České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Analýza a simulace signálů z drážních vozidel

Praha, 2009 **Autor: Tomáš Diringer**

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

V Praze dne 22.1.2009

podpis

..

Poděkování

Děkuji v prvé řadě vedoucímu bakalářské práce – Ing. Janu Konarskému za vedení této práce, své rodině za velkou podporu při studiu a svým kolegům z AŽD, s.r.o. za cenné zkušenosti.

Abstrakt

Tato bakalářská práce rozebírá problematiku vzájemné kompatibility hnacích vozidel s elektronickým řízením pohonu a prostředků pro detekci vlaku. Konkrétně se jedná o nízkofrekvenční kolejové obvody, jež jsou na železnicích České a Slovenské republiky majoritně nasazovány. Práce obsahuje podrobnou analýzu signálů zpětných trakčních proudů z obou napájecích soustav v ČR používaných. U každého pozorovaného dílčího signálu je řečeno, zda-li může potenciálně ovlivňovat zmíněné kolejové obvody. Dále práce obsahuje potřebné poznatky z trakční mechaniky a její popis z hlediska řídicí techniky, zejména popisy vytvořených modelů pohybu vlaku. V poslední řadě práce obsahuje ideový návrh generátoru typických průběhů zpětného trakčního proudu a souhrn základních požadavků na něj.

Abstract

This bachelor thesis deals with a compatibility between railway rolling stock with an electronic regulation of a traction and train detection systems. To be considered the low-frequency track circuits. These track circuits are mostly built on railways of the Czech and the Slovak Republic. The thesis contains a detailed analysis of traction current signals. These signals were measured on both railway traction systems in the Czech Republic. For each partial signal is discussed its potential influence to the track circuits. The thesis contains knowledge of the traction mechanics and description from the control engineering point of view. Primarily is described designed models of train motion. Next it contains also a proposal of generator of typical traction current signals.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Tomáš Diringer**

Studijní program: Elektrotechnika a informatika (bakalářský), strukturovaný
Obor: Kybernetika a měření

Název tématu: **Analýza a simulace signálů z drážních vozidel**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou zabezpečovacích zařízení používaných u železnice a to především s důrazem na kolejové obvody. Seznamte se s problematikou asynchronních pohonů používaných u drážních vozidel.
2. Analyzujte poskytnuté signály zpětných trakčních proudů z drážních vozidel s asynchronními pohony. Analýzu proveďte především ve vztahu k zabezpečovací technice kolejových obvodů používaných v ČR. Soustřeďte se především na frekvenční složky, které mohou ovlivnit funkci kolejových obvodů. Výsledkem analýzy by měl být základní popis charakteristických složek těchto proudů.
3. Navrhněte generátor typických zpětných trakčních proudů vycházející z předchozí analýzy. Generátor by měl umožňovat přidávání charakteristických složek trakčních proudů uživatelem. Výstupem z generátoru by měl být signál zpětných trakčních proudů definovaných uživatelem. Generátor realizujte jako grafické rozhraní například v programu MATLAB.

Seznam odborné literatury:

[1] SOVKA, P., POLLÁK, P. Vybrané metody číslicového zpracování signálů. 2. přeprac. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02821-6.
[2] ČSN 34 2613: Železniční zabezpečovací zařízení - Kolejové obvody a vnější podmínky pro jejich činnost. Praha: Český normalizační institut, 2007.
[3] KONARSKI, J. Zpracování signálů z kolejových obvodů. Příprava k disertační práci, Praha: ČVUT v Praze, FEL, Katedra teorie obvodů, únor 2007.

Vedoucí: Ing. Jan Konarski

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2008/2009

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry

L.S.

n.z. M. Šimková
doc. Ing. Boris Šimák, CSc.
děkan

V Praze dne 25. 2. 2008

Obsah

Seznam obrázků **13**

Seznam tabulek **15**

1 Úvod do problému a specifikace cíle **1**

1.1 Specifikace cíle 1

1.2 Železniční zabezpečovací technika 1

1.2.1 Kolejový obvod 2

1.3 Zpětný trakční proud 3

1.4 Moderní pohon z hlediska zpětného trakčního proudu 4

1.5 Vztah zpětného trakčního proudu a kolejových obvodů 7

2 Analýza zpětných trakčních proudů **9**

2.1 Použité SW prostředky pro analýzu 10

2.1.1 Načítání dat 10

2.1.2 Spektrogram 10

2.1.3 GUI motorová frekvence 10

2.2 Definice dílčích jevů 15

2.2.1 Útlum vyšších frekvencí 15

2.2.2 Síťová frekvence a její vyšší harmonické 15

2.2.3 Motorová frekvence a její vyšší harmonické 15

2.2.4 Zrcadlové frekvence 15

2.2.5 Přechodové děje 16

2.2.6 HDO 16

2.3 Analýza zpětných trakčních proudů na AC soustavě 17

2.3.1 Útlum vyšších frekvencí 17

2.3.2 Síťová frekvence a její vyšší harmonické 19

2.3.3 Motorová frekvence a její vyšší harmonické 28
2.3.4 Zrcadlové frekvence 33
2.3.5 Přechodové děje 35
2.3.6 HDO 40
2.4 Analýza zpětných trakčních proudů na DC soustavě 45
2.4.1 Útlum vyšších frekvencí 45
2.4.2 Síťová frekvence a její vyšší harmonické 47
2.4.3 Motorová frekvence a její vyšší harmonické 57
2.4.4 Zrcadlové frekvence 61
2.4.5 Přechodové děje 62
2.4.6 HDO 70
2.5 Závěr analýzy 73

3 Dynamika drážního vozidla 75
3.1 Dynamika hmotného bodu 75
3.2 Přechod od hmotného bodu k drážnímu vozidlu 76
3.2.1 Hnací síla 76
3.2.2 Brzdná síla 78
3.2.3 Odporové síly 79
3.3 Trakční dynamika z hlediska teorie řízení 81
3.3.1 Nelineární model 81
3.3.2 Linearizované stavové modely 82
3.3.3 Linearizovaný vstupně-výstupní popis 83
3.3.4 Popis v časové oblasti 84
3.3.5 Dynamika soustavy 85
3.3.6 Řízení soustavy 86
3.4 Srovnání naměřených průběhů rychlosti a simulace 86
3.4.1 Srovnání naměřené rychlosti a nelineárního modelu 88
3.4.2 Srovnání naměřené rychlosti a lineárního modelu 90

4 Návrh generátoru zpětného trakčního proudu 93
4.1 Účel a idea generátoru 93
4.2 Požadavky na generátor 93
4.2.1 Požadavky na funkci generátoru 93
4.2.2 Požadavky na ovládání 94

4.2.3 Požadavky na prezentaci dat 94
4.2.4 Požadavky na výstup generátoru 94
4.3 Implementace generátoru 94
4.4 Hotové části 96
4.4.1 Generování motorové frekvence 96

5 Zhodnocení práce **99**

Literatura **101**

A Seznam použitých zkratek **I**

B Seznam použitých veličin **III**

C Ukázky implementace **V**
C.1 Generování motorové frekvence V
C.2 Nelineární model v prostředí simulink VI

D Obsah přiloženého CD **IX**

Seznam obrázků

1.1 Schéma dvoupásového paralelního kolejového obvodu 3
1.2 Blokové schéma silového obvodu na AC soustavě 6
1.3 Blokové schéma silového obvodu na DC soustavě 6
1.4 Situace na styku dvou kolejových obvodů 7

2.1 Screenshot aplikace pro analýzu motorové frekvence 1 11
2.2 Screenshot aplikace pro analýzu motorové frekvence 2 11
2.3 Ilustrace jevu leakage ve frekvenčním spektru 13
2.4 Útlum vyšších frekvencí na AC soustavě – spektrogram 17
2.5 Útlum vyšších frekvencí na AC soustavě – spektrum 17
2.6 Síťová frekvence a vyšší harmonické na AC soustavě 19
2.7 Základní harmonická složka na AC soustavě 20
2.8 Druhá harmonická složka na AC soustavě 21
2.9 Třetí harmonická složka na AC soustavě 22
2.10 Čtvrtá harmonická složka na AC soustavě 23
2.11 Pátá harmonická složka na AC soustavě 24
2.12 Šestá harmonická složka na AC soustavě 25
2.13 Základní motorová frekvence na AC soustavě 28
2.14 Amplituda základní motorové frekvence na AC soustavě 29
2.15 Základní motorová frekvence na AC soustavě 29
2.16 Vyšší motorové frekvence na AC soustavě 30
2.17 Druhá vyšší motorová frekvence na AC soustavě 31
2.18 Zrcadlové frekvence na AC soustavě 33
2.19 Analýza přechodových dějů na AC soustavě. Oblast 2 36
2.20 Analýza přechodových dějů na AC soustavě. Oblast 3 37
2.21 Analýza přechodových dějů na AC soustavě. Oblast 4 38
2.22 Výřez spektra signálu na AC soustavě. Označena frekvence kolem 216 Hz 40

2.23 HDO na AC soustavě. 41
2.24 HDO s vyznačenými nosnými frekvencemi na AC soustavě. 42
2.25 Útlum vyšších frekvencí na DC soustavě – spektrum 45
2.26 Útlum vyšších frekvencí na DC soustavě – spektrogram 45
2.27 Síťová frekvence a vyšší harmonické na DC soustavě 47
2.28 50 Hz na DC soustavě 48
2.29 100 Hz na DC soustavě 49
2.30 150 Hz na DC soustavě 50
2.31 200 Hz na DC soustavě 51
2.32 250 Hz na DC soustavě 52
2.33 300 Hz na DC soustavě 53
2.34 600 Hz na DC soustavě 54
2.35 Základní motorová frekvence na DC soustavě 57
2.36 Vyšší motorové frekvence na DC soustavě. Prahováno na 100 mA 58
2.37 Základní motorová frekvence na DC soustavě 59
2.38 Zrcadlové frekvence na DC soustavě 61
2.39 Analýza přechodových dějů na DC soustavě. Oblast 1 63
2.40 Analýza přechodových dějů na DC soustavě. Oblast 2 64
2.41 Analýza přechodových dějů na DC soustavě. Oblast 3 65
2.42 Analýza přechodových dějů na DC soustavě. Oblast 4 66
2.43 Analýza přechodových dějů na DC soustavě. Oblast 5 67
2.44 Analýza přechodových dějů na DC soustavě. Oblast 6 68
2.45 HDO na DC soustavě. 70
2.46 HDO s vyznačenými nosnými frekvencemi na DC soustavě. 71

3.1 Teoretická trakční charakteristika pro 3 hodnoty poměrného tahu 78
3.2 Srovnání změřené rychlosti a nelineárního modelu 1 88
3.3 Srovnání změřené rychlosti a nelineárního modelu 2 88
3.4 Srovnání změřené rychlosti a nelineárního modelu 3 89
3.5 Srovnání změřené rychlosti a lineárního modelu 1 90
3.6 Srovnání změřené rychlosti a lineárního modelu 2 90

C.1 Screenshot nelineárního modelu v prostředí simulink 1 VI
C.2 Screenshot nelineárního modelu v prostředí simulink 2 VII

Seznam tabulek

2.1 Amplitudy síťové frekvence a vyšších harmonických složek na AC soustavě 27
2.2 Zrcadlové frekvence HDO podle složek síťové frekvence na AC soustavě 1 43
2.3 Zrcadlové frekvence HDO podle složek síťové frekvence na AC soustavě 2 44
2.4 Amplitudy síťové frekvence a vyšších harmonických složek na DC soustavě 55
2.5 Zrcadlové frekvence HDO podle složek síťové frekvence na DC soustavě . 72

Kapitola 1

Úvod do problému a specifikace cíle

1.1 Specifikace cíle

Cílem práce je vypracovat podrobnou analýzu zpětných trakčních proudů z jednoho konkrétního hnacího vozidla a pojmout ji, pokud možno tak, aby se mohla stát základem pro další analýzy. Analýzu je potřeba pojmout s velkým důrazem na součinnost vozidla a kolejových obvodů. Na základě analýzy je potřeba vyhodnotit, které složky a jevy ve zpětném trakčním proudu je možné zanedbat, a které je naopak potřeba simulovat. Posléze je už možné zhodnotit možnosti simulace potřebných složek zpětného trakčního proudu.

1.2 Železniční zabezpečovací technika

Železniční zebezpečovací techniku a zařízení můžeme podle [11] chápat:

> *„Železniční zabezpečovací zařízení je soubor technických prostředků a vazeb mezi nimi, které přispívají k bezpečnosti železničního provozu“.*

Úkolem železniční zabezpečovací techniky je tedy *přispívat* k bezpečnosti železniční dopravy. Železniční zabezpečovací zařízení se podle aplikace rozdělují na staniční zabezpečovací zařízení (SZZ), traťové (TZZ), přejezdové (PZZ) a vlakové (VZZ). Tato práce dává do souvislostí složky zpětného trakčního proudu a kompatibilitu kolejových obvodů s drážními vozidly. Tato problematika se nazývá *proudová kompatibilita drážních vozidel a prostředků pro detekci vlaku.* Kolejový obvod je jeden z prvků železniční zabezpečovací techniky. Je to zařízení spolupracující se všemi aplikacemi, tedy s SZZ, TZZ, PZZ i VZZ.

1.2.1 Kolejový obvod

Kolejový obvod je prostředek pro detekci vlaku, jeho výstup je dvoustavová informace *volný*, nebo *obsazený*. Historie dle [3] sahá do roku 1872, kdy si americký inženýr William Robinson nechal patentovat princip kolejového obvodu. Pro všechny typy kolejových obvodů je společné to, že se k přenosu signálu z vysílacího konce na přijímací využívají oba kolejnicové pásy. Přítomnost drážního vozidla se vyhodnocuje tím, že se v kolejovém obvodu objeví tzv. *šunt*, což je odpor paralelně spojených náprav vlaku. Šuntem je nazýván proto, že odpor náprav je velmi malý (u nově vyrobeného dvojkolí je elektrický odpor v jednotkách mΩ), ale za zkrat se nepovažuje. Dále se omezím na jeden následující typ kolejového obvodu, jež je na železnicích ČR a SR majoritně nasazen.

Paralelní dvoupásový nízkofrekvenční kolejový obvod

Tento kolejový obvod je, jak z názvu vyplývá, paralelní, tedy vlakový šunt je k přijímacímu a vysílacímu konci připojen paralelně. K odvodu zpětného trakčního proudu se využívají oba kolejnicové pásy, proto je to obvod dvoupásový. Dále je to obvod ohraničený, navazující kolejové obvody jsou odděleny izolovanými styky. Kolejový obvod umožňuje současný odvod zpětných trakčních proudů z hnacích vozidel i přenos signálního proudu. Prvek, který tento současný přenos umožňuje se nazývá *stykový transformátor*. Sousední kolejové obvody jsou elektricky spojeny středními odbočkami stykových transformátorů.

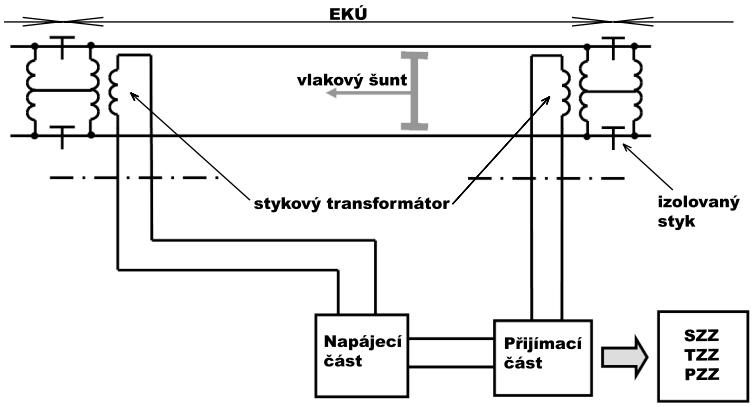
Napájecí strana kolejového obvodu je zdroj střídavého dvoufázového napětí, jež má mezi fázemi určitý posun, často 90°. Jedna fáze je vedena k přijímači kolejnicovými pásy, které tvoří vedení s rozprostřenými parametry a druhé napětí je vedeno k přijímači kabelem. První napětí se nazývá *kolejové napětí* a druhé se nazývá *místní napětí*.

Přijímací strana je tvořena kolejovým relé, nebo elektronickým přijímačem. Kolejové relé pracuje na principu *ferrarisova motoru*, kdy dvě, na sebe kolmá napětí vyvolají rotační pohyb hliníkového kotouče, který tvoří kotvu relé a je spřažen s pracovními kontakty. Elektronický přijímač realizuje stejnou funkci, ale jádro systému je elektronické. Pro vybuzení kolejového přijímače je potřebné současné splnění následujících podmínek:

1. dostatečná velikost místního napětí,
2. dostatečná velikost kolejového napětí,
3. fázový rozdíl místního a kolejové napětí v tolerančním pásmu,
4. dostatečná doba splnění všech podmínek.

Frekvence signálního proudu se obecně používá 75 Hz pro širé tratě a 275 Hz pro kolejové obvody ve stanicích. Z historických důvodů se stále mohou na neelektrifikovaných tratích používat kolejové obvody se signální frekvencí 25 Hz, 50 Hz a stejnosměrné. Frekvence 75 a 275 Hz byly navrženy tak, aby nebyly celistvým násobkem síťové frekvence a zároveň se napětí o těchto frekvencích dalo snadno vytvořit rotačním měničem. Ochranná frekvenční pásma jsou stanovena v [1]. Pro KO se signální frekvencí 50 Hz je stanoveno pásmo 44–56 Hz, pro 75 Hz je stanoveno pásmo 68–80 Hz, pro KO se signální frekvencí 275 Hz platí pásmo 262–280 Hz.

Velikost kolejového napětí je volena tak, aby v každém místě kolejového obvodu byla větší než hodnota, která je potřebná k průrazu mikroskopické vrstvy rzi, která v době mezi průjezdy drážních vozidel přirozeně vzniká. Zároveň musí být kolejové napětí takové, aby byly splněny podmínky ve smyslu nebezpečného dotyku živých částí. Hodnota kolejového napětí se obvykle volí v řádu jednotek voltů.



Obrázek 1.1: Schéma dvoupásového paralelního kolejového obvodu

1.3 Zpětný trakční proud

Železniční napájecí soustavy v ČR jsou dvojího druhu, střídavá a stejnosměrná. Střídavá má jmenovité napětí 25 kV a frekvenci 50 Hz. Je tvořena trakční transformovnou, která je napojena na přenosovou soustavu veřejné sítě. Vzhledem k tomu, že je jeden napájecí úsek napájen z jedné fáze, je třeba po sobě jdoucí úseky napájet z různých fází a takto je prostřídat. Tím odběr střídavé železniční napájecí soustavy zatěžuje všechny tři fáze

co nejvíce rovnoměrně.

Stejnosměrná soustava má jmenovité napětí 3 kV. Je tvořena měnírnou, kde se vstupní napětí transformuje a dvanáctipulsně usměrňuje. Trakční vedení (trolej) tvoří kladný pól a kolejnice záporný.

Zpětným trakčním proudem rozumíme proud, který teče v daném napájecím úseku přes hnací vozidla kolejnicemi do měnírny (transformovny). Jelikož admitance mezi kolejnicí a zemí není nulová, část zpětného trakčního proudu uniká do země, pak mluvíme o bludných proudech.

1.4 Moderní pohon z hlediska zpětného trakčního proudu

Zjednodušená schémata silových obvodů hnacího vozidla pro střídavou a stejnosměrnou napájecí soustavu ukazují obrázky 1.2 a 1.3.

Trakční transformátor

Transformuje vstupní napětí na napětí nižší. Na sekundární straně je realizováno přepínání převodu kvůli rozdílným napětím střídavých trakčních soustav. Na stejnosměrných soustavách se transformátor nevyužívá, ale některé jeho vinutí lze použít jako tlumivku.

Vstupní tlumivka

Využívá se pouze na stejnosměrných soustavách a slouží k vyhlazení vstupního napětí pro navazující zařízení – pulsní měnič. Jedná se o indukčnost s velmi malým odporem (v řádu mΩ). U EJ 680 a ES 64 (Taurus) se při jízdě na stejnosměrné soustavě používá primární vinutí trakčního transformátoru jako vstupní tlumivka. Lokomotiva Škoda 109E používá jako vstupní tlumivku dvojici tlumivek filtru které jsou společně s vlastním transformátorem součástí nádoby transformátoru.

Pulsní měnič

Je využíván pouze na střídavých soustavách, kde je potřeba napětí usměrnit. Jedná se v principu o čtyřkvadrantní řízený měnič, který umožňuje rekuperaci energie z pohonu do napájecí soustavy (ERP brzdění).

Stejnosměrný meziobvod

Tento pojem zahrnuje bloky *filtr* a *brzdný měnič*. Na střídavých soustavách se jako filtr používá DP a L–C rezonanční obvod naladěný na druhou harmonickou složku napájecí sítě. Na DC soustavě se jako filtr používá dolní propust 2. řádu. Brzdný měnič slouží k EDB brzdění, řídí množství energie, jež se mění v brzdném odporníku na teplo.

Trakční měnič

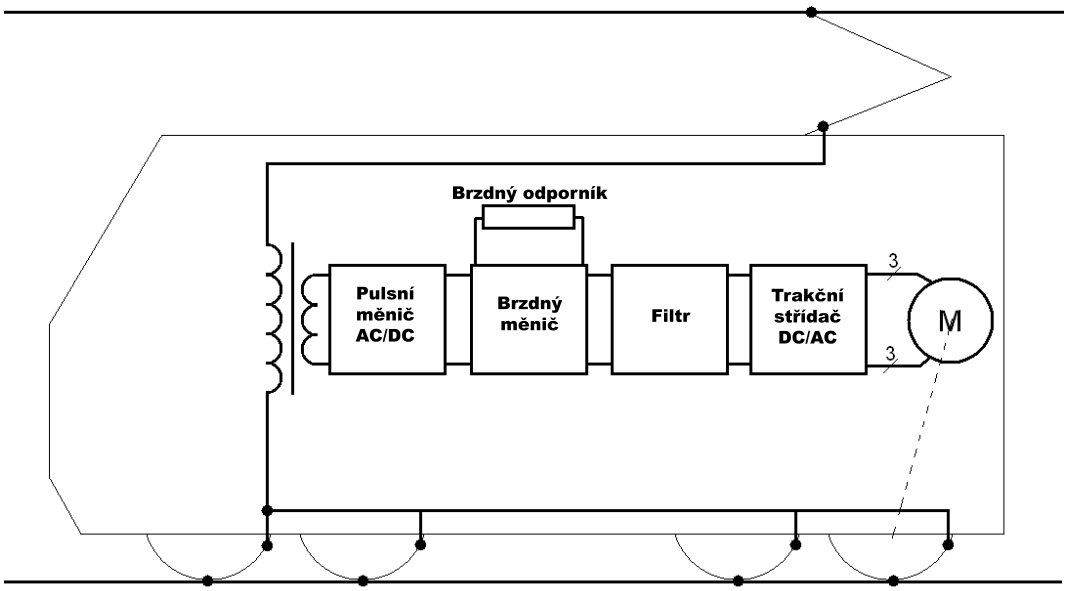
Trakční motory jsou napájeny trakčním měničem, který vytváří ze stejnosměrného napětí třífázové napětí. Toto napětí má vlastnosti, které jsou dané regulací (řízením). Otáčky synchronního i asynchronního motoru se dají efektivně řídit pouze frekvencí napájecího napětí. Pokud se řídí zároveň mechanické i elektrické veličiny motoru, pak mluvíme o tzv. *vektorové regulaci*.

Trakční motory

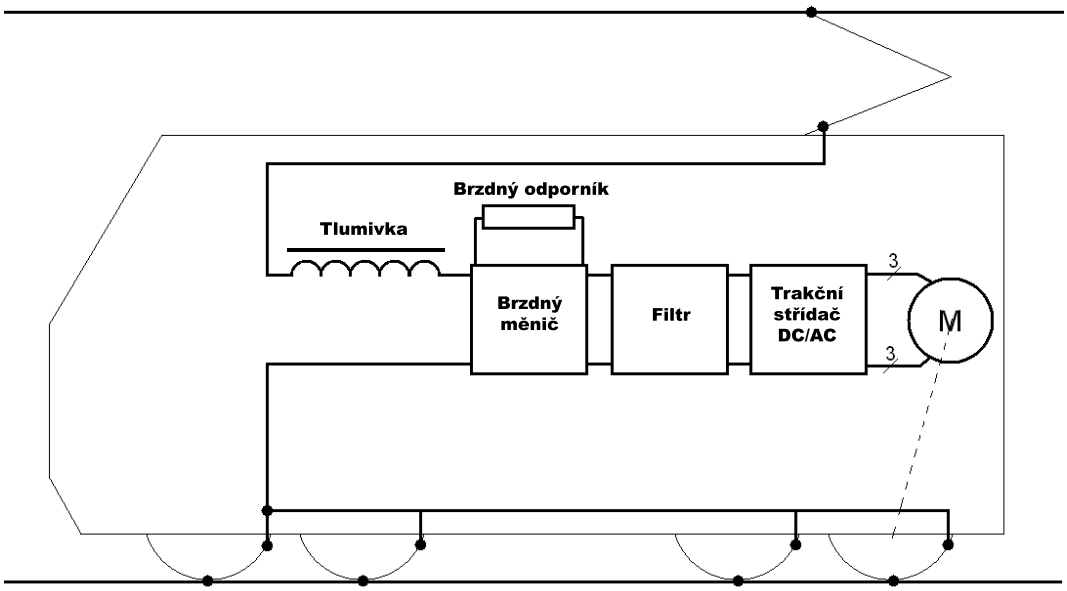
Jedná se o asynchronní motory s kotvou nakrátko, nebo o synchronní motory. Na obrazcích jsou motory nakreslené v zapojení do dvojité hvězdy, takto jsou motory zapojeny např. u lokomotivy 109E, kterou vyvíjí Škoda transportation s.r.o. od roku 2004. Ta disponuje čtyřmi asynchronními motory, každý o výkonu 1600 kW. EJ 680 celkově disponuje osmi asynchronními motory, každý o výkonu 550 kW. Zapojeny jsou do jednoduché hvězdy.

Hnací vozidlo a zpětný trakční proud

Jelikož silový obvod hnacího vozidla obsahuje nelineární prvky, chová se hnací vozidlo jako nelineární dvojbran a zátěž. Pak se na výstupu nelineárního dvojbranu vyskytují *intermodulační složky* [10, s. 389]. Zároveň ale tento připojený nelineární dvojbran zpětně působí na napájecí síť. Ovlivnění napájecí sítě je experimentálně potvrzeno analýzou zpětných trakčních proudů (kapitola 2).



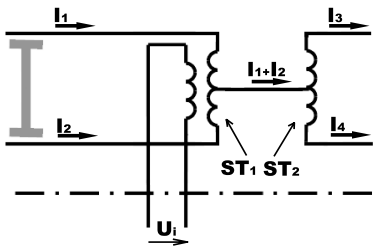
Obrázek 1.2: Blokové schéma silového obvodu na AC soustavě



Obrázek 1.3: Blokové schéma silového obvodu na DC soustavě

1.5 Vztah zpětného trakčního proudu a kolejových obvodů

Pro pochopení tohoto problému je potřeba zobrazit situaci na styku dvou KO. Zjednodušenou situaci ukazuje následující obrázek.



Obrázek 1.4: Situace na styku dvou kolejových obvodů

Uvažujme nejprve situaci, kdy řešíme pouze otázku zpětného trakčního proudu a neřešíme signální proud KO.

Přes hnací vozidlo teče zpětný trakční proud, který se rozdělí na oba kolejnicové pásy na proudy I_1 a I_2. Ty se sčítají na střední odbočce primární strany stykového transformátoru ST_1 a dále se rozdělují na oba kolejnicové pásy navazujícího KO na proudy I_3 a I_4. Pro jednoduchost chybí v obrázku sekundární strana ST_2. Rozdíl proudů I_1 a I_2 indukuje na sekundární straně ST_1 napětí U_i.

V případě, že proudy oběma kolejnicemi, tedy I_1 a I_2 jsou stejné, pak se na sekundární straně stykového transformátoru ST_1 nenaindukuje žádné napětí. To by znamenalo nulovou *asymetrii kolejového obvodu*. To je prakticky nedosažitelné a výpočty a normy počítají s nenulovou asymetrií. Ve vztahu ke kolejovým obvodům to znamená, že zpětný trakční proud indukuje napětí na přijímačové straně kolejového obvodu.

Když tedy tuto úvahu rozšíříme o signální proud KO, dojdeme k závěru, že se nám v praxi objevuje na přijímací straně KO součet dvou napětí. Jedno napětí je indukováno signálním proudem KO a druhé napětí je indukováno rozdílem zpětných trakčních proudů (rozdíl I_1 a I_2 v obrázku 1.4).

Pokud zpětný trakční proud naindukuje na sekundární straně stykového transformátoru dostatečně velké napětí konstantní frekvence shodné s frekvencí místního napětí a budou splněny fázové poměry mezi těmito napětími, může se kolejový přijímač vybudit a dát tak informaci *volno* při *obsazeném* EKÚ. To by znamenalo nebezpečnou reakci systému a následky by mohly být katastrofální.

Jak bylo řečeno v kapitole o kolejových obvodech, signální frekvence, která se používá pro kolejové obvody na elektrifikovaných tratích leží mimo násobky síťové frekvence. Není ale obecně vyloučeno, že zpětný trakční proud nemůže obsahovat složku o frekvenci 75 Hz nebo 275 Hz. Proto je velice důležité a z hlediska legislativy nutné pro každý nový typ hnacího vozidla provést měření zpětných trakčních proudů dle [2], vyhodnotit správnou metodikou a získané hodnoty porovnat s limity v normě [1].

Schvalovací proces elektrické jednotky *Pendolino* poukázal na to, že dobré vlastnosti moderního pohonu jsou vykoupeny zhoršenými vlastnostmi z hlediska železniční zabezpečovací techniky. Elektrické lokomotivy a jednotky vyvíjené do 80. let minulého století obsahovaly pohon tvořený stejnosměrným motorem a jeho řízení bylo kontaktní, fázové, nebo pulsní. U těchto bylo frekvenční spektrum zpětných trakčních proudů diskrétní. Výraznější složky měly v čase konstantní frekvence a objevovaly se přechodové děje. Rozvojem silnoproudé elektroniky po 80. letech bylo už možné vytvořit frekvenční měnič pro velké výkony, jež je třeba pro řízení asynchronního motoru, který se jeví jako velice výhodný pro hnací vozidla. Měniče obsahovaly GTO tyristory a později IGBT tranzistory. Hnací vozidlo s tímto moderním pohonem se jeví jako nelineární zátěž a ve zpětných trakčních proudech se objevují složky, jež se u pohonů starších typů nevyskytovaly. Obzvláště nepříznivá je složka, které se spojitě mění frekvence a zasahuje do ochranných pásem, jež jsou vyhrazeny signálním frekvencím kolejových obvodů.

Toto jsou tedy argumenty ukazující na důležitost analýzy zpětných trakčních proudů z vozidel s moderním pohonem.

Kapitola 2

Analýza zpětných trakčních proudů

Tato kapitola je součástí řešení této bakalářské práce, slouží jako analýza a rozbor analýzy zpětných trakčních proudů drážního vozidla[1]. V této kapitole budou u každého jevu nejprve rozebrány a popsány jeho atributy bez souvislostí a poté bude analýza shrnuta a vysvětleny souvislosti s železniční zabezpečovací technikou[2].

Poznámka k naměřeným průběhům

- V signálech z DC soustavy není vlivem měřící metody obsažena stejnosměrná složka.
- Při zkouškách, kdy byly naměřeny průběhy ZTP se neprovádělo rekuperační brzdění.

Poznámka ke všem spektrogramům v této analýze

- Amplitudy ve spektrogramu jsou pro přehlednost prahovány[3] na určitou hodnotu. Pokud není uvedeno jinak, jsou všechny spektrogramy na AC soustavě prahovány na hodnotu 0,8 A a na DC soustavě na hodnotu 0,5 A.
- KO jsou v ČR převážně nízkofrekvenční, proto je většinou ve spektrogramech zobrazena osa frekvence pouze do 500 Hz.

[1] elektrická jednotka 680 ČD
[2] dále jen ŽZT
[3] $x = x_p \quad$ pro $x \geq x_p$, kde x je amplituda a x_p je práh

2.1 Použité SW prostředky pro analýzu

Analýza změřených průběhů ZTP a rychlostí byla provedena v prostředí matlab. Pro naše účely bylo potřeba vyvinout následující funkce a GUI.

2.1.1 Načítání dat

Pro načítání dat do prostředí matlab bylo potřeba vytvořit funkci, která umožňuje načíst změřená data ze všech předkládaných formátů (dewesoft, wav, mat). Jedná se o funkci `nactidata.m` a napsal ji vedoucí této bakalářské práce – Ing. Konarski.

2.1.2 Spektrogram

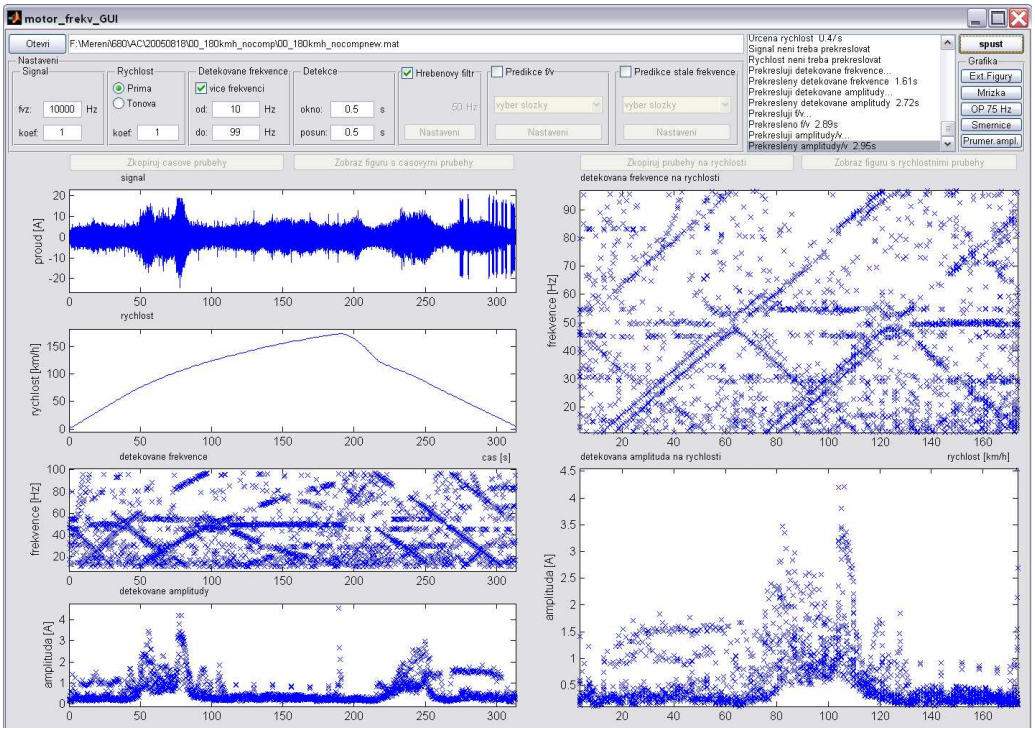
Funkci spektrogramu `spgram.m` napsal Ing. Konarski. Umožňuje podstatně více nastavení a zobrazení a je daleko lépe implementovatelná do GUI než standardní funkce spektrogramu v matlabu `spectrogram.m`. Všechny spektrogramy v této práci byly vykresleny právě touto funkcí.

2.1.3 GUI motorová frekvence

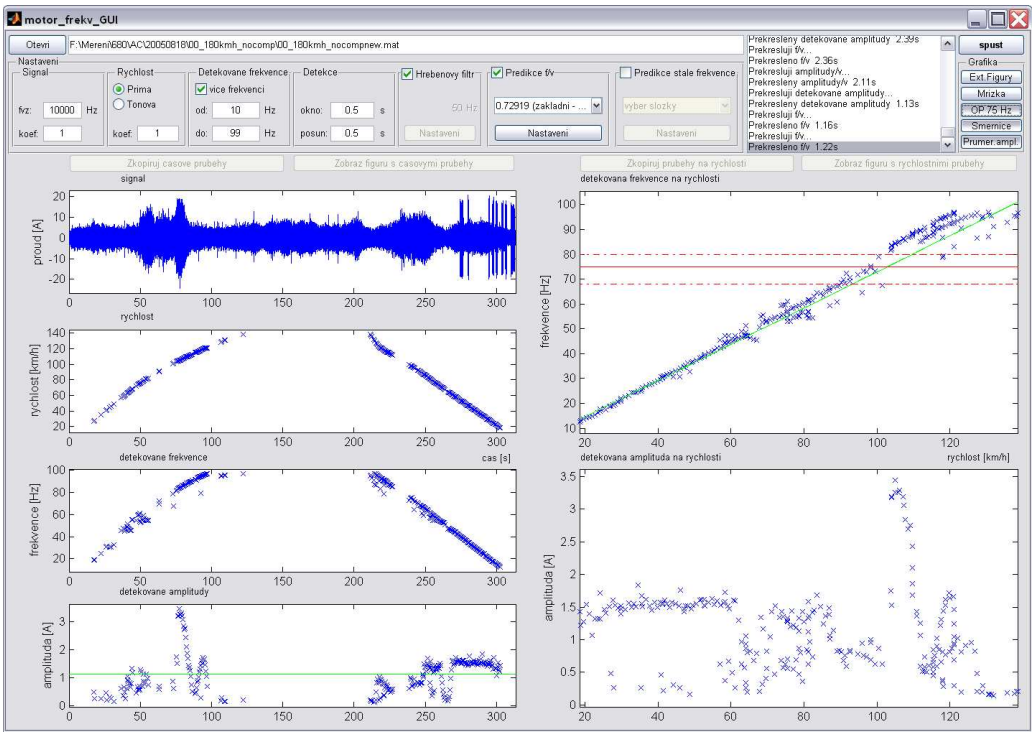
Toto GUI jsem vyvinul ve spolupráci s Ing. Konarskim. Primárně slouží k nalezení motorové frekvence v signálu ZTP. Pak lze stanovit poměr mezi frekvencí a rychlostí $k_{f,v}$ a lze zobrazit amplitudu motorové frekvence. Dále aplikace umožňuje zobrazit amplitudu dominantního harmonického průběhu.

Obrázek 2.1 ukazuje screenshot aplikace, kdy nebyla provedena predikce motorové frekvence. Na grafech vidíme všechny zdetekované frekvence a amplitudy. Na obrázku 2.2 vidíme analýzu stejného signálu, ale již byla provedena predikce motorové frekvence. Zdetekované frekvence a jejich amplitudy mimo toleranční pásmo $k_{f,v}$ jsou vypuštěny. Zároveň je v grafech zakresleno ochranné frekvenční pásmo pro KO s frekvencí 75 Hz podle [1], průměrná amplituda motorové frekvence a směrnice $k_{f,v}$.

Aplikace využívá dále uvedených funkcí, postupů a algoritmů:



Obrázek 2.1: Screenshot aplikace pro analýzu motorové frekvence 1



Obrázek 2.2: Screenshot aplikace pro analýzu motorové frekvence 2

Načítání dat

Načítání změřených dat do prostředí matlab je realizováno pomocí funkce, jež je popsána v kapitole 2.1.1.

Určení rychlosti

Signál rychlosti drážního vozidla je obsažen ve změřených signálech. Rychlost je měřena se stejnou vzorkovací frekvencí, jako signál ZTP. Pro další zpracování je potřeba získat stejný počet bodů rychlosti, dominantních frekvencí a jejich amplitud. Signál rychlosti se proto odpovídajícím způsobem průměruje.

Určení dominantních frekvencí a jejich amplitud

Nad signálem se po úsecích provádí FFT transformace, která je realizována funkcí popsanou v kapitole 2.1.2. Pomocí této funkce je možné nastavit požadované parametry, např. typ váhovacího okna, délku okna a jeho posun, prahování, atd. Když jsme takto v každém úseku získali diskrétní frekvenční spektrum, zbývá z něj vybrat dominantní frekvenci. Funkce pro určení dominantní frekvence dává na výběr ze dvou možností. Může se vybrat frekvence s největší amplitudou, nebo je možné vybrat více frekvencí – více lokálních maxim ve frekvenčním spektru. Dále pro jednoduchost uvažujme první možnost.

Pokud jsme vybrali dominantní frekvenci, musíme zohlednit jev – prosakování energie z jednoho frekvenčního binu do druhého, tzv. *leakage*. Mějme T_{vz} vzorkovací periodu, T_{sig} periodu signálu, N délku FFT a číslo m. Pokud v následujícím vztahu platí, že m je celé kladné číslo, pak k leakage nedochází, v ostatních případech k němu dochází.

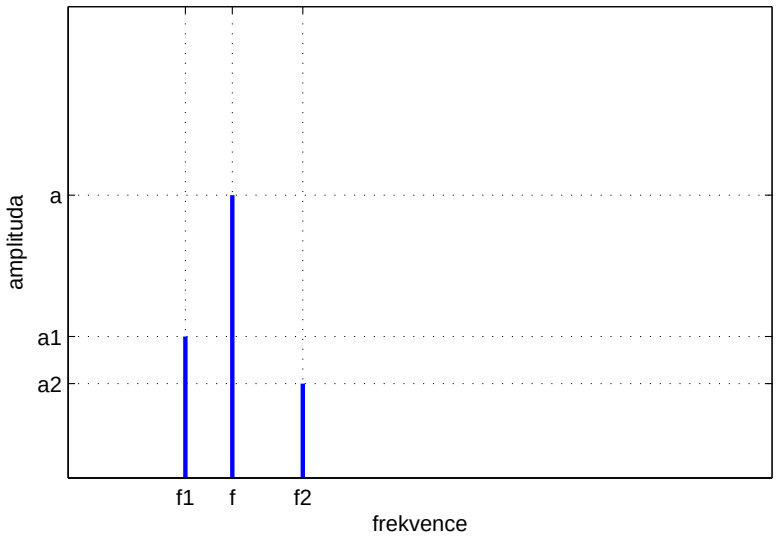
$$N\,T_{vz} = m\,T_{sig} \tag{2.1}$$

Nutno poznamenat, že ve většině případů k leakage dochází, proto je potřeba jej zohlednit a správně určit pravou frekvenci a její amplitudu. Obrázek 2.3 ilustruje případ, kdy došlo[4] k leakage.

Frekvence f a její amplituda a je hledaná frekvence a její amplituda. Frekvenci f_1 a její amplitudu a_1 jsme vybrali jako dominantní. f_2 je větší z obou okolních frekvenčních binů. V aplikaci se používá obdélníkové váhovací okno, pak se správná frekvence f a její amplituda a spočte:

$$f = f_1 + \frac{a_2}{a_1 + a_2}\,(f_2 - f_1), \quad a = \pi \frac{a_1\,a_2}{a_1 + a_2}\left[\sin\left(\pi \frac{a_2}{a_1 + a_2}\right)\right]^{-1} \tag{2.2}$$

[4] v aplikaci se vždy počítá s tím, že došlo



Obrázek 2.3: Ilustrace jevu leakage ve frekvenčním spektru

Predikce motorové frekvence

Predikcí motorové frekvence se rozumí nalezení motorové frekvence, určení poměru mezi frekvencí a rychlostí $k_{f,v}$ a vypuštění zdetekovaných bodů mimo tento poměr. Vycházíme z toho, že již máme určenu rychlost i dominantní frekvence a jejich amplitudy. Pak se pro každý bod určí poměr p_i jeho frekvence a rychlosti. Když jsou určeny tyto poměry, vybere se poměr s největší četností. Nakonec jsou body mimo poměr (s tolerancí) vypuštěny. Algoritmus 1 tyto úvahy detailně popisuje.

Predikce stálé frekvence funguje na velmi podobném principu a nebude zde více rozepsána. Její rozdíl oproti predikci motorové frekvence je pouze ten, že se neurčuje největší četnost[5] z poměrů p_i, ale přímo ze zdetekovaných frekvencí. Vypuštění frekvencí mimo toleranční pásmo je pak podobné.

[5]řádek 9 v algoritmu 1

Algorithm 1 Predikce motorové frekvence

$V = (v_1, v_2, \ldots, v_n)$ {rychlosti}
$F = (f_1, f_2, \ldots, f_n)$ {frekvence}
$A = (a_1, a_2, \ldots, a_n)$ {amplitudy}
$P = (p_1, p_2, \ldots, p_n), \quad p_1, p_2, \ldots, p_n = 0$ {poměr mezi F a V}
tol {tolerance určeného poměru mezi frekvencí a rychlostí v %}
for $i = 0$ to n **do**
  $p_i = \frac{f_i}{v_i}$ {podíl frekvence a rychlosti}
end for
$H = \mathrm{h}(P)$ {histogram}
$k_{f,v} = \max(H)$ {nalezení maxima v histogramu a tím určení dominantního poměru}
$V_{pred} = \varnothing$ {predikované rychlosti}
$F_{pred} = \varnothing$ {predikované frekvence}
$A_{pred} = \varnothing$ {predikované amplitudy}
for $i = 0$ to n **do**
  if $\left(p_i \geq k_{f,v}(1 - \frac{tol}{100})\right)$ && $\left(p_i \leq k_{f,v}(1 + \frac{tol}{100})\right)$ **then**
    $V_{pred} = V_{pred} \cup v_i$
    $F_{pred} = F_{pred} \cup f_i$
    $A_{pred} = A_{pred} \cup a_i$
  end if
end for

2.2 Definice dílčích jevů

Zde jsou shrnuty a definovány dominantní signály v ZTP. Následující poznatky vyplývají z podrobných rozborů, jež jsou v této kapitole na dalších stránkách. Pro lepší pochopení a orientaci v problému bylo lepší dominantní signály a jevy zadefinovat na tomto místě.

2.2.1 Útlum vyšších frekvencí

Na všech spektrogramech je zřejmé, že vyšším frekvencím ve ZTP odpovídají zpravidla menší amplitudy a nižším frekvencím odpovídají amplitudy vyšší. Patrné je to zejména u přechodových dějů, které ovlivňují celé spektrum a u průběhu s plynule proměnnou frekvencí. Tuto skutečnost tedy pojem *útlum vyšších frekvencí* reflektuje.

2.2.2 Síťová frekvence a její vyšší harmonické

Tento pojem zahrnuje složku průmyslové frekvence (50 Hz) a její vyšší harmonické.

2.2.3 Motorová frekvence a její vyšší harmonické

Ve ZTP je přítomný signál s plynule proměnnou frekvencí, což je patrné ve spektrogramech. Srovnáme-li si průběh rychlosti s průběhem této proměnné frekvence, zjistíme, že jsou ve zřejmé korelaci. Tento signál budeme nazývat *motorová frekvence*. Ve spektrogramech je patrno více průběhů této motorové frekvence. Ten nejvýraznější je zpravidla základní motorová frekvence. Vyšší složky motorové frekvence mají rovněž při nulových rychlostech nulovou frekvenci, ale v každých časových okamžicích mají oproti základní složce n-násobnou frekvenci, pak tedy hovoříme o n-tých složkách motorové frekvence.

2.2.4 Zrcadlové frekvence

Jednotlivé frekvenční složky mohou podléhat zrcadlení, zrcadlené průběhy jsou o určitou frekvenci posunuté, nebo jsou podle ní osově souměrné. V našem případě zpravidla dochází k zrcadlení motorové frekvence a HDO podle složky síťové frekvence a jejích harmonických.

2.2.5 Přechodové děje

Ve ZTP se vyskytují přechodové děje, které ovlivňují celé pozorované frekvenční spektrum.

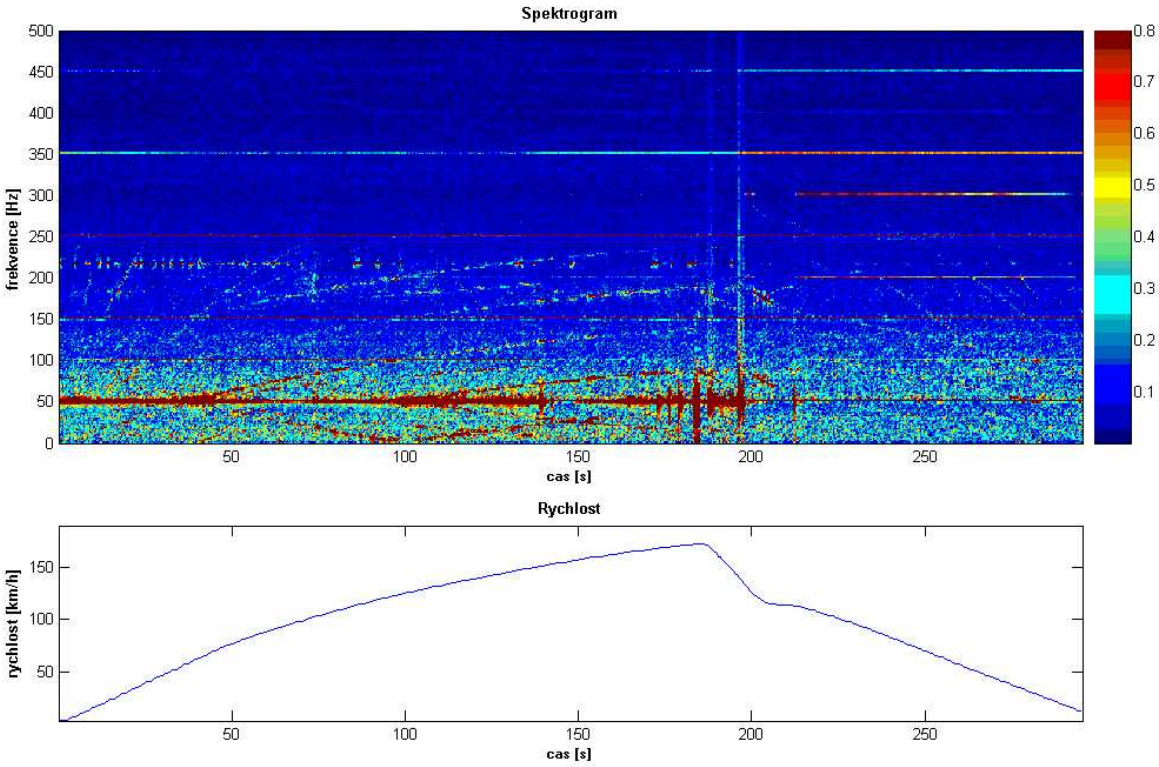
2.2.6 HDO

Ve spektrogramech je patrný dílčí signál, jehož frekvence se pohybuje okolo stálé frekvence a vyskytuje se na první pohled náhodně. Tento signál často tvoří úseky dlouhé zhruba 1 s, stejně dlouhé mezery, nebo se nevyskytuje vůbec. Tento signál je přenosem povelů hromadného dálkového ovládání a zkracuje se jako HDO. Vyskytuje se na více frekvencích, protože podléhá zrcadlení.

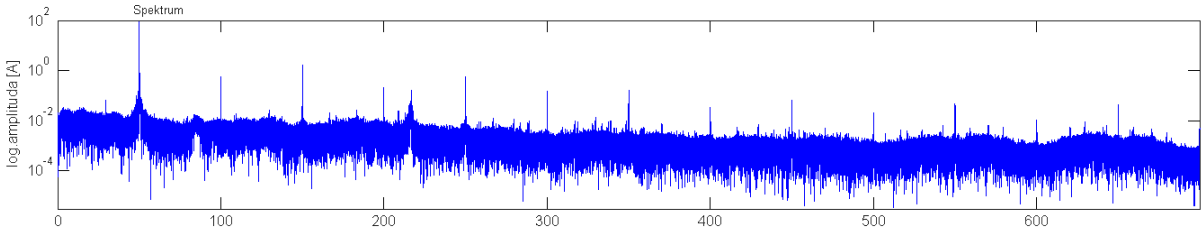
2.3 Analýza zpětných trakčních proudů na AC soustavě

2.3.1 Útlum vyšších frekvencí

Na všech spektrogramech je pozorovatelný útlum vyšších frekvencí. Viz obrázek 2.4, na obrázku není tento jev nijak vyznačen. Útlum vyšších frekvencí je pozorovatelný i ve spektru celého signálu – má sestupný trend, viz obrázek 2.5.



Obrázek 2.4: Útlum vyšších frekvencí na AC soustavě – spektrogram



Obrázek 2.5: Útlum vyšších frekvencí na AC soustavě – spektrum

Shrnutí vlastností dílčího jevu

Podle frekvenčního spektra v oblasti frekvencí 0–700 Hz jsem určil pokles 20 dB/700 Hz. Úmyslně neuvádím údaj v standardním rozměru, tj. dB/dek, protože v našem případě má spektrum konstantní trend v tomto lineárním měřítku, nikoliv v logaritmickém.

Příčina vzniku dílčího jevu

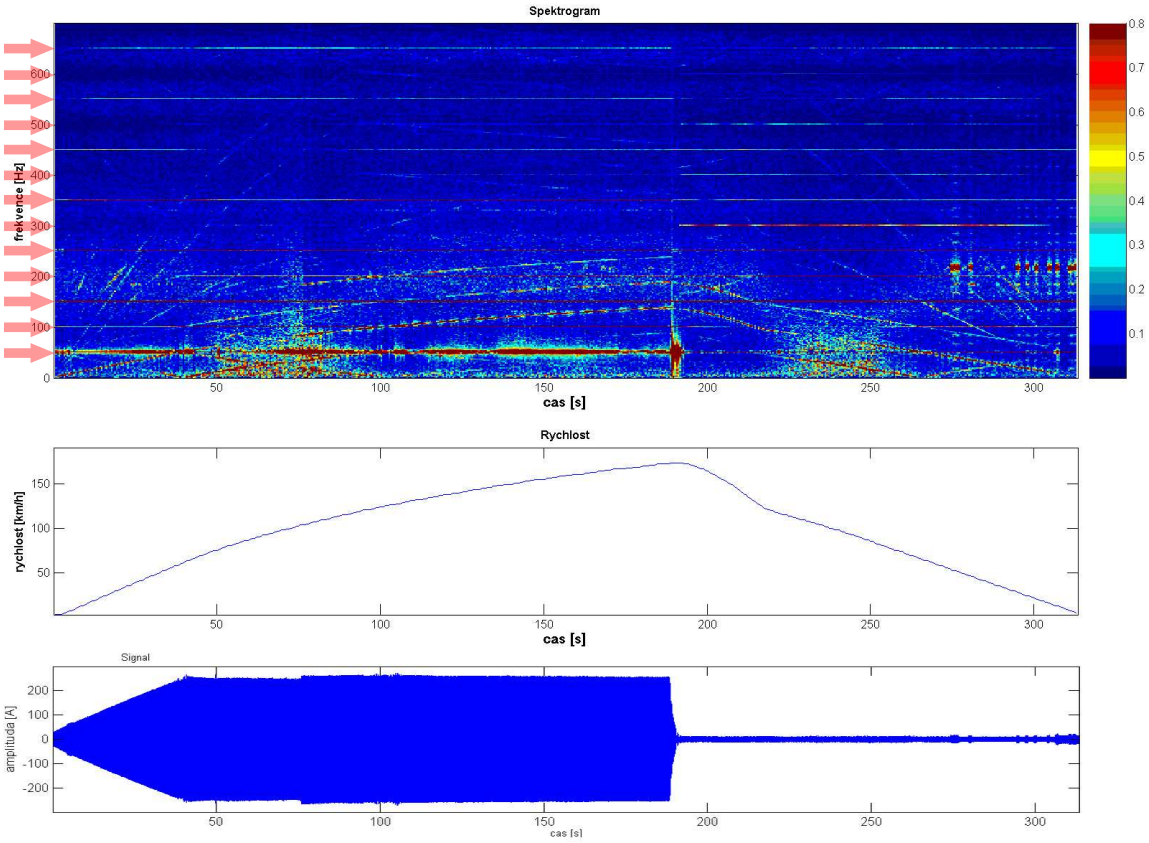
Drtivá většina fyzikálních systémů má charakter dolní propusti, i zde se s tímto charakterem setkáváme. Příčinu útlumu vyšších frekvencí je třeba hledat na hnacích vozidlech. Na hnacích vozidlech je cíleně použit filtr DP. Viz kapitola 1.4 na straně 4.

Vztah s ŽZT

Tento jev má na ŽZT pozitivní vliv. Signální frekvence KO v ČR mají signální frekvenci převážně 75 Hz a 275 Hz. Velmi výrazné proudy ve ZTP jsou na frekvenci 50 Hz a kolem ní. Do ochranného pásma signálních frekvencí KO zasahuje *motorová frekvence*, *zrcadlové frekvence* a *přechodové děje*. Na tyto ohrožující vlivy však působí na vyšších frekvencích právě tento útlum. Vztah tohoto jevu s ŽZT je tedy pozitivní.

2.3.2 Síťová frekvence a její vyšší harmonické

Ve ZTP se přirozeně vyskytuje jmenovitá frekvence napájecí sítě. Jak je vidět ve spektrogramu na obrázku 2.6. Ve spektrogramu jsou označeny vyšší harmonické od základní frekvence[6]. Pro správnou představu si musíme opět uvědomit, že je spektrogram prahovaný na hodnotu 0,8 A.



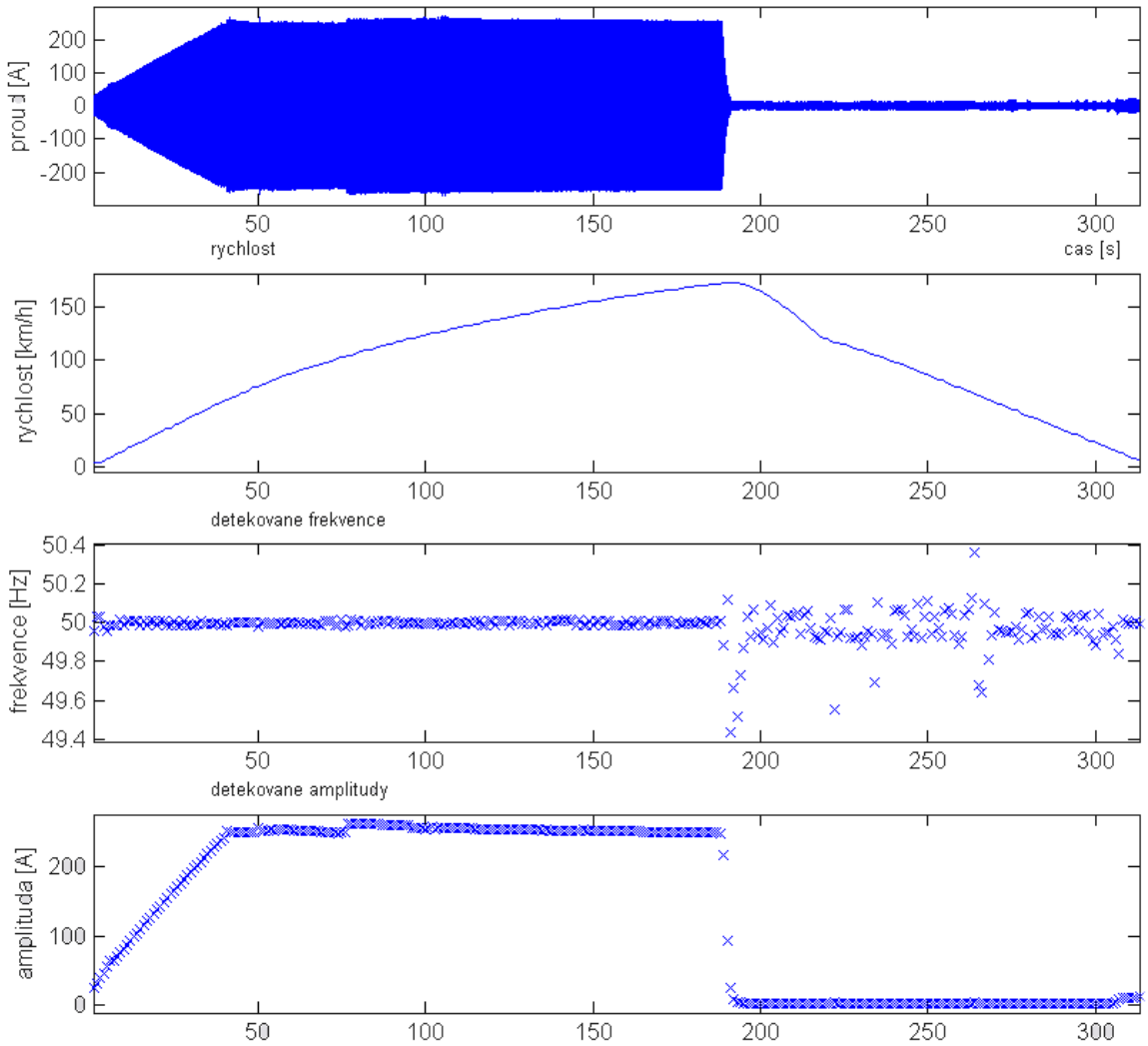
Obrázek 2.6: Síťová frekvence a vyšší harmonické na AC soustavě. Spektrogram, rychlost a průběh signálu.

Dále je třeba podrobně se zabývat amplitudami jednotlivých harmonických složek. Na této soustavě jsou výraznější liché harmonické složky. Toto tvrzení je patrné ze spektrogramu a dokazují ho obrázky 2.7–2.12. Jak je vidět na časovém průběhu první harmonické složky na obrázku 2.7, amplituda proudu se pohybuje od řádově jednotek ampér až po hodnoty řádově stovek ampér. Maximální amplituda proudu je přibližně 260 A. Z časového průběhu na tomtéž obrázku můžeme usoudit, že nadále je možné na obalovou křivku časových průběhu na AC soustavě nahlížet právě jako na amplitudu základní harmonické.

[6] 50 Hz

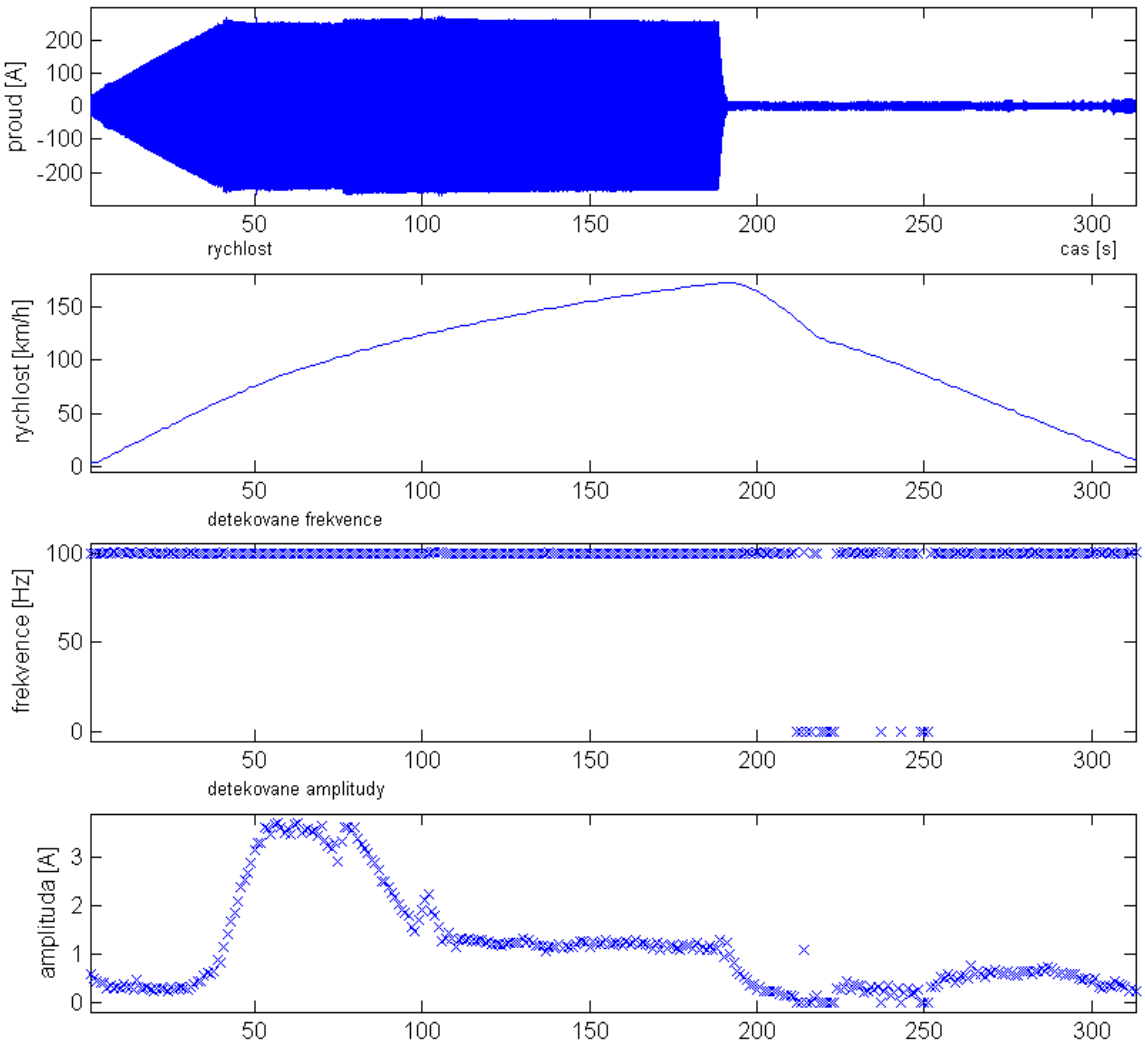
Další harmonické složky mají amplitudy už jen v řádu jednotek ampér.

Neméně důležitá část analýzy síťové frekvence je vztah velikostí amplitud jednotlivých harmonických vůči průběhu rychlosti. Na obou soustavách bude této souvislosti věnována patřičná pozornost.

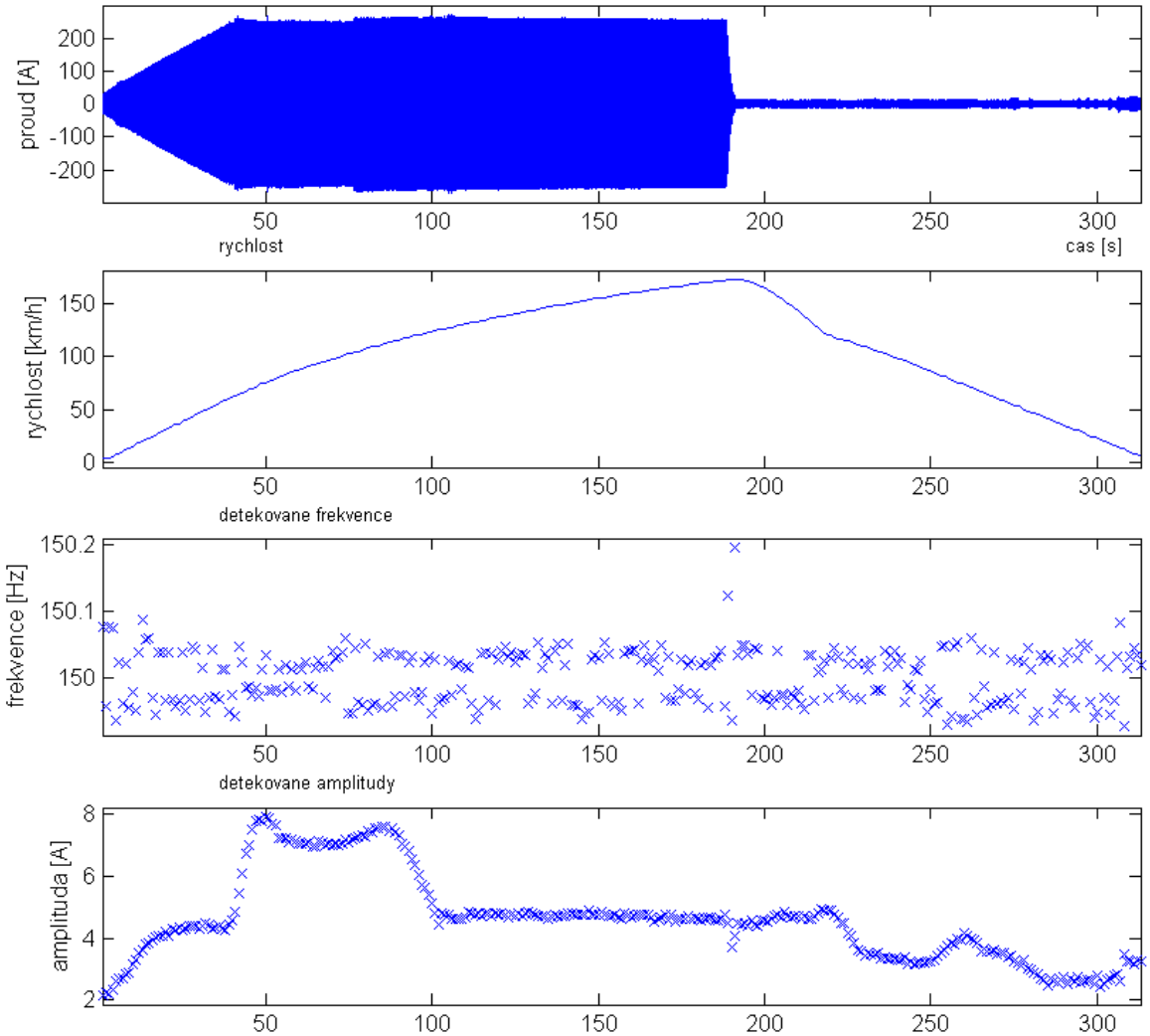


Obrázek 2.7: První (základní) harmonická složka. Signál, rychlost, detekované frekvence a detekované amplitudy na AC soustavě

Obrázek 2.7 dokazuje tvrzení, že je možné přibližně považovat obalovou křivku časových průběhů na AC soustavě za amplitudu základní harmonické složky.

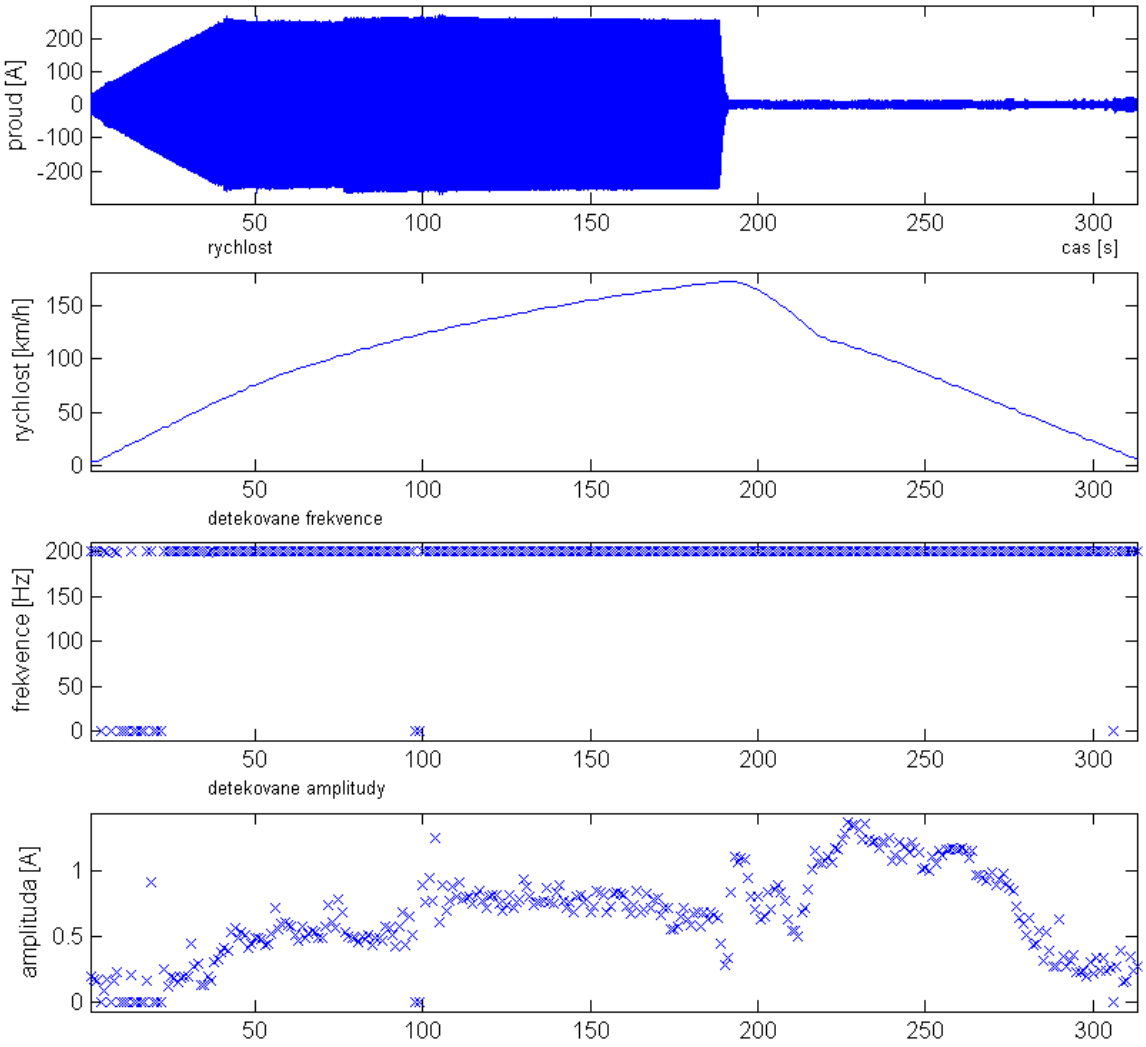


Obrázek 2.8: Druhá harmonická složka. Signál, rychlost, detekované frekvence a detekované amplitudy na AC soustavě



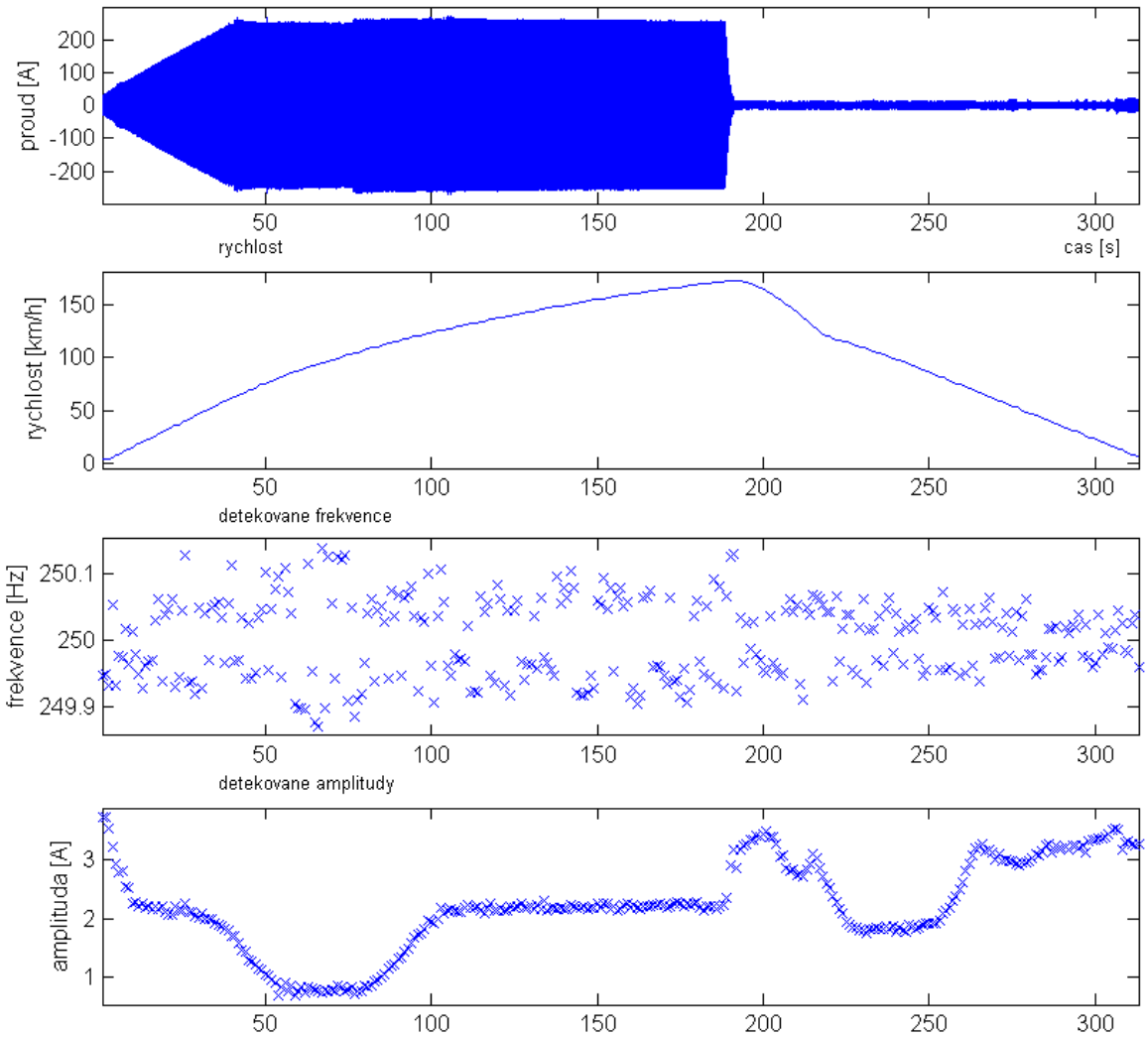
Obrázek 2.9: Třetí harmonická složka. Signál, rychlost, detekované frekvence a detekované amplitudy na AC soustavě

Na obrázku 2.8 a 2.9 si můžeme mimo podobnosti průběhu amplitud povšimnout, že platí tvrzení o amplitudách sudých a lichých složkách. Liché složky jsou oproti sudým přibližně dvojnásobné.



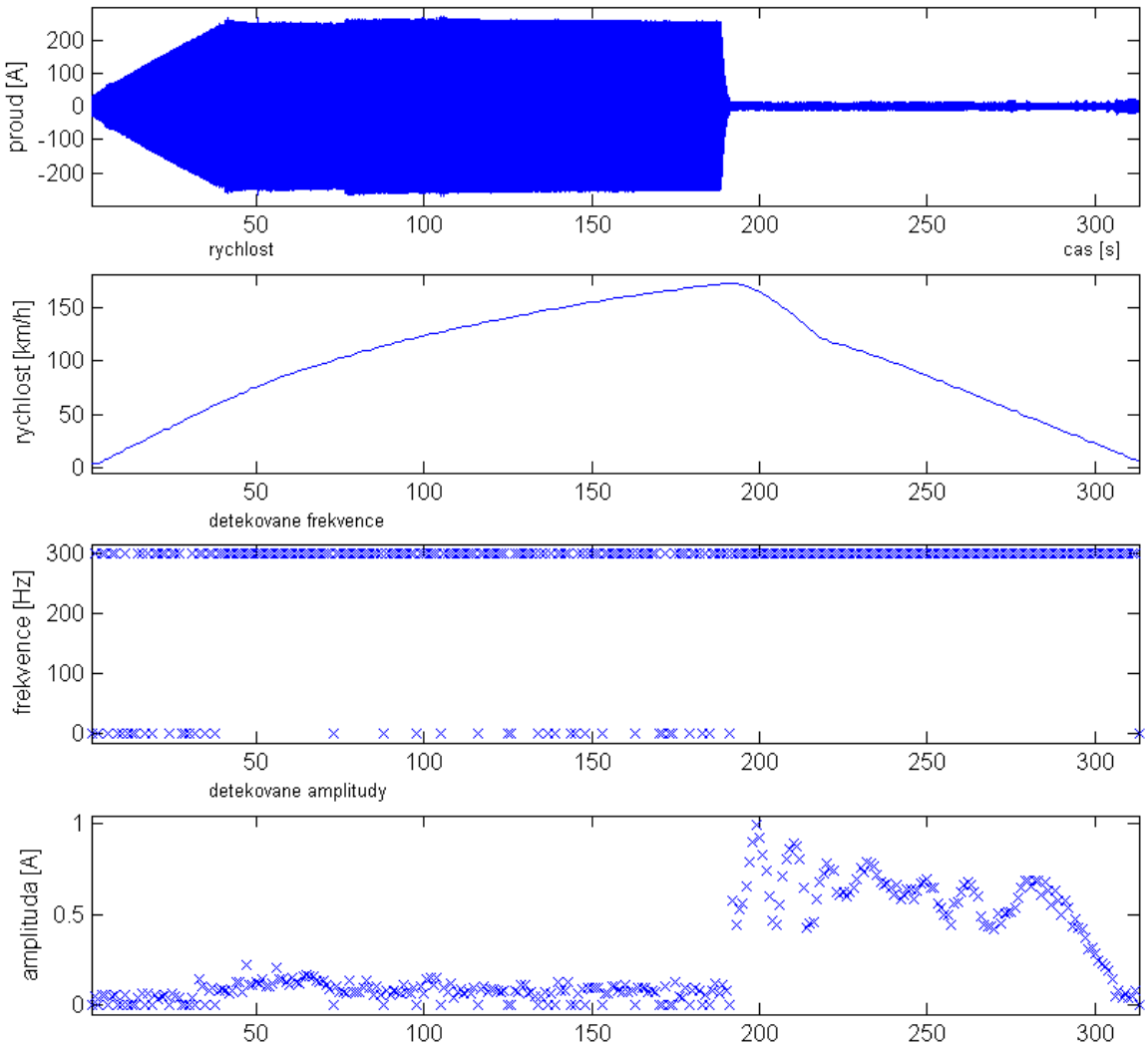
Obrázek 2.10: Čtvrtá harmonická složka. Signál, rychlost, detekované frekvence a detekované amplitudy na AC soustavě

Obrázek 2.10 pro 4. harmonickou složku nedává do souvislosti průběh amplitudy a rychlosti drážního vozidla.



Obrázek 2.11: Pátá harmonická složka. Signál, rychlost, detekované frekvence a detekované amplitudy na AC soustavě

Průběh 5. harmonické složky na obrázku 2.11 se zdá být podobný s průběhy na obrázku 2.8 a 2.9, pokud bychom tento převrátili podle vodorovné osy.



Obrázek 2.12: Šestá harmonická složka. Signál, rychlost, detekované frekvence a detekované amplitudy na AC soustavě

Z obrázku 2.12 můžeme usoudit, že při poklesu rychlosti prudce vzroste amplituda.

Shrnutí vlastností dílčího jevu

Ve spektrech a spektrogramech je patrné, že se ve ZTP vyskytují vyšší harmonické složky síťové frekvence. Na trakční soustavě 25 kV 50 Hz jsou výraznější liché násobky. Nejvýraznější složka je proud o jmenovité frekvenci, jeho amplituda silně souvisí s rychlostí drážního vozidla – při rozjezdu roste s konstantním sklonem do rychlosti přibližně 60 km h^{-1}, kde se ustálí na hodnotě 250 A. Při rychlosti přibližně 100 km h^{-1} dojde ke skokové změně na 260 A. Při brzdění amplituda rychle klesá na hodnotu 2 A. Druhá harmonická složka dosahuje maxima 4 A, minimum má 0 A. Souvislost s rychlostí je patrná – z počátku se pohybuje okolo 0,5 A, v okamžiku, kdy se amplituda trakčního proudu ustálí, tak amplituda této složky vzroste na své maximum. Při brzdění se tato složka pohybuje mezi 0–1 A. Třetí harmonická složka má podobný průběh, maximum má v 8 A, při brzdění se amplituda pohybuje mezi 2,5–4,5 A. Čtvrtá harmonická složka nemá zřejmou souvislost amplitudy s rychlostí. Amplituda kolísá mezi 0,2–1,5 A. Pátá harmonická složka má průběh velice podobný, osově souměrný s třetí složkou. Maximální amplitudu má přibližně 4 A. Šestá harmonická složka má malou amplitudu při rozjezdu drážního vozidla, pohybuje se mezi 0,1–0,2 A. Při brzdění rychle vzroste na hodnotu 1 A a dále se pohybuje mezi 0,5–1 A. Výše zmíněné skutečnosti přehledně shrnuje následující tabulka. Hodnoty jsou závislé na drážním vozidle a jeho výkonu, zde připomínáme, že se jednalo o EJ 680 s výkonem 4 MW, více viz kapitola 3.4 na straně 87.

Příčina vzniku dílčího jevu

Železniční napájecí soustava je tvořena trakčními transformovnami, které jsou napájeny z přenosové soustavy[7] o napětí 220 kV, nebo staršího vedení 110 kV. Napětí a proud této veřejné soustavy obsahuje vyšší harmonické složky, jejichž přípustný obsah definují příslušné normy. Moderní hnací vozidla obsahují výkonové nelineární prvky (pulsní usměrňovač, frekvenční měnič, trakční transformátor), které také přispívají k znečištění sinusového průběhu napětí a proudu v napájecí soustavě.

Amplitudy základní složky síťové frekvence úzce souvisí s mechanikou trakčního pohonu, ta je rozebrána v kapitole 3. Poznatky z této kapitoly mohou být shrnuty následujícím odstavcem.

Při rozjezdu je tažná síla konstantní, tato situace se nazývá *rozjezd konstantní silou.* Z ideálního vztahu $P = F\,v$ vyplývá, že se v této části musí nutně zvyšovat výkon

[7] v ČR jsou trakční transformovny napájeny z veřejné sítě, v Německu je železniční napájecí síť oddělená od veřejné. Byla takto vybudována z historických důvodů a dnes nabízí řadu výhod

Tabulka 2.1: Amplitudy síťové frekvence a vyšších harmonických složek na AC soustavě

Frekvenční složka [Hz]	Amplituda při rozjezdu [A]	Amplituda při brzdění [A]	Průměrná amplituda [A]	Souvislost s rychlostí
50	lineární nárůst při 0–60 $\mathrm{km\,h^{-1}}$ 20 $\mathrm{km\,h^{-1}} \sim$ 100 A 60 $\mathrm{km\,h^{-1}} \sim$ 250 A >60 $\mathrm{km\,h^{-1}} \sim$ 250–260 A	2	148,8	silná
100	0,2–4	0–1	1,3	je
150	2–8	2,5–4,5	4,61	slabá
200	0,2–1,5		0,73	žádná
250	0,5–4	1,8–3,5	2,22	je
300	0,1–0,2	0,1–1	0,34	silná

pohonu, aby byla tažná síla konstantní. Pokud se zvyšuje výkon pohonu, tak se musí zvyšovat odběr proudu, protože napětí je konstantní. Počínaje kritickou rychlostí již není tažná síla omezena. Hnací vozidlo jede stálým výkonem a tažná síla klesá s rychlostí. Odebíraný proud je tedy nutně konstantní. Poslední fáze trakční charakteristiky je oblast za maximální rychlostí vozidla, kdy se tažná síla obvykle považuje za nulovou. Všechny obrázky s časovým průběhem proudu na AC soustavě tyto hypotézy dokazují.

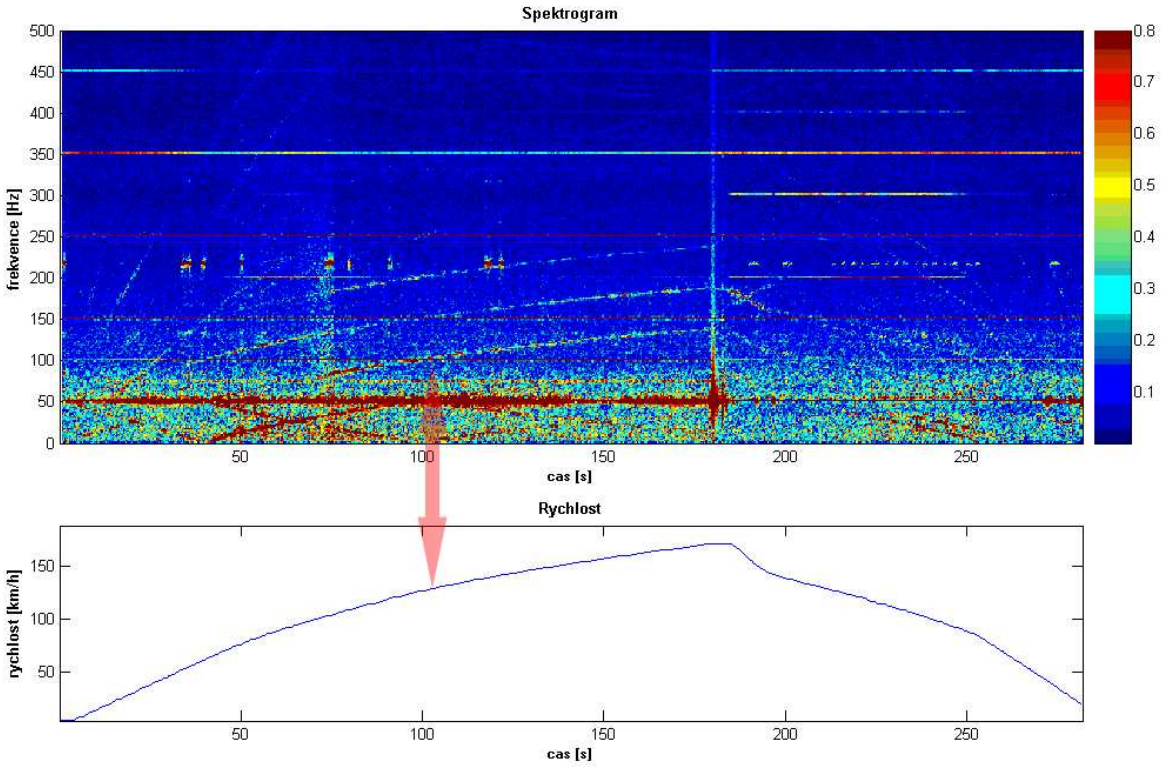
Obecně platí, že amplituda trakčního proudu při rozjezdu, proudu při rekuperaci a proudu, jež se maří v odporníku na teplo při EDB brzdění souvisí se způsobem řízení pohonu. Ten může být pro každý typ hnacího vozidla jiný, zpravidla je ale strategie přiblížit se k teoretické trakční charakteristice, která je na obrázku 3.1 na straně 78.

Vztah s ŽZT

Jmenovitá frekvence napájecí sítě a její vyšší harmonické frekvence nemají na trakční soustavě 25 kV 50 Hz žádný vliv na ŽZT, protože legislativou povolené KO jsou se signální frekvencí 75 Hz nebo 275 Hz. Starší typ KO se signální frekvencí 50 Hz se na střídavé soustavě vyskytovat nesmí.

2.3.3 Motorová frekvence a její vyšší harmonické

Na obrázku 2.13 je označena základní motorová frekvence. Její amplituda je rozebrána na obrázku 2.14 a 2.15.



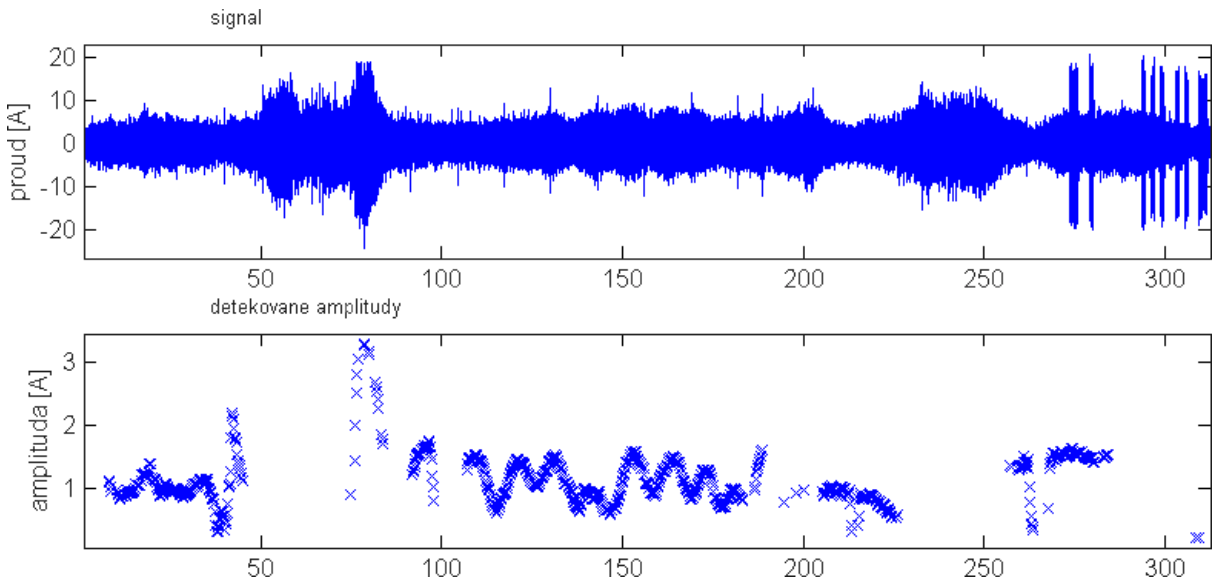
Obrázek 2.13: Základní motorová frekvence na AC soustavě

Obrázek 2.14 ukazuje časový průběh signálu po odfiltrování[8] 50 Hz a amplitudu základní motorové frekvence v čase.

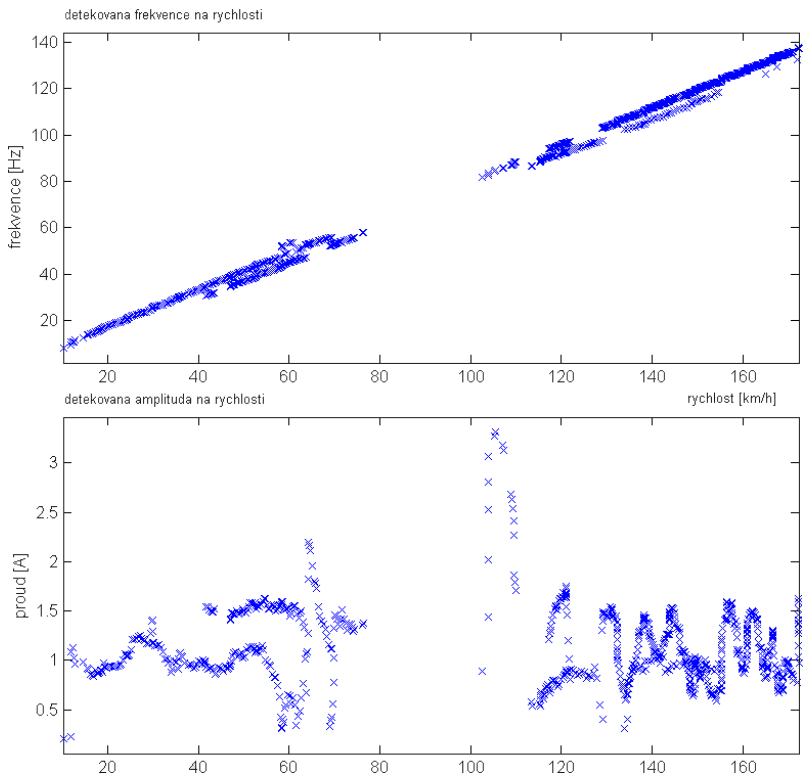
Obrázek 2.15 znázorňuje závislost frekvence a amplitudy na rychlosti drážního vozidla pro základní motorovou frekvenci. Obě závislosti obsahují dva průběhy[9]. Jeden při nárůstu rychlosti na maximální hodnotu a druhý při poklesu. Dále je patrné, že závislost motorové frekvence na rychlosti je lineární.

[8] filtruje se při zpracování signálu číslicovým hřebenovým filtrem

[9] závislost rychlosti na čase není prostá

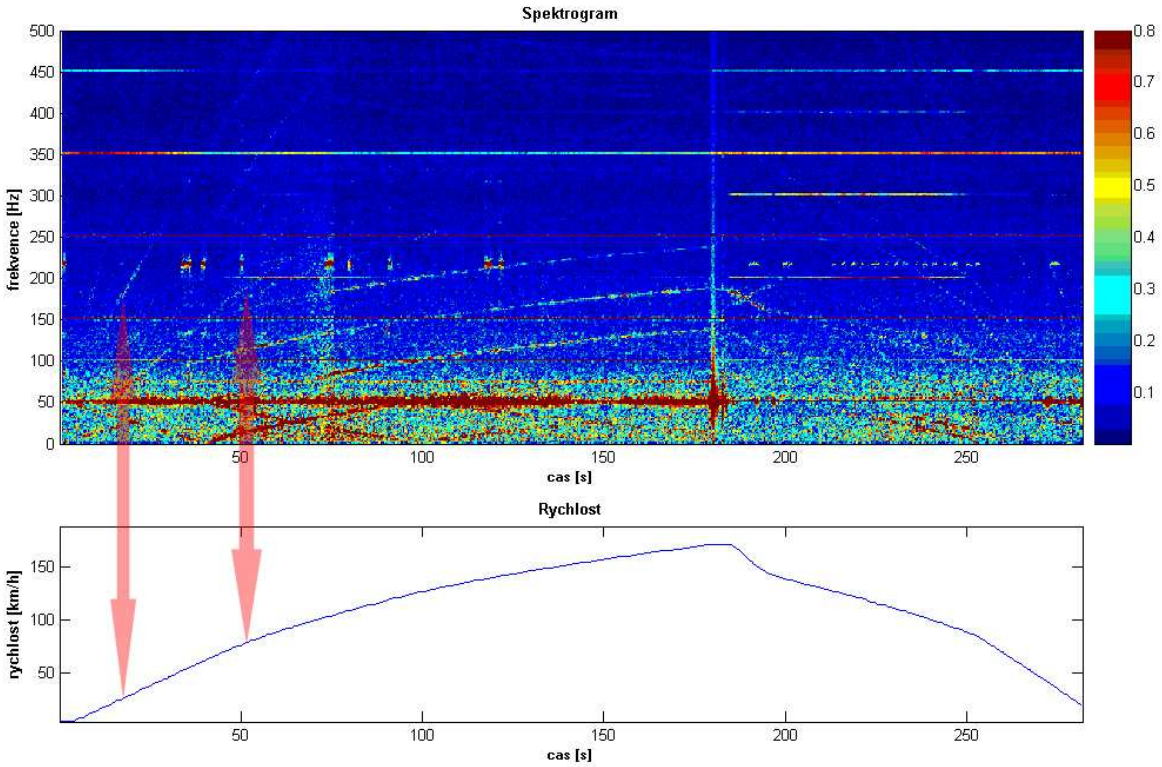


Obrázek 2.14: Signál po odfiltrování 50 Hz a amplituda základní motorové frekvence na AC soustavě



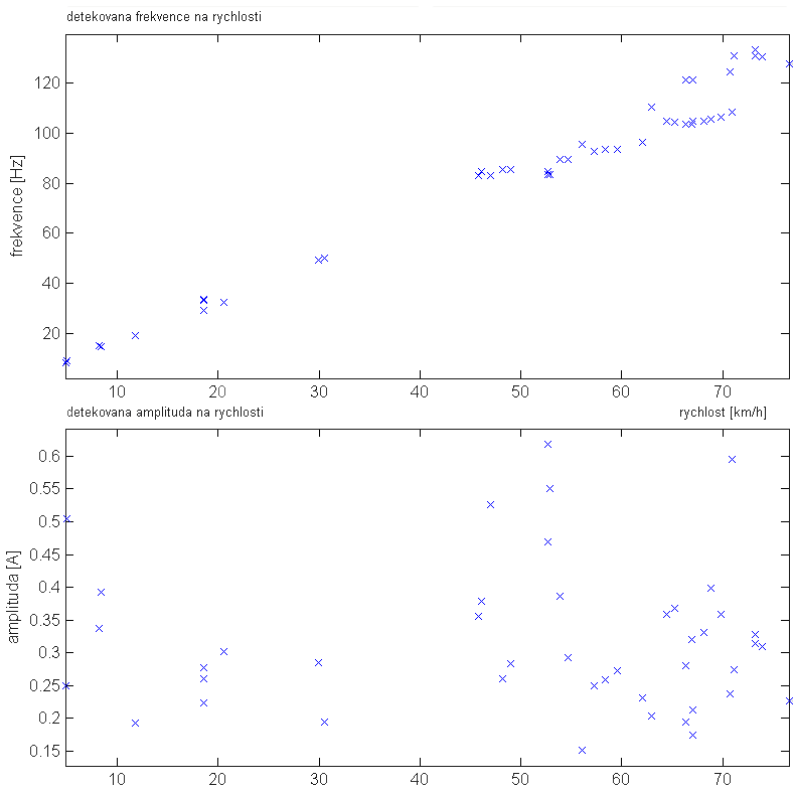
Obrázek 2.15: Základní motorová frekvence. Závislost frekvence a amplitudy proudu na rychlosti na AC soustavě

Zejména na AC soustavě jsou viditelné vyšší harmonické složky motorové frekvence. v obrázku 2.16 je šipkami vyznačena třetí a šestá harmonická motorové frekvence.



Obrázek 2.16: Vyšší motorové frekvence na AC soustavě

Na obrázku 2.17 je závislost frekvence a amplitudy na rychlosti pro druhou harmonickou motorové frekvence. Oproti té základní je méně výrázná, proto se zdetekovalo daleko méně bodů.



Obrázek 2.17: Druhá vyšší motorová frekvence. Závislost frekvence a amplitudy proudu na rychlosti na AC soustavě

Shrnutí vlastností dílčího jevu

Ve ZTP se vyskytuje motorová frekvence a její vyšší složky. Základní motorová frekvence je daleko výraznější, než její vyšší složky. Na obrázku 2.15 je vidět, že v určitých úsecích měla výrazně slabší amplitudu, proto tam byl detekován jiný dílčí signál a při predikci motorové frekvence se tato oblast[10] vypustila. V úsecích, kde naopak detekována byla dosahuje amplitudy 0,2–3,5 A. Průměrná amplituda je 1,1 A. Druhá složka dosahuje v úsecích, kde byla detekována amplitud 0,15–0,6 A, maximum je tedy oproti základní složce téměř šestkrát nižší. Průměrná amplituda této složky dosahuje 0,29 A, je tedy téměř čtyřikrát nižší, než u základní motorové frekvence. Vyšší složky jsou ve spektrogramech patrné, ale jejich amplituda je ještě slabší a nebyly použitým softwarovým prostředkem detekovány vůbec. Jejich amplitudu můžeme přibližně odhadnout ze spektrogramu, ve spektrogramu na obrázku 2.16 je výrazná zejména základní složka a její

[10] úsek odpovídá ochrannému pásmu pro KO se signální frekvencí 75 Hz. EJ 680 byla upravena, aby na těchto frekvencích generovala menší amplitudy

zrcadla postupně posunutá o 50 Hz směrem do vyšších frekencí. V tomto spektrogramu jsou označené dvě vyšší složky, jejichž amplitudu je možné odhadnout jako 0,1–0,7 A pro třetí složku a 0–0,5 A pro zrcadlenou šestou složku.

Další důležitý poznatek o motorové frekvenci je ten, že souvisí s rychlostí lineárně. Důležitý parametr je tedy poměr mezi frekvencí a odpovídající rychlostí pro základní složku. V tomto případě vychází zmíněný poměr $k_{f,v} = 0,792\ \mathrm{Hz\,km^{-1}\,h}$. N-tá vyšší složka má poměr n×0,792 $\mathrm{Hz\,km^{-1}\,h}$.

Příčina vzniku dílčího jevu

ZTP jsou analyzované z elektrické jednotky, která obsahuje moderní pohon – třífázové asynchronní motory řízené frekvenčním měničem [6]. Trakční motory jsou napájeny frekvenčním měničem, případně dvěma měniči, které vytvářejí 3-fázové napětí s proměnným kmitočtem. Otáčky trakčních motorů jsou tedy řízeny změnou napájecí frekvence. Zmíněné napětí se tedy objevuje i v ZTP a my o něm hovoříme jako o motorové frekvenci.

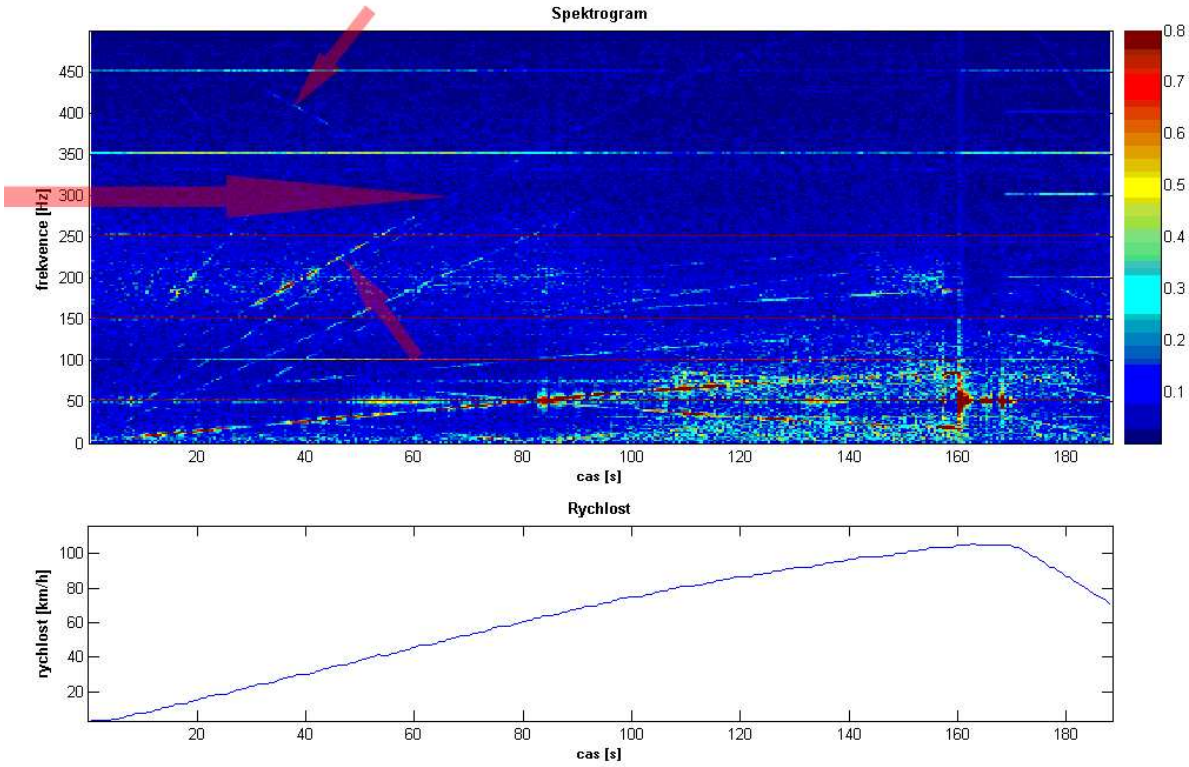
Vztah s ŽZT

Motorová frekvence, její vyšší složky a jejich zrcadla ovlivňují celé pozorované spektrum. Zasahují tedy i do ochranných pásem signálních kmitočtů KO, tyto jevy tedy mohou mít ohrožující vliv na ŽZT. Aby se vyloučilo ovlivnění[11] funkce KO, je potřeba pro každý nový typ hnacího vozidla provést korektní měření ZTP, vyhodnotit jej a zjištěné skutečnosti porovnat s proudovými limity KO v normě [1]. Tato zmíněná norma byla v posledních letech revidována, aby dovolené proudové limity, časové a fázové poměry reflektovaly fyzikální podstatu věci. Pokud tedy hnací vozidlo po odpovídajícím měření a vyhodnocení ZTP vyhoví normě [1], lze s vysokou pravděpodobností říci, že KO neovlivní.

[11] ovlivnění by mohlo znamenat nebezpečnou poruchu

2.3.4 Zrcadlové frekvence

Na AC soustavě podléhá zrcadlení především motorová frekvence a její vyšší harmonické, v menší míře pak podléhá zrcadlení HDO. Na obrázku 2.18 je označen zrcadlový průběh motorové frekvence podle šesté harmonické složky síťové frekvence. Ve spektrogramu na obrázku 2.16 je velice dobře patrná zrcadlená základní motorová frekvence, která je posunutá o 50 a 100 Hz do vyšších frekvencí, o 50 Hz posunutá do nižších a podle 50 Hz osově souměrná.



Obrázek 2.18: Zrcadlové frekvence na AC soustavě

Shrnutí vlastností dílčího jevu

K zrcadlení dochází podle výrazných složek vyšších harmonických síťové frekvence. Zrcadlení podléhá zejména motorová frekvence a její vyšší harmonické. V některých spektrogramech je vidět i zrcadlení HDO, například v další kapitole u obrázku 2.19. Frekvence f se podle frekvence f_z zrcadlí na f' dle následujícího vztahu:

$$f' = 2f_z - f \tag{2.3}$$

Příčina vzniku dílčího jevu

Moderní elektrické pohony obsahují nelineární prvky, v důsledku toho se hnací vozidlo chová jako nelineární dvojbran a zátěž. V tomto případě neplatí princip superpozice a dochází k jevu, tzv. *intermodulaci*. Ten říká, že pokud máme na vstupu nelineárního dvojbranu součet jednotlivých harmonických průběhů s frekvencemi $f_1, f_2, \ldots, f_n$, pak pro dané a_i dostaneme výslednou intermodulační frekvenci. Výsledných intermodulačních frekvencí je pro dané $f_1, f_2, \ldots, f_n$ více, dle volby konstant a_i. Výsledná intermodulační frekvence se spočte dle následujícího vztahu:

$$f' = a_1 f_1 + a_2 f_2 + \cdots + a_n f_n, \quad a_i \in \mathrm{Z} \tag{2.4}$$

Řád určité intermodulační složky se spočte:

$$o \ = |a_1| + |a_2| + \cdots + |a_n| \tag{2.5}$$

Vztah 2.3 je tedy výpočet intermodulační složky 3. řádu. Amplitudy výsledné intermodulační složky jsou v našem případě bohužel analyticky nevyčíslitelné. Více v [10].

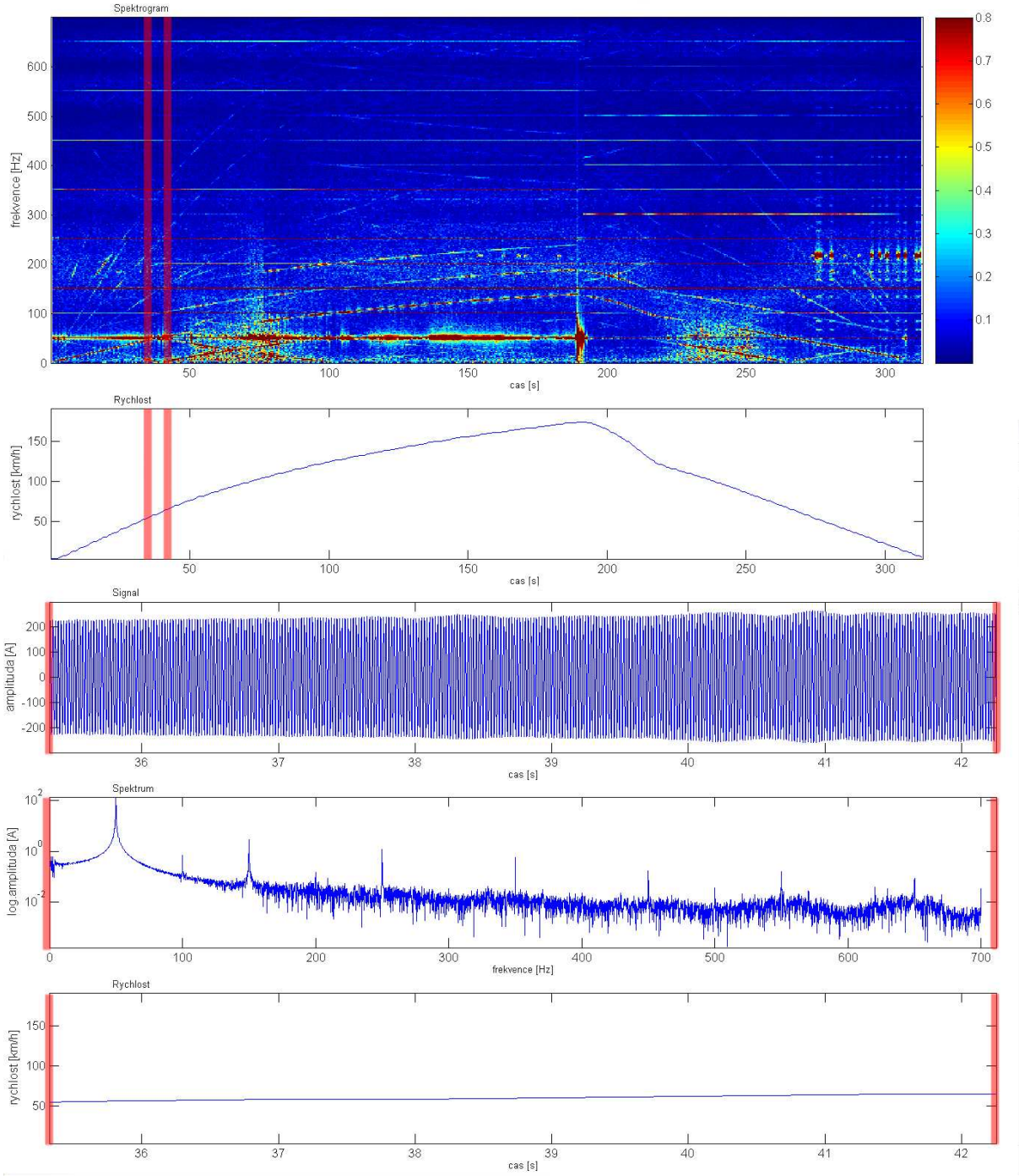
Vztah s ŽZT

Tento jev jako takový nemá přímo vliv na ŽZT, vliv na ŽZT je třeba vyšetřit u jevů, které podléhají zrcadlení a uvažovat tedy i jeho zrcadla. Zrcadlení podléhá motorová frekvence, její harmonické a HDO. Vztah s ŽZT je tedy pro tyto jevy vyšetřen v kapitolách 2.3.3 a 2.3.6 na stránkách 32 a 43.

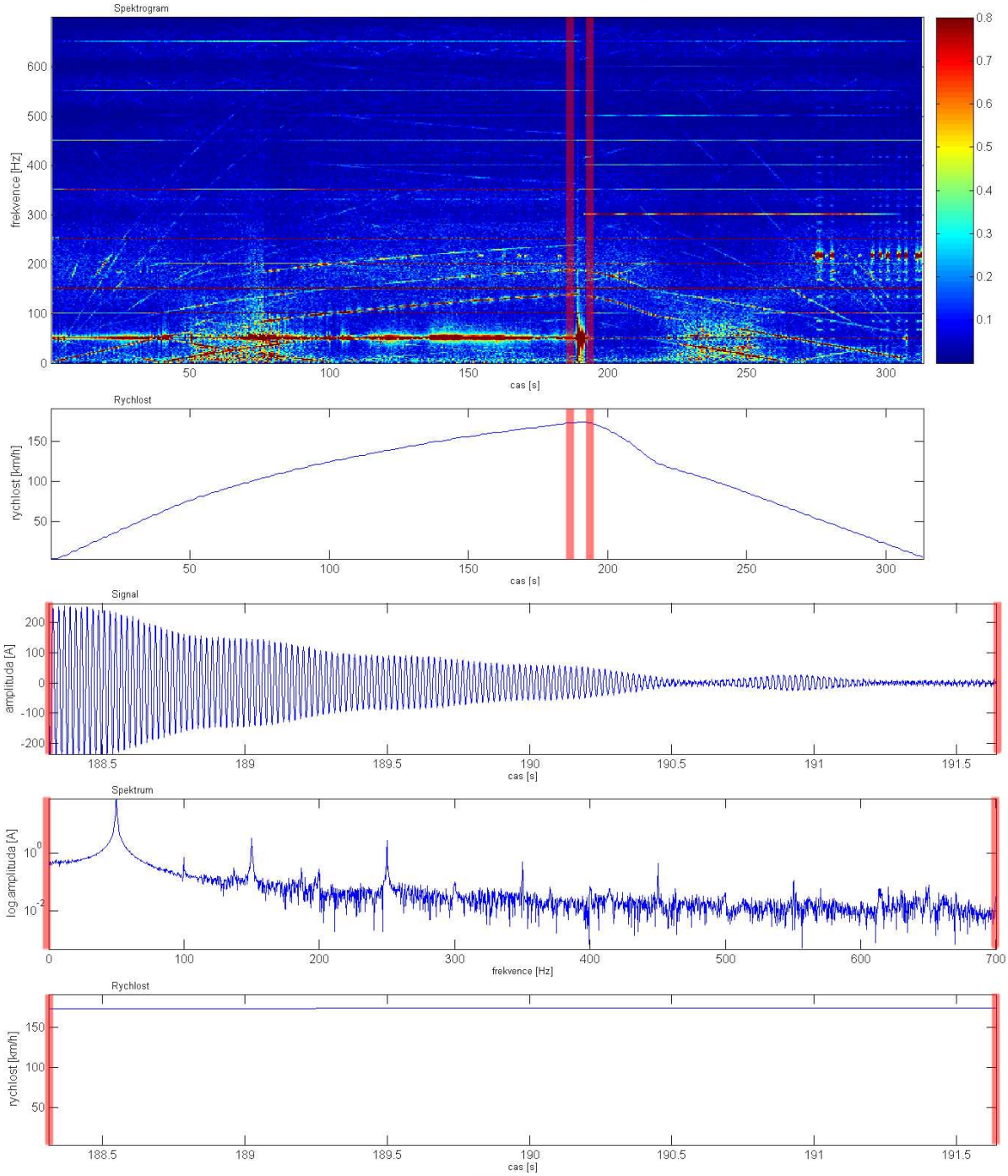
2.3.5 Přechodové děje

Pro analýzu přechodových dějů je vybrán jeden signál z AC soustavy, kde je pozornost zaměřena na úseky, kde se přechodové děje daly dle spektrogramu očekávat. Ve spektrogramu je svislými čarami naznačeno, který úsek je vybrán. Tomu pak odpovídá časový průběh, spektrum daného úseku a rychlost. Ne všechny dále uvedené obrázky opravdu zachycují přechodový děj, z důvodu názornosti analýzy jsou použity všechny analyzované úseky signálu bez ohledu na to, zda-li se na něm přechodový děj nachází, nebo ne.

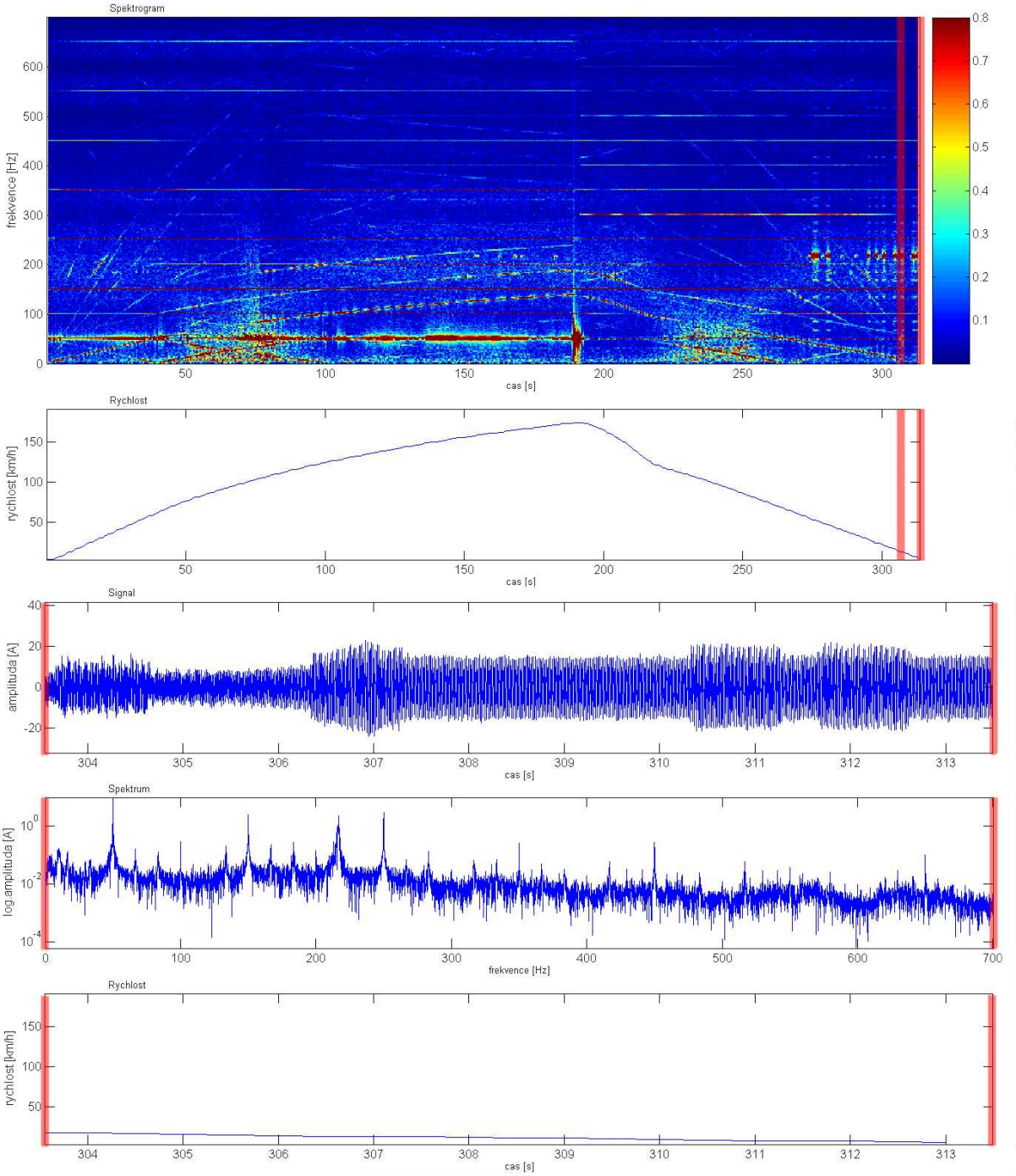
Je třeba si uvědomit, že analýza na této soustavě je složitější než na DC soustavě a že přechodové děje na AC soustavě jsou mnohem hůře viditelné. Na obrázku 2.21 vidíme konec naměřeného signálu. V časové oblasti vidíme 3 pulsy trvající 1s, tvořené vyšší frekvencí. Jedná se o HDO, což nasvědčuje i pohled na spektrum, kde je vidět výskyt složky s frekvencí 216 Hz. HDO je popsáno a analyzováno v následující kapitole.



Obrázek 2.19: Analýza přechodových dějů na AC soustavě. Oblast 2



Obrázek 2.20: Analýza přechodových dějů na AC soustavě. Oblast 3



Obrázek 2.21: Analýza přechodových dějů na AC soustavě. Oblast 4

Shrnutí vlastností dílčího jevu

Nosnou frekvencí energie je 50 Hz. Proto přechodové děje, zde se vyskytující, mají výrazné rozmítnutí na 50 Hz. Přechodové děje ovlivňují celé frekvenční spektrum. Například na obrázku 2.20 je ve spektrogramu a spektru vidět výrazné ovlivnění frekvence 50 Hz a kolem ní na obě strany. Ve spektru je vidět postupně se snižující amplituda na obě strany směrem od 50 Hz. Jedná se o skokové změny amplitudy 50 Hz-složky. V okamžiku tohoto děje pozorujeme ve spektrogramu ovlivnění celého frekvenčního spektra. Pokud tuto úvahu rozšíříme o útlum na vyšších frekvencích, dostáváme takovou podobu, jakou ve spektrogramech nacházíme. Na obrázku 2.21 je vidět HDO přenos. Ve zbylých oblastech se přechodové děje nevyskytovaly.

Příčina vzniku dílčího jevu

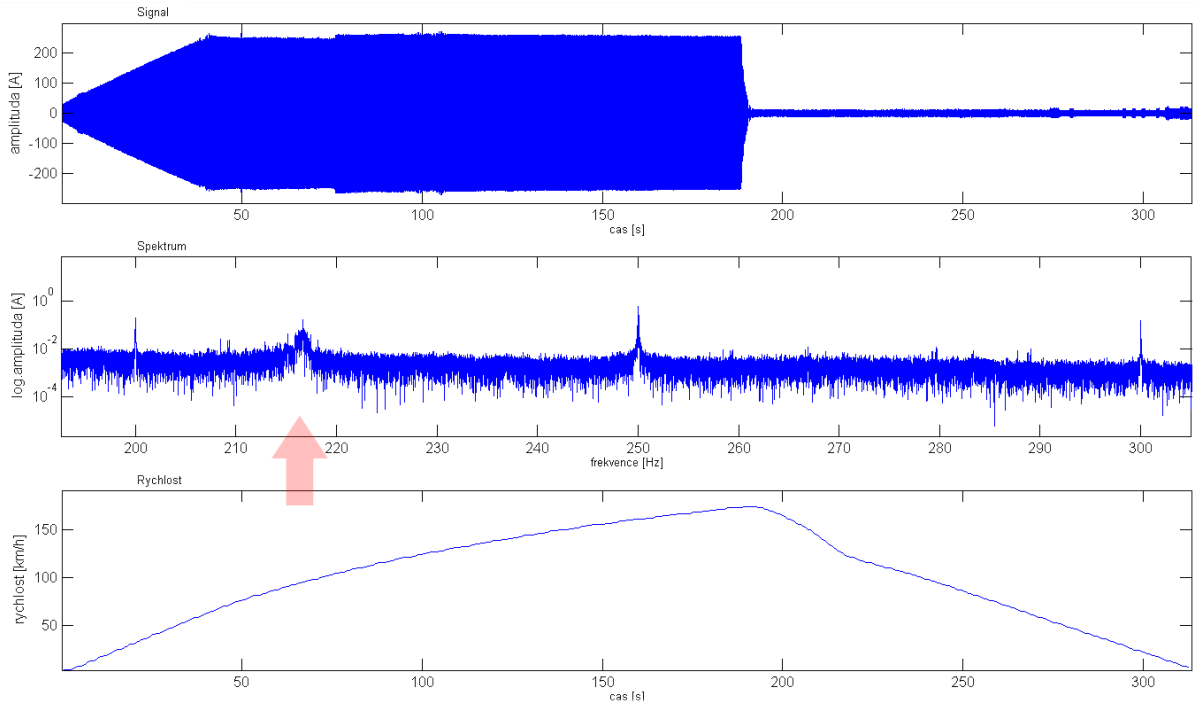
K přechodovým dějům dochází při změnách energie v soustavě. V našem případě to znamená okamžiky, kdy se mění režim jízdy hnacího vozidla, zatěžovací moment trakčních motorů, požadavek na poměrný tah, otáčky motoru, režim trakčních měničů atd. Přechodové děje vznikají i v železniční napájecí soustavě, například při spínacích procesech na trakčním vedení, vlivem změn odběrů elektrické energie jiných hnacích vozidel, atd.

Vztah s ŽZT

Přechodové děje je potřeba zohlednit při analýze kompatibility hnacího vozidla a ŽZT, neboť ovlivňují celé frekvenční spektrum. Na AC soustavě mají velkou amplitudu na frekvenci 50 Hz a kolem ní, zasahují tedy nezanedbatelnou amplitudou i do ochranného frekvenčního pásma KO s frekvencí 75 Hz.

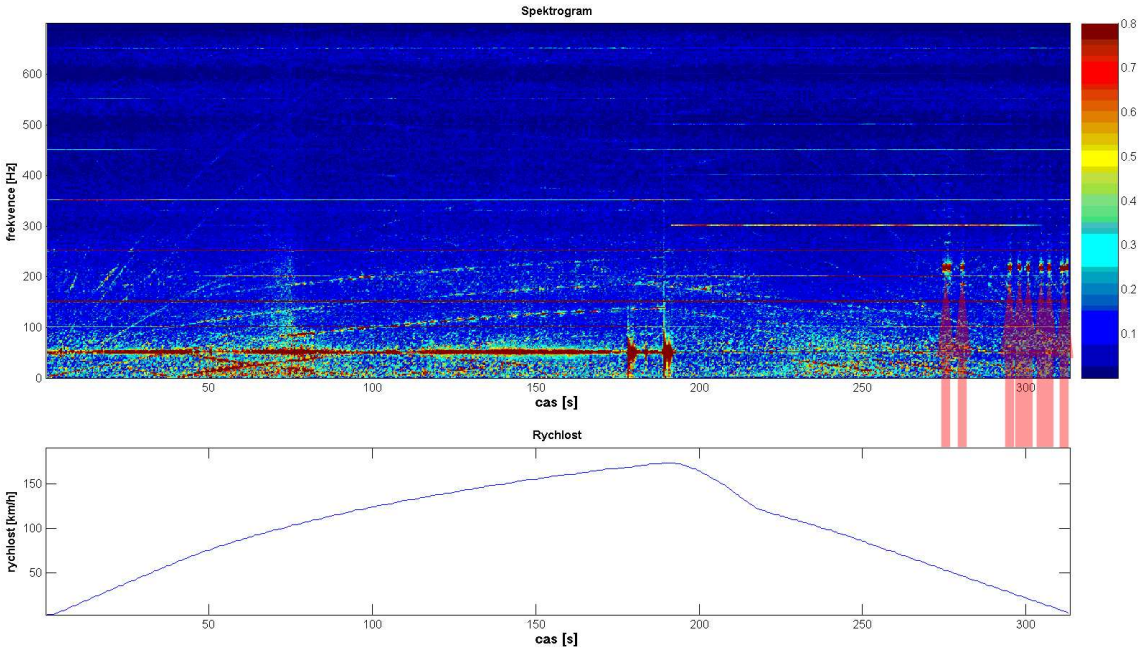
2.3.6 HDO

Ve spektrogramech na AC soustavě je vidět signál HDO s nosnou frekvencí 216,6 Hz a jeho zrcadla. Na dalším obrázku je vybrána malá část spektra, kde se jasně ukazuje, že se v signálu vyskytuje složka s frekvencí kolem 216 Hz.



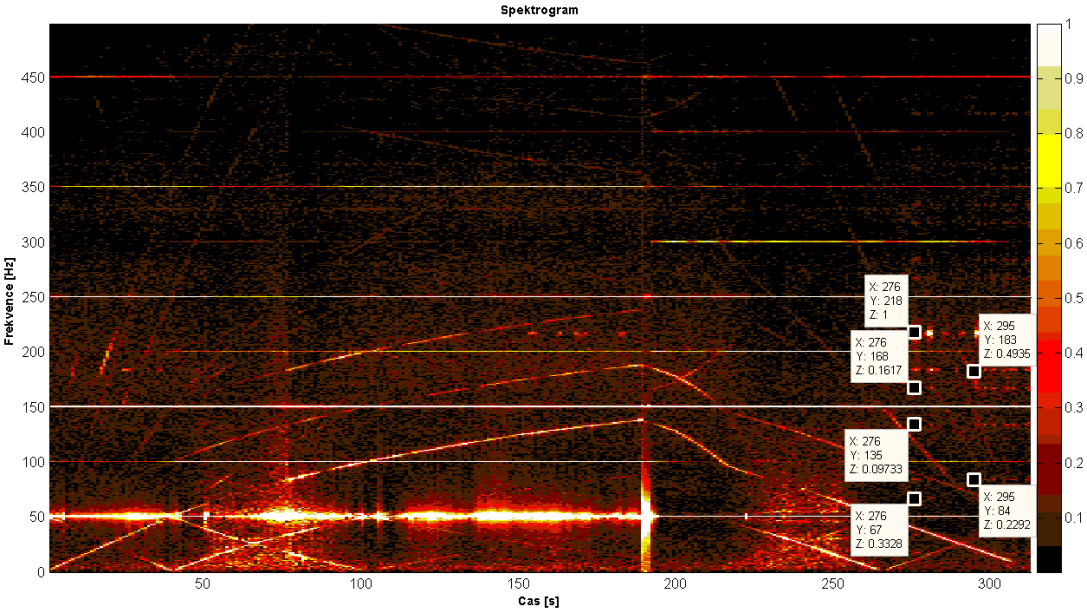
Obrázek 2.22: Výřez spektra signálu na AC soustavě. Označena frekvence kolem 216 Hz

V následujícím spektrogramu můžeme pozorovat vysílání HDO povelů. Jejich časový průběh můžeme vidět na obrázku 2.21 na straně 38.



Obrázek 2.23: HDO na AC soustavě.

Obrázek 2.24 opět znázorňuje HDO přenos a navíc kótuje viditelné frekvence (osa y). Pro určení frekvencí je třeba přihlédnout k rozlišení frekvence, které je v tomto případě 1 Hz.



Obrázek 2.24: HDO s vyznačenými nosnými frekvencemi na AC soustavě. Kótovány viditelné frekvence HDO

Shrnutí vlastností dílčího jevu

HDO je signál, který vysílá energetika pro řízení veřejného osvětlení, přepínání denního a nočního tarifu a další služby energetiky. Vlastní signál HDO je vytvořen amplitudovou modulací nosné frekvence a frekvence modulační. Modulační signál je vytvořen zařízením pro tvorbu HDO povelu, je to dvoustavový signál s významem 0—1. HDO povel je tvořen startovacím pulsem, zabezpečovací mezerou, zabezpečovacím pulsem a jednotlivými povelovými pulsy. Délka povelového pulsu je 1 s. Celková doba trvání HDO povelu je 64 s. V ČR jsou v provozu HDO vysílače s nosnými frekvencemi 183,3 Hz, 194 Hz, 216,6 Hz, 283,3 Hz a 760 Hz. Nejrozšířenější nosná frekvence je 216,6 Hz. Ve spektrogramu na obrázku 2.23 je označen probíhající přenos HDO, výrazný je na nosné frekvenci 216,6 Hz, avšak vyskytuje se i na frekvencích jiných, pravděpodobně dochází k zrcadlení a nejedná se tedy o přenos na jiné nosné frekvenci.

Příčina vzniku dílčího jevu

Železniční napájecí soustava je v případě ČR napojena trakčními transformovnami přímo na přenosovou soustavu veřejné sítě. Signál HDO se tedy přirozeně vyskytuje i v železniční napájecí soustavě.

Vztah s ŽZT

Pokud přijmeme hypotézu, že i HDO podléhá zrcadlení podle složek síťové frekvence, tak je nutné podle vztahu 2.3 spočítat zrcadlové frekvence pro používané signální frekvence HDO. Ty jsou uvedeny v tabulce 2.2.

Tabulka 2.2: Zrcadlové frekvence HDO podle složek síťové frekvence na AC soustavě (intermodulační frekvence 3.řádu)

f_{HDO} [Hz]	183,3	194	216,6	283,3	760
f'_{50} [Hz]	−83,3	−94	−116,6	−183,3	−660
f'_{100} [Hz]	16,7	6	−16,6	−83,3	−560
f'_{150} [Hz]	116,7	106	83,4	16,7	−460
f'_{200} [Hz]	216,7	206	183,4	116,7	−360
f'_{250} [Hz]	316,7	306	283,4	216,7	−260
f'_{300} [Hz]	416,7	406	383,4	316,7	−160
f'_{350} [Hz]	516,7	506	483,4	416,7	−60
f'_{400} [Hz]	616,7	606	583,4	516,7	40
f'_{450} [Hz]	716,7	706	683,4	616,7	140
f'_{500} [Hz]	816,7	806	783,4	716,7	240
f'_{550} [Hz]	916,7	906	883,4	816,7	340

Pokud srovnáme spektrogram s vyznačenými frekvencemi (obrázek 2.24), tak nalezneme nosnou frekvenci 216,6 Hz a její zrcadlové frekvence podle třetí a čtvrté harmonické síťové frekvence. Ostatní označené nosné frekvence neodpovídají žádné jiné nosné frekvenci HDO, ani jejím zrcadlovým frekvencím. Pravděpodobně dochází k zrcadlení podle jiných složek, než uvedených v tabulce 2.2. Spočítáme proto intermodulační frekvence jiných řádů. Omezíme se pouze na nosnou frekvenci HDO 216,6 Hz, protože je nejpoužívanější. Provedeme výpočet podle vzorce $f' = 2f_z - n\,f$. Případ pro $n = 1$ již spočítaný je (v tabulce 2.2). Případ pro $n = 2$, 3 a 4 zobrazuje tabulka 2.3

Tabulka 2.3: Zrcadlové frekvence HDO podle složek síťové frekvence na AC soustavě (intermodulační frekvence 4.řádu)

f_{HDO} [Hz]	$2 \times 216,6$	$3 \times 216,6$	$4 \times 216,6$
f'_{50} [Hz]	−333,2	−549,8	−766,4
f'_{100} [Hz]	−233,2	−449,8	−666,4
f'_{150} [Hz]	−133,2	−349,8	−566,4
f'_{200} [Hz]	−33,2	−249,8	−466,4
f'_{250} [Hz]	66,8	−149,8	−366,4
f'_{300} [Hz]	166,8	−49,8	−266,4
f'_{350} [Hz]	266,8	50,2	−166,4
f'_{400} [Hz]	366,8	150,2	−66,4
f'_{450} [Hz]	466,8	250,2	33,6
f'_{500} [Hz]	566,8	350,2	133,6
f'_{550} [Hz]	666,8	450,2	233,6

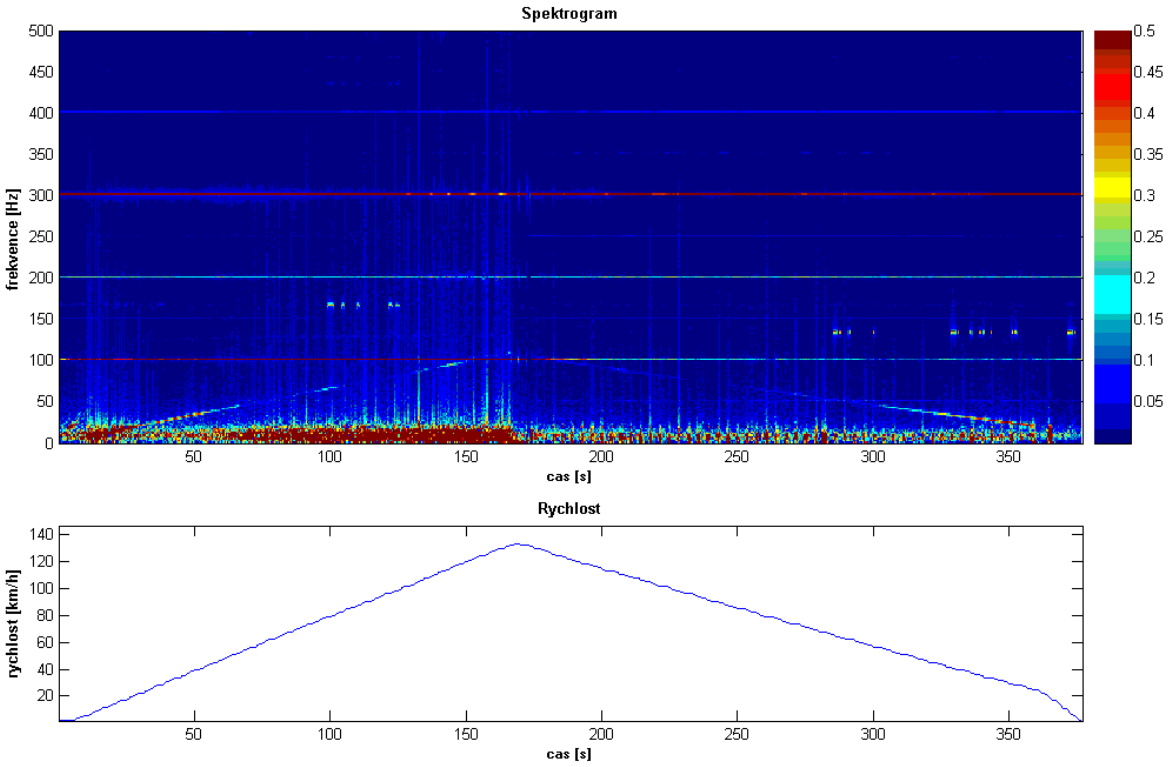
Z tabulky 2.2 vyplývá, že žádná z výše uvedených nosných frekvencí nebo jejich zrcadlové frekvence nezasahují do ochranných pásem KO. Tabulka 2.3 doplňuje zrcadlové frekvence, které byly viditelné v obrázku 2.24, ale nebyly v tabulce 2.2. Jedná se o frekvence 135 Hz a 67 Hz (s přihlédnutím k rozlišení spektrogramu). Nejedná se tedy o intermodulační produkt 3. řádu, ale 4. řádu ($f' = 2f_z - 2f$).

V tabulce 2.3 vycházejí frekvence −266,4 Hz a 266,8 Hz, ty leží v ochranném pásmu pro kolejové obvody se signální frekvencí 275 Hz. Teoreticky je tedy možné ovlivnění KO, ale ve spektrogramu není HDO na těchto frekvencích pozorováno.

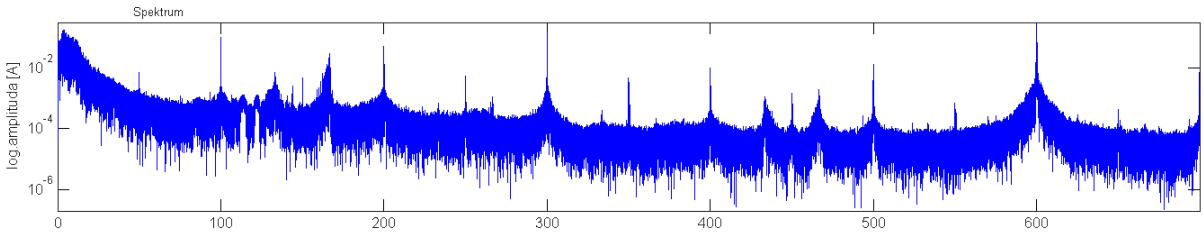
2.4 Analýza zpětných trakčních proudů na DC soustavě

2.4.1 Útlum vyšších frekvencí

Na této soustavě také dochází k útlumu vyšších frekvencí. Sestupný trend je také patrný, ale není v pozorovaném frekvenčním rozsahu konstantní. Na frekvencích 0–100 Hz dochází k útlumu přibližně 40 dB, na frekvencích 100–700 Hz útlum činí přibližně 20 dB.



Obrázek 2.25: Útlum vyšších frekvencí na DC soustavě – spektrum



Obrázek 2.26: Útlum vyšších frekvencí na DC soustavě – spektrogram

Shrnutí vlastností dílčího jevu

Pro určení útlumu na DC soustavě je vhodné rozdělit pozorované frekvenční spektrum na dvě části. V první, menší části dochází k většímu útlumu, v té druhé dochází k útlumu menšímu. V rozmezí frekvencí 0–100 Hz je útlum přibližně 40 dB, v rozmezí 100–700 Hz je útlum přibližně 20 dB.

Příčina vzniku dílčího jevu

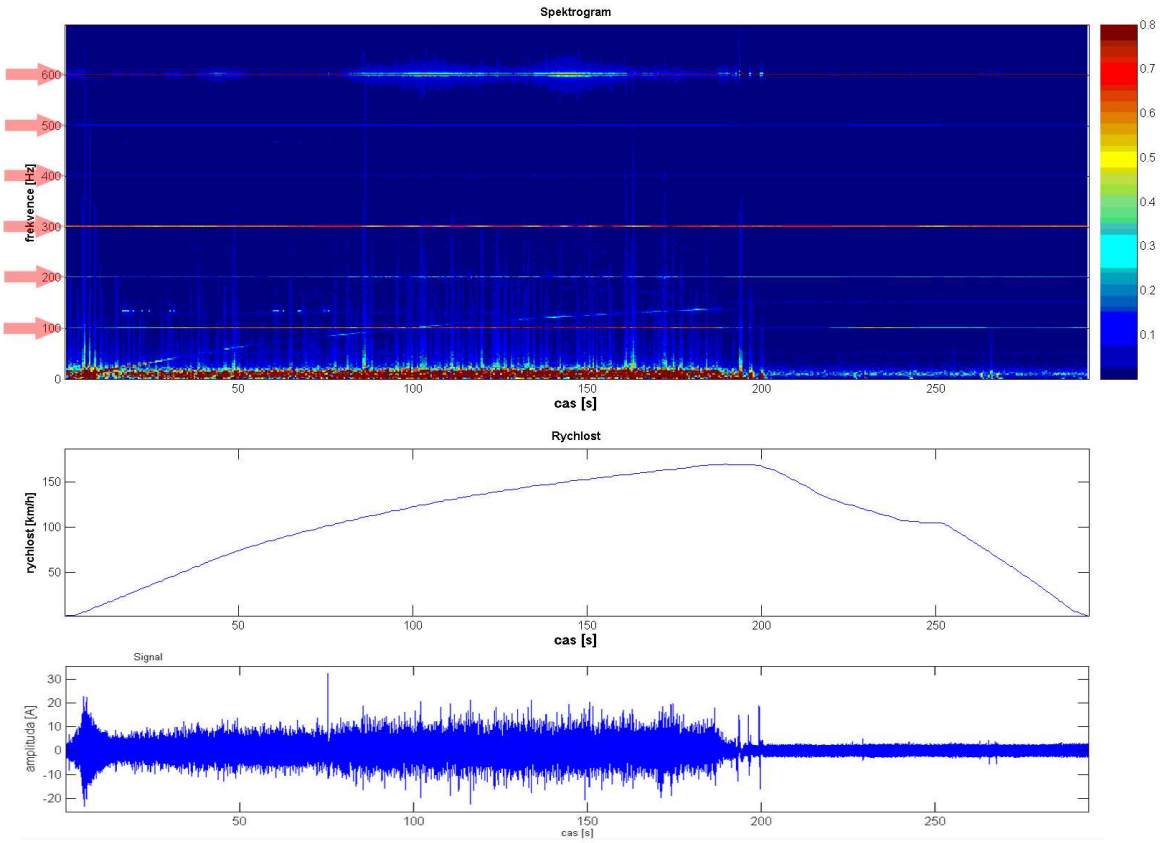
Hnací vozidla mají na DC soustavě napájený stejnosměrný meziobvod přes tlumivku. Ta tedy potlačuje vyšší frekvence a je příčinou toho, proč je útlum na této soustavě větší než na AC soustavě.

Vztah s ŽZT

Souvislost s ŽZT je zde stejná, jako na AC soustavě – útlum má pozitivní vliv, protože i zde jsou výrazné amplitudy proudu na nízkých frekvencích, směrem k vyšším na ně působí útlum a v ochranných pásmech KO tedy dosahují menší amplitudy.

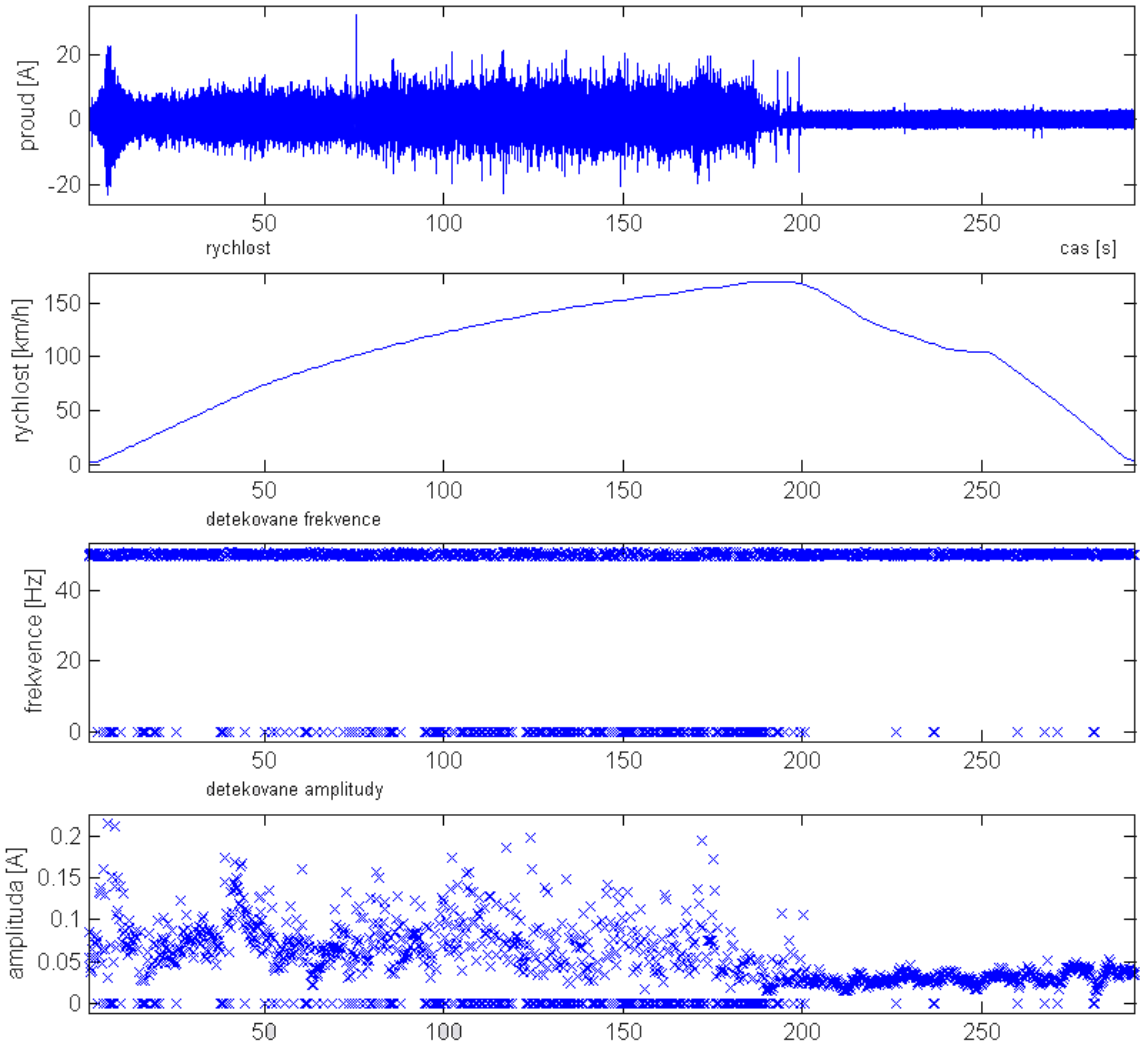
2.4.2 Síťová frekvence a její vyšší harmonické

Nejvýraznější frekvence na DC soustavě jsou složky 300 a 600 Hz. 300 Hz-složka má amplitudu řádově ve stovkách miliampér. 600 Hz-složce dle spektrogramu kolísá amplituda mezi 1–3 A viz obrázek 2.34. Na této soustavě jsou výrazné sudé harmonické složky, což je patrné ze spektrogramů i analýzy jednotlivých složek. Na AC soustavě je situace opačná – tam jsou výrazné liché harmonické složky.



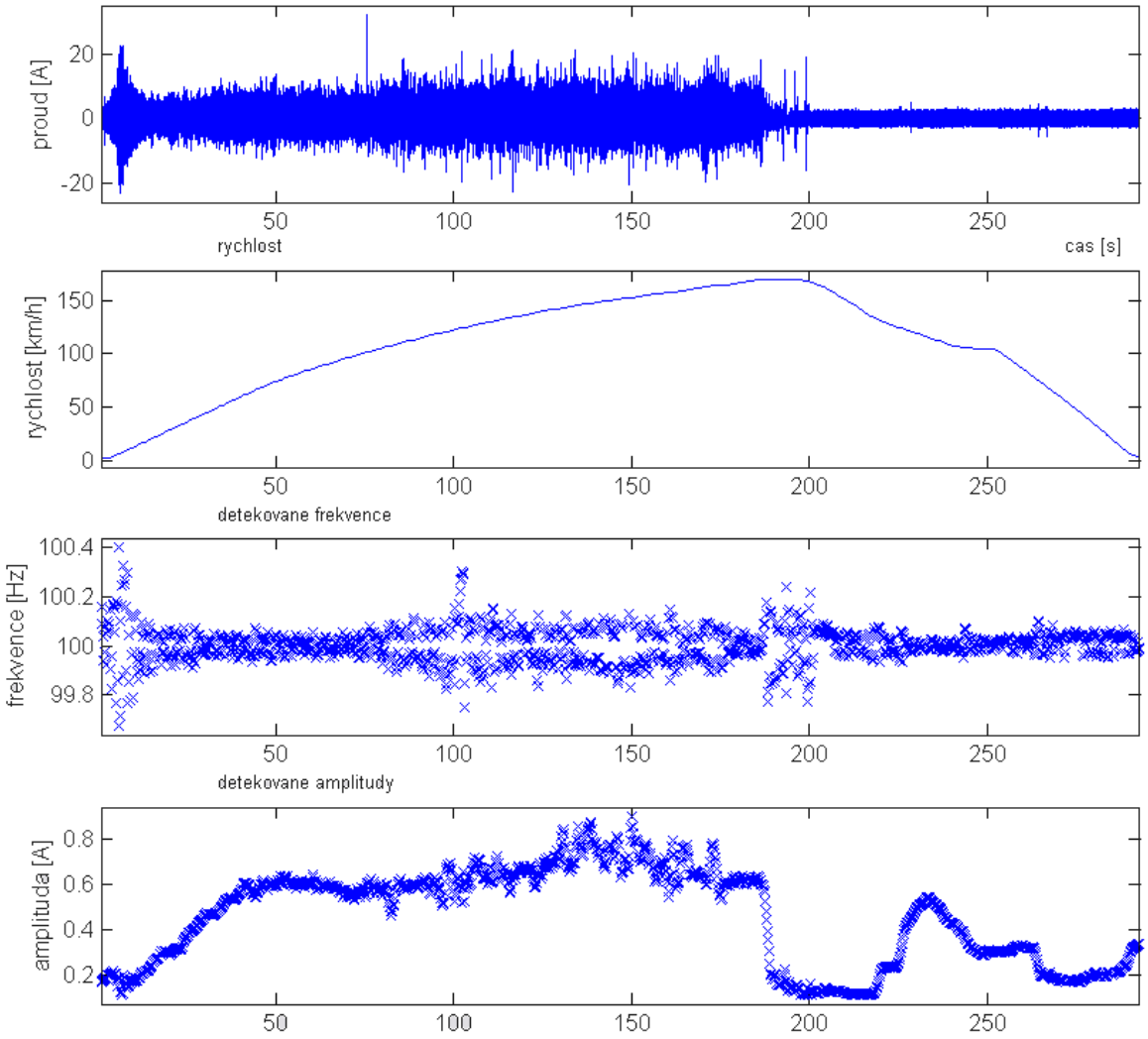
Obrázek 2.27: Síťová frekvence a vyšší harmonické na DC soustavě. Spektrogram, rychlost a průběh signálu. Vyznačeny sudé násobky základní frekvence

Stejně jako na AC soustavě budou i zde podrobně rozebrány průběhy amplitud harmonických složek. Na obrázcích 2.28–2.33 jsou rozebrány tytéž složky (50—300 Hz) a navíc je zde rozebrána složka 600 Hz (obrázek 2.34). Zmíněné složky nebudu na této soustavě označovat jako n-násobky základní harmonické, ale budu je označovat pouze jejich frekvencí.



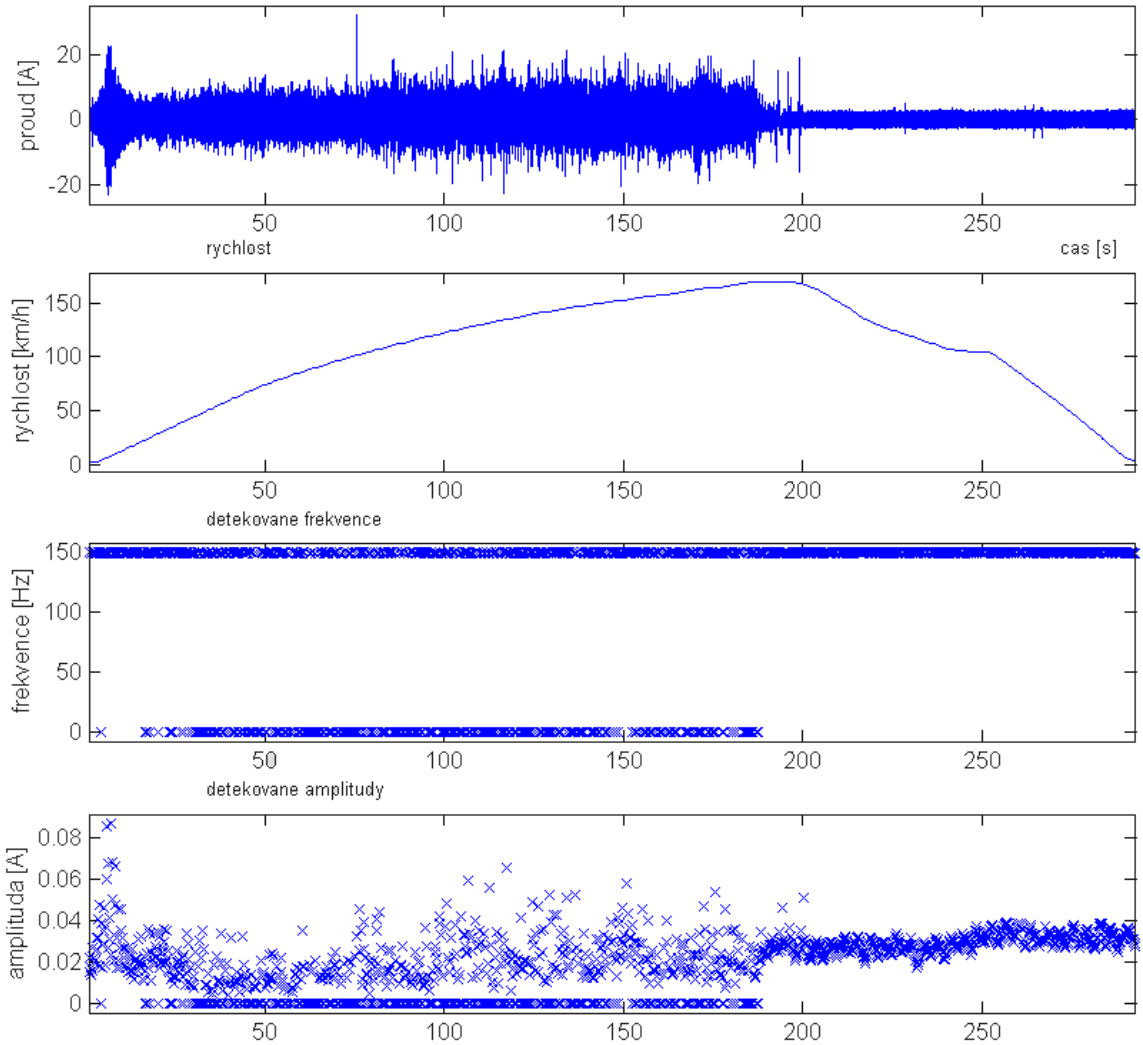
Obrázek 2.28: 50 Hz na DC soustavě

Amplituda 50 Hz-složky se pohybuje řádově v desítkách miliampér. Největší hodnota přesahuje hodnotu 200 mA. Souvislost průběhu amplitudy a rychlosti zde můžeme nalézt – při nárůstu rychlosti amplituda velice kolísá, při poklesu je téměř ustálená a pohybuje kolem 30 mA.



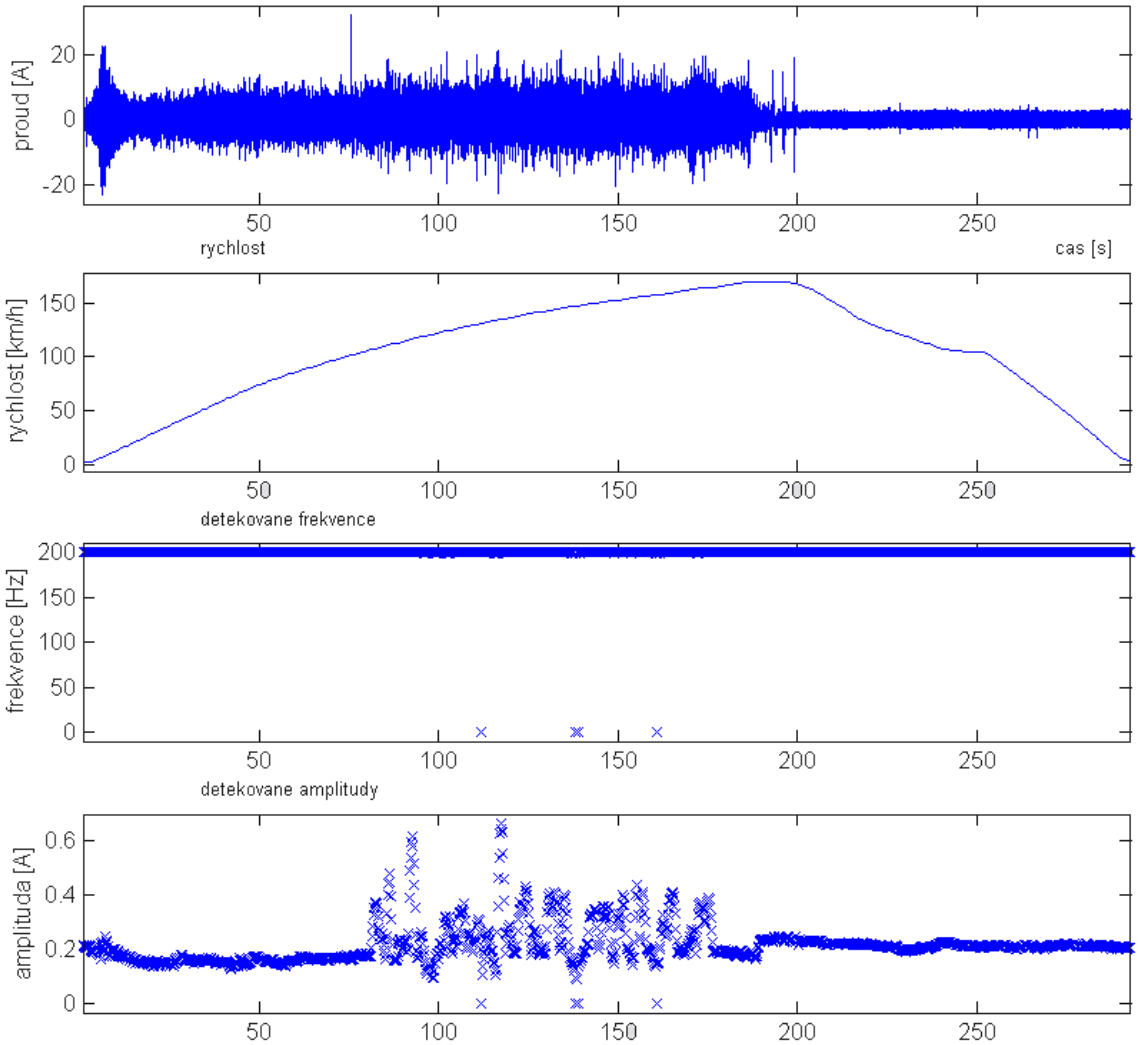
Obrázek 2.29: 100 Hz na DC soustavě

Na obrázku 2.29 můžeme vidět, že sudé harmonické složky jsou opravdu výraznější než liché. Amplituda se pohybuje od 50 mA do 1 A. Při rozjezdu tato složka kopíruje odběr trakčního proudu, který je stejný jako průběh 50 Hz-složky na AC soustavě (obrázek 2.7 na straně 20).



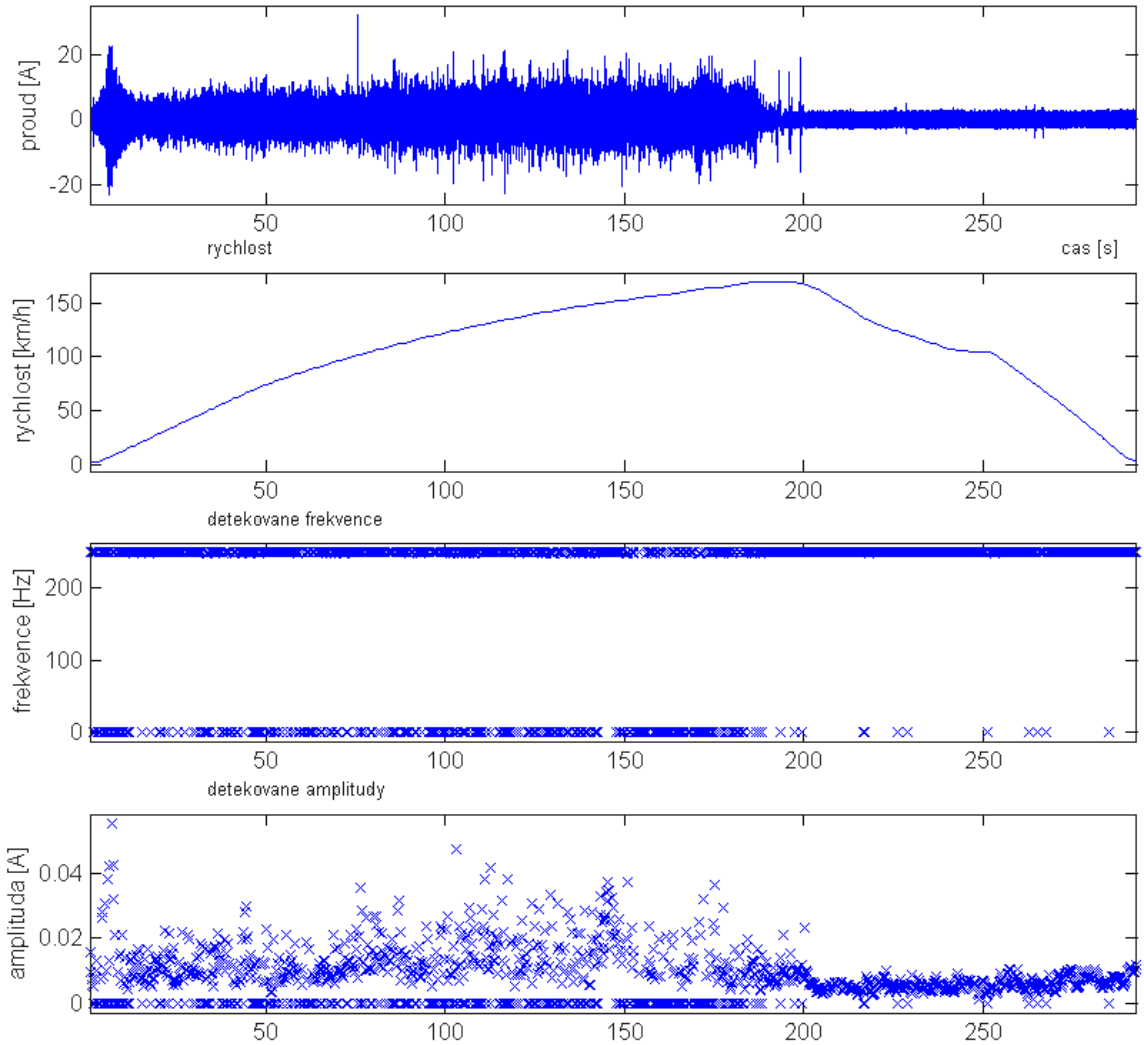
Obrázek 2.30: 150 Hz na DC soustavě

Obrázek 2.30 ukazuje podobnost této složky s první složkou–obrázek 2.28. Maximální hodnota amplitudy je kolem 90 mA. V části, kde rychlost klesá je ustálená hodnota amplitudy mezi 20–40 mA.



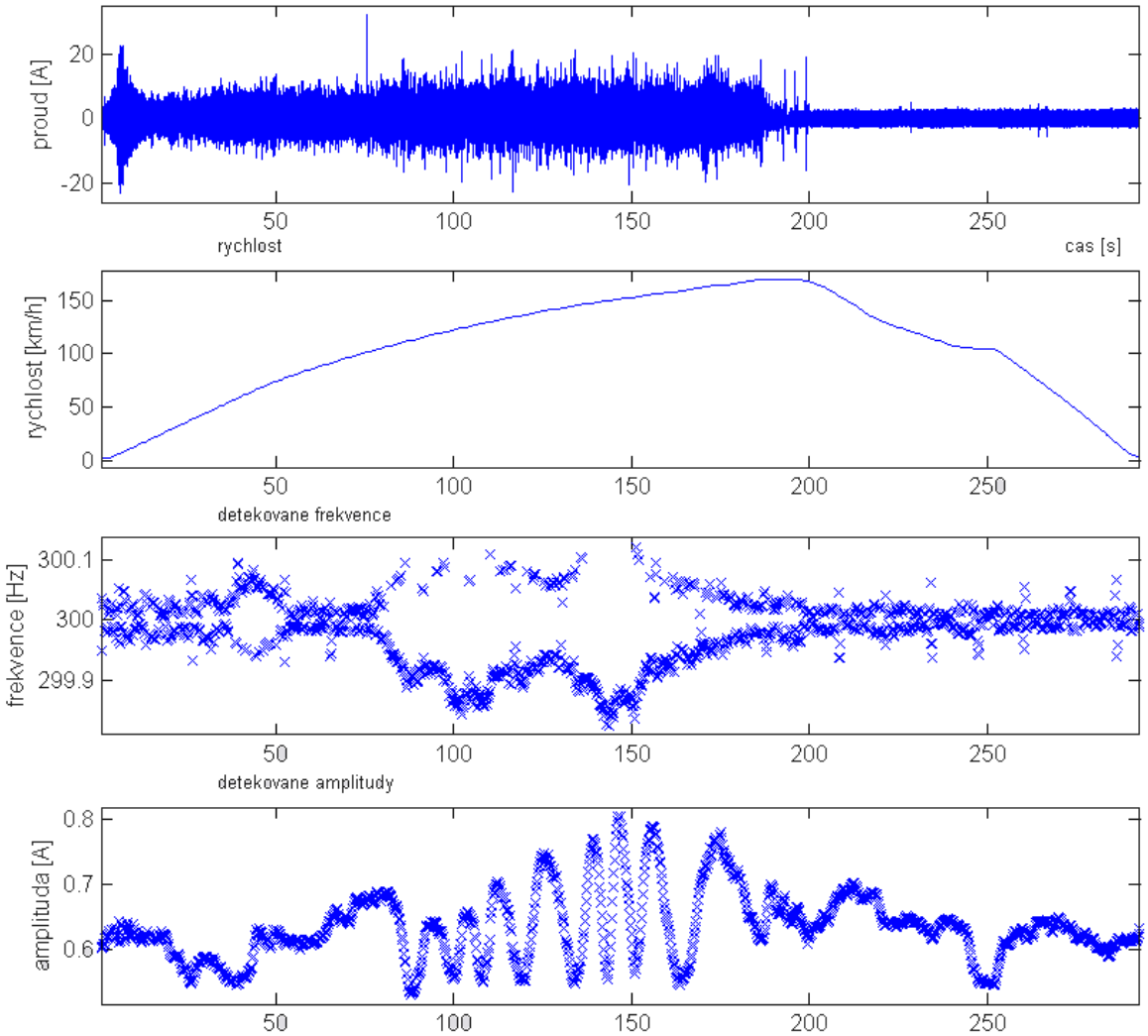
Obrázek 2.31: 200 Hz na DC soustavě

U složky 200 Hz se amplituda pohybuje kolem 200 mA, ve střední části naměřeného signálu amplituda kolísá a v maximech dosahuje 600 mA.



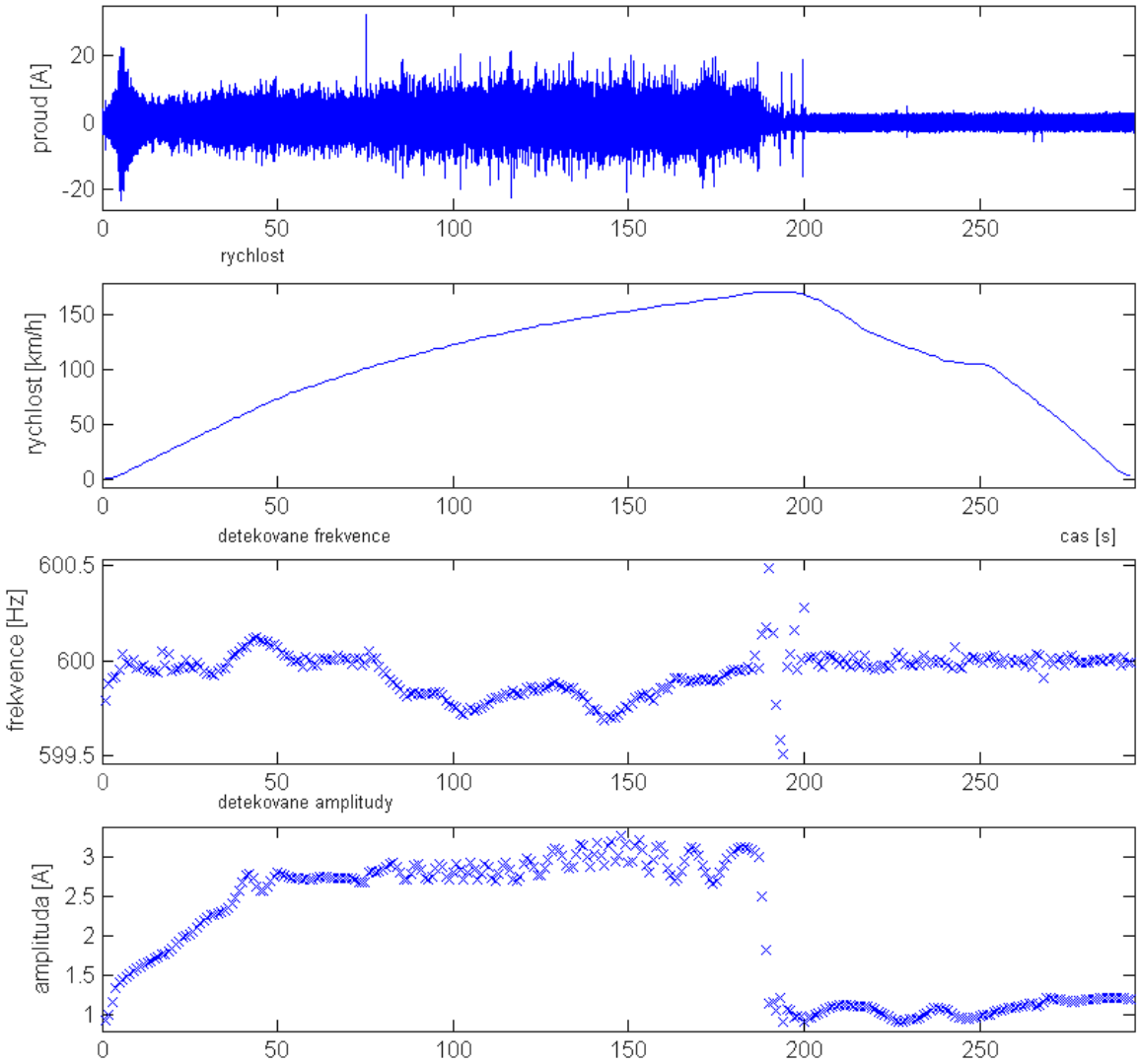
Obrázek 2.32: 250 Hz na DC soustavě

Složka 250 Hz má podobný průběh jako složky 50 a 150 Hz. Zde je ustálená hodnota při poklesu rychlosti kolem 10 mA.



Obrázek 2.33: 300 Hz na DC soustavě

Amplituda složky 300 Hz kolísá mezi 500–800 mA. Souvislost s rychlostí zde není patrná. Ve střední části je kolísání největší, podobně jako u složky 200 Hz.



Obrázek 2.34: 600 Hz na DC soustavě

Průběh této složky velice připomíná průběh základní síťové frekvence na AC soustavě, který je na straně 20. Je přímo úměrný odběru trakčního proudu.

Shrnutí vlastností dílčího jevu

Na této soustavě není naměřen stejnosměrný proud, protože vlivem měřící metody není stejnosměrná složka v signálech vůbec obsažena. Odebíraný stejnosměrný proud má stejný charakter jako 50 Hz-složka na AC soustavě. Přestože je tato soustava stejnosměrná, obsahují ZTP průmyslový kmitočet 50 Hz a jeho vyšší harmonické složky. U této soustavy není úplně korektní hovořit o n-násobcích základní složky, proto jsou zde složky nazvány jejich frekvencí. Z analýzy vyplývá, že narozdíl od AC soustavy jsou na DC soustavě výrazné sudé složky (100, 200, 300 a 600 Hz). Složky s frekvencí 50, 150 a 250 Hz mají společnou vlastnost – při rozjezdu amplituda velice kolísá, při brzdění je amplituda téměř ustálená. 50 Hz-složka má amplitudu při brzdění 30–50 mA, při rozjezdu velice kolísá, maximum má 220 mA. 100 Hz-složka má méně zřejmou souvislost s rychlostí, při brzdění nejprve poklesne z 0,6 A na 0,2 A, ale pak opět vzroste na 0,5 A. Při rozjezdu tato složka nejprve roste podobným způsobem jako základní síťová složka na AC soustavě. Průběh 150 Hz-složky je velice podobný se složkou 50 a 250 Hz. 200 Hz-složka má průběh velice netypický – při nárůstu rychlosti z 100 $\mathrm{km\,h^{-1}}$ na rychlost 160 $\mathrm{km\,h^{-1}}$ amplituda kolísá mezi 0,1–0,7 A, v ostatních úsecích je amplituda poměrně ustálená, její hodnota je 0,2 A. 300 Hz-složka nemá zřejmou souvislost s rychlostí, amplituda se pohybuje mezi 0,5–0,8 A. 600 Hz-složka má charakter odebíraného trakčního proudu. Amplitudy jsou přehledně shrnuty v následující tabulce.

Tabulka 2.4: Amplitudy síťové frekvence a vyšších harmonických složek na DC soustavě

Frekvenční složka [Hz]	Amplituda při rozjezdu [A]	Amplituda při brzdění [A]	Průměrná amplituda [A]	Souvislost s rychlostí
50	0,03–0,3	0,02–0,04	72×10^{-3}	je
100	0,1–0,9	0,05-0,5	0,46	slabá
150	0,01–0,09	0,02–0,04	28×10^{-3}	je
200	0,1–0,6	0,2–0,22	0,22	není
250	0,005–0,05	0,003–0,01	11×10^{-3}	je
300	0,5–0,8	0,55–0,7	0,63	není
600	1–3,5	1–1,3	2,1	silná

Příčina vzniku dílčího jevu

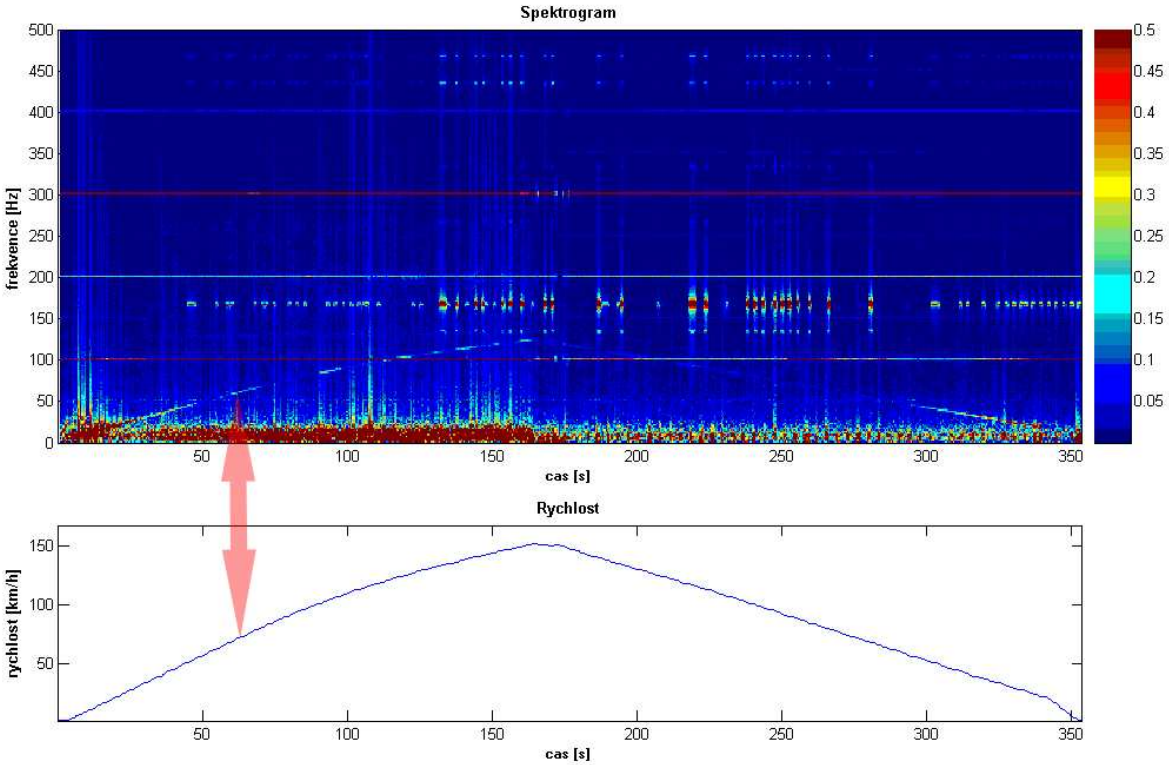
Stejnosměrná železniční napájecí soustava je tvořena trakčními měnírnami, které jsou napojeny na veřejnou přenosovou síť. Narozdíl od AC soustavy, kde dochází pouze k transformaci napětí, na DC soustavě dochází v měnírnách k transformaci napětí a usměrnění. Usměrnění je převážně dvanáctipulsní, proto se ve ZTP objevuje výrazná složka s frekvencí 600 Hz, je to tedy zbytkové zvlnění po dvanáctipulsním usměrnění. Tato složka má průběh velice podobný se základní síťovou složkou na AC soustavě, pouze s rozdílem velikostí amplitud. Protože má příčinu přímo v napájecí síti a nikoliv v ovlivňování sítě hnacím vozidlem, tak pro ní platí podobné principy jako pro základní síťovou složku na AC soustavě, zejména nárůst amplitudy při rozjezdu, který je vysvětlen v kapitole 2.3.2 na straně 26.

Vztah s ŽZT

Na této soustavě je stále ještě povolen provoz starších typů KO se signální frekvencí 50 Hz, proto může mít tento jev na DC soustavě ohrožující vliv. Příslušná norma [1] dovoluje pro stejnosměrné soustavy trvalý proud 260 mA v ochranném pásmu pro KO se signální frekvencí 50 Hz. V dřívějších dobách se přítomnost 50 Hz-složky kontrolovala přímo v měnírně, protože tehdejší rtuťové usměrňovače při poruše obsahovaly na výstupu složku 50 Hz a hrozilo tím ovlivnění bezpečné funkce KO. Dnes se v měnírnách používají polovodičové usměrňovače a neuvažuje se poruchový stav takový, že by jedna z diod vedla proud trvale. Proto se už velikost proud 50 Hz-složky nekontroluje. Přesto se ale na výstupu trakční měnírny vlivem nesymetrií a nelinearit 50 Hz-složka vyskytuje. Při dostatečném počtu drážních vozidel závislé vozby na jednom trakčním rameni může teoreticky dojít k ovlivnění KO se signální frekvencí 50 Hz.

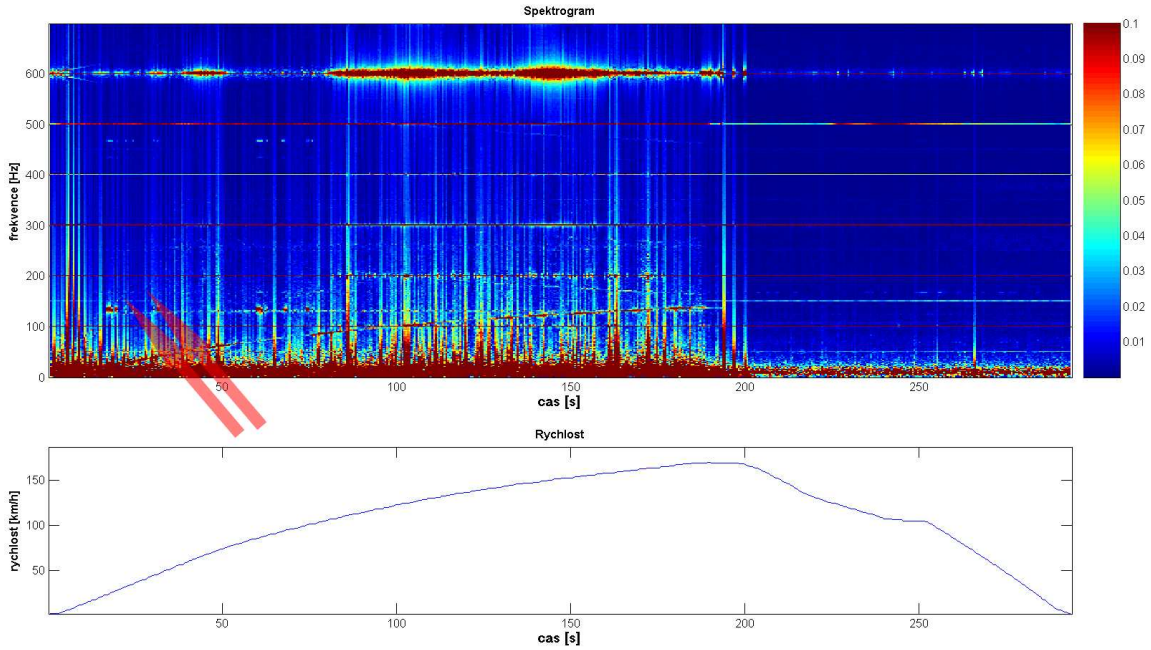
2.4.3 Motorová frekvence a její vyšší harmonické

Amplituda motorové frekvence na DC soustavě se dle spektrogramu pohybuje řádově ve stovkách miliampér. Na této soustavě se vyšší harmonické složky motorové frekvence vyskytují, ale jejich amplituda je velice malá, srovnatelná se šumem a pro jejich zpozorování je třeba prahovat spektrogram na nižší hodnotu. Na obrázku 2.35 je vidě základní harmonická motorové frekvence.

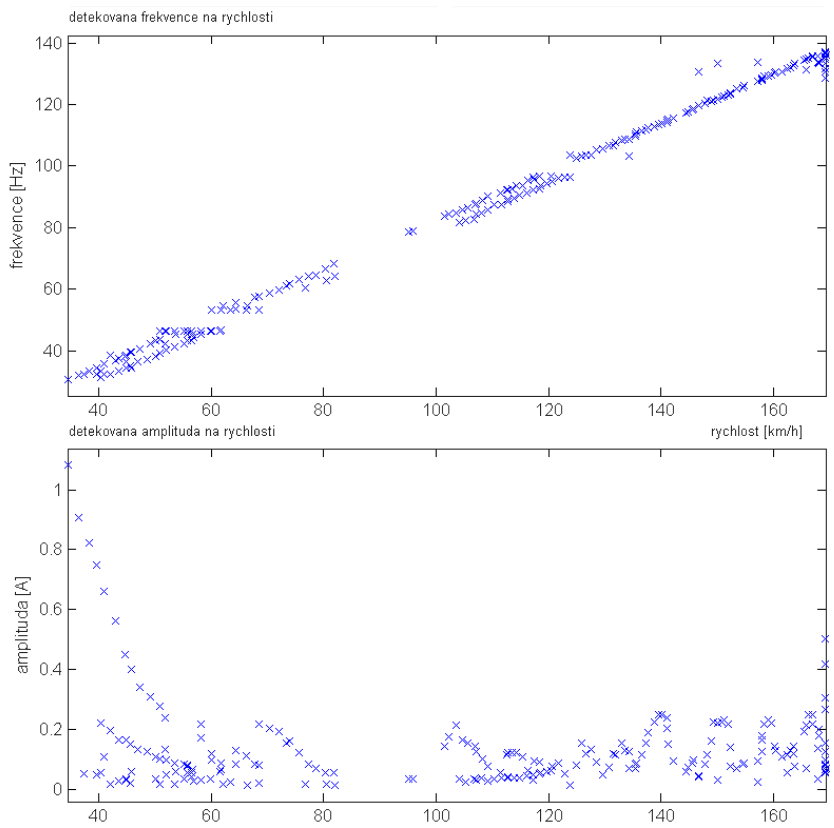


Obrázek 2.35: Základní motorová frekvence na DC soustavě

Na DC soustavě se vyšší harmonické složky motorové frekvence vyskytují, ale oproti AC soustavě jsou viditelné po nastavení prahu ve spektrogramu na nižší hodnotu, viz obrázek 2.36. Amplitudy vyšších složek motorové frekvence lze ze spektrogramu pouze odhadnout. Odhad je tedy řádově v jednotkách až desítkách miliampér.



Obrázek 2.36: Vyšší motorové frekvence na DC soustavě. Prahováno na 100 mA



Obrázek 2.37: Základní motorová frekvence. Závislost frekvence a amplitudy proudu na rychlosti na DC soustavě

Obrázek 2.37 ukazuje závislost frekvence a amplitudy pro základní motorovou frekvenci. Závislost frekvence na rychlosti je lineární, směrnice má hodnotu $k_{f,v} = 0,825\ \mathrm{Hz\,km^{-1}\,h}$. Průměrná hodnota amplitudy je 134 mA. Vyšší složky motorové frekvence nelze takovýmto způsobem analyzovat, protože mají o jeden řád menší amplitudu.

Shrnutí vlastností dílčího jevu

Poměr frekvence a rychlosti pro základní motorovou frekvenci činí 0,825 $\mathrm{Hz\,km^{-1}\,h}$, průměrná amplituda je 134 mA. Závislost frekvence na rychlosti je stejně jako na AC soustavě lineární. Vyšší složky mají přibližně o jeden řád menší amplitudu proudu, je velice obtížné tyto složky detekovat. Na AC soustavě byl naměřen poměr $k_{f,v}$ menší, 0,792. Roli hraje jednak rozlišení histogramu určených poměrů frekvence a rychlosti a hledání maxima v něm. V grafech znázorňujících závislost frekvence na rychlosti je možné pozorovat dva průběhy – rozjezd a EDB brzdění. V obou případech dochází k jinému skluzu trakčních motorů, tedy i jinému poměru $k_{f,v}$. určený poměr $k_{f,v}$ je tedy závislý na počtu

detekovaných bodů při rozjezdu a při EDB brzdění.

Příčina vzniku dílčího jevu

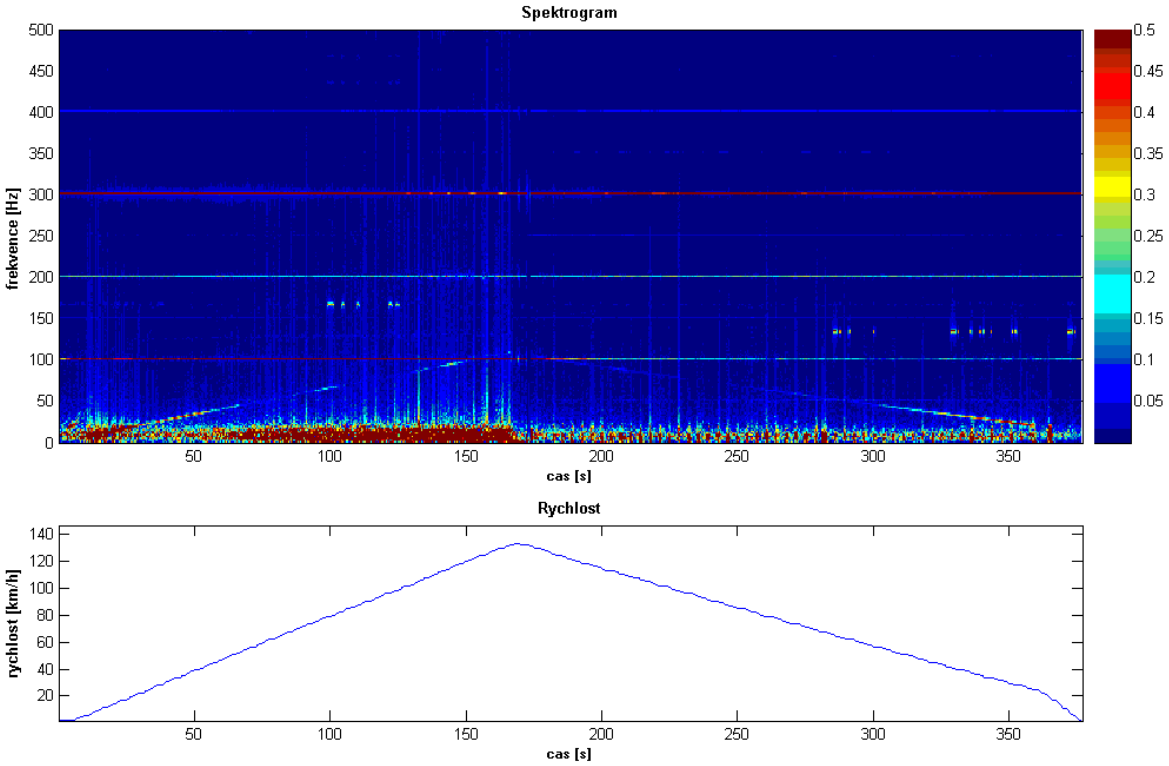
Pro hledání příčiny motorové frekvence můžeme vycházet z rozboru motorové frekvence na AC soustavě, která je v kapitole 2.3.3 na straně 32 s přihlédnutím k rozdílu mezi těmito soustavami. Na této soustavě není na hnacích vozidlech usměrňovač (měnič) v provozu, stejnosměrný meziobvod je napájen přímo z trolejového napětí přes vstupní tlumivku a kondenzátory filtru jsou připojeny do stejnosměrného obvodu. Tlumivka a zmíněné kondenzátory pak tvoří dolní propust 2. řádu.

Vztah s ŽZT

Souvislost tohoto jevu s ŽZT na této soustavě a na AC soustavě se liší pouze tím, že na této je třeba navíc uvažovat ochranné pásmo pro KO se signální frekvencí 50 Hz. Jinak se rozbor neliší s AC soustavou, kde je zpracovaný v kapitole 2.3.3 na straně 32. Možnost ohrožení KO motorovou frekvencí je třeba uvažovat, protože motorová frekvence zasahuje ochranná pásma KO.

2.4.4 Zrcadlové frekvence

Na DC soustavě je patrné zrcadlení pouze HDO. Zrcadlení motorové frekvence není, narozdíl od AC soustavy, vůbec patrné. Na obrázku 2.38 je vidět HDO signál kolem frekvencí 133, 166, 433 a 466 Hz. HDO a jeho zrcadlením se podrobněji zabývá kapitola 2.4.6 na straně 71.



Obrázek 2.38: Zrcadlové frekvence na DC soustavě

Shrnutí vlastností dílčího jevu

Na této soustavě se zrcadlí pouze HDO signál a to opět podle harmonických síťové frekvence.

Příčina vzniku dílčího jevu

Příčina zrcadlení frekvencí je stejná jako na AC soustavě, ta je vysvětlena v kapitole 2.3.4 na straně 34. Příčinu toho, proč se na této soustavě nezrcadlí motorová frekvence, je třeba hledat v jiném zapojení hnacího vozidla – na stejnosměrné soustavě se nevyužívá

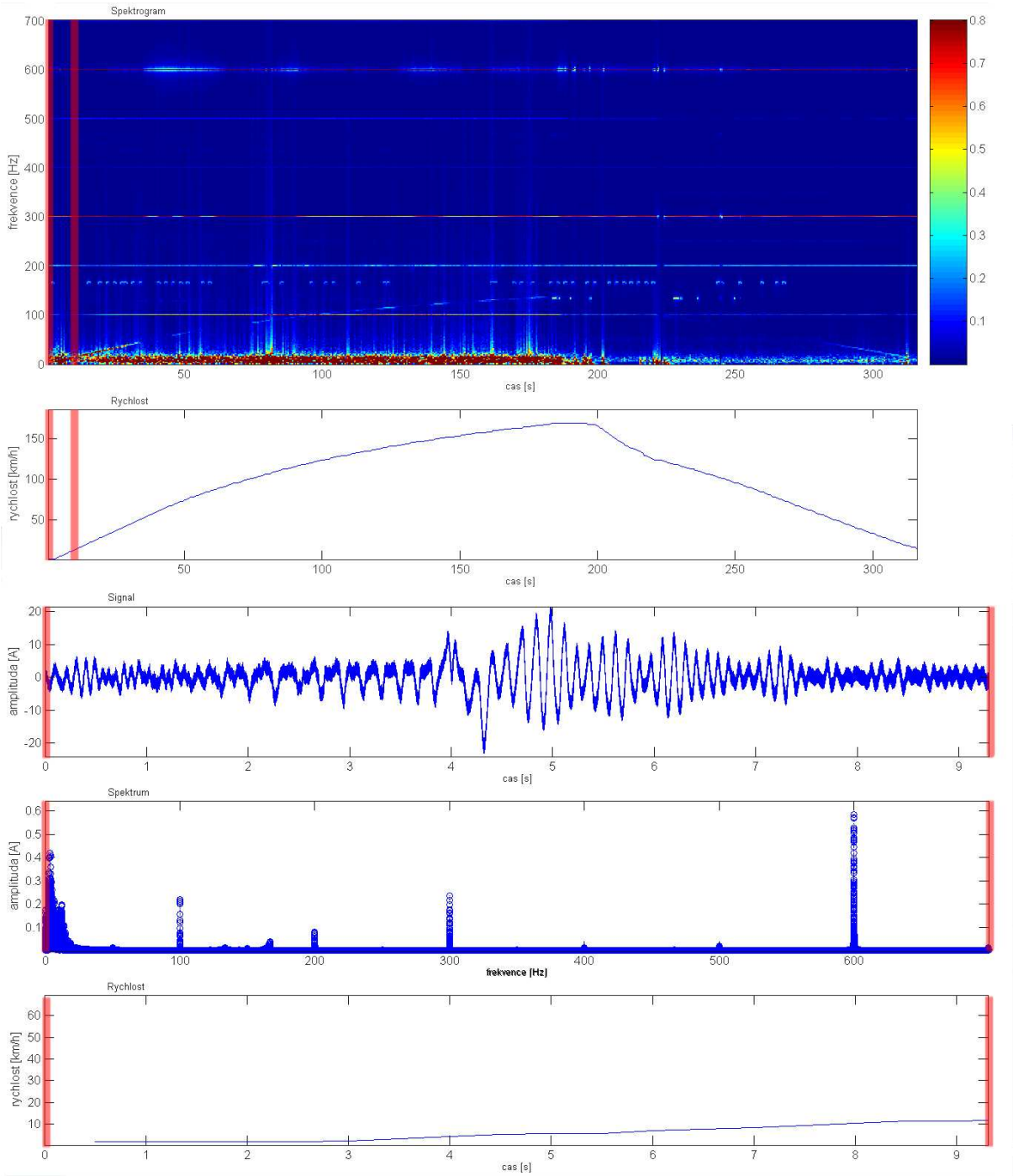
trakční transformátor a usměrňovač, trakční střídač je napájen přes vstupní tlumivku z trolejového napětí.

Vztah s ŽZT

Vztah s ŽZT je i na této soustavě třeba vyšetřovat u jevů, které zrcadlení podléhají. Zde to je tedy pouze HDO.

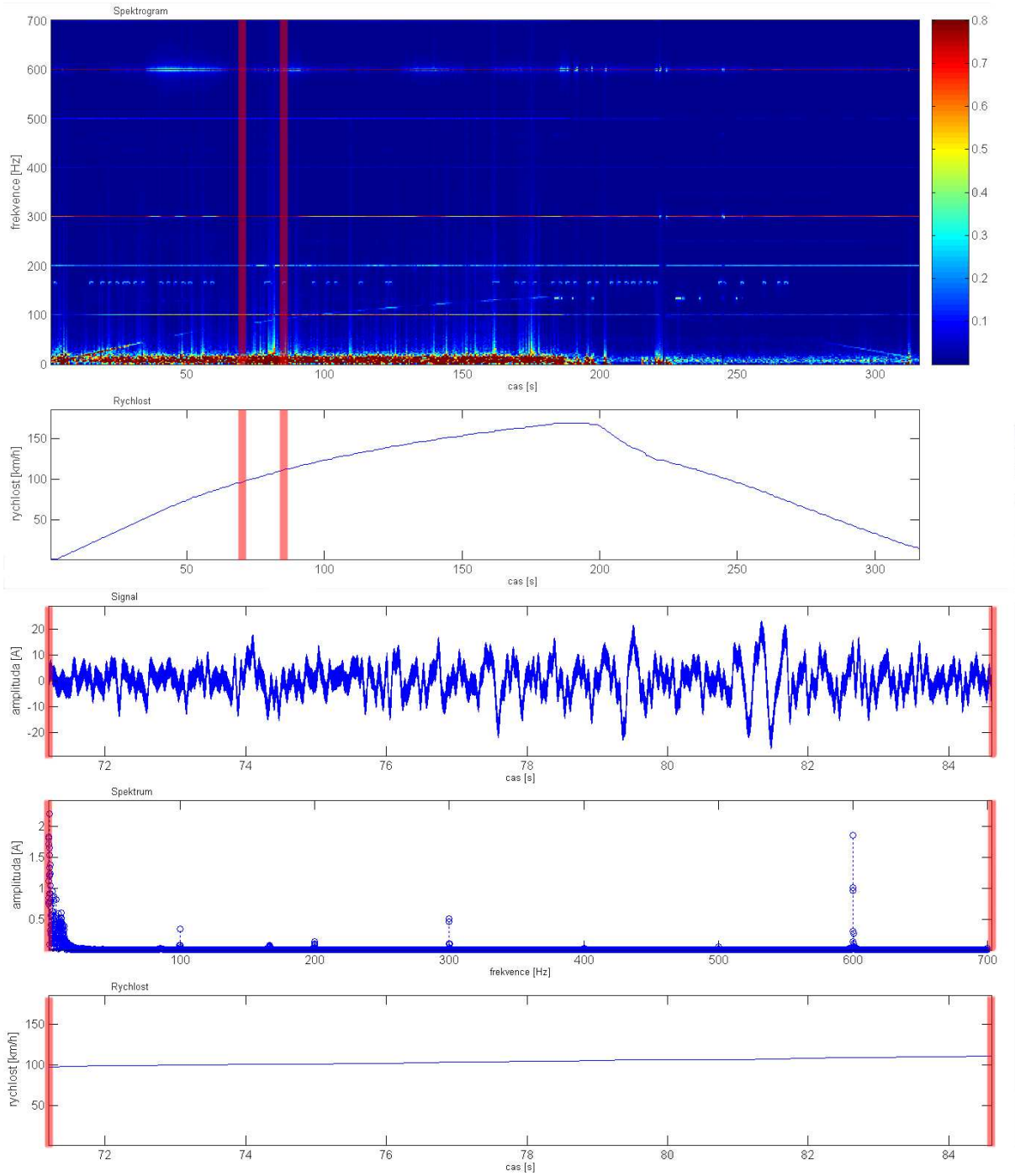
2.4.5 Přechodové děje

Na této soustavě jsou přechodové děje velice dobře patrné a mají poměrně rozmanitý charakter. Opět je vybrán jeden signál z DC soustavy, kde je pozornost zaměřena na začátek signálu, na konec a na úseky, kde je vidět ovlivnění celého spektra.



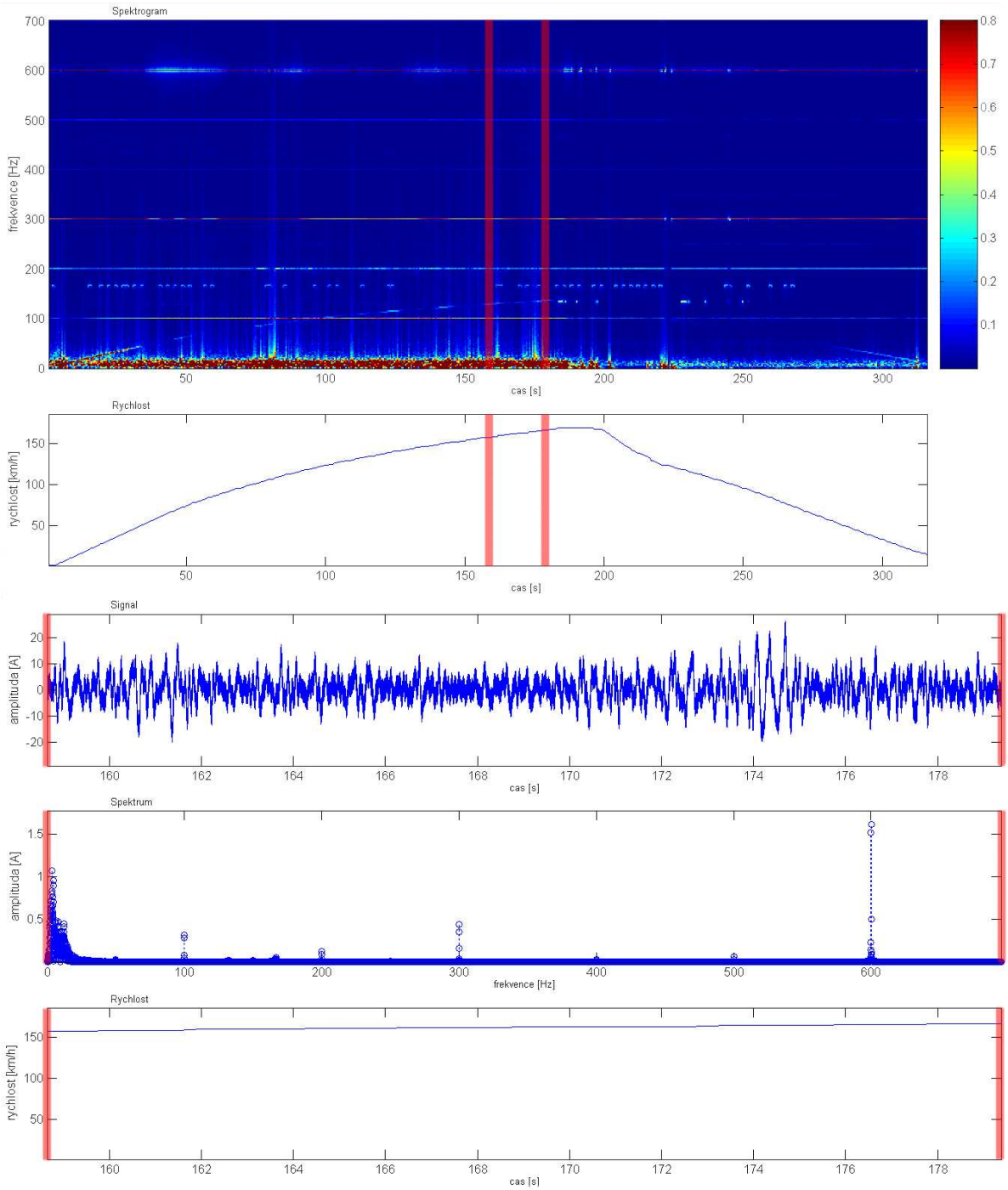
Obrázek 2.39: Analýza přechodových dějů na DC soustavě. Oblast 1

Na obrázku 2.39 můžeme v časovém úseku 4,5–7,5 s vidět tlumené kmitání s frekvencí přibližně 7 Hz a maximální amplitudou 20 A.



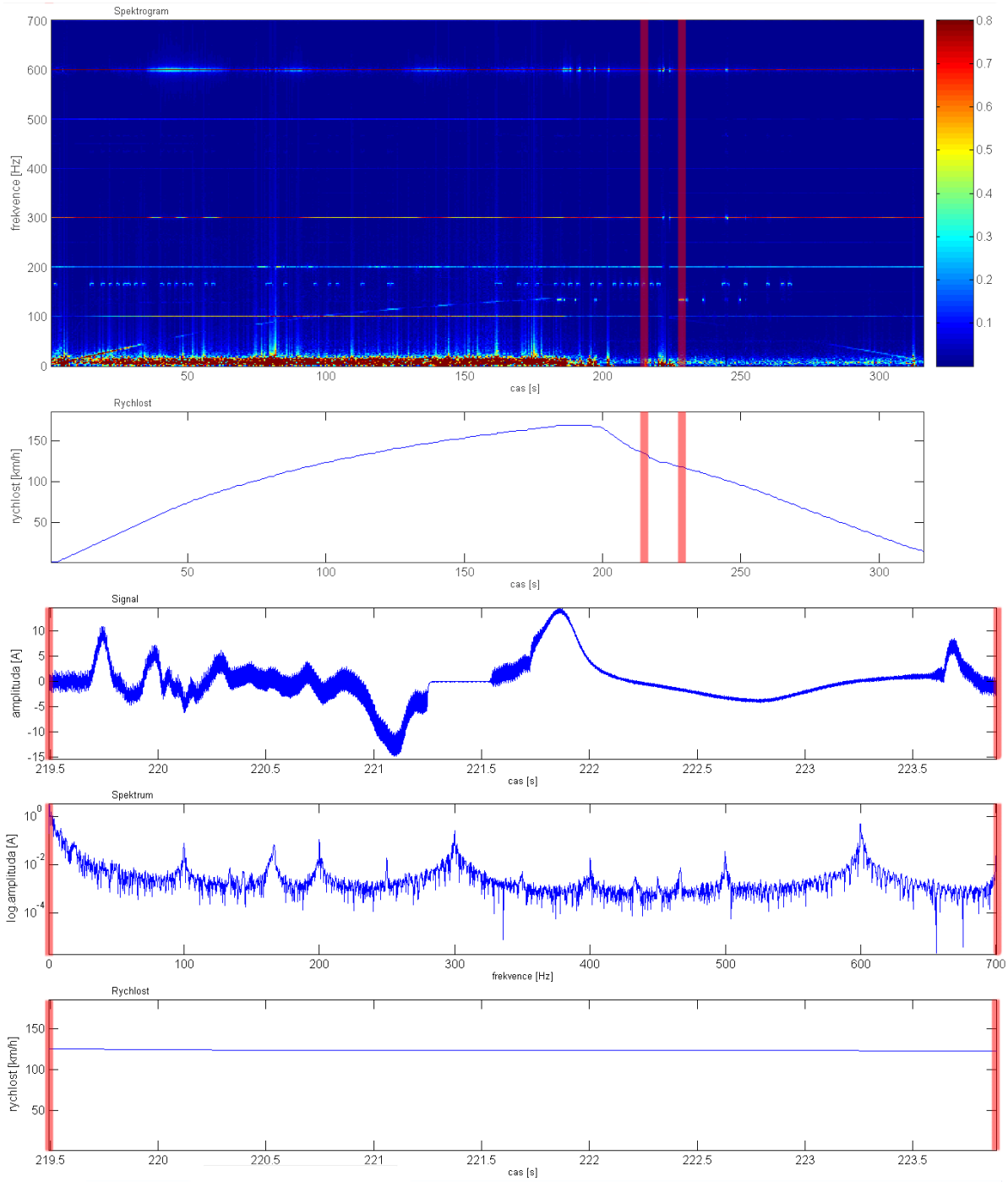
Obrázek 2.40: Analýza přechodových dějů na DC soustavě. Oblast 2

V označeném úseku na obrázku 2.40 je vidět několik zákmitů s amplitudou přibližně 20 A a frekvencí přibližně 3 Hz.



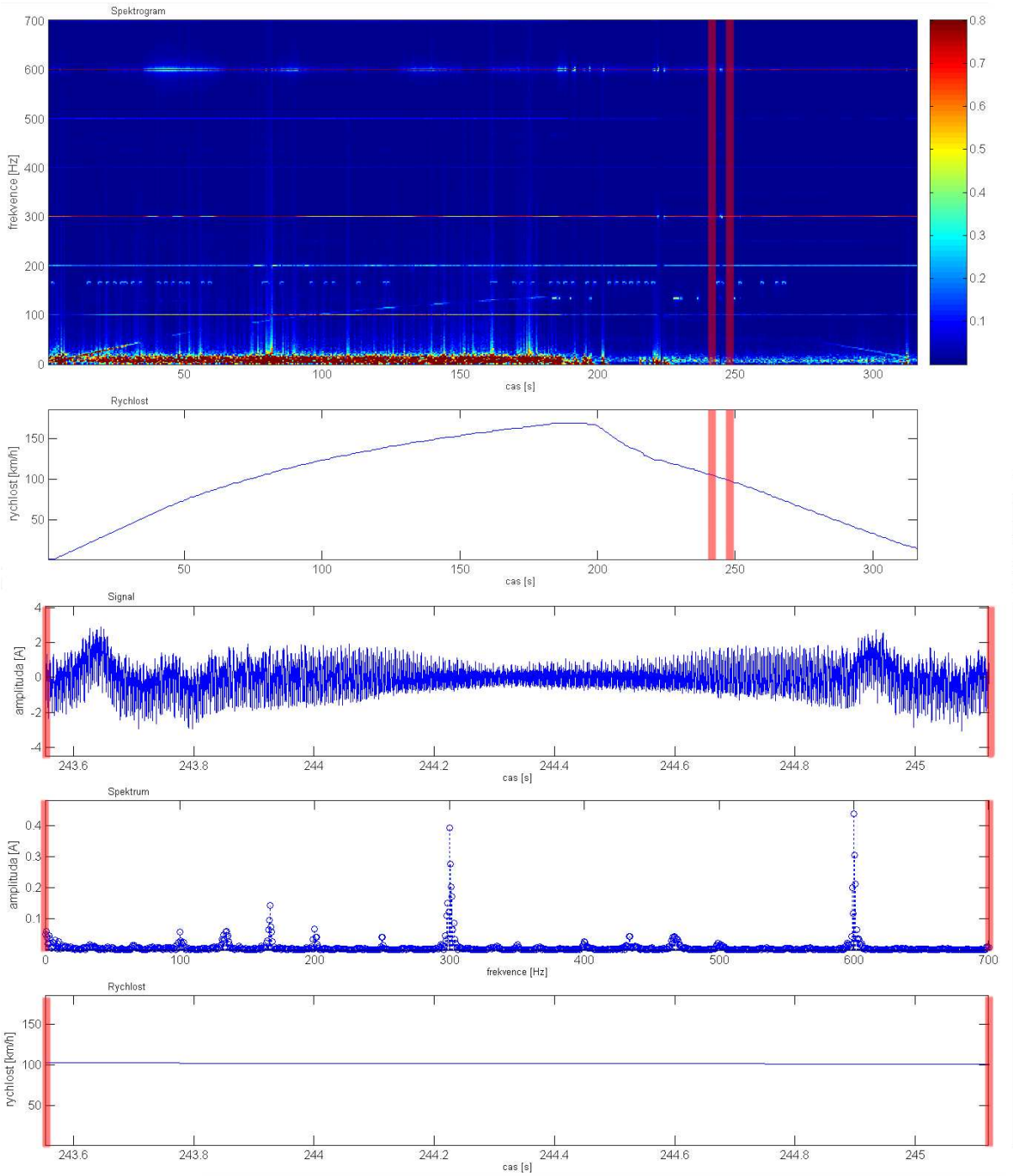
Obrázek 2.41: Analýza přechodových dějů na DC soustavě. Oblast 3

Na obrázku 2.41 je vidět v čase 174–175 s několik zákmitů opět s frekvencí přibližně 3 Hz a amplitudou 20 A



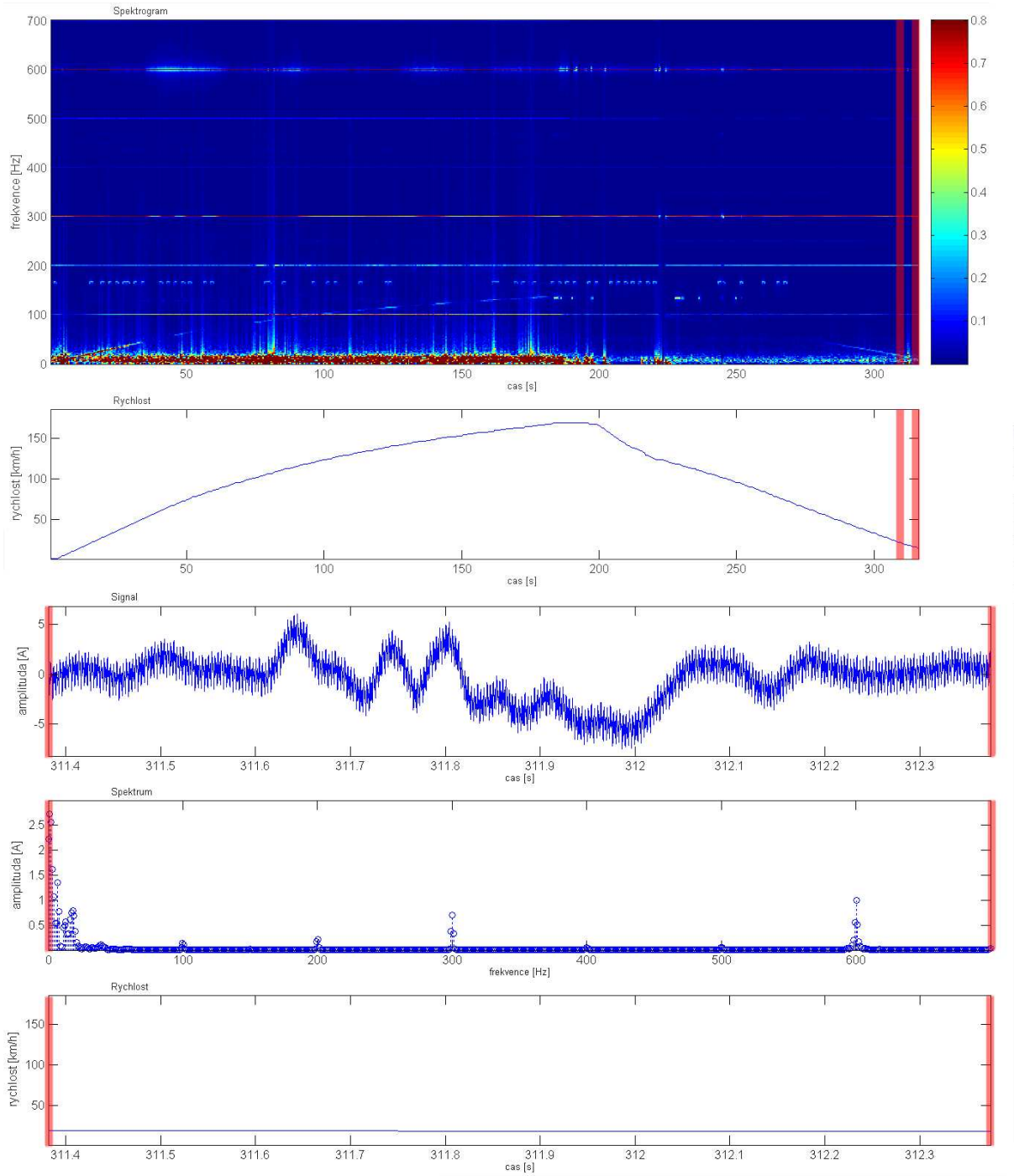
Obrázek 2.42: Analýza přechodových dějů na DC soustavě. Oblast 4

Přechodový děj na obrázku 2.42 obsahuje úsek dlouhý 550 ms s nulovým proudem, vybíjecí proces s časovou konstantou 300 ms, počáteční amplitudou 15 A a konečnou amplitudou −4 A. Poslední úsek má nabíjecí charakter s časovou konstantou 500 ms, počáteční amplitudou −4 A a konečnou (ustálenou) hodnotou 1 A.



Obrázek 2.43: Analýza přechodových dějů na DC soustavě. Oblast 5

Na obrázku 2.43 je patrné pouze dočasné snížení amplitudy po dobu 0,4 s ve střední části vybraného signálu.



Obrázek 2.44: Analýza přechodových dějů na DC soustavě. Oblast 6

Na obrázku 2.44 není přechodový děj patrný, pouze superpozice nízkofrekvenčních složek a vyšších harmonických složek síťové frekvence.

Shrnutí vlastností dílčího jevu

Přechodové děje mají rozmanitý charakter. Na obrázku 2.42 je vidět průběh složený z několika nekmitavých přechodových dějů, pravděpodobně nabíjecích a vybíjecích procesů. Obsahuje úsek 550 ms s nulovým proudem, vybíjecí proces s časovou konstantou 300 ms, počáteční amplitudou 15 A a konečnou amplitudou −4 A. Poslední úsek má nabíjecí charakter s časovou konstantou 500 ms, počáteční amplitudou −4 A a konečnou (ustálenou) hodnotou 1 A. Další přechodové děje mají kmitavý charakter, amplitudu mají přibližně 20 A a frekvenci mají v řádu jednotek Hz. Další přechodový děj je nekmitavý. I na této soustavě je ve spektrogramu vidět několik oblastí, kde dochází k ovlivnění celého frekvenčního spektra.

Příčina vzniku dílčího jevu

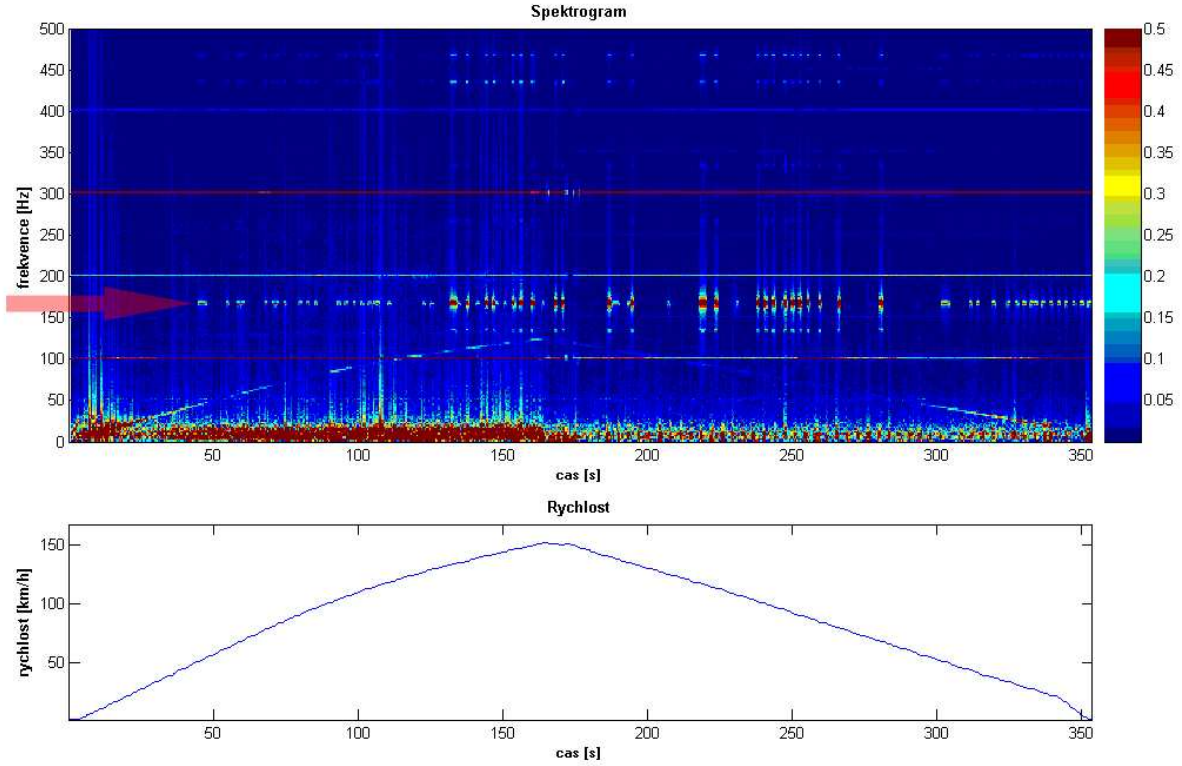
Příčina je stejná jako na AC soustavě, k přechodovým dějům dochází při změnách energie v soustavě. Přechodový děj na obrázku 2.42 je pravděpodobně způsoben změnou energetické bilance hnacího vozidla při přechodu z brzdění EDB na brzdění pneumatickou brzdou.

Vztah s ŽZT

Stejně jako na AC soustavě, i zde je třeba uvažovat ovlivnění ŽZT, protože přechodové děje ovlivňují celé pozorované spektrum.

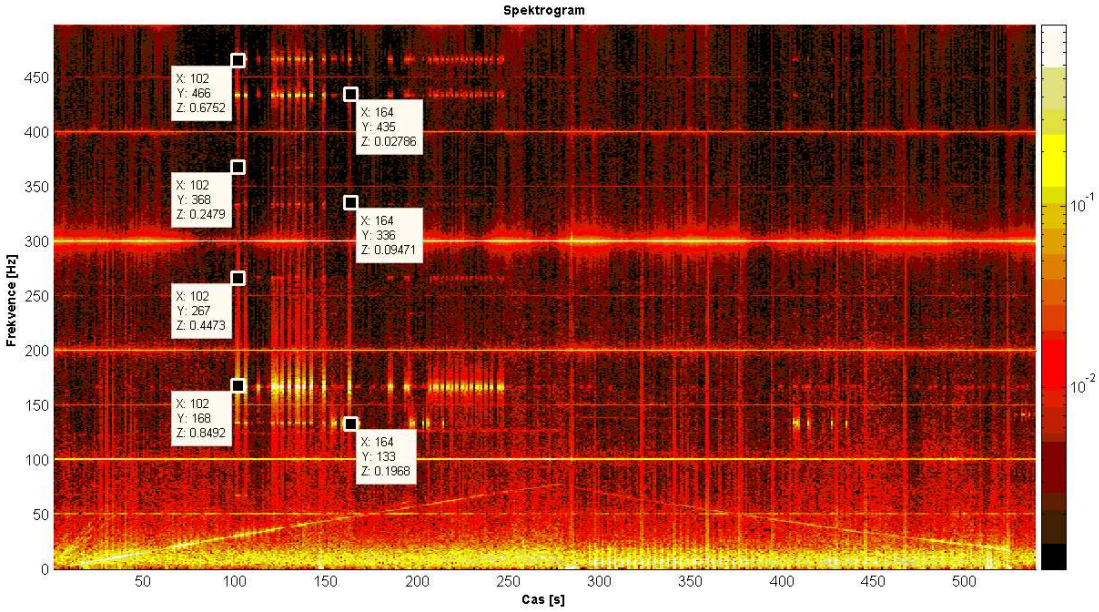
2.4.6 HDO

Na DC soustavě je situace složitější. Ze spektrogramu plyne, že se HDO vyskytuje na jiné frekvenci, než na AC soustavě, pravděpodobně podléhá zrcadlení. Na následujícím obrázku je dobře patrné i na frekvenci 133 Hz, 167 Hz a dále na frekvencích kolem 450 Hz. Konkrétně se jedná o kmitočty přibližně 433 Hz a 466 Hz. Na frekvenci 216 Hz se nevyskytuje vůbec.



Obrázek 2.45: HDO na DC soustavě.

Obrázek 2.46 opět znázorňuje HDO přenos a navíc kótuje viditelné nosné frekvence (osa y). Pro určení frekvencí je třeba přihlédnout k rozlišení frekvence, které je v tomto případě 1 Hz.



Obrázek 2.46: HDO s vyznačenými nosnými frekvencemi na DC soustavě.

Shrnutí vlastností dílčího jevu

HDO se na této soustavě nevyskytuje na nosné frekvenci tak, jak bychom očekávali. Na frekvenci 216,6 Hz, která je nejrozšířenější nosnou, není ve spektrogramech patrný HDO signál. HDO signál je dobře patrný na frekvencích 167 Hz, 433 Hz a 466 Hz. Pokud srovnáme obrázek 2.46 s tabulkou 2.5, najdeme dobrou shodu mezi spektrogramem a teoretickými frekvencemi v tabulce.

Příčina vzniku dílčího jevu

Příčinu výskytu HDO signálu na jiných frekvencích než na AC soustavě je třeba hledat v trakčních měnírnách. Tam dochází k dvanáctipulsnímu usměrnění. Pokud všechny tři fáze obsahují HDO signál, který má mezi jednotlivými fázemi nulový posuv, tak vlivem dvanáctipulsnímu usměrnění dochází k zdvojnásobení nosné frekvence HDO. Proto tedy při hledání nosných frekvencí HDO a jejich zrcadel musíme uvažovat dvojnásobnou nosnou frekvenci HDO vysílače. Stručný popis HDO signálu je na straně 42.

Vztah s ŽZT

I na této soustavě musíme vyšetřit všechny možné zrcadlové frekvence HDO všech možných nosných. Jak je výše uvedeno, uvažujeme dvojnásobné nosné kvůli trakčním měnír-

nám.

V tabulce 2.5 i v obrázku 2.46 vidíme HDO zrcadlené na frekvenci 266,8 Hz (v obrázku je označena jako 267 Hz). Ta leží v ochranném pásmu KO se signální frekvencí 275 Hz. V tabulce 2.5 můžeme najít HDO zrcadlené na 80 Hz. Tato frekvence leží na hranici ochranného pásma pro KO se signální frekvencí 75 Hz. Jedná se o zrcadlovou frekvenci od nosné frekvence HDO 760 Hz. Vysílače s touto nosnou frekvencí se již téměř nepoužívají a ustupují vysílačům s nosnou frekvencí 216,6 Hz. Závěr tedy je, že HDO a jeho zrcadla mohou potenciálně ovlivnit ŽZT.

Tabulka 2.5: Zrcadlové frekvence HDO podle složek síťové frekvence na DC soustavě

f_{HDO} [Hz]	$2 \times 183,3$ (366,6)	2×194 (388)	$2 \times 216,6$ (433,2)	$2 \times 283,3$ (566,6)	2×760 (1520)
f'_{50} [Hz]	−266,6	−288	−333,2	−466,6	−1420
f'_{100} [Hz]	−166,6	−188	−233,2	−366,6	−1320
f'_{150} [Hz]	−66,6	−88	−133,2	−266,6	−1220
f'_{200} [Hz]	33,4	12	−33,2	−166,6	−1120
f'_{250} [Hz]	133,4	112	66,8	−66,6	−1020
f'_{300} [Hz]	233,4	212	166,8	33,4	−920
f'_{350} [Hz]	333,4	312	266,8	133,4	−820
f'_{400} [Hz]	433,4	412	366,8	233,4	−720
f'_{450} [Hz]	533,4	512	466,8	333,4	−620
f'_{500} [Hz]	633,4	612	566,8	433,4	−520
f'_{550} [Hz]	733,4	712	666,8	533,4	−420
f'_{600} [Hz]	833,4	812	766,8	633,4	−320
f'_{650} [Hz]	933,4	912	866,8	733,4	−220
f'_{700} [Hz]	1033,4	1012	966,8	833,4	−120
f'_{750} [Hz]	1133,4	1112	1066,8	933,4	−20
f'_{800} [Hz]	1233,4	1212	1166,8	1033,4	80
f'_{850} [Hz]	1333,4	1312	1266,8	1133,4	180
f'_{900} [Hz]	1433,4	1412	1366,8	1233,4	280

2.5 Závěr analýzy

Celkový závěr analýzy lze vyvodit z dílčích závěrů, jež jsou zpracovány pro každý dílčí signál nebo jev.

Z hlediska ŽZT je nejnepříznivější dílčí signál *motorová frekvence*. Ta prokazatelně zasahuje nejen ochranná frekvenční pásma KO, ale přímo i signální frekvence KO a to na obou trakčních soustavách. Motorová frekvence, její vyšší harmonická a jejich zrcadla mají pro kompatibilitu s ŽZT prvořadý význam. *Přechodové děje* na obou trakčních soustavách také zasahují celé frekvenční spektrum, proto je potenciální možnost ovlivnění KO. Další ohrožující vliv má signál *HDO*. Na AC soustavě z tabulky 2.3 vyplývají 2 frekvence, které leží v ochranném pásmu pro KO se signální frekvencí 275 Hz (−266,4 Hz a 266,8 Hz). Na DC soustavě z tabulky 2.5 vyplývá frekvence 266,6 Hz, která rovněž leží v ochranném pásmu KO. Na rozdíl od zmíněných dvou frekvencí na AC soustavě, tato je i přímo viditelná ve spektrogramu (např. obrázek 2.46). Tabulky ukazují intermodulační produkty 3. a 4. řádu. Teoreticky může být HDO zrcadleno jako intermodulační produkt vyššího řádu. Tento vliv je potřeba také uvažovat ve vztahu ke KO. Poslední ohrožující vliv je síťová frekvence na DC soustavě, protože se na této soustavě ještě vyskytují KO se signální frekvencí 50 Hz.

Tato analýza je použitelná jako podklad pro další analýzy, jak jsme si předsevzali. Nicméně by bylo třeba se podrobně zabývat měřícím řetězcem a provést i další druhy měření. Např. by bylo třeba provést měření na čistě odporové zátěži, aby se odlišily složky vznikající na drážním vozidle a složky, jež se v železniční napájecí soustavě vyskytují z jiných důvodů.

Kapitola 3

Dynamika drážního vozidla

Tato kapitola si klade za cíl popsat fyziku pohybu drážního vozidla. Podrobněji se touto tématikou zabývá [9], [5] a [4]. Tyto publikace jsou přímo zaměřeny na železnici a čerpal jsem z nich informace pro sepsání této kapitoly.

3.1 Dynamika hmotného bodu

Vyjdeme z Newtonova zákona o síle, který dává do souvislosti hmotnost tělesa, sílu na něj působící a zrychlení, které mu tato síla udělí. Síla, působící na těleso má tedy velikost a směr stejný jako součin hmotnosti tělesa a zrychlení, se kterým se pohybuje.

$$\boldsymbol{F} = m\,\boldsymbol{a} \tag{3.1}$$

Zrychlení nahradíme derivací rychlosti podle času, kterou zapisujeme:

$$\boldsymbol{a} = \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = \dot{\boldsymbol{v}} \tag{3.2}$$

Pak můžeme dosadit zpět do zákona O síle:

$$\boldsymbol{F} = m\,\dot{\boldsymbol{v}} \tag{3.3}$$

Předmětem našeho zájmu je rychlost. Vyjádříme ji z předchozí rovnice a integrujeme obě strany. Dostaneme:

$$\boldsymbol{v} = \frac{1}{m}\int \boldsymbol{F}\,dt \tag{3.4}$$

Předchozí vztah nám říká, že průběh rychlosti získáme integrací průběhu síly, která na těleso působí a podělením jeho hmotností.

3.2 Přechod od hmotného bodu k drážnímu vozidlu

Síla na levé straně rovnice 3.3 je celková síla, která na těleso působí. Rozepíšeme ji na dílčí složky – hnací sílu, brzdnou sílu a odporovou sílu. Zároveň upustíme od vektorového popisu a budeme uvažovat pouze průmět sil do osy koleje.

$$F = F_h - F_b - F_o \tag{3.5}$$

Celková síla je výslednicí síly hnací F_h, brzdné F_b a odporové F_o. Tyto síly jsou vysvětleny v dalších sekcích. Hnací síla má kladnou hodnotu pro motorický chod. Pro případ brzdění pohonem (EDB nebo ERP) se uvažuje síla záporná. Brzdná síla F_b se vždy uvažuje s kladnou hodnotou, působí proti rychlosti pohybu. Odporová síla se dále dělí na jízdní odpory a traťové odpory. Jízdní odpory vždy působí proti směru rychlosti vozidla, traťové odpory mohou naopak vozidlo urychlovat (záporný sklon trati). Jednotlivé složky jsou vysvětleny v následujících kapitolách.

Dále musíme uvažovat zdánlivé zvýšení setrvačné hmotnosti vlivem momentu setrvačnosti hmot, konajících rotační pohyb svázaný s pohybem posuvným. Tyto skutečnosti popisuje parametr ξ, obvykle nabývá hodnoty $0,05$ pro vozidla bez pohonu a $0,1$–$0,2$ pro hnací vozidla. V rovnici 3.3 rozepíšeme jednotlivé síly a uvažujeme součinitel rotujících hmot ξ:

$$(1+\xi)m\frac{dv}{dt} = F_h - F_b - F_o \tag{3.6}$$

3.2.1 Hnací síla

Výkon hnacího vozidla se přeměňuje na *tažnou sílu na obvodu kol hnacího vozidla.* Část této síly se využije pro urychlování hnacího vozidla a část k urychlování zátěže – připojených vozů. Tato druhá část se nazývá *tažná síla na háku* podle působiště síly, tedy lokomotivního háku a dá se přesně měřit. Tažná síla na obvodu kol podléhá omezení z adheze. Maximální tažná síla na obvodu kol, při které ještě nedochází ke skluzu (neplést se skluzem asynchronního stroje) se nazývá *maximální adhezní tažná síla*, ta závisí zejména na hmotnosti hnacího vozidla, na jeho rychlosti a na vnějších podmínkách (železničním svršku). Pro popis míry využívaného výkonu hnacího vozidla se používá veličina *poměrný tah.*

Poměrný tah

Poměrný tah, dále jen PT, udává poměr právě využívaného výkonu a výkonu maximálního možného. Je tedy požadovanou hodnotou výkonu pohonu, udává se v %. Tato veličina vznikla z potřeby zadat požadovanou hodnotu výkonu pohonu tak, aby nikdy nevznikl nesplnitelný požadavek. Z trakční charakteristiky na obrázku 3.1 vyplývá, že při rychlostech menších než kritická rychlost v_{krit} nemůže hnací vozidlo využívat maximum svého výkonu, protože je limitováno maximální tažnou silou F_{max}.

Zavedeme maximální možný výkon hnacího vozidla P_{max}, kde P_h je maximální výkon hnacího vozidla (všech pohonů v danou chvíli funkčních), F_{max} je maximální tažná síla a v je rychlost vozidla v $\mathrm{m\,s^{-1}}$:

$$P_{max} = \min(P_h,\ F_{max}\, v) \tag{3.7}$$

Využívaný výkon hnacího vozidla je pak roven:

$$P = \frac{PT}{100}\, P_{max} \tag{3.8}$$

Hnací síla F_h pak je podílem využívaného výkonu a rychlosti v $\mathrm{m\,s^{-1}}$. Postupně dosadíme:

$$F_h = \frac{P}{v} = \frac{PT\, P_{max}}{100\, v} = \frac{PT\ \min(P_h,\ F_{max}\, v)}{100\, v} \tag{3.9}$$

Pak se můžeme pro zajímavost zpětně podívat na poměrný tah a určit ho ze vstahu:

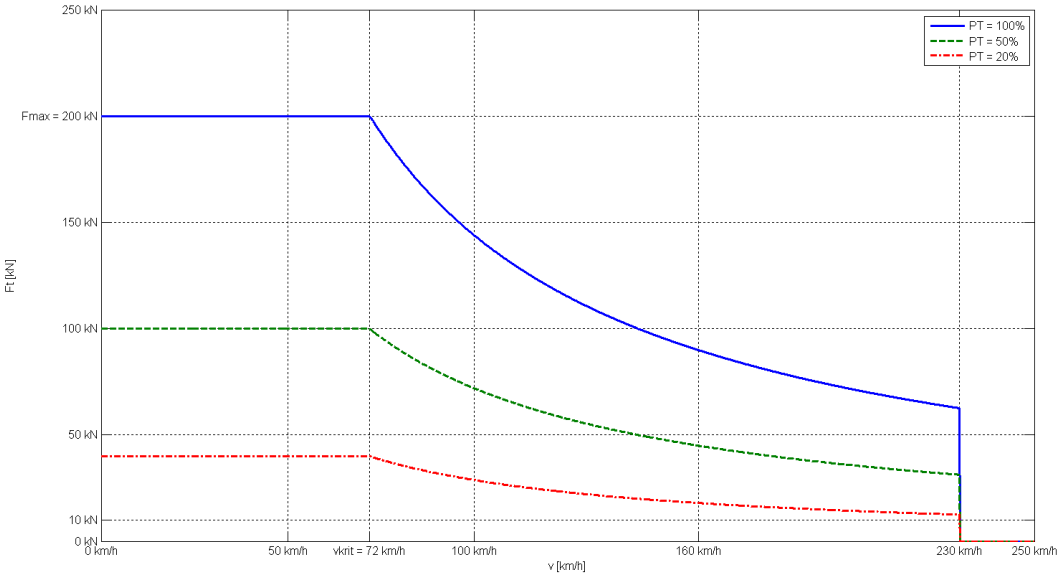
$$PT = 100\ \max(\frac{P}{P_{max}}\,,\ \frac{F}{F_{max}}\,) \tag{3.10}$$

Plný poměrný tah tedy odpovídá maximálnímu výkonu za daných podmínek, jež je hnací vozidlo schopno podat.

Trakční charakteristika

Trakční charakteristika popisuje závislost tažné síly na rychlosti vozidla při daném výkonu instalovaného pohonu a poměrném tahu. Vychází ze vztahů 3.7–3.10. Její grafické znázornění ukazuje obrázek 3.1. V grafu je vyznačena v_{krit} tedy kritická rychlost. Je to maximální rychlost, při které hnacího vozidlo využívá maximum hnací síly. Nebo také minimální rychlost, při které hnací vozidlo využívá maximum výkonu instalovaného pohonu.

Nyní máme hrubou představu o tažné síle a její souvislosti s rychlostí, poměrným tahem a maximálním výkonem. Pro podrobnější rozbor by bylo potřeba uvažovat neideální



Obrázek 3.1: Teoretická trakční charakteristika pro 3 hodnoty poměrného tahu a $P_h = 4000$ kW

podmínky, např. že žádný z pohonů, nemá takový tvar trakční charakteristiky podle teoretického vztahu, v reálném případě klesá tažná síla rychleji. Obecně záleží na způsobu přenosu výkonu u vozidel nezávislé trakce a na způsobu řízení pohonu a typu trakčních motorů u elektrické trakce. Přenos tažné síly z obvodu kol na lokomotivní hák také není ideální. Část síly se využije na urychlování vlastního hnacího vozidla. Navíc může při nepříznivých podmínkách docházet ke skluzu kol.

3.2.2 Brzdná síla

Brzdná síla je vyvozována účinkem brzdné soustavy drážního vozidla. Na každém vozidle musí být instalována tlakovzdušná brzda. Je to brzda samočinná a při poruše bezpečná, např. při roztržení vlaku dojde k zastavení soupravy. Na hnacích vozidlech může být brzda přímočinná, která je rovněž vzduchová a může být instalována brzda EDB, nebo ERP, tedy brzdění pohonem. V případě EDB se jedná o elektrodynamickou brzdu, kinetická energie se přeměňuje v odporníku na teplo. V případě ERP se jedná o snižování kinetické energie rekuperací výkonu zpět do napájecí soustavy. Pro EDB i ERP je společné, že se využívá generického režimu motorů. Aby se ERP mohla využívat na tratích dané správy, musí být legislativně povolena, protože ovlivňuje napájecí síť. Další používanou brzdou je

brzda elektromagnetická, která je aktivována použitím záchranné brzdy. Jedná se o brzdové trámce, které jsou v případě nouzového brzdění elektromagneticky přitlačovány ke kolejnicím.

Brzdná síla EDB, nebo ERP nemůže nahradit účinek brzdy tlakovzdušné v celém rozsahu rychlostí. Brzdná síla je ve vyšších rychlostech omezena maximálním výkonem brzdy a v nižších rychlostech indukovaným napětím v motoru. Tlakovzdušná, tedy třecí brzda pracuje v celém rozsahu. Její vyvozená síla závisí na rychlosti vozidla a na teplotě zdrží. Nevýhodou tlakovzdušné (samočinné) brzdy, je obtížnější způsob řízení brzdného účinku, než při brzdění pohonem. Elektromagnetická brzda je instalována pouze na nejnovějších vozech a je aktivována použitím záchranné brzdy, tedy rychlém snížení tlaku v hlavním potrubí pod určitou mez.

3.2.3 Odporové síly

Odporové síly je třeba nejprve rozdělit na odpory traťové a jízdní:

1. traťové odpory
   - odpor sklonu trati,
   - odpor oblouku.
2. jízdní odpory
   - složka suchého tření – má konstantní hodnotu,
   - složka viskózního tření – souvisí s rychlostí lineárně,
   - složka aerodynamického odporu – souvisí s kvadrátem rychlosti.

Pro odporové síly se používají empirické vzorce, jejichž výsledkem je poměrná odporová síla v $\mathrm{N\,kN^{-1}}$, pro přepočet na sílu je tedy nutno vynásobit tíhou vlaku F_v v kN. Z výše uvedených odporů budeme uvažovat odpor ze sklonu trati o_s, odpor z oblouku o_{obl} a jízdní odpor o_j. m_v v dalších vzorcích znamená hmotnost vlaku.

Celková odporová síla se vypočítá z níže uvedených složek takto:

$$F_o = F_s + F_{obl} + F_j \tag{3.11}$$

Odpor sklonu trati

Pro výpočet odporu ze sklonu trati se používá následující zjednodušený vztah. Sklon trati v promilích, tedy převýšení v metrech na jeden kilometr se značí s. Takto zjednodušený vztah si můžeme pro malé úhly dovolit – pro malé úhly lze zaměnit sinus a tangens.

$$o_s = s \tag{3.12}$$

Na sílu se přepočítá:

$$F_s = o_s \frac{F_v}{1000} = s \frac{m_v}{1000} g \tag{3.13}$$

Odpor oblouku

Pro odpor oblouku se používá jednoho ze vzorců Rocklových. Udává odpor, jež se projeví v ose koleje a způsobí odrychlení vlaku. R je poloměr oblouku v metrech.

$$o_{obl} = \frac{500}{R - 30} \tag{3.14}$$

Na sílu se přepočítá:

$$F_{obl} = o_{obl} \frac{F_v}{1000} = \frac{500}{R - 30} \frac{m_v}{1000} g \tag{3.15}$$

Jízdní odpor

Pro výpočet jízdního odporu se používá následující vztah, který zahrnuje všechny tři jeho složky. Parametry c se získají měřením a dají se najít např. v předpisu V7 ČD. Existují i vzorce pro výpočet jízdního odporu, kde jsou jako parametry zatížení nápravy, čelní plocha, koeficient tvaru atd. Jeden z těchto vzorců je uveden např. v [4].

Rychlost je ve vztahu násobena 3,6 z důvodu toho, že konstanty c_0, c_1, c_2 se dají nalézt v literatuře a předpisech, ale počítá se s dosazováním rychlosti do rovnice 3.16 v $\mathrm{km\,h^{-1}}$. Což je sice jednotka pro člověka snadno představitelná, určitě lépe než $\mathrm{m\,s^{-1}}$, ale pro další výpočty naprosto nevhodná. Proto je výhodné zachovat kompatibilitu konstant c úpravou vzorce.

$$o_j = c_0 + c_1\, 3,6\, v \; + c_2 (3,6\, v)^2 \tag{3.16}$$

Na sílu se přepočítá:

$$F_j = o_j \frac{F_v}{1000} = \left(c_0 + c_1\, 3,6\, v \; + c_2 (3,6\, v)^2\right) \frac{m_v}{1000} g \tag{3.17}$$

3.3 Trakční dynamika z hlediska teorie řízení

3.3.1 Nelineární model

V prvním přiblížení můžeme uvažovat soustavu, která má jako vstup sílu a výstup rychlost (podle rovnice 3.4), ale takový model by byl nicneříkající. Nejjednodušší model musí mít jako vstup poměrný tah. Celková síla, která se bude integrovat bude výslednicí dílčích sil dle rovnice 3.5.

Navržený nelineární model je popsán rovnicí 3.18 a simulinkové schéma modelu je zobrazeno v příloze C.2. Z rovnice je patrné, že opravdu jde o *nelineární* model. Hnací síla F_h souvisí s rychlostí nepřímo úměrně a má typickou nelinearitu – omezení přímkou F_{max}. Síla jízdních odporů také představuje nelinearitu, protože c_0 s rychlostí nesouvisí a c_2 souvisí s kvadrátem rychlosti. Pokud nejsou parametry sklon trati s a poloměr oblouku R vstupními veličinami, tak rovněž představují nelinearity. Z hlediska řízení soustavy jsou s a R obvykle poruchové veličiny.

$$\begin{aligned}(1+\xi)m_v\dot{v} &= F_h - F_b - F_o \\ &= \frac{PT\,\min(P_h,\ F_{max}\,v)}{100\,v} - F_b - \left[\left(c_0 + c_1 3,6v + c_2(3,6v)^2\right)\frac{m_v}{1000}\,g + \right. \\ &\quad \left. + s\frac{m_v}{1000}\,g + \frac{500}{R-30}\,\frac{m_v}{1000}\,g\right] \end{aligned} \tag{3.18}$$

Tento nelineární model se při srovnání se skutečným průběhem rychlosti ukazuje jako zcela dostačující, viz strana 89. Přesto není na škodu zmínit se o nedostatcích a zanedbaných jevech navrženého modelu a navrhnout možná vylepšení. V první řadě je hnací síla modelována ideálním vztahem, kterému se přibližují pouze hnací vozidla s moderním pohonem. V hnací síle není respektováno omezení z adheze a nejsou modelovány jevy při jejím překročení. Jako opatření tedy může být simulování hnací síly podle tabulky hodnot, tzv. *lookup-table* a porovnávání s křivkou maximální adhezní tažné síly. Při jejím překročení je možné simulovat stochastický děj – skluz kol. V poslední řadě lze simulovat minimální sílu potřebnou k uvedení vlaku do pohybu z nulové rychlosti – pásmo necitlivosti, tzv. *dead zone*.

3.3.2 Linearizované stavové modely

Vyjdeme z nelineárního modelu – rovnice 3.18. Protože má hnací síla typickou nelinearitu typu omezení, rozhodl jsem se vytvořit dva linearizované modely pro dvě situace, první pro linearizaci v okolí první části trakční charakteristiky a druhou v druhé části. Tedy první pro $v_{01} \leq v_{krit}$ a druhou $v_{02} > v_{krit}$.

Zavedeme dvě vstupní veličiny $u_1 = PT$, $u_2 = F_b$, stavovou veličinu $x = v$ a výstupní veličinu $y = x = v$.

Linearizovaný odchylkový stavový model bude ve tvaru:

$$\begin{aligned} \Delta\dot{\boldsymbol{x}} &= A\,\Delta\boldsymbol{x} + B\Delta\boldsymbol{u} \\ \Delta\boldsymbol{y} &= C\Delta\boldsymbol{x} + D\Delta\boldsymbol{u} \end{aligned} \tag{3.19}$$

Celý postup linearizace je podrobně vysvětlen např. v anglické publikaci [7] nebo v českém článku [8].

Matice přímé vazby D je nulová, matice $C = 1$. Matice A a B se spočtou podle následujících vztahů. Funkce f vyplývá z: $\dot{\boldsymbol{x}}(t) = f(\boldsymbol{x}(t), \boldsymbol{u}(t))$. V našem případě funkci f dostaneme z rovnice 3.18. Určíme A a B:

$$\boldsymbol{A} = \left.\frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{x}}\right|_{(\boldsymbol{x}_0,\,\boldsymbol{u}_0)}, \qquad \boldsymbol{B} = \left.\frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{u}}\right|_{(\boldsymbol{x}_0,\,\boldsymbol{u}_0)} \tag{3.20}$$

Výsledné linearizované modely jsou níže popsány. Body linearizace jsou pro první případ v_{01} a pro druhý případ v_{02} a PT_{02}. V druhém případě se vyskytuje P_{max}, pokud opravdu platí $v_{02} > v_{krit}$, pak maximální využitelný výkon a maximální instalovaný výkon

splývají, tedy $P_{max} = P_h$.

$$\text{pro } v_{01} \leq v_{krit}: \tag{3.21}$$

$$\begin{aligned}
A_1 &= \Big(-\frac{3,6g}{1000(1+\xi)} \left(c_1 + 2\, v_{01}\, c_2\, 3,6\right) \Big) \\
B_1 &= \Big(\frac{F_{max}}{100 m_v (1+\xi)} \qquad -\frac{1}{m_v(1+\xi)} \Big) \\
C_1 &= \Big(1 \Big) \\
D_1 &= \Big(0 \Big)
\end{aligned}$$

$$\text{pro } v_{02} > v_{krit}: \tag{3.22}$$

$$\begin{aligned}
A_2 &= \Big(-\frac{P_{max}\, PT_{02}}{100\, v_{02}^2\, m_v (1+\xi)} - \frac{3,6g}{1000(1+\xi)} \left(c_1 + 2\, v_{02}\, c_2\, 3,6\right) \Big) \\
B_2 &= \Big(\frac{P_{max}}{100\, v_{02}\, m_v (1+\xi)} \qquad -\frac{1}{m_v(1+\xi)} \Big) \\
C_2 &= \Big(1 \Big) \\
D_2 &= \Big(0 \Big)
\end{aligned}$$

3.3.3 Linearizovaný vstupně-výstupní popis

Pro úplnost kapitoly uvedu i vstupně-výstupní popis, obecně jej odvodím ze stavového popisu. Přenos $\hat{H}(s)$ se ze stavového popisu určí:

$$\hat{H}(s) = C(sI - A)^{-1}B + D \tag{3.23}$$

Matice D přímé vazby je ve většině reálných systémů nulová, i v tomto případě je tedy nulová. Pokud by nulová nebyla, systém by přenášel nekonečné frekvence. Obecně dosadím:

$$\hat{H}(s) = \Big(1\Big)\Big(\frac{1}{s - A_{(1,1)}}\Big)\Big(B_{(1,1)} \quad B_{(1,2)}\Big) \tag{3.24}$$

Přenos tedy bude matice 1×2, první prvek je přenos poměrného tahu na rychlost a druhý prvek je přenos brzdné síly na rychlost.

$$\hat{H}(s) = \Big(\underbrace{\frac{1}{s - A_{(1,1)}} B_{(1,1)}}_{\text{přenos } PT \text{ na } v} \qquad \underbrace{\frac{1}{s - A_{(1,1)}} B_{(1,2)}}_{\text{přenos } F_b \text{ na } v} \Big) \tag{3.25}$$

Dílčí přenosy je vhodné upravit do přehlednější formy, kde k je ustálená hodnota (hodnota v nekonečném čase) a T je časová konstanta systému. Přenos chceme převést na tvar:

$$\hat{H}(s) = \frac{k}{T\, s \ + 1} \tag{3.26}$$

Po úpravě na přehledný tvar, ze kterého pak je dobře vidět časová konstanta a ustálená hodnota, dostaneme:

$$\hat{H}(s) = \begin{pmatrix} \dfrac{-\frac{B_{(1,1)}}{A_{(1,1)}}}{-\frac{1}{A_{(1,1)}}\,s+1} & \dfrac{-\frac{B_{(1,2)}}{A_{(1,1)}}}{-\frac{1}{A_{(1,1}}\,s+1} \end{pmatrix} \tag{3.27}$$

Nesmíme však zapomenout, že jsme stavový model navrhli pro vstup PT, tedy 0–100% Pokud by z nějakého důvodu bylo potřeba normovat přenos na vstup 0–1, pak by se první část přenosu (odpovídá poměrnému tahu) násobila hodnotou 100.

3.3.4 Popis v časové oblasti

Pro generování motorové frekvence potřebujeme znát popis systému v časové oblasti. Vyjdu z přenosu (rovnice 3.25). Výstup soustavy v časové oblasti se určí:

$$y(t) = \mathcal{L}^{-1}\left\{H(s)\,U(s)\right\} \tag{3.28}$$

Obvykle bude stačit jako vstup konstantní hodnota poměrného tahu PT, brzdnou sílu můžeme vypustit, protože budeme uvažovat pouze rozjezd vozidla. Principiálně půjde o jednotkový skok násobený konstantou:

$$y(t) = \mathcal{L}^{-1}\left\{H(s)\,\frac{PT}{s}\right\} \tag{3.29}$$

Je třeba si uvědomit, že jsme vyšli z linearizovaného modelu, který má platnost pouze v okolí bodu linearizace. Opět rozdělíme výsledky podle rychlosti, v jejíž okolí zkoumáme

systém a podle kritické rychlosti. Dostáváme:

$$\text{pro } v_{01} \leq v_{krit}: \tag{3.30}$$

$$\begin{aligned}
A_1 &= \Big(-\frac{3,6g}{1000(1+\xi)}\,(c_1 + 2\,v_{01}\,c_2\,3,6)\Big) \\
B_1 &= \Big(\frac{F_{max}}{100 m_v(1+\xi)} \qquad -\frac{1}{m_v(1+\xi)}\Big) \\
k_1 &= -\frac{B_{1\,(1,1)}}{A_{1\,(1,1)}} \\
T_1 &= -\frac{1}{A_{1\,(1,1)}} \\
y_1(t) &= v_1(t) = \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{k_1}{T_1\,s\ +1}\ \frac{PT}{s}\right\} \\
&= PT\,k_1\Big(1 - \exp(-\frac{t}{T_1})\Big)
\end{aligned}$$

$$\text{pro } v_{02} > v_{krit}: \tag{3.31}$$

$$\begin{aligned}
A_2 &= \Big(-\frac{P_{max}\,PT_{02}}{100\,v_{02}^2\,m_v(1+\xi)} - \frac{3,6g}{1000(1+\xi)}\,(c_1 + 2\,v_{02}\,c_2\,3,6)\Big) \\
B_2 &= \Big(\frac{P_{max}}{100\,v_{02}\,m_v(1+\xi)} \qquad -\frac{1}{m_v(1+\xi)}\Big) \\
k_2 &= -\frac{B_{2\,(1,1)}}{A_{2\,(1,1)}} \\
T_2 &= -\frac{1}{A_{2\,(1,1)}} \\
y_2(t) &= v_2(t) = \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{k_2}{T_2\,s\ +1}\ \frac{1}{PT}\right\} \\
&= (PT + PT_{02})k_2\Big(1 - \exp(-\frac{t}{T_2})\Big)
\end{aligned}$$

3.3.5 Dynamika soustavy

Popis rozjezdu drážního vozidla

Při rozjezdu z nulové rychlosti je vlak urychlován silou $F_{max}\frac{PT}{100}$, protože je síla konstantní, musí se nutně zvyšovat výkon hnacího vozidla. Při dosažení kritické rychlosti je již výkon hnacího vozidla konstantní a hnací síla klesá po hyperbole. S rostoucí rychlostí se zvyšují jízdní odpory vlaku. V okamžiku vyrovnání hnací síly a odporových sil dochází k ustálení rychlosti vlaku.

Vlastnosti soustavy

K analýze vlastností systému je vhodné použít přenos (rovnice 3.27) a za $A_{1,1}, B_{1,1}$, případně $B_{1,2}$ dosadit z jednoho z linearizovaných stavových popisů. Pak tedy plynou následující vlastnosti:

Systém je stabilní, prvního řádu. Rychlost odezvy roste s klesající hmotností vlaku a s rostoucími parametry c. Maximální rychlost, jakou může vlak dosáhnout pozitivně ovlivňuje tažná síla, resp. výkon hnacího vozidla, negativně konstanty c. Ve vyšších rychlostech má výrazný vliv složka aerodynamického odporu c_2.

Odvození zrychlení

Máme-li úlohu, ve které nás zajímá konkrétní zrychlení a vlaku, které dosahuje v okolí rychlosti v_0, přímo se nabízí stavový popis, uvedený rovnicí 3.21. Levá strana horní rovnice je zrychlení v okolí bodu v_0, které nás zajímá. Za stav x na pravé straně tedy dosadíme rychlost v_0, kolem které určujeme zrychlení. Za u dosadíme vektor vstupu. V případě matic A a B se musíme rozhodnout podle toho, zda-li určujeme zrychlení pro okolí rychlosti menší než je kritická rychlost, nebo naopak vyšší. Tyto matice jsou odvozeny rovnicemi v kapitole 3.3.4.

3.3.6 Řízení soustavy

Cílem úlohy automatického řízení je navést vozidlo na požadovanou rychlost bez překmitu a tu udržovat s vysokou přesností. Úloha vede na situaci, kdy velké regulační odchylce náleží malý zásah a malé odchylce zásah větší. Na to klasická teorie řízení nestačí, musí se použít nelineární regulace. Podrobně se touto problematikou zabývá publikace [5].

3.4 Srovnání naměřených průběhů rychlosti a simulace

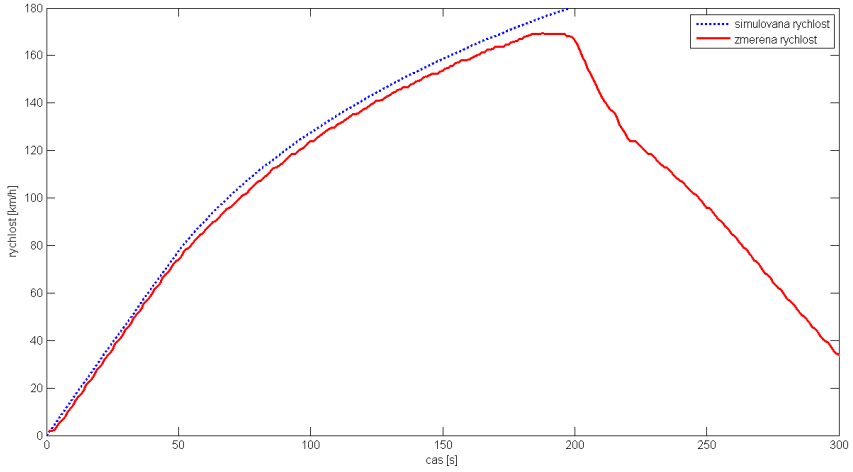
Na následujících obrázcích je ukázáno srovnání změřených průběhů rychlosti a simulace rychlosti. V prvním případě se simulací rozumí nelineární model podle rovnice 3.18, výpočet byl proveden v prostředí simulink. V druhém případě se jedná o dvojici lineárních modelů podle rovnic na straně 85. Výpočet byl proveden v prostředí matlab.

Použité parametry zkoušek a simulace

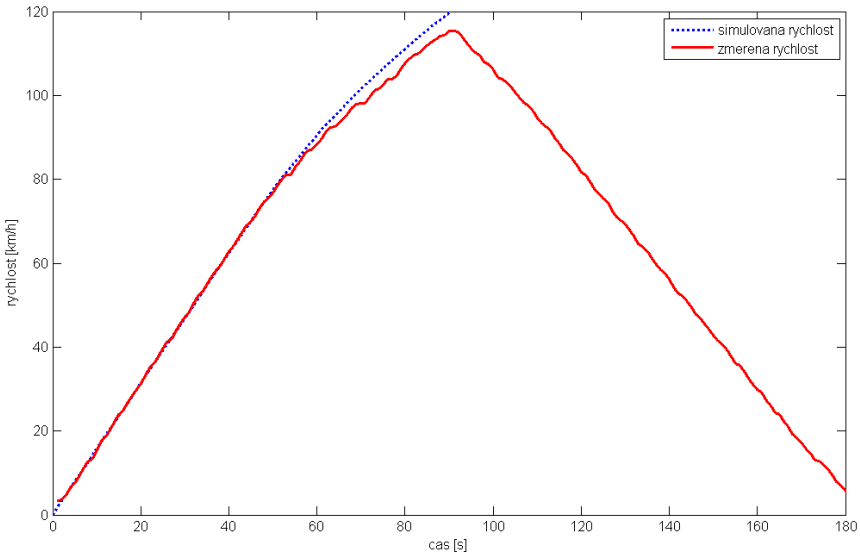
- EJ 680 (Pendolino),
- $P_h = 4$ MW,
- $F_{max} = 200$ kN,
- $v_{krit} = 72\ \mathrm{km\,h^{-1}}$,
- $m_v = 415$ t,
- $g = 9{,}81\ \mathrm{m\,s^{-2}}$,
- $c_0 = 2{,}426$,
- $c_1 = 0{,}00221068$,
- $c_2 = 0{,}00016641$,
- $\xi = 0{,}15$,
- $v_0 =$ uvedeno u obrázku,
- $PT =$ uvedeno u obrázku.

Pozn.: Konstanty jízdních odporů jsou převzaty z [9].

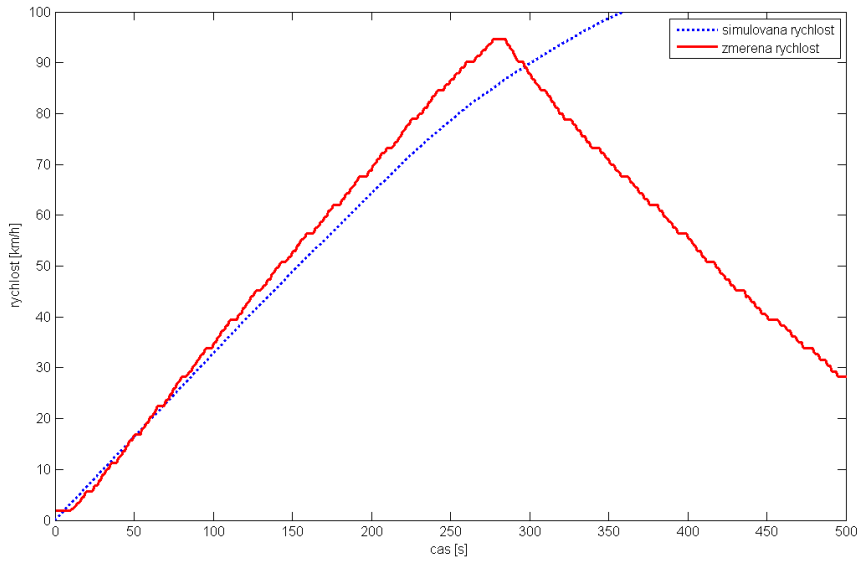
3.4.1 Srovnání naměřené rychlosti a nelineárního modelu



Obrázek 3.2: Srovnání skutečné a simulované rychlosti drážního vozidla podle nelineárního modelu. Nájezd do 180 $\mathrm{km\,h^{-1}}$, PT = 100%



Obrázek 3.3: Srovnání skutečné a simulované rychlosti drážního vozidla podle nelineárního modelu. Nájezd do 120 $\mathrm{km\,h^{-1}}$, PT = 100%

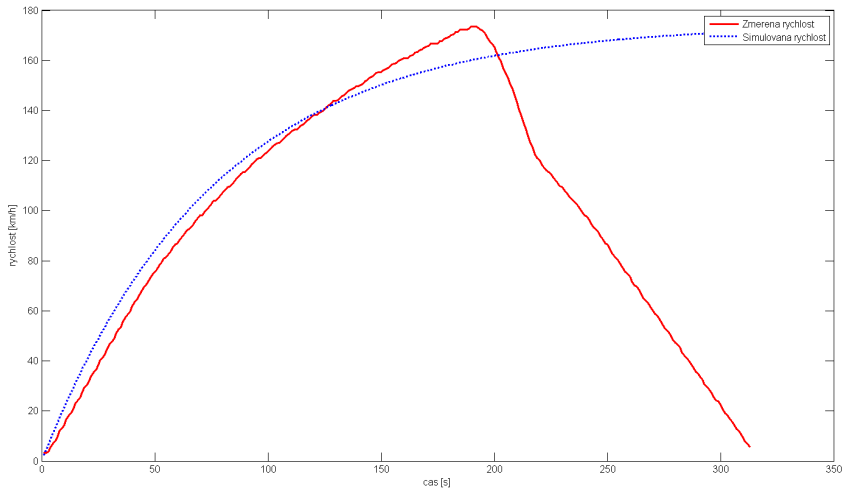


Obrázek 3.4: Srovnání skutečné a simulované rychlosti drážního vozidla podle nelineárního modelu. Nájezd do 100 $\mathrm{km\,h^{-1}}$, PT = 25%

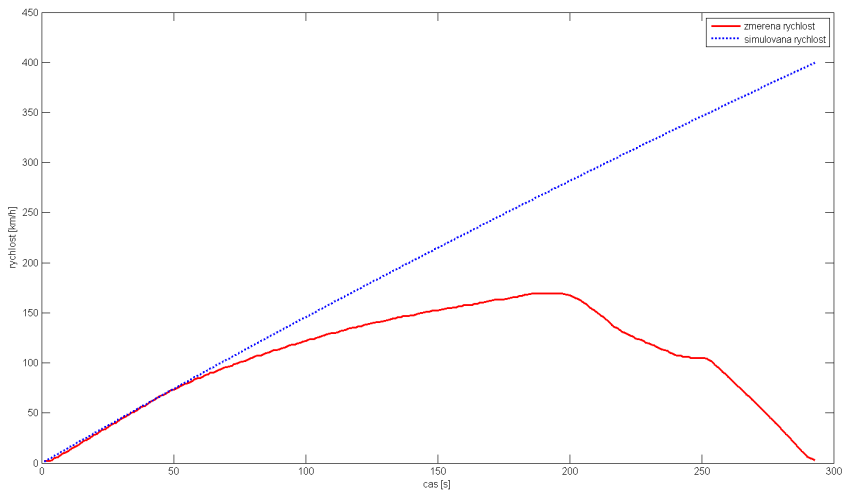
Zhodnocení nelineárního modelu

Nelineární model dle rovnice 3.18 se ukazuje jako dostatečně přesný. Srovnání bylo provedeno na třech naměřených průbezích. Naměřené rychlosti pochází ze zkoušek EJ 680, kdy rychlost nebyla hlavním bodem zájmu. Proto nejsou k dispozici detailní informace o zkouškách (počasí, stav železničního svršku, poloměry oblouků, sklony trati, atd.). Drobné nesrovnalosti srovnání simulované a změřené rychlosti připisuji právě těmto vlivům při měřící jízdě.

3.4.2 Srovnání naměřené rychlosti a lineárního modelu



Obrázek 3.5: Srovnání skutečné a simulované rychlosti drážního vozidla podle lineárního modelu. Nájezd do 180 km h^{-1}, PT = 100% $v0 = 94$ km h^{-1} ($v_0 > v_krit$)



Obrázek 3.6: Srovnání skutečné a simulované rychlosti drážního vozidla podle lineárního modelu. Nájezd do 180 km h^{-1}, PT = 100% $v0 = 61$ km h^{-1} ($v_0 < v_krit$)

Zhodnocení lineárního modelu

Provedl jsem srovnání lineárního modelu pro případ linearizace pro rychlost menší než kritická a v druhém případě pro rychlost větší než kritická. Obě srovnání souhlasí v oblasti rychlostí okolo bodu linearizace. Model pro $v_0 \leq v_{krit}$ velmi dobře souhlasí s měřením v oblasti rychlostí 0–v_{krit}. Dále již nerespektuje fakt, že hnacímu vozidlu začíná klesat hnací síla a nárůst rychlosti se zpomaluje. Model pro $v_0 > v_{krit}$ přestává souhlasit s měřením pro vyšší rychlosti, ale pro celou oblast rychlostí je použitelnější než model prvně zmíněný.

Kapitola 4

Návrh generátoru zpětného trakčního proudu

Tato kapitola je ideovým návrhem generátoru ZTP, souhrnem základních požadavků na něj a rozborem způsobů implementace.

4.1 Účel a idea generátoru

Předpokládá se použití k vytváření typických průběhů ZTP a k analýze odolnosti přijímačů KO proti rušení ohrožujícími proudy. Idea generátoru je taková, že uživatel, jež se zabývá problematikou proudové kompatibility hnacích vozidel a prostředků pro detekci vlaku, dostane možnost pomocí aplikace na PC vytvořit průběh ZTP a použít jej.

4.2 Požadavky na generátor

4.2.1 Požadavky na funkci generátoru

Generátor provádí aditivní syntézu uživatelem definovaných signálů. Syntéza probíhá tak, že uživatel definuje dílčí signál, který se pak přičte k výsledku minulé (poslední syntézy), nebo se přidá za něj.

4.2.2 Požadavky na ovládání

Ovládání generátoru bude prostřednictvím GUI. Uživatel musí mít možnost pohybovat se vpřed—zpět v provedených krocích syntézy. Ovládání aplikace by mělo být co nejvíce uživatelsky pohodlné.

4.2.3 Požadavky na prezentaci dat

Uživatel musí mít možnost trvalého zobrazení dílčího signálu a výsledku dosavadní syntézy. Uživatel musí mít možnost přepínat mezi časovou oblastí, spektrogramem a spektrem signálu. Měřítka grafů, prahování a jiné vlastnosti musí být uživatelem nastavitelné. Generátor musí zaznamenávat v přehledné formě parametry signálů, jež uživatel použil.

4.2.4 Požadavky na výstup generátoru

Počítá se, že se jako výstup generátoru použije zvuková karta. Pokud by toto řešení nestačilo, použije se vhodná vstupně–výstupní karta. Vytvořené průběhy musí jít uložit do souboru (mat, wav).

4.3 Implementace generátoru

Aplikace bude určena pro PC a měla by pracovat nezávisle na OS. V zadání této bakalářské práce se hovoří o GUI v prostředí matlab, to je jedno z možných řešení. Další možná řešení jsou:

1. Aplikace v prostředí matlab,
2. Aplikace v C++, použití funkcí přeložených z matlabu do C++,
3. JAVA aplikace, použití funkcí přeložených z matlabu do jazyku JAVA,
4. Aplikace v C++, použití vlastních funkcí, napsaných v C++.

Nyní je třeba porovnat navrhnutá řešení z několika úhlů pohledu.

Design GUI

Tvorba GUI v prostředí matlab je primárně určená pro velmi malé aplikace. Pro tvorbu větších aplikací[1] není matlab příliš vhodný a pokud i přesto chceme tvořit větší aplikace v matlabu, potřebujeme jistou dávku improvizace. Tvorba GUI (design) pro aplikaci v jazyku JAVA, například ve vývojovém prostředí netbeans je nesrovnatelně více uživatelsky pohodlná než v prostředí matlab.

Metody

Aplikace bude provádět složité matematické operace (vektorové operace, maticové operace, spektrální analýza) nad velkým množstvím dat. Na tyto operace je prostředí matlab stavěno. V tomto ohledu matlab jasně vyniká. V ostatních řešeních by bylo potřeba použít speciálních knihoven.

Prezentace dat

Vykreslování nejrůznějších grafů je v prostředí matlab velice jednoduché a výsledky vypadají profesionálně, ale je třeba počítat s tím, že matlab neprovádí během vykreslování optimalizace – vykresluje všechny body. To vede ke značnému zpomalení běhu aplikace a vysokým požadavkům na paměť. U ostatních řešení by bylo pravděpodobně potřeba vyvinout, nebo použít hotové knihovny např. pro vykreslování spektrogramu.

Rychlost aplikace

Dá se předpokládat, že aplikace v C++ by byla rychlejší než spravovaný kód (managed code) v jazyku JAVA, nebo interpretovaný kód v prostředí matlab.

Zhodnocení

Jako nejlepší implementaci vyhodnocuji variantu 1, přičemž se tato může zkompilovat. To vyžaduje matlab compiler, který je zpoplatněn, ale na druhou stranu bude aplikace rychlejší a budou ji moci využívat uživatelé, kteří nemají nainstalovaný matlab.

[1] diskutovaný generátor ZTP řadím mezi větší aplikace

4.4 Hotové části

V první řadě jsem se věnoval funkcím pro generování signálů. Nejdůležitější a nejobtížnější jsem vyhodnotil signál motorové frekvence. Kvůli časové náročnosti vlastní analýzy (kapitola 2) a rozboru dynamiky drážního vozidla (kapitola 3) se mi podařilo realizovat pouze generování motorové frekvence, o ní je pojednáno níže.

4.4.1 Generování motorové frekvence

Ze signálového hlediska nazveme motorovou frekvencí takový signál, jehož frekvence se mění v čase. V anglické literatuře jsou takovéto signály označeny jako *chirp* signály, i zde budeme tento termín používat. Zde je tedy nanejvýš vhodné uvést matematický aparát, který dá předpis pro časový signál, jehož frekvence je funkcí času.

Matematický aparát

Obecný vztah pro průběh chirp signálu je:

$$y(t) = \sin\left(2\pi \int_0^t f(\tau)d\tau + \varphi\right) \tag{4.1}$$

kde $f(\tau)$ je průběh frekvence v čase. Čas je označen jako τ. φ je fázový posun v radiánech. Dle tohoto vztahu jsme schopni při znalosti požadovaného průběhu frekvence určit odpovídající chirp signál.

Odvození harmonického průběhu

Z tohoto obecného vztahu můžeme zkusit odvodit harmonický průběh, tedy průběh s konstantní frekvencí. Funkce frekvence je konstantní: $f(\tau) = F$

$$y(t) = \sin\left(2\pi \int_0^t f(\tau)d\tau + \varphi\right) = \sin\left(2\pi \Big[F\tau\Big]_0^t + \varphi\right) = \sin\left(2\pi F t + \varphi\right) \tag{4.2}$$

Dostáváme tedy obecně známý vztah pro harmonický průběh.

Odvození motorové frekvence

Vycházíme z modelu pro $v > v_{krit}$ a parametrů T_2 a k_2 ze strany 85. Průběh frekvence $f(\tau)$ v čase se určí:

$$f(\tau) = 3,6\, k_{f,v}\, v(\tau) = 3,6\, k_{f,v}\, (PT + PT_{02})\, k_2 \left(1 - \exp(-\frac{\tau}{T_2})\right) \tag{4.3}$$

Spočítám integrál z $f(\tau)$:

$$\begin{aligned}
F(t) &= \int_0^t f(\tau)d\tau = \int_0^t 3,6\, k_{f,v}\,(PT + PT_{02})\, k_2 \Big(1 - \exp(-\frac{\tau}{T_2}\,)\Big) d\tau \\
&= \int_0^t 3,6\, k_{f,v}\,(PT + PT_{02})\, k_2\, d\tau - \int_0^t 3,6\, k_{f,v}\,(PT + PT_{02})\, k_2\, \exp(-\frac{\tau}{T_2}\,) d\tau \\
&= \Big[3,6\, k_{f,v}\,(PT + PT_{02})\, k_2\, \tau\Big]_0^t - 3,6\, k_{f,v}\,(PT + PT_{02})\, k_2 \Big[- T_2 \exp(-\frac{\tau}{T_2}\,)\Big]_0^t \\
&= 3,6\, k_{f,v}\,(PT + PT_{02})\, k_2 \Big(t + T_2 \exp(-\frac{\tau}{T_2}\,) - T_2\Big) \qquad (4.4)
\end{aligned}$$

Průběh motorové frekvence s amplitudou A a fázovým posunem φ se pak určí:

$$y(t) = A\, \sin\Big(2\pi F(t) + \varphi\Big) = A\, \sin\Bigg(2\pi 3,6\, k_{f,v}\,(PT + PT_{02})\, k_2 \Big(t + T \exp(-\frac{\tau}{T}\,) - T\Big) + \varphi\Bigg) \qquad (4.5)$$

Implementace těchto výpočtů jako matlabovský kód je v příloze C.1 a na přiloženém CD.

Kapitola 5

Zhodnocení práce

Cílem této bakalářské práce bylo seznámit se s problematikou železniční zabezpečovací techniky, vypracovat analýzu signálů zpětných trakčních proudů a navrhnout generátor těchto průběhů.

Seznámení s ŽZT jsem provedl formou absolvování předmětu „železniční zabezpečovací technika“ na fakultě dopravní ČVUT, studiem literatury [1], [2], [3], [6], [5], [9], [4] a [11] a touto problematikou se již 2 roky zabývám ve společnosti AŽD, s.r.o. Poznatky ze ŽZT, které souvisí s touto prací shrnuje kapitola 1.

Druhý bod zadání se týká vypracování analýzy průběhů zpětných trakčních proudů. Je to problematika velice složitá a náročná z hlediska organizace zkoušek, měřícího řetězce i vlastního vyhodnocení. Tato práce se omezuje pouze na vyhodnocení již naměřených průběhů. O metodě vlastního měření se práce nezmiňuje z důvodu velkého rozsahu problematiky. Pro vlastní analýzu bylo třeba vytvořit několik SW prostředků (kapitola 2.1). Tvorba těchto funkcí a GUI probíhala jako spolupráce vedoucího bakalářské práce se mnou. Vývoj GUI, popsané v kapitole 2.1.3, trval přibližně půl roku. Pomocí těchto prostředků jsem vytvořil analýzu zpětných trakčních proudů (kapitola 2), která byla časově náročná (také přibližně půl roku). Kladli jsme si za cíl, aby byla použitelná jako podklad pro podobné analýzy z jiných drážních vozidel. Myslím si, že tento cíl jsme naplnili a zároveň je analýza použitelná jako podklad pro generátor typických průběhů zpětných trakčních proudů – další bod zadání.

Posledním bodem zadání bylo navrhnout generátor typických průběhů zpětných trakčních proudů. Tento bod jsem naplnil pouze z části. Ideu generátoru jsem popsal v kapitole 4.1 a požadavky na něj v kapitole 4.2. Protože jeden z dílčích závěrů analýzy byl takový, že určité parametry dílčího signálů souvisí s rychlostí drážního vozidla, bylo nezbytně nutné rozebrat dynamiku pohybu drážního vozidla a vytvořit modely systému

(kapitola 3 a příloha C.2). Na základě této kapitoly bylo možné generovat nejkomplikovanější signál – motorovou frekvenci. Ta je analyzována v kapitolách 2.3.3 a 2.4.3, její matematické odvození a generovaní je popsáno v kapitole 4.4.1 a její implementace jako matlabovký skript je v příloze C.1. Funkce pro generování ostatních signálů již nebyly z důvodu časové tísně vytvořeny. Vytvořena byla tedy pouze dílčí funkce generátoru.

Nadále bych se touto problematikou chtěl zabývat a v rámci diplomové práce vytvořit zmíněný generátor, který bude stavět na této bakalářské práci.

Literatura

[1] *ČSN 34 2613 Železniční zabezpečovací zařízení – Kolejové obvody a vnější podmínky pro jejich činnost.* 2007.

[2] *TNŽ 28 1020 Zkoušky hnacích vozidel z hlediska rušení železničních zabezpečovacích zařízení.* 2007, (v návrhu).

[3] Faran, A.: *Paralelní kolejové obvody železnic České republiky a Slovenské republiky a jejich proudová kompatibilita s drážními vozidly.* Praha: AŽD Praha s.r.o., 2008.

[4] Gregora Stanislav, O. J.: *Elektrotechnika a zabezpečovací technika v dopravní infrastruktuře.* Univerzita Pardubice, 2005, ISBN 80-247-0507-9.

[5] Ivo Myslivec, P. V.: *Systémy řízení dopravních prostředků.* Vydavatelství ČVUT, 2004, ISBN 80-01-03115-2.

[6] Javůrek, J.: *Regulace moderních elektrických pohonů.* Grada publishing, a.s., 2003, ISBN 80-247-0507-9.

[7] Panos J. Antsaklis, A. N. M.: *A linear systems primer.* Birkhäuser, 2007, ISBN 978-0-8176-4434-5.

[8] Petr Augusta, O. H.: *Linearizace, diskretizace.* Poslední úpravy 11.4.2005, [CD-ROM], [citováno 8.února 2008].

[9] Rovenský, P.: *Pohyb vlaku.* [online], [citováno 10.ledna 2008].
URL `<http://www.masinky.ic.cz/technika/jizda.pdf>`

[10] Václav Žalud, J. D.: *Moderní radiotechnika.* BEN-technická literatura, 2006, ISBN 80-7300-132-2.

[11] Wikipedia: *Železniční zabezpečovací zařízení*. Poslední úpravy 28.11.2008, [online], [citováno 5.ledna 2009].
URL <http://cs.wikipedia.org/wiki/Železniční_zabezpečovací_zařízení>

Příloha A

Seznam použitých zkratek

DP . . . . . Dolní propust.
EDB . . . Elektrodynamická brzda.
EJ . . . . . Elektrická jednotka.
EKÚ . . . Elektrický kolejový úsek.
ERP . . . Elektrická Rekuperační brzda.
FFT . . . . Rychlá diskrétní Furierova transformace (fast Furier transform).
GUI . . . . Grafické uživatelské rozhraní (graphical user interface).
HDO . . . Hromadné dálkové ovládání.
KO . . . . . Kolejový obvod.
OS . . . . . Operační systém.
PC . . . . . Osobní počítač (personal computer).
PZZ . . . . Přejezdové zabezpečovací zařízení.
ST . . . . . Stykový transformátor.
SW . . . . . Software.
SZZ . . . . Staniční zabezpečovací zařízení.
TZZ . . . . Traťové zabezpečovací zařízení.
VZZ . . . . Vlakové zabezpečovací zařízení.
ZTP . . . . Zpětný trakční proud.
ŽZT . . . . Železniční zabezpečovací technika.

Příloha B

Seznam použitých veličin

A	Amplituda.	[-]
c_0	Konstanta suchého tření.	[-]
c_1	Konstanta viskózního tření.	[-]
c_2	Konstanta aerodynamického odporu.	[-]
F_b	Brzdná síla.	[N]
F_h	Hnací síla.	[N]
f_{HDO}	Nosná frekvence služby HDO.	[Hz]
F_{max}	Maximální hnací síla.	[N]
F_o	Odporová síla.	[N]
F_v	Tíha vlaku.	[N]
$k_{f,v}$	Poměr mezi motorovou frekvencí a rychlostí.	[$\mathrm{Hz\,km^{-1}\,h}$]
m	Kladné celé číslo (vystupuje v rovnici 2.1).	[-]
m_v	Hmotnost vlaku.	[kg]
N	Délka FFT.	[-]
o_j	Poměrná odporová síla jízdních odporů.	[$\mathrm{N\,kN^{-1}}$]
o_{obl}	Poměrná odporová síla oblouku.	[$\mathrm{N\,kN^{-1}}$]
o_s	Poměrná odporová síla ze sklonu trati.	[$\mathrm{N\,kN^{-1}}$]
P_h	Maximální výkon hnacího vozidla (všech jeho funkčních pohonů).	[W]
P_{max}	Maximální využitelný výkon hnacího vozidla.	[W]
PT	Poměrný tah.	[%]
s	Sklon trati.	[‰]
T_{sig}	Perioda signálu.	[s]
T_{vz}	Perioda vzorkování.	[s]
v_0	Rychlost, pro kterou je provedena linearizace.	[$\mathrm{m\,s^{-1}}$]

φ... Fázový posun. [rad]

ξ... Poměrná přirážka z rotujících hmot. [-]

Příloha C

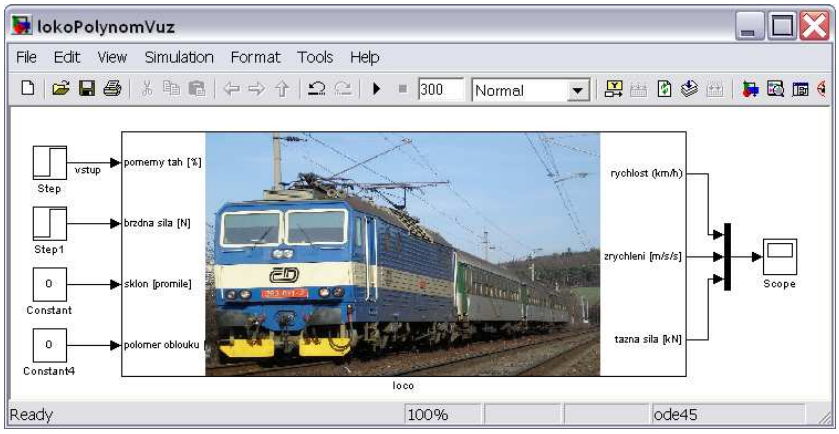
Ukázky implementace

C.1 Generování motorové frekvence

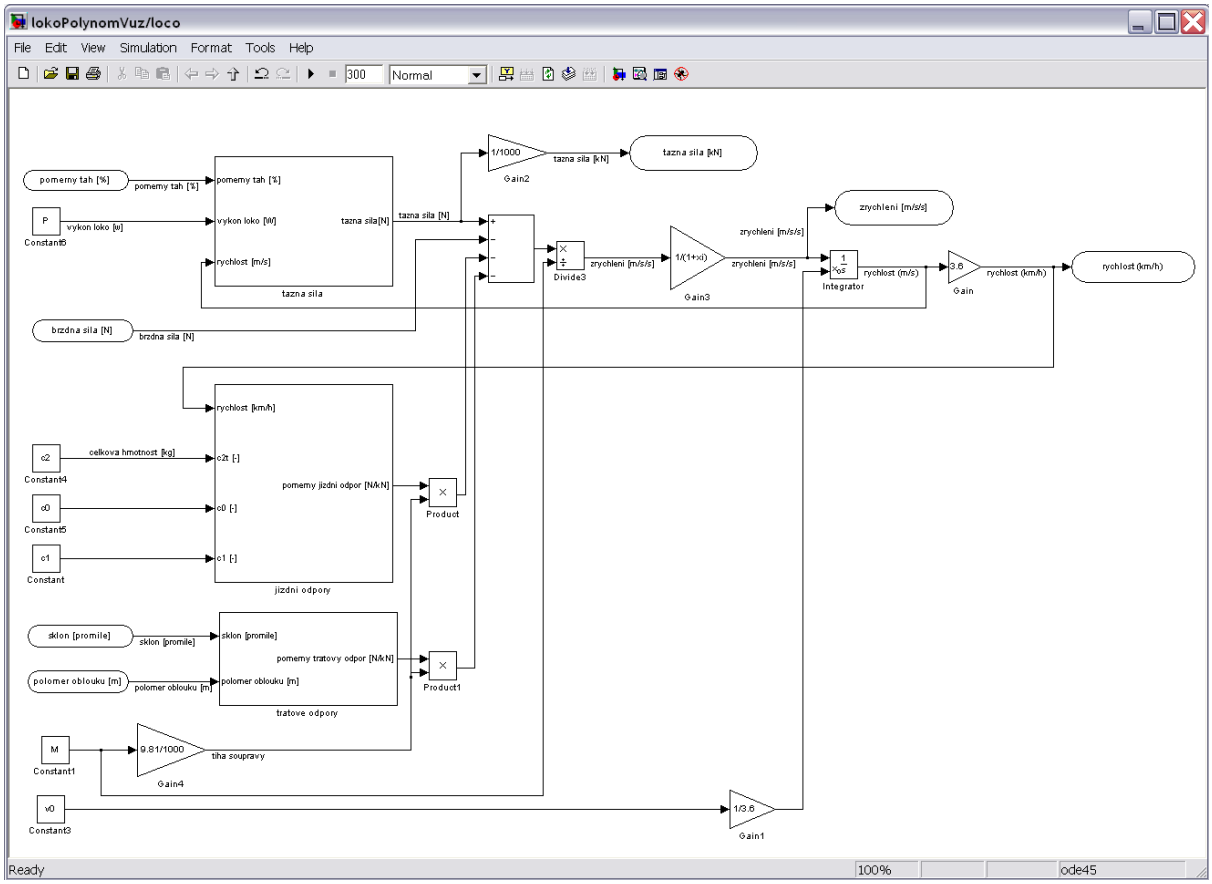
```
%% vlastnosti vlaku
c1 = 0.00221068; %jizdni odpor[-]
c2 = 0.00016641; %jizdni odpor[-]
g = 9.81; %tihove zrychleni [m/s/s]
xi = 0.15; %pomer. prirazka z rot. hmot [-]
m = 415e3; %hmotnost vlaku [kg]
Fmax = 200e3; %max. tazna sila [N]
Pmax = 4e6; %max. vykon hnaciho voz. [W]
kFV = 0.8; %pomer mezi motor. frekvenci a rychlosti [Hz/km*h]
%% vlastnosti simulace
v0 = 40/3.6; %pracovni bod [m/s]
PT = 100; %pomerny tah [%]
model = 1; %vyber modelu - if 1 then v0<vkrit, if 2 then v0>vkrit
%% osa casu
fvz = 1e4; %vzorkovaci frekvence [Hz]
t = 0:1/fvz:200-1/fvz; %osa casu [s]
```

```
%% vypocet rychlosti a motorove frekvence
switch model
    case 1
        A~= -3.6*g/(1000*(1+xi))*(c1+2*v0*c2*3.6); %matice dynamiky
        B = Fmax/(100*m*(1+xi)); %vstupni matice
        k~= -B/A; %ustalena hodnota v nekonecnu
        T = -1/A; %casova konstanta
        v~= PT*k*(1-exp(-t/T)); % signal rychlosti [m/s]
        F = PT*k*3.6*kFV*(t + T*exp(-t/T) - T); %integral prubehu frekv.
        y = sin(2*pi*F); %signal motorove frekvence
    case 2
        A~= -Pmax*PT/(100*v0^2*m*(1+xi)) - 3.6*g/(1000*(1+xi))* ...
            (c1+2*v0*c2*3.6); %matice dynamiky
        B = Pmax/(100*v0*m*(1+xi)); %vstupni matice
        k~= -B/A; %ustalena hodnota v nekonecnu
        T = -1/A; %casova konstanta
        v~= 2*PT*k*(1-exp(-t/T)); % signal rychlosti [m/s]
        F = 2*PT*k*3.6*kFV*(t + T*exp(-t/T) - T); %integral prubehu frekv.
        y = sin(2*pi*F); %signal motorove frekvence
end
%% prezentace dat
spgram(y,'fvz',fvz,'okno',1*fvz,'fprah',[0 500]) %spektrogram
figure
subplot(211), plot(t,v*3.6) %vykresleni rychlosti
xlabel('cas [s]'), ylabel('rychlost [km/h]')
subplot(212), plot(t,y), axis([0 5 -1.1 +1.1]) %casovy prubeh mot. frekv.
xlabel('cas [s]'), ylabel('amplituda [-]')
```

C.2 Nelineární model v prostředí simulink



Obrázek C.1: Screenshot nelineárního modelu v prostředí simulink 1



Obrázek C.2: Screenshot nelineárního modelu v prostředí simulink 2

Příloha D

Obsah přiloženého CD

■ CD	Kořenový adresář CD.
⊟ Literatura	Adresář s použitou literaturou ve formátu pdf.
☐ jizda.pdf	Dokument [9].
☐ Linearizace.pdf	Dokument [8].
⊟ Matlab_GUI	Adresář s GUI v prostředí matlab.
⊟ Motor_frekv	GUI pro analýzu signálů ZTP (popsáno v kapitole 2.1.3).
⊞ private	Privátní funkce, které aplikace využívá.
☐ motor_frekv_GUI.fig	Soubor s vlastnostmi figury aplikace.
☐ motor_frekv_GUI.m	Hlavní soubor aplikace. Tento se spouští.
⊟ Matlab_M-files	Adresář s m-files v prostředí matlab.
☐ motorfrekv.m	Skript generující průběh motorové frekvence, viz kapitola 4.4.1.
⊟ Matlab_toolbox	Toolbox, který obsahuje funkce potřebné pro analýzu signálů.
⊞ funkce	Obsahuje funkce potřebné pro analýzu signálů.
⊞ kalibracnisignaly	Obsahuje funkce pro kalibrační signály.
⊞ nactidata	Obsahuje funkce pro načítání změřených dat do prostředí matlab.
☐ mytoolbox_nastav.m	Matlab skript, který přidá toolbox do prohledávací cesty matlabu.
☐ mytoolbox_verze.txt	Informace o verzích tohoto toolboxu.
⊟ Prace	Adresář se soubory této bakalářské práce.
⊞ Latex	Zdrojové kódy pro typografický systém LaTeX.
☐ prace-tisk.pdf	Soubor této práce pro tisk.
☐ prace-publish.pdf	Soubor této práce, obsahuje podepsané zadání a prohlášení.
⊟ Simulink_model	Adresář pro modely v prostředí simulink.
⊞ Nelineární_model	Obsahuje nelineární model drážního vozidla dle rovnice 3.18.