

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

# Disertační práce

*červenec 2015*

*Miloš Okrouhlý*

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická  
Katedra měření

*Diagnostika vybraných  
vozidlových systémů a  
predikce jejich poruch*

Disertační práce

*Miloš Okrouhlý*

Praha, červenec 2015

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika  
Studijní obor: Měřicí technika

**Školitel:** *doc. Ing. Petr Kocourek, CSc.*

**Školitel specialista:** *doc. Ing. Jiří Novák, Ph.D.*

## Poděkování

V první řadě bych rád poděkoval svým školitelům doc. Ing. Petru Kocourkovi, CSc. a doc. Ing. Jiřímu Novákovi, Ph.D. za jejich odborné vedení této disertační práce, za připomínky, ale i za trpělivost. Velké poděkování, za neuvěřitelnou míru trpělivosti, porozumění, lásky a podpory, bych rád věnoval své rodině. Především své manželce Daniele, rodičům Františkovi a Anně, sestře, tchánovi i jeho bratru. Za motivaci k dokončení této práce, životní radost a štěstí dále děkuji svému synu Matějovi.

Rád bych poděkoval všem, kdo přispěli cennými radami k dokončení této disertační práce. Z katedry to jsou doc. Ing. Radislav Šmíd, Ph.D., doc. Ing. Petr Kašpar, CSc., prof. Ing. Vladimír Haasz, CSc. a Ing. Petr Ježdík, Ph.D. Dále pak Mgr. Daniela Okrouhlá, Miloslav Korbělík a Jan Korbělík. Rád bych také zmínil studenty, kteří svými bakalářskými a diplomovými pracemi pomáhali ve správném směřování této disertační práce, především Ing. Václav Hanus, Bc. Jakub Tauchman, Ing. Vladimír Horyna, Ing. Tomáš Pospíšil a další.

Speciální poděkování bych rád věnoval Jaroslavě Kočové za ochotu a vstřícnost nad rámec svých povinností při administrativní činnosti spojené s mým studiem. Dále kolegům doktorandům a všem členům katedry i fakulty.

V neposlední řadě bych rád poděkoval všem, kdo mě svými názory ovlivňovali a ovlivňují dodnes, čímž mi umožnili dívat se na svět i z jiných úhlů pohledu. Jmenovitě bych rád zmínil Ing. Luboše Viktora, Martina Šlesingera, Petra Veselého, Ing. Marka Fialu, Ing. Jana Váňu a Ing. Tomáše Levoru.

# Čestné prohlášení

Čestně prohlašuji, že disertační práci „Diagnostika vybraných vozidlových systémů a predikce jejich poruch“ jsem vypracoval samostatně a použil k tomu úplný výčet citací z literatury uvedené v seznamu na konci této práce. Nemám námitek proti půjčování nebo zveřejňování mé disertační práce, nebo jejích částí. Taktéž nemám námitek proti využití výsledků této práce Elektrotechnickou fakultou ČVUT, a to se souhlasem katedry měření.

V Praze dne .....

.....

Miloš Okrouhlý

## Abstrakt

Současný trend v automobilovém průmyslu směřuje jak ke snižování výrobních nákladů, tak ke zvyšování uživatelského komfortu a bezpečnosti přepravovaných osob. Zvýšení komfortu a bezpečnosti je často spojeno s instalací většího množství automobilového vybavení, často v podobě elektroniky či elektricky ovládaných akčních členů. Další podstatné zvyšování automobilového příslušenství vzniká vlivem legislativního nařízení, které si klade za cíl snížit množství škodlivých látek vypouštěných dopravními prostředky. Takovéto zvyšování automobilového příslušenství s sebou však přináší také zvýšenou potřebu detekce poruch těchto částí. Některé části je nutné diagnostikovat právě z legislativního nařízení, některé z důvodu zajištění bezpečnosti přepravovaných osob a některé z důvodu snadnějšího nalezení porouchaného dílu. Toto vše je však v rozporu s trendem snižování výrobních nákladů, proto je v této práci diskutována netradiční diagnostická metoda, která si klade za cíl snížit výrobní náklady spojené s palubní automobilovou diagnostikou. Metoda by v ideálním případě umožnila přechod od současného decentralizovaného způsobu diagnostického řešení k centralizovanému měření v jednom měřicím bodě.

V úvodu práce jsou popsány současné diagnostické metody vycházející z decentralizovaného způsobu měření včetně základní myšlenky nové diagnostické metody nazvané centralizovaná vozidlová diagnostika. Ta je založena na klasifikaci příznaků poruch měřitelných v proudu odebíraném z napájecí soustavy vozidla. Následuje rozbor časových průběhů proudového odběru elektrických částí běžné automobilové výbavy, na jehož základě byly tyto části ohodnoceny z hlediska diagnostické významnosti.

V teoretické části práce byly navrženy metody vhodné pro klasifikaci proudových průběhů. Jsou jimi například rychlá Fourierova transformace, vlnková transformace, metoda template matching nebo hranový detektor. V praktické části byla rozšířena množina poruch vybraných vozidlových systémů, jejichž příznaky mají projev identifikovatelný v proudu odebíraném z napájecí sítě vozidla. U těchto systémů, jimiž jsou zapalovací systém a přední stěrač vozidla, byl proveden podrobný rozbor časových průběhů proudového odběru, které odpovídají bezporuchovým i předpokládaným poruchovým stavům. Následuje stanovení mezí použitelnosti jednotlivých klasifikačních metod na rozšířené množině poruch v konceptu centralizované vozidlové diagnostiky.

V závěru práce jsou diskutovány možnosti centralizované vozidlové diagnostiky z pohledu použití jednoho či více měřicích bodů v napájecí soustavě vozidla. Myšlenka centralizovaného měření je také konfrontována se současným trendem automobilové elektroinstalace vycházející z uspořádání napájecí soustavy nejnovějšího modelu malého vozu automobilky Škoda, modelové řady Fabia III.

# Abstract

Today's trends in automotive industry lead towards enhancements in passenger comfort and safety and contemporarily to manufacturing costs reduction. Higher comfort and safety level is often accompanied with new electronic and electrical subsystems, driver assistance systems and electrically controlled actuators. Legal directives force another improvements leading especially to emissions and fuel consumption reduction. The increase of vehicle electronics brings the higher need of condition monitoring and diagnostics. Diagnostics of selected subsystem is required by legal regulations, diagnostics of some subsystem is required because of their direct impact on passenger safety, and diagnostics of remaining vehicle subsystems helps with faster and easier detection (and sometimes even prediction) of failures. Contradiction between the growth of diagnostic requirements and simultaneous manufacturing costs reduction has initiated design of a new diagnostic method focused on cheap on-board diagnostics. The method allows decreasing the number of diagnostic probes (up to a single one in an ideal case) and thus moving from decentralized to the centralized diagnostics in a single measurement point.

Today's diagnostics methods based on decentralized approach as well as the new approach called centralized diagnostics are explained within the thesis introduction. Centralized diagnostics approach is based on classification of signatures gathered up in a vehicle power supply network. The signatures (measured current consumption transients) of particular elements of vehicle electric and electronics are then analyzed and their potential for diagnostic purposes is evaluated.

Methods suitable for signature classification are discussed in theoretical part, e.g. Fast Fourier Transformation, Wavelet Transformation, Template Matching or Edge Detector. Next part of the thesis deals with the practical aspects of selected subsystems in the centralized diagnostics. Attention was paid to vehicle ignition system and front wiper. Detailed analysis of supply current transients is provided for error free and erroneous states, usability of particular classification methods and their limits in centralized diagnostic concept are discussed.

Finally, the centralized diagnostics concept possibilities are discussed from the point of view of number of diagnostic probes and their placement in vehicle supply network. The idea of centralized diagnostics is also confronted with the current trend of vehicle wiring, inspired by power supply network arrangement in the newest small Škoda vehicle Fabia III.

# Obsah

<b>1 Úvod</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Současný stav vozidlové diagnostiky</b> .....	<b>3</b>
<b>2.1 Současný decentralizovaný přístup</b> .....	<b>3</b>
2.1.1 Úvod .....	3
2.1.2 Vnitřní diagnostika (sériová diagnostika) .....	4
2.1.3 Vnější diagnostika (paralelní diagnostika) .....	5
2.1.4 Systém OBD (On-Board Diagnostics) .....	5
2.1.5 Diagnostika zapalovací soustavy spalovacích motorů .....	6
<b>2.2 Centralizovaná vozidlová diagnostika</b> .....	<b>9</b>
2.2.1 Základní myšlenka .....	9
2.2.2 Současný stav centralizované vozidlové diagnostiky .....	12
<b>2.3 Shrnutí</b> .....	<b>13</b>
<b>3 Cíle disertační práce</b> .....	<b>15</b>
<b>4 Rozbor elektrické výbavy automobilu</b> .....	<b>17</b>
<b>4.1 Analýza proudového odběru elektrických částí automobilové výbavy</b> ..	<b>17</b>
4.1.1 Režimy proudového odběru .....	17
4.1.2 Proudový odběr typických částí automobilové výbavy .....	19
4.1.3 Typické dynamické průběhy odebíraného proudu .....	21
<b>4.2 Diagnosticky významné části z pohledu centralizované diagnostiky</b> .....	<b>23</b>
<b>4.3 Mechanická konstrukce vybraných částí</b> .....	<b>25</b>
4.3.1 Konstrukce zapalovacího systému .....	25
4.3.2 Konstrukce stěrače .....	26
<b>4.4 Shrnutí</b> .....	<b>27</b>
<b>5 Navrhované metody</b> .....	<b>29</b>
<b>5.1 Rychlá Fourierova transformace</b> .....	<b>29</b>
<b>5.2 Vlnková transformace</b> .....	<b>29</b>
<b>5.3 Metoda template matching</b> .....	<b>30</b>
<b>5.4 Metoda template matching se separací příznaku</b> .....	<b>30</b>
<b>5.5 Hranový detektor</b> .....	<b>31</b>
<b>5.6 Metoda odchylky od aproximace</b> .....	<b>32</b>
<b>5.7 Detektor pulzů</b> .....	<b>32</b>

5.8	Shrnutí.....	33
<b>6</b>	<b>Rozšíření množiny poruchových stavů.....</b>	<b>35</b>
6.1	Zapalovací systém.....	35
6.1.1	Bezporuchový stav.....	35
6.1.2	Projevy poruch.....	40
6.1.3	Závěr .....	47
6.2	Stejnoseměrné elektromotory automobilové výbavy .....	47
6.2.1	Bezporuchový stav automobilového stěrače.....	48
6.2.2	Projevy poruch stěrače.....	51
6.2.3	Závěr .....	59
6.3	Shrnutí.....	60
<b>7</b>	<b>Klasifikace nalezených poruch.....</b>	<b>61</b>
7.1	Zapalovací systém.....	61
7.1.1	Klasifikace poruchy odpojené svíčky metodou vlnkové transformace .....	61
7.1.2	Algoritmus vyhodnocování poruchy odpojené svíčky metodou template matching .....	63
7.1.3	Detektor pulzů a porucha v primárním obvodu .....	74
7.1.4	Metoda odchylky od aproximace a poruchy na elektrodách svíčky...77	
7.1.5	Závěr .....	82
7.2	Stejnoseměrné elektromotory automobilové výbavy .....	83
7.2.1	Porucha způsobená zkratem a přerušením vinutí rotoru klasifikovaná pomocí rychlé Fourierovy transformace.....	83
7.2.2	Zadírání táhel stěrače .....	87
7.2.3	Závěr .....	90
7.3	Shrnutí.....	91
<b>8</b>	<b>Umístění měřicích bodů v napájecí síti vozidla .....</b>	<b>93</b>
<b>9</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>97</b>



## Seznam použitých zkratk

ABS	Anti-lock Braking System
ADP	Analogově Digitální Převodník
AKF	Aktivkohlefilter
CAN	Controller Area Network
DIC	Double Ignition Coil
ECU	Electronic Control Unit
EOBD	European On Board Diagnostics
FFT	Fast Fourier Transform
$f_{vz}$	vzorkovací frekvence
KL	Klema
LED	Light-Emitting Diode
MIL	Malfunction Indicator Lamp
MR	Modelový Rok
OBD	On Board Diagnostics
PWM	Pulse-Width Modulation
SAD	Sum of Absolute Differences
SIC	Single Ignition Coil
STFT	Short Time Fourier Transform
USA	United States of America
WT	Wavelet Transform

## Seznam obrázků

Obr. 1. Průběh napětí na sekundární straně zapalovací cívky (upraveno z [17]).	8
Obr. 2. Zobrazení jednojiskrových zapalovacích cívek (SIC – Single Ignition Coil) [18].	8
Obr. 3. Měřicí body (A, B, C a D) v napájecí síti automobilu.	10
Obr. 4. Proudový odběr v měřicím bodě B při volnoběžných otáčkách motoru.	18
Obr. 5. Proudový odběr vstřikovacích ventilů.	21
Obr. 6. Proudový odběr brzdových světel s wolframovou žárovkou.	22
Obr. 7. Proudový odběr motoru ostřikovače skel.	22
Obr. 8. Detail proudového odběru vyhřívání lambda sondy.	23
Obr. 9. Dvojiskrová (vlevo) a jednojiskrová (vpravo) zapalovací cívka.	25
Obr. 10. Blokové schéma jednojiskrové zapalovací cívky SIC.	26
Obr. 11. Konstrukce elektromotoru předního stěrače na vozidle Škoda Fabia II [28].	26
Obr. 12. Bezchybný stav zapalovacího systému s různou polohou hledaného proudového impulsu.	31
Obr. 13. Rozdíl měřeného signálu s aproximovaným polynomem.	32
Obr. 14. Průběh proudu odebíraného zapalovací cívkou z napájecí sítě automobilu.	36
Obr. 15. Střední hodnota zpoždění 9 svíček z 90 náměrů.	37
Obr. 16. Závislost zpoždění přeskočení jiskry zapalovací svíčky na tlaku vzduchu ve válci.	38
Obr. 17. Změna tlaku ve válci zážehového motoru při otáčkách 800 ot./min.	38
Obr. 18. Závislost průměrného zpoždění přeskočení devadesáti jisker na vzdálenosti elektrod svíčky.	39
Obr. 19. Proudový odběr zapalovacího systému s poruchou spínače v jedné zapalovací cívce.	41
Obr. 20. Proudový odběr zapalovací cívky při odpojené svíčke – častější výskyt.	43
Obr. 21. Proudový odběr zapalovací cívky při odpojené svíčke – méně častý výskyt.	43
Obr. 22. Proudový odběr zapalovací cívky při oddálených elektrodách svíčky.	44
Obr. 23. Proudový odběr zapalovací cívky při olejem zanesených elektrodách svíčky.	45
Obr. 24. Proudový odběr zapalovací cívky při zkratovaných elektrodách svíčky.	46

Obr. 25. Proudový odběr elektromotoru stěrače bez poruchy s odpojenou zátěží. ....	48
Obr. 26. Typický proudový odběr elektromotoru stěrače bez poruchy.....	49
Obr. 27. Separovaný proudový odběr elektromotoru stěrače bez poruchy. ....	50
Obr. 28. Neseparovaný proudový odběr elektromotoru stěrače bez poruchy. ....	51
Obr. 29. Proudový odběr elektromotoru stěrače s poruchou zkratu a odpojenou zátěží. ....	52
Obr. 30. Separovaný proudový odběr elektromotoru stěrače s poruchou zkratu. ....	53
Obr. 31. Neseparovaný proudový odběr elektromotoru stěrače s poruchou zkratu. ....	54
Obr. 32. Proudový odběr elektromotoru stěrače s poruchou přerušeného vinutí rotoru a odpojenou zátěží.....	55
Obr. 33. Separovaný proudový odběr elektromotoru stěrače s poruchou přerušeného vinutí. ....	56
Obr. 34. Neseparovaný proudový odběr elektromotoru stěrače s poruchou přerušeného vinutí. ....	57
Obr. 35. Místo výskytu nejčastější poruchy stěračů – zadírání táhel. ....	58
Obr. 36. Separovaný proudový odběr elektromotoru stěrače s poruchou zadírání. ....	58
Obr. 37. Neseparovaný proudový odběr elektromotoru stěrače s poruchou zadírání. ....	59
Obr. 38. Průběh proudu odebíraný zapalovací cívkou na záporném napájecím vedení ukostřeném ke karoserii vozidla (častější výskyt).....	62
Obr. 39. Detail správného příznaku poruchy odpojené svíčky (měřeno na kladném pólu – častější výskyt).....	62
Obr. 40. Mateřská vlnka z rodiny Gaussian řádu 3. ....	62
Obr. 41. Koeficienty vlnkové transformace správného příznaku. ....	63
Obr. 42. Vzor častějšího projevu poruchy vytvořený průměrováním z tisíce náměrů. ....	64
Obr. 43. Vzor méně častého projevu poruchy vytvořený průměrováním z tisíce náměrů. ....	64
Obr. 44. Nalezení vzoru častějšího projevu poruchy ve zkoumaném časovém okně.....	65
Obr. 45. Nalezení vzoru méně častějšího projevu poruchy ve zkoumaném časovém okně.....	65
Obr. 46. Histogramy minimální hodnoty <i>SAD</i> v poruchovém stavu.....	66
Obr. 47. Histogramy minimální hodnoty <i>SAD</i> v bezporuchovém stavu. ....	66
Obr. 48. Frekvenční spektra příznaků hledaných metodou template matching. ....	71

Obr. 49. Histogramy minimální hodnoty <i>SAD</i> v bezporuchovém i poruchovém stavu pro $f_{vz} = 6,25$ MHz.....	72
Obr. 50. Histogramy minimální hodnoty <i>SAD</i> v bezporuchovém i poruchovém stavu pro $f_{vz} = 62,5$ kHz. ....	73
Obr. 51. Výsledky hledání proudových impulzů s využitím detektoru pulzů.....	75
Obr. 52. Frekvenční spektrum proudového impulzu po sepnutí zapalovací cívky. ..	76
Obr. 53. Výsledky hledání proudových impulzů s využitím detektoru pulzů na signálu s $f_{vz} = 5$ kHz. ....	77
Obr. 54. Histogram zpoždění jiskry ze sta odměřů na jedné svíčke.....	78
Obr. 55. Filtrace zpoždění pomocí exponenciálního klouzavého průměrování. ....	79
Obr. 56. Signál ze sekundárního vinutí přes kapacitní vazbu. ....	81
Obr. 57. Frekvenční spektrum projevu kapacitní části jiskrového výboje po aproximaci. ....	82
Obr. 58. Amplitudová spektra separovaných proudových odběrů motoru stěrače bez poruch i s poruchami při nižší rychlosti otáčení.....	84
Obr. 59. Amplitudová spektra separovaných proudových odběrů motoru stěrače bez poruch i s poruchami při vyšší rychlosti otáčení.....	85
Obr. 60. Časové průběhy separovaného proudového odběru různých typů motoru stěrače s poruchou zadíráání.....	88
Obr. 61. Amplitudové spektrum separovaného proudového odběru různých typů motoru stěrače s poruchou zadíráání. ....	88
Obr. 62. Amplitudové spektrum separovaného proudového odběru různých typů motoru stěrače bez poruchy. ....	89
Obr. 63. Amplitudové spektrum separovaného proudového odběru motoru stěrače s poruchou zadíráání při různých rychlostech stírání. ....	89
Obr. 64. Zjednodušené schéma napájecí soustavy automobilu Škoda Fabia II.....	94
Obr. 65. Zjednodušené schéma napájecí soustavy automobilu Škoda Fabia III. ....	94

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Proudový odběr typických elektrických zařízení v automobilu s přechodovým charakterem odběru proudu.....	19
Tabulka 2: Proudový odběr typických elektrických zařízení v automobilu s pulzním průběhem odběru proudu. ....	20
Tabulka 3: Proudový odběr typických elektrických zařízení v automobilu s periodickým průběhem odběru proudu. ....	20
Tabulka 4: Střední hodnota a rozptyl zpoždění jiskry z 90 náměrů na 9 svíčkách. ..	37
Tabulka 5: Tlak ve válci zážehového motoru v závislosti na otáčkách.....	39
Tabulka 6: Parametry vzorů (template) ovlivňující velikost SAD.....	67
Tabulka 7: Prahovací úrovně pro klasifikaci příznaků.....	67
Tabulka 8: Počty nalezených příznaků z 1000 poruchových náměrů. ....	67
Tabulka 9: Počty nalezených příznaků z 1000 bezporuchových náměrů.....	68
Tabulka 10: Zjednodušené shrnutí hypotéz $H_0$ .....	69
Tabulka 11: Počet vzorků na příznak při změně vzorkovací frekvence.....	72
Tabulka 12: Prahovací úrovně pro klasifikaci příznaků při $f_{vz} = 6,25$ MHz.....	72
Tabulka 13: Počty nalezených příznaků z 1000 poruchových náměrů při $f_{vz} = 6,25$ MHz. ....	73
Tabulka 14: Počty nalezených příznaků z 1000 bezporuchových náměrů při $f_{vz} = 6,25$ MHz. ....	73
Tabulka 15: Prahovací úrovně pro klasifikaci příznaků při $f_{vz} = 62,5$ kHz. ....	73
Tabulka 16: Počty nalezených příznaků z 1000 poruchových náměrů při $f_{vz} = 62,5$ kHz. ....	74
Tabulka 17: Počty nalezených příznaků z 1000 bezporuchových náměrů při $f_{vz} = 62,5$ kHz. ....	74
Tabulka 18: Popis klasifikační metody na konkrétní zapalovací svíče. ....	80
Tabulka 19: Výsledky časové lokalizace přeskočení jiskry při $f_{vz} = 7,4$ MHz. ....	82
Tabulka 20: Nárůst proudu ve spektrální oblasti 1. harmonické rotoru po zapnutí stěrače. ....	84
Tabulka 21: Nárůst proudu ve spektrální oblasti 1. harmonické rotoru po zapnutí stěrače. ....	86
Tabulka 22: Nárůst proudu ve spektrální oblasti 2. harmonické rotoru po zapnutí stěrače. ....	86
Tabulka 23: Nárůst proudu ve zkoumaných spektr. oblastech po zapnutí stěrače. ...	87



# 1 Úvod

Bezpečnost a spolehlivost v automobilovém průmyslu je již od vzniku prvního automobilu velmi diskutovaným tématem [1]. Automobilky jsou neustále nuceny snižovat výrobní náklady i přes protichůdný požadavek zvyšování komfortu pomocí moderních technologií. Trend snižování výrobních nákladů je patrný z [2] a popis použití nových technologií v automobilovém průmyslu je popsán například v [3]. Jednou z možností takového snižování je používat při výrobě levnější materiály. To s sebou však přináší i zvýšené nároky na kontrolu částí z těchto materiálů vyráběných. Takováto kontrola je řešena pomocí palubní vozidlové diagnostiky. Současný stav řešení palubní vozidlové diagnostiky se zakládá na decentralizovaném konceptu, který detekuje následky vzniklé poruchy. Při vyšším nároku na diagnostiku v decentralizovaném konceptu roste počet měřicích sond a vyhodnocovacích jednotek a tím opět stoupají náklady. Moderní metody automobilové diagnostiky v decentralizovaném konceptu popisuje [4] a [5].

Tato práce se zabývá diagnostickými možnostmi centralizovaného uspořádání palubní vozidlové diagnostiky. Centralizovaná vozidlová diagnostika funguje na principu měření elektrického proudu v napájecí síti automobilu v několika měřicích bodech. K rozpoznání poruch zařízení, které se projevují v napájecí síti vozidla, je vyžadována velmi přesná znalost všech elektrických částí automobilu. Důležitá je znalost chování těchto zařízení jak v bezporuchovém, tak v poruchovém stavu. K tomu jsou v některých případech využívány diagnostické modely těchto elektrických částí automobilu, příkladem může být model pro detekci zapalování v [6] či jiný příklad využití modelu ke hledání poruchy akčních členů v [7]. Pojem centralizované a decentralizované diagnostiky bude podrobně vysvětlen níže a je částečně popsán v [8], [9] a [10].

I když metoda centralizované diagnostiky umožňuje diagnostiku teoreticky všech elektrických a elektromechanických částí vozidla, reálně diagnostikovatelná množina vozidlové výbavy je značně omezena. Tato práce si mimo jiné stanoví za cíl nalezení tohoto reálného omezení.





## 2 Současný stav vozidlové diagnostiky

S rozvojem automobilového průmyslu se do dnešních vozidel instaluje stále větší množství elektronických systémů a akčních členů. Dnes již dokonce existují automobily obsahující i padesát řídicích jednotek. Takovéto množství vozidlových systémů však v případě jakékoliv poruchy klade zvýšené nároky na její správnou lokalizaci. V dnešním automobilovém průmyslu jsou proto kladeny vysoké požadavky na rozvoj diagnostických postupů.

### 2.1 Současný decentralizovaný přístup

V dnešních automobilech je umístěno hned několik elektronických řídicích jednotek. Každá se stará o určitou část vozidla a zároveň je ve vozidle umístěna na jiném místě tak, aby se minimalizovala délka vodičů potřebných k propojení senzorů a akčních členů, které jsou k dané jednotce připojeny. Tyto řídicí jednotky jsou mezi sebou navzájem propojeny tak, aby si mohly předávat důležité informace. Diagnostiku vlastních senzorů a akčních členů si však každá jednotka zajišťuje sama, proto se z pohledu diagnostického hovoří o decentralizovaném přístupu.

#### 2.1.1 Úvod

První motorová vozidla využívala elektrickou energii pouze pro vznik zážehu u spalovacích motorů, s postupem doby začaly moderní automobily využívat elektrickou energii pro osvětlení, startování, stěrače atd. Do této doby ve vozidlech prakticky nebyla využívána elektronika. Uživatel byl nucen před každou jízdou provádět kontrolu stavu motoru optickou prohlídkou předem stanovených částí motoru. Pokud nastala nějaká porucha, její lokalizace byla opět prováděna optickou prohlídkou, případně akustickou kontrolou jednotlivých částí motoru.

Jak se automobilový průmysl rozvíjel, začala motorová vozidla využívat senzory (převodníky neelektrických veličin na elektrické) pro indikaci poruchového stavu, jako je například nedostatek motorového oleje, vysoká teplota motoru, porucha brzdového systému atd. Výrobci motorových vozidel se postupem doby také sjednotili v indikaci základních provozních parametrů na palubní desce vozidel.

Do motorových vozidel se dále začalo instalovat větší a větší množství elektronických jednotek jak pro optimalizaci spotřeby a zvýšení výkonu motorů, tak pro zlepšení jízdních vlastností a zvýšení cestovního komfortu přepravovaných osob. Elektronika však již začala zásadním způsobem zasahovat i do samotného ovládání vozidla. Jako příklad může být uvedeno elektrohydraulické servořízení, antiblokovací systém brzd, parkovací asistent, adaptivní tempomat atd. Nasazení elektroniky do oblasti bezpečnostně kritických systémů spolu přináší i zvýšené nároky na detekci poruchy (diagnostiku) této elektroniky a její okamžité odstavení.

Diagnostika poruchy elektronických systémů byla zcela ponechána v režii výrobce daného systému v závislosti na požadavcích konkrétní automobilové společnosti. Jednotná pravidla pro diagnostiku poruchy elektronických systémů nejsou dodnes specifikována. První náznak sjednocení požadavků na automobilovou diagnostiku se začíná objevovat se systémem OBD (On-Board Diagnostics), což je normou definovaný protokol, sloužící k diagnostice emisních systémů automobilu.

Od nástupu elektroniky do motorových vozidel se mění postup oprav automobilů, ty se nyní dělí na opravy mechanické a elektrické. Aby ovšem mohla být porucha opravena, musí být nejprve diagnostikována příčina jejích projevů. Od vzniku systému OBD se hovoří o rozdělení diagnostického hledání závad. Ty je možné hledat pomocí vnitřní diagnostiky, také nazývané sériová diagnostika, a vnější diagnostiky, nazývané paralelní diagnostika, podrobněji popsáno v [11].

### ***2.1.2 Vnitřní diagnostika (sériová diagnostika)***

Vnitřní diagnostika umožňuje hledat či lokalizovat závady pomocí informace získané z elektroniky instalované ve vozidle. Z počátku byly informace o závadě indikovány přímo na palubní desce řidiče pomocí příslušné kontrolky. S přibývajícím počtem senzorů se ukázala nutnost seskupení indikace více typů poruch pod jednu kontrolku, přičemž bylo třeba zachovat jejich rozlišení. Tuto potřebu řešil systém OBD I pomocí takzvaného blikacího kódu, kterým se definuje typ poruchy pomocí specifického blikání kontrolky. Následně bylo a do dnešní doby také je k přenosu identifikačního kódu poruchy využíváno diagnostické vedení.

V současných automobilech je umístěno více elektronických jednotek (řídících jednotek, ECUs – Electronic Control Units). Každá ECU monitoruje (diagnostikuje) nejen sama sebe, ale také všechny senzory a akční členy (aktuátory) k ní připojené. Pokud na jakémkoli z diagnostikovaných prvků vyhodnotí poruchu, uloží informaci o zjištěné poruše do vlastní paměti závad a podle závažnosti diagnostikované poruchy se přepne do nouzového režimu a předá informaci o poruše řidiči vozidla prostřednictvím kontrolky na palubní desce automobilu. Informace o poruše bývá však často velice nekonkrétní. Zpřesněním diagnostikované poruchy v současném řešení automobilů se zabývá například [12].

Vyčtení těchto závad z paměti jednotlivých ECU se dnes provádí pomocí diagnostických přístrojů. Těchto přístrojů je celá řada a zpravidla platí, že každý výrobce automobilů (koncern) používá jiný diagnostický přístroj. Existují i univerzální diagnostické přístroje, ale jejich funkcionalita bývá značně omezena. Diagnostické přístroje pro automobily určené na evropský trh dnes musí splňovat protokol EOBD (obdoba OBD II), což jim umožňuje nejen vyčtení paměti závad, ale také její mazání, sledování hodnot získaných ze senzorů připojených k dané jednotce, testování akčních členů a samotné programování řídící jednotky (například základní nastavení). Více informací o vnitřní diagnostice je k nalezení v [13].

### **2.1.3 Vnější diagnostika (paralelní diagnostika)**

Vnější diagnostika se zakládá na původním způsobu lokalizace poruchy v motorových vozidlech. Základem je optické a akustické vyšetření vozidla, ale v dnešní době především diagnostika pomocí jiných elektrických i neelektrických měřicích přístrojů. Těmi jsou především multimetr (pro měření odporů vedení, napájecího napětí, proudů, či kostřicích bodů), osciloskop (pro měření dynamických dějů), analyzátor emisí výfukových zplodin (pro určení kvality hoření směsi) či manometr. Metoda hledání automobilových poruch pomocí osciloskopu sleduje dynamické změny elektrických signálů v automobilu, stejně jako diagnostické metody představené v této disertační práci. Hledání poruch pomocí osciloskopu je představeno například v [14]. Jako vnější diagnostika se také uvádí metoda výměny podezřelých dílů.

K lokalizaci poruchy pomocí vnější diagnostiky se zpravidla přistupuje i po identifikaci poruchy pomocí vnitřní diagnostiky. Informace z vnitřní diagnostiky nemusí být vždy spolehlivá, ba dokonce často nemusí být žádná - i přes zjevnou poruchu motorového vozidla.

Vnější diagnostikou vozidla se zabývá několik specializovaných vědních oblastí, které si kladou za cíl lokalizovat závadu bez nutnosti rozebrání funkčního celku vozidla, stejně jako je tomu u metody centralizované vozidlové diagnostiky. Příkladem může být diagnostika hluku a vibrací, viz [15], nebo tribotechnická diagnostika, oba diagnostické obory jsou také popsány v [16].

### **2.1.4 Systém OBD (On-Board Diagnostics)**

Již na počátku osmdesátých let 20. století byla Kalifornie vlivem velké hustoty osídlení se značným stupněm motorizace vystavena vysokému znečištění ovzduší. To vedlo k potřebě omezení emisí výfukového systému automobilů a vzniku prvního systému sjednocujícího požadavky na diagnostiku určitých částí automobilu. Tento systém vznikl v roce 1988 a je označován zkratkou OBD I.

**OBD I** nařizuje kontrolovat veškeré elektronické komponenty ovlivňující emise výfukových plynů elektronikou umístěnou přímo ve vozidle. Pokud je zaznamenána porucha, je o ní řidič vozidla informován pomocí kontrolky na palubní desce vozidla. Rozlišení konkrétní poruchy bylo realizováno tzv. blikacím kódem. Nebylo však specifikováno, jakým způsobem má být tento kód interpretován. Blikací kód byl nejprve zobrazován pomocí informační kontrolky na palubní desce automobilu, později byl však přenášen pomocí diagnostického vedení označované jako K-vedení do diagnostického přístroje. Přenos po vedení byl jednosměrný a k jeho inicializaci docházelo například sepnutím zapalovacího klíčku nebo pomocí druhého vedení označovaného jako L. Konektor pro diagnostické vedení však také nebyl specifikován, a proto se lišil podle výrobce vozidel a někdy dokonce i podle modelů.

**OBD II** vešla v platnost v USA v lednu 1996. Z hlediska emisí výfukových plynů nařizuje kontrolu nejen elektronických komponent, ale i všech ostatních komponent ovlivňujících složení výfukových plynů. Zavádí povinnost kontrolovat především stárnutí katalyzátoru, stav systémů recirkulace spalín a sekundárního vzduchu, monitorování palivového systému, lambda sond a vynechání motoru. Dalším důležitým přínosem je standardizace konektoru a přenosových protokolů. Došlo k jednoznačnému označení poruch přímo souvisejících s emisemi výfukového systému. Byly definovány vzhled a barva kontrolky MIL (Malfunction Indicator Lamp) pro indikaci poruchy způsobující zvýšené emise a dalších částí motoru.

**EOBD** je označení pro evropskou verzi OBD II, která OBD II plně přebírá. Její povinné dodržování platí pro určitá nově vyrobená vozidla od roku 2000, přičemž v následujících letech se kategorie nově vyrobených vozidel, která tuto specifikaci musela dodržovat, rozšiřovaly. Více o protokolu OBD je například v [13] a [16].

I přes zavedení povinného systému EOBD pro evropská vozidla mají výrobci motorových vozidel volné ruce v oblasti vnitřní diagnostiky, proto ji nelze popsat zcela obecně. V zásadě však platí, že si každá řídicí jednotka diagnostikuje sama své senzory a aktuátory. Pro správnou funkci senzorů se sleduje velikost napájecího napětí, rozsah výstupních hodnot snímače, provádí se kontrola věrohodnosti dat na základě dalších dostupných informací a některé důležité senzory jsou dokonce duplikovány. Aktuátory jsou sledovány z hlediska odebíraného proudu nebo pomocí jiného senzoru, který je přímo či nepřímo ovlivněn změnou stavu daného aktuátoru. Většina výstupů a vstupů řídicí jednotky je také sledována z hlediska přerušení nebo zkratu na kostru či na napájecí vedení.

### ***2.1.5 Diagnostika zapalovací soustavy spalovacích motorů***

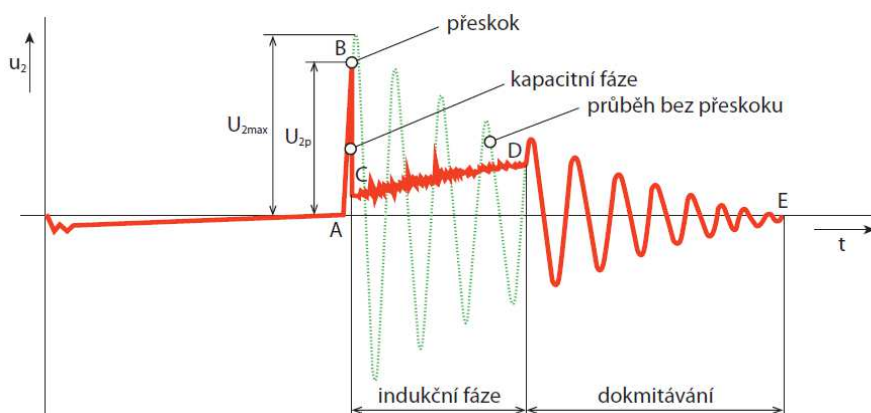
Diagnostiku poruch v zapalovací soustavě automobilu lze opět rozdělit na diagnostiku řešenou v odborném autoservisu, tedy na vnější, a palubní diagnostiku zajištěnou řídicí jednotkou motoru, tedy vnitřní.

#### **Vnější diagnostika**

V neodborném servisu se lokalizace poruchy zážehového motoru často řeší postupnou výměnou jednotlivých dílů zapalovací a vstříkovací soustavy, dokud nedojde k výměně reálně poškozeného dílu. V odborném servisu zkušený automechanik k lokalizaci poruchy motoru používá osciloskop. Pomocí kapacitního klešťového snímače a osciloskopu lze měřit dynamický průběh napětí na sekundární straně zapalovací cívky, ze kterého je možné identifikovat poškozený díl, a to nejen zapalovací soustavy.

Napětí na sekundárním vinutí cívky bateriového (klasického) zapalování má charakter podle obr. 1. Jelikož je tento průběh velmi podrobně popsán v [17], bude zde citována pouze nejdůležitější část kapitoly z této publikace. „První fáze vybíjecího pochodu probíhá od okamžiku, kdy se rozpojí kontakty přerušovače (bod A), až do okamžiku, kdy přeskóčí jiskra (bod B). Doba, která uplyne mezi body **A** a **B**, je asi 1 ms ( $10^{-3}$  s). Pokud by nenastal přeskok jiskry, sekundární napětí by dosáhlo hodnoty  $U_{2max}$  a v sekundárním obvodu by nastaly tlumené oscilace (naznačeno čárkovaně). Ve skutečném provozu dojde při napětí  $U_{2p}$  (bod B) k průrazu mezi elektrodami svíčky a tím se děj v sekundárním obvodu podstatně změní. První část výboje se nazývá *kapacitní*. Tento děj trvá asi 100 ns až 10 ns ( $10^{-7}$  s až  $10^{-8}$  s) a na grafu jej tedy v závislosti na čase nelze znázornit (je představován svislou čarou). Z analogií s podobnými ději lze usuzovat, že se jedná o řadu silně tlumených vysokofrekvenčních kmitů. Uvolní se sice poměrně malé množství energie, ale ve velmi krátkém čase - to znamená, že hustota energie, a tedy i výkon jsou značné. Výboj začne vybitím kapacity svíčky, která je asi 5 pF až 15 pF. Pro zapálení směsi je tato část výboje nejdůležitější. Po vybití energie nahromaděné v kapacitě elektrod svíčky následuje výboj kapacity kabelů. Průrazem klesne velmi rychle napětí mezi elektrodami svíčky z hodnoty  $U_{2p}$  na malé napětí výboje. Energie nashromážděná v magnetickém poli nemá na kapacitní část výboje žádný vliv, protože se vzhledem k velké indukčnosti může uvolňovat jen pomalu. Mezi body **C** a **D** vzniká *indukční* část výboje, do které je přivedena větší část energie nashromážděná v soustavě. Je to celá řada po sobě rychle následujících průrazů a zhasnutí, které se na osciloskopu jeví jen jako světlé pásmo, ohraničené obalovou křivkou těchto výbojů. Na konci indukčního výboje může dojít i k vzrůstu sekundárního napětí, a to tím více, čím vyšší je ve válci tlak. Úsek mezi body **D** a **E** jsou tlumené kmitů, které by byly v soustavě od počátku, pokud by nedošlo k průrazu. Na zapalování již nemají žádný vliv, musí však skončit dříve, než dojde k novému sepnutí kontaktů přerušovače.“ I když se jedná o klasické zapalování, princip v současné době nejběžněji používaného plně elektronického zapalování je podobný.

Z takového dynamického průběhu sekundárního napětí zkušený automechanik dokáže lokalizovat pravděpodobnou poruchu v konkrétním válci motoru. Z příliš vysokého průrazného napětí se dá usuzovat na nadměrné oddálení elektrod, z malého napětí na nízký kompresní tlak či zvýšenou bohatost směsi. Z hodnoty a tvaru kmitů v indukční části hoření jiskry lze vyhodnotit netěsnosti v sacím potrubí, bohatost směsi, ucpané vstřikovací ventily, netěsnost válce či zanesený vzduchový filtr. Ukazateli stavu zapalování jsou také doba hoření jiskry či dokmitání po zhasnutí jiskry, které může poukázat na mezizávitové zkratky nebo poškození izolace vysokonapěťové části.



Obr. 1. Průběh napětí na sekundární straně zapalovací cívky (upraveno z [17]).

S příchodem moderních jednojiskrových cívek spojených se svíčkou (SIC – Single Ignition Coil), viz obr. 2, došlo ke ztrátě možnosti měřit sekundární napětí cívky kvůli nedostatečnému přístupu k zapalovací cívce, která je z velké části zasunuta do konstrukce motoru. Zpočátku bylo možné tento fakt řešit měřením dynamického průběhu napětí v primárním obvodu, který také obsahoval většinu potřebné informace, ovšem po integraci koncového stupně do samotné SIC cívky včetně odrušovacího filtru byl i tento zdroj informace odstraněn.



Obr. 2. Zobrazení jednojiskrových zapalovacích cívek (SIC – Single Ignition Coil) [18].

### Vnitřní diagnostika

Od roku 2000, kdy v Evropě vešel v platnost systém regulace EOBD vycházející z americké OBD II, mají automobily (skupiny M<sub>1</sub> a N<sub>1</sub> kategorie I, ostatní později) povinnost kontrolovat vynechání zapalování, aby nedošlo k enormnímu nárůstu škodlivin ve výfukových plynech a následnému poškození katalyzátoru a lambda sond vlivem vzplanutí pohonné směsi ve výfukovém systému.

Vynechání zapalování lze sledovat pouze nepřímo. V praxi je vynechání identifikováno vyhodnocením změny úhlové rychlosti klikového hřídele, sledováním signálu z indukčního snímače polohy klikového hřídele. Popis principu lze nalézt v [19]. Synchronizace vůči prvnímu válci je realizována Hallovým senzorem polohy vačkového hřídele. Po zapálení směsi by na senzoru polohy klikového hřídele mělo být zaznamenáno odpovídající zrychlení. Rozmezí očekávaných hodnot je uloženo v řídicí jednotce a je algoritmem vyhodnocováno mimo jiné i v závislosti na velikosti torzních kmitů způsobených nerovnoměrným povrchem vozovky, prudkou změnou zátěže nebo spínáním klimatizace. Povrch vozovky je identifikován pomocí akcelerometru umístěného na karosérii vozidla.

Vyhodnocení výpadku zapalování se provádí nepřetržitě s vysokou prioritou ve dvou úrovních po uplynutí pěti sekund od startu motoru. První úroveň sleduje možné poškození katalyzátoru vyhodnocováním procentního vynechání zážehů v porovnání s mapovým polem procentních hodnot v závislosti na otáčkách a zatížení. Druhá úroveň sleduje překročení emisních limitů, pokud je 5 z posledních 16 testů chybových.

Takovýmto způsobem je sice zjištěno, že nedochází k zapalování v konkrétním válci motoru, do kterého je následně přerušen přívod paliva, není však identifikována konkrétní příčina poruchy, která může vzniknout jak ve vstřikovacím, tak v zapalovacím systému.

## **2.2 Centralizovaná vozidlová diagnostika**

Centralizovaná vozidlová diagnostika je nový přístup řešení automobilové vnitřní diagnostiky využívající známé postupy dnes používané v oblasti vnější diagnostiky, se snahou aplikovat je v jednom centrálním místě vozidla.

### **2.2.1 Základní myšlenka**

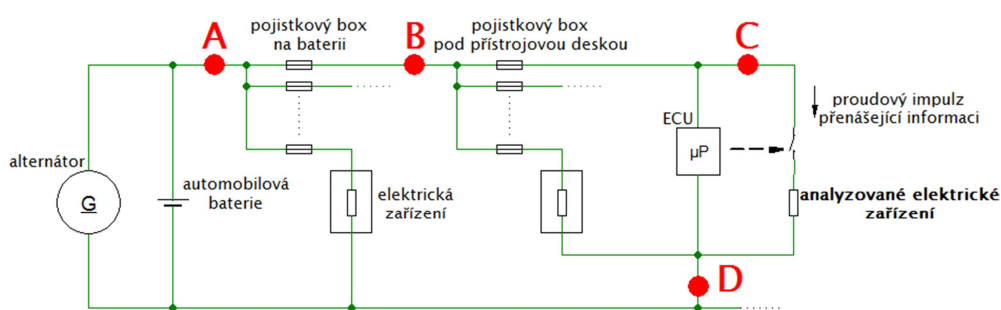
Základní myšlenka centralizovaného konceptu vozidlové diagnostiky vychází z faktu, že veškeré změny stavů elektrických zařízení jsou provázeny přesně definovanými fyzikálními ději. Ať jde o změnu logického bitu uvnitř procesoru (dochází k sepnutí jednoho či více tranzistorů), nebo o otočení rotoru stejnosměrně napájeného elektrického motoru (vzájemné působení magnetických polí provázené přepínáním vinutí pólů na kartáčích), vždy dochází k fyzikálnímu jevu, který je doprovázen projevem v napájecí síti elektrického obvodu.

Když budeme uvažovat, že zkoumané elektrické zařízení, v němž chceme pozorovat změnu stavu, bude připojeno k ideálnímu zdroji napětí, projev fyzikálního děje provázejícího změnu stavu bude možné sledovat ve změně elektrického proudu odebíraného ze zdroje. V opačném, spíše teoretickém případě, při připojení elektrického zařízení k ideálnímu zdroji proudu, je možné se změnou stavu pozorovat změnu napájecího napětí. Pokud přejdeme od ideálních zdrojů elektrické

energie k reálnému zdroji, budeme moci se změnou stavu elektrického zařízení pozorovat příznaky, a to jak ve změně odebíraného proudu, tak ve změně napájecího napětí. Jelikož se však v praxi, a v případě automobilu to platí obzvláště, používají napájecí zdroje s charakterem blízkým ideálnímu zdroji napětí, jsou projevy fyzikálních dějů elektrických zařízení pozorovatelné mnohonásobně lépe v odebíraném proudu.

Koncept centralizované vozidlové diagnostiky využívá právě tento základní poznatek. V napájecí síti automobilu je tedy teoreticky možné pozorovat stavy a chování všech elektrických zařízení automobilu. V ideálním případě je tudíž možné použít pouze jediný senzor proudu umístěný mezi napájecím zdrojem a spotřebiči. V praxi je však potřeba použít více proudových senzorů a ani v takovém případě nelze vždy pozorovat chování všech zařízení s dostatečnou přesností.

Metoda centralizované vozidlové diagnostiky je založena na měření průběhu napájecího proudu ve stávajících elektrických rozvodech vozidla, díky čemuž mohou být výrazně sníženy náklady spojené s instalací při konečné realizaci systému v automobilu. V ideálním případě stačí vložit proudovou sondu na vodič spojující autobaterii (včetně alternátoru) a elektrické části (spotřebiče) vozidla a signál z této proudové sondy vyhodnocovat v centrální diagnostické jednotce. Jak již bylo popsáno, v měřeném proudu jsou obsaženy informace o stavu a chování všech elektrických částí automobilu. V diagnostikovaném průběhu odebíraného proudu jsou ale měřitelné také důsledky mechanických projevů, například od táhel stěrače, elektricky ovládaného okénka nebo elektrohydraulického posilovače řízení.



Obr. 3. Měřicí body (A, B, C a D) v napájecí síti automobilu.

Centralizovaná vozidlová diagnostika využívá jako hlavní zdroj informace napájecí síť automobilu. Na obr. 3 jsou znázorněny možné měřicí body (A, B, C a D) v napájecí síti automobilu. V ideálním případě je pomocí proudové sondy v měřicím bodě A snímán odebíraný proud z autobaterie a alternátoru a z tohoto proudu jsou následně identifikovány funkční stavy všech elektrických částí automobilu. Měřicí bod B představuje částečnou separaci několika měřených



zařízení, tak jak to umožňuje napájecí síť. V této práci byl použit pouze jeden měřicí bod B, umístěný za pojistkou na akumulátoru, ze které jsou napájena všechna elektrická zařízení připojená do pojistkového boxu pod volantem testovaného automobilu Škoda Fabia II. Měřicí bod C označuje takové místo v napájecí síti vozidla, ve kterém lze měřit separovaný proud, tedy proudový odběr jednoho elektrického zařízení. V měřicím bodě D lze měřit proud několika zařízení, která jsou přivedena do stejného kostřičního bodu vozidla. Jako vedlejší zdroj informace mohou být v případě potřeby využita data přenášená po komunikační sběrnici CAN (Controller Area Network).

Centralizovanou vozidlovou diagnostiku lze rozdělit do tří částí. První část se týká získávání dat (příznaků) z měřicích sond. Jejich kvalita závisí na dynamickém rozsahu, vzorkovací frekvenci a efektivním počtu bitů použitého měřicího zařízení. Druhá část se zabývá lokalizací a separací konkrétních příznaků a třetí interpretací příznaků a klasifikací stavů diagnostikovaných komponent.

Počet současně diagnostikovatelných zařízení je určen kvalitou algoritmu pro lokalizaci a separaci příznaků. Lokalizace a separace příznaků může být založena například na detektoru pulzů, korelační funkci, filtrech typu pásmové propusti či horní propusti atd. Významné informace používané pro lokalizaci a separaci příznaků mohou být získány také z příslušné sběrnice CAN přenášející spouštěcí signál nebo sadu podpůrných informací. Největší problém v centralizované vozidlové diagnostice nastává při lokalizaci a separaci příznaků ze zařízení s nízkým proudovým odběrem. To může být částečně vyřešeno použitím více sond v bodech B, nebo dokonce v bodech C namísto jedné sondy v bodě A (znázorněno na obr. 3). Použitím měřicích bodů C je dosaženo přirozené separace příznaků diagnostikovaných zařízení napájených z různých větví, ale použití jednoho měřicího bodu A je cestou nesrovnatelně levnější. Výsledné uspořádání by vždy mělo být kompromisem mezi použitelností a finančními náklady. Pro získání optimálních výsledků by bylo výhodné rekonstruovat rozvodnou síť vozidla tak, aby příslušná sonda nemusela využívat velký dynamický rozsah měření. K nalezení nejlepšího kompromisu je potřeba identifikovat a vyhodnotit každé potencionálně diagnostikované zařízení v příslušném měřicím bodě C k určení nejistoty měření, která je potřebná pro budoucí úspěšnou interpretaci příznaků a klasifikaci stavů diagnostikovaného zařízení. Dalším krokem je zjištění, zda lokalizační a separační algoritmus (vybraný pro příslušný příznak) může poskytnout příznaky požadované kvality měřením v bodech B, nebo dokonce v bodě A. S problémem lokalizace příznaku souvisí i řešení problému se souběhem několika poruch zároveň, toto téma je řešeno například v [20] a [21].

Výsledky interpretace příznaků a algoritmu klasifikujícího stavu diagnostikovaného zařízení závisí na schopnosti popsat vliv změny stavu diagnostikovaného zařízení na příznak a na opakovatelnosti příznaků pro konkrétní stavy. Některé algoritmy mohou být dokonce nastaveny tak, že dokážou předpovídat

nadcházející poruchy diagnostikovaného zařízení, a díky tomu mohou být kritické komponenty opraveny nebo vyměněny dříve, než dojde k jejich selhání.

V porovnání s dnes používaným decentralizovaným konceptem přináší metoda centralizované diagnostiky několik výhod. Může snížit náklady díky redukci diagnostických sond (v nejlepším případě pouze jedna sonda) použitím specializovaného zařízení. V mnoha případech je možné klasifikovat stavy diagnostikovaného zařízení lépe než v nyní používaném řešení. Díky analýze příznaků je v některých případech možné chybu dokonce predikovat a v neposlední řadě je možné systém rozšířit o analýzu dalších elektrických částí bez hardwarové úpravy, stačí pouze nahrát nový firmware. Naopak nevýhody tato metoda přináší v nutnosti aplikace složitých výpočetních algoritmů, klade velké nároky na kvalitu, přesnost a výkon hardware. V neposlední řadě přináší výsledky s větší nepřesností a chybovostí, výsledky proto musí být vyhodnocovány statisticky.

### ***2.2.2 Současný stav centralizované vozidlové diagnostiky***

Ověřením principů konceptu centralizované diagnostiky se již ve své práci nazvané Possibility of Vehicular Electric Equipment Diagnostics Using Power Supply Network Transient Analysis [22] zabýval Ing. Petr Ježdík, Ph.D. Věnoval se rozboru interpretace příznaků na napájecí síti pro typické části automobilu se spalovacím motorem, konkrétně na vozidle Škoda Fabia I. Zaměřil se na světelné vybavení a částečně i na zapalovací systém, vstřikovací ventily a elektrické rotační stroje. U každé zkoumané části vytvořil rozbor mechanické konstrukce, představil diagnostický model, diskutoval diagnostické možnosti a navrhl možné úpravy systému, jež by přispěly k lepší interpretaci příznaků na napájecí síti vozidla. Pro interpretaci příznaků využil možnosti separovat daný příznak měřením v bodě C, oproti obr. 1 však využíval napájecí vodič se zápornou polaritou, neboť u výsledného centralizovaného konceptu preferoval měření shluku signálů jednou sondou v centrálním kostřicím bodě vozidla.

Ve své práci se doktor Ježdík zabýval podrobněji interpretací příznaků žárovek s wolframovým vláknem, kdy zkoumal vliv opotřebení žárovky na změnu příznaků v napájecí síti, a zapalovacím systémem spalovacích motorů, kde hledal vhodnou metodu k rozlišení dvou typů poruch. Závěrem jeho práce bylo potvrzení teoretických předpokladů centralizovaného konceptu automobilové diagnostiky a návrh možností v pokračování jeho práce.

Ve studii zapalovacího systému našel doktor Ježdík dva charakteristické příznaky poruchy v přechodovém ději primárního proudu zapalovací cívky. Oba příznaky naměřil při simulaci poruchy pomocí odpojené zapalovací svíčky. Jeden z příznaků označil jako poruchu odpojené svíčky s elektrickým průrazem vzduchové mezery a přiřadil takovéto chování poruše při nadměrně oddálených elektrodách zapalovací svíčky (v práci označena jako porucha číslo 1). Druhý příznak označil

jako poruchu odpojené svíčky s elektrickým průrazem izolace na vysokonapěťovém kabelu, neboť měřil na dvoujiskrovém systému zapalovací cívky (DIC – Double Ignition Coil) a přiřadil takovéto chování poruše způsobené zanesením elektrod zapalovací svíčky olejem (v práci označena jako porucha číslo 2). Z těchto předpokladů stanovil další závěr, že časová poloha takto nalezeného příznaku v měřeném proudu odpovídá míře oddálení či zanesení elektrod zapalovací svíčky.

Tyto odlišné projevy našel při simulaci poruchy odpojené zapalovací svíčky a označil každý projev za krajní situaci poruchy vzniklé v jiskřišti svíčky. Toto označení se při validaci výsledků v této práci ukázalo jako nepřesné. Poruchy vzniklé v jiskřišti zapalovací svíčky se projevují jinými příznaky, neboť samotná zapalovací svíčka není pouhý vodič přenášející elektrický potenciál z prostoru mimo motor do zapalovací oblasti válce, ale obsahuje i sériově zapojený odrušovací rezistor, viz [23]. Příznaky poruch, jež byly naměřeny v práci doktora Ježdíka při simulaci poruchy odpojené svíčky, tak odpovídají právě této poruše a nikoliv poruchám zanesených či nadměrně oddálených elektrod zapalovací svíčky. To vedlo k potřebě důkladnějšího průzkumu poruch zapalovací soustavy.

Doktor Ježdík ve své dizertační práci dále porovnal tři klasifikační metody pro poruchy zapalovacího systému s ohledem na jejich použitelnost v systému centralizované vozidlové diagnostiky. Jako jedinou vhodnou označil metodu vlnkové transformace s využitím mateřské vlnky z rodiny Gaussian. Pro poruchu označenou číslem 1 použil vlnku řádu 2 a pro poruchu označenou číslem 2 použil vlnku řádu 3. Přesný popis metody hledání poruchy s využitím vlnkové transformace lze nalézt v [22].

Tato práce je tedy plynulým navázáním na výsledky prezentované v práci doktora Ježdíka, přičemž zásadním způsobem rozšiřuje množinu nalezených poruch a pro dříve popsané poruchy nachází robustnější klasifikační metody.

## 2.3 Shrnutí

Vozidlová diagnostika se rozděluje na vnější a vnitřní diagnostiku, tedy na hledání závad člověkem, ať už za použití dalšího zařízení, či nikoliv, nebo pomocí elektroniky umístěné na palubě vozidla. Současná vnitřní diagnostika často neposkytuje dostatečnou informaci k přesné lokalizaci poruchy, proto musí být doplněna metodami vnější diagnostiky. Byla proto představena nová metoda centralizované vozidlové diagnostiky, která si klade za cíl v oblasti vnitřní diagnostiky aplikovat metodu známou z oblasti vnější diagnostiky, s přihlédnutím k minimalizaci s tím spojených nákladů. Konkrétně se jedná o metodu vnější diagnostiky využívající sledování odebíraného proudu pomocí osciloskopu. Byly také představeny postupy používané pro hledání závad v zapalovací soustavě jak vnitřní, tak vnější diagnostikou s využitím osciloskopu.



### 3 Cíle disertační práce

Současný stav vozidlové diagnostiky byl popsán v 2. kapitole. Jedná se o diagnostický přístup založený na decentralizovaném konceptu, který v současné době přijali všichni automobiloví výrobci (vnitřní diagnostika). Tento přístup je založen na činnosti několika řídicích jednotek, které jsou s jistou nadsázkou schopné autonomně řídit určité ucelené části vozidla. Aby byla zajištěna autonomie, musí si každá řídicí jednotka zajistit také vlastní diagnostiku sama sebe, připojených senzorů i aktuátorů. Takováto lokální diagnostika bude vždy dosahovat nejméně výhodnějších analýz poruchového chování, ovšem za cenu zvýšených nákladů. Proto se identifikace některých poruch přenechává k vyhodnocení metodou vnější diagnostiky.

Metoda centralizované vozidlové diagnostiky vznikla s myšlenkou rozšířit množinu poruch analyzovaných vnitřní diagnostikou s možností významné redukce pořizovacích nákladů, neboť by byl pro analýzu více poruch použit pouze jeden měřicí hardware bez nutnosti úpravy současné konstrukce vozidla. Během studia principů centralizované diagnostiky Ing. Petrem Ježdíkem Ph.D. v jeho disertační práci [22], viz kapitolu 2.2.2, se objevila možnost touto metodou poruchy dokonce predikovat.

Tato práce si klade za cíl především rozšířit a klasifikovat množinu poruch, jejichž příznaky jsou měřitelné na napájecí síti vozidla tak, aby byla využitelná nejen pro koncept centralizované vozidlové diagnostiky, ale zároveň aby tyto výsledky bylo možné integrovat do současného decentralizovaného konceptu vnitřní diagnostiky, případně aby usnadnily lokalizaci poruchy pomocí vnější diagnostiky.

Hlavním cílem této disertační práce je stanovit meze centralizované vozidlové diagnostiky s praktickými ukázkami na vybraných vozidlových systémech. Aby bylo možno dosáhnout tohoto cíle, je potřeba splnit tyto dílčí úkoly:

- I. Provést rozbor časových průběhů proudového odběru elektrických částí běžné automobilové výbavy a na jeho základě stanovit diagnosticky významné části z pohledu centralizované vozidlové diagnostiky.
- II. Navrhnout metody vhodné pro klasifikaci proudových průběhů.
- III. Rozšířit množinu poruch pro vybrané vozidlové systémy, jejichž příznaky mají projev identifikovatelný v proudu odebíraném z napájecí sítě vozidla.
- IV. Stanovit meze použitelnosti jednotlivých klasifikačních metod na rozšířené množině poruch v konceptu centralizované vozidlové diagnostiky.
- V. Navrhnout vhodné umístění měřicích bodů v napájecí síti vozidla.



## 4 Rozbor elektrické výbavy automobilu

### 4.1 Analýza proudového odběru elektrických částí automobilové výbavy

Typickým zdrojem elektrické energie v automobilu je buď olovený akumulátor při vypnutém motoru, nebo alternátor při nastartovaném motoru. Mezi alternátorem a baterií mohou téct proudy až 90 A (dle typu alternátoru). Kromě startéru jsou veškeré elektrické prvky v automobilu obvykle chráněny pojistkami. Elektrické prvky s vyšším proudovým odběrem jsou chráněny pojistkou umístěnou přímo na krytu autobaterie, zatímco většina prvků s nižším proudovým odběrem má pojistku umístěnou v prostoru kabiny automobilu (blokově naznačeno na obr. 3). Podrobnější popis proudového odběru nejzajímavějších zařízení z pohledu centralizované vozidlové diagnostiky bude popsán v následujících podkapitolách.

#### 4.1.1 Režimy proudového odběru

Automobil se z pohledu proudového odběru může nacházet v několika režimech. Tyto režimy v podstatě udávají, jaká zařízení jsou, mohou být, případně nemohou být spuštěna. Velmi zjednodušeně lze říci, že režimy proudového odběru automobilu jsou definovány polohou zapalovacího klíčku.

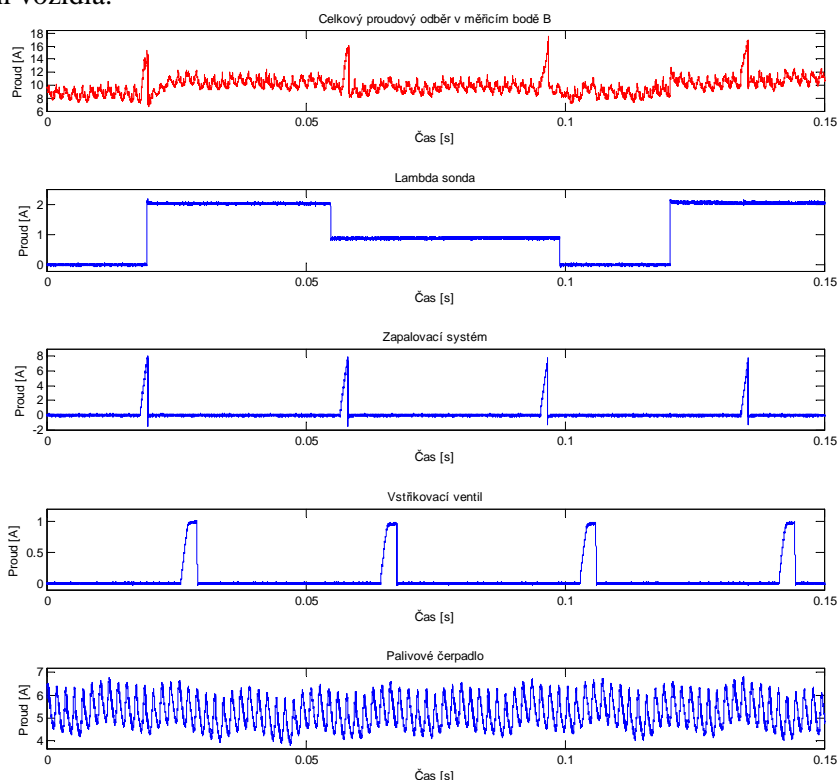
Základním režimem z pohledu proudového odběru je stav, kdy má vozidlo vypnutý motor a je uzamčeno (dále jen režim I). Typickým příkladem může být zaparkované vozidlo na parkovišti, kde může být odstaveno i velmi dlouho dobu. Je tedy kladen důraz na minimální proudový odběr, aby nedošlo k předčasnému vybití baterie, což by v nejlepším případě zabránilo pouze opětovnému nastartování, v horším případě by vedlo k odstavení zabezpečovacího systému a snadné krádeži vozu. Proudový odběr v tomto stavu je u testovacího vozidla (Škoda Fabia II Sport 1.4 16V 63kW MR 2007) v řádu stovek miliampér (změřeno 500 mA) po dobu 30 sekund od okamžiku nastavení režimu I a následně v řádu desítek miliampér (změřeno 60 mA). Proudový odběr odpovídá výbavě vozidla neboli počtu reálně instalovaných elektronických jednotek. Změna proudového odběru je způsobena postupným přepínáním jednotek do režimu se sníženou spotřebou.

Následující režim II odpovídá stavu, kdy je vypnutý motor, klíče nejsou v zapalování, ale vozidlo zároveň není uzamčeno. Proudový odběr pak odpovídá přibližně stejným hodnotám jako v režimu I. V tomto režimu může být proudový odběr navýšen o spotřebu dalších zařízení, která jsou spínána uživatelem.

V režimu III je typický proudový odběr testovaného vozidla v řádu jednotek ampér (změřeno 3,5 A). Jedná se o situaci, kdy jsou klíče v zapalování pootočený do polohy před nastartováním, ale motor je stále ve vypnutém stavu.

Poslední režim IV odpovídá situaci při nastartovaném motoru. Proudový odběr výrazně stoupne díky automatické aktivaci elektrických zařízení zajišťujících samotný chod motoru. Jedná se například o palivové čerpadlo a zapalovací či vstřikovací systém. Hodnota proudu je při vypnutých všech uživatelem ovládaných zařízeních v řádu desítek ampér (změřeno 12 A).

Všechny výše uvedené proudové odběry jsou pouze orientační, neboť jejich hodnota je závislá na konkrétním typu vozidla, jeho výbavě a samotném nastavení funkcí vozu. Proudový odběr automobilu je zde rozdělen do čtyř režimů, které však nepostihují všechny možné situace, pouze vystihují nejběžnější situace při typickém užívání vozidla.



Obr. 4. Proudový odběr v měřicím bodě B při volnoběžných otáčkách motoru.

Typický proudový odběr v režimu IV měřený v bodě B dle obr. 3 je při volnoběžných otáčkách zobrazen na obr. 4. Měřený signál je získán z automobilu Škoda Fabia II Sport 1,4 16V 63 kW zapalovacího motoru se systémem SIC, modelový rok 2007. Měření bylo provedeno pomocí osciloskopu Tektronix TDS 7104, zesilovače proudové sondy TCPA300 a proudové sondy TCP303. Měření byla porovnána i se zapalovacími systémy DIC na jiných vozech Škoda Fabia, kde byly změřeny velmi podobné průběhy.



Po nastartování zážehového motoru jsou v napájecí soustavě při bezporuchovém stavu příznaky minimálně od čtyř zdrojů. Na obr. 4 jsou zachyceny signály při volnoběžných otáčkách motoru, kdy všechny výkonové přechodové děje již odezněly. První signál má obdélníkový charakter vlastnostmi blízký pulzně šířkové modulaci (PWM), odpovídá proudovému odběru vyhřívání lambda sondy. Signál má pevnou frekvenci s proměnnou střídou a amplitudou podle aktuální teploty lambda sondy. Další dva signály odpovídají proudovým odběrům vstřikovacích ventilů a zapalovacího systému. Jejich frekvence a fázový posuv jsou stejné, což vyplývá z principu samotné funkce motoru. Poslední signál odpovídá proudovému odběru palivového čerpadla. Frekvence proudových impulzů motorového čerpadla odpovídá jeho otáčkám, velikost těchto impulzů však závisí na tlaku pohonných hmot v palivovém systému.

#### 4.1.2 Proudový odběr typických částí automobilové výbavy

Na testovacím vozidle bylo provedeno několik náměrů pro řádové stanovení proudového odběru typických elektrických zařízení v automobilu. Naměřené hodnoty byly přehledně seřazeny do třech tabulek (tabulka 1, 2 a 3) podle velikosti odebíraného proudu po odeznění krátkodobých přechodových dějů vzniklých při rozběhu zařízení. Každá tabulka obsahuje zařízení jiného typu, definované jeho proudovým odběrem, avšak zařazení některých zařízení do konkrétní tabulky nemusí být jednoznačné a je potřeba ho chápat pouze jako orientační.

Tabulka 1: Proudový odběr typických elektrických zařízení v automobilu s přechodovým charakterem odběru proudu.

<b>Přechodový charakter</b>	<b><math>I_{peak}</math> [A]</b>	<b><math>I_{ust}</math> [A]</b>
vyhřívání zadního skla	není	18
vyhřívání sedadel	není	5
směrová světla	31	4
potkávací světla	24	3,5
brzdová světla	28	3
přední mlhová světla	29	2,6
zpětné světlo	10	1,6
parkovací světlo L, osvětlení SPZ	15	1,5
koncová mlhová světla	11	1,5
parkovací světlo P	7	1
clonka dálkových světel	není	0,9
vnitřní osvětlení	6	0,8
multifunkční modul	není	0,5

Tabulka 2: Proudový odběr typických elektrických zařízení v automobilu s pulzním průběhem odběru proudu.

Pulzní průběh	$I_{\text{peak}}$ [A]		$t_{\text{peak}}$ [ms]	T [ms]
	max	typ	typ	typ
centrální zamykání	12	10	300	-
zapaľovací systém	12	8	1,5	150
zámek víka zavazadlového prostoru	8	5	400	-
alarm – poplach	4	2,7	0,11	0,32
vstřikovací systém	1	1	3	150
škrticí klapka	3,9	1	0,2	0,5
ventil AKF	0,5	0,5	20	100

Tabulka 3: Proudový odběr typických elektrických zařízení v automobilu s periodickým průběhem odběru proudu.

Periodický průběh	$I_{\text{peak}}$ [A]	$I_{\text{str ust}}$ [A]	$I_{\text{peak-peak}}$ [A]	T [ms]
alternátor	57	13	10	1
ventilátor chlazení	19	11	1,5	2
ventilátor topení	7	6	1,5	3
palivové čerpadlo	19	5,5	2	1,7
ovládání oken	16	5	0,5	1,6
ostřikovače skel	15	4	1	0,3
houkačka	12	3	6	2
přední stěrače	16	3	2	1,5
zadní stěrač	6	2	0,8	2,3
el. hydr. servořízení	120	2	4	0,8
lambda sonda	3	1,5	3	100
ovládání zrcátek	6	0,05	0,04	5

V tabulkách 1–3 jsou uvedeny pouze hrubé proudové odběry pro vytvoření přehledu, v jakých řádech se proudové odběry konkrétních zařízení pohybují. Proudový odběr však v naprosté většině případů nelze popsat jednoduše několika parametry. Pro aplikaci centralizované vozidlové diagnostiky je důležité zkoumat, jaký je celkový proudový odběr od zapnutí zařízení až po jeho vypnutí, jak se mění se zátěží, jak se mění z pohledu krátkých časových úseků a jak se v něm projevují poruchy jednotlivých prvků zařízení. Ukázky typických proudových odběrů pro několik málo vybraných zařízení v bezporuchovém stavu jsou detailněji zobrazeny v následující kapitole.

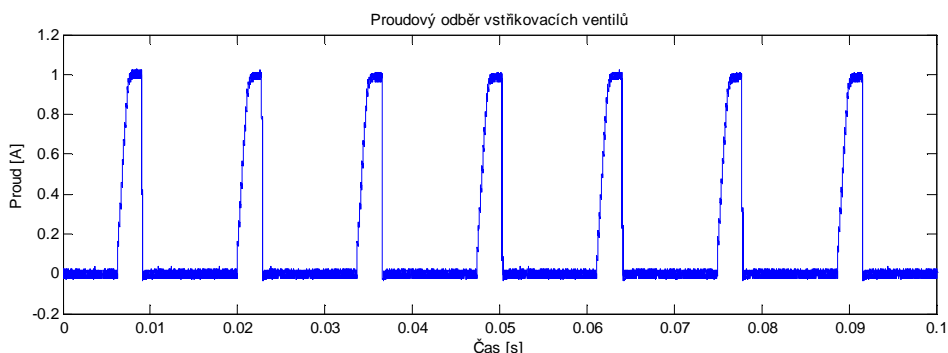
### 4.1.3 Typické dynamické průběhy odebíraného proudu

Elektrické zařízení vozidlové výbavy bylo pro lepší orientaci roztríděno do tří kategorií podle typického projevu proudového odběru. Aby bylo snazší si pod těmito kategoriemi představit typický průběh proudového odběru, bylo vybráno několik vozidlových spotřebičů s charakteristickými proudovými projevy.

#### 4.1.3.1 Vstřikovací systém

Vstřikovací systém určuje, jak velké množství paliva bude dopraveno do válců motoru. Další funkcí vstřikovacího systému je zajistit dostatečně jemné rozprášení paliva do nasávaného vzduchu, tato vlastnost je však výhradně závislá na mechanické konstrukci vstřikovacího ventilu. Vstřikovací systém není nezbytnou částí motorového systému, neboť může být v odůvodněných případech nahrazen starší technologií v podobě karburátoru.

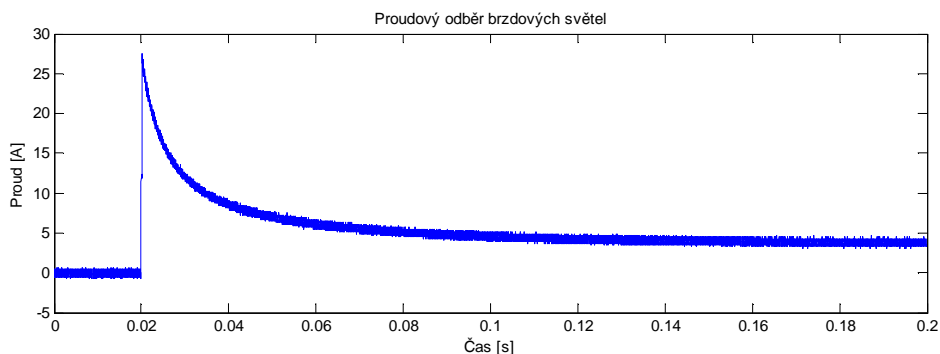
Hlavní částí vstřikovacího systému je elektromagnetický ventil, který se skládá z elektromagnetického vinutí (solenoidu) a pohyblivého jádra vymezeného do základní polohy pružinou. Při připojení elektrického napětí začne vinutím protékat proud a tím vznikne elektromagnetické pole. Takovéto pole svými magnetickými účinky přitáhne jádro v protisměru působení pružiny a tím se otevře ventil, kterým začne proudit pohonná kapalina do sacího vedení, případně přímo do válců motoru. Vstřikovací ventil má proudový odběr charakteristický pro zařízení z kategorie pulzních průběhů, viz obr. 5.



Obr. 5. Proudový odběr vstřikovacích ventilů.

#### 4.1.3.2 Osvětlení

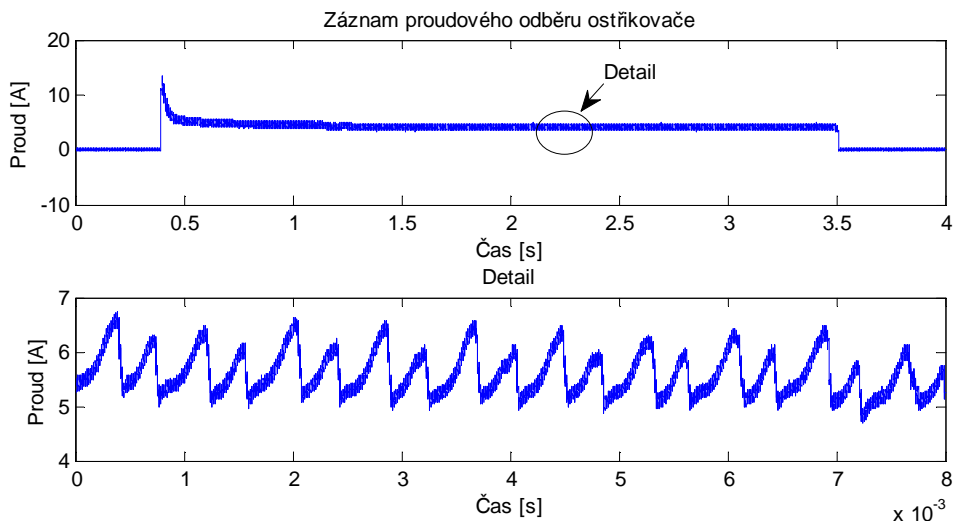
Představitelem aktuátoru s přechodovým charakterem odebíraného proudu může být například světelný zdroj. V nových motorových vozidlech se pro osvětlení začínají využívat moderní světelné zdroje, jako jsou xenonové výbojky pro přední světlomety nebo LED diody pro obrysová, či koncová světla. Přesto dosud u motorových vozidel převládá použití wolframových a halogenových žárovek. Proudový odběr wolframové žárovky (2 x 21 W) je znázorněn na obr. 6.



Obr. 6. Proudový odběr brzdových světel s wolframovou žárovkou.

#### 4.1.3.3 Ostřikovače skel

Typickým aktuátorem s periodickým průběhem odebíraného proudu je subsystém se stejnosměrným motorem, například elektromotor čerpadla ostřikovače skel. Proud odebíraný stejnosměrným motorem s konstantním zatížením je znázorněn na obr. 7 nahoře. Při rozběhu vznikne velký proudový impuls, ale z hlediska diagnostického je mnohem zajímavější periodický průběh proudu, který je patrný z detailu na obr. 7.

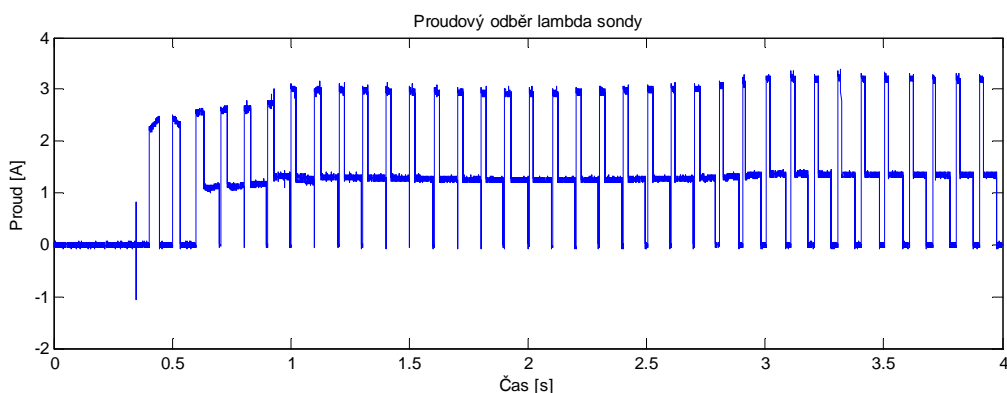


Obr. 7. Proudový odběr motoru ostřikovače skel.

#### 4.1.3.4 Lambda sonda

Lambda sonda je senzor sloužící k zajištění maximální účinnosti katalyzátoru. Řídicí jednotka motoru snímá hodnotu lambda sondy a na základě naměřených výsledků reguluje ideální poměr paliva a vzduchu (tzv. stechiometrické oblasti). O tom, zda v motoru dochází ke spalování ideální směsi, se řídicí jednotka dozví právě z lambda sondy, která zjišťuje poměr kyslíku a výfukových plynů ve výfukové soustavě. Lambda sonda je umístěna před katalyzátorem. Ve vozidlech vybavených EOBD je umístěna ještě druhá lambda sonda za katalyzátorem. Tato druhá sonda má ovšem pouze diagnostický účel, neboť detekuje špatnou funkci katalyzátoru.

Lambda sondy běžně používané v dnešních automobilech jsou tří typů. Lambda sondy s oxidem zirkoničitým či titaničitým nebo širokopásmové lambda sondy. Pro správnou funkci těchto sond musí základní element dosáhnout požadované provozní teploty. Aby se zkrátila doba ohřevu sondy výfukovými plyny, případně se přihřála na provozní teplotu, obsahuje sonda také topné vinutí. Proud odebíraný topným vinutím lambda sondy je znázorněn na obr. 8. Ze záznamu je patrné, že zařazení této vozidlové výbavy do kategorie periodických průběhů není jednoznačné, neboť by mohlo být zařazeno také do kategorie pulzních průběhů.



Obr. 8. Detail proudového odběru vyhřívání lambda sondy.

## 4.2 Diagnosticky významné části z pohledu centralizované diagnostiky

Dříve, než bude řešena otázka diagnostické významnosti z pohledu centralizované vozidlové diagnostiky, je nutné zvážit, zda se dané zařízení vůbec vyplatí diagnostikovat. Například prediktivní informace o možné závadě žárovičky osvětlení interiéru nebo vyhřívání sedadel pravděpodobně nevyváží náklady spojené s její klasifikací.

Z pohledu diagnostické významnosti lze rozdělit výbavu vozidla do čtyř základních skupin. Jedná se o kritické části přímo ovlivňující životy účastníků silničního provozu (brzdy, řízení), části ovlivňující základní funkce vozidla (motor, spojka), části nepřímo ovlivňující bezpečí přepravovaných osob (osvětlení vozidla, přední stěrače) a části bez vlivu na provoz či bezpečí osob (typicky komfortní systém: stahování okének, vyhřívání sedadel atd.).

Nejdůležitější z hlediska bezpečnosti je první jmenovaná skupina, právě proto je legislativní snaha neintegrovat do této oblasti vozidlové výbavy mnoho elektroniky a pro případ selhání této elektroniky zachovat ještě mechanickou vazbu, která uživateli ponechá možnost bezpečného ovládní vozidla pro jeho uvedení do klidového stavu. A právě s ohledem na tyto požadavky je konstruováno například

elektrohydraulické servořízení nebo antiblokovací systém brzd (ABS). Vzhledem k závažnosti případné poruchy těchto systémů jsou vybaveny precizní vnitřní diagnostikou. Například systém ABS je kromě standardní kontroly senzorů a aktuátorů vybaven zdvojenou nezávislou řídicí elektronikou, jejíž výstupy jsou navzájem porovnávány. Pokud je v takovémto systému zaznamenána porucha, je jednotka neprodleně odstavena, aby nemohla žádným způsobem zasahovat do mechanické vazby.

Do druhé skupiny lze zahrnout vše, co při své poruše může zabránit dalšímu provozu motorového vozidla. Jedná se především o části pohonné jednotky, ale také o spojku, převodovku atd. Krom pohonné jednotky však tyto části v základním provedení vozidla neobsahují elektrické akční členy, takže jejich stav nelze sledovat centralizovanou vozidlovou diagnostikou. V další skupině jsou zahrnuty takové části vozidla, které mohou nepřímo ovlivnit lidské zdraví nebo bezpečnost silničního provozu. Lze sem zařadit například vnější osvětlení vozidla, přední stěrače, ale i katalyzátor či lambda sondu. Do poslední skupiny spadá automobilové vybavení, které z diagnostického pohledu nemá vysokou prioritu, takže se vyplatí lokalizaci jeho poruch přenechat metodám spadajícím do kategorie vnější diagnostiky. Příkladem takové výbavy může být vyhřívání sedadel, autorádio, ostřikovače a další části komfortního systému.

Z pohledu centralizované diagnostiky není, kvůli blokovacím kondenzátorům a parazitní indukčnosti napájecího vedení, možné sledovat malé změny proudového odběru, které jsou typické pro změny stavů senzorů a mikropočítačů řídicích jednotek. Centrální vozidlová diagnostika je tedy schopna ze změny odebíraného proudu identifikovat pouze výraznější projevy poruch akčních členů. V porovnání s decentralizovanou vnitřní diagnostikou bude dosahovat vždy horších výsledků, ale díky víceúčelovému využití jedné proudové sondy může rozšířit množinu diagnostikovaných poruch o poruchy, které se kvůli vysokým nákladům nevyplatí sledovat vnitřní diagnostikou. Tou se většinou diagnostikuje stav akčních členů sledováním jejich polohy pomocí jiného senzoru, není tak často možné pozorovat ani zásadní změny v chování akčního členu způsobené jeho opotřebením. V tomto směru centralizovaná vozidlová diagnostika nabízí další rozšíření v podobě možné predikce závady.

Pokud spojíme diagnosticky významné skupiny vozidlové výbavy s diagnostickými možnostmi centralizované diagnostiky, dojdeme k závěru, že se ve vozidlové výbavě nalézá pouze několik typů diagnosticky významných akčních členů. Jsou to stejnosměrně napájené elektromotory, elektromagnetické ventily, odporové aktuátory a transformátor. Takovéto typy diagnosticky významných aktuátorů jsou obsaženy v těchto systémech: V diagnosticky nejdůležitější skupině je to elektrohydraulické servořízení (elektromotor pohánějící čerpadlo) a jednotka ABS (čerpadlo, elektromagnetické ventily). V druhé diagnosticky méně významné skupině palivové čerpadlo, škrticí klapka, vstřikovací ventily a zapalovací cívka.

Do nejméně diagnosticky významné skupiny patří stěrače předních skel, vnější osvětlení vozidla nebo vyhřívání lambda sondy.

## 4.3 Mechanická konstrukce vybraných částí

Pro vysvětlení projevů vybraných elektrických částí automobilové výbavy v odebíraném proudu budou v této kapitole podrobněji popsány konstrukční detaily těchto částí specifické pro dané použití.

### 4.3.1 Konstrukce zapalovacího systému

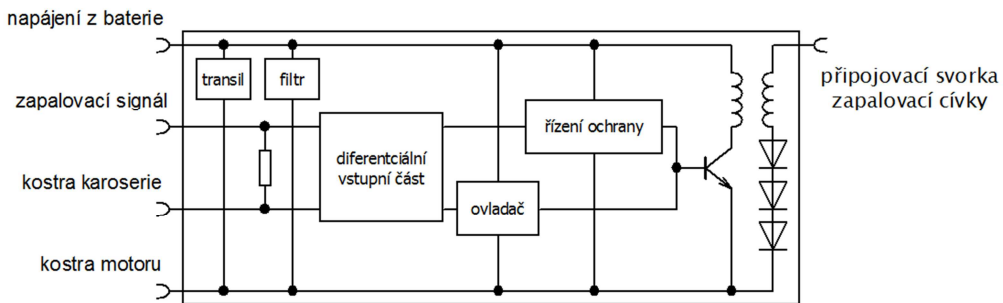
Zapalovací systém je nedílnou částí zážehového motoru. Zajišťuje zapálení směsi pohonné hmoty a kyslíku ve válcích motoru. Pracuje na principu vytvoření elektrické jiskry mezi vysokonapěťovými kontakty zapalovací svíčky. Více informací o zapalovacích svíčkách naleznete v [17] a [23]. Elektrický výboj je způsoben vytrhnutím elektronů z atomů a molekul plynu (tzv. ionizací plynu). Tato ionizace plynu je vyvolána vzrůstajícím napětím na elektrodách zapalovací svíčky, díky rychlému rozpojení elektrického obvodu s induktivním charakterem a následnou transformací tohoto indukovaného napětí v transformátoru s poměrem přibližně 1:200 [18]. Tento transformátor je také označován jako zapalovací cívka. Zapalovací systém je podrobněji popsán v [17], [24] a [25].

U levnějších variant zážehových motorů se sudým počtem válců se používá dvoujiskrová zapalovací cívka (DIC – Double Ignition Coil) znázorněná na obr. 9 vlevo. Tento systém spíná vždy dvě svíčky najednou. V současné době se však více používají jednojiskrové zapalovací cívky (SIC – Single Ignition Coil), viz obr. 9 vpravo, a proto bude v této práci zkoumán zapalovací systém právě s tímto typem cívek. V tomto případě připadá na každou svíčku jedna cívka, která je na tuto svíčku přímo nasazena. Více informací naleznete v [26].



Obr. 9. Dvoujiskrová (vlevo) a jednojiskrová (vpravo) zapalovací cívka.

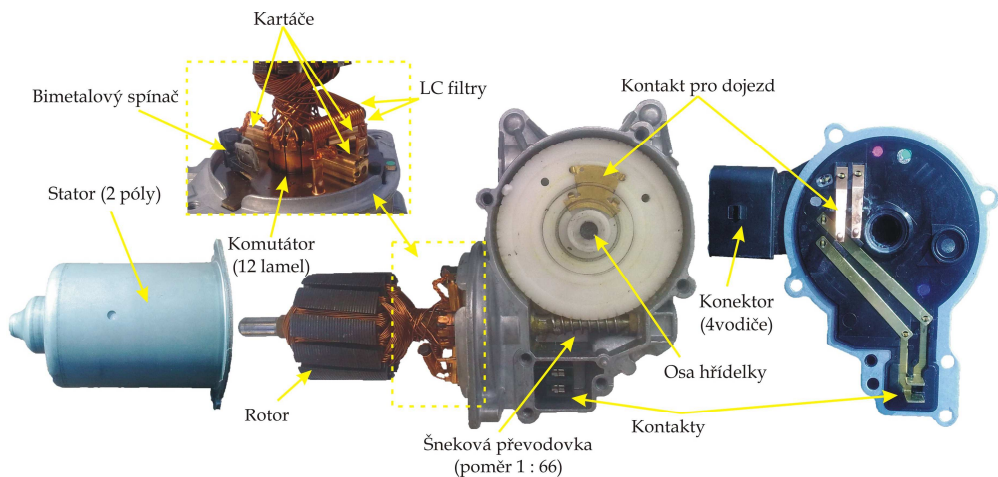
V současné době se používá přímé řízení zapalování pomocí řídicí jednotky motoru (tzv. plně elektronické zapalování) s integrovaným výkonovým stupněm v zapalovací cívce SIC. V takovém případě jsou k zapalovací cívce vedeny řídicí signály z řídicí jednotky motoru a napájecí vodiče z rozvodné napájecí sítě. Přivedení napájecího napětí na samotný transformátor je zajištěno polovodičovými spínači zabudovanými přímo v zapalovací cívce, viz blokové schéma na obr. 10. Tyto spínače jsou schopny přenést proud v řádu až desítek ampér.



Obr. 10. Blokové schéma jednojiskrové zapalovací cívky SIC.

### 4.3.2 Konstrukce stěrače

V automobilech se nejčastěji používají stejnosměrné kartáčové elektromotory s permanentním magnetem. Princip spočívá ve vzájemném působení permanentního magnetu umístěného v tzv. statoru a elektromagnetického pole vyvolaného tokem proudu vodičem, respektive pohyblivou cívkou v tzv. rotoru. Podrobný popis konstrukce takového motoru je popsán v [27].



Obr. 11. Konstrukce elektromotoru předního stěrače na vozidle Škoda Fabia II [28]

Motor předního stěrače na testovaném automobilu Škoda Fabia II Sport má dvoupólový stator tvořený permanentními magnety a dvanáctipólový rotor (kotvu). Na lamely komutátoru jsou přivedeny dva kartáče v ose motoru a jeden kartáč mimo osu, určený pro přepnutí na vyšší rychlost otáčení motoru. Před přívodními kartáči jsou umístěny LC filtry pro snížení rušení od komutátoru a celý obvod je navíc jištěn bimetalovou tepelnou pojistkou proti přehřátí motoru při dlouhodobém přetížení. Na ose motoru je umístěna šneková převodovka s převodovým poměrem 62:1. Konstrukce motoru je znázorněna na obr. 11.



## 4.4 Shrnutí

Elektrické akční členy automobilové výbavy lze rozřídít do tří skupin podle typického charakteru odebíraného proudu. Velikost tohoto proudu, stejně jako okamžik, kdy jsou jednotlivé členy napájeny, jsou velice různorodé. Tyto akční členy lze však také rozřídít do několika málo skupin z pohledu konstrukčního. V automobilu se totiž nachází jen několik málo typů akčních členů, především stejnosměrné elektromotory, elektromagnetické ventily, topné a osvětlovací prvky, řídicí jednotky, relé a jediný významný transformátor v podobě zapalovací cívky. Z pohledu vnitřní diagnostiky však není nezbytně nutné kontrolovat všechny elektrické akční členy a z pohledu centralizované vozidlové diagnostiky je zase možné sledovat pouze takové akční členy, které se svými proudovými projevy vzájemně neruší. Je tedy dobré mít přehled o všech elektrických akčních členech a znát jejich typické proudové odběry a projevy poruch pro návrh vhodného měřicího bodu v napájecí soustavě. Jako diagnosticky významné akční členy byly stanoveny: elektrohydraulické servořízení, jednotka ABS, zapalovací systém, vstřikovací systém, palivové čerpadlo, škrticí klapka, vnější osvětlení, stěrače, vyhřívání lambda sondy.



## 5 Navrhované metody

Pokud budeme vědět, jakým dynamickým dějem se konkrétní poruchy v měřeném proudu projevují, můžeme zvolit správnou klasifikační metodu, která hledaný projev jednoznačně identifikuje. V této kapitole budou diskutovány různé vyhodnocovací metody a jejich vlastnosti vhodné pro klasifikaci poruch vybraných elektrických částí automobilu. Konkrétně se jedná o rychlou Fourierovu transformaci, vlnkovou transformaci, metodu template matching, hranový detektor, detektor pulzů a jejich modifikované verze.

### 5.1 Rychlá Fourierova transformace

Rychlá Fourierova transformace (FFT) přináší informaci o frekvenčním popisu měřeného signálu. Jedná se v podstatě o diskrétní Fourierovu transformaci, viz rovnice (1), která využívá efektivní algoritmus pro snížení výpočetní náročnosti. Algoritmů FFT je velké množství, některé z nich jsou popsány například v [29], [30] a [31].

$$X(k/NT) = T \sum_{n=0}^{N-1} x(nT) e^{-j \frac{2\pi}{N} nk} \quad (1)$$

kde  $k$  je frekvence ( $f_k = k/NT$ ) a  $n$  čas ( $t_n = nT$ ),  $N$  udává počet vzorků a  $T$  délku záznamu,  $x(nT)$  je hodnota signálu v časové oblasti.

### 5.2 Vlnková transformace

Vlnková transformace (WT) přináší informaci o časově proměnném frekvenčním popisu zkoumaného signálu, viz [32]. Frekvenční popis signálu lze získat například pomocí Fourierovy transformace, ta ovšem předpokládá stálost frekvenčních složek v čase. Pro časově proměnné signály lze pro analýzu ve frekvenční oblasti uplatnit metodu krátké Fourierovy transformace (STFT), která využívá postupného posouvání okna ohraničujícího krátký časový úsek signálu, v němž je zkoumáno frekvenční spektrum. Tato metoda však naráží na nedostatky vycházející z Heisenbergova principu neurčitosti. Tedy že zvýšení přesnosti v časové oblasti má za následek snížení přesnosti ve frekvenční oblasti a naopak. Nedostatky STFT se snaží odstranit WT návrhem optimální šířky a tvaru okna, za účelem nastavení vyvážené hranice rozlišitelnosti mezi frekvencí a časem, viz rovnice (2).

$$CWT(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \overline{\psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right)} dt \quad (2)$$

kde  $\tau$  je poloha umístění vlnky na časové ose,  $s$  je měřítko,  $\psi$  mateřská vlnka a  $\overline{\psi}$  komplexně sdružené číslo.

Koeficienty výsledné matice popisují signál v trojrozměrném prostoru. Osy reprezentují čas, měřítko a koeficienty WT. Když se změní základní frekvence hledaných oscilací nebo jejich časová pozice, posune se pouze maximální hodnota ve výsledné matici. Nejdůležitější vlastností WT je citlivost při hledání poruchových oscilací na volbu mateřské vlnky stejného tvaru.

### 5.3 Metoda template matching

Metoda template matching je známá především v oblasti digitálního zpracování obrazu. Lze ji ovšem uplatnit i v oblasti signálového zpracování pro hledání zákmitů specifických tvarů v měřeném signálu. Metoda hledá specifický tvar (vzor) v měřeném signálu. Vzor může být libovolného tvaru a pro jeho definici nejsou kladeny žádné podmínky. Takovýto vzor se stanoví výběrem reálně naměřeného příznaku proudu, ideálně průměrováním několika takovýchto příznaků. Princip hledání vzoru v měřeném signálu metodou template matching je patrný z rovnice (3).

$$SAD(x) = \sum_{i=0}^N |t(i) - s(x+i)| \quad (3)$$

kde  $t$  (template) je vzor vytvořený průměrováním,  $s$  aktuálně měřený signál,  $N$  počet vzorků vzoru (template).

Shoda vzoru (template) se zákmitem ve zkoumaném signálu je indikována minimální hodnotou  $SAD(x)$  (Sum of absolute differences). Pokud tato hodnota klesne pod vhodně zvolenou prahovou úroveň, je zaručena dostatečná shoda. Výhodou metody je jednoduchá implementace a rychlost zpracování naměřených dat. Nevýhodou je omezená citlivost na zákmity stejného tvaru v jiném měřítku. Metoda template matching je také popsána v [33].

### 5.4 Metoda template matching se separací příznaku

V měřicím bodě B (dle obr. 3) je signál navýšen o proudové odběry dalších zařízení. Tento efekt by se při realizaci metody template matching projevoval jako nežádoucí aditivní složka do hodnoty  $SAD(x)$ . Prahová hodnota by vlivem těchto složek byla překročena a nebylo by možné nalézt hledaný projev poruchy. Tento efekt lze odstranit odečtením střední hodnoty jak ve vzoru, tak ve zkoumané oblasti signálu o délce vzoru, viz rovnice (4).

$$SAD(x) = \sum_{i=1}^N \left| \left( t(i) - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N t(j) \right) - \left( s(x+i) - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N s(x+j) \right) \right| \quad (4)$$

kde  $t$  (template) je vzor vytvořený průměrováním,  $s$  aktuálně měřený signál,  $N$  počet vzorků vzoru (template).

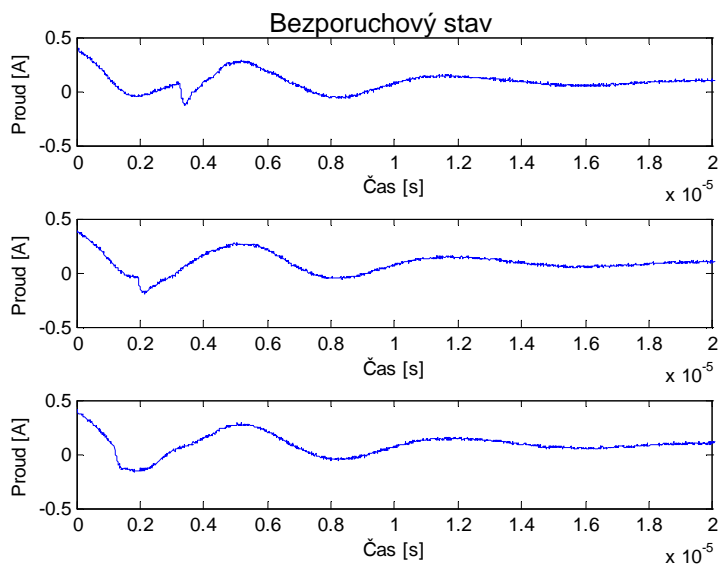
## 5.5 Hranový detektor

Detektor sestupných hran v proudovém signálu může být založen na postupném prohledávání krátké oblasti za aktuálně zkoumaným vzorkem změřeného signálu. Minimální hodnota ve zkoumané oblasti je odečtena od aktuálně zkoumaného vzorku a výsledný rozdíl porovnán s hodnotou získanou z předcházejícího vzorku. Největší diference při procházení měřeného signálu odpovídá nalezené hraně. Princip nejlépe vysvětlí následující rovnice (5).

$$h = \max_{k=1}^{N-T} \left( s(k) - \min_{l=k}^{k+T} (s(l)) \right) \quad (5)$$

kde  $s$  je měřený signál,  $N$  počet vzorků měřeného signálu a  $T$  oblast pro hledání hrany, která musí odpovídat délce hledané hrany.

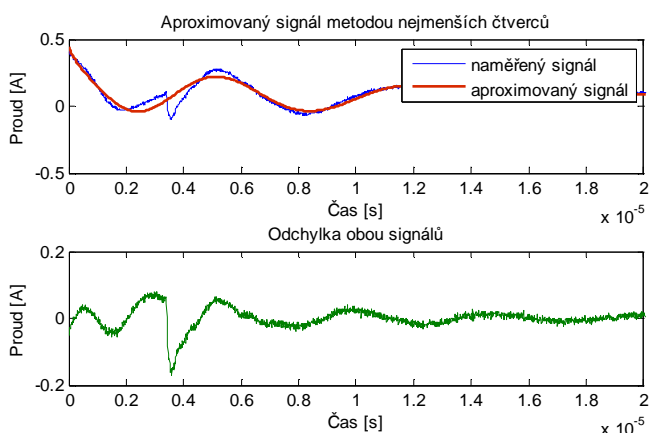
Takovýto detektor dokáže nalézt sestupnou hranu v signálu znázorněném na obr. 12 nahoře, pokud vybereme vhodné časové okno ve změřeném signálu. Se signálem na obr. 12 uprostřed a dole již může nastat problém, neboť hledaný příznak je posunut do oblasti minima proudové oscilace a detektor při nevhodně nastavené oblasti  $T$  bude hledat spíše hranu oscilace, namísto hrany proudového impulsu provázející přeskok jiskry. Musí se tedy dbát na dobré nastavení oblasti  $T$ , nebo nejdříve signál separovat metodou odchylky od aproximace, která odstraní sestupné hrany způsobené proudovou oscilací.



Obr. 12. Bezchybný stav zapalovacího systému s různou polohou hledaného proudového impulsu.

## 5.6 Metoda odchyly od aproximace

Metodou odchyly od aproximace lze v signálu s nižší frekvenční složkou nalézt krátký přechodový děj s vyšší frekvenční složkou. Tato metoda se zakládá na určení aproximačního polynomu metodou nejmenších čtverců, který dobře proloží delší základní signál, v němž se objevuje hledaný krátký přechodový děj s vyšší frekvenční složkou. Pokud se od měřeného signálu odečte aproximovaný, výsledný signál v ideálním případě přesně odpovídá krátkému přechodovému ději. Ve výsledném signálu tedy vznikne proudový impuls o velikosti krátkého přechodového děje s vyšší frekvenční složkou, kterou lze nejsnáze nalézt detekcí strmých hran. Reálný výsledek je patrný z obr. 13.



Obr. 13. Rozdíl měřeného signálu s aproximovaným polynomem.

## 5.7 Detektor pulzů

Detektor pulzů je metoda určená k hledání pulzů ve zkoumaném signálu. Její princip spočívá ve využití dvou hranových detektorů, přičemž jedním hranovým detektorem je hledána strmá hrana před aktuálně zkoumaným vzorkem signálu a druhým detektorem za aktuálně zkoumaným vzorkem, viz rovnici (6). Pro přesnější identifikaci hledaného impulsu jsou zkoumané oblasti obou hranových detektorů odlišné. Impulz může být považován za nalezený, pokud oba hranové detektory překročí nastavenou úroveň. Podmínka nutná pro nalezení impulsu je patrná z rovnice (7). Aby došlo k jednoznačnému nalezení impulsu, je za vrchol hledaného impulsu považována hodnota s nejvyšším součtem hodnot obou hranových detektorů, viz rovnici (8)

$$h_1(k) = s(k) - \min_{l=k-T_1}^k(s(l)); \quad h_2(k) = s(k) - \min_{l=k}^{k+T_2}(s(l)) \quad (6)$$

kde  $s$  je měřený signál,  $k$  aktuální vzorek signálu,  $T_1$  a  $T_2$  počet vzorků v oblasti pro hledání náběžné a sestupné hrany v okolí aktuálně zkoumaného vzorku.

$$(h_1(k) \geq H_1) \cap (h_2(k) \geq H_2) \quad (7)$$

kde  $H_1$  a  $H_2$  jsou prahové hodnoty.

$$h = \max_{k=T_1}^{N-T_2} (h_1(k) + h_2(k)) \quad (8)$$

kde  $N$  je celkový počet vzorků zkoumané oblasti pro hledání největšího impulzu.

## 5.8 Shrnutí

Každá porucha se v měřeném proudu projevuje nějakým způsobem, který je pro ni charakteristický. Zároveň nelze žádný projev poruchy nikdy zcela separovat od dalších změn proudového odběru vyvolaných jinými vlivy. Proto také nelze použít jednu metodu pro hledání všech nalezených projevů poruch. Pro určení konkrétního projevu poruchy je tedy potřeba vybrat takovou nejvhodnější metodu, při jejímž použití se projeví co nejvíce výhod dané metody a uplatní se co nejméně nevýhod. Níže je shrnuto srovnání výhod a nevýhod jednotlivých metod a odhad jejich použitelnosti pro hledání poruch pomocí centralizované vozidlové diagnostiky.

### I. *Rychlá Fourierova transformace*

- výhody:
  - o rychlá metoda
  - o dostupné realizace pro různé platformy
- nevýhody:
  - o pouze harmonické průběhy
  - o pro vyšší přesnost velké množství vzorků měřených delší dobu
- použití:
  - o na hledání příznaků poruch s periodickým výskytem, typicky u elektromotorů

### II. *Vlnková transformace*

- výhody:
  - o frekvenční analýza v čase
  - o omezuje vliv Heisenbergova principu neurčitosti
  - o potlačuje vliv aditivních signálů
- nevýhody:
  - o omezená možnost výběru mateřské vlnky
  - o citlivost na výběr mateřské vlnky
- použití:
  - o na hledání příznaků poruch s tvarem blízkým mateřské vlnce v proudovém odběru s více elektrickými spotřebiči

### **III. Metoda template matching**

- výhody:
  - o jednoduchá a rychlá metoda
  - o vyhledávání složitých tvarů
- nevýhody:
  - o neměnnost hledaného projevu ve tvaru i měřítku
  - o citlivost na aditivní složky (i stejnosměrné)
- použití:
  - o na hledání tvarově konstantních projevů poruch v měřeném proudu těsně před spotřebičem

### **IV. Metoda template matching se separací příznaku**

- výhody:
  - o odstraňuje citlivost na nízkofrekvenční aditivní složky
- použití:
  - o na hledání výrazných tvarově konstantních projevů poruch v měřeném proudu pro více spotřebičů bez rychlých změn proudového odběru

### **V. Hranový detektor**

- výhody:
  - o jednoduchá metoda detekce změny signálu
- použití:
  - o na hledání nejvýraznějších příznaků v měřeném proudu

### **VI. Metoda odchylky od aproximace**

- výhody:
  - o detekce i malé změny signálu
- nevýhody:
  - o pouze změny s nejvyšší frekvenční složkou ve zkoumaném signálu
- použití:
  - o na hledání malých příznaků s rychlou proudovou špičkou



## 6 Rozšíření množiny poruchových stavů

Základní množina poruchových stavů identifikovatelných metodou centralizované vozidlové diagnostiky na vybraných částech vozidlové výbavy byla již popsána v [22]. Jedná se o poruchu odpojené zapalovací svíčky zážehového motoru, poruchu elektrických rotačních strojů, osvětlení automobilu a vstřikovacího ventilu. V této kapitole bude rozšířena množina poruchových stavů zapalovací soustavy o nové dosud nepopsané příznaky poruch identifikovatelné z proudu v napájecí síti vozidla. Jedná se například o příznaky poruch v primárním obvodu zapalovací soustavy, zanesené elektrody zapalovací svíčky či změnu vzdálenosti elektrod zapalovací svíčky. Stejně tak bude rozšířena množina identifikovatelných poruch stejnosměrně napájených elektrických motorů s permanentním magnetem o poruchy zkratovaného či přerušeného vinutí rotoru a zadírání v části mechanické zátěže motoru.

### 6.1 Zapalovací systém

Testováním zapalovacího systému v decentralizovaném konceptu se již zabývali v [34]. V následujícím textu jsou však poruchové stavy zkoumány z pohledu centralizovaného přístupu. Ten se zabývá projevy poruch měřitelnými v odebraném napájecím proudu.

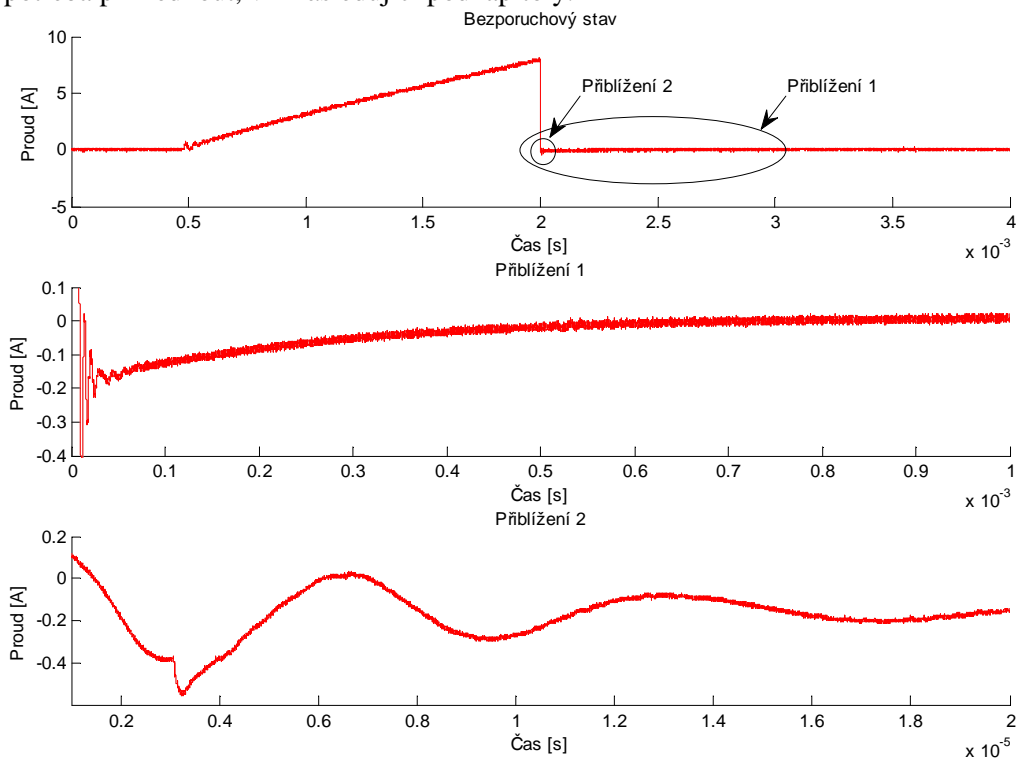
#### 6.1.1 Bezporuchový stav

V případě správné funkce zapalovacího systému je sepnut polovodičový spínač ovládaný řídicí jednotkou motoru, viz blokové schéma na obr. 10. Do primárního obvodu transformátoru začne téct proud a tím se akumuluje energie do magnetického jádra transformátoru. V okamžiku rozpojení polovodičového spínače na primárním vinutí se rychle změní smysl magnetického toku, neboť na obou koncích magnetického plechového jádra jsou umístěny dva permanentní magnety s opačnou orientací magnetického pole.

Touto změnou magnetického toku se indukuje elektrické napětí jak do primárního, tak sekundárního vinutí, jehož velikost odpovídá počtu závitů daného vinutí. Primární obvod má přibližně 200 závitů, sekundární v deseti sekcích přibližně 15 000 závitů. Indukované napětí v sekundárním obvodu tak dosahuje více než 33 kV. Takto vysoké napětí je však žádané, neboť vede k napěťovému průrazu a tedy k přeskočení zapalovací jiskry mezi elektrodami svíčky.

Napětí indukované v primárním obvodu zapalovací cívky je naopak nežádoucí, protože vyvolává rušení v napájecí síti vozidla. Do novějších zapalovacích cívek, jako je ta, na které bylo měřeno v této práci, se proto přidává ochranný elektrický obvod, viz obr. 10. Tento obvod při zvýšeném napětí na primárním vinutí otevře spínací tranzistor a akumulovanou energii v primárním vinutí vrátí do napájecí sítě,

kde jsou pro zajištění nižšího rušení umístěny blokovací kondenzátory. K takovému nárůstu indukovaného napětí na primárním vinutí dochází v okamžiku přeskocení jiskry na elektrodách svíčky (přesněji v kapacitní části jiskrového výboje), neboť sekundární obvod se z elektrického hlediska dostává do zkratu a tím opět nastává významná změna magnetického toku. Tímto jevem lze pomocí proudové sondy určit přesný okamžik začátku hoření zapalovací jiskry a tak stanovit zpoždění mezi rozepnutím spínače primárního vinutí a přeskocením zapalovací jiskry. Díky znalosti takového zpoždění lze určit stav zapalovací svíčky i poruchu v zapalovací soustavě motoru. Toto zpoždění je ovšem závislé na více faktorech, ke kterým je potřeba přihlídnout, viz následující podkapitoly.



Obr. 14. Průběh proudu odebíraného zapalovací cívkou z napájecí sítě automobilu.

Záznam měřeného proudu v bezporuchovém stavu při sepnutí polovodičového spínače je znázorněn na obr. 14. Na horním grafu je patrný nabíjecí proud tekoucí do zapalovací cívky po sepnutí spínacího prvku a následný prudký pokles po rozepnutí spínače. V prostředním a spodním grafu jsou v detailu zobrazeny proudové oscilace po rozpojení primárního obvodu zapalovací cívky. Záznam byl měřen v měřicím bodě C dle obr. 3, čímž byla zajištěna separace signálu od ostatních zařízení. Vzhledem k nízkému rozlišení použitého osciloskopu (8 bitů) musely být detaily proudového průběhu (Zoom 1 a Zoom 2) měřeny v časové posloupnosti, proto mohou být mezi jednotlivými grafy pozorovány mírné odchylky.

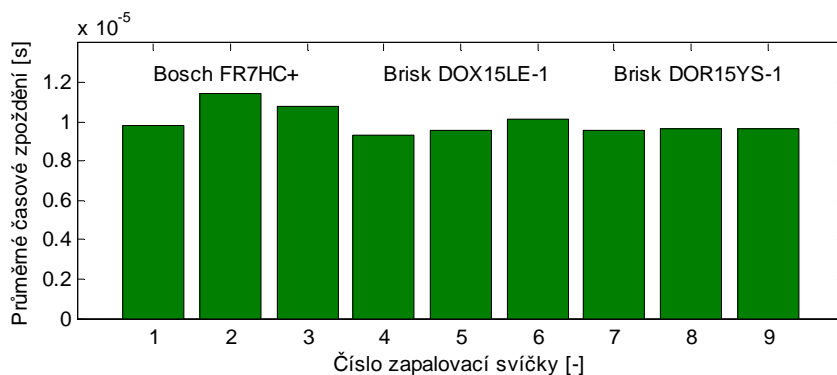
V bezporuchovém stavu zapalovací soustavy se po rozeznutí spínače v proudovém záznamu dle obr. 14 objevuje strmý pokles proudu. Po jeho prudkém poklesu vznikají tlumené oscilace, které postupně konvergují k nulové hodnotě protékajícího proudu. Tyto oscilace jsou vyvolány indukovaným napětím v primárním vinutí, které se přenáší do napájecí soustavy. V těchto oscilacích se objevuje proudový impuls indikující začátek hoření jiskry (kapacitní část výboje), viz spodní graf na obr. 14. Časová poloha tohoto impulsu se při opakovaném měření mírně posouvá oběma směry, je tudíž nezbytné k dalšímu zpracování používat střední hodnotu tohoto zpoždění získanou z více náměrů. Protože se však poruchy v zapalovací soustavě způsobené na svíčke dají určit především ze zpoždění přeskočení jiskry, je důležité znát všechny faktory, které toto zpoždění mohou ovlivnit.

### 6.1.1.1 Závislost zpoždění jiskry na konkrétní svíčke

Pro devět zapalovacích svíček bylo měřeno zpoždění mezi signálem od řídicí jednotky motoru, který dává impuls pro přeskočení jiskry, a okamžikem skutečného přeskočení jiskry. Byly použity tři typy zapalovacích svíček, od každého typu tři vzorky. Jednalo se o zapalovací svíčky výrobce Bosch s označením FR7HC+, jež mají vzdálenost mezi elektrodami 0,90 mm, dále svíčky od výrobce Brisk s označením DOX15LE-1 se vzdáleností elektrod 1,05 mm a poslední typ opět od výrobce Brisk s označením DOR15YS-1 se vzdáleností elektrod 1,00 mm. Na každé svíčke bylo provedeno 90 náměrů, jejichž výsledky jsou zaneseny v tabulce 4 a graficky znázorněny na obr. 15.

Tabulka 4: Střední hodnota a rozptyl zpoždění jiskry z 90 náměrů na 9 svíčkách.

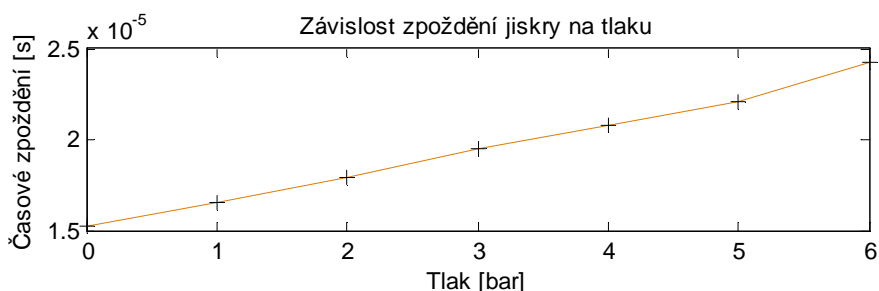
číslo svíčky	1	2	3	4	5	6	7	8	9
typ svíčky	Bosch FR7HC+			Brisk DOX15LE-1			Brisk DOR15YS-1		
průměrné zpoždění [ $\mu$ s]	9,79	11,47	10,76	9,32	9,55	10,13	9,55	9,66	9,65
rozptyl zpoždění [ns]	0,07	0,55	0,18	0,03	0,12	0,15	0,20	0,21	0,10



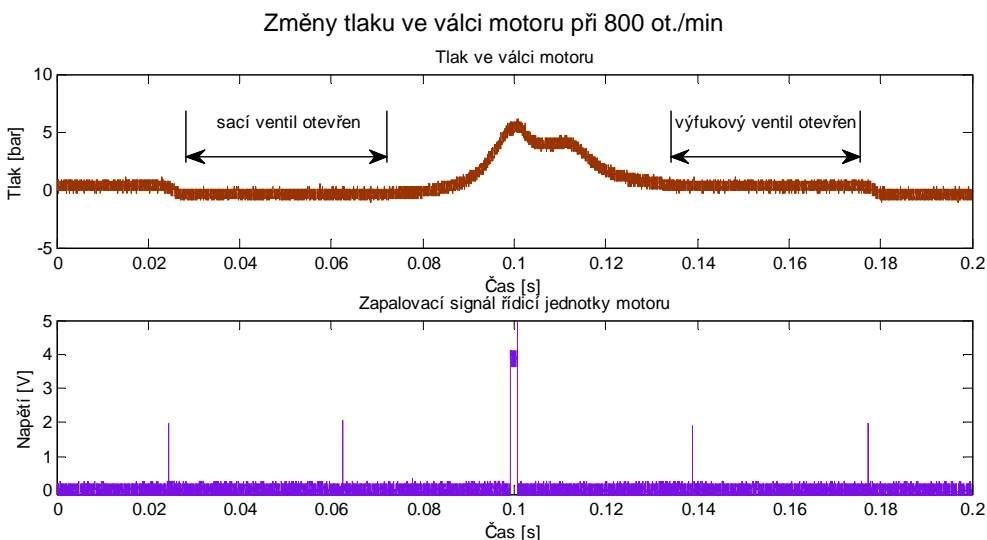
Obr. 15. Střední hodnota zpoždění 9 svíček z 90 náměrů.

### 6.1.1.2 Závislost zpoždění jiskry na tlaku

Indukované napětí v sekundárním obvodu musí být dostatečně vysoké, aby vyvolalo přeskok jiskry mezi elektrodami zapalovací svíčky. Mezi těmito elektrodami je v reálném motoru směs vzduchu a pohonných hmot. Právě tato směs určuje elektrickou pevnost prostředí mezi elektrodami, čímž je dána minimální velikost napětí potřebná k přeskočení jiskry a díky lineárnímu nárůstu indukovaného napětí na sekundárním vinutí také časové zpoždění mezi rozepnutím spínače primárního obvodu a přeskočením jiskry. Velikost napětí potřebná k přeskočení jiskry je také závislá na rychlosti nárůstu napětí v sekundárním obvodu, ta je ovšem pro konkrétní zapalovací cívku konstantní. Elektrická pevnost vzduchu a pohonné směsi je závislá především na tlaku ve válci motoru, poměr vzduchu a pohonných hmot má zanedbatelný vliv, viz stranu 12 v [17]. Na obr. 16 je patrné, že časové zpoždění a tím i elektrická pevnost vzduchu s rostoucím tlakem roste. Měření, jehož výsledky jsou zobrazeny na tomto obrázku, bylo provedeno na stejné zapalovací cívce i svíčke jako v testovaném automobilu, ale bez přítomnosti pohonných hmot.



Obr. 16. Závislost zpoždění přeskočení jiskry zapalovací svíčky na tlaku vzduchu ve válci.



Obr. 17. Změna tlaku ve válci zážehového motoru při otáčkách 800 ot./min.

Tlak ve válci zážehového motoru je značně proměnný, viz obr. 17. Velikost tlaku je závislá jednak na poloze vačkové hřídele, jednak na otáčkách motoru. Závislost zpoždění přeskočení jiskry na otáčkách je způsobena změnou předstihu zapalování. Čím má motor vyšší otáčky, tím je předstih zapalovací soustavy vyšší před horní úvratí a tím menší tlak směsi je ve válci v okamžiku přeskočení jiskry, viz tabulku 5. Tlaky v tabulce jsou pouze orientační, jejich hodnota je vztažena vůči minimálnímu tlaku ve válci, tedy tlaku při otevřeném sacím ventilu, který je nižší než atmosférický tlak.

Tabulka 5: Tlak ve válci zážehového motoru v závislosti na otáčkách.

ot./min	800	1500	2500	3500	4500
max. tlak [bar]	6,2	6	8,9	11,9	15,1
tlak při jiskře [bar]	5,6	5,2	2	1,2	1,4

### 6.1.1.3 Závislost zpoždění jiskry na oddálení elektrod

Zpoždění mezi signálem od řídicí jednotky motoru, který dává impuls pro přeskočení jiskry, a okamžikem skutečného přeskočení jiskry je závislé také na vzdálenosti elektrod zapalovací svíčky. Čím větší je vzdálenost mezi elektrodami, tím vyšší musí být napětí na sekundární straně zapalovací cívky, které vyvolá přeskočení jiskry, a tím také roste zpoždění. Na obr. 18 je znázorněna závislost zpoždění jiskry na oddálení elektrod, měřená na zapalovací svíčke BRISK DOX15LE-1. Časové zpoždění přeskočení jiskry bylo průměrováno z 90 měření.



Obr. 18. Závislost průměrného zpoždění přeskočení devadesáti jisker na vzdálenosti elektrod svíčky.

### 6.1.2 Projevy poruch

V případě silného znečištění elektrod zapalovací svíčky nedojde k vybití akumulované energie pomocí jiskry. Akumulovaná energie je pak zmařena přes parazitní impedance, což vede k tlumeným oscilacím vysokého napětí, při kterých může nastat destrukce izolace zapalovací cívky. Protože má však zapalovací cívka charakter transformátoru, indukuje se v ní napětí také na primárním vinutí. Díky ochranným obvodům, detekujícím takto zvýšené napětí v primárním obvodu, se polovodičový spínač při překročení určitého napětí uzavře a část akumulované energie se vrátí zpět do nabíjecí sítě, viz obr. 10.

Všechny rozlišitelné poruchy v zapalovací soustavě automobilu se do měřeného proudu na primární straně zapalovací cívky promítají nestandardním přenosem energie transformátorového jádra. Z mechanického pohledu se mohou objevit tyto chyby:

- I. porucha v primárním obvodu zapalovacího systému
- II. odpojená svíčka
- III. nadměrně oddálené elektrody svíčky
- IV. zanesené elektrody svíčky
- V. zkratované elektrody svíčky a proražená izolace sekundárního vinutí zapalovací cívky

Z elektrického hlediska se mohou objevit čtyři základní poruchy, ke kterým se mohou přiřadit výše jmenované chyby:

1. do zapalovacího obvodu není přiveden nabíjecí proud
  - nefunkční polovodičový spínač, přerušené vedení od řídicí jednotky motoru, přerušené primární vinutí
2. dráha jiskry je neúměrně prodloužena
  - svíčka je odpojena, kontakty svíčky jsou nadměrně oddáleny
3. sekundární obvod je rozpojen tak, že nedojde k přeskočení jiskry
  - svíčka je značně zanešená nevodivými mechanickými nečistotami
4. sekundární obvod je zkratován
  - proražená izolace, spojené kontakty svíčky, mezi kontakty svíčky je vodivá nečistota

Výjimečně se mohou objevit kombinace těchto poruch nebo může dojít k rozpojení sekundárního obvodu mimo jiskřiště svíčky a tím k dvojitému jiskření (mimo válec motoru) a energetickému zeslabení zapalovací jiskry. Vznik těchto kombinací je však velmi nepravděpodobný a většinou jedna z výše zmíněných elektrických poruch dominuje svými účinky.

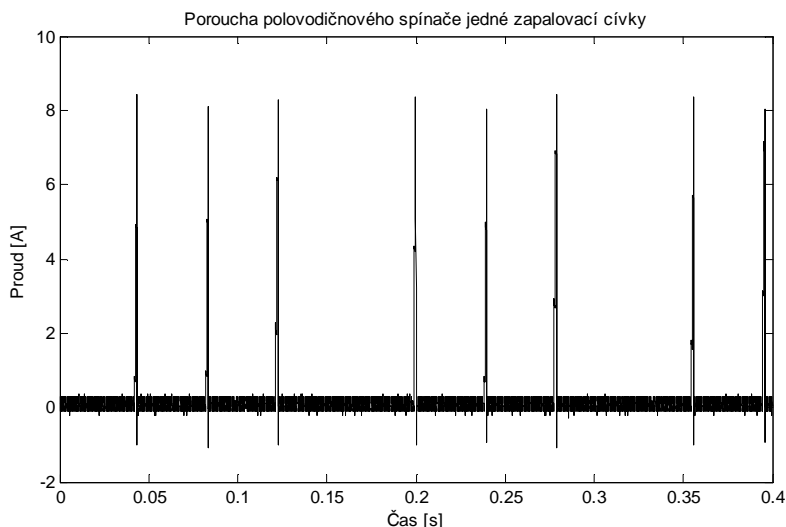
V disertační práci [22] již byla zkoumána porucha odpojené zapalovací svíčky, protože však v této práci bude k identifikaci stejné poruchy použita jiná klasifikační metoda, budou zde popsány i projevy této poruchy.

Po konzultaci s několika autorizovanými servisí bylo zjištěno, že nejčastějšími závadami v zapalovacím systému je vadný polovodičový spínač, oddálení elektrod svíček v důsledku jejich vypálení (stárnutí) nebo zanesení elektrod svíček (například usazeninami karbonu).

Všechny popsané chyby budou v následujícím textu blíže popsány, simulovány a bude diskutována možnost jejich vyhodnocení pomocí centralizované vozidlové diagnostiky. Aby bylo možné přesně nalézt příznaky jednotlivých chyb, byla každá chyba simulována krajní realizací takovéto chyby. Empirickým pozorováním projevů jednotlivých chyb, které jsou zobrazeny v následujících obrázcích 19–24, bylo zjištěno, že projevy většiny chyb jsou pozorovatelné v časovém okně 20  $\mu\text{s}$  po zapálení svíčky (rozepnutí polovodičového spínače). V případě odpojené svíčky do 200  $\mu\text{s}$  a v případě silně zanesené svíčky do 1ms.

### 6.1.2.1 Porucha v primárním obvodu zapalovacího systému

Porucha v primárním obvodu zapalovacího obvodu je nejčastěji způsobena nefunkčním polovodičovým spínačem. Tato závada se podle tvrzení autorizovaných servisů automobilové společnosti Škoda v zapalovací soustavě SIC objevuje nejčastěji. V důsledku této poruchy nedochází k zapálení palivové směsi v příslušném válci motoru. Směs pak proniká až do výfukového potrubí, kde se při vysokých teplotách může samovolně vznítit. Při vznícení paliva ve výfukovém potrubí může dojít k poškození jak katalyzátoru, tak lambda sond. Aby k takovému poškození nedošlo, řídicí jednotka při detekci výpadku konkrétního válce motoru vypne vstřikování do příslušného válce.



Obr. 19. Proudový odběr zapalovacího systému s poruchou spínače v jedné zapalovací cívký.

Na obr. 19 je znázorněn záznam měřeného proudu odebíraného čtyřmi zapalovacími cívkami z autobaterie při volnoběžných otáčkách čtyřválcového motoru a současně poruše polovodičového spínače na jedné zapalovací cívce. Záznam byl měřen v měřicím bodě C dle obr. 3, čímž byla zajištěna separace signálu od ostatních příznaků.

V případě detekce výpadku proudového impulsu lze stanovit poruchu v primárním obvodu zapalovací cívkou (transformátoru). V praxi se v drtivé většině jedná o poruchu polovodičového spínače. Může dojít i k přerušení primárního vinutí zapalovacího transformátoru, ale protože je polovodičový spínač nedílnou součástí zapalovací cívkou, musí být vyměněna celá cívka systému SIC. Jen ve velmi výjimečných případech nastává přerušení přírodních vodičů; ty jsou dvojího typu. Buď napájecí vodiče vedené z pojistkové skříně, nebo spínací vedené od řídicí jednotky motoru.

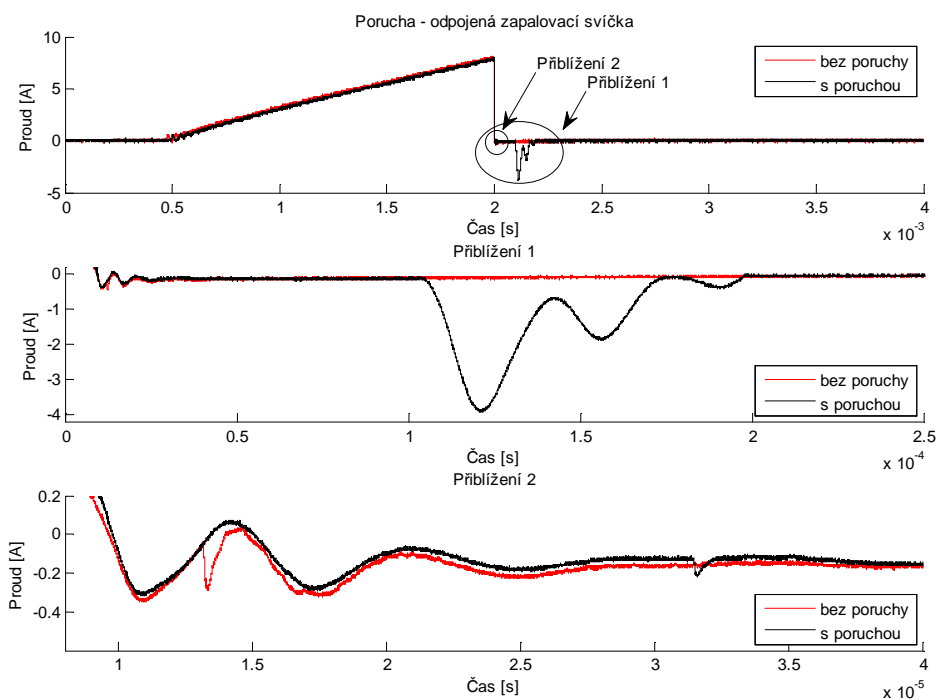
Nalézt poruchu v zapalovací cívce je u této poruchy velmi snadné. Stejně jako u ní, tak u všech dále popsanych je ovšem problém s přiřazením nalezené chyby ke konkrétní zapalovací cívce. Toto přiřazení lze nejnadhěji vytvořit přivedením řídicího signálu pro spínání prvního válce od řídicí jednotky motoru, přidáním další zprávy na motorovou sběrnici CAN, která by informovala o sepnutí zapalovací cívkou prvního válce, nebo přivedením signálu z vačkového senzoru otáček.

#### **6.1.2.2 *Odpojená svíčka***

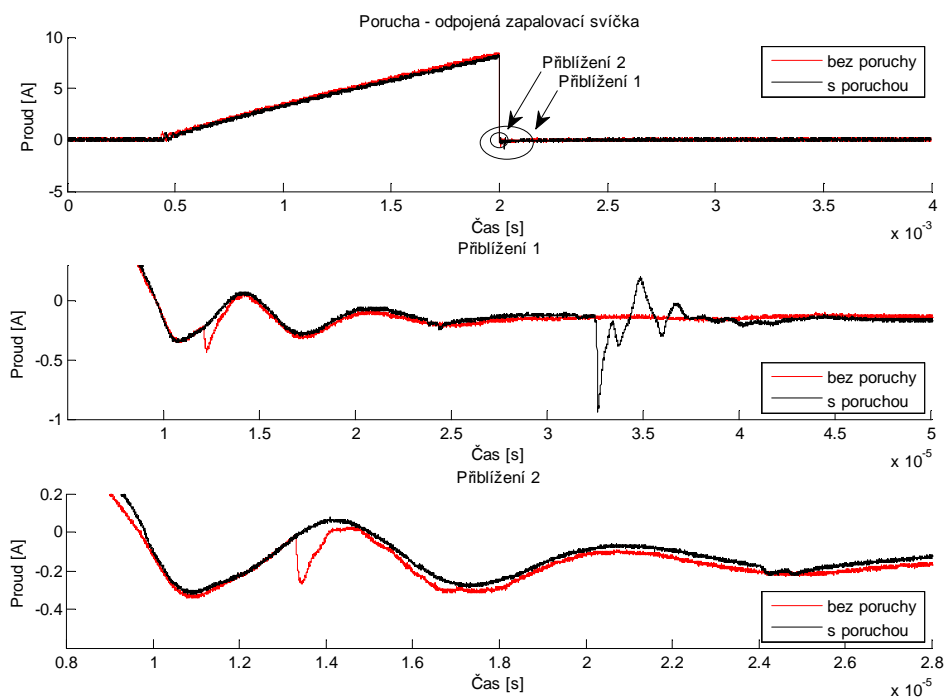
U SIC systému je velmi malá pravděpodobnost, že by došlo k samovolnému rozpojení SIC zapalovací cívkou a svíčky, ale v případě DIC systému je toto riziko poměrně zvýšeno, jelikož zapalovací cívka a svíčka jsou spojeny přes vysokonapěťové kabely o délce i několik desítek centimetrů. Oba systémy vykazují prakticky shodné projevy této poruchy, proto je na obr. 20 a 21 znázorněn průběh měřeného proudu na SIC systému s nepřipojenou zapalovací svíčkou.

Tato porucha je v měřeném proudu charakterizována dvěma typy odlišných a navzájem se vylučujících příznaků. Při sekvenčním měření bylo zjištěno, že nejčastěji se porucha projevuje příznakem znázorněným na obr. 20, ale v přibližném poměru výskytu 1:4 se projevuje příznakem dle obr. 21. V obou případech dochází k přeskočení jiskry ve „fajfce“ (u DIC systému), nebo v konektoru pro připojení svíčky (u SIC systému). Při projevu poruchy odpojení svíčky dle obr. 21 vzniká barvitější a opticky silnější jiskra než v častějším případě dle obr. 20. Tento jev lze vysvětlit částečným vybitím akumulované energie u častější varianty; pokud se však nevybitá energie nahromadí, vznikne méně častý projev s opticky silnější jiskrou a přenosem většího množství energie.





Obr. 20. Proudový odběr zapalovací cívky při odpojené svíčke – častější výskyt.

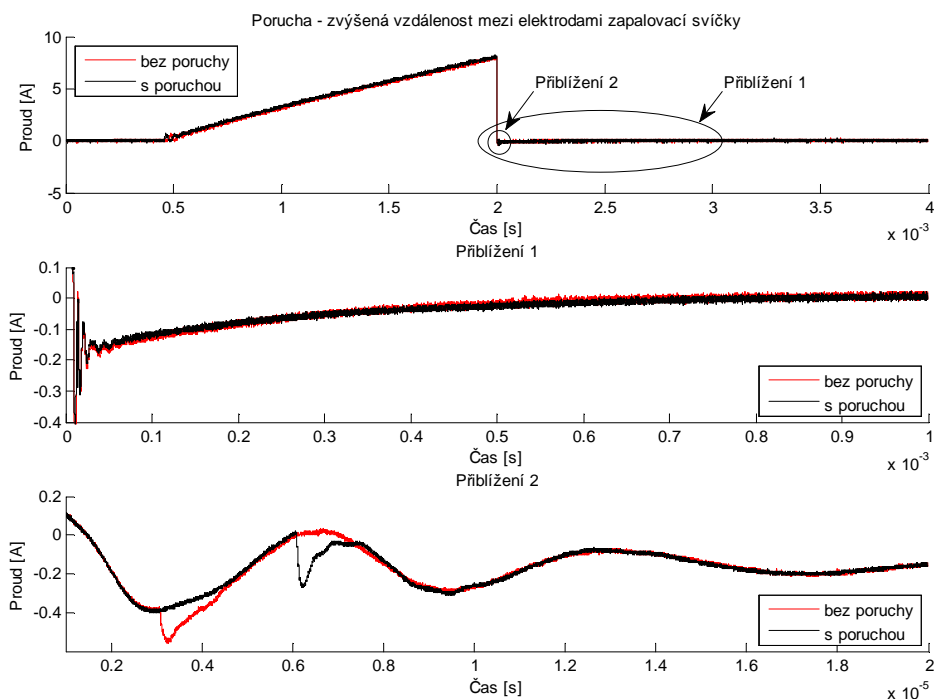


Obr. 21. Proudový odběr zapalovací cívky při odpojené svíčke – méně častý výskyt.

Častější projev poruchy odpojené svíčky patrný z prostředního grafu na obr. 20 vyvolává výraznější proudovou oscilaci, která je při opakovaném měření stálá jak v časové poloze, tak v měřítku i tvaru. Zatímco méně častý projev stejné poruchy patrný z prostředního grafu na obr. 21 je menší, časově nestálý, ale měřítko a tvar se také výrazněji nemění. Méně častý projev je navíc vyvolán s kratším zpožděním od okamžiku přerušení primárního obvodu zapalovacího transformátoru.

### 6.1.2.3 Nadměrně oddálené elektrody svíčky a částečné zanášení karbonem

I když je při provozu automobilu se zážehovým motorem používáno palivo doporučené výrobcem a je zvolen správný typ zapalovacích svíček, dochází k postupnému zanášení i vypalování elektrod těchto svíček. Výrobce z tohoto důvodu doporučuje pravidelné výměny zapalovacích svíček, průměrně po najetí 60 000 km. Aby došlo aspoň k částečnému zpomalení vypalování elektrod, jsou konstruovány ze slitin vzácných kovů nebo legovány stříbrem.



Obr. 22. Proudový odběr zapalovací cívky při oddálených elektrodách svíčky.

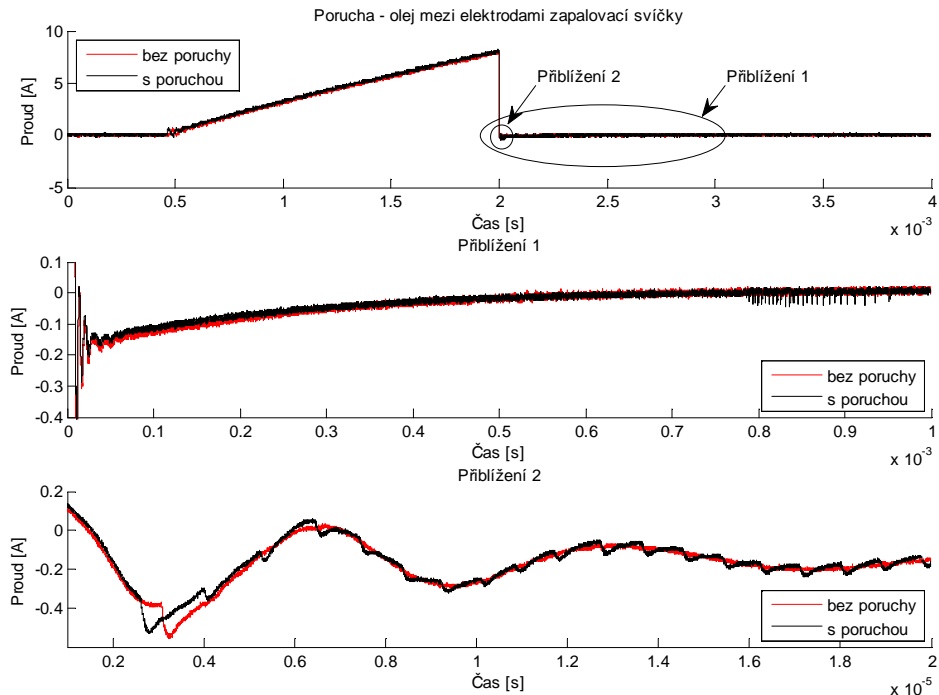
Aby se minimalizovalo množství usazenin na elektrodách zapalovací svíčky, musí být použita svíčka s vhodně zvolenou tepelnou hodnotou. Na konci svíčky je požadována teplota v rozmezí 500 °C až 850 °C, teprve při této teplotě dochází ke spalování usazenin a nastává tzv. samočisticí jev. Pokud je teplota nižší, dochází ke zvýšenému usazování karbonu, pokud vyšší, mohou nastávat samozápaly.

Extrémní situace oddálení elektrod, při níž byl měřen proud v napájecí soustavě automobilu, je vidět na obr. 23. Tato situace byla navozena mechanickým odstraněním kostřicích elektrod zapalovací svíčky, kdy přeskakuje jiskra mezi středovou elektrodou a kovovou objímkou svíčky.

Vypalování elektrod a jejich zanášení karbonem je přímo spjata se změnou elektrické pevnosti prostředí mezi elektrodami. Čím více jsou elektrody oddáleny, nebo zaneseny karbonem, tím větší je elektrická pevnost prostředí. Napětí na sekundární straně tak musí dosáhnout větší hodnoty do okamžiku přeskóčení jiskry. Zpoždění mezi signálem z řídicí jednotky motoru a skutečným přeskókem jiskry se tedy prodlužuje. Drobný proudový impulz se tudíž posouvá se stejnou závislostí jako na obr. 18.

#### 6.1.2.4 Zanesené elektrody svíčky

Pokud je používáno alternativní palivo, případně nekvalitní směsi neodpovídající předepsaným normám, mohou se elektrody zapalovací svíčky zanášet mnohem rychleji. Nejběžnějšími nečistotami na elektrodách svíčky jsou karbonové usazeniny, ale může dojít také k narušení těsnících vlastností pístních kroužků a tím do spalovacího prostoru začne pronikat olej. Další nečistotou na elektrodách svíčky bránící zapálení jiskry tedy může být motorový olej, a právě ten byl použit jako nečistota při měření proudu zaznamenaném na obr. 22.

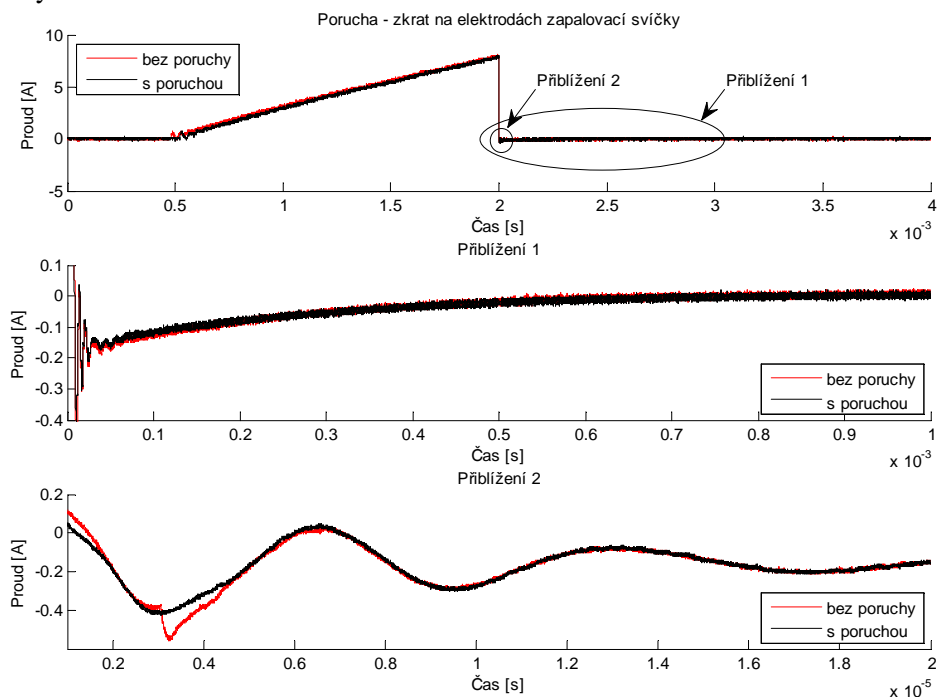


Obr. 23. Proudový odběr zapalovací cívky při olejem zanesených elektrodách svíčky.

Při porovnání měřeného proudu u svíčky se zanesenými elektrodami s proudem měřeným v bezporuchovém stavu je patrné, že se v tlumených oscilacích objevilo velké množství drobných proudových impulzů. Ty jsou způsobeny ochranným obvodem na primární straně vinutí, který při nadměrném nárůstu napětí krátkodobě otevírá spínací tranzistor, viz obr. 10. Další významný projev v podobě proudových impulzů se objevuje kolem 1 ms po přeskocení jiskry; tyto ovšem nebyly blíže zkoumány, neboť nejsou k jednoznačné klasifikaci poruchy nezbytně nutné, jejich přítomnost může posloužit jako sekundární zdroj informace o vzniku poruchy.

### 6.1.2.5 Zkratované elektrody svíčky a proražená izolace sekundárního vinutí zapalovací cívky

Další možná chyba v zapalovací soustavě může nastat při zkratu elektrod svíčky. K takovému zkratu může dojít při vniknutí vodivých nečistot do válce, nebo při mechanickém spojení obou elektrod. Porucha proražené izolace sekundárního vinutí zapalovací cívky je podle autorizovaných servisů automobilové společnosti Škoda v zapalovací soustavě SIC druhou nejčastější poruchou. Při jejím vzniku dochází k akumulaci energie do magnetického obvodu zapalovací cívky, stejně jako v bezporuchovém stavu. Po rozpojení primárního obvodu na elektrodách zapalovací svíčky ovšem nedochází k přeskoku jiskry, jelikož je veškerá energie zmařena elektrickým průrazem v sekundárním vinutí cívky, nebo přes zkratované elektrody svíčky.



Obr. 24. Proudový odběr zapalovací cívky při zkratovaných elektrodách svíčky.

Pokud by nastala některá z těchto poruch, nedošlo by ke vzniku jiskry mezi elektrodami svíčky a tím by nemohla být zapálena směs paliva a vzduchu v příslušném válci motoru. Záznam měřeného proudu při zkratu elektrod svíčky je znázorněn na obr. 26. Při porovnání měřeného proudu poruchy způsobené zkratem elektrod svíčky nebo průrazem sekundárního vinutí s proudem v bezporuchovém stavu vymizel drobný proudový impulz v tlumených oscilacích.

### **6.1.3 Závěr**

V této části byly popsány projevy možných poruch zapalovací soustavy v časovém průběhu odebíraného proudu. Při většině těchto poruch dochází k vyřazení příslušného válce spalovacího motoru z provozu. Takovéto poruchy mají zároveň proudové projevy jednoznačně rozlišitelné od projevů v bezporuchovém stavu. Jinak je tomu však v případě poruch oddálených či částečně zanesených elektrod zapalovací svíčky. Aby bylo možné tyto poruchy rozlišit od bezporuchového stavu, je nutné znát vliv různých faktorů, jakými jsou například použitý typ zapalovací svíčky, přednastavené oddálení jejích elektrod nebo tlak ve válci motoru v okamžiku přeskočení jiskry. Se znalostí těchto faktorů ovlivňujících projevy poruch v měřeném proudu by při vhodné volbě klasifikační metody měly být všechny poruchy zapalovacího systému jednoznačně identifikovatelné.

## **6.2 Stejnoseměrné elektromotory automobilové výbavy**

Stejnoseměrně napájené elektromotory jsou nedílnou součástí automobilové výbavy. Podle jejich důležitosti lze jmenovat například motor čerpadla antiblokovacího systému, motor palivového čerpadla, motor dochlazování, motor stěračů, či motory stahování okének a motor ventilátoru. Centralizovaná vozidlová diagnostika si klade za cíl diagnostikovat poruchy různých částí automobilové výbavy z napájecí sítě vozidla. Diagnostika poruch elektrických motorů z odebíraného proudu je velice rozšířenou vědeckou disciplínou. Většina výzkumu v této oblasti se však zaměřuje na motory napájené střídavým elektrickým proudem. Stejnoseměrným elektromotorům není zdaleka věnována taková pozornost, ale i tak se jedná o velice dobře zmapovaný diagnostický obor, viz [35] až [38].

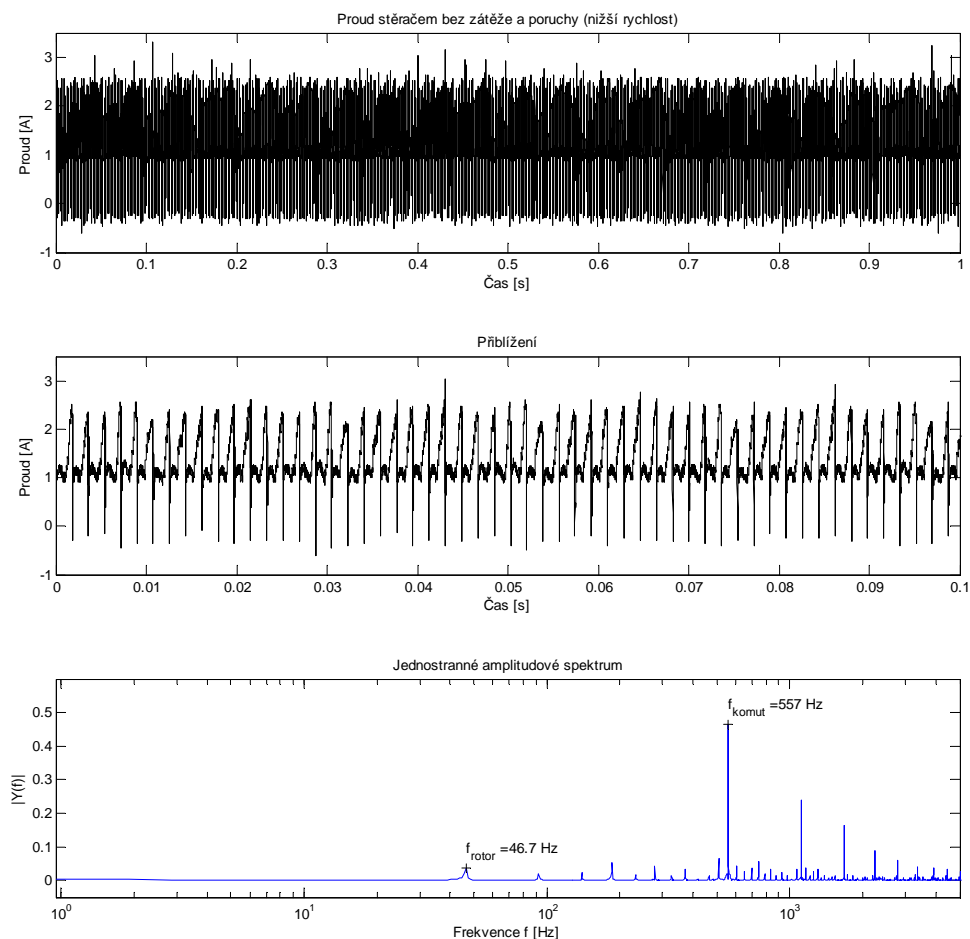
V odebíraném proudu lze však analyzovat mnohem více než jen projevy samotného elektromotoru, ať už se jedná o projevy bezporuchového či poruchového stavu motoru. V odebíraném proudu se projevují také příznaky vyvolané mechanickou částí aktuátorů. Takto lze diagnostikovat poruchové i bezporuchové stavy části mechanické konstrukce automobilu. Ideálním příkladem projevů mechanické konstrukce aktuátoru do odebíraného proudu jsou stěrače.

V disertační práci doktora Ježdíka [22] byly diskutovány možnosti využití centralizované vozidlové diagnostiky u palivového čerpadla ke sledování stárnutí motoru a identifikaci poruchy jedné funkční sekce u osmi pólového motoru. K tomu

byla jako vhodná klasifikační metoda navržena rychlá Fourierova transformace.

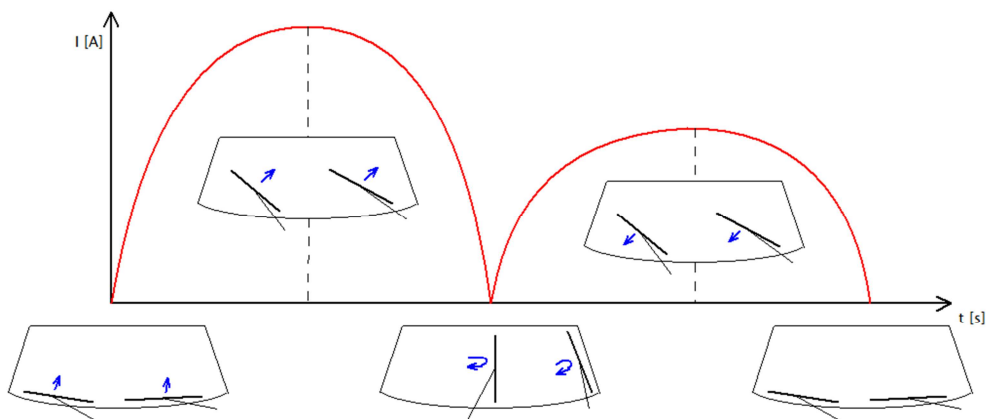
### 6.2.1 *Bezporuchový stav automobilového stěrače*

Jako ideální příklad stejnosměrně napájeného elektromotoru byl pro jeho projevy mechanické zátěže v odebíraném elektrickém proudu zvolen elektromotor stěrače. Záznam naměřeného proudu na motoru stěrače při odpojené zátěži a jeho frekvenční analýza jsou znázorněny na obr. 25. Odpojenou zátěží je myšleno odstranění mechanického převodu kruhového pohybu na pohyb kyvný, včetně ramének stěrače. Provozní stav stěrače bez zátěže v praxi sice nemůže nastat, je však výhodný pro představení projevů poruch samotného stejnosměrně napájeného elektromotoru v napájecí síti bez dalších zkreslujících vlivů.



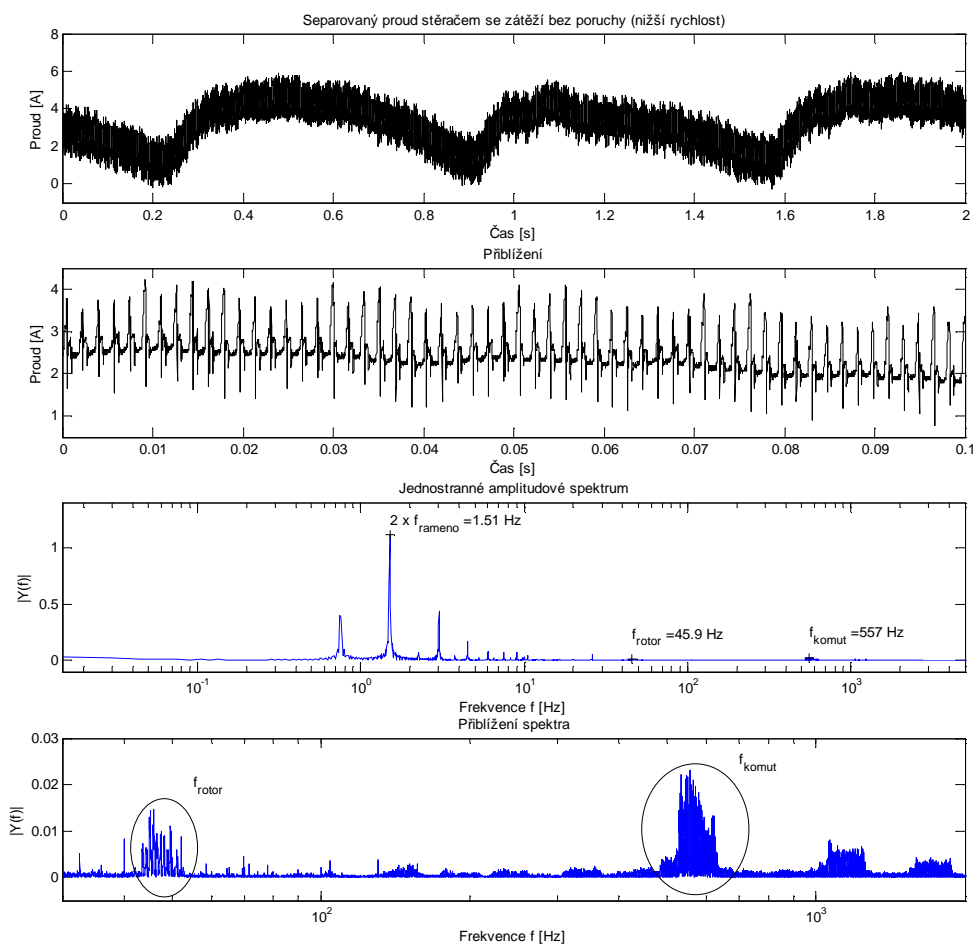
Obr. 25. Proudový odběr elektromotoru stěrače bez poruchy s odpojenou zátěží.

V tomto případě je v jednostranném amplitudovém spektru patrná základní frekvence otáček rotoru a její vyšší harmonické. Mnohem výraznější je však frekvenční složka odpovídající přepínání lamel na komutátoru a její vyšší harmonické frekvence.



Obr. 26. Typický proudový odběr elektromotoru stěrače bez poruchy.

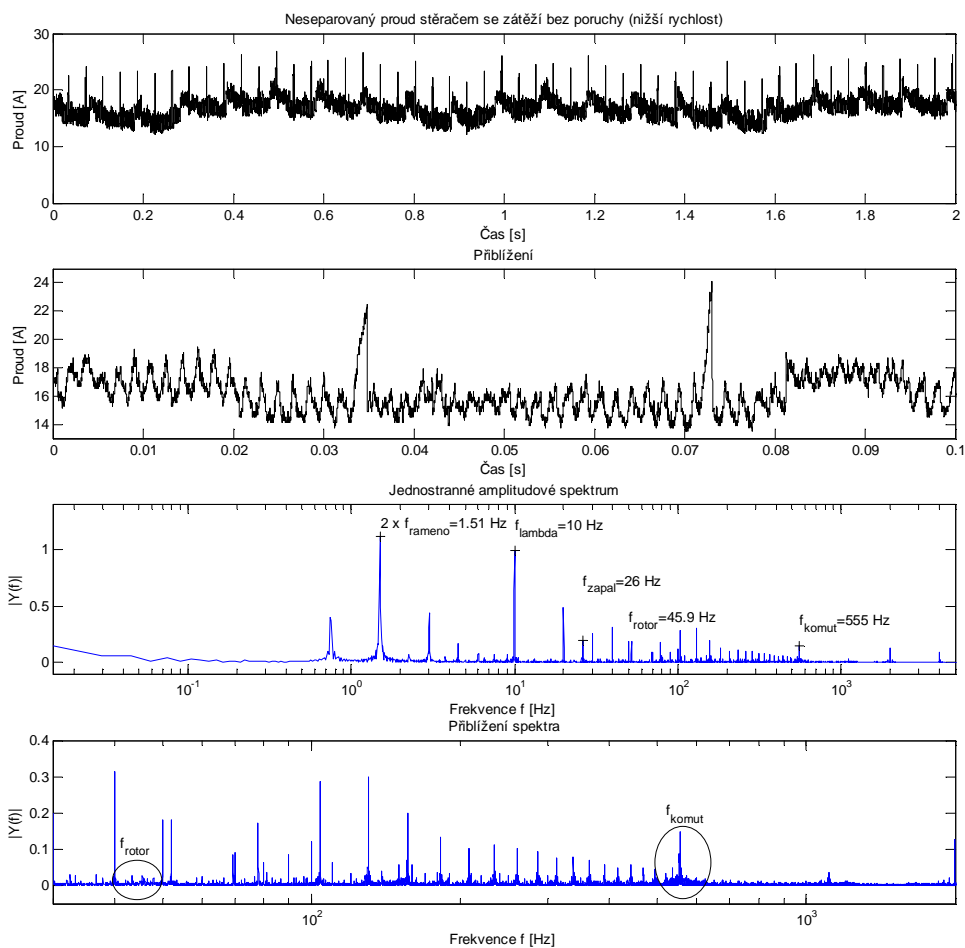
Po připojení zátěže k motoru stěrače se v měřeném proudu (separovaný proud v měřicím bodě C) objevují projevy mechanické konstrukce. Připojenou zátěží se rozumí standardní provozní stav stěrače automobilu. Díky mechanickému převodu rotačního pohybu na kyvný je proudový odběr v průběhu jedné stírací periody nerovnoměrný, viz obr. 26. Velikost odebíraného proudu odpovídá poloze stěrače, respektive rychlosti pohybu raménka stěrače. Čím vyšší rychlostí se raménko pohybuje, tím vyšší třecí sílu musí motor stěrače překonávat a tím větší proud odebírá z napájecí sítě. Ve frekvenční oblasti se tyto projevy mechanické konstrukce projevují na nízkých frekvencích, viz obr. 27. Nejvýraznější frekvenční složka odpovídá druhé harmonické jednoho cyklu pohybu ramének stěrače. Z amplitudového spektra je dále patrné, že složka odpovídající frekvenci rotoru i přepínání lamel komutátoru byla po zatížení elektromotoru stěrače rozprostřena do větší frekvenční oblasti. Tento efekt je způsoben nerovnoměrným zatížením elektromotoru v průběhu jednoho stíracího cyklu.



Obr. 27. Separovaný proudový odběr elektromotoru stěrače bez poruchy.

Neseperovaný proud (měřicí bod B obr. 3) při nastartovaném motoru vozidla a připojené zátěži k elektromotoru stěrače je znázorněn na obr. 28. Elektrický proud odebíraný z napájecí sítě v měřicím bodě B je oproti separovanému proudu z bodu C (obr. 27) výrazně vyšší, neboť je v tomto měřicím bodě měřen také proud odebíraný dalšími elektrickými prvky vozidla zajišťujícími správný chod motoru, např. palivové čerpadlo, vstřikovací ventily, zapalovací systém, škrticí klapka atd. V amplitudovém spektru na obr. 28 tak přibýlo velké množství spektrálních čar a některé dokonce zasahují do spektrální oblasti odpovídající projevům stěrače, což by mohl být problém při následné klasifikaci stavu motoru stěrače pomocí spektrální analýzy.





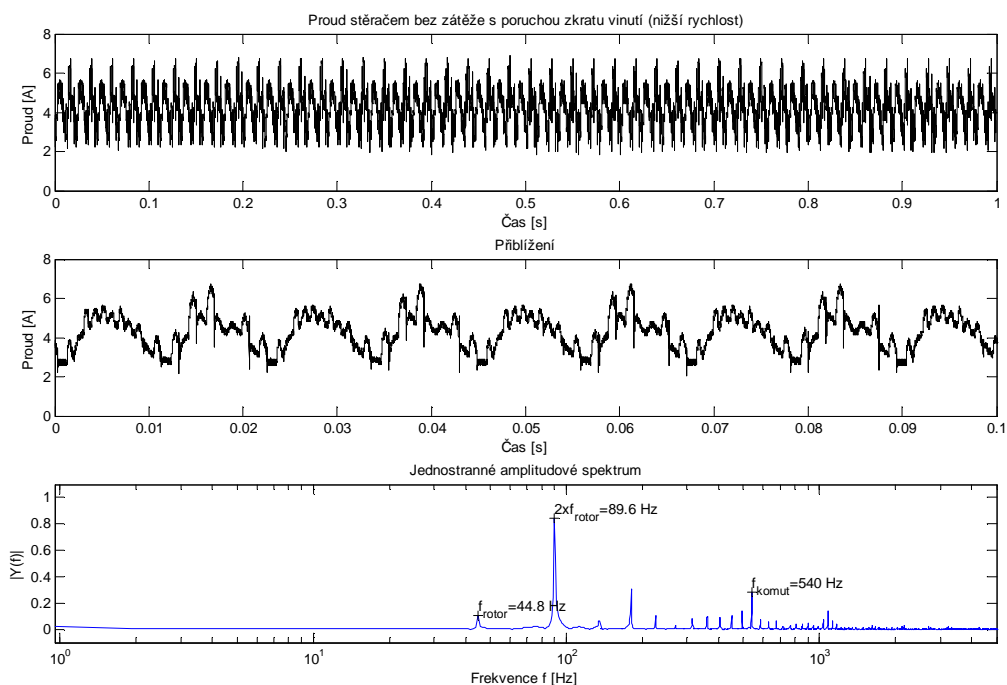
Obr. 28. Neseparovaný proudový odběr elektromotoru stěrače bez poruchy.

## 6.2.2 Projevy poruch stěrače

Stejněsměrně napájené elektromotory na principu točivých strojů mají periodický průběh odebíraného proudu. Všechny poruchy se tudíž musí v odebíraném proudu projevat také periodickými průběhy. Jako nejjednodušší způsob vyhodnocení těchto poruch se jeví frekvenční analýza. Poruchy stejnosměrného motoru by se měly projevat jako zvýšená harmonická frekvenční složka odvozená od násobku základní frekvence. Za základní frekvenci u stejnosměrného motoru lze označit frekvenci odpovídající otáčkám rotoru, nebo frekvenci přepínání lamel na komutátoru. Obě frekvence jsou vůči sobě posunuty o násobek, odpovídající počtu vinutí (pólů) rotoru u dvoupólového statoru.

### 6.2.2.1 Zkratovaná sekce vinutí rotoru

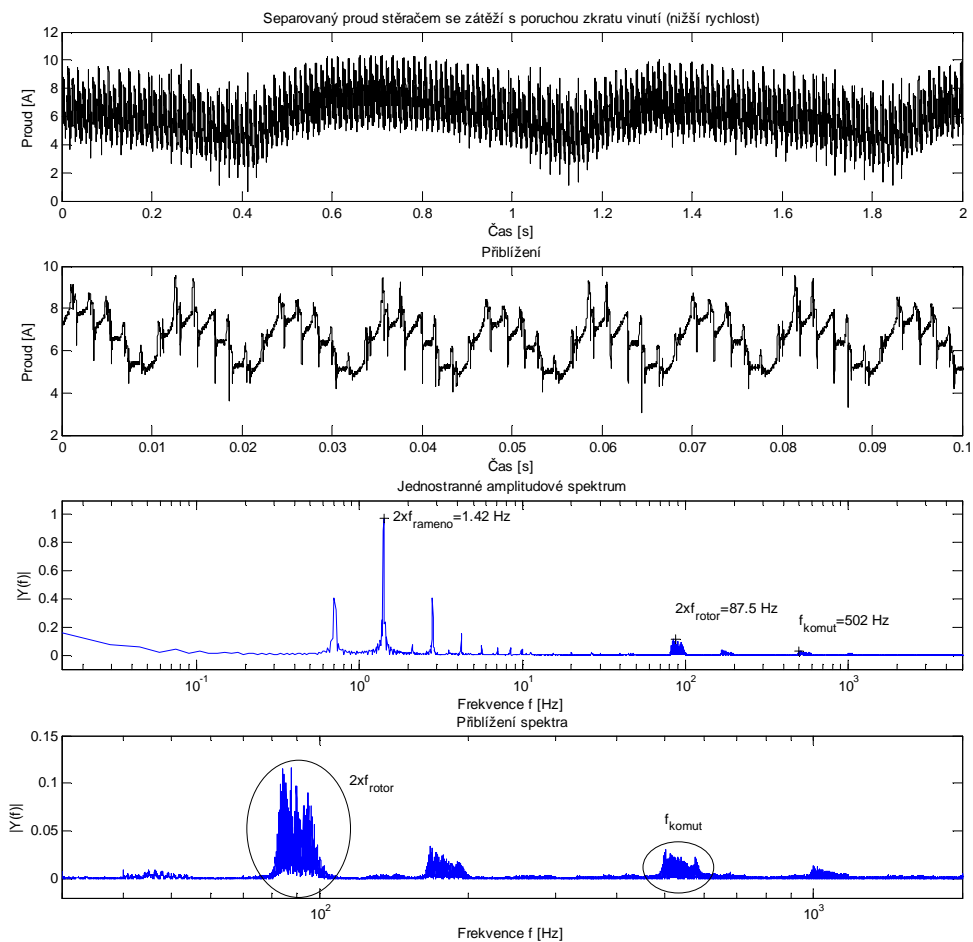
Záznam naměřeného proudu na motoru stěrače se zkratovanou sekcí vinutí rotoru při odpojené zátěži a jeho frekvenční analýza jsou znázorněny na obr. 29. Vinutí bylo zkratováno propojením dvou sousedních lamel komutátoru, tím byl z provozu vyřazen jeden z dvanácti pólů rotoru. Takováto porucha může nastat při elektrickém průrazu či mechanickém poškození ochranné izolace vodiče ve vinutí nebo při zkratu komutátorových lamel uhlíkovým prachem z opotřebovaných kartáčů.



Obr. 29. Proudový odběr elektromotoru stěrače s poruchou zkratu a odpojenou zátěží.

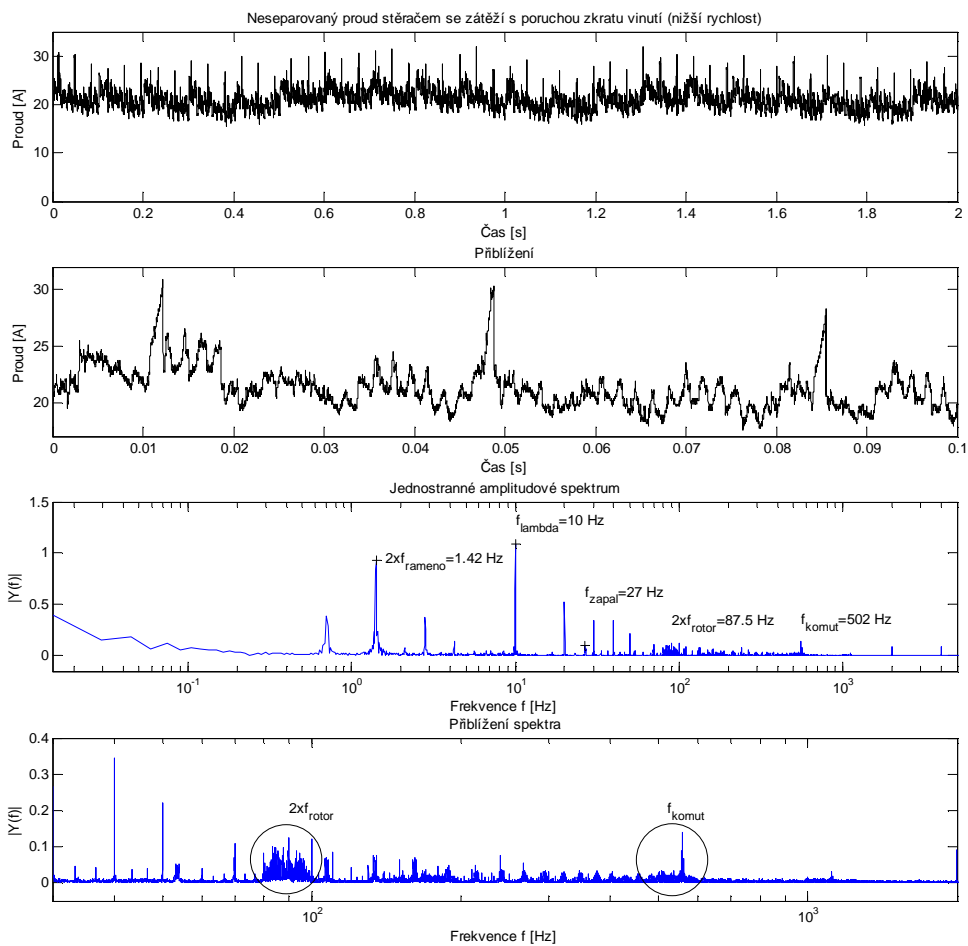
Z amplitudového spektra na obr. 29 je patrné, že oproti bezporuchovému stavu (viz obr. 25) došlo k výraznému nárůstu druhé harmonické frekvence odpovídající otáčkám rotoru.

Separovaný proud (v měřicím bodě C) elektromotorem stěrače po připojení zátěže, tedy v běžném provozu na vozidle, je znázorněn na obr. 30. I zde je patrný nárůst druhé harmonické frekvence odvozené od otáček rotoru, ovšem opět v rozprostřené spektrální oblasti způsobené nerovnoměrnou zátěží působící na elektromotor stěrače.



Obr. 30. Separovaný proudový odběr elektromotoru stěrače s poruchou zkratu.

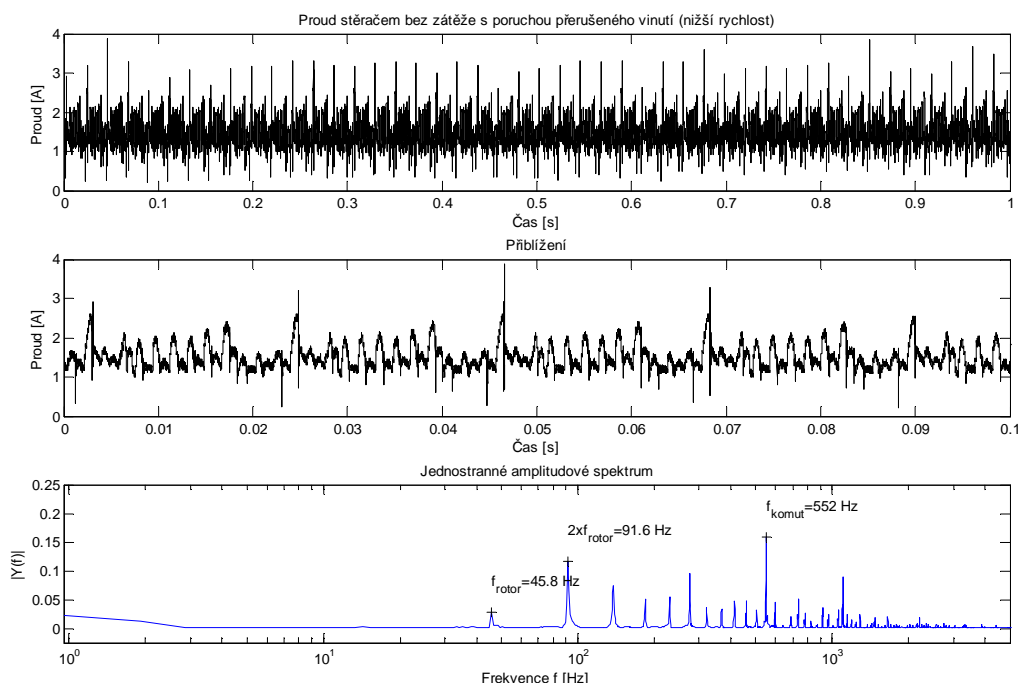
Neseparovaný proud (v měřicím bodě B) při nastartovaném motoru vozidla a zatíženém elektromotoru stěrače je znázorněn na obr. 31. V amplitudovém spektru neseparovaného proudového odběru zarušeného dalšími elektrickými částmi automobilu zajišťujícími správný chod motoru je také patrný nárůst spektrální oblasti odpovídající druhé harmonické frekvenci otáčení rotoru. Sledováním této oblasti by tedy mohlo být možné klasifikovat poruchu zkratovaného vinutí rotoru.



Obr. 31. Neseparovaný proudový odběr elektromotoru stěrača s poruchou zkratu.

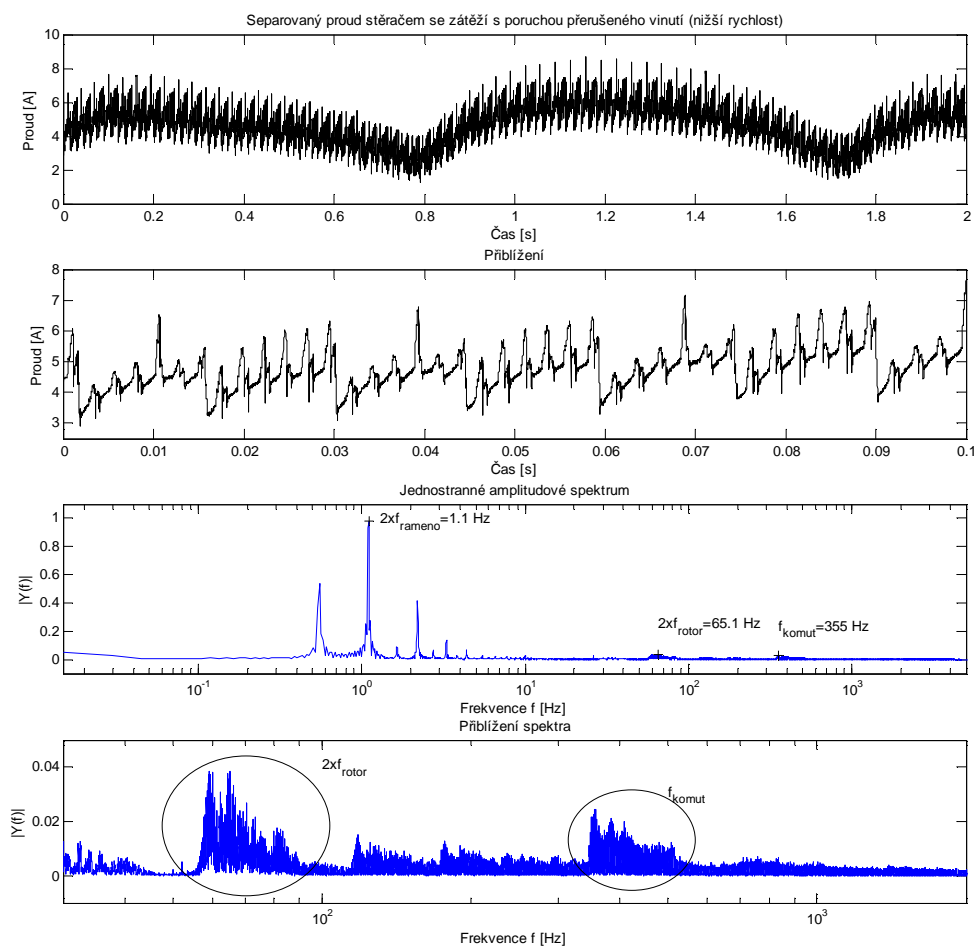
### 6.2.2.2 Přerušené vinutí rotoru

Proud odebraný stěračem bez zátěže s přerušeným vinutím rotoru je znázorněn na obr. 32. Díky kruhovému uspořádání cívek rotoru je i při této závadě motor provozuschopný, ovšem s polovičním počtem pólů rotoru. Výjimkou je velice krátký okamžik, kdy je komutována (zkratována) přerušená cívka, v tu chvíli se motor chová stejně jako v bezporuchovém stavu. I u této poruchy je v amplitudovém spektru patrný nárůst druhé harmonické odpovídající frekvenci otáčení rotoru. Oproti zkratovanému vinutí však došlo k výraznému poklesu celkově odebíraného proudu.



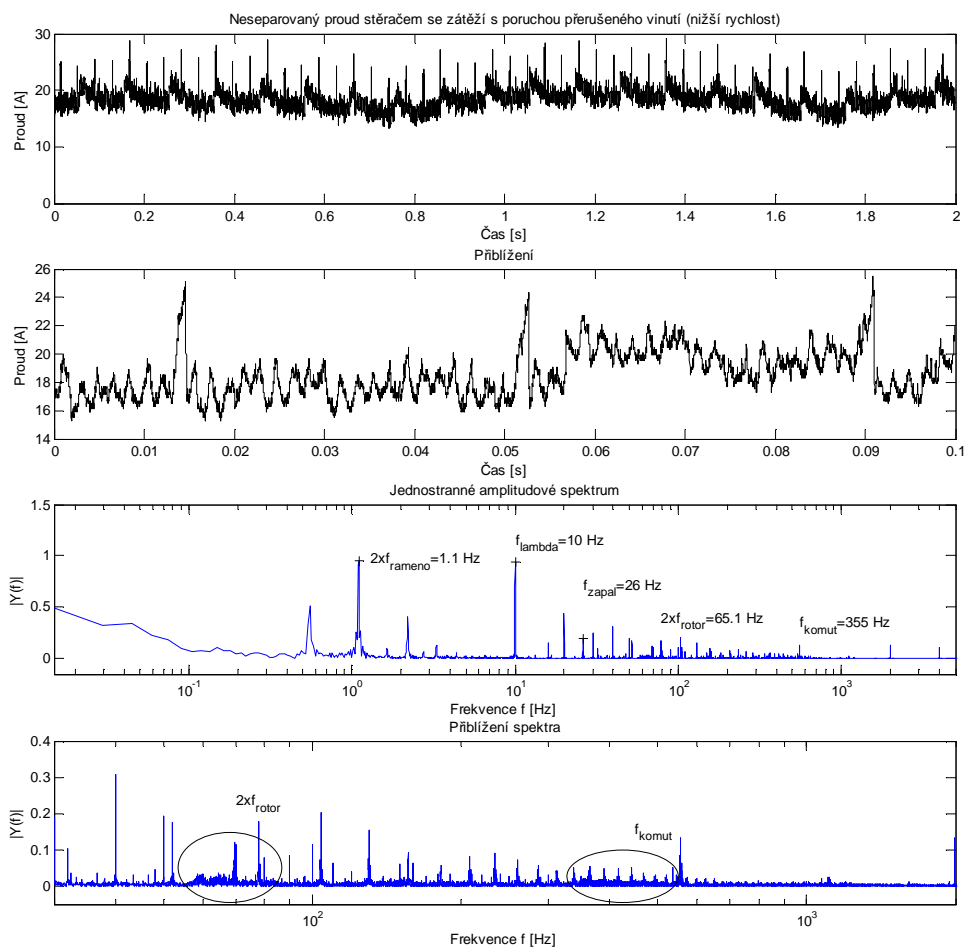
Obr. 32. Proudový odběr elektromotoru stěrače s poruchou přerušného vinutí rotoru a odpojenou zátěží.

Na obr. 33 je patrný záznam separovaného proudu (měřicí bod C) elektromotoru stěrače se zátěží. Projev je velice obdobný poruše zkratovaného vinutí s rozdílem nižší hodnoty odebíraného proudu a díky tomu je zde také patrná podobnost spektrálních čar.



Obr. 33. Separovaný proudový odběr elektromotoru stěrače s poruchou přerušného vinutí.

Poslední obr. 34 opět zobrazuje záznam neseparovaného (měřící bod B) proudu zatíženého elektromotoru stěrače při nastartovaném motoru vozidla. Spektrální analýza zde odpovídá stejným závěrům jako u předchozího měření. Ke klasifikaci poruchy přerušného vinutí rotoru tedy bude potřeba sledovat stejnou spektrální oblast jako při poruše zkratu na vinutí rotoru. K jejich rozlišení tak bude potřeba uvažovat míru nárůstu proudu v této spektrální oblasti.



Obr. 34. Neseparovaný proudový odběr elektromotoru stěrače s poruchou přerušného vinutí.

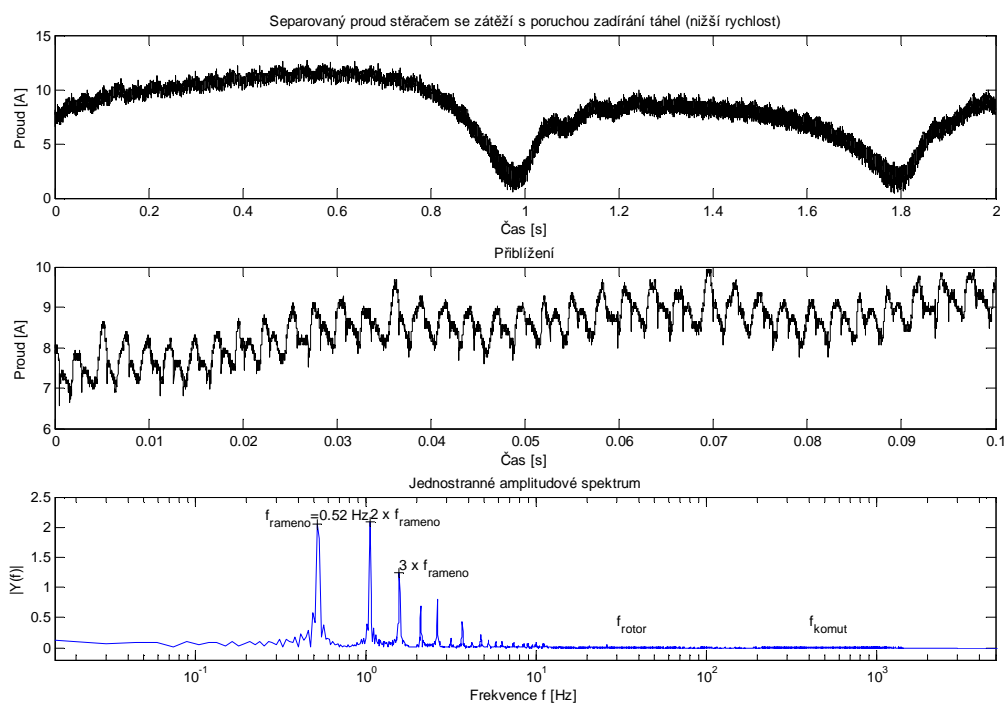
### 6.2.2.3 Zadírání táhel stěrače

Nejčastější poruchou, která se vyskytuje u automobilových stěračů, je zadírání hřídele v mechanismu táhel stěračů, sloužících k převodu rotačního pohybu motoru na pohyb kyvný, viz obr. 35. Při této poruše dochází k nárůstu odebíraného proudu vlivem zvýšené zátěže, a tak se elektromotor stěrače značně přehřívá. Navíc při zvýšené zátěži, jakou je například silný déšť a vyšší rychlost stírání, bimetalová tepelná pojistka náhle rozpojí napájecí okruh a stěrač se v nejméně vhodném okamžiku zastaví. V těchto případech se jedná o vysoce závažnou poruchu, která může ohrozit nejen bezpečnost silničního provozu ale i lidské životy.



Obr. 35. Místo výskytu nejčastější poruchy stěračů – zadírání táhel.

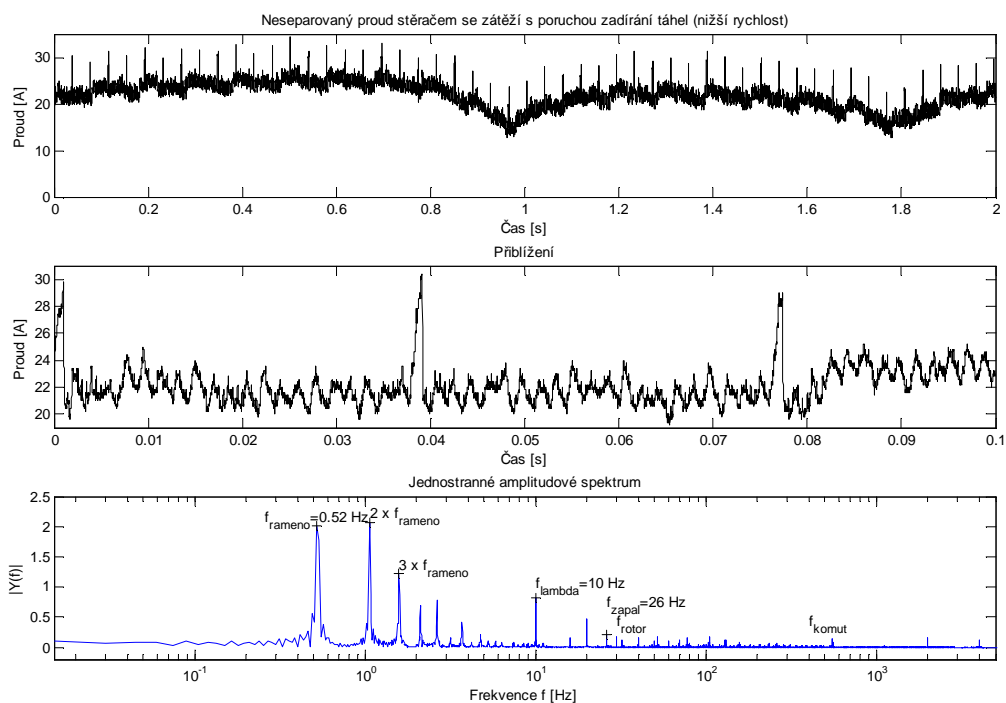
Na obr. 36 je znázorněn průběh separovaného proudu (měřicí bod C) odebíraného elektromotorem stěrače zatíženého táhly ramének se zadírající se hřídelí. Z amplitudového spektra je oproti bezporuchovému stavu patrný nárůst všech harmonických frekvencí odvozených od periody stíracího cyklu. Nejvýraznější je však nárůst první a třetí harmonické frekvence.



Obr. 36. Separovaný proudový odběr elektromotoru stěrače s poruchou zadírání.



Z amplitudového spektra neseparovaného proudu (měřicí bod B) elektromotoru při stejném zatížení zadírajícími se táhly stěrače na obr. 37 je patrné, že frekvenční složky odpovídající cyklickému pohybu ramének stěrače jsou silně dominantní vůči zbylým spektrálním čarám měřeného proudu. Díky tomu je možné poruchu zadírání stěračů z měřeného proudu separovat a dále klasifikovat mnohem dříve, než dojde k nežádoucímu přehřátí a následnému odpojení elektromotoru stěrače.



Obr. 37. Neseparovaný proudový odběr elektromotoru stěrače s poruchou zadírání.

### 6.2.3 Závěr

V této části práce byly představeny projevy běžných poruch u stejnosměrně napájených elektrických motorů v měřeném proudu a jeho spektrální analýze. Poruchy týkající se zkratu a přerušeno-vinutí rotoru jsou z časového průběhu proudu na rozdíl od spektrální analýzy jen obtížně identifikovatelné, a to jak v separovaném, tak především v neseparovaném proudu, který je ovlivněn proudovými odběry dalších elektrických částí automobilu. Tyto poruchy se ve spektrální analýze proudu projevují nárůstem druhé harmonické otáček rotoru, tato harmonická je však vlivem nerovnoměrné zátěže motoru rozprostřena. Projev poruchy zadírání hřídele v táhlech stěrače sice lze pozorovat v časovém průběhu proudu, ale opět mnohem lépe v jeho spektrálním obraze.

## 6.3 Shrnutí

Většina poruch, které se mohou vyskytovat v zapalovací soustavě, způsobí úplné vyřazení příslušného válce motoru z provozu. Všechny tyto poruchy jsou jednoznačně identifikovatelné v časovém průběhu měřeného proudu, z nichž největší proudový projev v napájecí soustavě automobilu vyvolá, respektive nevyvolá, porucha v primárním obvodu zapalovací soustavy. Při této poruše v měřeném proudu chybí osmiampérová proudová špička trvající 1,5 ms. Další proudově významný projev způsobuje porucha odpojené zapalovací svíčky, ostatní poruchy vyvolají v měřeném proudu pouze malé proudové změny o velikosti 200 mA v časovém intervalu jedné mikrosekundy. To vyžaduje zvýšené nároky na použitý měřicí hardware.

Poruchy automobilové výbavy se stejnosměrně napájenými elektromotory jsou díky periodickému průběhu odebíraného proudu lépe identifikovatelné ve spektrální analýze měřeného proudu. Projevy poruch jsou ve frekvenčním spektru separované od projevů proudových odběrů jiných elektrických částí automobilu měřených ve společném bodě napájecí sítě. Poruchy v těchto elektromotorech většinou nezpůsobí okamžité přerušení činnosti motoru, proto je takovému přerušení možné při včasné identifikaci poruchy předcházet. Při vzniku poruchy způsobené zkratem či přerušeným vinutím rotoru dochází k nárůstu určité harmonické frekvence ve spektrální analýze měřeného proudu, stejně jako při mechanickém zadírání částí pro přenos krouticího pohybu do zátěže. Takovéto zadírání, jaké je běžné u táhel stěrače, však může být stejně dobře identifikováno i z časového průběhu měřeného proudu, naopak nerovnoměrné zatěžování elektromotoru způsobuje rozprostření pozorovaných harmonických složek ve spektru. Ke klasifikaci těchto poruch je tedy nutné sledovat zvolený interval harmonických složek frekvenčního spektra.

## 7 Klasifikace nalezených poruch

Jakým způsobem lze poruchy jednoznačně identifikovat měřením odebíraného proudu z napájecí sítě vozidla již bylo prezentováno v předchozí kapitole. Aby však tyto poruchy mohly být klasifikovány vnitřní diagnostikou vozidla, je potřeba pro každou poruchu navrhnout vhodnou klasifikační metodu.

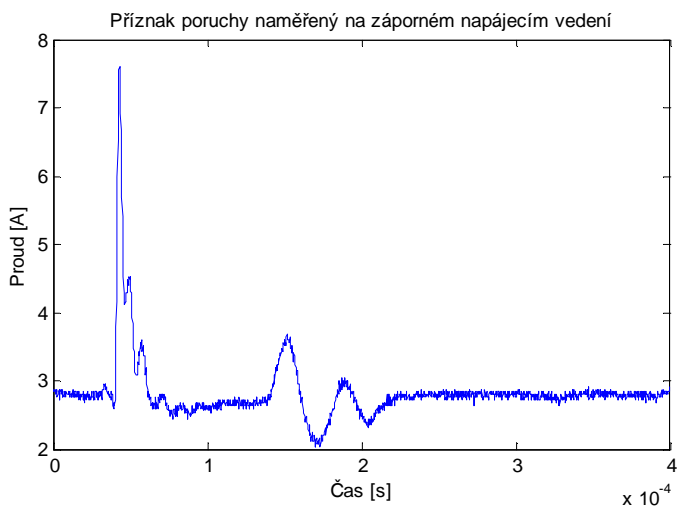
### 7.1 Zapalovací systém

Poruchy v zapalovací soustavě již ve své disertační práci [22] popisoval doktor Ježdík. Zabýval se především poruchou odpojené zapalovací svíčky. Pro její klasifikaci použil metodu vlnkové transformace. Své měření prováděl na vozidle Škoda Fabia I se zapalovacím systémem DIC, a proto byla v této práci použita stejná klasifikační metoda pro hledání stejné poruchy, ale na vozidle Škoda Fabia II se zapalovacím systémem SIC. Navíc jsou zde navrženy i jiné klasifikační metody jak pro poruchu odpojené svíčky, tak pro nově identifikované projevy poruch.

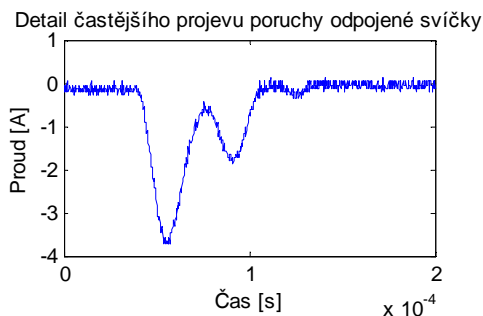
#### 7.1.1 Klasifikace poruchy odpojené svíčky metodou vlnkové transformace

Klasifikace poruchy odpojené zapalovací svíčky byla realizována pomocí vlnkové transformace v [22] při měření na záporném pólu napájecího vedení. Volba záporného pólu napájecího vedení pro umístění proudové sondy však může být u některých částí automobilové výbavy nevhodná. Zapalovací systém je jednou takovou částí, neboť pro připojení záporného pólu využívá více kostřicích bodů. Zapalovací systém DIC je ukostřen pomocí jednoho vedení do kostřicího bodu karoserie, ale také pomocí upevňovacích šroubů k bloku motoru. Zapalovací systém SIC má dokonce dvě vedení do dvou různých kostřicích bodů (na bloku motoru a karosérii, viz obr. 12) a navíc stínění připojené přímo na zapalovací svíčku.

Kvůli vícenásobnému ukostření zapalovací cívky dochází v případě měření na záporném pólu k chybě způsobené měřením pouze částečného proudu odebíraného cívkou. To je patrné z grafu na obr. 38. Nabíjecí proud na tomto grafu naroste z nuly do osmi ampér za méně než 10  $\mu$ s, z grafu na obr. 14 je však patrné, že doba nabíjecího pulzu správně odpovídá hodnotě 1,5 ms. Stejně tak dynamický průběh příznaku poruchy odpojené zapalovací svíčky neodpovídá příznaku naměřenému na kladném napájecím vedení v měřicím bodě C (dále jen správný příznak), viz obr. 20 a v detailu obr. 39.

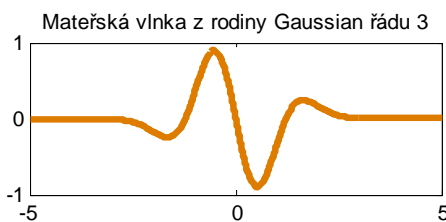


Obr. 38. Průběh proudu odebíraný zapalovací cívkou na záporném napájecím vedení ukostřeném ke karoserii vozidla (častější výskyt).

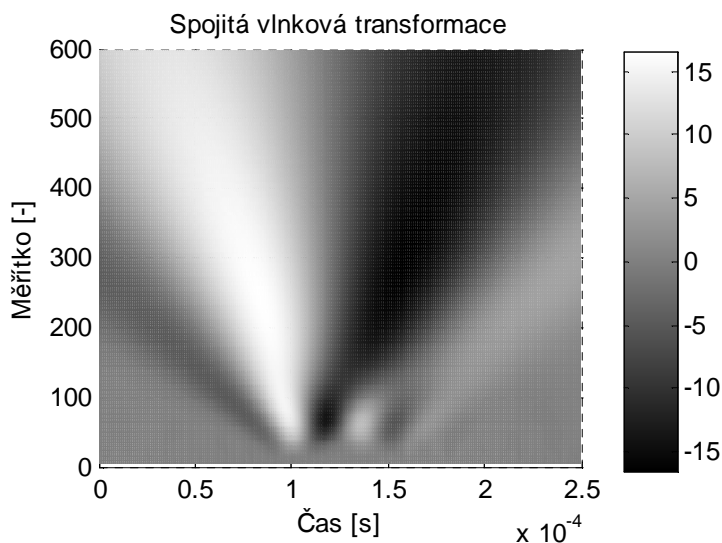


Obr. 39. Detail správného příznaku poruchy odpojené svíčky (měřeno na kladném pólu – častější výskyt).

Pokud je na správný příznak aplikována vlnková transformace s mateřskou vlnkou z rodiny Gaussian řádu 3, viz obr. 40, bude výsledné spektrum koeficientů transformace nadměrně rozprostřeno, viz bílá oblast obr. 41. Vzhledem k tomuto rozprostření spektra může dojít k nechtěné záměně hledaného příznaku za příznak vyvolaný proudovým odběrem jiné části automobilové výbavy.



Obr. 40. Mateřská vlnka z rodiny Gaussian řádu 3.

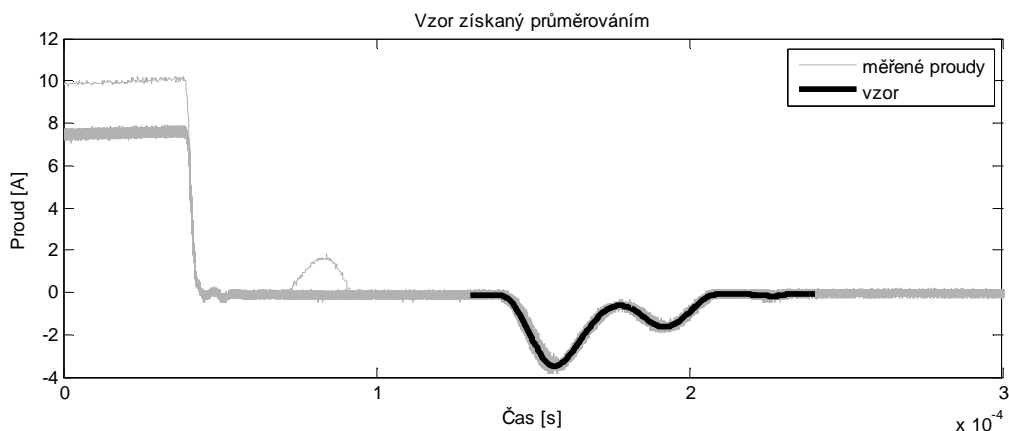


Obr. 41. Koeficienty vlnkové transformace správného příznaku.

Rozprostření spektra vlnkové transformace lze vyřešit vhodnější volbou mateřské vlnky. Mateřské vlnky, které lze použít pro výpočet vlnkové transformace, ovšem podléhají přísným pravidlům, a proto je jejich množství omezené. Ze známých mateřských vlnek se bohužel nepodařilo pro správný příznak poruchy odpojené zapalovací svíčky nalézt takovou, která by rozprostření spektra zabránila. Jako řešení klasifikace této poruchy se však ukázalo použití jiné klasifikační metody, která je dokonce výpočetně jednodušší nežli metoda založená na vlnkové transformaci v [22]. Jedná se o klasifikaci pomocí metody template matching, viz následující kapitola. Další ukázka využití vlnkové transformace pro klasifikaci automobilových poruch je například v [39].

### ***7.1.2 Algoritmus vyhodnocování poruchy odpojené svíčky metodou template matching***

Jak bylo zmíněno dříve, metoda template matching je vhodná pro hledání poruch, které v časovém průběhu měřeného proudu vyvolávají projevy neměnného tvaru i měřítka. V zapalovací soustavě takové podmínky splňuje pouze jediná porucha, a tou je porucha způsobená odpojením zapalovací svíčky. Ta má v měřeném sekundárním proudu dva odlišné projevy, které se vyskytují střídavě v přibližném poměru 1:4. Častější projev poruchy z obr. 20 je stálý jak v měřítku, tak v časové poloze vztahované vůči spádové hraně spínacího signálu od řídicí jednotky motoru. Díky této vlastnosti byl velmi jednoduše vytvořen přesný vzor průměrováním tisíce odměrů primárního proudu, v němž se tento projev vyskytoval. Těchto tisíc vzorků naměřených v bodě C dle obr. 3 (separovaný proudový odběr jedné zapalovací cívky SIC) a vzor vytvořený průměrováním těchto naměrů zachycuje obr. 42.



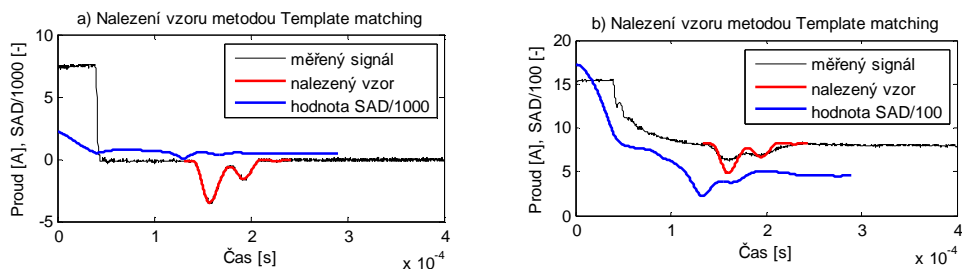
Obr. 42. Vzor častějšího projevu poruchy vytvořený průměrováním z tisíce náměrů.

Obdobným způsobem byl vytvořen i vzor pro druhý méně častý projev této poruchy. Tento projev je však nestálý jak v časové ose, tak v měřítku. Proměnnost v měřítku však není tak velká, aby bránila použití metody template matching. Výsledný vzor této poruchy po synchronizaci proudových náměrů je znázorněn na obr. 43.



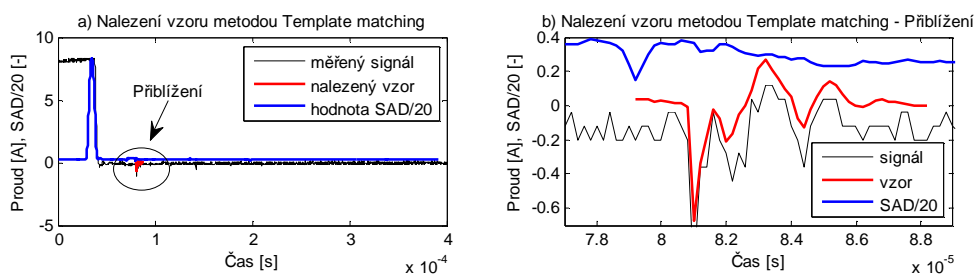
Obr. 43. Vzor méně častého projevu poruchy vytvořený průměrováním z tisíce náměrů.

Vzory byly vytvořeny na separovaném signálu zapalovací cívky prvního válce (bod C obr. 3). Na takto separovaném signálu má metoda vysokou úspěšnost nalezení poruchy i na zapalovacích cívkách dalších válců, viz obr. 44 a). Pro metodu centralizované vozidlové diagnostiky je však důležitějším parametrem úspěšnost nalezení poruchy v neseparovaném signálu. Tedy na signálu naměřeném v bodě B (ideálně v bodě A) obr. 3. Na obr. 44 b) je zobrazen výsledek hledání příznaku poruchy v měřicím bodě B pro vzor častějšího projevu poruchy.



Obr. 44. Nalezení vzoru častějšího projevu poruchy ve zkoumaném časovém okně.

Projev méně časté poruchy dle obr. 43 je bohužel velmi malý. Jeho velikost se blíží velikosti měřeného šumu. Přesto je možné metodou template matching v měřicím bodě C dle obr. 3 (separovaný signál) tento projev poruchy spolehlivě nalézt, viz obr. 45. Měřený šum v měřicím bodě B dle obr. 3 je ovšem mnohem větší. V tomto šumu je projev méně časté poruchy natolik potlačen, že ho již metodou template matching není možné nalézt.

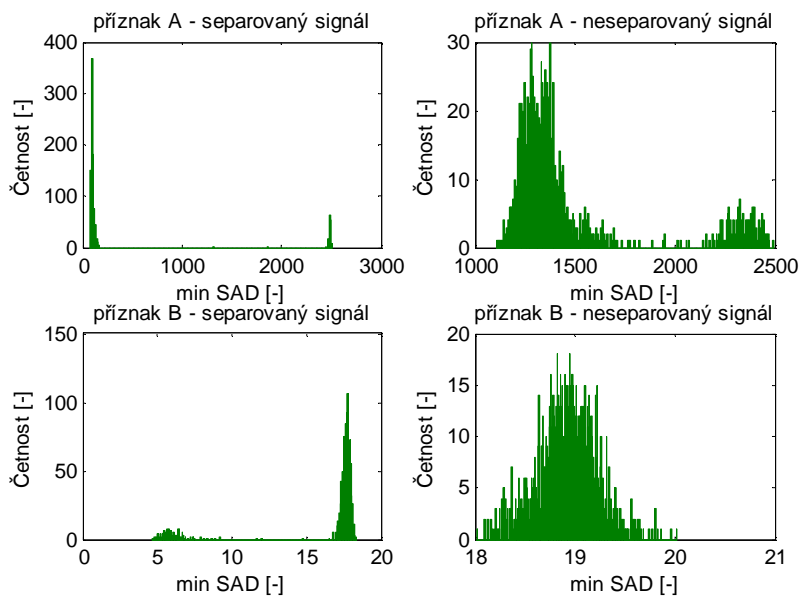


Obr. 45. Nalezení vzoru méně častějšího projevu poruchy ve zkoumaném časovém okně.

### 7.1.2.1 Statistické zhodnocení metody template matching

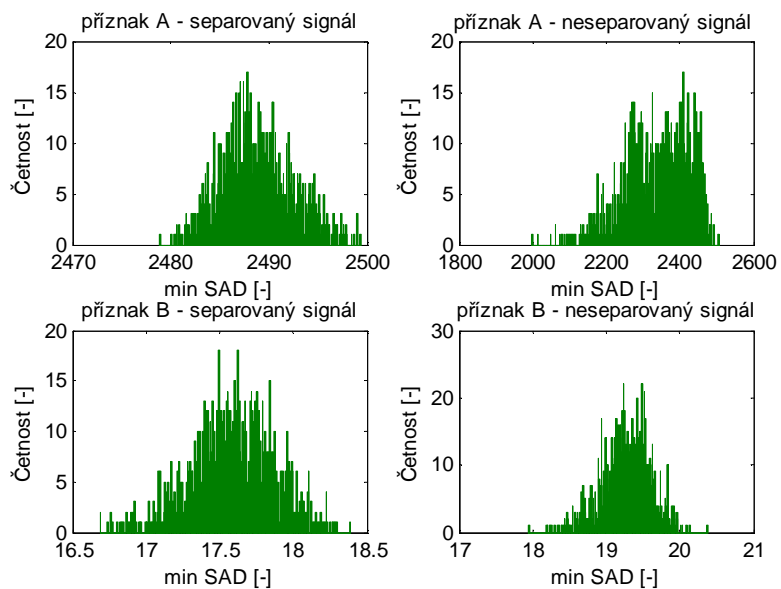
Na každé samostatné zapalovací cívce (SIC) zkoumaného automobilu byly vytvořeny sady jednoho tisíce náměrů při rozdílných otáčkách motoru. Pro zhodnocení kvality algoritmu vyhodnocování poruchy metodou template matching byly synchronně měřeny proudy v měřicím bodě C (separovaný signál) i v měřicím bodě B (neseparovaný signál), a to jak v poruchovém stavu (odpojená svíčka), tak v bezporuchovém stavu (připojená svíčka). Metodou template matching lze vyhodnocovat pouze poruchu odpojené svíčky, která se v měřeném proudě projevuje dvěma vzájemně se vylučujícími příznaky, viz obr. 20 a 21 nebo 42 a 43. Častější projev poruchy je dále označován také jako příznak A a méně častý projev poruchy jako příznak B. Metoda template matching pro vyhodnocení poruchy využívá prahování minimální hodnoty SAD (Sum of absolute differences). Histogram minimálních hodnot SAD z každého náměru (celkový počet náměrů byl 1000) je znázorněn na obr. 46 a 47.

## Histogramy - poruchový stav



Obr. 46. Histogramy minimální hodnoty *SAD* v poruchovém stavu.

## Histogramy- bezporuchový stav



Obr. 47. Histogramy minimální hodnoty *SAD* v bezporuchovém stavu.



Velikost hodnoty *SAD* je závislá na časové délce a počtu vzorků zvoleného vzoru (template). Pro prezentované výsledky byly vytvořeny dva vzory (template), A a B podle obr. 42 a 43 s parametry dle tabulky 6.

Tabulka 6: Parametry vzorů (template) ovlivňující velikost *SAD*.

vzor (template)	A	B
počet vzorků $N$ [-]	2751	151
vzorkovací frekvence $f_{vz}$ [MHz]	25	25

Dle histogramů na obr. 46 lze stanovit prahovací úroveň pro klasifikaci nalezeného a nenalezeného příznaku, viz tabulku 7.

Tabulka 7: Prahovací úrovně pro klasifikaci příznaků.

hledaný příznak	A	B
separovaný signál	300	2000
neseparovaný signál	10	18.5

Dle zvolených prahovacích úrovní byly klasifikovány příznaky měřené při odpojené svíčke (poruchový stav) dle tabulky 8. Na separovaném signálu měřeném v měřicím bodě C nebyly nalezeny žádné shodné příznaky a z tisíce náměrů nebyly pouze čtyři příznaky klasifikovány. Po jejich prozkoumání bylo zjištěno, že se jednalo o nesprávně klasifikované příznaky B této poruchy. Příznak A byl na separovaném signálu nalezen ve 100 % všech výskytů.

Tabulka 8: Počty nalezených příznaků z 1000 poruchových náměrů.

popis	příznaků A	příznaků B	shodných příznaků	nezařazených příznaků
separovaný signál	853	143	0	4
neseparovaný signál	854	90	87	143
shodných separovaných a neseparovaných příznaků	852	3		
falešných neseparovaných příznaků vůči separovaným	2	87		

Pro zhodnocení falešně nalezených příznaků byly stejným způsobem klasifikovány příznaky měřené při připojené svíčke (bezporuchový stav). Výsledky jsou patrné z tabulky 9.

Tabulka 9: Počty nalezených příznaků z 1000 bezporuchových náměrů.

popis	příznaků A	příznaků B	shodných příznaků	nezařazených příznaků
<b>separovaný signál</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	0	1000
<b>neseparovaný signál</b>	<b>1</b>	<b>20</b>	0	979
shodných separovaných a neseparovaných příznaků	0	0		
falešných neseparovaných příznaků vůči separovaným	1	20		

Z těchto výsledků lze na hladině významnosti 1 % stanovit následující hypotézy:

- a. Na separovaném signálu (měřicí bod C) jsou metodou template matching nalezeny příznaky A se 100 % úspěšností.
- b. Na separovaném signálu (měřicí bod C) jsou metodou template matching nalezeny příznaky B se 100 % úspěšností.
- c. Na separovaném signálu (měřicí bod C) jsou metodou template matching nalezeny příznaky A při reálném výskytu příznaků B s 0 % falešných příznaků.
- d. Na separovaném signálu (měřicí bod C) jsou metodou template matching nalezeny příznaky B při reálném výskytu příznaků A s 0 % falešných příznaků.
- e. Na separovaném signálu (měřicí bod C) jsou metodou template matching nalezeny příznaky A při bezporuchovém provozu (připojená svíčka--) s 0 % falešných příznaků.
- f. Na separovaném signálu (měřicí bod C) jsou metodou template matching nalezeny příznaky B při bezporuchovém provozu (připojená svíčka ) s 0 % falešných příznaků.
- g. Na neseparovaném signálu (měřicí bod B) jsou metodou template matching nalezeny příznaky A se 100 % úspěšností.
- h. Na neseparovaném signálu (měřicí bod B) jsou metodou template matching nalezeny příznaky B s 5 % úspěšností.
- i. Na neseparovaném signálu (měřicí bod B) jsou metodou template matching nalezeny příznaky A při reálném výskytu příznaků B s 0 % falešných příznaků.

- j. Na neseparovaném signálu (měřicí bod B) jsou metodou template matching nalezeny příznaky B při reálném výskytu příznaků A s 8 % falešných příznaků.
- k. Na neseparovaném signálu (měřicí bod B) jsou metodou template matching nalezeny příznaky A při bezporuchovém provozu s 0 % falešných příznaků.
- l. Na neseparovaném signálu (měřicí bod B) jsou metodou template matching nalezeny příznaky A při bezporuchovém provozu s 1 % falešných příznaků.

Pro přehlednost byly tyto hypotézy shrnuty do zjednodušené tabulky 10.

Tabulka 10: Zjednodušené shrnutí hypotéz  $H_0$ .

hypotéza $H_0$	signál	nalezený příznak	skutečný příznak	výskyt [%]	
a	separovaný (měřicí bod C)	správný	A	A	100
b			B	B	100
c		falešný	A	B	0
d			B	A	0
e			A	bez poruchy	0
f			B	bez poruchy	0
g	neseparovaný (měřicí bod B)	správný	A	A	100
h			B	B	5
i		falešný	A	B	0
j			B	A	8
k			A	bez poruchy	0
l			B	bez poruchy	1

Po ověření alternativních hypotéz  $H_1$  dojdeme k závěru, že se všechny alternativní hypotézy zamítají, tedy hypotézy  $H_0$  nemůžeme zamítnout. Na hladině významnosti 1 % tak můžeme tvrdit, že všechny stanovené hypotézy  $H_0$  platí.

Z výše uvedeného lze tedy vyvodit fakt, že porucha odpojení zapalovací svíčky je i v měřicím bodě B dobře klasifikovatelná díky dobré klasifikaci častějšího projevu poruchy s proudovým příznakem A. Z tabulek 8 a 9 je dále patrné, že nalezení chyby s určením konkrétního typu projevu je dostatečně přesné pouze pro separovaný signál. Určení konkrétního typu projevu je však z hlediska diagnostického nedůležité, na rozdíl od informace zda porucha skutečně nastala. Chybné nálezy poruchy jsou pod hranicí 3 %, a naopak dobrá detekce poruch nad hranicí 85 % i na neseparovaném signálu, což dává dostatečně kvalitní výsledky pro

správnou detekci poruchy s rozhodovací hranicí empiricky stanovenou na 50 % výskytu detekce poruchy v měřicím bodě B.

### 7.1.2.2 Měřicí body a parametry měření

Měřicí bod C: vhodné

Měřicí bod B: použitelné

Měřicí bod A: nevhodné

Délka záznamu: 400  $\mu$ s

Vzorkovací frekvence: 25 MHz

Rozlišení: 80 mA

Max. proud v měřicím bodě C: 11 A

Max. proud v měřicím bodě B: 110 A (25 A je-li v provozu pouze motor)

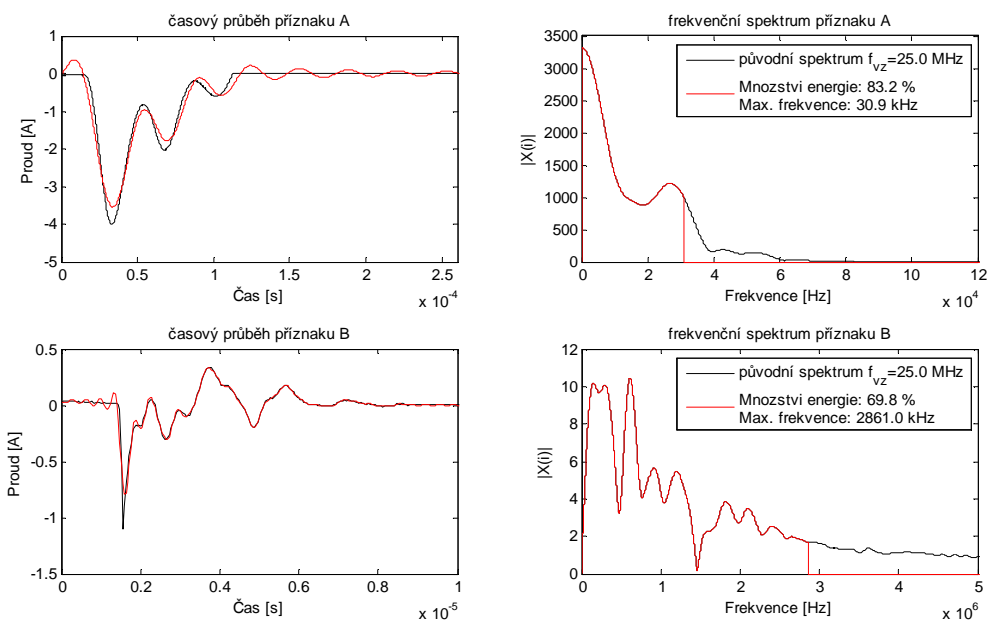
Max. proud příznaku v bodě C: -4 A

### 7.1.2.3 Minimální vzorkovací frekvence

Výše popsané měřicí parametry odpovídají nastavení použitých měřicích přístrojů při analýze hledané poruchy. Délka záznamu měřeného signálu vyhovuje běžným požadavkům pro další zpracování. Použité rozlišení měřeného signálu vzhledem k vstupnímu rozsahu proudu v měřicím bodě C odpovídá dynamickému rozsahu 1:200, což je dostačující požadavek pro použití jednoduchého analogově-digitálního převodníku (ADP) s efektivním počtem bitů 8. V měřicím bodě B je potřebný dynamický rozsah 1: 1375, což odpovídá ADP s efektivním počtem bitů 11. Z hlediska ADP, ale především i rychlosti zpracování měřeného signálu je nejvýznamnějším parametrem vzorkovací frekvence  $f_{vz}$ .

Jednoznačné určení  $f_{vz}$ , která by udávala hranici použitelnosti této metody, však není možné, neboť hledané příznaky svým charakterem odpovídají neperiodickým dějům. Proto je frekvenční spektrum takovýchto příznaků nekonečné. Většina energie ve spektru je však obsažena v nižších harmonických složkách, proto je možné při průzkumu spektra každého příznaku nalézt hraniční frekvenci, po kterou je ve spektru zachováno dostatečné množství energie pro věrnou rekonstrukci hledaného příznaku a všechny vyšší frekvence je již možné vypustit. Pro nalezení spektra příznaků byla použita rychlá Fourierova transformace (FFT), která je primárně určena pro periodické děje. Aby bylo zvýšeno rozlišení ve frekvenčním spektru (menší frekvenční bin), je změřený příznak doplněn konstantními hodnotami do celkového počtu vzorků  $2^{20}$ . Dále byla od prodlouženého příznaku odečtena stejnosměrná složka, která pro metodu template matching nenese užitečnou informaci, pouze do frekvenčního spektra zanáší aditivní (zkreslující) informaci o celkovém množství energie.

Získané frekvenční spektrum pomocí FFT transformace bylo pro oba příznaky vytvořeno ze vzorů metody template matching, tedy zprůměrováním tisíce náměrů. Tím byl ze spektra odfiltrován vysokofrekvenční šum vzniklý při měření. Původní signál obou příznaků a jejich frekvenční spektra jsou na obr. 48 znázorněny černou barvou, rekonstruovaný signál s omezenou frekvenční složkou je znázorněn barvou červenou. Maximální frekvence a tím i množství zachované energie byly stanoveny empiricky na základě podobnosti rekonstruovaného signálu s původním signálem. Hraniční vzorkovací frekvence je tedy dána Nyquistovým teorémem jako vyšší než dvojnásobek maximální frekvence, což pro příznak A odpovídá minimální  $f_{vz}$  62 kHz a pro příznak B  $f_{vz}$  6 MHz. Nezbytnou podmínkou při vzorkování touto nízkou frekvencí je použití předřadného filtru s dolní propustí, který zabrání vzniku aliasingu.



Obr. 48. Frekvenční spektra příznaků hledaných metodou template matching.

Jistou náповědou při volbě minimální  $f_{vz}$  může být také časová délka obou příznaků a počet vzorků při zvolené  $f_{vz}$ , viz tabulku 11. Příznak B je však jednoznačně identifikovatelný především krátkým proudovým impulzem o časové délce 360 ns, což pro  $f_{vz} = 25$  MHz odpovídá 9 vzorkům, při snížení  $f_{vz}$  na 6 MHz odpovídá 2,2 vzorkům. Vlivem vyššího podvzorkování tedy může dojít k úplné ztrátě informace o existenci proudového impulzu.

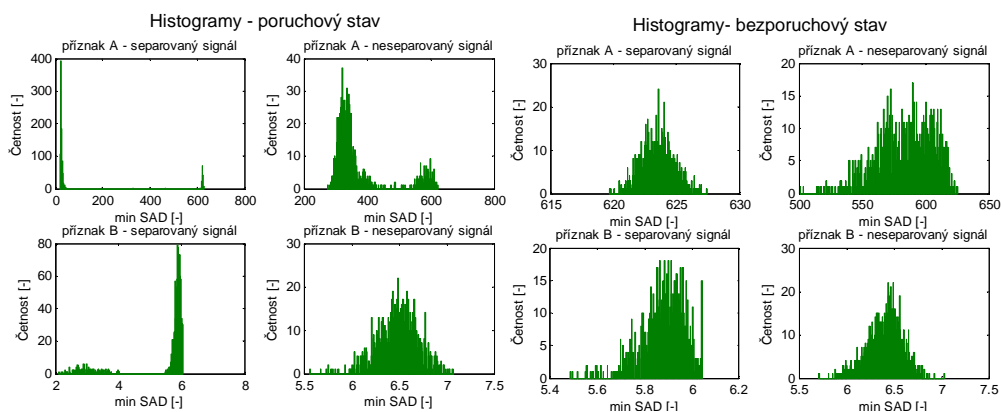
Tabulka 11: Počet vzorků na příznak při změně vzorkovací frekvence.

		$f_{vz}$ [MHz]		
		25	6	0,062
příznak	$T$ [μs]	vzorku [-]		
A	110	2750	660	68
B	6	150	36	0,37

Při snížení vzorkovací frekvence na hodnotu  $f_{vz} = 6,25$  MHz byla opět aplikována vyhodnocovací metoda template matching. Pro sníženou  $f_{vz}$  byly znovu vygenerovány odpovídající vzory (template) a následně získány histogramy minimální hodnoty SAD pro tisíc náměrů bezporuchového i poruchového stavu, a to jak v měřicím bodě C (separovaný signál), tak v bodě B (neseparovaný signál), viz obr. 49. Pro samotnou klasifikaci poruchy byly podle histogramu upraveny prahovací hodnoty dle tabulky 12.

Tabulka 12: Prahovací úrovně pro klasifikaci příznaků při  $f_{vz} = 6,25$  MHz.

hledaný příznak	A	B
separovaný signál	75	500
neseparovaný signál	5	6



Obr. 49. Histogramy minimální hodnoty SAD v bezporuchovém i poruchovém stavu pro  $f_{vz} = 6,25$  MHz.

Výsledky klasifikace poruchy při snížené vzorkovací frekvenci jsou zobrazeny v tabulkách 13 a 14. Z nich po porovnání s tabulkami 8 a 9 vyplývá, že snížená  $f_{vz}$  ještě neměla žádný vliv na správnou klasifikaci častějšího (příznaku A) ani méně častého (příznaku B) projevu poruchy.

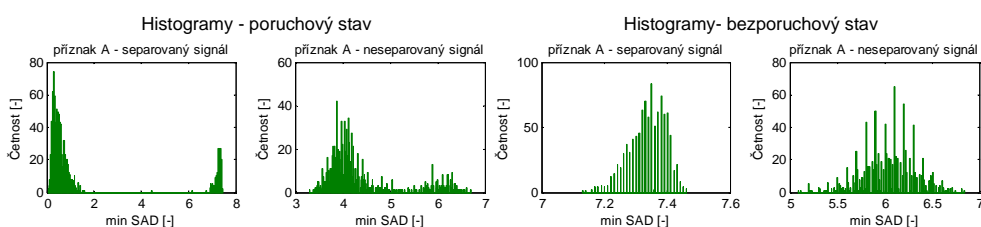
Tabulka 13: Počty nalezených příznaků z 1000 poruchových náměrů při  $f_{vz} = 6,25$  MHz.

popis	příznaků A	příznaků B	shodných příznaků	nezařazených příznaků
<b>separovaný signál</b>	<b>853</b>	<b>145</b>	0	2
<b>neseparovaný signál</b>	<b>854</b>	<b>15</b>	11	142
shodných separovaných a neseparovaných příznaků	852	4		
falešných neseparovaných příznaků vůči separovaným	2	11		

Tabulka 14: Počty nalezených příznaků z 1000 bezporuchových náměrů při  $f_{vz} = 6,25$  MHz.

popis	příznaků A	příznaků B	shodných příznaků	nezařazených příznaků
<b>separovaný signál</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	0	1000
<b>neseparovaný signál</b>	<b>0</b>	<b>24</b>	0	976
shodných separovaných a neseparovaných příznaků	0	0		
falešných neseparovaných příznaků vůči separovaným	0	24		

Obdobným způsobem bylo testováno snížení  $f_{vz}$  na hodnotu 62 kHz. Histogramy minimální hodnoty SAD pro tuto frekvenci jsou patrné z obr. 50.



Obr. 50. Histogramy minimální hodnoty SAD v bezporuchovém i poruchovém stavu pro  $f_{vz} = 62,5$  kHz.

Tabulka 15: Prahovací úrovně pro klasifikaci příznaků při  $f_{vz} = 62,5$  kHz.

hledaný příznak	A	B
<b>separovaný signál</b>	2	5,5
<b>neseparovaný signál</b>	-	-

Výsledky klasifikace poruchy po snížení  $f_{vz}$  a opětovné úpravě prahovacích hodnot dle histogramů, viz tabulku 15, jsou zaznamenány v tabulkách 16 a 17. Při jejich opětovném porovnání s tabulkami 8 a 9 lze tvrdit, že příznak A (častější projev) i přes mírné pohoršení v měřicím bodě B (neseparovaný signál) stále nabízí dostatečně přesné výsledky pro stanovení důvěryhodného závěru klasifikujícího vznik poruchy odpojené svíčky - zatímco klasifikace příznaku B při této vzorkovací frekvenci již zcela selhala.

Tabulka 16: Počty nalezených příznaků z 1000 poruchových náměrů při  $f_{vz} = 62,5$  kHz.

popis	příznaků A	příznaků B	shodných příznaků	nezařazených příznaků
<b>separovaný signál</b>	<b>853</b>	<b>0</b>	0	147
<b>neseparovaný signál</b>	<b>856</b>	<b>0</b>	0	144
shodných separovaných a neseparovaných příznaků	850	0		
falešných neseparovaných příznaků vůči separovaným	6	0		

Tabulka 17: Počty nalezených příznaků z 1000 bezporuchových náměrů při  $f_{vz} = 62,5$  kHz.

popis	příznaků A	příznaků B	shodných příznaků	nezařazených příznaků
<b>separovaný signál</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	0	1000
<b>neseparovaný signál</b>	<b>29</b>	<b>0</b>	0	971
shodných separovaných a neseparovaných příznaků	0	0		
falešných neseparovaných příznaků vůči separovaným	29	0		

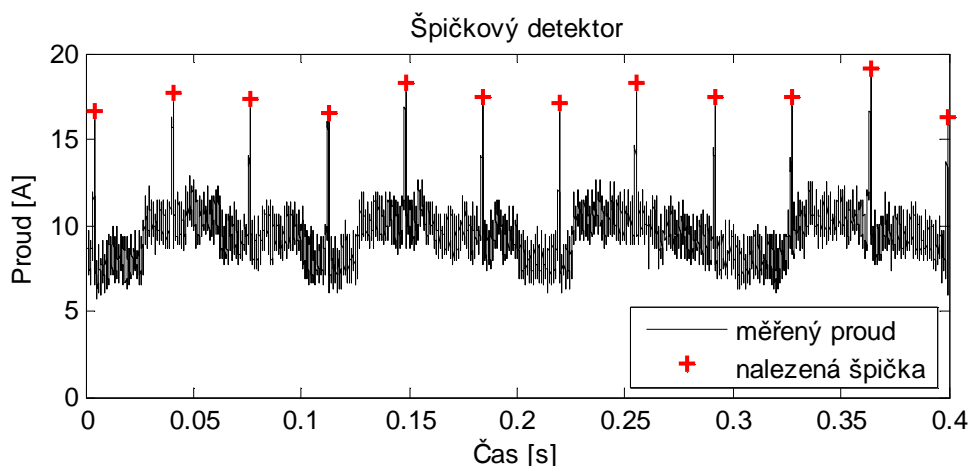
### 7.1.3 Detektor pulzů a porucha v primárním obvodu

Porucha v primárním obvodu zapalovací cívky v drtivé většině případů vede k trvalému rozpojení elektrického obvodu. Tento jev se v důsledku projevuje nulovým proudovým odběrem porouchané zapalovací cívky bez ohledu na to, zda došlo k přerušení přívodního vedení či poškození polovodičového spínače (v praxi nejčastější případ). Takovýto projev chybějícího proudového impulsu v napájecím proudu, viz obr. 19, je nejnáze klasifikovatelný pomocí detektoru pulzů dle rovnic (6) až (8) z kapitoly 5.7 na straně 32.



Díky charakteristické strmosti nabíjecího proudu zapalovací cívky (mnohonásobně kratší sestupná hrana, velký nárůst proudu a krátký interval pulzu) je vyloučena záměna proudového impulsu zapalovací cívky s přechodovým jevem vyvolaným při náběhu jiného spotřebiče automobilové výbavy.

Pro implementaci detektoru pulzů byly stanoveny konstanty  $T_1$  a  $T_2$  rovnice (6) dle typických intervalů náběžné ( $t_1 = 1,2$  ms) a sestupné hrany ( $t_2 = 80$   $\mu$ s). Tedy při vzorkovací frekvenci měřeného proudu  $f_{vz} = 5$  MHz na hodnoty  $T_1 = 6000$  a  $T_2 = 400$  vzorků. Prahovací konstanty detektoru pulzů dle rovnice (7) byly nastaveny na hodnoty  $H_1 = 5A$  a  $H_2 = 5A$ . Výsledky detektoru pulzů byly ověřeny na signálu měřeném v bodě B dle obr. 3 při volnoběžných otáčkách motoru, viz obr. 51.



Obr. 51. Výsledky hledání proudových impulsů s využitím detektoru pulzů.

Pro identifikaci konkrétní zapalovací cívky musí být detektor pulzů synchronizován buď s řídicím signálem předem stanovené zapalovací cívky, s obdobnou informací získanou ze sběrnice CAN (v současné době není u vozů značky Škoda k dispozici), nebo ze senzoru otáček vačkového hřídele. Ze sběrnice CAN je v současné době možno získat informaci o otáčkách motoru a tím omezit oblast prohledávaného prostoru detektorem pulzů. Výpadek proudového impulsu je klasifikován jako porucha primárního obvodu přiřazené zapalovací cívky.

### 7.1.3.1 Měřicí body a parametry měření

- Měřicí bod C: vhodné
- Měřicí bod B: vhodné
- Měřicí bod A: použitelné

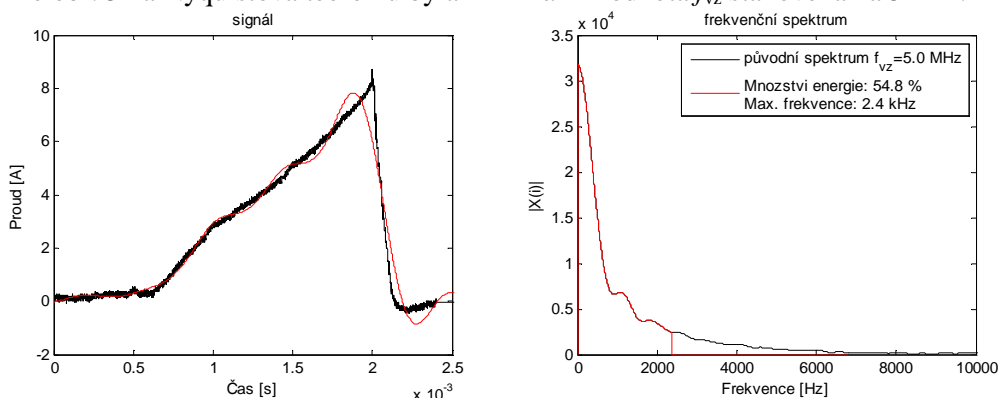
Délka záznamu: 400 ms  
 Vzorkovací frekvence: 5 MHz  
 Rozlišení: 200 mA  
 Max. proud v měřicím bodě C: 11 A  
 Min. proud v měřicím bodě C: -4 A  
 Max. proud v měřicím bodě B: 110 A (25 A je-li v provozu pouze motor)  
 Max. proud příznaku v bodě C: 10 A

### 7.1.3.2 Minimální vzorkovací frekvence

Použité měřicí parametry při aplikaci detektoru pulzů mají na měřicí zařízení značně snížené nároky, v porovnání s metodou template matching. Použité rozlišení není nikterak výjimečné pro nejlépejší měřicí přístroje a v porovnání s použitým měřicím rozsahem neklade ani zvýšené nároky na volbu analogově-digitálního převodníku (ADP). V měřicím bodě C je dynamický rozsah 1:75, což odpovídá ADP s efektivním počtem bitů 7, pro měřicí bod B je dynamický rozsah 1:550, tedy ADP s efektivním počtem bitů 10.

Pro hledání výpadku zapalovací cívky je však nezbytné výrazným způsobem prodloužit dobu měření, s čímž úzce souvisí velikost paměti pro uložení zaznamenaných vzorků k dalšímu zpracování. Právě počet vzorků v závislosti na použité vzorkovací frekvenci přímo ovlivňuje i rychlost zpracování; je tedy vhodné nalézt minimální a přesto dostačující vzorkovací frekvenci  $f_{vz}$ .

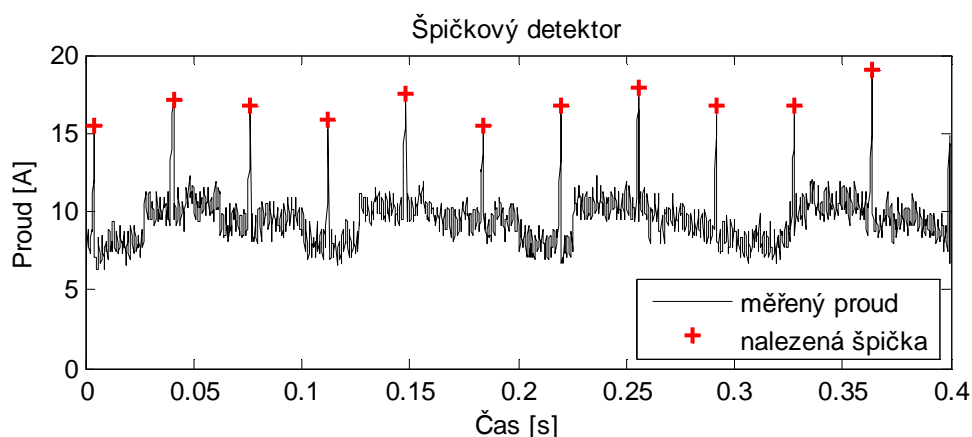
Pro nalezení minimální  $f_{vz}$  byla opět vytvořena spektrální analýza metodou FFT pro neperiodický příznak průměrovaný z pouhých dvanácti náměrů. Díky tomu je vliv šumu ve spektru významnější a množství energie spektra, pro dostatečně věrohodnou rekonstrukci signálu, s omezenou frekvenční složkou nižší. Příznak byl opět prodloužen na hodnotu  $2^{20}$  vzorků s následným odstraněním střední hodnoty. Dle obr. 52 a Nyquistova teorému byla minimální hodnota  $f_{vz}$  stanovena na 5 kHz.



Obr. 52. Frekvenční spektrum proudového impulzu po sepnutí zapalovací cívky.

Při hledání optimální  $f_{vz}$  je dobré si také připomenout dobu náběžné ( $t_1 = 1,2$  ms) a sestupné ( $t_2 = 80$   $\mu$ s) hrany proudového artefaktu. Pro použitou vzorkovací frekvenci ( $f_{vz} = 5$  MHz) tak na náběžnou hranu připadá 6000 vzorků a na sestupnou hranu 400 vzorků. Z těchto hodnot je patrné, že měřený signál je nadměrně převzorkovaný, neboť hledaný proudový impulz v měřeném signálu je natolik charakteristický, že není potřeba jeho bližší zkoumání.

Při volbě  $f_{vz} = 5$  kHz, tedy 1000 x nižší, již na náběžnou hranu připadá 6 vzorků a na sestupnou pouze 0,4 vzorku. Detektor pulzů však pracoval opět bezchybně, viz obr. 53.



Obr. 53. Výsledky hledání proudových impulzů s využitím detektoru pulzů na signálu s  $f_{vz} = 5$  kHz.

#### 7.1.4 Metoda odchylky od aproximace a poruchy na elektrodách svíčky

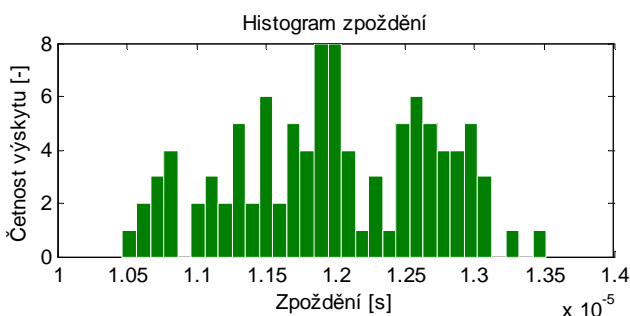
V předchozích kapitolách bylo popsáno, jak lze identifikovat poruchu zapalovací soustavy zapříčiněnou odpojením svíčky či poruchou polovodičového spínače (tranzistoru) zapalovací cívky. Zbylé dříve popisované poruchy lze klasifikovat stanovením zpoždění mezi impulzem od řídicí jednotky motoru a skutečným přeskočením jiskry. Při měření proudu metodou centralizované vozidlové diagnostiky se jedná o zpoždění mezi sestupnou hranou nabíjecího proudu a drobným proudovým impulzem v tlumených oscilacích.

Skutečné přeskočení jiskry na elektrodách zapalovací svíčky se v měřeném proudu projevuje drobným proudovým impulzem v tlumených oscilacích vyvolaným ochranným elektronickým obvodem zapalovací cívky signalizující průběh kapacitní části jiskrového výboje. Tento časový okamžik lze stanovit

metodou odchylky od aproximace, viz kapitolu 5.6. Polynom vhodný pro aproximaci měřeného proudu byl stanoven empiricky s řádem patnáct. Pro algoritmus hledání rychlých hran byla stanovena očekávaná délka hrany  $T$  dle rovnice (5) na hodnotu  $0,2 \mu\text{s}$  a minimální velikost hrany na hodnotu  $70 \text{ mA}$ .

Pro stanovení správné klasifikace poruchy dle časového zpoždění jiskry je nutné naměřit větší množství proudových signálů k stanovení střední hodnoty, neboť hodnota časového zpoždění jiskry má nezanedbatelný rozptyl, viz obr. 54 a tabulku 4, díky čemuž by v oblasti blízké prahové hodnotě docházelo k častému překročení stanovené hodnoty a tím k chybnému určení stavu elektrod zapalovací svíčky.

Je nutné si připomenout, že proud musí být měřen za volnoběžných otáček, kdy jsou mezi elektrodami zapalovací svíčky udržovány stejné podmínky prostředí, tedy tlak a množství pohonné směsi s konstantním poměrem vzduchu a paliva, aby nedocházelo k ovlivnění časového zpoždění přeskočení jiskry zapalovací svíčky dalšími vlivy, viz kapitolu 6.1.1.



Obr. 54. Histogram zpoždění jiskry ze sta odměřů na jedné svíčke.

Ke stanovení střední hodnoty zpoždění přeskočení jiskry zapalovací svíčky, díky čemuž dojde k odstranění nežádoucího rozptylu měřené hodnoty zpoždění jiskry, je vhodné využít exponenciálního klouzavého průměrování dle rovnice (9).

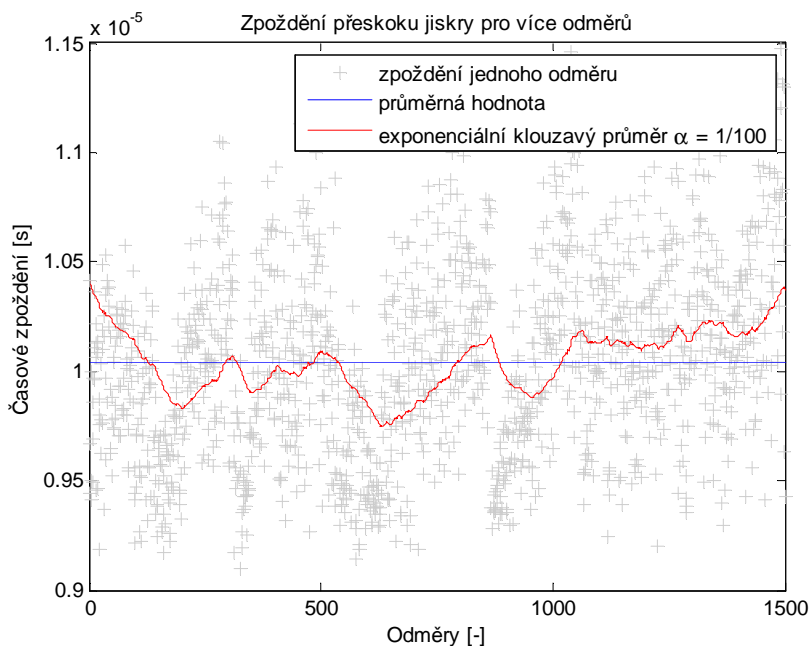
$$EMA_k = EMA_{k-1} + \alpha(D_k - EMA_{k-1}) \quad (9)$$

kde  $EMA$  je hodnota exponenciálního klouzavého průměru,  $D$  doba zpoždění přeskočení jiskry,  $\alpha$  udává váhu klouzavého průměrování a  $k$  je číslo aktuálního vzorku.

Exponenciální klouzavé průměrování lze také zapsat v podobě modifikovaného klouzavého průměrování, kde  $\alpha = 1/N$ , do tvaru z rovnice (10).

$$MMA_k = \frac{(N-1)EMA_{k-1} + D_k}{N} \quad (10)$$

Proměnnost zpoždění jiskry a její odfiltrování exponenciálním klouzavým průměrováním jsou znázorněny na obr. 55 při stanoveném váhování na hodnotu  $N = 100$ .



Obr. 55. Filtrace zpoždění pomocí exponenciálního klouzavého průměrování.

Výslednou hodnotu zpoždění přeskoğu jiskry po filtraci metodou klouzavého průměrování lze již použít ke klasifikaci případné poruchy na elektrodách zapalovací svíčky (zkrat elektrod, oddálené elektrody nebo znečištěné elektrody). Nejprve je však potřeba stanovit hranici mezi zpožděním v bezporuchovém provozu a zpožděním odpovídajícím nadměrnému oddálení elektrod svíčky. Tato hranice je pro každou konkrétní zapalovací svíčku jiná a vychází z nepřesnosti při výrobním procesu zapalovacích svíček. Je tedy nutné po výměně svíček nasbírat dostatečné množství vzorků pro stanovení rozsahu zpoždění, v němž se bezporuchový stav nachází.

V konkrétním případě, který byl použit pro klasifikaci poruchových stavů elektrod zapalovací svíčky v této práci, byla použita zapalovací svíčka výrobce Brisk s označením DR15YS-1, jejíž bezporuchový stav po filtraci klouzavým průměrováním se pohyboval do hodnoty zpoždění  $10,6 \mu\text{s}$ . Proto byla stanovena hranice bezporuchového stavu na hodnotu  $11 \mu\text{s}$ . Klasifikace na ostatní poruchové stavy elektrod zapalovací svíčky je stanovena obdobným způsobem dle tabulky 18.

Tabulka 18: Popis klasifikační metody na konkrétní zapalovací svíčke.

<b>porucha</b>	<b>popis klasifikace</b>
zkrat	proudová špička nenalezena (hranový detektor nepřekročil 70 mA)
bezporuchový stav	zpoždění po filtraci < 11 μs
oddálené elektrody	zpoždění po filtraci > 11 μs ∧ nalezena pouze jedna hrana
znečištěné elektrody	zpoždění po filtraci > 11 μs ∧ nalezena více než jedna hrana

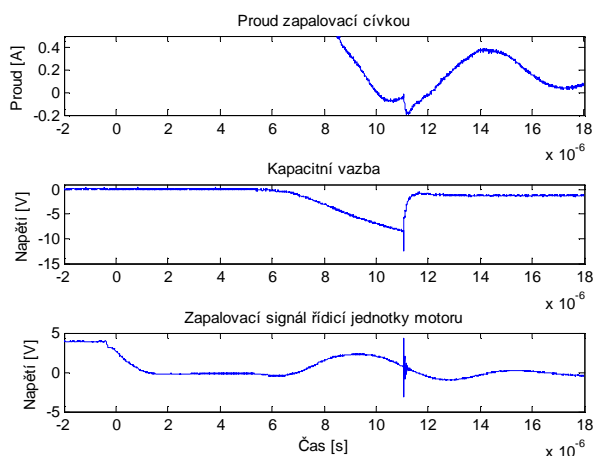
Pro ověření správně nastavených klasifikačních hranic bylo naměřeno 1500 proudových odběrů pro zvolenou zapalovací svíčku jak v bezporuchovém stavu, tak ve všech poruchových stavech. Ve všech případech došlo k 100% správné identifikaci stavu a nikdy nebyl identifikován falešný stav elektrod zapalovací svíčky.

Poruchy identifikované z časového zpoždění jiskry jsou klasifikovány na základě drobného proudového impulsu zaznamenaného v měřeném signálu. Velikost tohoto impulsu je ovšem natolik malá (viz obr. 14) v porovnání s ostatními proudy naměřenými centralizovanou vozidlovou diagnostikou, že je rozlišitelná pouze v měřicím bodě C dle obr. 3. V měřicím bodě B a A se prakticky neprojevuje, neboť tento proudový projev se tlumí přes blokovací kondenzátory ostatních zapalovacích cívek a řídicích jednotek vozidla. Identifikaci těchto poruch je proto vhodnější spíše než centralizovanou vozidlovou diagnostikou realizovat decentralizovaným konceptem. Například kapacitní vazbou ze sekundárního vinutí, viz zdroj referenční informace v následující podkapitole.

#### **7.1.4.1 Statistické zhodnocení metody**

Ověření správného nalezení zapalovacího času bylo provedeno na třech typech zapalovacích svíček, přičemž od každého typu byly použity tři vzorky. Jednalo se o zapalovací svíčky výrobce Bosch s označením FR7HC+, dále svíčky od výrobce Brisk s označením DOX15LE-1 a poslední typ opět od výrobce Brisk s označením DOR15YS-1.

Na každé svíčke vzniklo 90 náměrů, což celkem vytvořilo 810 měření pro ověření funkce algoritmu. Z tohoto počtu bylo správně nalezeno všech 810 proudových impulsů vzniklých při přeskočení jiskry. Jako zdroj referenční informace o poloze časového zpoždění byla využita kapacitní vazba ze sekundárního vinutí na vodič volně přiložený k vinutí. Takovýmto měřením lze zvýšit přesnost separace i rozlišitelnosti okamžiku přeskočení jiskry, viz obr. 56 a [14].



Obr. 56. Signál ze sekundárního vinutí přes kapacitní vazbu.

#### 7.1.4.2 Měřicí body a parametry měření

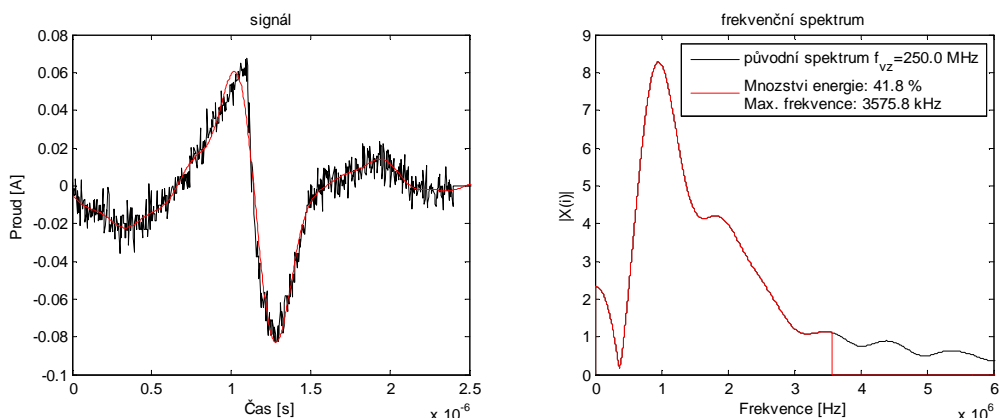
Měřicí bod C: použitelné  
Měřicí bod B: nepoužitelné  
Měřicí bod A: nepoužitelné

Délka záznamu: 20  $\mu$ s  
Vzorkovací frekvence: 250 MHz  
Rozlišení: 4 mA  
Max. proud v měřicím bodě C: 11 A  
Min. proud v měřicím bodě C: -4 A  
Max. velikost příznaku: 0,2 A

#### 7.1.4.3 Minimální vzorkovací frekvence

Metoda odchylky od aproximace pro hledání poruchy na elektrodách zapalovací cívky je na volbu vhodného měřicího hardware nejnáročnější. Díky požadavku na vyšší rozlišení je vyžadován dynamický rozsah 1:3750, což odpovídá analogově-digitálnímu převodníku s efektivním počtem bitů 12.

Vzorkovací frekvence je pro tento příznak poruchy nastavena velmi vysoko, proto i zde je snaha nalézt minimální  $f_{vz}$ , pro kterou je metoda s dostatečnou přesností použitelná. Je tedy opět nalezeno frekvenční spektrum neperiodického příznaku (proudového impulzu) pomocí FFT, viz obr. 57, který ovšem, díky svým vlastnostem, nebylo možné zprůměrovat a odfiltrovat tak nežádoucí vysokofrekvenční šum. Maximální stanovená frekvence proto omezuje frekvenční spektrum s malou zůstatkovou energií, neboť většina energie spektra byla uložena v šumu. Minimální vzorkovací frekvence tak byla stanovena na hodnotu 7,2 MHz, s nutností použít předřadný filtr typu dolní propust.



Obr. 57. Frekvenční spektrum projevu kapacitní části jiskrového výboje po aproximaci.

Toto snížení  $f_{vz}$  však již má vliv na výsledky správného určení časové polohy přeskocení zapalovací jiskry. Ověření správného nalezení zapalovacího času bylo opět provedeno na třech typech zapalovacích svíček, a od každého typu byly použity tři vzorky. Výsledky správné časové lokalizace jsou patrné z tabulky 19.

Tabulka 19: Výsledky časové lokalizace přeskoku jiskry při  $f_{vz} = 7,4$  MHz.

číslo vzorku	počet měření	správně nalezených	chybně identifikováno	popis vzorku
1	90	90	0	BOSCH FR7HC+ (odtrh 0,90 mm)
2	90	86	4	
3	90	90	0	
4	90	90	0	BRISK DOX15LE-1 (odtrh 1,05 mm)
5	90	90	0	
6	90	90	0	
7	90	89	1	BRISK DOR15YS-1 (odtrh 1,00 mm)
8	90	86	4	
9	90	90	0	

### 7.1.5 Závěr

Pro každou dříve popsanou poruchu v zapalovacím systému se podařilo nalézt klasifikační metodu, která tuto poruchu dokáže v měřeném proudu s dostatečnou jistotou identifikovat. Ne všechny poruchy je však možné vyhodnocovat konceptem centralizované vozidlové diagnostiky v jednom měřicím bodě. Takovými poruchami jsou poruchy na elektrodách zapalovací svíčky (zkrat, zanesení a vypálení elektrod) a zkrat v sekundárním obvodu zapalovací cívky. Projevy těchto poruch se sice podařilo úspěšně identifikovat navrhovanými klasifikačními metodami, ale pouze z proudu měřeného separovaně od ostatních elektrických částí vozidla. Pro jejich



úspěšnou identifikaci tak musí být použit samostatný měřicí bod, který vyžaduje vysoké nároky na použitý měřicí hardware (12 bitový ADP s minimální  $f_{vz} = 7,2$  MHz). Naopak poruchu odpojené zapalovací svíčky je možné úspěšně identifikovat i z proudu měřeného ve společném měřicím bodě pro elektrické části vnitřní automobilové výbavy. Pro tuto poruchu jsou na měřicí hardware kladeny snížené nároky (11 bitový ADP s minimální  $f_{vz} = 62,5$  kHz). Nejmenší nároky na hardware jsou však kladeny při identifikaci poruchy v primárním obvodu zapalovací soustavy (10 bitový ADP s minimální  $f_{vz} = 5$  kHz), pro kterou je za určitých podmínek možné měřit proud společně se všemi elektrickými částmi automobilové výbavy.

## **7.2 Stejnoseměrné elektromotory automobilové výbavy**

Stejně jako byly navrženy klasifikační metody pro identifikaci poruch v zapalovacím systému vozidla, i zde bude navržena metoda pro hledání poruch stejnosměrně napájených elektromotorů automobilové výbavy, použitelná pro vnitřní diagnostiku vozidla. U poruch elektromotorů se jedná především o prahovací funkci nastavenou do vhodné oblasti spektrální analýzy odebíraného proudu. Stejná metoda byla navržena i pro hledání jiných poruch u palivového čerpadla v [22].

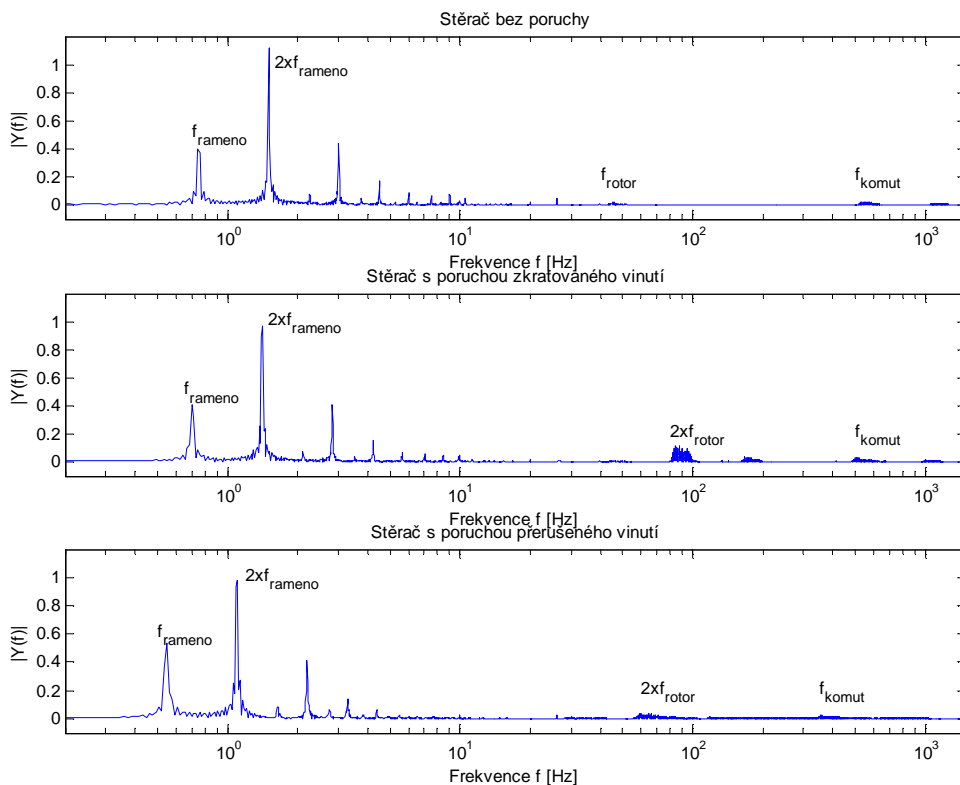
### ***7.2.1 Porucha způsobená zkratem a přerušením vinutí rotoru klasifikovaná pomocí rychlé Fourierovy transformace***

V automobilech jsou většinou elektromotory realizovány jako točivé elektrické stroje. Vykonnávají tedy periodicky se opakující děj (periodické otáčení rotoru). Pokud uvnitř elektromotoru nastane porucha, bude se i ta projevovat s periodickými účinky. Tato periodičnost se promítá i do odebíraného proudu, a proto je výhodné pro klasifikaci stavu těchto motorů z napájecí sítě využít frekvenční analýzu. Ta již byla pro ukázkou projevů poruchy způsobené zkratem či přerušením vinutím použita v kapitole 6.2 „Stejnoseměrné elektromotory automobilové výbavy“.

#### ***7.2.1.1 Nižší rychlost otáčení elektromotoru stěrače***

Pro přehlednost jsou na obr. 58 znázorněny stejné spektrální analýzy separovaného proudu (měřicí bod C) odebíraného zatíženým elektromotorem stěrače při nižší rychlosti otáčení ve stejném měřítku pro stavy s poruchami i bez nich, stejně jako v kapitole 6.2.

Jednostranné amplitudové spektrum separovaného proudu zatíženého stěrače (nižší rychlost)



Obr. 58. Amplitudová spektra separovaných proudových odběrů motoru stěrače bez poruch i s poruchami při nižší rychlosti otáčení.

Jak již bylo konstatováno, porucha zkratovaného i přerušného vinutí rotoru se při nižší rychlosti otáčení ve spektrální analýze projevuje výrazným nárůstem spektrálních čar v oblasti odpovídající druhé harmonické frekvenci otáčení rotoru. Oblast výskytu této harmonické frekvence je závislá na zatížení elektromotoru, které je proměnné a odpovídá nejen poloze raménka stěrače v rámci jednoho cyklu, ale také na množství stírané vody, rychlosti jízdy vozidla, stáří gumových lamel atd. Proto byla oblast pro klasifikaci hledaných poruch stanovena od 40 do 100 Hz. Amplitudy těchto spektrálních čar jsou sečteny a porovnány se součtem amplitud spektrálních čar ve stejné oblasti těsně před zapnutím elektromotoru stěrače. Tento nárůst spektrálních čar neseperovaného proudu (měřicí bod B) ve zvolené oblasti po zapnutí stěrače zobrazuje tabulka 20. Měření byla provedena na vozidle s nastartovaným spalovacím motorem.

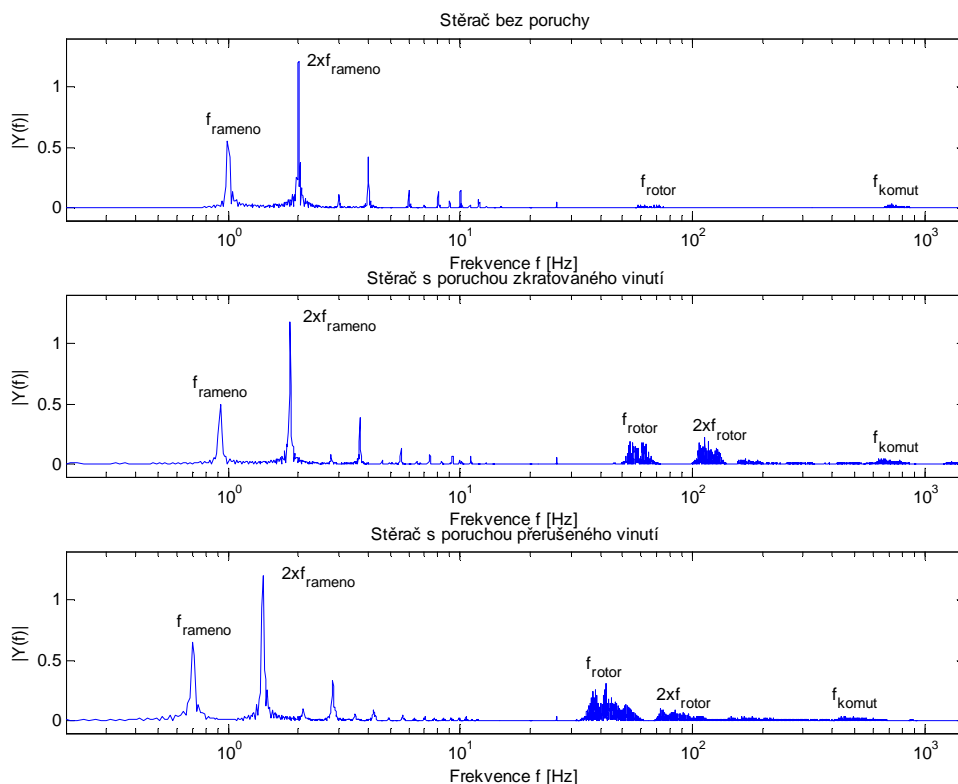
Tabulka 20: Nárůst proudu ve spektrální oblasti 1. harmonické rotoru po zapnutí stěrače.

spektrální oblast 40–100 Hz	bez poruchy	porucha zkratu	porucha přerušení
nárůst neseparov. proudu	1%	232%	84%

### 7.2.1.2 Vyšší rychlost otáčení elektromotoru stěrače

Vyšší rychlosti otáčení stejnosměrně napájeného elektromotoru stěrače se dosahuje vychýlením jednoho komutátorového kartáče mimo osu rotoru, proto má spektrální analýza při této změně odlišné výsledky. Na obr. 59 jsou zobrazeny spektrální analýzy separovaného proudu (měřicí bod C) zatíženého elektromotoru stěrače při vyšší rychlosti otáčení bez poruch i s poruchami ve stejném měřítku. V porovnání s nižší rychlostí otáčení motoru stěrače se při stejných poruchách zvyšuje hodnota spektrálních čar v oblasti 1. i 2. harmonické frekvence odpovídající otáčkám rotoru.

Jednostranné amplitudové spektrum separovaného proudu zatíženého stěrače (vyšší rychlost)



Obr. 59. Amplitudová spektra separovaných proudových odběrů motoru stěrače bez poruch i s poruchami při vyšší rychlosti otáčení

Z grafů na obr. 59 byly stanoveny spektrální oblasti 1. harmonické frekvence otáčení rotoru od 30 do 80 Hz a 2. harmonické frekvence rotoru od 70 do 140 Hz. Obě oblasti je možné použít ke klasifikaci hledaných poruch, neboť v nich dochází k nárůstu spektrálních čar oproti stavu s vypnutým stěračem, viz tabulky 21 a 22.

Měření bylo opět provedeno v měřicím bodě B při nastartovaném spalovacím motoru a zatíženém elektromotoru stěrače (běžný provozní stav automobilového stěrače).

Tabulka 21: Nárůst proudu ve spektrální oblasti 1. harmonické rotoru po zapnutí stěrače.

spektrální oblast 30–80 Hz	bez poruchy	porucha zkratu	porucha přerušení
nárůst neseparov. proudu	22%	313%	583%

Tabulka 22: Nárůst proudu ve spektrální oblasti 2. harmonické rotoru po zapnutí stěrače.

spektrální oblast 70–140 Hz	bez poruchy	porucha zkratu	porucha přerušení
nárůst neseparov. proudu	9%	360%	195%

Z tabulek 21 a 22 je dále patrné, že při vyšší rychlosti otáčení elektromotoru stěrače lze rozlišit i typ poruchy. V případě, že je nárůst spektrálních čar v oblasti 1. harmonické frekvence vyšší nežli ve 2., je porucha způsobena přerušením vinutí rotoru. Je-li tomu naopak, je porucha způsobena zkratem vinutí na rotoru.

### 7.2.1.3 Měřicí body a parametry měření

Měřicí bod C: vhodné

Měřicí bod B: vhodné

Měřicí bod A: použitelné

Délka záznamu: 40 s

Vzorkovací frekvence: 250 kHz

Rozlišení v měřicím bodě C: 200 mA

Rozlišení v měřicím bodě B: 40 mA

Max. proud v měřicím bodě B: 110 A (25 A je-li v provozu pouze motor)

### 7.2.1.4 Minimální vzorkovací frekvence a délka záznamu

Použité měřicí parametry popsané výše byly použity pro hledání a klasifikaci poruch zvoleného stejnosměrně napájeného elektromotoru. Dynamický rozsah ADP 1:550 (efektivní počtem bitů 10) v měřicím bodě B, jakož i vzorkovací frekvence odpovídá požadavkům běžně používaných přístrojů. Vzorkovací frekvence však může být nastavena na mnohem nižší hodnotu, neboť spektrální oblast vhodná pro klasifikaci poruchy byla stanovena s horní hranicí 140 Hz. Z tabulky 23 je patrné, jak se procentuálně změnila hodnota spektrálních čar ve zkoumaných frekvenčních oblastech po zapnutí motoru stěrače při odfiltrování vyšších frekvenčních složek dolnofrekvenční propustí (DP) Butterworthova typu třetího řádu o zlomové frekvenci 500 Hz a frekvenci vzorkování 1,25 kHz. Při snížené vzorkovací frekvenci s použitím filtru došlo k minimálnímu ovlivnění klasifikace, neboť tím byla zkoumaná oblast amplitudového spektra ovlivněna také pouze minimálně.

Vzhledem k nízkým hodnotám zkoumaných frekvenčních složek amplitudové charakteristiky je mnohem důležitějším parametrem časová délka celého záznamu, neboť čím delší je časový záznam, tím vyšší je rozlišitelnost ve spektru a naopak. Při krátkém časovém záznamu budou nízké hodnoty ovlivněny rozmazáním spektra (leakage), díky nemožnosti přesného stanovení délky měřeného záznamu, takže nebude možné v dostatečné míře stanovit věrohodnou klasifikaci. Tabulka 23 dále ukazuje vliv časové délky záznamu měřeného proudu na procentuální nárůst hodnoty spektrálních čar ve zkoumaných oblastech po zapnutí motoru stěrače způsobené rozmazáním spektra.

Tabulka 23: Nárůst proudu ve zkoumaných spektr. oblastech po zapnutí stěrače.

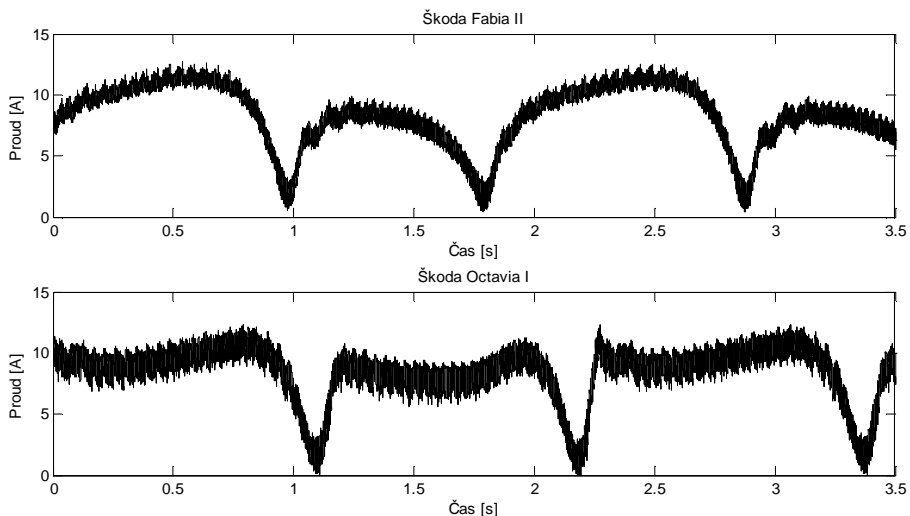
hodnoty jsou uvedeny v %	nižší rychlost stěrače			vyšší rychlost stěrače					
	2. harmonická rotoru			1. harmonická rotoru			2. harmonická rotoru		
	bez poruch	zkrat	přerušení	bez poruch	zkrat	přerušení	bez poruch	zkrat	přerušení
$f_{vz} = 250 \text{ kHz}$ $t = 40 \text{ s}$	1	232	84	22	313	584	9	360	195
$f_{vz} = 1,25 \text{ kHz}$ $t = 40 \text{ s}$	3	225	82	24	310	567	10	349	189
$f_{vz} = 1,25 \text{ kHz}$ $t = 4 \text{ s}$	7	148	53	16	197	319	9	229	120
$f_{vz} = 1,25 \text{ kHz}$ $t = 1 \text{ s}$	11	111	38	19	182	238	10	163	78
$f_{vz} = 1,25 \text{ kHz}$ $t = 0,4 \text{ s}$	-7	95	30	24	161	185	12	108	50
	frekvenční oblast= 40-100 Hz			frekvenční oblast= 30-80 Hz			frekvenční oblast= 70-140 Hz		

## 7.2.2 Zadírání táhel stěrače

V kapitole 6.2 již bylo zobrazeno amplitudové spektrum odebíraného proudu při poruše zadírání táhel stěrače na testovacím vozidle Škoda Fabia II Sport. Pro porovnání získaných výsledků se v rámci této práce podařilo získat obdobný náměr i na jiném vozidle. Na obr. 60 je zobrazen časový průběh odebíraného separovaného proudu elektromotorem stěrače při poruše zadřených táhel jak na testovaném vozidle Škoda Fabia II Sport nahoře, tak na vozidle Škoda Octavia I (modelový rok 2001) dole.

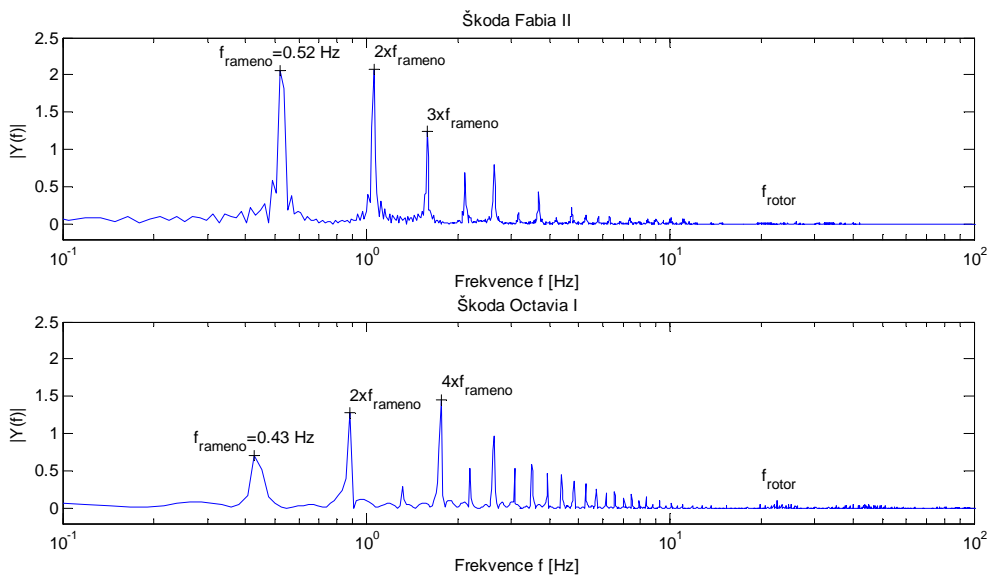
Amplitudová spektra obou záznamů měřeného proudu je možné porovnat na obr. 63. Opět Škoda Fabia nahoře a Octavia dole. Hlavní rozdíl ve spektru je poměrový nárůst odlišných harmonických složek frekvence odvozené od cyklu stírání ramének. U Škody Fabie je značný nárůst první a třetí harmonické frekvence, vztaženo k druhé harmonické frekvenci, neboť ta je v měřeném proudu z principu nejvýraznější; u Škody Octavie je patrný nárůst především čtvrté a šesté harmonické složky. Porovnání amplitudového spektra obou typů stěračů v bezporuchovém stavu je znázorněno na obr. 64. Z něj je patrné, že poměr harmonických složek je v bezporuchovém stavu u obou typů stěračů obdobný.

Separovaný proud stěračem s poruchou zadírání táhel (nižší rychlost)

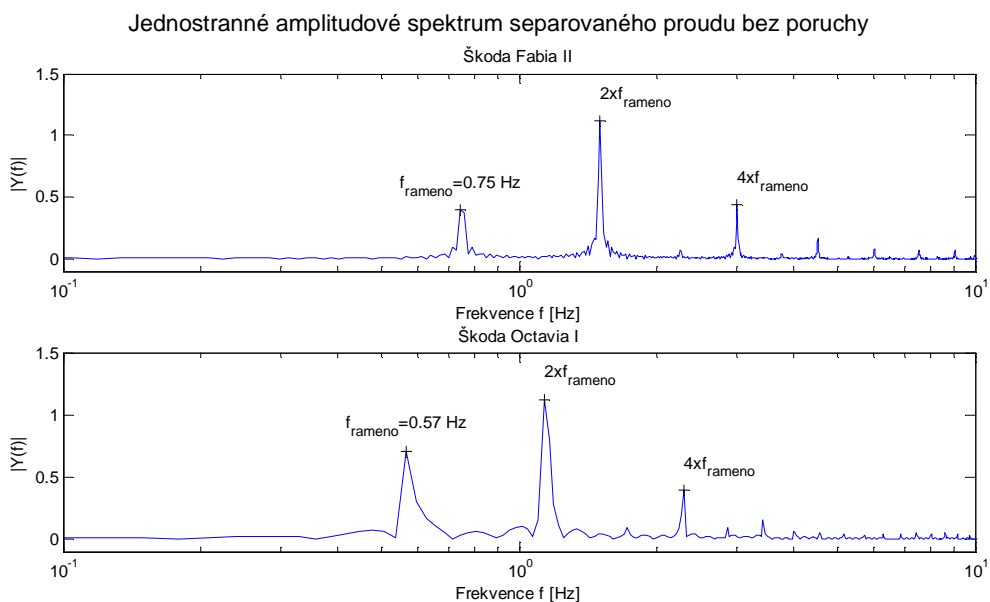


Obr. 60. Časové průběhy separovaného proudového odběru různých typů motoru stěrače s poruchou zadírání.

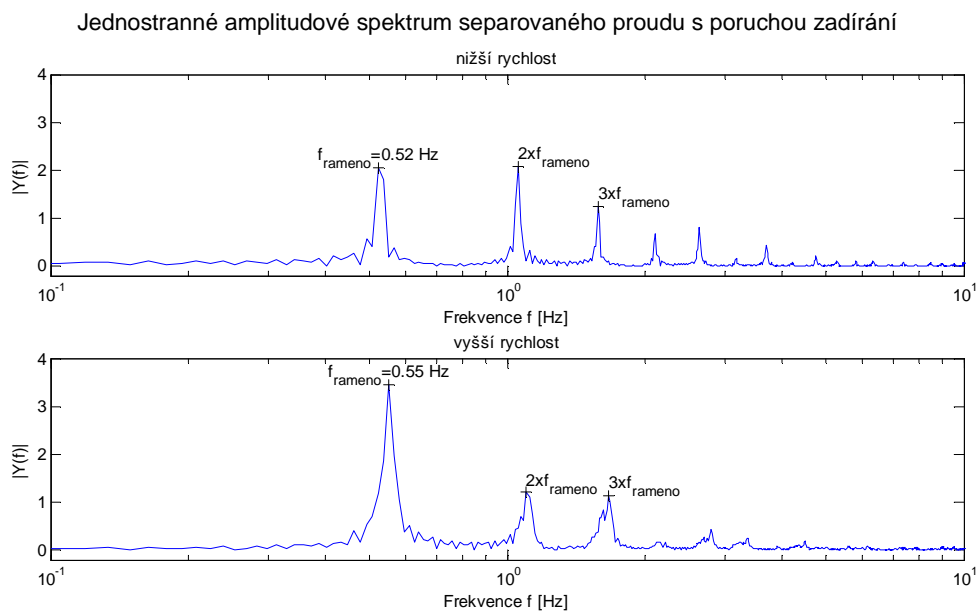
Jednostranné amplitudové spektrum separovaného proudu s poruchou zadírání



Obr. 61. Amplitudové spektrum separovaného proudového odběru různých typů motoru stěrače s poruchou zadírání.



Obr. 62. Amplitudové spektrum separovaného proudového odběru různých typů motoru stěrače bez poruchy.



Obr. 63. Amplitudové spektrum separovaného proudového odběru motoru stěrače s poruchou zadírání při různých rychlostech stírání.

Z obr. 65 je patrné, že porucha zadírání táhel stěrače se v amplitudovém spektru pro nižší a vyšší rychlost otáčení elektromotoru stěrače projevuje nárůstem odlišných harmonických složek.

Na základě zjištěných vlastností byl stanoven předpoklad, že porucha zadírání táhel stěrače může být klasifikována při překročení 80% hodnoty druhé harmonické složky jinou harmonickou složkou, uvažujeme-li pouze harmonické složky odvozené od periody stíracího cyklu. Tento předpoklad však nebyl statisticky ověřen, neboť k takovému ověření nebylo možné získat dostatečné množství vzorků porouchaných stěračů.

### **7.2.2.1 Měřicí body a parametry měření**

Měřicí bod C: vhodné

Měřicí bod B: vhodné

Měřicí bod A: použitelné

Délka záznamu: 40 s

Vzorkovací frekvence: 250 kHz

Rozlišení v měřicím bodě C: 200 mA

Rozlišení v měřicím bodě B: 40 mA

Max. proud v měřicím bodě B: 110 A (25 A je-li v provozu pouze motor)

### **7.2.2.2 Minimální vzorkovací frekvence a délka záznamu**

Použité měřicí parametry byly pro nalezení projevů poruch zvoleny stejné jako v předchozím bodě při hledání poruchy způsobené zkratem či přerušným vinutím rotoru stejnosměrně napájeného elektromotoru. I zde se následně ukázala tato volba jako přehnaně naddimenzovaná. Jelikož je v zásadě měřen stejný proud jako u předchozí poruchy, je potřeba zvolit stejný ADP, tedy s počtem efektivních bitů 10 pro měření v měřicím bodě B. Pokud bychom však nechtěli klasifikovat poruchy na elektromotoru stěrače, ale pouze poruchu zadírání táhel, můžeme si dovolit více snížit vzorkovací frekvenci, za podmínky použití předřadného dolnofrekvenčního filtru, neboť frekvenční pásmo, které nás u této poruchy zajímá, nepřekročí hranici 10 Hz (reálně 4 Hz). Naopak časovou délku záznamu pro takto nízké frekvenční pásmo není možné dále zkracovat, neboť by opět došlo k nežádoucímu rozmazání spektra v oblasti nízkých frekvencí.

### **7.2.3 Závěr**

Vybrané poruchy, které se mohou vyskytovat u stejnosměrně napájených elektromotorů automobilové výbavy, byly prezentovány na elektromotoru předního stěrače vozidla. Pro všechny takovéto poruchy byla navržena klasifikační metoda založená na prahování vhodné oblasti spektrální analýzy. Pro klasifikaci poruchy přerušného či zkratovaného vinutí rotoru je vhodné sledovat nárůst spektrálních čar v oblasti první, případně druhé harmonické složky frekvenční analýzy měřeného proudu odpovídající otáčení rotoru. Pro identifikaci poruchy zadírání táhel stěrače je výhodné sledovat nárůst spektrálních čar v oblasti frekvenční analýzy odpovídající



harmonickým složkám odvozených od periody stíracího cyklu. Na měřicí hardware k identifikaci těchto poruch nejsou kladeny vysoké nároky (10 bitový ADP s minimální  $f_{vz} = 1$  kHz) při měření proudu ve společném napájecím bodě pro elektrické části vnitřní automobilové výbavy. Za určitých podmínek je dokonce možné měřit proud společně se všemi elektrickými částmi automobilové výbavy.

### 7.3 Shrnutí

Projevy poruch elektricky napájených akčních členů v odebíraném proudu ke své klasifikaci vyžadují použití různých klasifikačních metod i analogově digitálních převodníků s odlišnými nároky na dynamický rozsah a minimální vzorkovací frekvenci. Ale ani při použití ideálního měřicího hardware a klasifikačních metod nelze projevy všech poruch měřit v jednom centrálním měřicím bodě napájecí sítě. Příčinou není jen vzájemné rušení měřených částí automobilové výbavy, ale především vliv parazitních vlastností napájecího vedení v kombinaci s blokovacími kondenzátory různých řídicích jednotek.

Jeden společný měřicí bod pro klasifikaci poruch více částí automobilové výbavy lze použít pro identifikaci poruchy v primárním obvodu zapalovacího systému i poruch v motoru stěrače, jako jsou přerušení či zkrat ve vinutí rotoru, nebo zadírání v táhlech pro převod kroutícího pohybu na pohyb kyvný. Porucha odpojené svíčky sice může být měřena také ve společném měřicím bodě napájecí soustavy, klasifikační metoda template matching použitá pro hledání projevů této poruchy v měřeném proudu je však více citlivá na rušení způsobené proudovým odběrem dalších elektrických částí automobilu.

Největší nároky na volbu vhodného měřicího bodu jsou kladeny při klasifikaci poruchy na elektrodách zapalovací svíčky a zkratu sekundárního vinutí zapalovací cívky. Proud v tomto případě musí být měřen v takovém bodě napájecí sítě, ze kterého nejsou napájeny jiné elektrické části vozidla než zapalovací cívky.

Obecně lze také vyslovit závěr, že poruchy v zapalovací soustavě automobilu lze klasifikovat přímo z časového průběhu odebíraného proudu, zatímco poruchy elektromotorů automobilové výbavy z jeho spektrální analýzy.



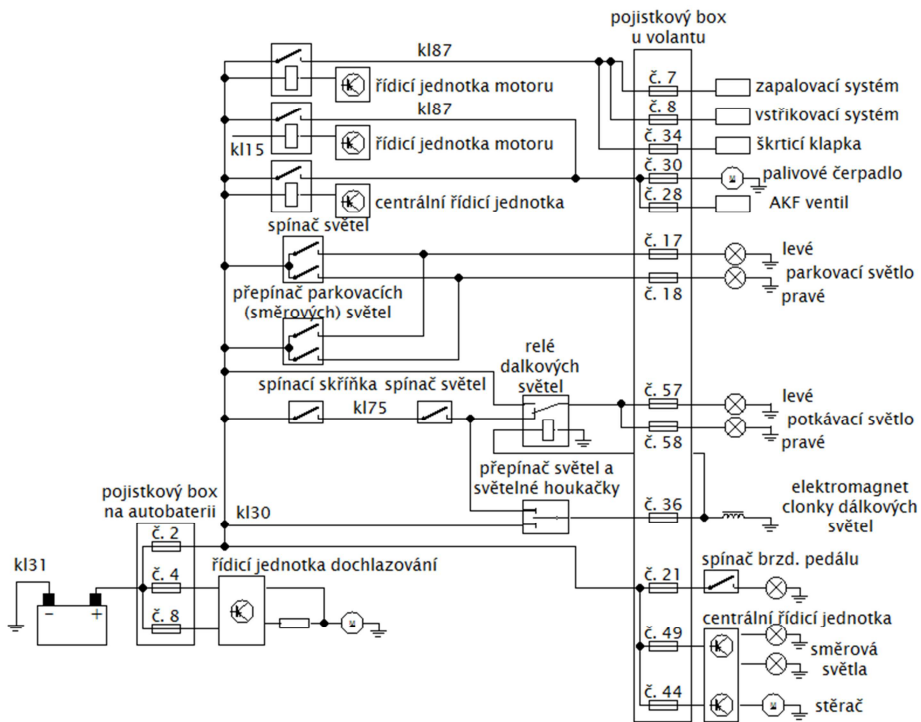
## 8 Umístění měřicích bodů v napájecí síti vozidla

Současná konstrukce napájecí soustavy testovaného vozidla Škoda Fabia II (Sport 1.4 16V 63kW MR 2007) není zcela vhodná pro koncept centralizované vozidlové diagnostiky z pohledu ideální volby měřicích bodů, avšak není ani zcela nepoužitelná. Ideální případ, tedy umístění pouze jedné měřicí sondy v centrálním místě vozidla (u autobaterie), však ani při změně uspořádání napájecí soustavy nebude možný nikdy. Tomu brání především blokovací kondenzátory řídicích jednotek vozidlové výbavy a parazitní vlastnosti napájecího vedení či současné měření proudu odebíraného dalšími částmi automobilové výbavy. Částečným řešením je rozdělit diagnosticky významné části automobilové výbavy do několika skupin, jejichž projevy poruch se v odebíraném proudu ovlivňují jen minimálně, a měřit jejich společně odebíraný proud v oddělených větvích napájecí soustavy.

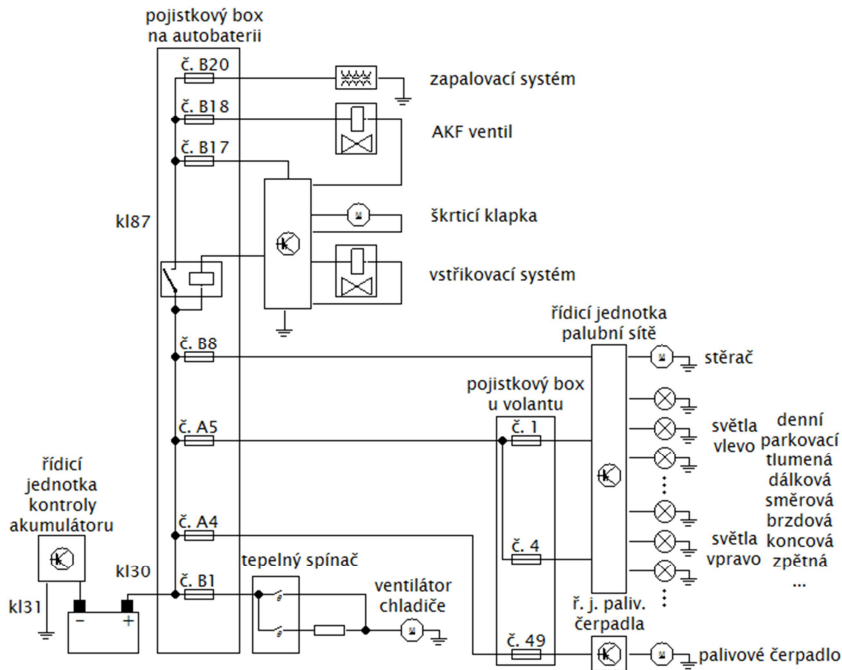
Pro koncept centralizované vozidlové diagnostiky bylo v kapitole 4.2 vybráno několik diagnosticky významných částí automobilové výbavy, které je možné touto metodou klasifikovat a zároveň má smysl jejich poruchy, případně predikci poruch, sledovat za cenu zvýšených výrobních nákladů. Jedná se o zapalovací systém, vstřikovací systém, škrticí klapku, palivové čerpadlo, světelnou soustavu a přední stěrač. Kritické systémy jako je ABS a servořízení již mají velice precizní vnitřní diagnostiku integrovanou a systém centralizované vozidlové diagnostiky by zde neměl žádný významný přínos, stejně jako je tomu u lambda sondy (viz OBD).

Jmenované akční členy lze rozdělit do několika skupin, které se jen minimálně vzájemně ovlivňují či zakrývají své projevy poruch ve společně odebíraném napájecím proudu. Do první skupiny lze zařadit zapalovací a vstřikovací systém, škrticí klapku, případně i ventil AKF. Do druhé skupiny pak ventilátor chlazení, palivové čerpadlo a přední stěrače a do poslední skupiny vnější osvětlení vozidla. Při rozčlenění zařízení do těchto skupin, kdy pro každou skupinu chceme měřit společně odebíraný proud jednou měřicí sondou, je důležité si uvědomit, že takováto zařízení mohou být napájena z různých typů napájecích vodičů, tzv. klem (např. KL30 – permanentně připojeno ke kladnému pólu baterie, KL15 – spojena s KL30 v první a druhé poloze zapalování atd.). Zjednodušené schéma napájecí soustavy testovacího vozidla Škoda Fabia II je na obr. 66.

Ideálním místem pro umístění několika málo měřicích bodů se zdá být pojistkový box u volantu řidiče, ovšem při způsobu zapojení elektrické soustavy na vozidle Škoda Fabia II by bez většího zásahu do struktury nebylo možné použít pro seskupení více zařízení do jednoho měřicího bodu nejjednodušší a nejlevnější měřicí metodu pomocí malého sériového odporu, nýbrž dražší a složitější variantu pro bezkontaktní měření proudu pomocí Hallovy sondy.



Obr. 64. Zjednodušené schéma napájecí soustavy automobilu Škoda Fabia II.



Obr. 65. Zjednodušené schéma napájecí soustavy automobilu Škoda Fabia III.

S příchodem nového modelu testovaného vozidla, Škoda Fabia III, však došlo k zásadní restrukturalizaci napájecí soustavy vozidla, která významně usnadňuje aplikaci klasifikačních metod navržených pro centralizovanou vozidlovou diagnostiku v tomto vozidle, viz obr. 65. Dokonce již do jisté míry využívá stejných principů. U vozidla Škoda Fabia III již nejsou vnější světla ovládána pomocí mechanických spínačů plně ovládaných uživatelem, kde bylo každé světlo jištěno samostatnou pojistkou, nyníž jsou rozdělena pouze do dvou samostatně jištěných okruhů. Světla jsou pak spínána řídicí jednotkou palubní sítě na základě signálů ze spínačů ovládaných uživatelem. V jednotce palubní sítě je každá žárovka (případně LED panel) spínána samostatným inteligentním spínačem, který na žárovce pomocí PWM signálu reguluje elektrický příkon tak, aby nedocházelo k jejímu přetěžování při sepnutí či zvýšeném napětí v napájecí soustavě vozidla. Zároveň tento spínač měří odebíraný proud, ze kterého se vyhodnocuje zkrat či přerušovaný elektrický obvod. Takto změřený proud je možné dále v řídicí jednotce palubní sítě vyhodnocovat metodami známými z konceptu centralizované vozidlové diagnostiky, viz [22], a tak predikovat možnou poruchu žárovky. Stejně tak je měřen proud odebíraný předním stěračem, tudíž i predikci zadření či poruchy motoru stěrače lze klasifikovat přímo v řídicí jednotce palubní sítě.

Obdobným způsobem lze klasifikovat stav motoru palivového čerpadla v řídicí jednotce palivového čerpadla. Zbývá tedy zvolit vhodný měřicí bod zapalovacího a vstřikovacího systému včetně škrticí klapky a AKF ventilu, který lze s výhodou umístit za relé v pojistkovém boxu na autobaterii u vozidla Fabia III, viz obr. 65, a měřit tak část odebraného proudu z tzv. klemy KL87. Poslední akční člen vhodný ke klasifikaci pomocí měření odebíraného proudu je ventilátor chlazení. Ten lze díky velkému proudovému odběru klasifikovat s výhodou v řídicí jednotce kontroly akumulátoru, ve které je možné zároveň klasifikovat i další poruchy ostatních akčních členů vozidla, které mají dostatečný projev v celkově odebíraném proudu z napájecí sítě automobilu.

Struktura napájecí soustavy současných automobilů není zcela vhodná pro nasazení konceptu centralizované vozidlové diagnostiky ani s použitím více měřicích míst. Současný trend nejnovějších automobilů však ukazuje, že myšlenka klasifikace funkčního stavu akčních členů z proudového odběru je a bude stále více využívána pomocí decentralizovaného měření. Většina zařízení je totiž spínána samostatným inteligentním spínačem v příslušné řídicí jednotce, kterým je zároveň měřen separovaný proud všech takovýchto akčních členů a může tak být jednoduše klasifikován jejich stav, včetně predikce případné poruchy.



## 9 Závěr

Koncept centralizované vozidlové diagnostiky vychází z předpokladu, že veškeré děje elektricky napájených částí automobilu se projevují ve změně odebíraného proudu. Měřením odebíraného proudu z elektrického zdroje vozidla, tedy autobaterie včetně alternátoru, je možné identifikovat poruchové stavy řady elektrických částí vozidla, a dokonce i mechanických částí jimi ovládaných. Tento předpoklad však v praxi naráží na několik omezení, která brání využití pouze jednoho centrálního měřicího bodu. Prvním je potřeba velkého dynamického rozsahu použitého analogově digitálního převodníku, neboť příznaky poruch některých částí automobilové výbavy jsou v rozsahu desítek miliampér, zatímco maximální odebíraný proud ze zdroje dosahuje stovek ampér. Dalším podstatnějším omezením jsou parazitní vlastnosti vedení, jako je indukčnost a kapacita v kombinaci s blokovacími kondenzátory v různých řídicích jednotkách vozidla. Je důležité zmínit také vzájemné rušení se samotných elektricky ovládaných akčních členů, kdy projev jednoho bezporuchového akčního členu může zakrýt projev poruchy jiného, stejně tak bezporuchový projev jednoho může odpovídat projevu poruchy druhého akčního členu. V neposlední řadě je také potřeba zmínit vliv mnoha provozních stavů každého akčního členu, které mohou ovlivňovat projev konkrétní poruchy, jako například rozdílné tlaky ve válci motoru v okamžiku přeskoku jiskry na kontaktech zapalovací svíčky vlivem změny předstihu.

Použití několika měřicích bodů pro klasifikaci poruchových stavů omezeného počtu akčních členů je sice částečným řešením problémů, avšak naráží na konstrukční uspořádání napájecí soustavy dnes vyráběných automobilů. Struktura napájecí soustavy dnešních automobilů naopak zvyhodňuje decentralizovaný způsob měření odebíraného proudu pro každý akční člen separovaně, a do značné míry již je tento způsob klasifikace implementován do jednotlivých řídicích jednotek pomocí integrovaných inteligentních spínačů. Ty však v současné době nesledují dynamický průběh odebíraného proudu ke klasifikaci poruchy, nýbrž pouze aktuální hodnotu proudu.

Základního cíle disertační práce, tj. stanovení mezí centrální vozidlové diagnostiky, bylo v podstatě dosaženo. Podařilo se:

1. *Provést rozbor časových průběhů proudového odběru elektrických částí běžné automobilové výbavy a na jeho základě stanovit diagnosticky významné části z pohledu centralizované vozidlové diagnostiky. (kapitola 4)*

V napájecí síti vozidla se každá elektrická část automobilové výbavy projevuje různými proudovými odběry, v nichž se často skrývá i projev poruchy takovéto části. Co se týče dynamického průběhu odebíraného proudu lze automobilová zařízení rozdělit do tří skupin: s přechodovým charakterem, pulzním průběhem a periodickým průběhem odebíraného proudu.

Na základě zjištěných hodnot odebíraného proudu byly dále stanoveny diagnosticky významné části automobilové výbavy z pohledu centralizované vozidlové výbavy. Jsou jimi elektrohydraulické servořízení, jednotka ABS, zapalovací systém, vstřikovací systém, palivové čerpadlo, škrticí klapka, vnější osvětlení, stěrače a vyhřívání lambda sondy.

## *II. Navrhnout metody vhodné pro klasifikaci proudových průběhů. (kapitola 5)*

V této části byly navrženy různé klasifikační metody vhodné pro identifikaci projevů poruchy v měřeném průběhu odebíraného proudu. U každé metody byly diskutovány výhody i nedostatky a pro každou z nich byl stanoven předpoklad vhodného použití v konceptu centralizované vozidlové diagnostiky. Konkrétně se jedná o metodu rychlé Fourierovy transformace, vlnkovou transformaci, metodu template matching, hranový detektor, detektor pulzů a jejich modifikované verze.

## *III. Rozšířit množinu poruch pro vybrané vozidlové systémy, jejichž příznaky mají projev identifikovatelný v proudu odebíraném z napájecí sítě vozidla. (kapitola 6)*

Jistá množina poruch identifikovatelných z proudu měřeného v napájecí síti automobilu již byla stanovena v disertační práci [22] doktora Ježdíka. Tato množina však zdaleka nepokrývá všechny poruchy elektrické výbavy vozidla. Cílem této části práce bylo tuto množinu rozšířit o poruchy identifikovatelné v zapalovacím systému vozidla a ve stejnosměrně napájených elektromotorech automobilové výbavy, konkrétně byl zvolen motor předního stěrače pro jeho výrazný projev mechanické zátěže do průběhu měřeného proudu. Byly tak popsány projevy poruch v primárním obvodu zapalovací cívky, odpojené zapalovací svíčky, poruchy na elektrodách svíčky, včetně zkratu sekundárního vinutí zapalovací cívky, poruchy v rotoru stěrače a zadírání táhel stěrače pro převod rotačního pohybu na kyvný.

## *IV. Stanovit meze použitelnosti jednotlivých klasifikačních metod na rozšířené množině poruch v konceptu centralizované vozidlové diagnostiky. (kapitola 7)*

Na hledání projevů poruch v měřeném proudu popsaných v této disertační práci byly aplikovány navrhované klasifikační metody. Na základě výsledků klasifikace hledané poruchy byly stanoveny minimální požadavky na měřicí hardware, týkající se volby počtu efektivních bitů, vzorkovací frekvence, případně délky měřeného záznamu, a na volbu měřicího bodu v současném uspořádání napájecí soustavy testovaného automobilu, při měření proudového odběru více elektrických částí automobilové výbavy v jednom bodě. Nejvyšší nároky jsou kladeny na volbu těchto parametrů při měření poruch na elektrodách zapalovací svíčky a zkratu v sekundárním vinutí zapalovací cívky. Naopak nejmenší nároky jsou kladeny na úspěšnou klasifikaci poruchy v primárním obvodu zapalovací cívky a zadírání táhel stěrače.



V. *Navrhnout vhodné umístění měřicích bodů v napájecí síti vozidla. (kapitola 8)*

Aby byly výsledky klasifikace projevů poruch z měřeného proudu co nejméně ovlivněny parazitními vlastnostmi vedení, blokovacích kondenzátorů řídicích jednotek a měřením proudového odběru více elektrických částí současně, bylo by nutné rozdělit diagnosticky významné části automobilové výbavy minimálně do tří skupin. V každé skupině by byly pouze takové části automobilové výbavy, které se svými proudovými odběry ovlivňují jen minimálně a mají podobnou hodnotu odebíraného proudu. Každá skupina by byla napájena z jednoho společného bodu napájecí soustavy a v žádné části napájecí soustavy za tímto bodem by neměl být blokovací kondenzátor. Toto je s ohledem na strukturu napájecích vodičů v testovaném vozidle řešitelné například pomocí měřicí sondy s Hallovou sondou, do které by byly svedeny napájecí vodiče směřující do diagnostikovaných akčních členů. Jednodušší řešení však nabízí využití decentralizovaného měření inteligentními spínači použitých v napájecí síti nového modelového typu testovaného vozidla, které pro každý spínaný akční člen zároveň měří odebíraný proud.

Splněním jednotlivých bodů se podařilo stanovit diagnosticky významné části automobilové výbavy z pohledu centralizovaného konceptu, na vybraných částech rozšířit a klasifikovat množinu poruch, jejichž příznaky jsou měřitelné na napájecí síti vozidla, a pro každou poruchu stanovit krajní umístění měřicího bodu v napájecí síti testovaného vozidla. Konkrétně se jedná o zapalovací systém s poruchami v primárním obvodu zapalovací cívky, zkratu v sekundárním obvodu cívky, odpojené zapalovací svíčky či s poruchami na elektrodách svíčky, a o motor předního stěrače s poruchami zkratovaného či přerušeného vinutí stejnosměrně napájeného elektromotoru a zadírání táhel stěrače pro převod krouťícího pohybu na kyvný. Výsledkem tohoto rozboru je závěr, že nelze všechny poruchy elektrické automobilové výbavy měřit v jednom společném bodě, ale musí být rozděleny do několika skupin podle charakteru odebíraného proudu a každá skupina musí být měřena samostatně jednou měřicí sondou.

Rozšířením množiny poruchových stavů akčních členů s popisem dynamického průběhu jejich projevů v odebíraném proudu a návrhem klasifikační metody ke každé poruše může tato práce výrazně přispět i k rozšíření funkcionality současně používaných i teprve vyvíjených řídicích jednotek, a to bez výrazných konstrukčních úprav.

V práci byly popsány dynamické projevy poruch v odebíraném proudu na omezeném množství akčních členů jednoho vybraného typu pro jeden automobil. Získání většího počtu akčních členů různých typů se ukázalo být finančně nákladnou záležitostí. Poruchy akčních členů musely být také často simulovány, neboť získání přirozeně vzniklých poruch akčních členů z autorizovaných servisů bylo v rozporu s procesním nařízením automobilek.

Pro další zobecnění a verifikaci navržených metod bude v první řadě potřeba získat větší množství akčních členů různých typů a výrobců určené pro různé typy automobilů několika výrobců. Na takovýchto sadách akčních členů je nezbytné ověřit shodnost dynamických projevů všech dosud prezentovaných poruch v odebíraném proudu. Ve spolupráci s výrobcí automobilů by bylo žádoucí získat tyto akční členy s přirozeně vzniklými poruchami a statisticky stanovit pravděpodobnost vzniku jednotlivých typů poruch pro každý typ akčního členu v závislosti na stáří a opotřebení. V dalším kroku bude nutné na množině bezporuchových i poruchových akčních členů vytvořit statistické zhodnocení navrhovaných metod pro odhalení konkrétního typu poruchy.

## Citace

- [1] Borner, M.; Straky, H.; Weispfenning, T. & Isermann, R. (2002). Model based fault detection of vehicle suspension and hydraulic brake systems. *Mechatronics*, 12(8), 999–1010.
- [2] O'Connor, A. (2008). Tata Nano–world's cheapest new car is unveiled in India. *The Times*, 11.
- [3] Gusikhin, O.; Rychtyckyj, N. & Filev, D. (2007). Intelligent systems in the automotive industry: applications and trends. *Knowledge and Information Systems*, 12(2), 147–168.
- [4] Crossman, J.; Guo, H.; Murphey, Y. & Cardillo, J. (2003). Automotive signal fault diagnostics - part I: signal fault analysis, signal segmentation, feature extraction and quasi-optimal feature selection. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 52(4), 1063–1075.
- [5] Murphey, Y.; Crossman, J.; Chen, Z. & Cardillo, J. (2003). Automotive fault diagnosis - part II: a distributed agent diagnostic system. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 52(4), 1076–1098.
- [6] Rizvi, M. A. & Bhatti, A. I. (2009, December). Hybrid model for early detection of misfire fault in SI engines. In *Multitopic Conference, 2009. INMIC 2009. IEEE 13th International* (pp. 1–6). IEEE.
- [7] Alessandri, A.; Caccia, M. & Veruggio, G. (1999). Fault detection of actuator faults in unmanned underwater vehicles. *Control Engineering Practice*, 7(3), 357–368.
- [8] Ježdík, P. & Novák, J. (2008). Centralised diagnostics of electronic and electric equipment in vehicles, engine lighting equipment testing. *International Scientific Journal of Computing*, 7(2), 30–34.
- [9] Okrouhlý, M. & Novák, J. (2013, September). Centralized vehicle diagnostics. In *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS), 2013 IEEE 7th International Conference on* (Vol. 1, pp. 353–357). IEEE.
- [10] Okrouhlý, M. & Novák, J. (2014). Centralized Diagnostics of Ignition System. *Elektronika ir Elektrotechnika*, 20(10), 23–34.

- [11] Čoček, J. (2012). Sériová a paralelní diagnostika pohonných jednotek motorových vozidel. Bakalářská práce, VUT v Brně, Brno.
- [12] Lili, Z. & Jiangwei, C. (2010). Study of automobile electric controlled system fault diagnosis based on classification pattern recognition. In *The 2010 IEEE International Conference on Information and Automation* (pp. 2076–2081).
- [13] Vlk, F. (2006). *Diagnostika motorových vozidel*. 1. vyd. Brno: Vlk, 444 s. ISBN 80-239-7064-X.
- [14] Jičínský, Š. (2006). *Osciloskop a jeho využití v automobilové praxi*. 1. vyd. Praha: Grada, 238 s. ISBN 80-247-1417-5.
- [15] Ghaderi, H. & Kabiri, P. (2012, May). Fourier transform and correlation-based feature selection for fault detection of automobile engines. In *Artificial Intelligence and Signal Processing (AISP), 2012 16th CSI International Symposium on* (pp. 514–519). IEEE.
- [16] Štěrbá, P.; Čupera, J. & Polcar, A. (2011). *Automobily 8, Diagnostika motorových vozidel II*. 1. vyd. Brno: Avid. 181 s. ISBN 978-80-87143-19-3.
- [17] Jan, Z.; Ždánský, B. & Kubát, J. (2008). *Automobily 6, Elektrotechnika motorových vozidel II*. 1. vyd. Brno: Avid. 211 s. ISBN 978-80-87143-14-8.
- [18] NGK Spark Plug Europe (2014). *Základní znalosti o zapalovacích cívkách*. Dostupné z <http://www.ngk.de/cz/technicke-detaily/zapalovaci-civky>
- [19] Mauer, G. F. (1992, November). On-line performance diagnostics for internal combustion engines. In *Industrial Electronics, Control, Instrumentation, and Automation, 1992. Power Electronics and Motion Control., Proceedings of the 1992 International Conference on* (pp. 1460–1465). IEEE.
- [20] Vong, C. M.; Wong, P. K. & Ip, W. F. (2011, July). Simultaneous faults diagnosis for automotive ignition patterns. In *Machine Learning and Cybernetics (ICMLC), 2011 International Conference on* (Vol. 3, pp. 1324–1330). IEEE.
- [21] Derong, T.; Xinping, Y.; Song, G. & Zhenglin, L. (2005, October). Fault diagnosis for spark ignition engine based on multi-sensor data fusion. In *Vehicular Electronics and Safety, 2005. IEEE International Conference on* (pp. 311–314). IEEE.

- [22] Ježdík, P. (2011). Possibility of Vehicular Electric Equipment Diagnostics Using Power Supply Network Transient Analysis. Disertační práce, ČVUT, Praha.
- [23] NGK Spark Plug Europe (2014). Konstrukce zapalovací svíčky. Dostupné z <http://www.ngk.de/cz/technicke-detaily/zapalovaci-svicky/zaklady-zapalovacich-svicek/konstrukce-zapalovaci-svicky>
- [24] Patel, V. & Steffka, M. (2005, August). Vehicular spark ignition systems radiated emissions and reception performance. In Electromagnetic Compatibility, 2005. EMC 2005. 2005 International Symposium on (Vol. 1, pp. 19–23). IEEE.
- [25] Soldera, F. A.; Mucklich, F. T.; Hrastnik, K. & Kaiser, T. (2004). Description of the discharge process in spark plugs and its correlation with the electrode erosion patterns. Vehicular Technology, IEEE Transactions on, 53(4), 1257–1265.
- [26] Shiraishi, T. (2008). Spark ignition engine, controller for use in the engine, ignition coil for use in the engine. U.S. Patent No. 7,353,813. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [27] Machytka, V. (1913). Elektrotechnika : příručka pro elektromontéry, upravená se zřetelem ku vyučování na živnostenských školách. 1, Elektrické stroje a přístroje. vyd. Praha: I.L. Kober. Dostupné z <http://elektrika.cz/terminolog/eterminologitem.2005-07-29.6568034704/view>
- [28] Hanus, V. (2013). Měření a vyhodnocení proudů v napájecí síti automobilu. Diplomová práce, ČVUT, Praha.
- [29] Hlaváč, V. & Sedláček, M. (2000). Zpracování signálů a obrazů. České vysoké učení technické, 255s., ISBN 80-01-03110-1.
- [30] Oppenheim, A. V.; Schafer, R. W. & Buck, J. R. (1989). Discrete-time signal processing (Vol. 2). Englewood Cliffs: Prentice-hall.
- [31] Čížek, V. (1981). Diskrétní Fourierova transformace a její použití. SNTL, Praha.
- [32] Šmíd, R. (2001). Úvod do vlnkové transformace. ČVUT FEL katedra měření. Dostupné z <http://measure.feld.cvut.cz/groups/diag/download/Wavelet-intro8859.pdf>

- [33] Friedman, D. H. (1969). *Detection of signals by template matching*. Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press.
- [34] Zhenyong, L.; Xin, C. & Shiwei, R. (2009, March). Study on Monitoring and Fault Diagnosis for Ignition System of Engines. In *Education Technology and Computer Science. ETCS '09. First International Workshop on* (Vol. 1, pp. 895–899). IEEE.
- [35] McKINNON, D. L. (2007). Online fault analysis of DC motors. In *AIST Proceedings: AISTech 2007*. Dostupné z [http://www.pdma.com/pdfs/Articles/Online\\_Fault\\_Analysis\\_of\\_DC\\_Motors.pdf](http://www.pdma.com/pdfs/Articles/Online_Fault_Analysis_of_DC_Motors.pdf)
- [36] Isermann, R. (2011). *Fault-diagnosis applications: model-based condition monitoring: actuators, drives, machinery, plants, sensors, and fault-tolerant systems*. Springer Science & Business Media, ISBN 978-3-642-12766-3.
- [37] Iorgulescu, M. & Beloiu, R. (2012, October). Study of DC motor diagnosis based on the vibration spectrum and current analysis, In *Applied and Theoretical Electricity (ICATE), 2012 International Conference on* (pp. 1–4). IEEE.
- [38] Glowacz, Z. & Zdrojewski, A. (2007, September). Diagnostics of commutator DC motor basing on spectral analysis of signals. In *Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, 2007. SDEMPED 2007. IEEE International Symposium on* (pp. 497–500). IEEE.
- [39] Guo, H.; Crossman, J. A.; Murphey, Y. L. & Coleman, M. (2000). Automotive signal diagnostics using wavelets and machine learning. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 49(5), 1650–1662.

# Seznam publikací

## Publikace v impaktovaných časopisech vztahující se k tématu disertační práce

- [40] Okrouhlý, M. (60%) - Novák, J. (40%): Centralized Diagnostics of Ignition System. *Elektronika ir Elektrotechnika*. 2014, vol. 20, no. 10, p. 23-34. ISSN 1392-1215. Citováno: 0

## Ostatní publikace vztahující se k tématu disertační práce

- [41] Okrouhlý, M. (60%) - Novák, J. (40%): Centralized Vehicle Diagnostics. In *IDAACS 2013 - Proceedings of the 2013 IEEE 7th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems*. Berlin: IEEE, 2013, p. 353-357. ISBN 978-1-4799-1426-5. Citováno: 1

## Ostatní publikace

- [42] Novák, J. (40%) - Okrouhlý, M. (30%) - Sobotka, J. (30%): FlexRay Modelling and Application. In *Advanced Distributed Measuring Systems - Exhibits of Application*. Aalborg: River Publishers, 2012, p. 121-162. ISBN 978-87-92329-72-1. Citováno: 0
- [43] Okrouhlý, M. (50%) - Waraus, D. (50%): Anti-Lock Braking System Based on FlexRay Protocol. In *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS)*. Piscataway: IEEE, 2011, vol. 1, p. 283-286. ISBN 978-1-4577-1426-9. Citováno: 1
- [44] Okrouhlý, M.: Anti-lock Braking System by FlexRay. In *Electronic Devices and Systems, IMAPS CS International Conference 2011 Proceedings*. Brno: VUT v Brně, FEKT, 2011, p. 147-152. ISBN 978-80-214-4303-7. Citováno: 0
- [45] Okrouhlý, M. (90%) - Novák, J. (10%): Model of Electromechanical Valve in the Anti-lock Braking System. In *Measurement 2011 - 8th International Conference on Measurement (Proceedings)*. Bratislava: Institute of Measurement Science, 2011, p. 249-252. ISBN 978-80-969672-4-7. Citováno: 0
- [46] Okrouhlý, M.: Simulated Faults in Model of Electromechanical Valve in Anti-lock Braking System. In *POSTER 2011 - 15th International Student Conference on Electrical Engineering*. Prague: CTU, Faculty of Electrical Engineering, 2011, p. 1-4. ISBN 978-80-01-04806-1. Citováno: 0