stoupání vidíme, že rozdíly mezi jednotlivým nastaveními omezení využití optimalizace nejsou příliš velké. Je to dáno skutečností, že vozidlo ve stoupání využívá značný moment jednotlivých motorů a tudíž pro optimalizované řízení je dostupný jen omezený moment. Zároveň nedochází k přechodu jednoho z dvojice motorů u protilehlých kol do režimu s opačnou polaritou momentu.

Další měření bylo provedeno nad zastávkou Veksl, zde se jedná o trať téměř v rovině s pravým a následně s levým obloukem s krátkým rovným úsekem - Obr. 6.15. Uplatní se algoritmus optimalizovaného řízení jak pro oblouk tak přímou trať.

Tab. 6.3 - Eso nad Vekslem [Wh]

rovná i oblouk	10km/h	15km/h	20km/h
bez regulace	43,20	54,23	67,60
bez omezení	62,21	65,79	72,44
J a B	43,62	55,62	68,79
J	42,34	54,89	68,14



Obr. 6.15 – l = 540 m

Posledním měřením spotřeby trakční energie je úsek za stanicí Nová Ves. Jedná se o táhlý oblouk se stoupáním. Výsledky jsou do značné míry obdobné.

Tab. 6.4 - Oblouk nad Novou Vsí [Wh]

jen oblouk	10 km/h	15 km/h
bez regulace	35,41	45,69
bez omezení	55,63	59,19
J	43,27	51,58
J a B	44,49	51,91



Obr. 6.16 – Oblouk nad Novou Vsí l = 360 m

Z naměřených dat byl zjištěn i vliv rychlosti vozidla a vliv omezení oblasti aktivní optimalizace řízení. Významný vliv na spotřebovanou trakční energii proti režimu bez omezení má režim s aktivací optimalizovaného řízení pouze pro jízdu. Při rychlosti 10 a 20 km/h při aktivované optimalizaci řízení bez omezení dochází k nárůstu spotřeby energie o 10 až 20 %. K nejmenšímu nárůstu spotřebované trakční energie došlo při jízdě v oblouku nad areálem Mladějovské průmyslové dráhy. Tato skutečnost je dána tím, že vozidlo jedoucí do stoupání využívá značnou část momentu trakčních motorů a tím je omezený dostupný moment pro optimalizované řízení a současně nedochází k přechodu jednoho z dvojice motorů do režimu s opačnou polaritou momentu. Zde s aktivovanou optimalizací řízení došlo k nárůstu spotřeby o 13 % při rychlosti 20 km/h.

Při jízdě nad Novou Vsí rychlostí 20 km/h byl nárůst spotřeby energie s aktivní optimalizací řízení oproti deaktivované optimalizaci o 13 %. Z výsledků je patrné, že se snižující se rychlostí a optimalizovaným řízením bez omezení dochází k procentuálnímu nárůstu spotřeby. Největší nárůst potom byl v případě oblouků. Velký nárůst trakční spotřeby experimentálního vozidla při optimalizovaném řízení je dán skutečností, že na experimentálním vozidle nejsou trakční pohony optimalizovány po stránce účinnosti a vzhledem k absenci převodovek jsou motory provozovány při otáčkách výrazně nižších oproti jmenovitým, tedy s výrazně nižší účinností ve srovnání s účinností při jmenovitých otáčkách. Tím je dosahováno i nízké účinnosti při rekuperaci v případě kdy jedna strana motorů je v brzdě a druhá v tahu. Nedochází k ideálnímu přenesení trakční energie ze strany rekuperace na stranu v motorickém režimu.

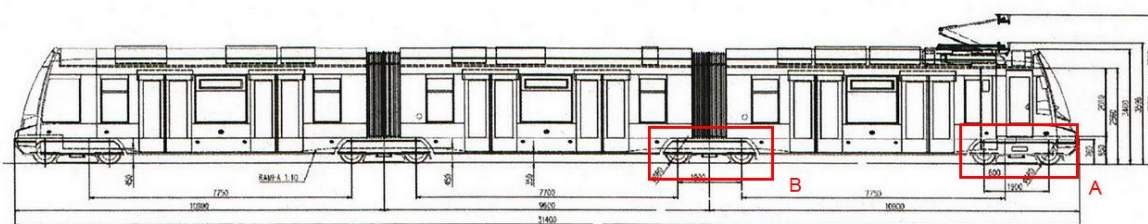
7 SROVNÁVACÍ MĚŘENÍ NA TRAMVAJI 15T

7.1 Popis

Oblast experimentů pro ověření již odladěných algoritmů optimalizovaného řízení na vozidle 15T bylo nutné řešit jak s pražským Dopravním podnikem tak se ŠKODOU Elektrik a.s.. Pro experimentální ověření byla vyčleněna tramvaj s číslem 9223. Přípravy měření byly koordinovány ze strany VÚKV a.s.. Programátorům ze ŠKODY Elektrik a.s. byly předány podklady a požadavky na prováděné experimenty v oblasti optimalizovaného řízení a popis metodiky implementace optimalizačních algoritmů. Čas vymezený na experimentální zkoušky byl pouze měsíc. Dle těchto parametrů byl sestaven harmonogram a program měření Ing. Janem Čapkem, Ph.D..

Z časového harmonogramu přípravných prací pro měření se SW pro optimalizované řízení vyplynuly čtyři noční termíny. Paralelně s těmito experimenty bylo naplánováno měření jízdních vlastností tramvaje 15T.

Měření bylo rozděleno na dvě části, kdy při první polovině měření bude osazen měřicím vybavením podvozek (A) viz. Obr. 7.1. Jedno z měření se bude provádět s nezátíženou tramvají a druhé s loženou. Poté bude měřicí vybavení instalováno na podvozek (B) a postup měření se bude opakovat.



Obr. 7.1 – 15T označení podvozků [12]

Měřené veličiny pro optimalizované řízení:

- Silové účinky v kontaktu kolo-kolejnice – měřené síly: kolový tlak (Q), příčná vodící síla (Y), tangenciální síla (T), (2 měřicí kola, 2 nápravnice)
- Žádost o moment jednotlivých kol
- Natočení podvozku vůči skříni vozidla

- Úhlová rychlost jednotlivých kol
- Rychlost, ujetá dráha, poloha vozu na trati
- 3x kamera pro snímání kontaktu kolo-kolejnice
- Momenty na hřídelích motorů

Ostatní veličiny:

- Síly v tlumičích
- Zrychlení na nápravnicích, rámech podvozků a vozidlových skříních
- Pohyby v primárním a sekundárním vypružení
- Mechanické napětí na vybraných místech na nápravnicích, rámech podvozků a kardanotáhlech
- Nedostatek převýšení

Obr. 7.2 zachycuje první otočný podvozek (A) s instalovaným měřícím zařízením včetně snímačů momentu trakčních motorů. V pravé části se nachází detail zařízení pro přenos signálů z měrné hřídele, které bylo instalováno z boku motoru.



Obr. 7.2 – Tramvaj 15T ForCity – otočný podvozek osazen sensorovou technikou (v levo), detail na přenos signálů z měřícího hřídele (v pravo)

Prvotní ověření základních měřených veličin, včetně výpočtu regulační odchylky polohy podvozku v oblouku u koeficientu c_3 podle vztahu (2.24) proběhlo v areálu Ústředních dílen Hostivař. Jízdní zkoušky v pražské tramvajové síti byly realizovány v nočních hodinách od 22 do 6 h z důvodů nižší frekvence tramvajového provozu. Za účelem ladění SW byl vytipován úsek Palmovka – Vozovna Kobylisy (Obr. 7.3). Úsek disponuje řadou oblouků, stoupání a žlábkovými i hlavovými kolejnicemi s různou mírou opotřebení.



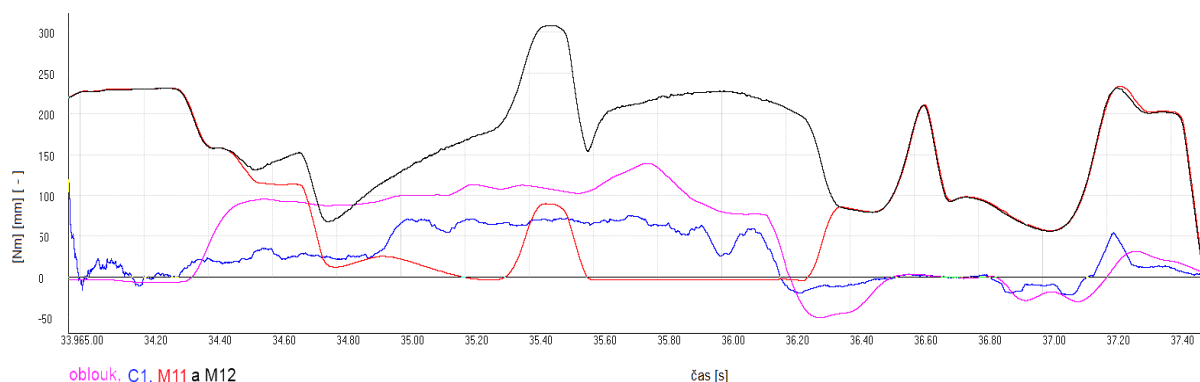
Obr. 7.3 – Úsek testování algoritmu optimalizace řízení s tramvaji 15T – Vozovna Kobylisy – Palmovka [23]

Nejdříve bylo nutné naladit konstanty algoritmů pro optimalizované řízení. Algoritmus detekce oblouků, použitý na experimentálním kolejovém vozidle, na tramvaji 15T nefungoval dle předpokladů. Příčinou byla odlišná relace mezi rozchodem kolejní a poloměry oblouků trati na Mladějovské průmyslové dráze a v pražské tramvajové síti (v Praze je větší rozchod při menších poloměrech oblouků). Tento problém byl vyřešen použitím algoritmu ŠKODY Elektrik a.s. pro výpočet poloměrů projížděného oblouku na základě přímého rozdílu úhlových rychlostí jednotlivých protilehlých kol v podvozku. Vlivem SW provedení řízení pohonů na tramvaji 15T je optimalizované řízení aktivní pouze při jízdě či v brzdě, nikoliv však ve výběhu.

Při zkouškách byla snaha provést ověřovací pokusy v přímé trati. Zkoumal se vliv přidavného momentu na polohu podvozku v kolejové dráze. Bohužel pomocí SW nebylo možné vnutit rozrovnání momentů a tím vytvořit umělé jednostranné nabíhání podvozku. Tramvaj s číslem 9223 nevykazovala jednostranné nabíhání a během jízdy v přímé trati docházelo k sinusovému pohybu podvozku. Dá se předpokládat, že k jednostrannému nabíhání podvozku může docházet vlivem zhoršené geometrie podvozku u jiných vozů, což potvrzují i informace od pracovníků DP Praha.

7.2 Výsledky

Na obrázku (Obr. 7.4) je pro ukázkou znázorněn průběh hodnot momentů trakčních motorů první nápravnice. M_{11} je moment předního pravého kola a M_{12} předního levého kola. Regulační odchylka příčné polohy podvozku u koeficientu c_1 je vypočtena dle vztahu (2.24). Poslední veličinou je indikace oblouku pomocí snímače natočení podvozku – fialový průběh indukující míru zakřivení oblouku. Algoritmus pro výpočet v oblouku je aktivní, když je vypočtený poloměr menší než 150 m. V grafu vidíme nárůst fialového průběhu indukující, že první podvozek se nachází v oblouku. Reakcí na to je nárůst přidavného momentu mezi vnitřním a vnějším kolem. Moment motoru na vnitřní straně oblouku (červený) postupně klesá až na nulovou hodnotu, kde tato hodnota je limitní vzhledem k absenci možnosti přechodu do režimu s opačnou polaritou momentu. Při dosažení nulové hodnoty trakčního momentu pohonu na vnitřní straně oblouku nedochází dále k nárůstu momentu na pohonu na vnější straně oblouku. Tato podmínka je nutná, aby nedocházelo ke změně výsledné tažné síly a hodnota odpovídala požadavku regulátoru tažné síly.

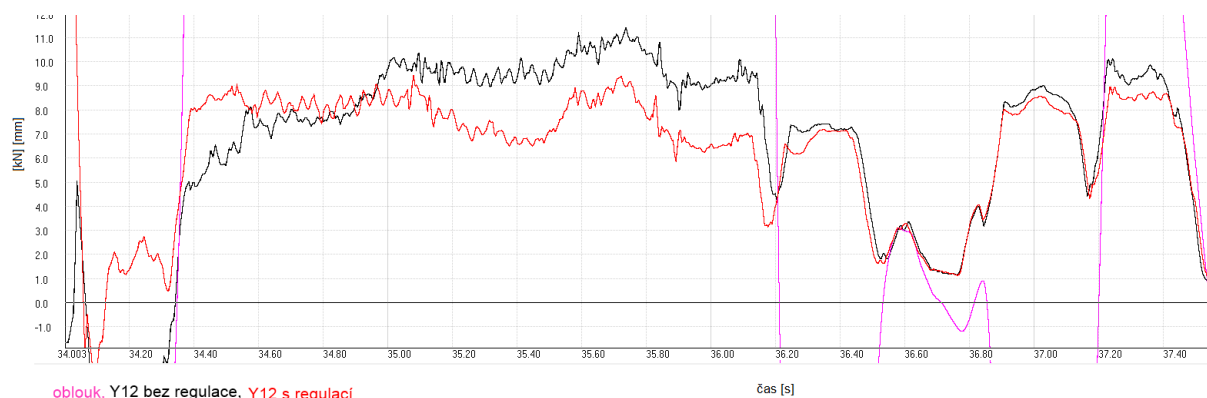


Obr. 7.4 – Průběhy momentů na trakčním motoru na pravé a levé straně podvozku (černá a červená křivka) pro algoritmus oblouku [12]

Obr. 7.5 je synchronizován v časové oblasti s Obr. 7.4 a zobrazuje velikost vodící síly Y_{12} (nabíhající kolo) při aktivním optimalizovaném řízení (červený průběh) a bez optimalizovaného řízení (černý průběh). Fialový průběh znázorňuje natočení podvozku vůči skříni vozidla stejně jako na Obr. 7.4. Při porovnání průběhů vodících sil s a bez optimalizovaného řízení je zřejmé, že dojde ke snížení vodících sil o desítky %.

Na měřeném úseku Vozovna Kobylisy – Palmovka se vyskytoval problém s výpočtem projížděného poloměru. Problém se podařilo analyzovat po prohlídce kolejového svršku. Jedná se o úsek obsahující klasickou kolejnici s tím, že obsahuje tzv. falešné žlábký. Tj. hlava

kolejnice vykazovala značné opotřebení a tím dochází k indikaci oblouku opačným směrovým vedením.

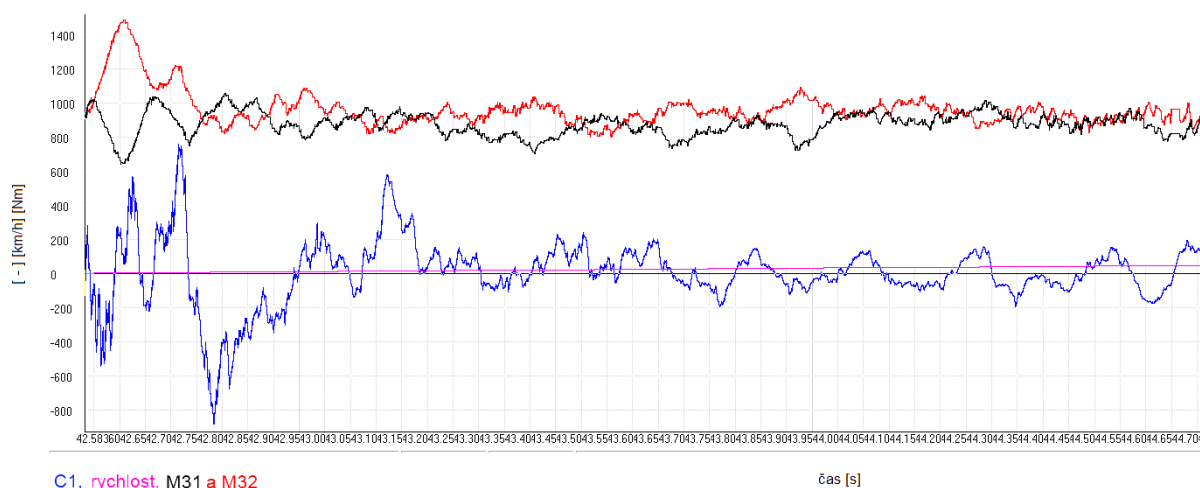


oblouk, Y12 bez regulace, Y12 s regulaci

čas [s]

Obr. 7.5 – Srovnání průběhů naměřených vodících sil bez optimalizovaného řízení (černý průběh) a se optimalizovaným řízením (červený průběh) [12]

Záznam průběhu optimalizovaného řízení při jízdě v přímé trati je zobrazen na Obr. 7.6. Jedná se o záznam z druhého podvozku (B) jak již napovídá označení momentů. Zde jsou uvedeny momenty z druhého podvozku první nápravnice (momenty M_{31} a M_{32}). Výpočet přídatného momentu ΔM vychází z výpočtu regulační odchylky u koeficientu c_1 , ta reprezentuje příčnou polohu podvozku v kolejové dráze (modrý průběh). Vidíme, že regulační odchylka tzv. sinusuje a výsledná střední hodnota se pohybuje kolem nulové hodnoty. Jak již bylo řečeno dříve, nebylo možné uměle vyvolat jednostranné nabíhání podvozku.

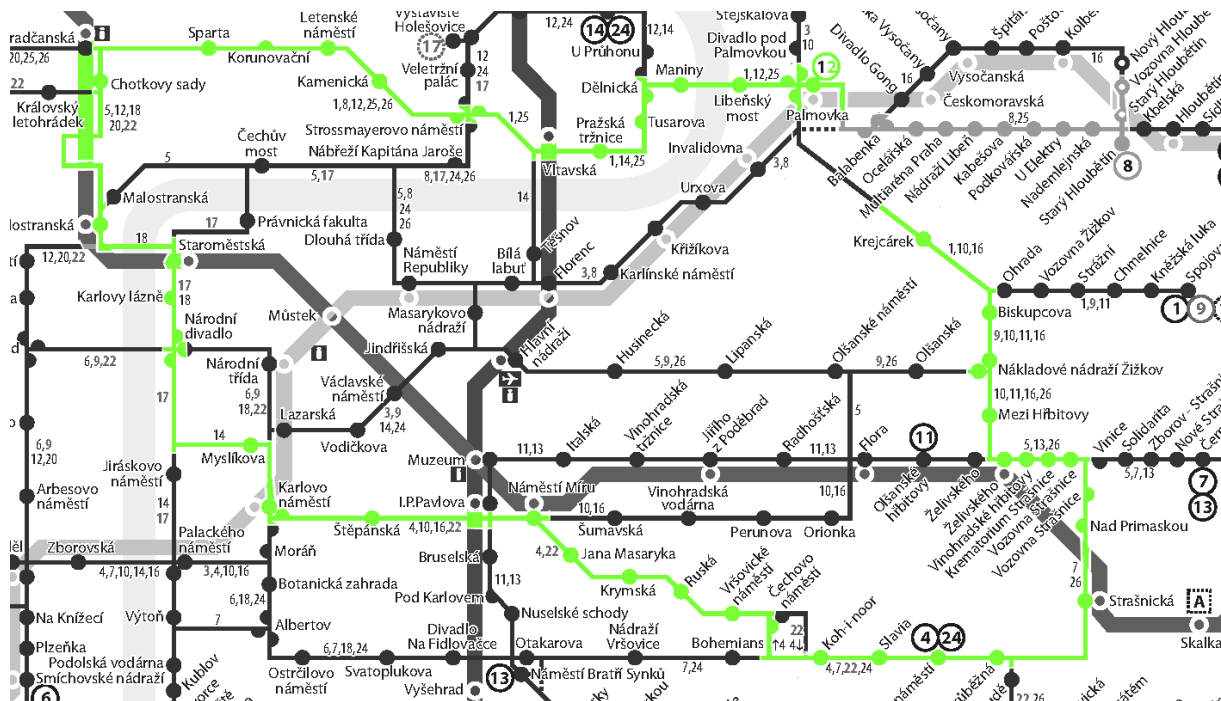


C1, rychlost, M31 a M32

čas [s]

Obr. 7.6 – Jízda přímou trati s aktivní regulací na regulační odchylku u koeficientu c_1 (modrý průběh) [12]

Pro zlepšení vypovídající schopnosti vlivu optimalizovaného řízení na velikost vodičích sil byla zvolena delší trasa než Palmovka – Vozovna Kobylisy. Trasa je zobrazena na Obr. 7.7

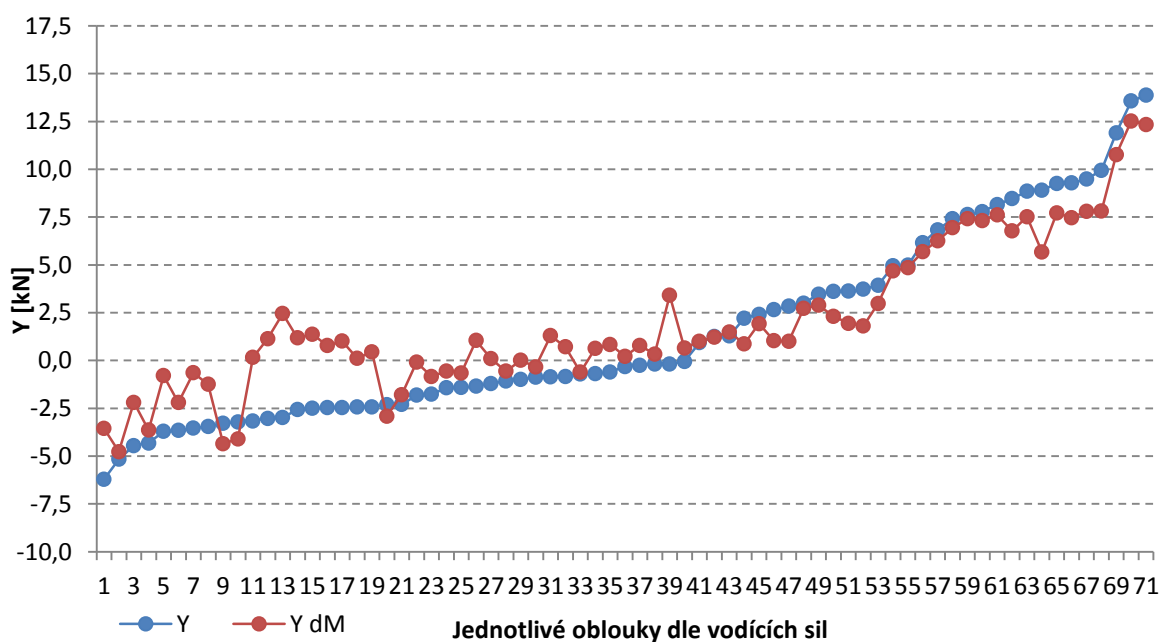


Obr. 7.7 – Trasa pro měření [23]

Výsledky měření vodičích sil pro jednotlivé oblouky jsou zobrazeny na Obr. 7.8. Na horizontální ose jsou čísla oblouku seřazena vzestupně podle střední vodičí síly na nabíhající kole. Modré body jsou hodnoty střední vodičí síly Y bez optimalizovaného řízení. Červené body potom zobrazují střední vodičí sílu na nabíhající kole s optimalizovaným řízením. V místech kde je modrá hodnota střední vodičí síly záporná, rozumíme snížením vodičí síly přiblížení se nulové hodnotě.

Při porovnání hodnot je vidět hlavní přínos optimalizovaného řízení v oblouku, tedy pokles vodičích sil až o 30 %, s čímž koresponduje snížení opotřebení kol a kolejnic.

Velikost snížení vodičích sil v kontaktu kolo-kolejnice do značné míry ovlivňuje skutečnost, že vozidlo mnohdy projíždí oblouk výběhem. Dříve již bylo řečeno, že optimalizované řízení je na tramvaji 15T aktivní pouze v jízdě či brzdě, nikoliv však ve výběhu.

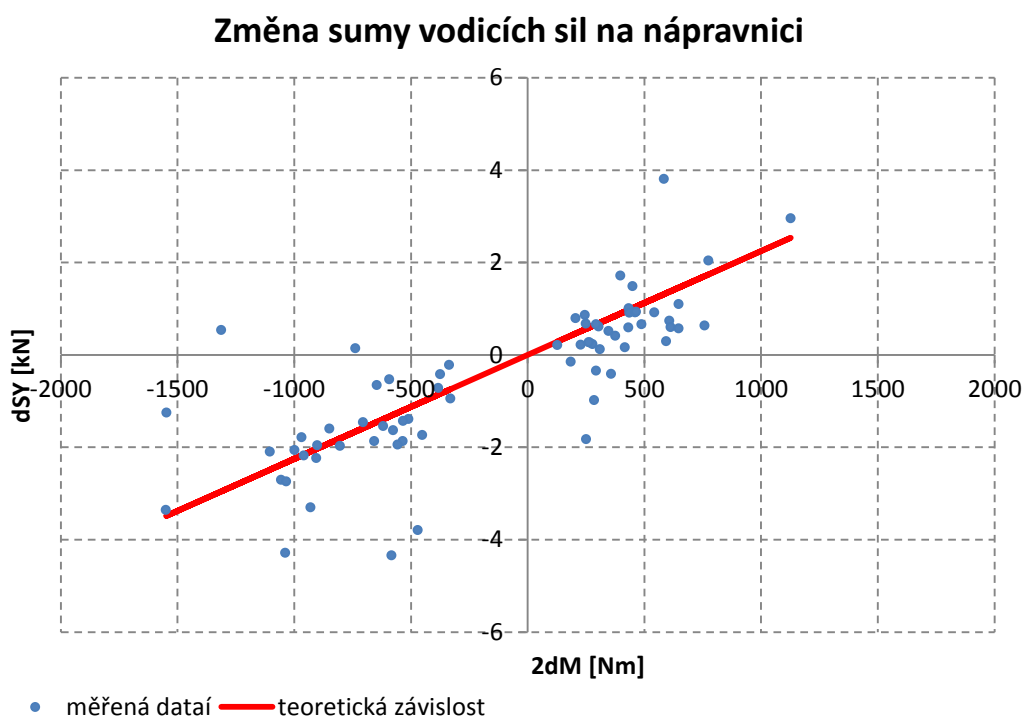


Obr. 7.8 – Vodící síla na nabíhající kole (oblouky řazeny dle vodící síly) [12]

Závislost snížení vodící síly na velikosti přídavného momentu

Graf závislosti snížení vodící síly na velikosti přídavného momentu je zobrazen na Obr. 7.9. Zde vidíme jednotlivé body vytvořené z nalogovaných dat. Červeně je zakreslena teoretická závislost, která byla odvozena.

Při velikosti vodící síly $Y = 10$ kN a rozdílovém momentu $\Delta M = 500$ Nm činní pokles vodící síly na nabíhající kole cca 2 kN, výsledné snížení vodící síly je o 20 %.



Obr. 7.9 – Závislost snížení vodící síly na velikosti přídatného momentu [12]

V porovnání s výsledky, které byly dosaženy na experimentálním kolejovém vozidle, bylo u tramvaje 15T snížení vodících sil menší. To je dáno jednak rozdílným způsobem jízdy, dále pak limitací rozsahu přídatného momentu od 0 do 100 %. I přes tyto skutečnosti algoritmus optimalizovaného řízení dosáhl snížení vodících sil. Vzhledem k časové náročnosti experimentů nebylo možné provést větší množství měření, či některé větší SW úpravy, které by mohly ještě více přispět ke snížení vodící síly. Během experimentů se podařilo snížit vodící síly cca 10 až 20 % v návaznosti na obsazení tramvaje. Pokles míry opotřebení je však menší oproti poklesu vodící síly podle [3].

7.3 Vliv optimalizovaného řízení na spotřebu trakční energie 15T

Stejně jako na experimentálním kolejovém vozidle, tak i u tramvaje 15T vyvstala otázka vlivu optimalizovaného řízení na spotřebu trakční energie. U tramvaje dochází k optimalizovanému řízení pouze u režimu jízda a brzda, nikoli v režimu výběh. Styl řízení tramvaje ve značné míře využívá výběhu i při průjezdu obloukem. Během režimu jízda a brzda bylo rozvážení momentů motorů při optimalizovaném řízení omezeno shora maximálním momentem trakčních motorů, zdola potom nulou. Měření bylo prováděno pouze pro aktivaci algoritmu oblouku, který se na experimentálním kolejovém vozidle projevoval

jako energeticky nejnáročnější. Měření bylo realizováno v úseku Palmovka – Vozovna Kobylisy – Palmovka o délce cca 10,5 km. Z časových důvodů byla provedena pouze dvě měření, výsledky jsou uvedeny v Tab. 7.1 a Tab. 7.2. V prvním sloupci se nachází ID jednotlivých měření pro dohledání záznamů o aktivaci a průběhu optimalizovaného řízení. Následuje sloupec měření spotřebované trakční energie pouze jednoho podvozku s větší přesností, v obou případech se jedná o podvozek B. Dále následují data vyčtená z palubního systému tramvaje 15T. Zde se nachází trakční spotřeba, celková spotřeba tramvaje včetně pomocné spotřeby a ujetá vzdálenost.

Tab. 7.1 - Měření v úseku Palmovka – Vozovna Kobylisy – Palmovka

	Energie podvozku B	Tramvaj 15T		Vzdálenost	Poznámky
	Spotřeba	Spotřeba	Celková		
	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[km]	
ID 133	8,27084	31	28	10,322	bez reg. část s rekuperací
ID135	11,21997	42	48	10,326	reg.
ID137	11,42241	42	48	10,318	bez reg.
ID140	10,89737	40	44	10,32	reg.
ID142	10,97623	42	48	10,321	bez reg.

U ID 133 vidíme rozdíl ve sloupci celkové spotřeby, je to dáno aktivní rekuperací u určité části trati. Všechna následující měření se již prováděla s deaktivovanou rekuperací pro lepší vypovídající schopnost. Při porovnání jednotlivých měření v Tab. 7.1 vidíme, že rozdíly ve spotřebě mezi jízdou s optimalizovaným řízením a bez optimalizovaného řízení jsou v řádu jednotek %. Při takto nízkých odchylkách se dá říci, že větší vliv na spotřebu bude dán nerovnoměrnou dopravní situací (např. počet rozjezdů) i přes fakt, že se jednalo o noční provoz.

Výsledky z druhého měření obsahuje tabulka Tab. 7.2. Při porovnání spotřeby trakční energie s a bez optimalizovaného řízení, jsou patrné pouze malé rozdíly ve spotřebě v řádu jednotek %.

Tab. 7.2 – Druhé měření v úseku Palmovka – Vozovna Kobyličky – Palmovka

	Energie podvozku B	Tramvaj 15T		Vzdálenost	Poznámky
	Spotřeba	Spotřeba	Celková		
	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[km]	
ID 155	14,47401	55	61	10,309	bez reg.
ID157	17,61383	55	60	9,341	s reg.
ID159	11,79563	55	61	11,291	s reg.
ID161	12,56996	47	53	10,309	bez reg.

Vidíme, že rozdíly spotřebované trakční energie mezi měřeními s optimalizovaným řízením a bez optimalizovaného řízení jsou při obou měřeních nízké v porovnání s experimentálním kolejovým vozidlem. Na minimalizaci vlivu optimalizovaného řízení na velikost odběru trakční energie na tramvaji 15T se bezpochyby projevuje vliv vyšší účinnosti pohonů tramvaje oproti pohonům v podvozku experimentálního vozidla. [22]

8 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY A PŘÍNOS DISERTACE

Stěžejní část práce je experimentální, ta byla cílena na nadřazený řídicí systém a tvorbu SW pro optimalizované řízení na experimentálním vozidle.

SW pro optimalizaci řízení na experimentálním kolejovém vozidle s nezávisle otáčivými koly byl navržen, vyvinut, implementován a odladěn.

Při nastavování a ladění algoritmů byl zvolen postup pro ověřování jednotlivých závislostí potřebných pro optimalizované řízení. Pomocí dílčích testů byla ověřena funkčnost a míra přínosu. Totožný postup ověřování dílčích testů byl uplatněn následně při implementaci a oživování algoritmů pro optimalizované řízení na tramvaji 15T.

Bylo prokázáno, že rozlišení 4096 poloh na otáčku kola s vhodným způsobem zpracování informace je dostačující pro výpočet a detekci příčné polohy v přímé trati. Rozdíl úhlových rychlostí je dán velikostí příčné výchylky nápravnice, kdy vlivem kuželovitosti kola dochází k rozdílným styčným poloměrům a tím i k rozdílu úhlových rychlostí. Přesnost vyhodnocení musí být o řád vyšší než samotný rozdíl úhlové rychlosti. U tramvaje 15T, která disponuje lepší rozlišovací schopností na otáčku, bylo dosaženo adekvátních výsledků potřebných pro algoritmus optimalizovaného řízení individuálně poháněných kol.

Na základě kvality snímání úhlové rychlosti a výpočtu regulační odchylky pro příčný směr u koeficientu c_1 podvozku v kolejové dráze a velikosti regulační odchylky pro vzpříčenou polohu u koeficientu c_3 byl odladěn algoritmus pro automatickou detekci polohy podvozku v oblouku bez nutnosti použití jiných veličin, než jsou dostupné na tramvaji 15T. Vymezení funkce algoritmu pro oblouk je dáno velikostí vypočtené regulační odchylky pro vzpříčenou polohu v kolejové dráze. V případě algoritmu na tramvaji byl využit již v minulosti naprogramovaný algoritmus pro výpočet projížděného poloměru. Jeho slabinou je problém míry opotřebení kolejnic a vyjetých falešných žlábků, které se na několika místech v pražské kolejové síti vyskytují. V takovém případě dochází k detekci opačného směru oblouku. V reálných podmínkách se uvažuje o využití GPS modulu a znalostí tratě pro přepínání algoritmů pro přímou trať a oblouk.

Nejdůležitějším úkolem bylo zjistit vliv přídavného momentu, kdy u pohonů na jedné straně podvozku byl moment navýšen a na druhé straně o stejnou míru snížen, zda je možné

přídavným momentem dosáhnout změny vodící síly a změny příčné polohy v kolejové dráze. Vliv přídavného momentu na změnu příčné polohy podvozku v kolejové dráze byl ověřen jak pomocí mechanického měření příčné polohy, tak výpočtem regulační odchylky příčné polohy u koeficientu c_I na základě výpočtu z úhlových rychlostí kol. Bylo dokázáno, že změnou momentů je možné ovlivnit příčnou polohu podvozku v kolejové dráze, v oblouku pak převážně pouze snížit vodící síly.

Přínos algoritmu optimalizace řízení na snížení vodících sil se projevil příznivě. Byly potvrzeny teoretické předpoklady včetně závěrů simulací. Z výsledků měření zaměřených na ověření snížení vodících sil je patrné, že je možné snížit vodící síly v oblouku řádově o desítky procent. To vede ke snížení opotřebení v kontaktu kolo-kolejnice a tím k prodloužení životnosti kola a kolejové dráhy. Snížení vodících sil má i příznivý vliv na bezpečnost proti vykolejení vozidla. Výsledek je však ovlivněn řadou faktorů, i oblastí ve které je algoritmus optimalizovaného řízení aktivní. Vzhledem k faktu, že moment při optimalizovaném řízení nebyl na experimentálním vozidle omezen nulovým momentem, ale byl umožněn přechod do opačné polarity, bylo dosaženo lepších výsledků snížení vodících sil ve srovnání s tramvají 15T.

Při měření na tramvaji 15T bylo prokázáno snížení vodících sil. Bylo by možné dosáhnout ještě lepších výsledků. Řídicí systém tramvaje má jisté rezervy v porovnání s experimentálním kolejovým vozidlem. U tramvaje 15T během měření docházelo k optimalizovanému řízení pouze v režimu jízda a brzda, nikoli výběh. Ten je u jízdy tramvají hojně využíván.

Jedním z cílů projektu byl i výzkum vlivu optimalizovaného synchronizovaného řízení pohonů podvozku kolejového vozidla s nezávisle otáčivými koly na velikost odběru trakční energie vozidla. Tato problematika byla detailně zkoumána na experimentálním vozidle. Zde se ukazuje, že algoritmy optimalizovaného řízení způsobují nárůst odběru trakční energie o jednotky až desítky % v závislosti na míře využití těchto algoritmů (jízda/jízda i výběh, jízda/jízda i brzda, omezení rozvážení momentů na nulu/bez omezení). Výše nárůstu odběru trakční energie výrazně narůstá s klesající účinností pohonů vozidla. U experimentálního vozidla je účinnost pohonů poměrně malá – do 60%, proto je vliv algoritmů optimalizovaného řízení na trakční odběr výrazný. Při obdobných měřeních na tramvaji 15T, kde je účinnost pohonů výrazně vyšší (kolem 90%), nebyl indikován prokazatelný nárůst odběru trakční

energie při použití optimalizačních algoritmů, rozdíly v odběru trakční energie tramvaje 15T při měřeních na definované trati byly dány evidentně režimem jízdy a rozdílností provozních situací.

Z výsledků práce vzešly další možnosti testování a postupy ověřování, které bude nutné dále řešit. Jednou ze skutečností je vylepšení algoritmů a lepší ověření na samotném vozidle 15T. To nebylo z časových důvodů plně možné tak, jako na experimentálním kolejovém vozidle. Z výsledků uvedených v této práci vychází, že bude nutné provést dlouhodobá měření na tramvajích 15T, zaměřená na mechanické opotřebení kol a spotřebu trakční elektrické energie.

Stručná charakteristika splnění cílů disertační práce je následující:

- Na základě předchozích teoretických návrhů byly v rámci disertační práce vyvinuty, implementovány a odladěny metody pro indikaci polohy podvozku s nezávisle otáčivými koly v kolejové dráze. Jedná se zejména o rozpoznání příčného posunutí podvozku v přímé trati a rozpoznání vzpříčení v oblouku. Vstupními hodnotami algoritmů jsou okamžité hodnoty úhlových rychlostí jednotlivých kol v podvozku. V rámci vývoje algoritmů musel proběhnout výzkum a návrh v hodné metody přesného vyhodnocení těchto rychlostí s krátkou vzorkovací periodou, která by byla aplikovatelná v podmínkách reálného provozu. Vyvinuté metody byly úspěšně testovány v podmínkách reálného drážního vozidla a to jednak na experimentálním vozidle, jednak na tramvaji 15T.
- Na základě předchozích teoretických návrhů byl v rámci disertace vyvinut, implementován a odladěn algoritmus pro optimalizované synchronizované řízení individuálních pohonů kol v podvozku s nezávisle otáčivými koly s cílem zmenšení vodících sil a snížení opotřebení kol a kolejnic. Odladěný algoritmus je plně funkční v podmínkách reálného drážního provozu, kde byl testován na experimentálním vozidle a na tramvaji 15T. Na obou vozidlech bylo nezávislými měřeními v mechanické části prokázáno snížení vodících sil až o desítky % při použití vyvinutých algoritmů.
- Na základě předchozích teoretických návrhů byl v rámci disertace vyvinut, implementován a odladěn algoritmus pro optimalizované synchronizované řízení individuálních pohonů kol v podvozku s nezávisle otáčivými koly s

cílem zamezení nabíhání podvozku na jednu stranu kolejové dráhy v přímé trati v důsledku absence pevné mechanické vazby mezi koly. Eliminací naléhání podvozku na jednu stranu kolejové dráhy v přímé trati se sníží opotřebení kol a kolejnic. Odladěný algoritmus je plně funkční v podmínkách reálného drážního provozu, kde byl testován na experimentálním vozidle a na tramvaji 15T.

- Byla navržena, vyvinuta, implementována a odladěna původní metoda pro indikaci charakteru tratě přímá trať/oblouk s využitím informací o rychlostech kol v podvozku a o průběhu žádaných hodnot momentů pro jednotlivé motory. Indikace charakteru trati je potřebná z důvodu nutnosti přepínání algoritmů optimalizovaného synchronizovaného řízení pro oblouk a pro přímou trať. Metoda byla úspěšně otestována a využívána při měřeních na experimentálním vozidle. Na tramvaji 15T nebylo možno metodu použít z důvodu odlišné relace mezi rozchodem koleje a poloměry projížděných oblouků.
- Byl proveden detailní experimentální výzkum vlivu optimalizovaného synchronizovaného řízení individuálních pohonů v podvozku s nezávisle otáčivými koly na trakční spotřebu experimentálního vozidla pro různé varianty aktivace optimalizačních algoritmů. Vlivem nízké účinnosti pohonů experimentálního vozidla byly vlivy řízení na energetickou spotřebu dobře měřitelné. Měření bylo zjištěno, že spotřeba trakční energie experimentálního vozidla se v závislosti na variantě aktivace optimalizačního algoritmu zvýší o jednotky až desítky %. Na tramvaji 15T nebylo navýšení trakční spotřeby vlivem optimalizačních algoritmů prokázáno vlivem vyšší účinnosti trakčních pohonů a díky provozním vlivům během měření.

Cíle disertační práce byly splněny.

ZÁVĚR

Důležitým faktorem, při tvorbě této práce byla účast autora na projektu „Výzkum jízdních vlastností a řízení pohonů trakčních kolejových vozidel s nezávisle otáčivými koly.“ Výzkum probíhal v rovině teoretické, simulační, experimentální i v ověřovací na reálném vozidle. Projekt byl cílen na jedinečné technické uspořádání pohonu tramvaje 15T ForCity. V současné době Dopravní podnik města Prahy disponuje počtem převyšujícím sto vozidel. Narůstající počty vozidel přidávají na významu této práce. Při snížení sil v kontaktu kolo-kolejnice dochází ke snížení opotřebení, to má příznivý vliv na snížení nákladů na údržbu a zvýšení kilometrového náběhu vozidla.

Cílem práce byl výzkum a rozpracování metod pro optimalizované řízení pohonů nezávisle otáčivých kol v podvozku kolejového vozidla v součinnostech s technickými vlastnostmi reálných elektronických systémů s nespojitým zpracováním informace pro měření i regulaci a ve vazbě na reálné traťové poměry.

Projekt skončil ke konci roku 2014 s následujícími závěry. U experimentálního kolejového vozidla byla plně odladěna optimalizace řízení včetně automatické detekce oblouk/přímá trať (bez použití GPS modulu), informace je nezbytná pro přechod mezi algoritmy výpočtu přídatného momentu. Vyvinutý algoritmus optimalizovaného řízení umožňuje v přímé trati odstranit či zmenšit trvalé nalehnutí podvozku na jednu stranu kolejové dráhy. Při průjezdu obloukem bylo pomocí algoritmu optimalizovaného řízení dosaženo snížení vodících sil až o desítky procent. To má příznivý vliv na míru opotřebení v kontaktu kolo-kolejnice a pozitivně přispívá k bezpečnosti proti vykolejení. U experimentálního kolejového vozidla s optimalizovaným řízením byl zjištěn nárůst spotřeby trakční energie o desítky procent. Bylo prokázáno, že z informací o úhlové rychlosti jednotlivých kol je možné rozpoznání příčné polohy podvozku v kolejové dráze. Ověření bylo provedeno pomocí mechanických snímacích prvků.

Zkušenosti a postupy získané z experimentů prováděných na experimentálním kolejovém vozidle byly využity při implementaci algoritmu optimalizovaného řízení a ověřovacím měření na reálném vozidle 15T. I přes omezené podmínky experimentů, převážně však z časového limitu, kdy pro vlastní měření byly vyhrazeny pouze čtyři noci, bylo dosaženo jistých výsledků. Na tramvaji 15T byly uskutečněny testy pro ověření funkčnosti

optimalizovaného řízení včetně ověřování potenciálu pro snížení opotřebení v kontaktu kolo-kolejnice. Výsledky z experimentálního měření prokázaly příznivý vliv optimalizovaného řízení na snížení vodících sil v kontaktu kolo-kolejnice. Procentuální míra snížení vodících sil však nedosahovala hodnot totožných s měřením na experimentálním kolejovém vozidle. Vliv na rozdíl výsledků má styl jízdy, absence optimalizovaného řízení při výběhu a režim při jízdě, kdy dochází k limitaci momentu zdola na nulu. Pozitivním výsledkem je vliv optimalizovaného řízení na spotřebu trakční energie tramvaje 15T, kdy pro jízdu s a bez optimalizovaného řízení vychází spotřeba téměř totožná s odchylkou v řádu jednotek procent. Odchytky však mohou být způsobeny nemožností dodržet podobnost dopravní situace.

Závěrem lze říci, že optimalizované řízení naplnilo očekávání dle teoretických předpokladů a simulací. Z výsledků je vidět pozitivní dopad algoritmu na síly v kontaktu kolo-kolejnice. Na základě těchto výsledků je další postup vývoje především v kompetenci firem skupiny ŠKODA, jako výrobce vozidla 15T, případně v kompetenci provozovatelů a zákazníků. [24]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 – Dvojkolí v koleji – přímá trať	16
Obr. 2.2 – Příčné posunutí dvojkolí (vlevo) a dvojice nezávisle otáčivých kol (vpravo) v přímé koleji	16
Obr. 2.3 – Příčný pohyb dvojkolí v oblouku [1]	18
Obr. 2.4 – Uspořádání trakce tramvaje 15T ForCity pro Prahu 0	19
Obr. 2.5 – Značení kol v podvozku a přidavný moment	23
Obr. 2.6 – Působení přidavného momentu ΔM a vytváření momentu M_z	25
Obr. 2.7 – Vzpříčená poloha podvozku v přímé trati (vlevo) a příčný posun podvozku (vpravo)	26
Obr. 2.8 – Simulace příčného pohybu dvojkolí (dvojkolí/nezávisle otáčivá kola) [4]	29
Obr. 2.9 – Simulace míry opotřebení dvojkolí (dvojkolí/nezávisle otáčivá kola) [1]	29
Obr. 2.10 - Opotřebení jízdních ploch kol a kolejnic při průjezdu obloukem [12]	31
Obr. 2.11 – Výsledky simulace celkové míry opotřebení vztažená k nezávisle otáčivým kolům ($v = 1 \text{ m/s}$, $\mu = 0,4$) [12]	32
Obr. 3.1 – Návrh a konečná podoba experimentálního kolejového vozidla (více viz. Příloha F) [2]	34
Obr. 3.2 – Konstrukční řešení podvozku experimentálního vozidla [2]	35
Obr. 3.3 – Podvozek experimentálního vozidla	36
Obr. 3.4 – Blokové schéma elektrické trakce [1]	37
Obr. 3.5 – Rozvaděč experimentálního vozidla	38
Obr. 3.6 – Trakční baterie Pb 12 V/ 150 Ah	39
Obr. 3.7 – Trakční střídač (jeden individuální pohon) [2]	40
Obr. 3.8 – Trakční střídač	41
Obr. 3.9 – Synchronní motor s permanentními magnety - AKM 74P	43
Obr. 3.10 – Ovládací pult experimentálního kolejového vozidla	44
Obr. 4.1 – Nadřazený řídicí systém cRIO-9022 od firmy National Instrument [8]	45
Obr. 4.2 – Ovládací a informační panel – PC	47
Obr. 4.3 – Blokové schéma komunikace LabVIEW [8]	47
Obr. 4.4 – Otevření komunikace s FPGA - Block diagram target	48
Obr. 4.5 – Zápis a čtení z FPGA - Block diagram target	48
Obr. 4.6 – Příklad komunikace mezi zařízením a počítačem	49

Obr. 4.7 – Měření úhlové rychlosti v FPGA - Block diagram.....	51
Obr. 4.8 – Záznam rychlosti v horní části při 5 ms (velké kvantovací kroky)	52
Obr. 4.9 – Závislost rozdílu poloměrů valení na příčné poloze podvozku v kolejové dráze (kolejnice 93/18) [2]	52
Obr. 4.10 – Závislost kroku na měřícím časovým okně ($v = 5$ km/h)	53
Obr. 4.11 – Výpočet rychlosti individuálně poháněného kola	54
Obr. 4.12 – Záznam z jízdy, na ose y rychlost jednotlivých kol [km/h] ($R = 60$ m)	54
Obr. 4.13 – Komunikace po TCP s VÚKV - Block diagram	56
Obr. 4.14 – Panel ADclient VÚKV	56
Obr. 4.15 – Řízení momentu - Block diagram.....	57
Obr. 4.16 – Schéma omezení rychlosti	59
Obr. 4.17 – Blok ovládání výpočtu přídavného momentu.....	60
Obr. 4.18 – Limitace přídavného momentu	61
Obr. 4.19 – Skluz dvojkolí.....	63
Obr. 4.20 – Skluz se zapnutou SO v3.0 nastavení 100 % EDB.....	63
Obr. 4.21 – Vypočtené regulační odchylky u koeficientu c_1 při průjezdu obloukem ($t = 15$ s)	64
Obr. 4.22 – Vypočtené regulační odchylky u koeficientu c_3 při průjezdu obloukem ($t = 15$ s) – tři režimy řízení pohonů.....	65
Obr. 4.23 – Auto switch, set param toff $\Delta M < 5$ Nm.....	66
Obr. 5.1 – Schéma měřícího aparátu.....	67
Obr. 5.2 – Měřící vybavení VÚKV a.s., průmyslový počítač a UTP kabely pro připojení snímací techniky	68
Obr. 5.3 – Půdorys rozmístěním snímačů na experimentálním vozidle [3].....	70
Obr. 5.4 – Kladky pro snímání úhlu náběhu a příčné polohy podvozku [3]	71
Obr. 5.5 – Nápravnice experimentálního vozidla s rozmístěním měřících ojniček (2),(3) a (4) [2].....	72
Obr. 5.6 – Detail zapojení tenzometryckých snímačů (2),(3) a (4) [2].....	72
Obr. 5.7 – Ojničky osazené tenzometry před kalibrací (2),(3) a (4) [2]	73
Obr. 5.8 – Mladějovská průmyslová dráha	74
Obr. 6.1 – Jízda bez přídavného momentu: přímá trať a oblouk	79
Obr. 6.2 – Jízda v přímé trati a výpočet regulační odchylky u koeficientu c_1 – poloha podvozku v příčném směru.....	80

Obr. 6.3 – Příčná poloha podvozku v kolejové dráze snímaná mechanicky a vypočtena z otáček kol [12]	80
Obr. 6.4 – Vliv přidavného momentu $\Delta M = 25$ Nm na příčnou polohu podvozku	81
Obr. 6.5 – Funkce optimalizovaného řízení při jednostraném nabíhání (moment 25 Nm)	82
Obr. 6.6 – Vliv optimalizovaného řízení při jízdě obloukem na polohu podvozku v kolejové dráze reprezentovanou regulační odchylkou u koeficientu c_3	83
Obr. 6.7 – Automatické přepínání optimalizace – regulační veličina u koeficientu c_1 (příčná poloha) a koeficientu c_3 (tětivová poloha)	84
Obr. 6.8 – Automatické přepínání optimalizace – stav režimu výpočtu a vypočítaný poloměr	84
Obr. 6.9 – Automatické přepínání optimalizace – moment levého kola M_{12} a pravého M_{11}	85
Obr. 6.10 – Vliv přidavného momentu $\Delta M = 25$ Nm na příčnou polohu (černý průběh) [12].	86
Obr. 6.11 – Vliv optimalizovaného řízení na příčnou polohu podvozku (zelený) při uměle vyvolaném nabíhání (černý průběh $\Delta M = 25$ Nm) [12].	86
Obr. 6.12 – Vliv optimalizovaného řízení na snížení vodících sil Y na nabíhající kole (červený průběh) [12]	87
Obr. 6.13 – $l = 1580$ m	89
Obr. 6.14 – $l = 457$ m	89
Obr. 6.15 – $l = 540$ m	90
Obr. 6.16 – Oblouk nad Novou Vsí $l = 360$ m	90
Obr. 7.1 – 15T označení podvozků [12]	92
Obr. 7.2 – Tramvaj 15T ForCity – otočný podvozek osazen sensorovou technikou (v levo), detail na přenos signálů z měřícího hřídele (v pravo)	93
Obr. 7.3 – Úsek testování algoritmu optimalizace řízení s tramvají 15T – Vozovna Kobylisy – Palmovka [23]	94
Obr. 7.4 – Průběhy momentů na trakčním motoru na pravé a levé straně podvozku (černá a červená křivka) pro algoritmus oblouku [12]	95
Obr. 7.5 – Srovnání průběhů naměřených vodících sil bez optimalizovaného řízení (černý průběh) a se optimalizovaným řízením (červený průběh) [12]	96
Obr. 7.6 – Jízda přímou tratí s aktivní regulací na regulační odchylku u koeficientu c_1 (modrý průběh) [12]	96
Obr. 7.7 – Trasa pro měření [23]	97
Obr. 7.8 – Vodící síla na nabíhající kole (oblouky řazeny dle vodící síly) [12]	98

Obr. 7.9 – Závislost snížení vodící síly na velikosti přídatného momentu [12]99

SEZNAM TABULEK

Tab. 5.1 - Výčet senzorů umístěných na experimentálním kolejovém vozidle [2]	69
Tab. 6.1 - Přímá trať za Novou Vsí [Wh]	89
Tab. 6.2 - Oblouk nad průmyslovým areálem [Wh]	89
Tab. 6.3 - Eso nad Vekslem [Wh]	90
Tab. 6.4 - Oblouk nad Novou Vsí [Wh]	90
Tab. 7.1 - Měření v úseku Palmovka – Vozovna Kobylisy – Palmovka	100
Tab. 7.2 – Druhé měření v úseku Palmovka – Vozovna Kobylisy – Palmovka	101

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] NOVÁK, Jaroslav, Michael LATA, Ondřej ČERNÝ, Petr SÝKORA, Jan ČAPEK, Jan MALINSKÝ, Jan MAŠEK, Jan BAUER a Ladislav SOBOTKA. *Návrh a stavba experimentálního vozidla s nezávisle otáčivými koly a výsledky souvisejících teoretických a simulačních prací: Roční průběžná zpráva za rok 2011 z řešení projektu TA01030391*. Pardubice, 2011.
- [2] NOVÁK, Jaroslav, Michael LATA, Ondřej ČERNÝ, Petr SÝKORA, Václav LENOCH, Jan ČAPEK, Jan MALINSKÝ a Ladislav SOBOTKA. *Vlastnosti a řízení kolejových vozidel s nezávisle otáčivými koly – teoretické a simulační práce, stavba experimentálního vozidla: Roční průběžná zpráva za rok 2012 z řešení projektu TA01030391 č. KEEZ – T – 06 - 12*. 2012, 106 s.
- [3] NOVÁK, Jaroslav, Michael LATA, Ondřej ČERNÝ, Petr SÝKORA, Václav LENOCH, Jan ČAPEK, Jan MALINSKÝ, Ladislav SOBOTKA, Jan BAUER, Petr VOLTR, a Radovan Doleček. *Výzkum jízdních vlastností a řízení pohonů trakčních kolejových vozidel s nezávisle otáčivými koly – teoretické a simulační práce, stavba experimentálního vozidla: Roční průběžná zpráva za rok 2013 z řešení projektu TA01030391 č. KEEZ – T – 06 - 12*. 2013, 110 s.
- [4] ČAPEK, Jan, Petr SÝKORA a Václav LENOCH, V.: *Control of Traction Rail Vehicle with Free-wheels: TRANSACTIONS ON ELECTRICAL ENGINEERING 2012 No.4*, pp. 111 – 115, ISSN 1805-3386
- [5] LENOCH, Václav a Petr SÝKORA. *Experimentální kolejové vozidlo určené pro výzkum individuálního pohonu nezávisle otáčivých kol. In: SEKEL 2012: September 5.-7. 2012 Bratislava STU - Modra-Hormónia Slovenská republika*. Bratislava: Faculty of Mechanical Engineering, 2012, s. 6. ISBN 978-80-227-3781-4.
- [6] LENOCH, Václav. *Nadřazený řídicí systém experimentálního kolejového vozidla*. In: *Elektrotechnická zařízení v dopravě*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2012, s. 7.
- [7] NOVÁK, Jaroslav, Ondřej ČERNÝ a Jiří ŠIMÁNEK, J.: *Regulace synchronního motoru pro lehkou kolejovou trakci*, ELEKTRO. 2008, roč. 18, č.6 , s. 4-10. ISSN 1210-0889.
- [8] ČAPEK, Jan. *Optimalizace jízdních vlastností nízkopodlažních tramvají*. Praha, 2013-11-12. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/23161>. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Rus Ladislav.

- [9] NOVÁK a Václav LENOCH. *SEKEL 2014: Synchronizované řízení podvozku kolejového vozidla s nezávisle otáčivými koly* [online]. 1. vyd. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2014[cit. 2014-10-30]. ISBN 978-80-213-2480-0.
- [10] webové stránky National Instruments: <http://www.ni.com/compactrio/>
- [11] interní materiály a dokumentace ŠKODA ELECTRIC
- [12] interní materiály a dokumentace VÚKV a.s.
- [13] webové stránky firmy Albright www.albrightinternational.com
- [14] webové stránky firmy Metra Blansko: <http://www.metra.cz/merici-pristroje/panelove-a-rozvadecove-pristroje/>
- [15] webové stránky firmy Elektro, výrobní závod Bečov nad Teplou: <http://www.elektrobecov.cz/>
- [16] *Semikron: SK 75 GD 066 T* [online]. c 2014 [cit. 2014-11-04]. Dostupné z: <http://www.semikron.com/products/product-classes/igbt-modules/detail/sk-75-gd-066-t-24912420.html>
- [17] *Semikron: SKHI 61 R* [online]. c 2014 [cit. 2014-11-04]. Dostupné z: <http://www.sindopower.com/en/Products-and-Shop/Product-Groups/Drivers/SKHI-61-R.html>
- [18] *Axima: AXIstand*. [online]. 2014 [cit. 2014-11-05]. Dostupné z: <http://www.axima.cz/katalog/produkt/axistand/21/7131259e.html>
- [19] *Texas Instruments: TMS320F2812*. [online]. 2014 [cit. 2014-11-05]. Dostupné z: <http://www.ti.com/product/TMS320F2812/description>
- [20] VYSKOČIL, J.: *Technický popis jednotky D8213C1*, Technická zpráva ŠKODA ELECTRIC, 2006
- [21] *Kollmorgen: AC Synchronous Servo Motors*. [online]. 2014 [cit. 2014-11-05]. Dostupné z: <http://www.kollmorgen.com/en-us/products/motors/servo/akm-series/akm-series-ac-synchronous-motors/ac-synchronous-servo-motors/>
- [22] NOVÁK, Jaroslav, Václav LENOCH a Jan ČAPEK. *Výzkum synchronizovaného řízení pohonů kolejového vozidla s nezávisle otáčivými koly (1. část): Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku* [online]. Josef KOŠTÁL. Josef KOŠTÁL. Pod Vodárenskou věží 4, Praha 8: FCC Public s.r.o., 2014, roč. 2014, č. 11 [cit. 2014-11-12]. ISSN 1210-0889. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Elektro/2014/11/Elektro_11_2014_output/web/flipviewerxpress.html?seq=1Dfa

- [23] *Pražská integrovaná doprava: Tramvaje* [online]. 2014. vyd. 2014 [cit. 2014-08-28]. Dostupné z: http://www.ropid.cz/mapy/tramvaje_s190x362.html
- [24] NOVÁK, Jaroslav, Václav LENOCH a Jan ČAPEK. *Výzkum synchronizovaného řízení pohonů kolejového vozidla s nezávisle otáčivými koly (2. část – dokončení): Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku* [online]. Josef KOŠTÁL. Josef KOŠTÁL. Pod Vodárenskou věží 4, Praha 8: FCC Public s.r.o., 2014, roč. 2014, č. 12 [cit. 2014-12-12]. ISSN 1210-0889. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Elektro/2014/12/Elektro_12_2014_output/web/flipviewerxpress.html?seq=6

SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA

Publikace v mezinárodním odborném periodiku

- [1] ČAPEK, Jan, Petr SÝKORA a Václav LENOCH. *Control of Traction Rail Vehicle with Free-wheels: TRANSACTIONS ON ELECTRICAL ENGINEERING 2012 No.4*, pp. 111 – 115, ISSN 1805-3386

Publikace v národních odborných periodikách

- [2] NOVÁK, Jaroslav, Zdeněk MAŠEK a Václav LENOCH. *Elektronické řízení hydrostatického přenosu výkonu na kolejovém vozidle: (1. část). Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku*. Praha: FCC Public s. r. o., 2012, roč. 22, č. 12, s. 6-8. ISSN 1210-0889.
- [3] NOVÁK, Jaroslav, Zdeněk MAŠEK a Václav LENOCH. *Elektronické řízení hydrostatického přenosu výkonu na kolejovém vozidle: (2. část – dokončení). Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku*. Praha: FCC Public s. r. o., 2013, roč. 23, č. 1, s. 12-16. ISSN 1210-0889.
- [4] ČERNÝ, Ondřej, Radovan DOLEČEK, Jaroslav NOVÁK, Petr SÝKORA a Václav LENOCH. *Vědeckotechnický sborník ČD: Experimentální vozidlo s volně otáčivými koly pro rozchod 600 mm*. Generální ředitelství Českých drah, Nábřeží L. Svobody 1222, Praha 1: Generální ředitelství Českých drah, Jana Želivského 2, Praha 3, 2013, 7
- [5] NOVÁK, Jaroslav, Václav LENOCH a Jan ČAPEK. *Výzkum synchronizovaného řízení pohonů kolejového vozidla s nezávisle otáčivými koly (1. část): Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku* [online]. Josef KOŠTÁL. Josef KOŠTÁL. Pod Vodárenskou věží 4, Praha 8: FCC Public s.r.o., 2014, roč. 2014, č. 11 [cit. 2014-11-12]. ISSN 1210-0889. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz /flipviewer/Elektro/2014/11/Elektro_11_2014_output/web/flipviewerxpress.html?seq=1
- [6] NOVÁK, Jaroslav, Václav LENOCH a Jan ČAPEK. *Výzkum synchronizovaného řízení pohonů kolejového vozidla s nezávisle otáčivými koly (2. část – dokončení): Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku* [online]. Josef KOŠTÁL. Josef KOŠTÁL. Pod Vodárenskou věží 4, Praha 8: FCC Public s.r.o., 2014, roč. 2014, č. 12 [cit. 2014-12-12]. ISSN 1210-0889. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz /flipviewer/Elektro/2014/12/Elektro_12_2014_output/web/flipviewerxpress.html?seq=6
- [7] ČERNÝ, Ondřej, Václav LENOCH a Jaroslav NOVÁK. *Výzkum řízení pohonů: Sborník vědeckých prací DFJP Univerzity Pardubice*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2013.

Publikace na mezinárodních konferencích

- [8] DOLEČEK, R., ČERNÝ, O., LENOCH, V., SCHEJBAL, V., Disturbing effects at traction drives with PMSM, in Proceedings of 22nd International Conference, *Radioelektronika 2012*, April 17 - 18, 2012 pp. 165 - 168, ISBN 978-80-214-4468-3.
- [9] DOLEČEK, Radovan, Ondřej ČERNÝ a Václav LENOCH., *The GPS application for the control of the rail vehicle*, in Proceedings of 24th International Conference, *Radioelektronika 2014*, Bratislava, Slovak Republic, April 15 - 16, 2014, ISBN 978-1-4799-3714-1.

Publikace na národních konferencích

- [10] LENOCH, Václav. *Pomocné pohony u motorových lokomotiv*. In: *Elektrotechnická zařízení v dopravě*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 25.2.2011, s. 1-5. ISBN 978-80-7395-366-9
- [11] LENOCH, Václav. *Model hydrostatického systému v LabVIEW*. In: *Elektrotechnická zařízení v dopravě*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 28.2.2012, s. 1-8. ISBN 978-80-7395-466-6.
- [12] LENOCH, Václav. *Simulace rušivých vlivů na trakčním pohonu s PMSM*. In: *Elektrotechnická zařízení v dopravě*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 28.2.2012, s. 1-9. ISBN 978-80-7395-466-6.
- [13] SÝKORA, Petr a Václav LENOCH. *Celosvětové trendy ekologizace dopravy*. In: *E-bus the smart way!: Elektromobilita ve veřejné dopravě*. Brno, 31.5.2012, s. 23.
- [14] MAŠEK, Zdeněk a Václav LENOCH. *Řízení hydrostatického přenosu výkonu na vozidle MUV 74*. In: *Řízení a regulace v dopravní technice*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 25.5.2012, s. 26. ISBN 978-80-7395-495-6.
- [15] LENOCH, Václav a Petr SÝKORA. *Experimentální kolejové vozidlo určené pro výzkum individuálního pohonu nezávisle otáčivých kol*. In: *SEKEL 2012: September 5.-7. 2012 Bratislava STU - Modra-Hormónia Slovenská republika*. Bratislava: Faculty of Mechanical Engineering, 2012, s. 6. ISBN 978-80-227-3781-4.
- [16] LENOCH, Václav, Jaroslav NOVÁK a Zdeněk MAŠEK. *18. Medzinárodný seminár traťové stroje v teórii a praxi SETRAS 2012 Žilina* ISBN 978-80-89276-39-4
- [17] LENOCH, Václav. *Nadřazený řídicí systém experimentálního kolejového vozidla*. In: *Elektrotechnická zařízení v dopravě*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2012, s. 7. ISBN 978-80-7395-575-5.
- [18] NOVÁK, Jaroslav, Petr SÝKORA a Václav LENOCH. *Výzkum řízení kolejového vozidla s nezávisle otáčivými koly: Sborník z XXXIII. Celostátní konference o elektrických pohonech*. Plzeň: Česká elektrotechnická společnost, 2013. ISBN 978-80-02-02457-6.

- [19] LENOCH, Václav. *Nadřazený řídicí systém experimentálního kolejového vozidla. sborník z konference Elektrotechnická zařízení v dopravě*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2013. ISBN 978-80-7395-575-5.
- [20] SÝKORA, Petr a Václav LENOCH. *Vývoj a zkoušky v dopravní technice: Výzkum jízdních vlastností kolejových vozidel s nezávisle otáčivými koly*. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2013. ISBN 978-80-7395-626-4.
- [21] ČERNÝ, Ondra, Václav LENOCH, Petr SÝKORA a Radovan DOLEČEK. *Sborník z konference Elektrotechnická zařízení v dopravě: Elektrická výzbroj bateriového experimentálního vozidla*. 1. vyd. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2013. ISBN 978-80-7395-575-5.
- [22] LENOCH, Václav, Petr SÝKORA a Radovan DOLEČEK. *Elektrotechnická zařízení v dopravě: Optimalizace vedení experimentálního kolejového vozidla v koleji*. Pardubice: Univerzitou Pardubice, DFJP, 27.2.2014. ISBN 978-80-7395-749-0.
- [23] NOVÁK, Jaroslav, Zdeněk MAŠEK, Václav LENOCH a Ladislav MLYNAŘÍK. *Regulace hydrostatického přenosu trakčního výkonu pro kolejové vozidlo MUV74. In: SEKEL 2012: September 5.-7. 2012 Bratislava STU - Modra-Hormónia Slovenská republika*. Bratislava: Faculty of Mechanical Engineering, 2012, s. 7. ISBN 978-80-227-3781-4.
- [24] MAŠEK, Zdeněk, Jaroslav NOVÁK, Ladislav MLYNAŘÍK a Václav LenoCh. *Regulace hydrostatického přenosu trakčního výkonu speciálního kolejového vozidla MUV74.1KSF*, sborník z konference SEKEL 2013, Moravská Třebová 2013, ISBN 978-80-7395-625-7, R - SW – řízení MUV
- [25] ČERNÝ, Ondřej, Radovan DOLEČEK, Václav LENOCH a Jaroslav NOVÁK. *Testování jízdních vlastností experimentálního vozidla s nezávisle otáčivými koly: SEKEL 2013*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2013. ISBN 978-80-7395-625-7.
- [26] NOVÁK, Jaroslav a Václav LENOCH. *SEKEL 2014: Synchronizované řízení podvozku kolejového vozidla s nezávisle otáčivými koly*. 1. vyd. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2014[cit. 2014-10-30]. ISBN 978-80-213-2480-0.

Technické zprávy

- [27] NOVÁK, Jaroslav, Michael LATA, Ondřej ČERNÝ, Petr SÝKORA, Václav LENOCH, Jan ČAPEK, Jan MALINSKÝ a Ladislav SOBOTKA. *Vlastnosti a řízení kolejových vozidel s nezávisle otáčivými koly – teoretické a simulační práce, stavba experimentálního vozidla: Roční průběžná zpráva za rok 2012 z řešení projektu TA01030391 č. KEEZ – T – 06 - 12*. 2012, 106 s.
- [28] JAROSLAV, Novák, Pavel HLADÍK, Ondřej ČERNÝ a Václav LENOCH. *Vyšetřování výkonových vlastností synchronních motorů s permanentními magnety pro optimalizaci jejich nasazení v trakčních pohonech. Výzkumná zpráva*. 2013, č. 1, s. 21.

- [29] NOVÁK, Jaroslav, Michael LATA, Ondřej ČERNÝ, Petr SÝKORA, Václav LENOCH, Jan ČAPEK, Jan MALINSKÝ, Ladislav SOBOTKA, Jan BAUER, Petr VOLTR, a Radovan Doleček. *Výzkum jízdních vlastností a řízení pohonů trakčních kolejových vozidel s nezávisle otáčivými koly – teoretické a simulační práce, stavba experimentálního vozidla: Roční průběžná zpráva za rok 2013 z řešení projektu TA01030391 č. KEEZ – T – 06 - 12. 2013, 110 s.*

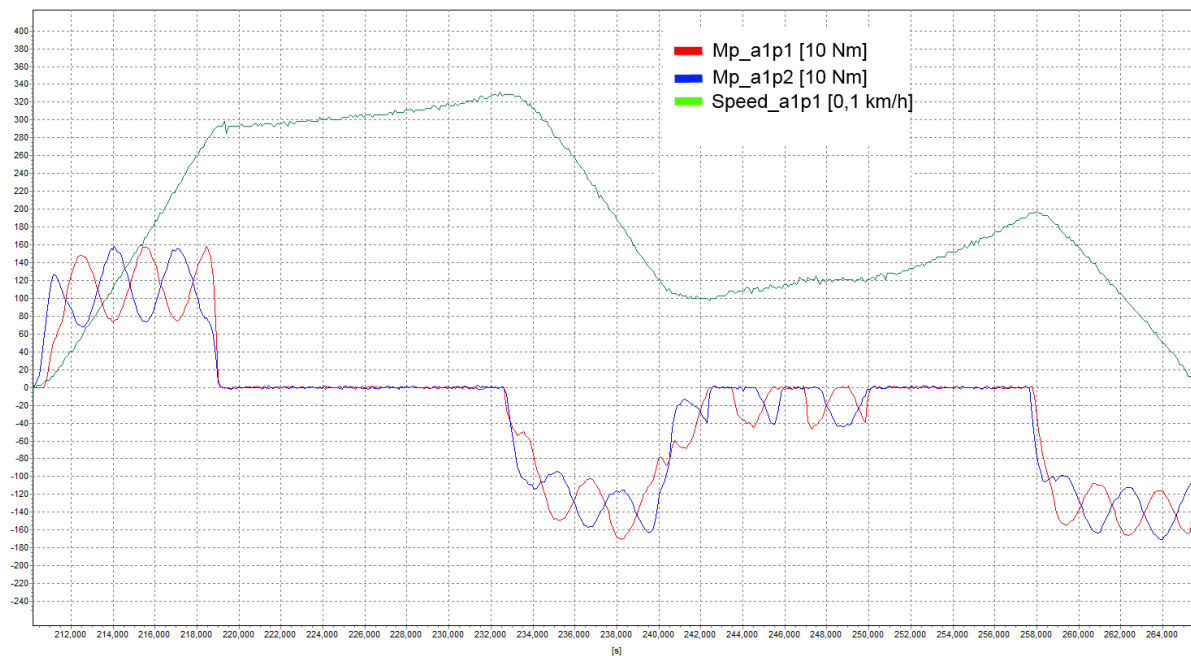
SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A – Umělé vnucené sinusování v jízdě a brzdě 15T	i
Příloha B – Výsledky simulací opotřebení v přímé trati	ii
Příloha C – Výsledky simulací opotřebení v přímé trati – varianta 1.....	iii
Příloha D – Výsledky simulací opotřebení v přímé trati – varianta 2	iv
Příloha E – Výsledky simulací vodících sil v olbouku – varianta 2.....	v
Příloha F – výkres experimentálního kolejového vozidla	vi
Příloha G – Elektrické schéma experimentálního kolejového vozidla	vii
Příloha H – Ukázka kalibračního protokolu ojníčky	viii
Příloha I – Parametry Mladějovské průmyslové dráhy	ix

PŘÍLOHA

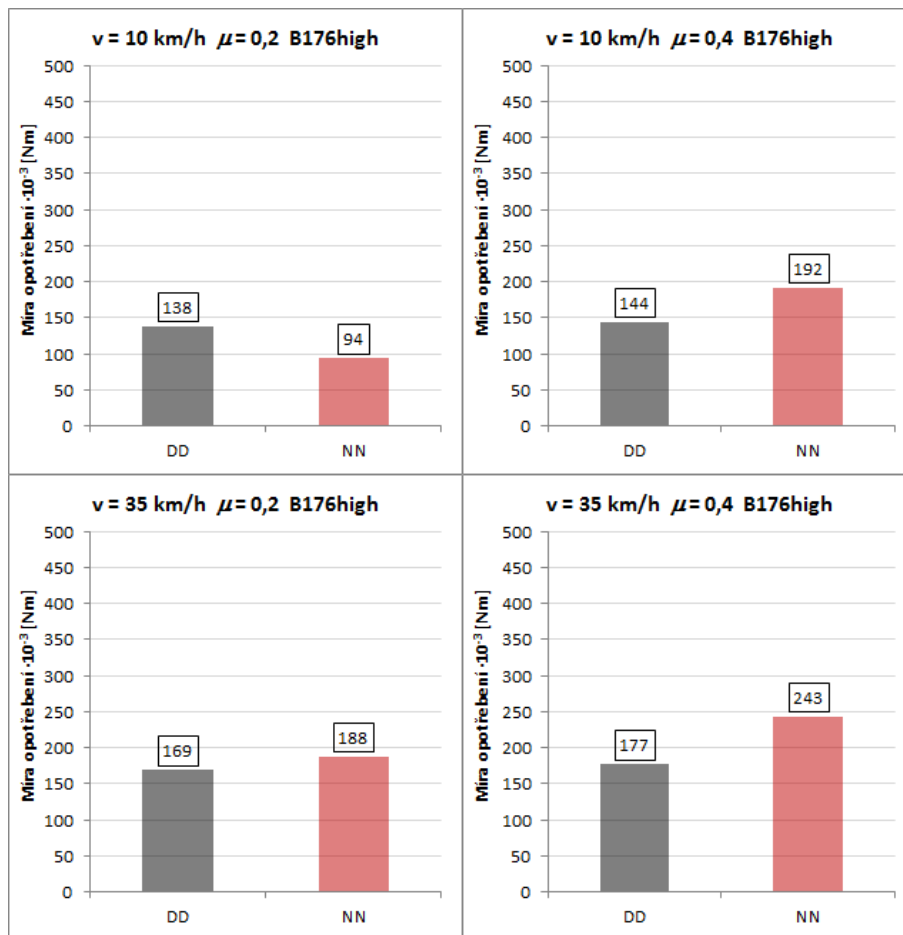
PŘÍLOHA A – UMĚLÉ VNUCENÉ SINUSOVÁNÍ V JÍZDĚ A BRZDĚ 15T

Zdroj Škoda Electric a.s. [2]

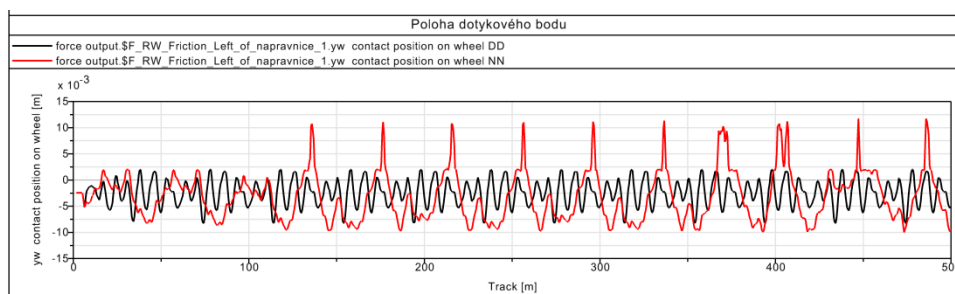


PŘÍLOHA B – VÝSLEDKY SIMULACÍ OPOTŘEBENÍ V PŘÍMÉ TRATI

Zdroj Ing. Čapek, VÚKV a.s. [12]



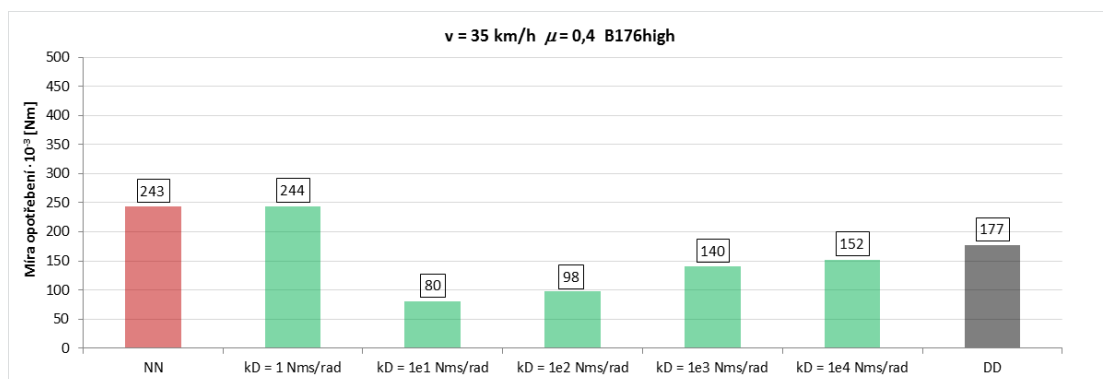
Výsledky simulačních výpočtů – míra opotřebení profilů kol a kolejnic ($v = 10$ a 35 km/h, $\mu = 0,2$ a $0,4$, nerovnosti UIC B176 „horší“)(DD – varianta s dvojkolím, NN – nezávisle otáčivé kola) [12]



Výsledky simulačních výpočtů, experimentální vozidlo, jízda v přímé trati ($v = 35$ km/h, $\mu = 0,4$, nerovnosti UIC B176 „horší“) [12]

PŘÍLOHA C – VÝSLEDKY SIMULACÍ OPOTŘEBENÍ V PŘÍMÉ TRATI – VARIANTA 1

Zdroj Ing. Čapek, VÚKV a.s. [12]



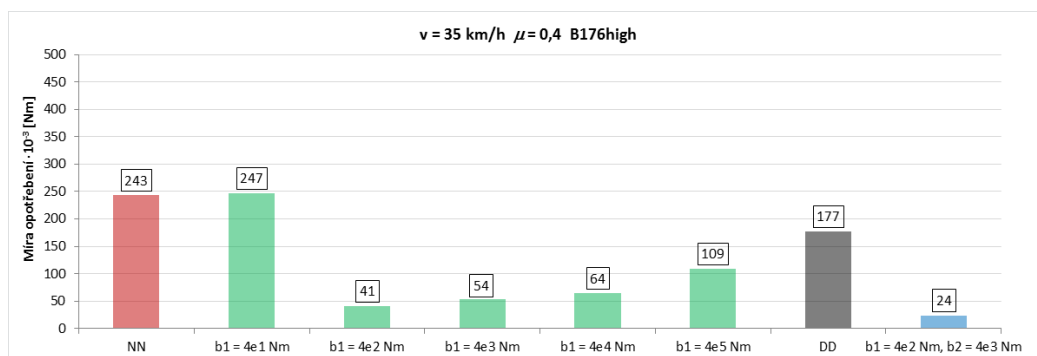
Výsledky simulačních výpočtů, torzní vazba c_D (k_D) – míra opotřebení profilů kol a kolejnic
($v = 35$ km/h, $\mu = 0,4$, nerovnosti UIC B176 „horší“)
(DD – varianta s dvojkolím, NN - nezávisle otáčivé kola) [12]



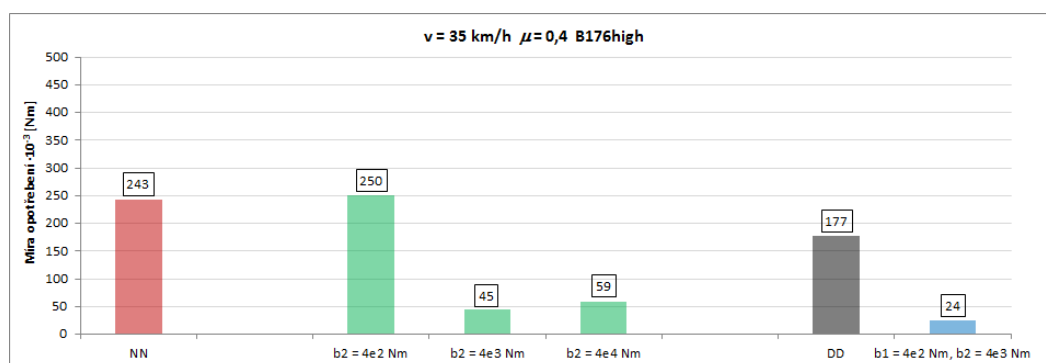
Výsledky simulačních výpočtů, torzní vazba d_D (k_D) = 10 Nm·s/rad – přídatný moment ΔM
($v = 35$ km/h, $\mu = 0,4$, nerovnosti UIC B176 „horší“) [12]

PŘÍLOHA D – VÝSLEDKY SIMULACÍ OPOTŘEBENÍ V PŘÍMÉ TRATI – VARIANTA 2

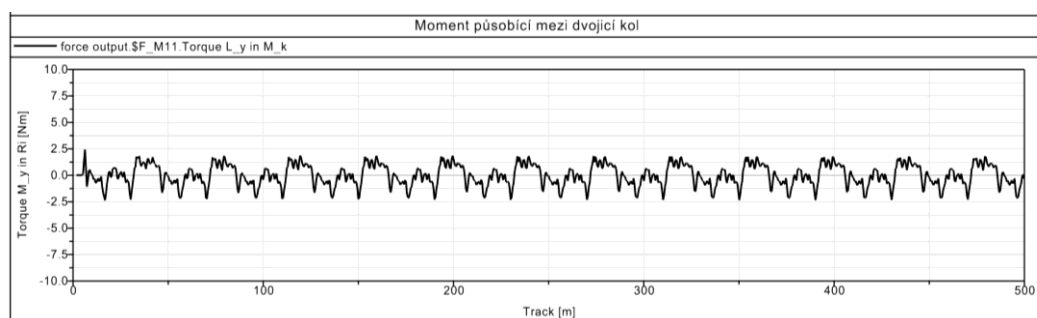
Zdroj Ing. Čapek, VÚKV a.s. [12]



Výsledky simulačních výpočtů, konstanta c_1 (b1) – míra opotřebení profilů kol a kolejnic
($v = 35$ km/h, $\mu = 0,4$, nerovnosti UIC B176 „horší“) [12]



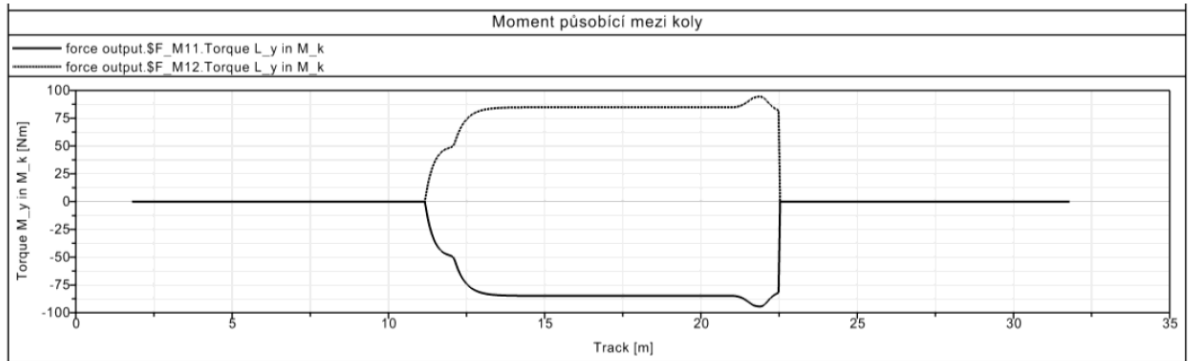
Výsledky simulačních výpočtů, konstanta c_2 (b2) – míra opotřebení profilů kol a kolejnic
($v = 35$ km/h, $\mu = 0,4$, nerovnosti UIC B176 „horší“) [12]



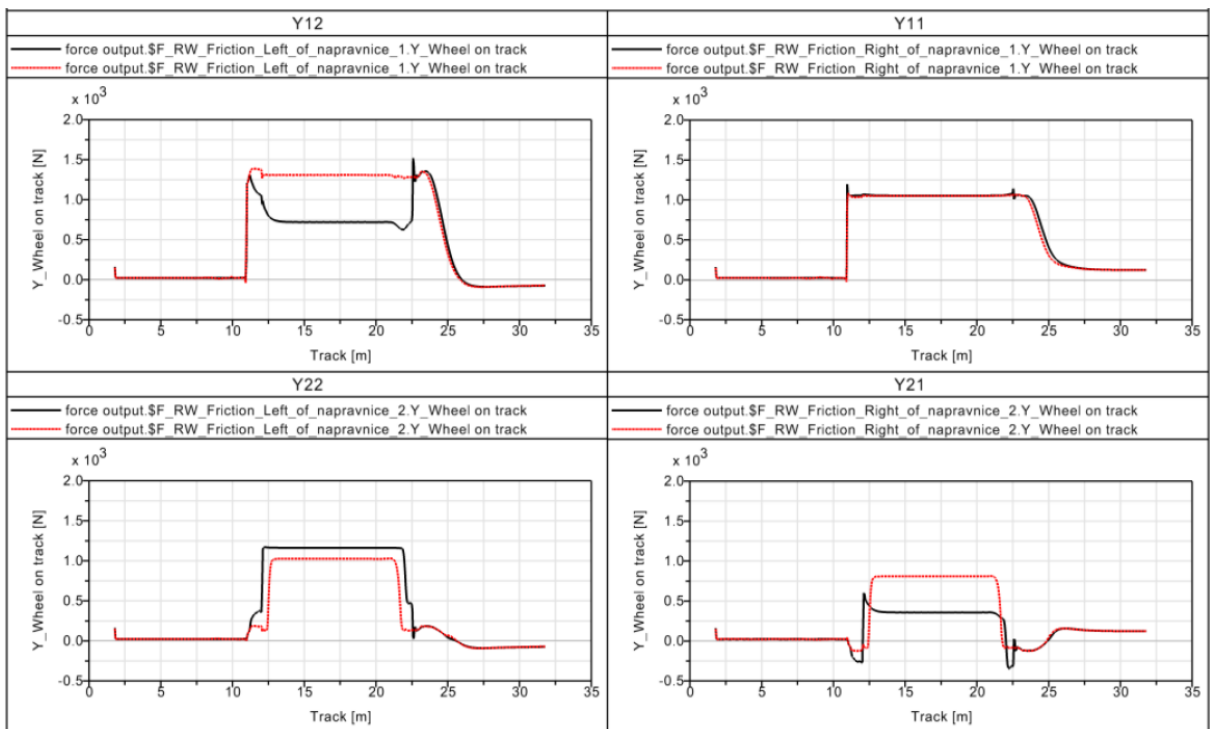
Výsledky simulačních výpočtů, $C_1 = 4e2$ Nm, $C_2 = 4e3$ Nm
($v = 35$ km/h, $\mu = 0,4$, nerovnosti UIC B176 „horší“) [12]

PŘÍLOHA E – VÝSLEDKY SIMULACÍ VODÍCÍCH SIL V OLBOUKU – VARIANTA 2

Zdroj Ing. Čapek, VÚKV a.s. [12]



Výsledky simulačních výpočtů, průjezd obloukem pro poloměr $R = 20$ m, moment ΔM ($v = 1$ m/s, $\mu = 0,4$)



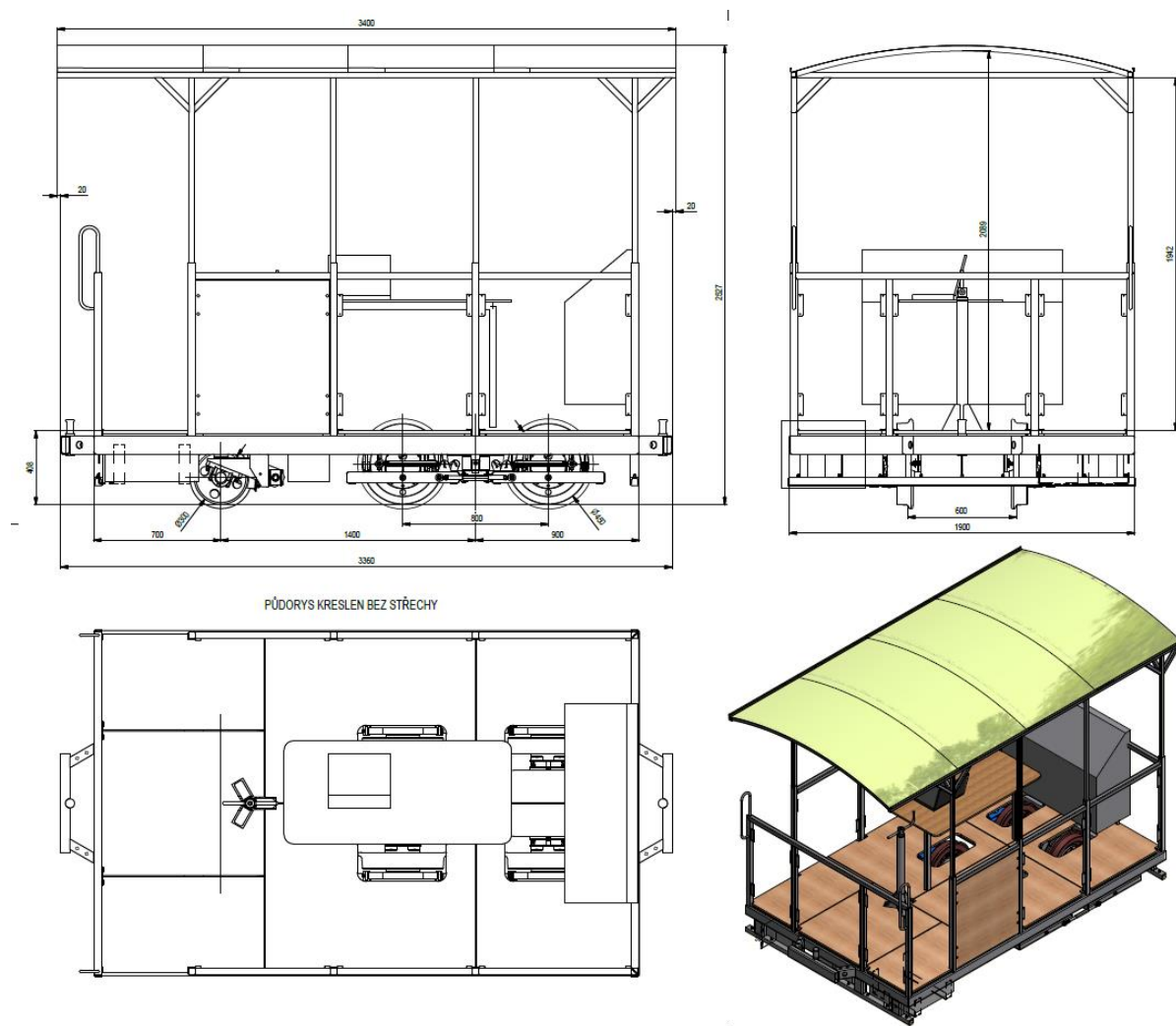
Výsledky simulačních výpočtů, průjezd obloukem $R = 20$ m, vodící síly Y ,

černá – s momentem ΔM ,

červená – bez momentu ΔM ($v = 1$ m/s, $\mu = 0,4$)

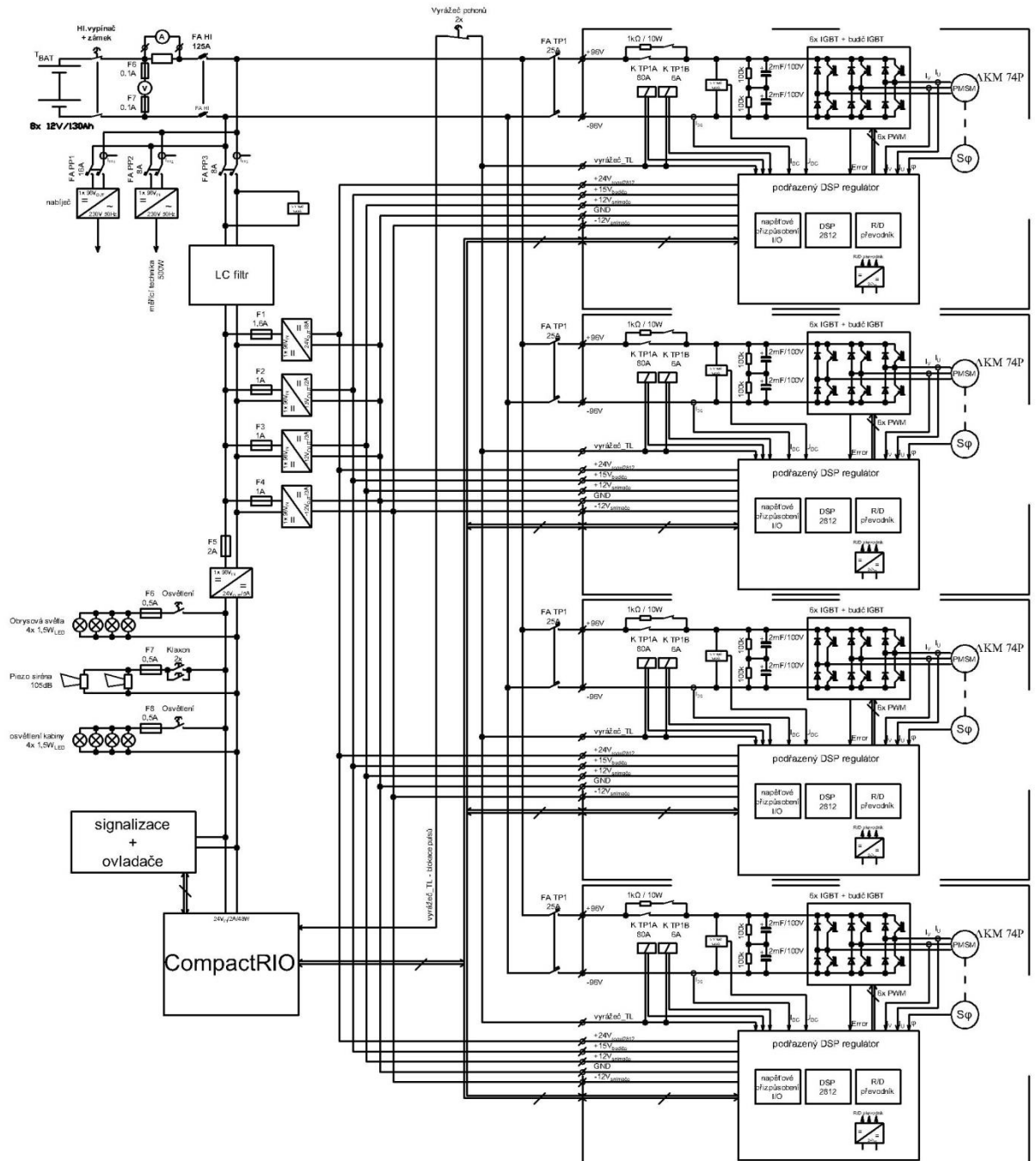
PŘÍLOHA F – VÝKRES EXPERIMENTÁLNÍHO KOLEJOVÉHO VOZIDLA

Zdroj VÚKV a.s. [12]

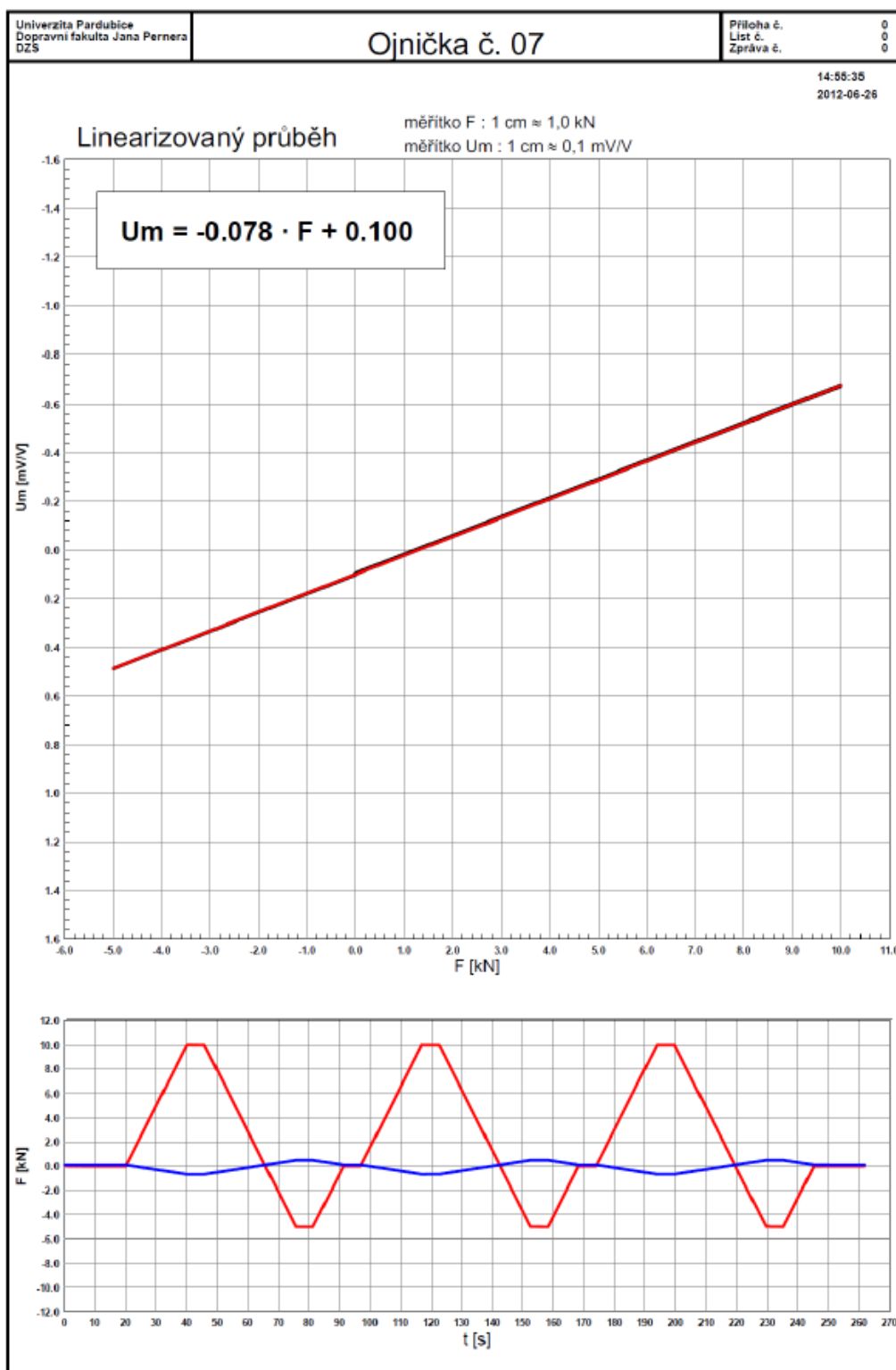


Návrh experimentálního kolejového vozidla s volně otáčivými koly, návrh VÚKV a.s.

PŘÍLOHA G – ELEKTRICKÉ SCHÉMA EXPERIMENTÁLNÍHO KOLEJOVÉHO VOZIDLA



PŘÍLOHA H – UKÁZKA KALIBRAČNÍHO PROTOKOLU OJNIČKY



© UNIVERZITA PARDUBICE, GF, IP, IPE, T. Czech Republic, JAVa, 20120626

PŘÍLOHA I – PARAMETRY MLADĚJOVSKÉ PRŮMYSLOVÉ DRÁHY

Závislost nadmořské výšky na délce MPD



Závislost poloměru a sklonu na délce MPD

