

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra aplikované elektrotechniky a telekomunikací

DISERTAČNÍ PRÁCE

Adaptivní systémy řízení aktivních filtrů
pevných částic pro vznětové motory

Ing. Jindřich Křivka

Školitel: doc. Ing. Jiří Skála, Ph.D.

Konzultant specialista: Ing. Kamil Kosturik, Ph.D.

Plzeň 2019

Čestné prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě disertační práci zpracovanou v rámci doktorského studia na Fakultě elektrotechnické, Katedře aplikované elektroniky a telekomunikací Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu literatury, který je součástí této disertační práce. Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této práce, je legální.

.....
Podpis a datum

Poděkování

Velmi rád bych poděkoval všem pracovníkům Západočeské univerzity v Plzni a společnosti Autometal, spol. s ro, kteří mi poskytli podporu během mé práce. Rád bych vyzdvihnul přínos mého školitele doc. Ing. Jiřího Skály, Ph.D. a konzultanta specialisty Ing. Kamila Kosturika, Ph.D., kteří mi poskytovali cenné rady a podněty během zpracovávání tohoto náročného úkolu. Dále bych chtěl poděkovat mému kolegovi Ing. Jiřímu Žahourovi, se kterým jsem v rámci týmu emisních technologií po celou dobu efektivně spolupracoval.

Veliké díky též patří mé ženě Ivoně Křivkové, která mne po celou dobu podporovala a vytvořila mi kvalitní rodinné zázemí, bez kterého bych to nezvládl.

Tato práce vznikla za podpory projektu SGS-2018-001: Výzkum a vývoj elektronických a komunikačních systémů ve vědeckých a inženýrských aplikacích.

Anotace

Práce se věnuje návrhu elektronického řídicího systému elektricky regenerovatelných filtrů pevných částic pro vznětové motory. Dále jsou v ní navrženy optimální metody řízení aktivní regenerace a autonomní inicializaci elektronického systému. Práce také obsahuje popis vlastního elektronického systému s důrazem na vývoj řízení spínání proudové regenerační smyčky. Část práce je též věnována samotnému konstrukčnímu řešení ERDPF filtru, kde je elektronický systém umístěn v samotném těle filtru.

Klíčová slova

Filtr pevných částic, ERDPF, aktivní regenerace, autonomní systém, emise PM

Annotation

The doctoral thesis deals with an electronic control system development of electrically regenerable diesel particulate filters. The thesis is dedicated to design of optimal methods for an active regeneration control and an autonomous electronic system initialization. The text contains electronic system design description and the field of a regeneration current switching is emphasis. A part of thesis deals of a mechanical design. The primary goal was to develop a compact technology with the electronic system that is integrated directly into a filter body.

Key words

Diesel Particulate Filter, ERDPF, Active Regeneration, Autonomous System, PM Emissions

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Popis	Description
AE	Aktivní element	Active Element
CRT	Průběžná regenerační technologie	Continuously Regenerating Technology
CU _x	Sekundární modul	Control Unit
DOC	Diesellový oxidační katalyzátor	Diesel Oxidation Catalyst
DPF	Filtr pevných částic	Diesel Particulate Filter
ERDPF	Elektricky regenerovatelný filtr pevných částic	Electrically Regenerable Diesel Particulate Filter
FBC	Palivová katalytická aditiva	Fuel Borne Catalyst
HMS	Hlavní výkonový spínač	Main MOSFET switch
LSB	Nejméně významný bit	Least Significant Bit
MCE	Hlavní modul	Main Control Unit
MSB	Nejvýznamnější bit	Most Significant Bit
OEM	Originální díl	Original Equipment Manufacturer
PM	Pevné částice	Particulate Matter
PN	Počet pevných částic	Particle Number
SBMMAF	Mediánový klouzavý průměr s váhováním	Smart Balancing Moving Median Average Filter
SCR	Selektivní katalytická redukce	Selective Catalytic Reduction
TPM	Celkový počet částic	Total Particle Mass

Seznam použitých symbolů

Zkratka	Veličina	Popis
ADC _{bits}	[-]	Počet bitů ADC převodníku
C _{AE}	[J*g ⁻¹ *°K ⁻¹]	Měrná tepelná kapacita aktivního elementu
C _{bat}	[Ah]	Odběr energie z akumulátoru na regeneraci
C _{MF}	[J*kg ⁻¹ *°K ⁻¹]	Měrná tepelná kapacita spalin
e _F	[%]	Efektivita filtru
I _P	[A]	Výsledná výstupní hodnota naměřeného proudu
I _{PN}	[A]	Maximální rozsah měřeného proudu
I _{reg}	[A]	Regenerační proud
J _N	[-]	Poměrný difuzní odpor filtru
J _{NACT(t)}	[-]	Hodnota J _N pro aktuální vstupní tlaky
J _{NACTOUT(t)}	[-]	Výsledná výstupní hodnota pro aktuální vstupní tlaky
J _{NNORMAL}	[-]	Referenční výstupní hodnota (zaplnění filtru)
J _{NOUT(t-1)}	[-]	Celková výstupní hodnota SBMMAF algoritmu z předchozího kroku
k(T)	[s ⁻¹]	Poměr regenerace PM

k_{dif}	[%]	Vstupní poměr hodnot do výpočtu vztážený k mediánu tlaku
K_{DIST}	[mBar]	Rozsah vzdálené množiny dle tlaků P_{VTDPF}
$K_K(n)$	[-]	Korekce pro danou hodnotu v mediánovém filtru
$K_K(t)$	[-]	Korekce aktuální vstupní hodnoty $JN_{ACT}(t)$
K_{NEAR}	[mBar]	Rozsah blízké množiny dle tlaků P_{VTDPF}
m	[g*s ⁻¹]	Hmotnostní průtok spalin
m_{AE}	[g*s ⁻¹]	Hmotnost aktivního elementu
$MLOE$	[g]	Maximální přípustná zátěž PM na jeden element
m_{MF}	[kg*s ⁻¹]	Hmotnostní průtok spalin
NE	[-]	Počet elementů ERDPF filtru
$NROE$	[h ⁻¹]	Počet regenerací každého elementu za hodinu provozu motoru
P	[kW]	Výkon motoru
P_{DPF}	[mBar]	Diferenční tlak na ERDPF filtru
P_m	[g*kWh ⁻¹]	Emise PM daného motoru
PM	[g]	Celková hmotnost zachycených sazí
P_{REG}	[W]	Regenerační výkon
P_{VTDPF}	[mBar]	Diferenční tlak na hmotnostním průtokoměru
Q_{REG}	[J]	Minimální energie potřebná k iniciaci aktivní regenerace
R	[Ω]	Elektrický odpor
R_{iAE}	[Ω]	Vnitřní odpor aktivního elementu
t	[s]	Čas
T	[°C]	Teplota
T_{ext}	[°C]	Aktuální teplota spalin
t_{FIN}	[s]	Doba potřebná k iniciaci regenerace
t_{MAX}	[-]	Velikost okna klouzavého průměru
T_{max}	[°C]	Maximální dosažitelná teplota ohřevu spalin
T_n	[°C]	Teplota dosažená za sekundu ohřívání
T_{n-1}	[°C]	Teplota dosažená v předchozím kroku
T_{SAMPL}	[ms]	Perioda vzorkování ADC převodníku
U_{bat}	[V]	Napětí baterií
V_{out}	[V]	Výstupní napětí senzoru proudu
V_{ref}	[V]	Referenční napětí senzoru proudu
W_{ACT}	[-]	Váhový koeficient korekce vzdálené množiny
W_{JN}	[-]	Váhový koeficient rozdílu $JN_{ACT}(t)$ k výstupu SBMMAF algoritmu
η_{bat}	[%]	Účinnost nabíjení akumulátorů

Obsah

Poděkování.....	I
Anotace	II
Klíčová slova.....	II
Annotation.....	II
Key words	II
Seznam použitých zkratk.....	III
Seznam použitých symbolů.....	III
Obsah.....	V
1 Motivace.....	1
1.1 Výchozí stav projektu.....	1
1.2 Cíle práce.....	2
2 Emise výfukových plynů.....	3
2.1 Zdravotní rizika spojená s expozicí dieselovým výfukovým plynům.....	3
2.2 Látky obsažené ve výfukových plynech.....	4
3 Pevné částice – PM	5
3.1 Rozdělení PM	6
3.1.1 Objem částic – PM	7
3.1.2 Počet částic – PN.....	8
3.1.3 Saze - BC.....	8
3.1.4 Celkový objem částic TPM.....	8
3.2 Evropské emisní normy	8
3.2.1 Trendy v emisních legislativách Evropy - PM.....	10
3.3 Metody měření koncentrace PM ve spalinách.....	10
3.3.1 Mokré měření	12
3.3.2 Suché měření	12
3.3.3 Metoda kontinuálního sbírání vzorků a až následné vyhodnocení	13
3.3.4 Metoda přímého určení složení emisí ve fázi aerosolu	13
4 DPF filtry	14
4.1 Regenerace DPF filtru pomocí oxidace.....	14
4.1.1 Oxidace za pomoci kyslíku	15
4.1.2 Oxidace za pomoci oxidu dusičitého	16
4.2 Dělení DPF filtrů	17
4.3 Jednorázové DPF filtry.....	18

4.4	Pasivní princip regenerace.....	19
4.4.1	Palivová aditiva – FBC	20
4.4.2	Katalyzátor jako součást DPF filtru	20
4.4.3	NO ₂ katalyzátor s DPF filtrem - CRT	20
4.5	Aktivní regenerace.....	21
4.5.1	Řídicí jednotka motoru.....	22
4.5.2	Katalytické spalování paliva	22
4.5.3	Přímé spalování paliva	23
4.5.4	Elektrická regenerace	23
5	Podmínky provozu DPF filtrů.....	25
5.1	Rovnovážený stav	26
5.2	Maximální hodnoty zpětného tlaku	27
6	Vyhřívání substrátu – ERDPF metoda.....	28
6.1	Počáteční stav a inovační podněty ERDPF projektu.....	29
6.1.1	Výchozí stav projektu	29
6.1.2	Začátek participace na projektu	30
6.1.3	Detekce zaplnění DPF filtru.....	30
6.1.4	Navýšení tepelného výkonu aktivních elementů.....	31
6.1.5	Modulární elektronický systém.....	32
6.2	Metody odhadu schopnosti dosažení iniciační teploty.....	32
6.2.1	Vliv hmotnostního průtoku spalin na regeneraci	32
6.2.2	Odhad potřebného času pro regeneraci	34
6.2.3	Vyhodnocení průběhu regenerace	38
6.3	Měření teploty pomocí změny odporu aktivních elementů.....	40
6.3.1	Princip měření odporu AE	41
6.3.2	Výpočet velikosti odporu aktivního elementu	41
6.3.3	Výstup měření	42
6.4	Dopady na ekonomiku provozu vozidla.....	43
6.4.1	Vliv zpětného tlaku na spotřebu paliva	44
6.4.2	Regenerační strategie	44
6.4.3	Vliv regenerace na celkovou spotřebu paliva	45
6.5	Přehled obdobných řešení DPF filtrů ve světě a jejich srovnání s ERDPF	48
6.5.1	PROVENTIA EMISSION CONTROL	48
6.5.2	RYPOS Inc.....	49

7	Mechanický návrh ERDPF filtrů	51
7.1	ERDPF testovací stolice	51
7.2	Testování provozních podmínek a simulace ohřátí	52
7.3	Mechanické návrhy prototypů ERDPF filtrů	54
7.3.1	Testovací box elektroniky 24V ERDPF	54
7.3.2	21 AE ERDPF prototyp	56
7.3.3	12 AE ERDPF Lombardiny	57
7.3.4	21 AE ERDPF flat.....	58
7.3.5	12 AE ARYAN	59
8	Elektronický systém 24V ERDPF V2.....	61
8.1	Původní řešení – historický vývoj	61
8.2	Bez-reléová elektronika.....	63
8.3	Základní popis elektronického systému	66
8.4	Spínání regenerační proudové smyčky.....	68
8.4.1	Centrální nábojová pumpa	69
8.4.2	Řízení hlavního spínače	70
8.5	Kruhová topologie	75
8.6	Senzorické vybavení.....	75
8.7	Instalace elektroniky ve filtru 12 AE ARYAN	77
8.8	Zástavba filtru ve vozidle	79
8.9	24V ERDPF V1	80
8.10	Kompatibilita s SCR systémem	81
9	Metody autonomie ERDPF systému	82
9.1	Nezávislost na informační síti vozidla	82
9.2	Metoda autonomní inicializace.....	84
9.2.1	Základní předpoklad - univerzální elektronický systém	84
9.2.2	Způsob detekce modulů	84
9.2.3	Způsob detekce přítomnosti aktivních elementů.....	86
9.2.4	Inicializace iniciačního odporu aktivních elementů.....	86
9.3	Metoda SBMMAF – detekce zaplnění DPF filtru.....	87
9.3.1	Důvody pro návrh jiné metody detekce zaplnění.....	87
9.3.2	Idea nového přístupu	87
9.3.3	Výchozí úvaha o funkci SBMMAF filtru	89
9.3.4	Inicializace algoritmu SBMMAF.....	90

9.3.5	Nová vstupní hodnota	91
9.3.6	Výpočet korekční konstanty.....	92
9.3.7	Výstup metody SBMMAF	95
10	Závěr	97
	Literatura	99
11	Seznam autorovo publikací	102
11.1	Souvisejících s tématem – řazeno chronologicky	102
11.2	Nesouvisejících s tématem – řazeno chronologicky	104
12	Přílohy.....	107
12.1	MCE_ERDPF_V2 Hlavní schéma.....	108
12.2	MCE_ERDPF_V2 Řízení HMS.....	109
12.3	MCE_ERDPF_V2 Nábojová pumpa	110
12.4	MCEP_ERDPF_V2 Hlavní schéma.....	111
12.5	MCEP_ERDPF_V2 Hlavní spínač HMS.....	112
12.6	CUx_ERDPF_V2 Hlavní schéma	113
12.7	CUx_ERDPF_V2 Spínač výkonového modulu	114
12.8	CUxP_ERDPF_V2 Hlavní spínač.....	115
12.9	CUxP_ERDPF_V2 Sekundární spínač – jeden AE	116
12.10	Fotografie z výroby a testování filtru 12AE ERDPF ARYAN.....	117

1 Motivace

V dnešní době každá zodpovědná společnost již klade důraz na ochranu životního prostředí. Tento trend se postupně projevuje napříč lidskými činnostmi. Pomocí legislativních norem dochází mimo jiné i k regulaci emisí výfukových plynů. Emisní normy též definují mimo jiné limity pevných částic (PM), které mají jak toxické, tak mutagenní účinky na lidský organismus, kde působí zejména jako nosiče dalších nebezpečných prvků.

Současné technologie snižování emisí pro vznětové motory jsou schopné spolehlivě redukovat PM s účinností vyšší než 90 %, nicméně jsou značně limitované kvalitou paliva a aktuálními provozními podmínkami vozidla. Běžně používané filtry pevných částic s aktivní regenerací jsou schopné iniciovat regeneraci pouze za vhodných teplotních podmínek a omezených hmotnostních průtoků spalin. Tyto nedostatky se projevují zejména v aplikacích, kde je vozidlo využíváno mimo silniční síť.

Řešením těchto nedostatků může být například DPF filtr s aktivní elektrickou regenerací (ERDPF), který je schopen oproti jiným řešením iniciovat regeneraci filtru i za nepříznivých podmínek a navíc je odolný vůči nekvalitnímu palivu. Princip funkce ERDPF filtru je založen na aktivních elementech, ve kterých se zachycují pevné částice. Po zaplnění filtru je iniciována aktivní regenerace, která spočívá v ohřátí samotného těla aktivního elementu průchodem elektrického proudu a ve spálení zachycených sazí. Iniciační teplota rychlého vznícení sazí se pohybuje okolo 600–700 °C.

1.1 Výchozí stav projektu

Projekt elektricky regenerovatelných filtrů pevných částic je již v pokročilé fázi vývoje, kdy jeho filtrační schopnosti byly ověřeny v akreditovaných laboratořích. Existují verze filtru pro napájení z 12V baterie se čtyřmi aktivními elementy a elektronikou určenou pro osazení do instalační krabice mimo tělo samotného filtru. Elektronický systém neumožňuje jednoduché rozšíření systému o další aktivní elementy. Hlavní spínání proudové regenerační smyčky je realizováno pomocí výkonového relé. Jednotlivé aktivní elementy jsou propojeny s elektronikou relativně složitou externí kabeláží, která také limituje nasazení filtru s výkonnějšími motory.

1.2 Cíle práce

Cílem práce je navržení komplexního kompaktního emisního systému na filtraci PM, který bude nezávislý na provozních datech z řídicích jednotek vozidla. Návrh elektronického systému by měl zohlednit různorodost potencionálních aplikací a být co možná nejvíce univerzální. Měl by umožňovat připojení různého počtu aktivních elementů. Během práce musí být kladen důraz na vyrobiteľnost v podmínkách malosériové výroby.

Na základě těchto předpokladů lze zdůraznit některé jednotlivé části řešené problematiky:

- Seznámit se s problematikou emisí pevných částic u dieselových motorů
- Zhodnotit stávající stav vývoje ERDPF filtrů a navrhnout možná vylepšení
- Ověřit přechod celého systému z 12V napájení na 24V
- Definovat princip metody řízení aktivní regenerace
- Navrhnout univerzální elektronický systém
- Navrhnout mechanickou platformu nové generace ERDPF filtrů
- Integrovat elektronický systém do těla samotného ERDPF filtru
- Definovat metody řízení ERDPF filtrů
- Otestovat jak jednotlivé části, tak celý elektronický systém ERDPF filtrů

2 Emise výfukových plynů

Před samotnou problematikou elektronického a mechanického návrhu a metod řízení ERDPF filtru je důležité pochopit problematiku emisí obecně, porozumět jednotlivým složkám emisí, dopadům na životní prostředí a jejich vztahu vzhledem k lidskému zdraví.

2.1 Zdravotní rizika spojená s expozicí dieselovým výfukovým plynům

Výfukové plyny mají bezesporu negativní vliv na své okolí. Na toto téma bylo zpracováno značné množství vědeckých studií a jejich přehledů (podrobné informace lze dohledat například zde [1] [2]). Vědecké studie korelují v tom, že výfukové plyny ve zvýšené míře neprospívají jak celkovému životní prostředí, tak samotnému lidskému zdraví. Jelikož předmětem mé práce je vývoj filtru pevných částic (Diesel Particulate Filter – DPF), tak se zaměřím pouze na účinky pevných částic.

Jejich maximální povolené limity jsou stanoveny v rámci smogových stupnic Českého hydrometeorologického ústavu jako PM_{10} a $PM_{2,5}$, kde se sleduje jejich velikost a výskyt v ovzduší v $\mu\text{g}/\text{m}^3$ za danou časovou jednotku. Tyto ukazatele mají přímý dopad na hodnocení kvality ovzduší v dané lokalitě, pro subjektivní zhodnocení aktuálních podmínek je definována stupnice od 1 ($0\text{--}20 \mu\text{g}/\text{m}^3$) do 6 (více jak $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Pevné částice se přirozeně vyskytují v přírodě, kde jsou jejich zdrojem například požáry, větrná eroze nebo vulkanická činnost, naproti tomu antropogenními zdroji jsou spalování fosilních paliv a biopaliv.

Mezi hlavní průvodní příznaky znečištění pevnými částicemi patří snížená viditelnost (smog) v místě se zvýšenou koncentrací. Součástí pevných částic jsou v neposlední řadě také saze, které mají podíl na globálním oteplování tím, že nepřímo zahřívají troposféru pohlcováním slunečního záření [3].

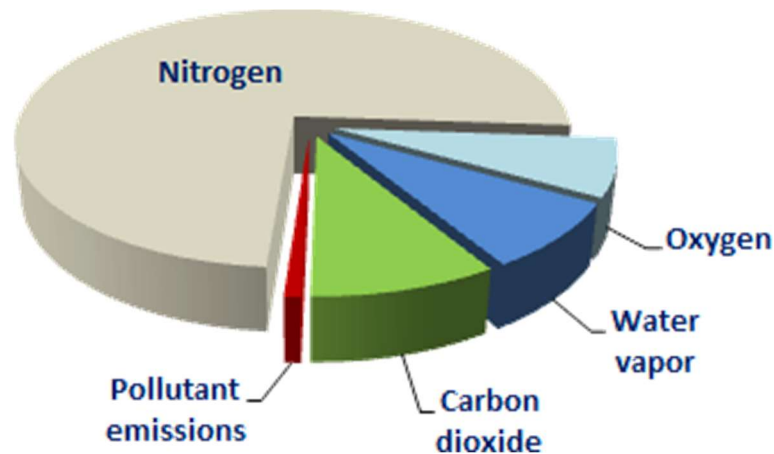
Zásadním je také jejich vliv na lidský organizmus, kde se v závislosti na své velikosti mohou dostat až do krevního řečiště a současně mohou být nositeli dalších nebezpečných látek. Mimo jiné jsou jim přisuzovány tyto zdravotní komplikace: snížená funkce plic, zhoršení nebo vznik astmatu, srdeční arytmie, zhoršení obecných subjektivních respiračních problémů [4]. Z těchto důvodů je prospěšné zabývat se metodami pro redukci pevných částic v emisích dieselových motorů a shledávám v tom výraznou motivaci pro mou další práci.

2.2 Látky obsažené ve výfukových plynech

Dieselová motorová jednotka přeměňuje chemickou energii ve formě fosilního paliva na mechanickou energii ve formě pohybu pístů ve válcích motoru. Při ideálních podmínkách jsou produkovány pouze vodní páry H_2O a oxid uhličitý CO_2 , které spolu s dusíkem N_2 a kyslíkem O_2 tvoří emisní plyny, které jsou v následujícím rozmezí hodnot:

- CO_2 2 ... 12 %
- H_2O 2 ... 12 %
- O_2 3 ... 17 %
- N_2 Dovažuje zbytek směsi výfukových plynů

Výsledné poměry jsou odlišné pro různá zatížení motoru, kdy je obsah O_2 nejnižší pro nejvyšší zatížení motoru, naopak koncentrace CO_2 a H_2O roste se zatížením. Těchto ideálních poměrů bez produkce vedlejších emisí však za běžného provozu motoru nelze dosáhnout a při spalovacím procesu dochází ke vzniku dalších emisních látek, které jsou zdraví škodlivé pro své okolí (viz kapitola 2.1). Emise však obsahují také škodlivé látky, které vznikají při nedokonalém spalování paliva, oleje na stěnách válců, palivových a olejových aditiv, sirných sloučenin a jiných nečistot, které provází spalovací proces. Jednotlivé poměry hlavních látek obsažených v emisních plynech jsou zachyceny formou grafu (Obrázek 2-1). Škodlivé emise (vyjma CO_2) tvoří maximálně desetiny procenta z celkového objemu emisí u motorové jednotky, která není vybavena dodatečnými systémy pro snížení těchto emisí, jako je DPF filtr nebo selektivní katalytická redukce (SCR systém). Po dovybavení motoru těmito technologiemi jsou pak výsledné emise (NO_x a PM) řádově nižší. Tento přístup je nutný a nově homologované vozidlo se dnes bez přídatných výfukových systémů neobejde, neboť maximální hodnoty škodlivých složek emisí jsou pevně zakotveny v legislativě většiny rozvinutých společností (viz kapitola 0). Avšak ne všechny škodlivé látky jsou dnes regulovány a je pravděpodobné, že se v budoucnosti setkáme s novými výzvami na omezení dalších emisních složek, jako jsou například sloučeniny oxidů síry (SO_x), polycyklické aromatické uhlovodíky (PAH), pevný maximální počet částic (PN) aj.



Obrázek 2-1 Relativní poměry prvků obsažených látek ve výfukových plynech dieselového motoru [5]

3 Pevné částice – PM

Zkratky PM „Particle Mass“ nebo DPM vycházející z anglického označení „Diesel Particulate Matter“ jsou využívány jak laickou, tak i odbornou veřejností. Emise PM spolu s NO_x jsou v dnešní době, co se zdravotních rizik týče, považovány za nejnebezpečnější složku emisí pro lidské zdraví. Bylo zpracováno mnoho studií posuzujících jejich negativní vlivy [6], ale v současné době ještě nejsou všechny průvodní jevy dostatečně popsány a vysvětleny.

Emise PM jsou během spalovacího procesu zdrojem typického optického vjemu černomodrého kouře vycházejícího z výfuku od dieselového motoru. Tento kouř je proto obecně považován za synonymum vozidla se špatnými emisemi a z hlediska pochopení emisní problematiky laickou veřejností je také nejjednodušším na vysvětlení a obhájení legislativních emisních represí, které se projevují zvýšením ceny koncového produktu (nejčastěji vozidla).

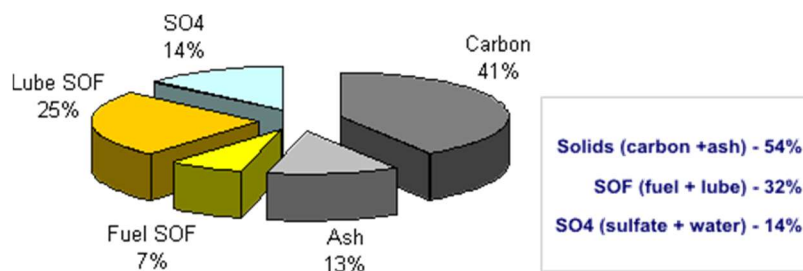
PM je dle své fyzické homogenity heterogenní směs – aerosol. Oproti ostatním plynným emisním skupinám nemá jasně definované složení a jejich definice je závislá na metodě testování jejich přítomnosti ve spalínách. Jedná se tedy o komplexní veličinu, která udává podíl pevných látek určitého kruhového průměru v emisích vznětových motorů. Emise pevných částic jsou sledovanou veličinou, která je zakotvena v emisních normách (kapitola 0 Rozdělení PM). Hlavními prvky jsou volný uhlík, těžké uhlovodíky excitované z paliva a motorového oleje a v neposlední řadě také produkty ze síry [6].

3.1 Rozdělení PM

Složení PM je přímo závislé na kvalitě paliva a oleje, použité spalovací technologii motoru, aktuálních provozních podmínkách (teplota, tlak, výkon) a v neposlední řadě také na použití dodatečných emisních technologií (DPF, SCR, EGR,...). Z toho plyne, že poměr, složení a objem PM nejsou časově stálé veličiny, které by se nechaly jednoduše měřit a kategorizovat. Další značný vliv na objem a složení PM v emisích má ovzduší v okolí vozidla, které je nasáváno a využíváno ve spalovacím procesu, což znamená, že pokud se vozidlo pohybuje v prašném prostředí, tak jsou negativně ovlivněny i celkové emise PM.

Z hlediska složení PM a jeho změn v průběhu spalovacího procesu lze vysledovat, že když PM opouští spalovací komoru, je většina PM ve formě organických částic (SOF) a pevných uhlíkových částic (SOL), které se zformují během spalovacího procesu. Následně pak dle vlastností prostředí (teplota, tlak, dodatečné emisní technologie) dochází k přeměně na uhlovodíky, sírany (sulfáty) a vodu (vodní páry). Složkou, která se v průběhu spalovacího procesu nemění, jsou metalické pevné částice z opotřebení motoru. U nových technologií motorů je jejich podíl větší, protože produkce uhlíkových frakcí-sazí je menší [6].

Na obrázku níže je vyobrazen graf s jednotlivými složkami pevných částic v emisích motoru určeného pro nákladní automobil. Je patrné, že čistý uhlík tvoří pouze 41 % z celkového objemu zachycených pevných částic. Další významnou 32% složkou je popílek a pevné částice, které pocházejí z motorového oleje a paliva, tyto částice nelze zregenerovat oxidačním procesem a je nutné je při údržbě filtru odstranit mechanicky. Zbytek částic, tedy 14 %, je tvořen sulfáty.



Obrázek 3-1 Složení emisí pevných částic dieselového motoru [6]
(změřeno pro HD dieselový motor během US FTP tranzientního testu)

Z hlediska emisí jsou zajímavé jednotlivé vlastnosti PM, které jsou významné s ohledem na zdravotní rizika pro člověka. Základní přehled těchto vlastností je uveden

v tabulce (Tabulka 1). V současné době je většina regulace zaměřena na objem pevných částic ve spalínách, ovšem v některých vyspělých státech jako USA a EU je již zaveden limit pro maximální celkový počet částic na ujetý kilometr.

Vlastnost	Popis
Objem částic - PM	Celkový objem pevných částic, který zahrnuje všechny velikosti, chemická složení v plynném i pevném skupenství. V současné době asi nejlepší indikátor pro posouzení dopad životní prostředí/zdraví
Koncentrace částic - PN	Celkový počet jednotlivých frakcí PM. Většina dnešních emisí PM s nainstalovanými DPF má aerodynamický průměr menší než 100 nm. Tyto částice se velmi snadnou dostanou do plic.
Velikost částic	Velikost částic má významný vliv vzhledem ke zdravotním rizikům. Velikost povrchu může být vztažena k aerodynamickému průměru, elektrickému pohybovému průměru aj.
Velikost povrchu částic	Nejpřesnější ukazatel vlastností PM
Složení částic	Chemické složení PM vzhledem ke zdravotním rizikům

Tabulka 1 Parametry měření vzhledem k zdravotním rizikům [7]

Z pohledu velikosti jednotlivých frakcí částic je situace poměrně jednoduchá a jejich rozdělení je uvedeno v tabulce níže.

Popis částic	Značení v literatuře	Velikost kruhového průměru částice
Hrubé částice	PM _{10-2.5}	2.5 – 10 μm
Částice menší než 10 μm	PM ₁₀	< 10 μm
Jemné částice	PM _{2.5}	< 2.5 μm
Ultrajemné částice a nanočástice	UFP	< 0.1 μm

Tabulka 2 Ustálené rozdělení částic podle jejich velikosti [6]

3.1.1 Objem částic – PM

Na tomto parametru jsou založeny všechny dnešní emisní limity, které se zabývají regulací pevných částic ve spalínách [7]. Jejich detekce je založena na gravimetrické metodě, kde dominují pevné částice v tzv. akumulární fázi (tvoří shluky částic o průměru větším než 100 nm). Toto měření koresponduje s měřením kvality ovzduší na automatizovaných stanicích v USA a Evropě, kde se sledují limity PM₁₀ a PM_{2,5}.

3.1.2 Počet částic – PN

Tento alternativní parametr k PM je v současnosti čím dál tím více diskutovaným parametrem, protože většina emisí PM se přesouvá z akumulární fáze do fáze nukleační. To znamená, že se většina PM dostane do ovzduší ve formě nukleační, kde jsou kruhové průměry částic menší než 100 nm. Část odborné veřejnosti zastává názor, že PM jsou v této formě nebezpečnější než PM s větším průměrem. Tento jev je významně ovlivněn dodatečnými výfukovými technologiemi DPF filtrů (více v kapitole 3.3).

3.1.3 Saze - BC

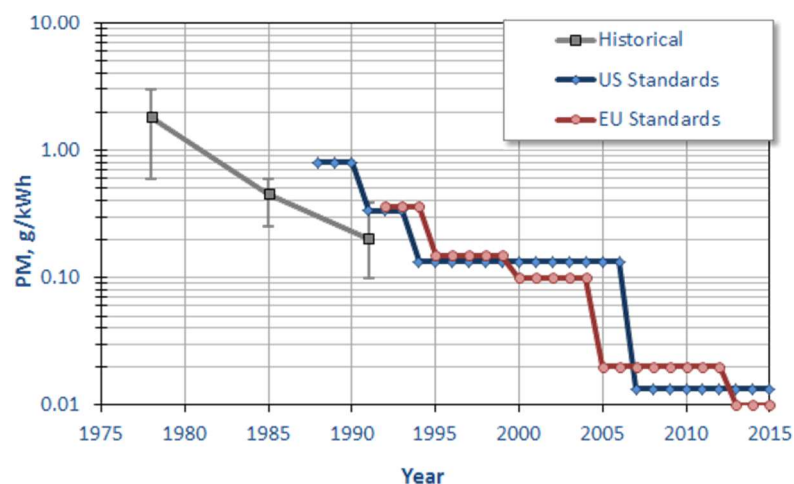
Třetí možností k sledování jsou saze (Black Carbon – BC), jsou to uhlíkaté sloučeniny v pevné formě. Na tomto parametru je možné ve světě vysledovat také několik emisních limitů, lze však říci, že tato metoda vyhodnocení PM je nejméně přesná [7]. Saze jsou také bedlivě sledované pro svůj vliv na životní prostředí, zejména pro svoji schopnost absorpce aerosolů a ohřívání spodních vrstev atmosféry (pohlcují sluneční záření).

3.1.4 Celkový objem částic TPM

Dle ustáleného značení, které je využíváno v odborné literatuře, se určuje celkové složení PM dle níže uvedené rovnice. Jednotlivé složky PM jsou uvedeny v dalším textu.

$$\text{TMP} = \text{SOL} + \text{SOF} + \text{SO4} \quad (3.1)$$

3.2 Evropské emisní normy



Obrázek 3-2 Historický vývoj regulace PM u nákladních automobilů [5]

V grafu (Obrázek 3-2) jsou zaznamenány trendy legislativních limitů USA a EU pro emise PM u nákladních vozidel. Z grafu je patrné, že v dnešní době je produkce PM omezena téměř 100x více než před třiceti léty.

Evropská unie má v platnosti legislativní emisní normy Euro I-VI pro nákladní automobily a autobusy a Euro 1-6 pro ostatní vozidla, které byly Evropskou komisí uvedeny v platnost zaváděcím předpisem číslo 2017/1151 [8]. Každé vozidlo přicházející na evropský trh musí být homologováno pro provoz na pozemních komunikacích podle těchto platných limitů.

Druh vozidla	CO	NO _x	HC+NO _x	PM	PN
	g/km; g/kWh ⁽¹⁾				#/km
M ₁ - osobní automobily < 2500 kg	0,5	0,08	0,17	0,005	6×10 ¹¹
N ₁ - lehká užitková vozidla < 1305 kg	0,5	0,08	0,17	0,005	6×10 ¹¹
N ₁ - lehká užitková vozidla 1305-1760 kg	0,63	0,105	0,195	0,005	6×10 ¹¹
N ₁ - lehká užitková vozidla > 1760 kg	0,74	0,125	0,215	0,005	6×10 ¹¹
N ₂ - užitková vozidla 3500 - 12000 kg	0,74	0,125	0,215	0,005	6×10 ¹¹
Nákladní automobily, autobusy	1,5	0,4	0,13 ⁽²⁾	0,01	8×10 ¹¹

⁽¹⁾ – U nákladních automobilů jsou definovány emise v g/kWh

⁽²⁾ – U nákladních automobilů se určuje pouze počet HC nikoliv HC + NO_x

Tabulka 3 Emisní limity dle norem EURO 6 a EURO IV [8]

Ve výše uvedené tabulce je uveden přehled aktuálně platných emisních limitů pro vozidla včetně nákladních automobilů a autobusů. V níže uvedené tabulce je uveden přehled historického vývoje emisních limitů PM pro jednotlivé kategorie vozidel a emisních limitů.

Emisní norma EURO x	1 a I	2 a II	3 a III	4 a IV	5 a V	6 a VI
Druh vozidla	g/km; g/kWh ⁽¹⁾					
M ₁ - osobní automobily < 2500 kg	0,14	0,08 - 0,1	0,05	0,025	0,005	0,005
N ₁ - lehká užitková vozidla < 1305 kg	0,14	0,08 - 0,1	0,05	0,025	0,005	0,005
N ₁ - lehká užitková vozidla 1305-1760 kg	0,19	0,12 - 0,14	0,07	0,04	0,005	0,005
N ₁ - lehká užitková vozidla > 1760 kg	0,25	0,17 - 0,20	0,1	0,06	0,005	0,005
N ₂ - užitková vozidla 3500 - 12000 kg	X	X	X	X	0,005	0,005
Nákladní automobily, autobusy	0,612 - 0,36	0,25 - 0,15	0,1	0,02	0,02	0,01

⁽¹⁾ – U nákladních automobilů jsou definovány emise v g/kWh

Tabulka 4 Emisní limity PM pro všechny normy EURO 1-6 a EURO I-IV [8]

3.2.1 Trendy v emisních legislativách Evropy - PM

V současné době dominuje legislativním normám parametr omezující celkový hmotnostní objem pevných částic ve spalinách dieselových motorů. V mnoha zemích je to také jediný sledovaný emisní parametr. V posledních letech se však dostáváme do fáze, kdy se mění celkové složení PM, zejména se jedná o velikost jednotlivých frakcí PM. To způsobuje jak problémy zdravotní, tak technologické, protože spolehlivé měření částic s kruhovým průměrem menším než 30 nm je problematické [7].

V Evropské unii byly tyto požadavky zohledněny v emisní normě Euro 5b zavedením dodatečného parametru PN ke stávajícímu parametru PM. Limit byl stanoven 6×10^{11} částic/km pro všechna vozidla vyjma nákladních automobilů, kde je zaveden limit v podobě Euro VI 8×10^{11} částic/km.

Zajímavostí je, že tento limit měl být zaveden už v normě Euro 3/Euro III, nicméně výrobci nebyli schopni dosáhnout požadovaných limitů, zejména kvůli zvýšené produkci NO_x při současném snížení PN. To znamená, že pokud se motor nastavil na nízkou produkci PN, tak produkoval zvýšené množství NO_x .

Zavedení limitu PN bylo odůvodněno tak, že má zabránit využívání tzv. otevřených DPF filtrů u dalšího vývoje vozidel oproti uzavřeným, které mají vyšší účinnost.

Od 1. 9. 2018 se zavádí metodika testování s WLTC cyklem (World Harmonized Light Vehicle Duty Test Cycle), která nahrazuje dosavadní testovací cyklus NEDC (New European Driving Cycle). Její průběh reflektuje různé výkonnostní třídy automobilů a měla by zmenšit riziko nesprávného ověření emisí daného vozidla. V příštím roce by měla vejít v platnost testovací metodika RDE (Real Driving Emission), která je založena na testování v reálných podmínkách vně laboratoří. Tento princip by tak měl reflektovat skutečné provozní podmínky spolu s reálnými emisemi a spotřebou.

3.3 Metody měření koncentrace PM ve spalinách

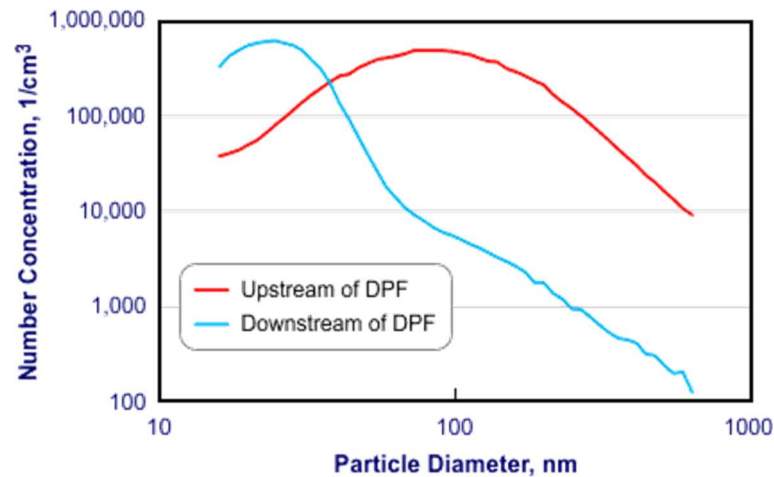
Většina metod je založena na vyhodnocení odfiltrované váhy PM v poměru k objemu filtrovaného vzduchu/spalin. Každá tato metoda závisí na principu filtrace/odloučení PM od filtrovaného materiálu. Protože složení a kvantita PM je velmi proměnlivá hodnota, neexistuje v současné době jedna jediná správná metoda měření, která by dokázala klasifikovat a kvantifikovat všechny složky PM [7]. Z tohoto důvodu jsou všechny dnes

využívané metody k vyhodnocování PM nějakým způsobem přizpůsobeny požadavkům konkrétního typu měření, např. pro měření kvality ovzduší nebo homologaci vozidla jsou kladeny jiné požadavky na danou technologii. U těchto dvou příkladů je problém zejména v tom, že PM ve výfukovém potrubí dosahuje vysokých teplot a při ochlazení na teplotu okolního vzduchu stále mění své skupenství i chemické složení. Z těchto důvodů je problematika měření emisí velmi složitým a náročným oborem, který by si zasloužil mnohem větší rozsah zpracování, nicméně v textu následuje alespoň stručný výtah základních metod měření.

V dnešní době je čím dál tím těžší klasifikovat, vysvětlit a změřit PM v dílčích částech výfukového systému vozidel. U motorových jednotek bez dodatečných emisních technologií byl ve výfukovém systému dominantní složkou PM elementární uhlík - EC, který v průběhu průchodu spalínovou cestou zkonduzoval na větší frakce, které se pak následně usazovaly jako saze [7], jež se z části samovolně zachycovaly ve spalínové cestě (převážně v tlumiči) a zbytek se dostal do ovzduší, kde se z velké části pro svou vyšší hmotnost usadil v okolí svého vzniku.

Optimalizací spalovacího procesu je dnes docíleno toho, že mnohem větší část částic prochází ve formě plynu nebo nanočástic i přes stěny DPF filtru a není tak možné zachytit je a odfiltrovat [9] a většina částic proto zůstává v troposféře a je unášena povětrnostními vlivy mimo místo svého vzniku. Z grafu (Obrázek 3-3) je patrný vliv DPF filtru na složení PM ve spalínách, na kterém je patrné, že před DPF filtrem jsou průměry frakcí PM o řád vyšší než za ním. Subjektivně se tedy sníží celková hmotnost PM, ale vzroste výsledný počet pevných částic – PN (z anglického „particle number“).

Z důvodů nukleace (vzniku krystalových zárodků v nasycené směsi), kondenzace v průběhu měření a značné proměnlivosti měřené směsi je velmi obtížné přesně a opakovatelně provádět měření poměrů hmotnosti, velikosti a počtu částic u spalín. I přes tato úskalí se klasifikovaly dvě základní metody měření, jedná se o suchý a mokrá princip [7]. Ve skutečnosti se pak používá kompromis mezi těmito gravimetrickými metodami měření koncentrace spalín.



Obrázek 3-3 Rozložení PM před DPF filtrem (červená křivka) a za ním (modrá křivka) [7]

V USA využívají metody založené na částečném ředění směsi a následném ochlazení, kde dojde k její částečné nukleaci a kondenzaci -> svými výsledky se blíží spíše mokré metodě. Naopak v Evropě je ředění směsi výrazně větší a metoda se blíží k suché variantě měření, proto se mohou výsledky emisí lišit ve prospěch evropských laboratoří.

3.3.1 Mokré měření

Mokré měření je založeno na přímém měření emisí, kde je měřena koncentrace PM v neředěné směsi emisí, která je v průběhu měření ochlazována a dochází tak k nukleaci a kondenzaci frakcí PM. Tato metoda měří za těch nejhorších emisních podmínek, koresponduje se situací, kdy je spalínová cesta studená (např. po nastartování motoru). Výsledkem tohoto testu jsou tak ve skutečnosti hodnoty, které nekorrespondují s normálními provozními podmínkami.

3.3.2 Suché měření

Naopak suché měření je prováděno tak, že se emisní směs naředí v takovém poměru, aby nebylo dosaženo nadkritické hustoty emisní směsi a nedocházelo tak k nukleaci a kondenzaci emisí v průběhu měření. Toto měření je přívětivější, co se konečných výsledků týče, avšak nezahrnuje všechny škodliviny, které se objevují ve formě aerosolů na výstupu výfukového potrubí, a obsahují i látky v kapalném skupenství zejména po nastartování vozidla [10].

3.3.3 Metoda kontinuálního sbírání vzorků a až následné vyhodnocení

Tato metoda je založena na kontinuálním rovnoměrném odebírání vzorků emisních plynů po celou dobu testovacího cyklu daného zátěžového testu. Následně je vyhodnocen objem PM jako jeho podíl na celkovém objemu emisí pomocí gravimetrické metody. Takto založené metody mají nevýhodu v tom, že PM není detekován ve skupenství, ve kterém opouští spalínovou cestu. Nicméně lze na druhou stranu konstatovat, že tím lze simulovat přechod spalin do rovnovážného stavu v atmosféře. Tato metoda bývá slangově označována jako „pytlová metoda“.

3.3.4 Metoda přímého určení složení emisí ve fázi aerosolu

Tato metoda je technicky mnohem náročnější než předchozí a obnáší kontinuální vyhodnocování proudu spalin ve formě aerosolu, který prochází měřicí aparaturou. V průběhu měření je kladen důraz na minimalizaci vnějších vlivů, to je výzva zejména pro návrh samotného měřicího zařízení. Například velikost částic je vyhodnocována z aerodynamického odporu vůči normálovému proudění definovaného plynu, vyhodnocují se změny v toku normálového plynu. Měření celkového objemu pevných částic není tak přesné jako měření pomocí gravimetrických metod, nicméně poskytuje informace o složení aerosolů, které nám gravimetrická metoda poskytnout nemůže. V praxi tak můžeme nalézt využití obou technik měření.

4 DPF filtry

Metod, jak dosáhnout snížení PM ve spalínách, je celá řada. Typ použité technologie závisí na konkrétním typu cílové aplikace, kde se musí zvážit mnoho provozních faktorů od teploty spalin přes jejich objem až po požadovanou výslednou účinnost filtrace; na základě těchto parametrů je pak možné vybrat co možná nejefektivnější metodu pro snížení emisí.

V automobilových aplikacích je návrh filtru omezen zejména rozměrem daného zařízení, a tak jsou dnes běžně používané DPF filtry rozměrově srovnatelné s klasickými tlumiči a katalyzátory, které jsou běžnou součástí výfukového systému vozidel. Dnešní OEM DPF filtry jsou složité komplexní systémy, které jsou provázány s řídicími systémy celého vozidla.

Většina dnes používaných DPF filtrů v automobilovém průmyslu funguje na principu mechanického filtru, ve kterém se zachycují pevné částice, které mají větší velikost, než je velikost průměrů samotné pórovitosti filtrů. Velké rozdíly jsou pak mezi různými typy materiálů, které jsou použité pro výrobu filtračního substrátu a jeho mechanické konstrukce a v neposlední řadě také v principu iniciace regenerace.

4.1 Regenerace DPF filtru pomocí oxidace

Saze zachycené v substrátech DPF filtrů podléhají chemickým dějům a pokud jsou splněny podmínky jako správná teplota a obsah chemických prvků ve spalínách, dojde k regeneraci DPF filtru. To znamená, že se pevný uhlík ve formě sazí přemění ideálně na oxid uhličitý pomocí volného kyslíku nebo oxidu dusičitého. Tento proces zmenšuje množství zachycených sazí ve filtru, nicméně ve filtru se usazuje popílek a jiné pevné částice (kovové částice z motoru aj.), tyto částice není možné z filtru za provozu odstranit a zaplňují tak postupně filtrační substrát. Tento jev má velký vliv na životnost DPF filtru, protože usazené částice ve filtru brání průchodu spalinám a zvětšují tak velikost zpětného tlaku ve výfukovém potrubí, který je hlavním diagnostickým parametrem správné funkce DPF filtru. Při překročení limitní úrovně zpětného tlaku musí být filtr vyměněn, jinak

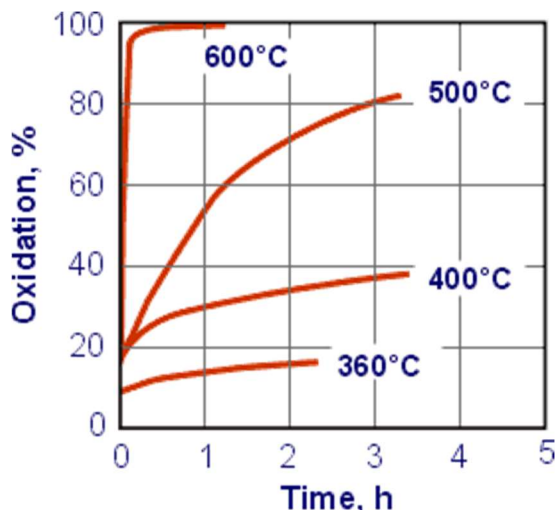
dochází ke zvýšené spotřebě paliva, namáhání motoru a v krajním případě může dojít až ke zničení motorové jednotky. Více o podmínkách správné funkce DPF filtru v kapitole 5.

4.1.1 Oxidace za pomoci kyslíku

Volný kyslík je obsažen ve výfukových plynech v podstatě za každých podmínek, které mohou v dieselovém motoru nastat. Nicméně aby mohla oxidace pomocí kyslíku (hoření), tedy regenerace, započít, je potřeba, aby bylo dosaženo optimálních provozních podmínek a to zejména u teploty spalin. Části PM zachycenou v DPF filtru, kterou lze tímto způsobem regenerovat, jsou pouze saze. Pokud je dosaženo správné teploty a v emisních plynech je dostatečné množství volného kyslíku, probíhá hoření podle rovnice (4.1) a na výstupu je oxid uhličitý. Pokud však podmínky nejsou optimální, tak dochází k nedokonalému spalování sazí dle rovnice (4.2) a na výstupu je pak velmi jedovatý plyn oxid uhelnatý. Ve skutečnosti probíhají obě reakce a podmínky ve výfuku ovlivňuje pouze jejich poměrné rozdělení.



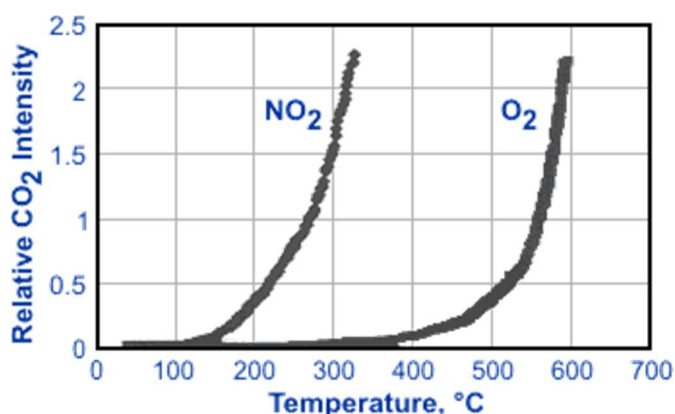
V grafu níže je zachyceno, jaké poměrné množství sazí (oxidovatelných pevných částic) je zredukováno při různých provozních teplotách regeneračního proudu spalin s dostatečným obsahem volného kyslíku [11]. Z grafu (Obrázek 4-1) je patrné, že k dosažení úspěšné rychlé regenerace DPF filtru musí přesáhnout teplota spalin hranici 600 °C. Ideálně se pak saze redukují při teplotách atakujících hranici 700 °C. Pod těmito úrovněmi teplot je pak regenerace velmi pomalým dějem, který není dostatečný pro regeneraci usazených sazí v DPF filtru. Ovšem DPF filtr se může za těchto nižších teplot dostat do rovnovážného stavu, kdy se již nezaplňuje sazemi, které tak stíhají kontinuálně dohořívát ještě před samotným dosažením DPF filtru – jedná se o tzv. dohořívání ve spalinové cestě. Při takovýchto teplotách je však enormně namáhán samotný motor i výfukový systém, v praxi není žádoucí, aby byl motor běžně za takovýchto teplot v provozu.



Obrázek 4-1 Graf efektivní oxidace sazí při různých teplotách [11]

Při zkoumání samotného hoření sazí v závislosti na teplotě byl pozorován zajímavý fakt [11], že zhruba 10–25 % usazených sazí shoří mnohem rychleji (intenzivněji) nežli jejich poměrný zbytek. Tento jev je vysvětlován tím, že saze mají složitou povrchovou strukturu, při iniciaci hoření je povrch těchto PM frakcí mnohem větší a po jejich odhoření již není povrch, který je schopen hořet, tak veliký a navíc se obaluje popílkem, který také zpomaluje tento proces. Z tohoto poznatku vyplývá doporučení pro strategie regenerací DPF filtrů, kde je násobně snazší zregenerovat částečně zaplněný filtr oproti filtru již téměř zanesenému.

4.1.2 Oxidace za pomoci oxidu dusičitého



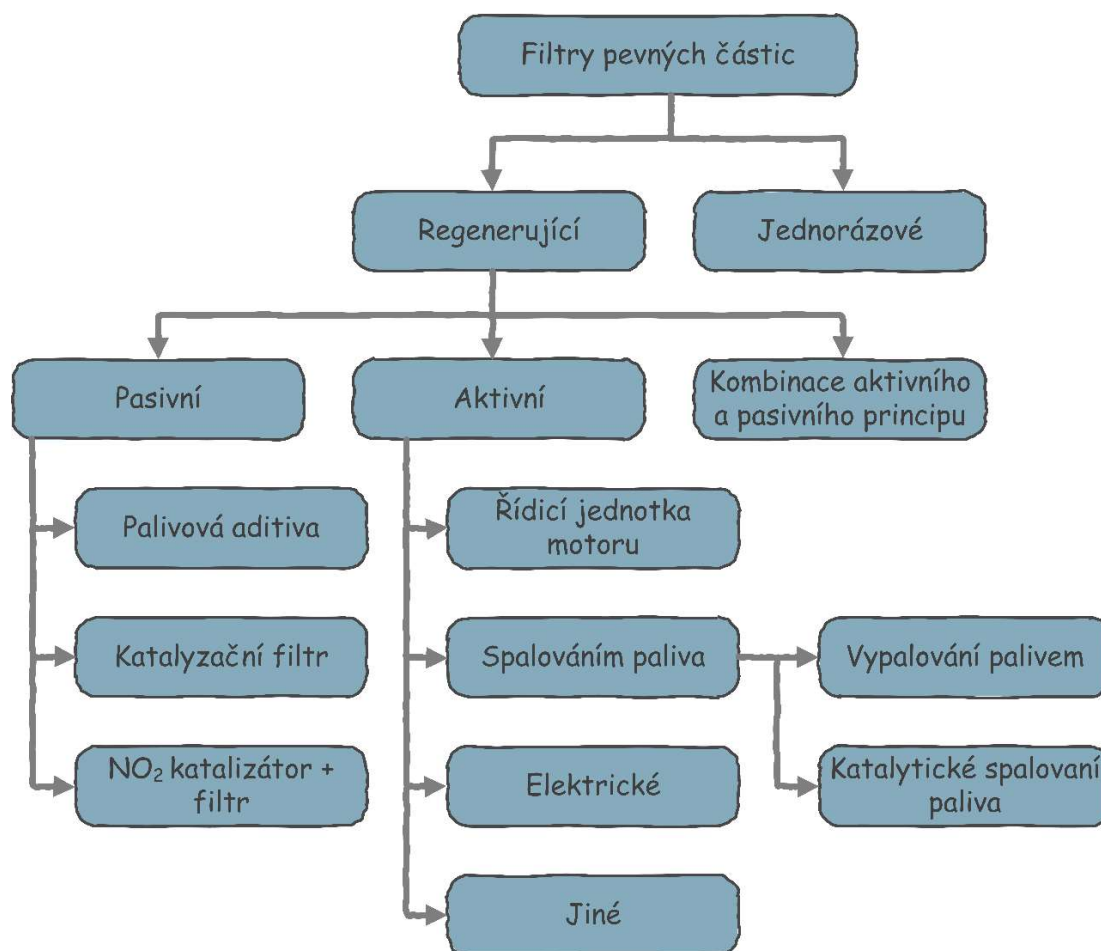
Obrázek 4-2 Intenzita oxidace dle objemu CO₂ na výstupu výfukového potrubí při současném konstantním objemu NO₂ a O₂ ve spalinách při kontinuální změně teploty spalin [11]

Efektivitu redukce sazí v DPF filtru při nižších teplotách je možné zlepšit pomocí oxidu dusičitého – NO₂, který je silnější oxidant nežli volný kyslík a významně redukuje usazené saze již při teplotách kolem 250 °C. To je oproti 550 °C, které je nutné dosáhnout

pro oxidaci kyslíkem, značné zlepšení [11]. Tato teplotní závislost je pro obě látky vynesena v grafu (Obrázek 4-2).

Nevýhoda tohoto principu spočívá v tom, že musí být ve spalinách zajištěno dostatečné množství NO_2 , ale ten se u běžného motoru vyskytuje pouze v malém množství. Proto musí být ve spalinové cestě před samotným DPF filtrem umístěn jeho zdroj. Takovým zdrojem může být například oxidační katalyzátor, kde dochází k přeměně NO na NO_2 (více v kapitole 4.4).

4.2 Dělení DPF filtrů



Obrázek 4-3 Rozdělení jednotlivých typů filtrů pevných částic

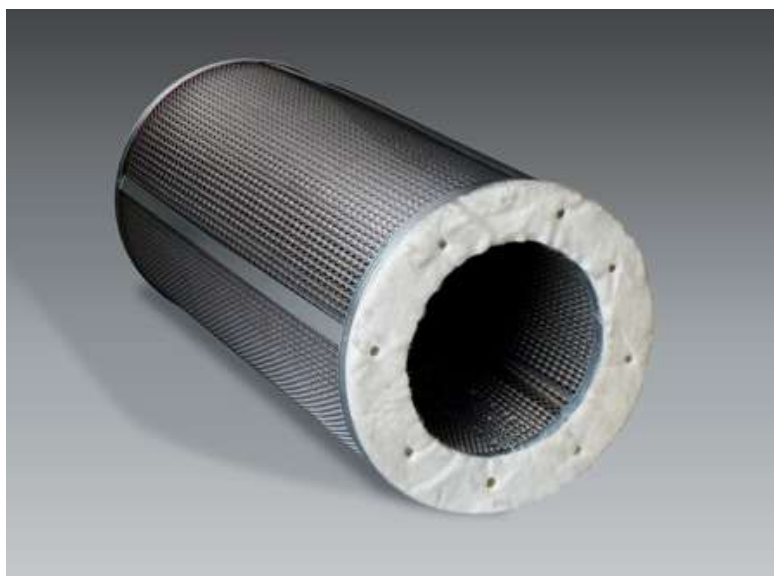
Dělení DPF filtrů do skupin je obtížné, protože se vzájemně překrývají principy jejich fungování. Lze je rozdělit do dvou hlavních kategorií: filtry, které umožňují regeneraci zachycených sazí, a jednorázové filtry čili filtry na jedno použití. DPF filtry schopné regenerace je možné dále rozlišit podle principu jejich regenerace na dvě (tři) skupiny; pasivní - filtr regeneruje samovolně za běžných podmínek ve výfukovém systému; aktivní - filtr potřebuje ke své regeneraci nebo její iniciaci externí zdroj energie (většinou ve formě

dodaného tepla). Třetí kategorií je kombinace obou předchozích při zohlednění všech dějů, které mohou probíhat ve výfukovém systému; do této kategorie spadá většina dnes průmyslově vyráběných filtrů.

V digramu (Obrázek 4-3) je uvedeno stručné základní rozdělení DPF filtrů podle jejich principu regenerace respektující předchozí výčet základních poznávacích znaků jednotlivých skupin.

4.3 Jednorázové DPF filtry

Tento typ filtru má konstrukci podobnou klasickému vzduchovému filtru z tepelně odolnějších materiálů jako skelná tkanina nebo metalická vlna [12]. Je vhodný pro aplikace, kde není motor zatěžován dlouhodobým provozem nebo konstrukce stroje neumožňuje využití dostupných technologií schopných regenerace zejména z důvodu optimalizace pohonné jednotky a z toho plynoucí nízké teploty spalin. Oblastí nasazení těchto filtrů jsou tak zejména stacionární motory, které slouží jako pohon pro generátory elektrické energie. Tyto pohonné jednotky jsou navrženy na provoz při konstantních otáčkách a pracovní cyklus motoru je tak možné velmi přesně vyladit na co možná nejvyšší výkon při současném ohledu na minimalizaci emisí a teplotního namáhání celé pohonné jednotky.



Obrázek 4-4 Jednorázový DPF filtr firmy Blackthorn [13]

Tato technologie je též vhodná pro retrofitting (dovybavení stávajícího zařízení o novou technologii), kdy je možné při nízkých nákladech dosáhnout účinnosti až kolem 85 % [13]. Implementace filtru do stávajícího zařízení spočívá pouze v zařazení filtru do spalinové cesty, ve většině případů se z důvodu co nejnižšího teplotního namáhání

instaluje na jeho konec. Hlavní výhodou je, že systém může být bez jakékoliv elektroniky. Stačí pouze vypočítat maximální dobu provozu filtru na základě emisí motoru a kapacity DPF filtru. Za dodržení tohoto servisního intervalu je pak ovšem zodpovědná obsluha zařízení, to může být v některých aplikacích problematické, a proto existují verze, kdy je systém dovybaven měřením zpětného tlaku. Ten je schopen vyhodnotit zaplnění filtru a včas upozornit obsluhu na nutnost jeho výměny. Pokud je implementace elektronického systému provedena s větším impaktem do samotného řízení motorové jednotky, je možné omezit její chod, aby nedošlo k jejímu poškození vysokým zpětným tlakem.

Tento filtr je řešením pro retrofitting zařízení v případě, že stávající motor nespĺňuje pouze přísnější emisní limity a je tak možné za velmi nízké vstupní náklady modernizovat stávající zařízení a vyhovět tak novým emisním specifikacím.

4.4 Pasivní princip regenerace

Jak již bylo zmíněno v textu výše, tyto typy filtrů regenerují ve výfukovém systému za běžného provozu pouze při optimálních podmínkách. Regenerace samotného DPF filtru je založena na dvou základních typech oxidací (hoření), které jsou vysvětleny v kapitole (4.1 Regenerace DPF filtru pomocí oxidace).

Hlavním podmiňujícím faktorem pro iniciaci pasivní regenerace je teplota spalin, která je přímo odvislá od aktuálního jízdního profilu a značně odlišná pro jízdu v městské aglomeraci oproti jízdě na dálnici, kde jsou teploty ve spalinách mnohem vyšší. Tuto největší nevýhodu pasivních filtrů lze částečně kompenzovat pomocí následujících přístupů: palivová aditiva, katalyzátor a CRT systém. Pak je možné dosáhnout pasivní regenerace při teplotách kolem 250–300 °C [14].

Avšak ani tyto podmínky a zlepšující opatření neodstraní nedostatek tohoto způsobu regenerace, a to přímou závislost na samotném řidiči. Ten má sice k dispozici informační systém vozidla, který ho upozorní na nezbytnost zvýšení teploty spalin, nicméně realizace je závislá pouze na jeho vůli a okolních podmínkách (těžko zvýšíte teplotu ve spalinách, pokud právě stojíte v koloně vozidel). Dnešní řídicí systémy těchto filtrů mohou ovlivnit chod motoru tak, aby minimalizovaly případné škody způsobené zaplněným filtrem, zejména omezením výkonu motoru.

4.4.1 Palivová aditiva – FBC

Palivová aditiva jsou dnes využívanou metodou jak u pasivních, tak aktivních DPF filtrů. Jejich účelem je mimo jiné snížit iniciační teplotu vznícení usazených sazí. Jako aditiva se využívají materiály baryum, vápník, železo, cer, měď, platina, mangan aj. Tato aditiva fungují ve dvou fázích. Aditivum jednak zlepšuje průběh samotného spalovacího procesu, kde přímo snižuje produkci škodlivých emisí PM o 30–40 % a snižuje spotřebu až o 10 % u starších motorů, u novějších tento vliv není tak výrazný [15]. A také se dostává spolu s PM do samotného DPF filtru, kde pak zafunguje jako katalyzátor a regenerace probíhá již od teplot kolem 250 °C.

Systémy FBC fungují tak, že po natankování vozidla je vyhodnoceno množství potřebného aditiva, které je pak následně injektováno do palivové nádrže ze zásobníku, který je nutné též pravidelně doplňovat předepsanými aditivami.

4.4.2 Katalyzátor jako součást DPF filtru

Další možností snížení iniciační teploty za pomoci katalyzátorů je jejich potažení přímo na substrát DPF filtru. Jedná se o často používanou metodu, která je striktně limitována obsahem síry v palivu, jejíž frakce ve spalínách způsobují poškození katalytické vrstvy.

V praxi se používá katalytický potah s proměnnou hustotou, to znamená, že na vstupu DPF filtru je koncentrace katalyzátoru nejvyšší a dále se snižuje. Důvodem je potlačení rychlého průběhu regenerace, která by způsobila až roztavení nosného materiálu DPF filtru, který má teplotu tání vyšší než 1400 °C.

4.4.3 NO₂ katalyzátor s DPF filtrem - CRT

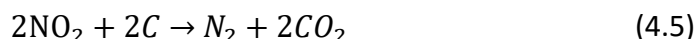
„Continuously Regenerating Technology“ – CRT je obchodní označení filtru pevných částic firmy Johnson Matthey, využívajícího k redukci PM emise NO₂. Tento filtr je velmi zajímavý svými provozními podmínkami, kde redukce zachycených sazí probíhá již při teplotách kolem 275 °C. Nevýhodou tohoto typu filtru je jeho náchylnost na obsah síry

v palivu, který nesmí překročit hranici 3 ppm, za kterou již dochází k omezení funkčnosti systému [14].

Základním požadavkem pro provoz filtru podle rovnic (4.4) a (4.5) je dostatečný poměr PM/NO_x ve spalinách. Bohužel produkce těchto emisních složek je podmíněna samotným nastavením motoru a není možné ji přímo řídit.

Funkce tohoto DPF filtru je založena na dvou chemických dějích. První probíhá v oxidačním katalyzátoru před samotným částicovým filtrem, zde dochází k reakci oxidu dusnatého (NO) s volným kyslíkem (O₂) a výsledkem je produkce oxidu dusičitého (NO₂) rovnice (4.3). V samotném částicovém filtru pak reaguje oxid dusičitý s uhlíkem a dojde k přeměně zpět na oxid dusnatý a oxid uhelnatý (CO). Tím dochází k úbytku zachycených sazí v částicovém filtru.

Nevýhodou těchto chemických reakcí je produkce NO a CO, která je popsána v rovnici (4.4). Za ideálních podmínek by bylo možné dosáhnout reakce dle rovnice (4.5), kde by na výstupu byly pouze CO₂ a N₂. Tento cíl je výzvou pro další vývoj filtrů tohoto typu, kde se k ovlivnění průběhu chemických reakcí využívají různá katalytická potažení samotného DPF filtru [14].



4.5 Aktivní regenerace

Princip „aktivní regenerace“ je zcela odlišným přístupem k dané problematice. Vyznačuje se tím, že fáze regenerace je cíleně vyvolána a řízena podle podmínek regenerační strategie daného výrobce. K iniciování aktivní regenerace je nezbytný přídatný zdroj energie, v automobilních aplikacích se nabízejí dva lehce dostupné typy: palivo a elektrická energie. Hlavní výhodou tohoto přístupu oproti pasivním metodám je možnost provádět regeneraci DPF filtru, v ideálním případě za jakýchkoli teplotních podmínek ve výfuku, a tím mít možnost přímé kontroly nad objemem zachycených sazí. Různé systémy se pak liší rozsahem provozních podmínek, za kterých jsou schopné provozu. Nicméně každá aktivní metoda znamená značný zásah buď do samotné zástavby

vozidla (přidání dodatečných systémů) nebo značnou úpravu již stávajících řídicích prvků (úprava softwaru v řídicích jednotkách vozidla).

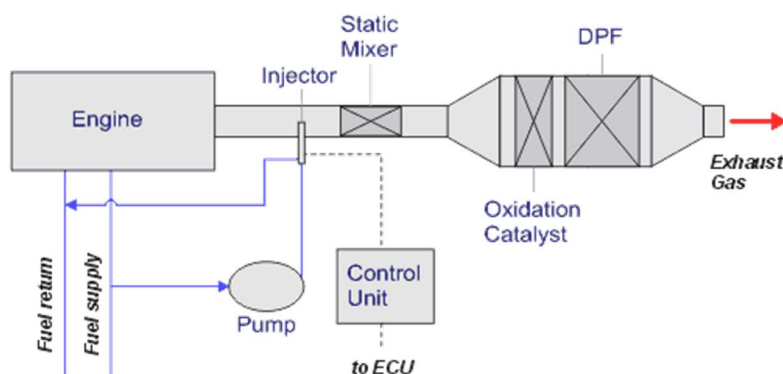
4.5.1 Řídicí jednotka motoru

Nejrozšířenější aktivní systémy využívají palivo jako zdroj pro zvýšení teploty DPF filtru. Dnes nejčastěji používaným principem u nových vozidel je využití možnosti změn v časování vstřikování paliva (tzv. „dostřik“) až do motorové fáze „výfuku“. To zapříčiní, že se nespálené palivo dostane až do výfukového systému, kde je při dostatečné okolní teplotě dodatečně spáleno, což zapříčiní další zvýšení teploty spalin. Pokud je dosaženo minimální iniciační teploty pro regeneraci, tak následně dojde ke spálení usazených sazí „regenerace DPF filtru“. Tento princip je, co se týče impaktu do zástavby vozidla, minimální a funkčnost systému je pouze otázkou firmwaru řídicí jednotky motoru.

Řídicí jednotka motoru může ovlivňovat i jiné systémy vozidla k dosažení vyšších teplot spalin, nicméně jejich vliv je omezený a značně závislý na stavu aktuálních provozních podmínek vozidla. Zde je jejich stručný výčet:

- Změna mapy pokrytí RPM motoru a množstvím vstřikovaného paliva
- Změna nastavení EGR ventilu
- Změna parametrů lopatek u turbodmychadla
- Překlenutí chladiče vstupního vzduchu za turbodmychadlem

4.5.2 Katalytické spalování paliva



Obrázek 4-5 Schéma katalytického spalování paliva k iniciaci regenerace DPF filtru [16]

Lepší možnost kontroly nad iniciací regenerace představuje katalytické spalování paliva. To je založeno na vstřiku paliva před samotný DPF filtr, před kterým je navíc ještě umístěn DOC katalyzátor. Ten iniciuje hoření tohoto paliva již od teplot kolem 250 °C

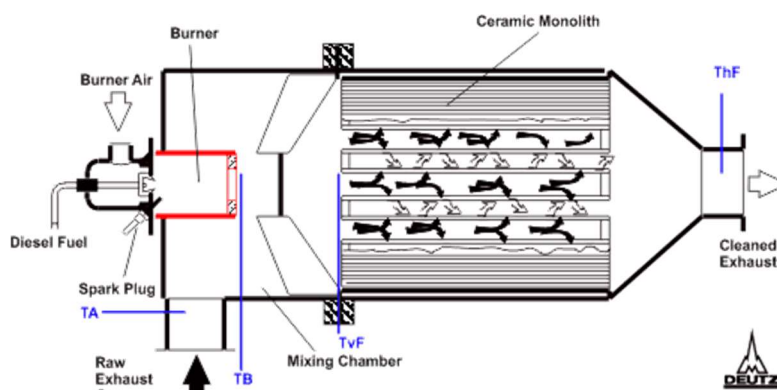
těsně před samotným substrátem DPF filtru a nedochází tak k výrazným tepelným ztrátám. Základní schéma tohoto systému je zachyceno na obrázku níže.

To je hlavní výhodou oproti předchozímu systému, kde dochází k hoření paliva již při samotném vstupu spalin do výfukového systému a tedy k jejich postupnému chladnutí.

4.5.3 Přímé spalování paliva

Další možností využití paliva je jeho přímé spalování ve výfukovém systému, to obnáší instalaci složitějšího systému s palivovou tryskou a spalovací komorou umístěnou přímo ve výfukovém potrubí. Schéma celého systému je zachyceno na obrázku níže.

Výhodou oproti předchozímu řešení je to, že může být umístěn až za DOC, tím se omezí pokles teploty průchodem dlouhé spalinové cesty a generace dalších emisních látek (NO_x, HC, dioxiny aj.). Tento typ je rozšířený zejména u nákladních automobilů, kde není tak limitující cena zařízení a na vozidle je větší prostor k zástavbě.



Obrázek 4-6 Schéma přímého spalování paliva k iniciaci regenerace DPF filtru [16]

4.5.4 Elektrická regenerace

Elektrická regenerace využívá pro dosažení iniciační teploty oxidace sazí volným kyslíkem elektrickou energii, mezi obecně rozšířené metody patří: vyhřívání substrátu, mikrovlnný ohřev a předeřívání vzduchu/emisních plynů.

- Vyhřívání substrátu – téma této práce, podrobně zpracováno v dalším textu
- Mikrovlnný ohřev

K ohřevu sazí se využívá mikrovlnné záření o frekvenčním rozsahu 500 MHz až 100 GHz. Je možné využít magnetron jak k ohřevu samotného filtračního substrátu, tak i samotných sazí, které mají permitivitu vhodnou k tomuto účelu.

Tento způsob má výhodu v poměrně jednoduchém principu své funkce, nicméně v průběhu vývoje bylo krajně problematické rozložení generovaného tepla, které je závislé na velikosti jednotlivých frakcí zachycených PM. To způsobovalo poruchu integrity filtračního materiálu a následného nekontrolovatelného úniku PM do ovzduší.

Dalším značným problémem byla indukce nežádoucí elektrické energie do okolí (karoserie vozidla aj.), která interagovala s elektronickým vybavením vozidla a vedla k útlumu vývoje tohoto druhu DPF filtrů, který dosahoval svého vrcholu na přelomu tisíciletí [17].

- Předehřívání vzduchu/emisích plynů

Tento princip je založen na předehřevu plynů před samotným filtračním substrátem. Je realizován elektrickou topnou spirálou, která ohřívá proud plynů jím procházejících.

Tato metoda je velmi jednoduchá, ale vzhledem k teplotám, které je nutné dosáhnout k iniciaci regenerace, je nemožné použít tento systém k regeneraci za jízdy vozidla. Energie, která by byla nutná k ohřevu celého objemu spalin, přesahuje možnosti elektrické energie v palubní síti běžného vozidla.

Z těchto důvodů našla tato technologie uplatnění v segmentech trhu, kde není nezbytný dlouhodobý provoz filtru pod zatížením. Uplatnily se dvě základní technologie, kde jedna spočívá v napojení vozidla na elektrickou síť, která pak slouží jako zdroj pro topnou spirálu, a druhá spočívá v demontáži samotného filtru, který se následně umístí do regeneračního přípravku mimo vozidlo. V aplikacích pro nákladní vozidla a autobusy jsou tyto technologie nevyužitelné.

5 Podmínky provozu DPF filtrů

Pro samotný návrh DPF filtru je nezbytné zhodnotit základní požadavky, parametry a dopady, které bude mít samotný filtr na vozidlo. Samozřejmě není možné navrhnout dokonalý systém, a tak je výsledné zařízení vždy určitým kompromisem. V seznamu uvedeném níže je výčet základních bodů, které je nutné vzít v potaz při samotném návrhu filtru.

- Schopnosti filtrace PM z proudu spalin
 - Efektivita filtrace PM
 - Odolnost proti sirným frakcím
 - Průchodnost částic s aerodynamickým průměrem menším než 100 nm
 - Celkový numerický součet PM udávaný jako PN
- Sekundární redukce ostatních emisí (CO, HC, NO_x ...)
- Zamezení zhoršení ostatních emisních složek
 - Zvýšení ostatních plyných emisí (CO, HC, NO_x ...)
 - Vytváření nových emisních frakcí (dioxiny aj.)
 - Únik popílku do ovzduší
- Co nejmenší zpětný tlak
- Co nejmenší zvýšení spotřeby
- Co nejvyšší spolehlivost a životnost
- Co nejmenší požadavky na údržbu (rozsah, nízké servisní intervaly)
- Co nejmenší impakt do zástavby vozidla (mechanický, elektronický a softwarový)
- Pokud možno žádné zhoršení bezpečnostních parametrů vozidla (zejména možnost vzniku požáru)
- Minimalizace nákladů emisních technologií do koncové ceny produktu
 - Pořizovací náklady
 - Náklady na údržbu

Na základě dlouhodobých zkušeností ostatních výrobců/návrhářů jsou podmínkou k úspěchu produktu na trhu tyto tři parametry [14]:

- Kontrolovaná regenerace

Je jedním z klíčových požadavků na nový systém. Těch stávajících, které jsou závislé na aktuálních podmínkách, již bylo navrženo mnoho, a proto je zásadní, aby byl nový systém schopen provést kontrolovanou regeneraci pokud možno za jakýchkoliv podmínek (hmotnostní průtok spalin a jejich teplota). Pokud systém nebude splňovat tento požadavek, tak je prakticky nemožné komerční nasazení na trhu s DPF filtry, který je dosavadními technologiemi již pokryt. Z tohoto důvodu je to jeden ze základních požadavků navrhovaného systému.

- Dopad na celkovou spotřebu vozidla

V dnešní době se nesledují jenom samotné emise vozidla, ale také jeho celková spotřeba, a proto by regenerace filtru měla mít minimální dopad na tento vypovídající parametr o vozidle.

- Možnosti odstranění zachyceného popílku

Protože popílek je nedílnou součástí PM, kterou nelze zregenerovat, je nezbytné při návrhu designu počítat s jeho usazováním v rámci DPF filtru. Ve své podstatě je usazený popílek základním limitujícím faktorem životnosti celého DPF filtru. Z toho důvodu existují filtry, které mají buď dostatečnou kapacitu pro jeho uskladnění (srovnatelnou s životností vozidla), nebo je vyřešeno jeho mechanické odstranění, které má ekonomicky akceptovatelný dopad na provozní náklady filtru. Jelikož jedním z majoritních zdrojů emisí PM jsou olejové náplně vozidla, tak jsou dnes kladeny velké požadavky na dodavatele maziv, aby byla zátěž PM co možná nejmenší.

5.1 Rovnovážný stav

Aktuální stav DPF filtru na základě akumulace PM se nechá rozdělit do třech fází: akumulace, rovnováha a regenerace. Tyto stavy plynou z rovnice (5.1), ve které je vyjádřen vztah akumulace PM a jejich regenerace. Akumulace/zachytávání PM je vyjádřena účinností odloučení PM z průtoku spalin a regeneračním koeficientem

vztaženým k teplotě spalin. Z derivace celkové akumulace PM v čase lze rozhodnout, ve které fázi se DPF filtr nachází:

1. Akumulační - $dPM/dt > 0$
2. Rovnovážný - $dPM/dt = 0$
3. Regenerační - $dPM/dt < 0$

Tyto stavy lze detekovat pomocí měření velikosti zpětného tlaku v závislosti na hmotnostním průtoku spalin. Pro mou práci je určení úrovně zaplnění DPF filtru jedním z klíčových parametrů, a proto je mu věnována kapitola 9 Metody autonomie ERDPF systému.

$$\frac{dPM}{dt} = \frac{e_F}{100} * m - PM * k(T) \quad (5.1)$$

- ~ PM [g] - celková hmotnost zachycených sazí
- ~ t [s] - čas
- ~ k(T) [s⁻¹] - poměr regenerace PM
- ~ T [°C] - teplota
- ~ e_F [%] - efektivita zachycení PM v DPF filtru
- ~ m [g*s⁻¹] - hmotnostní průtok spalin

5.2 Maximální hodnoty zpětného tlaku

Důležitou částí řešení podmínek provozu motorových jednotek je hodnota zpětného tlaku na výstupu z motoru. Z hlediska návrhu a dimenzování jak mechanické části DPF filtrů, tak i z hlediska elektronického je důležité pokrýt senzorkým měřením celý rozsah možných provozních zpětných tlaků ve výfukové soustavě. Zpětný tlak má významný vliv na spotřebu paliva a v neposlední řadě také na mechanické namáhání motoru. V tabulce (Tabulka 5) jsou uvedeny doporučené rozsahy maximálních přípustných tlaků pro dané výkonnostní skupiny motorových jednotek. Při překročení těchto hodnot může v krajním případě dojít k poškození DPF filtru nebo i motoru.

Výkon motoru [kW]	Maximální přípustný tlak [kPa]
< 50	40
50-500	20
>500	10

Tabulka 5 Doporučené maximální hodnoty zpětného tlaku [18]

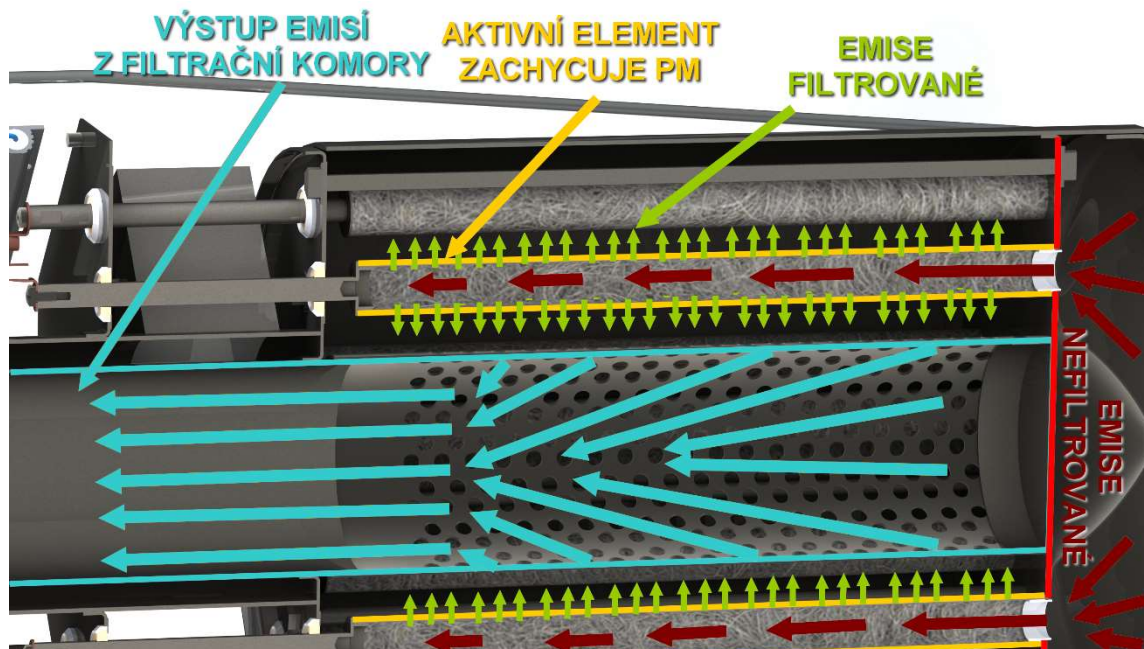
6 Vyhřívání substrátu – ERDPF metoda

Princip elektrické regenerace je založen, stejně jako ostatní metody DPF filtrů, na oxidaci zachycených sazí ve filtračním médiu. V ERDPF filtru se k tomuto účelu využívají tzv. aktivní elementy (AE) ve tvaru dutého válce (Obrázek 6-1), které jsou tvořeny z metalických vláken a nosné mřížky. Tyto AE mohou být vyrobeny v různé délce (350–150 mm), která tak přímo definuje jejich elektrický odpor.



Obrázek 6-1 Aktivní element (AE) zachytává PM a v průběhu iniciace regenerace funguje jako tepelný zdroj

Celý ERDPF filtr je složen z více AE, jejich počet je odvozen od výkonu motoru, na který má být filtr nainstalován (Obrázek 6-2). Vstupující spaliny jsou přepážkami nasměrovány do otevřených konců aktivních elementů (rudé šipky). PM jsou následně zachytávány mezi jednotlivými metalickými vlákny (zelené šipky), tím se zaplňuje volný objem AE a zvyšuje se kladený odpor průchodu spalinám - klasický princip mechanického filtru. Vyfiltrované spaliny pak prochází komorou aktivních elementů a odchází výfukovým potrubím pryč z ERDPF filtru (modré šipky).



Obrázek 6-2 Schéma principu filtrace spalin pomocí aktivních elementů

Od ostatních typů DPF filtrů se ERDPF nejvíce odlišuje způsobem, jakým je dosahováno iniciační teploty usazených PM frakcí. To je realizováno pomocí průchodu elektrického proudu samotným konduktivním filtračním materiálem aktivního elementu, který má elektrický odpor cca 45 mΩ při délce AE 350 mm. Při průchodu elektrického proudu dochází k jeho ohřívání (zdroj tepelné energie). Po dosažení iniciační teploty (650 °C) dochází k aktivní regeneraci zachycených PM frakcí v těle AE a jejich shořením.

Princip přívodu energie k aktivnímu elementu je zachycen na obrázku (Obrázek 6-3) s využitím elektronického systému 24V ERDPF V2. Konkrétní jeden AE je připojen k výstupu hlavního modulu pomocí jednoho ze tří spínačů v některém sekundárním modulu. Systém je navržen tak, aby vydržel krátkodobé zatížení maximálním proudem o hodnotě až 1000 A



Obrázek 6-3 Znárodnění proudové regenerační smyčky - zahřívání aktivního elementu pomocí 24V ERDPF V2

6.1 Počáteční stav a inovační podněty ERDPF projektu

6.1.1 Výchozí stav projektu

Vývoj ERDPF filtrů byl předmětem výzkumu v rámci projektu s názvem „Aktivní uzavřené filtry pevných částic pro dieselové motory s elektrickým systémem regenerace“ řešeném ve spolupráci s komerčními partnery Autometal, spol. s r.o. a Tesla Blatná, a.s. V rámci tohoto projektu se udělal významný pokrok v této oblasti, nicméně projekt byl zacílen na aplikace s 12V napájením, které vzhledem k rezistivitě aktivních elementů

neposkytuje dostatečný výkon pro aktivní regeneraci při současně nepříznivých podmínkách panujících ve výfuku (nízká teplota a velký hmotnostní průtok spalin).

Největším přínosem projektu bylo ověření funkčnosti a realizovatelnosti celé koncepce filtru s elektrickými aktivními elementy, kde bylo nutné vyřešit mnoho technických problémů, například rozdílnou tepelnou roztažnost filtračního materiálu a těla samotného ERDPF filtru a s tím spojené obtížné napojení výkonového přívodu elektrické energie do jednotlivých aktivních elementů. Samostatnou kapitolou pak bylo ověření funkčnosti filtrace PM aktivními elementy, která byla ověřena pomocí měření v certifikovaných laboratořích TÜV.

6.1.2 Začátek participace na projektu

Má práce na tomto projektu započala současně s koncem mého magisterského studia. Zpočátku jsem se věnoval ověřování vyhodnocovacího algoritmu zaplnění DPF filtru závěrečné fáze řešení výše zmíněného MPO projektu. V rámci testování algoritmu na vozidle Mitsubishi Grandis, které bylo vybaveno ERDPF filtrem pevných částic se čtyřmi aktivními elementy, jsem najezdil tisíce kilometrů testovacích jízd. Během testování byly odhaleny některé nedostatky stávajícího řešení, ze kterých vyplynuly podklady pro další směřování vývoje DPF filtru s aktivní regenerací.

6.1.3 Detekce zaplnění DPF filtru

Počáteční aktivity byly zaměřeny na testování již vyvinutého algoritmu na detekci zaplnění filtru a kalibrace rozhodných limitních zpětných tlaků pro iniciaci aktivní regenerace. Původní algoritmus pracoval s myšlenkou striktního rozdělení výkonu motoru do několika pásem podle aktuálního výkonu motoru odhadovaného dle rozdílných tlaků na definovaném zúžení potrubí ve spalinové cestě – využití principu Venturiho trubice. Nezávislá detekce aktuálního zatížení motoru je jedním ze stěžejních parametrů celého projektu, protože systém má být zcela nezávislý na datech z řídicích jednotek vozidla. To umožňuje velmi snadnou implementaci ERDPF filtru do stávajícího výfukového systému a projekt tak cílí do oblasti produktů vhodných pro retrofitting.

V průběhu vyhodnocování bylo zjištěno, že metoda detekce zaplnění ERDPF filtru je sice funkční, nicméně není optimální, protože je silně závislá na jízdním profilu vozidla, potažmo stylu jízdy každého řidiče. V rámci evaluace algoritmu vyvstaly pochybnosti

nad univerzálností tohoto řešení pro jiná vozidla. Následně jsem inicioval nový směr ve vývoji, který je založen na kontinuálním vyhodnocování vztahu zpětného tlaku (P_{DPF}) vůči ekvivalentu hmotnostního průtoku (P_{VT}). Byl tak započat vývoj zcela nových metod detekce zaplnění ERDPF filtru. Klíčovým požadavkem byla právě schopnost poskytovat kontinuální informaci o aktuální stavu zaplnění DPF filtru PM frakcemi za jakýchkoliv provozních podmínek zatížení motoru.

Od samého počátku jsem cílil na návrh univerzálního řešení, které by bylo použitelné v rozdílných aplikacích pro různé výkonové škály motorových jednotek. Tato metoda je popsána v kapitole (9.2 Metoda autonomní inicializace).

6.1.4 Navýšení tepelného výkonu aktivních elementů

Během testování vozidla v reálném provozu bylo odhaleno, že aktuální tepelný výkon aktivních elementů je velmi limitující pro iniciaci aktivní regenerace během jízdy vozidla. Systém byl navržen s tím, že v průběhu aktivní regenerace přejde vozidlo do klidového režimu při volnoběžných otáčkách po dobu přibližně dvaceti sekund pro regeneraci jednoho aktivního elementu. To nijak zásadně neomezuje využití filtru, nicméně to vyžaduje kooperaci systému s řidičem přes dodatečný uživatelský interface, který řidiče na tento požadavek upozorní a řidič musí následně tuto výzvu reflektovat, aby nedošlo k poškození filtru nebo motoru.

Tato jeho vlastnost se mi nejevila jako optimální. Původní systém byl 12V, to spolu s vnitřní rezistivitou aktivních elementů limituje maximální možný tepelný výkon. Chtěl jsem vyzkoušet 24V napájení, které by zvedlo výkon přibližně čtyřnásobně. Nicméně znamenalo by to kompletně předělat celý návrh elektronického systému a navíc nebylo jisté, zda zvýšení tepelného výkonu neovlivní životnost aktivních elementů.

I přesto byla tato konfigurace 24V napájení zdárně otestována v laboratorních podmínkách, nicméně současně byly potvrzeny obavy o proveditelnosti tohoto záměru. Z testů vyplynulo, že aktivní element je schopen opakovaně odolávat teplotnímu namáhání, nicméně při překročení kritického teplotního bodu dojde k nenávratnému poškození metalické vlny, která tvoří filtrační médium AE.

Tato myšlenka 24V napájení uvozuje počátek mé práce na vývoji nového elektronického systému řízení ERDPF filtrů.

6.1.5 Modulární elektronický systém

V průběhu vývoje nové elektroniky byl ERDPF systém nabízen potencionálním zákazníkům s původním 12V elektronickým řešením. To mi umožnilo seznámit se s různorodostí potenciálních aplikací ERDPF filtrů, díky tomu mi přišel stávající systém velmi limitující svou invariabilitou. Elektronický systém byl navržen pro obsluhu čtyř aktivních elementů a neimplementoval možnost jejich rozšíření o další aktivní elementy.

Na základě těchto poznatků jsem inicioval myšlenku, která spočívala v novém návrhu modulárního stavebnicového systému, který by umožnil pokrytí většiny výkonnostních profilů diesellových motorových jednotek.

Nový návrh elektronického systému mi pak umožnil zpracovat myšlenku autonomního systému automatické inicializace mechanického uspořádání ERDPF filtru, která je rozebrána v kapitole (9.2). Samotný elektronický systém je pak popsán v kapitole (8 Elektronický systém 24V ERDPF V2).

6.2 Metody odhadu schopnosti dosažení iniciační teploty

Zásadním parametrem nového kvalitního návrhu ERDPF filtru je schopnost dosažení iniciační teploty aktivního elementu. Jak bylo objasněno v kapitole (4.1.1 Oxidace za pomoci kyslíku), tak hodnota teploty, kterou musí být schopen systém vyvinout, je minimálně 600–700 °C. Do samotného procesu ohřívání aktivního elementu zasahuje mnoho vnějších vlivů, mezi ty hlavní patří: aktuální teplota spalin, aktuální hmotnostní průtok spalin, hodnota regeneračního proudu a samotná vnitřní rezistivita aktivního elementu.

Aby bylo možné exaktně odhadnout minimální dobu zahřívání aktivního elementu, je nutné vyhodnotit všechny výše vyjmenované aktuální podmínky v ERDPF filtru. Z tohoto důvodu je elektronický řídicí systém ERDPF vybaven sensory, které mimo jiné měří hodnotu regeneračního proudu, aktuální teplotu spalin, diferenční tlak ERDPF filtru a ekvivalent hmotnostního průtoku.

6.2.1 Vliv hmotnostního průtoku spalin na regeneraci

Jedním ze základních parametrů je maximální přípustná hodnota hmotnostního průtoku spalin skrz aktivní element, při kterém je systém schopen dosáhnout iniciační teploty. Tento jev je popsán rovnicí (6.1), která udává vztah mezi výkonem aktivního

elementu, aktuální hodnotou hmotnostního průtoku a teplotou spalin. Z této rovnice je pak snadno dopočitatelná hodnota maximálního ohřátí protékajících spalin. Rovnice nekalkuluje se samotným zahříváním aktivního elementu, které je řešeno až v dalším textu.

$$\frac{I_{reg}^2 * R_{iAE}}{m_{MF} * C_{MF}} + T_{ext} = T_{max} \quad (6.1)$$

~	I_{reg}	[A]	- regenerační proud
~	R_{iAE}	[Ω]	- vnitřní odpor aktivního elementu
~	m_{MF}	[kg*s ⁻¹]	- hmotnostní průtok spalin
~	C_{MF}	[J*kg ⁻¹ *K ⁻¹]	- měrná tepelná kapacita spalin
~	T_{ext}	[°C]	- aktuální teplota spalin
~	T_{max}	[°C]	- maximální dosažitelná teplota ohřevu spalin

Maximální možné ohřátí spalin je také přímo závislé na jejich aktuální vstupní teplotě, což je možno vidět v názorném příkladu dosazení do vztahu (6.1). Pokud vycházím z reálných podkladů pro motorovou jednotku o výkonu 260 kW při jmenovitých otáčkách maximálního krouticího momentu 1900 rpm, tak hmotnostní průtok spalin jedním elementem dosahuje hodnoty 0,0103 kg*s⁻¹. Vycházím z předpokladu, že je ERDPF filtr osazený 24 aktivními elementy a teplota spalin dosahuje hodnoty 250 °C. Pro tento názorný příklad (6.2) je výsledná hodnota maximálního ohřátí protékajících spalin 845 °C. To znamená, že výsledná hodnota výrazně překračuje hranici iniciace aktivní regenerace a není žádoucí ohřát aktivní element až na tuto maximální teplotu, která urychluje degradaci samotného substrátu DPF filtru a snižuje tím celkovou životnost filtru.

$$T_{max} = \frac{350^2 * 0,05}{0,0103 * 1003} + 250 = 845 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (6.2)$$

Aby bylo možné udělat rychlou časově nenáročnou kalkulaci nového mechanického návrhu ERDPF filtru, tak jsem pro tento účel vytvořil interaktivní tabulku, která implementuje všechny potřebné výpočty pro zjištění maximální možné teploty aktivního elementu při různých teplotách spalin a otáčkách motoru. Do tabulky je nezbytné vyplnit vstupní údaje jako: objem motoru, počet válců, rozsah otáček motoru a rezistivitu aktivního elementu. Z těchto údajů je pak vygenerována výstupní tabulka, která pomocí gradientu barev jasně znázorňuje, za jakých podmínek je možné s tímto mechanickým uspořádáním dosáhnout iniciačních teplot potřebných pro regeneraci.

Výstupní tabulka pro motorovou jednotku, kterou jsem použil v předchozích výpočtech, je zachycena na obrázku (Obrázek 6-4).

Ohřátí - jeden aktivní element (1/24 hmotnostního průtoku spalin - teplota výfukových plynů je 250°C)								
AIR FLOW 24 TUBES [kg/s]	160A - MAX t [°C]	200A - MAX t [°C]	250A - MAX t [°C]	300A - MAX t [°C]	350A - MAX t [°C]	400A - MAX t [°C]	450A - MAX t [°C]	500A - MAX t [°C]
0,0043	545 °C	712 °C	971 °C	1 288 °C	1 663 °C	2 096 °C	2 587 °C	3 135 °C
0,0054	486 °C	619 °C	827 °C	1 081 °C	1 381 °C	1 727 °C	2 119 °C	2 558 °C
0,0081	408 °C	496 °C	635 °C	804 °C	1 004 °C	1 235 °C	1 496 °C	1 788 °C
0,0103	374 °C	444 °C	554 °C	687 °C	845 °C	1 027 °C	1 234 °C	1 465 °C
0,0135	345 °C	398 °C	481 °C	582 °C	702 °C	841 °C	998 °C	1 173 °C
0,0163	329 °C	373 °C	442 °C	527 °C	627 °C	742 °C	873 °C	1 019 °C
0,0190	318 °C	355 °C	415 °C	487 °C	573 °C	672 °C	784 °C	909 °C

Obrázek 6-4 Výstupní tabulka s barevným gradientem znázorňující maximální teploty aktivního elementu

V reálné aplikaci je ohřívání elementu složitější proces, protože v průběhu filtrace dochází k postupnému zanášení aktivního elementu PM frakcemi, které nerovnoměrně zmenšují poměr průchozího povrchu aktivního elementu a brání volnému průchodu spalin, tím se zvyšuje difuzní odpor ERDPF filtru. Nerovnoměrné zanášení aktivního elementu má za následek též nerovnoměrné zahřívání (ochlazování) aktivního elementu a iniciační teploty je tak v místech s nižším průtokem spalin dosaženo mnohem rychleji. Tyto lokální zdroje s vyšší intenzitou zahřívání jsou pak schopné iniciovat regeneraci celého objemu aktivního elementu.

Z tohoto důvodu je nutné implementovat do řídicího systému vyhodnocení aktuálního stavu elementu v průběhu samotné regenerační fáze tak, aby nedošlo k jeho nenávratnému poškození. V dalším vývoji tak byl kladen důraz na návrh této metodiky řízení ERDPF filtru (6.2.3 Vyhodnocení průběhu regenerace).

6.2.2 Odhad potřebného času pro regeneraci

Aby bylo možné ještě před iniciací samotné fáze aktivní regenerace určit alespoň přibližnou dobu potřebnou k dosažení iniciační teploty, tak je nezbytné mít ekvivalentní matematický vztah založený na aktuálních podmínkách v ERDPF filtru. Tento vztah je popsán rovnicí (6.3), která udává základní vztah mezi tepelným výkonem aktivního elementu a aktuálními parametry spalin. Následně jsem z této rovnice vyjádřil časovou posloupnost ohřívání aktivního elementu (6.4), kde je uvažován základní časový krok jedné sekundy. Tuto posloupnost pak lze využít pro výpočet doby potřebné k ohřátí aktivního elementu za daných podmínek.

$$I_{reg}^2 * R_{IAE} = c_{AE} * m_{AE} * (T_2 - T_1) + c_{MF} * m_{MF} * (T_2 - T_1) \quad (6.3)$$

$$T_n = \frac{c_{AE} * m_{AE} * T_{n-1} + c_{MF} * m_{MF} * T_{exh} + I_{reg}^2 * R_{IAE}}{c_{AE} * m_{AE} + c_{MF} * m_{MF}} \quad (6.4)$$

~	I_{reg}	[A]	- regenerační proud
~	R_{iAE}	[Ω]	- vnitřní odpor aktivního elementu
~	m_{MF}	[$g \cdot s^{-1}$]	- hmotnostní průtok spalin
~	C_{MF}	[$J \cdot g^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$]	- měrná tepelná kapacita spalin
~	m_{AE}	[$g \cdot s^{-1}$]	- hmotnost aktivního elementu
~	C_{AE}	[$J \cdot g^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$]	- měrná tepelná kapacita aktivního elementu
~	T_{exh}	[$^\circ C$]	- aktuální teplota spalin
~	T_n	[$^\circ C$]	- teplota dosažená za sekundu ohřívání
~	T_{n-1}	[$^\circ C$]	- teplota dosažená v předchozím kroku

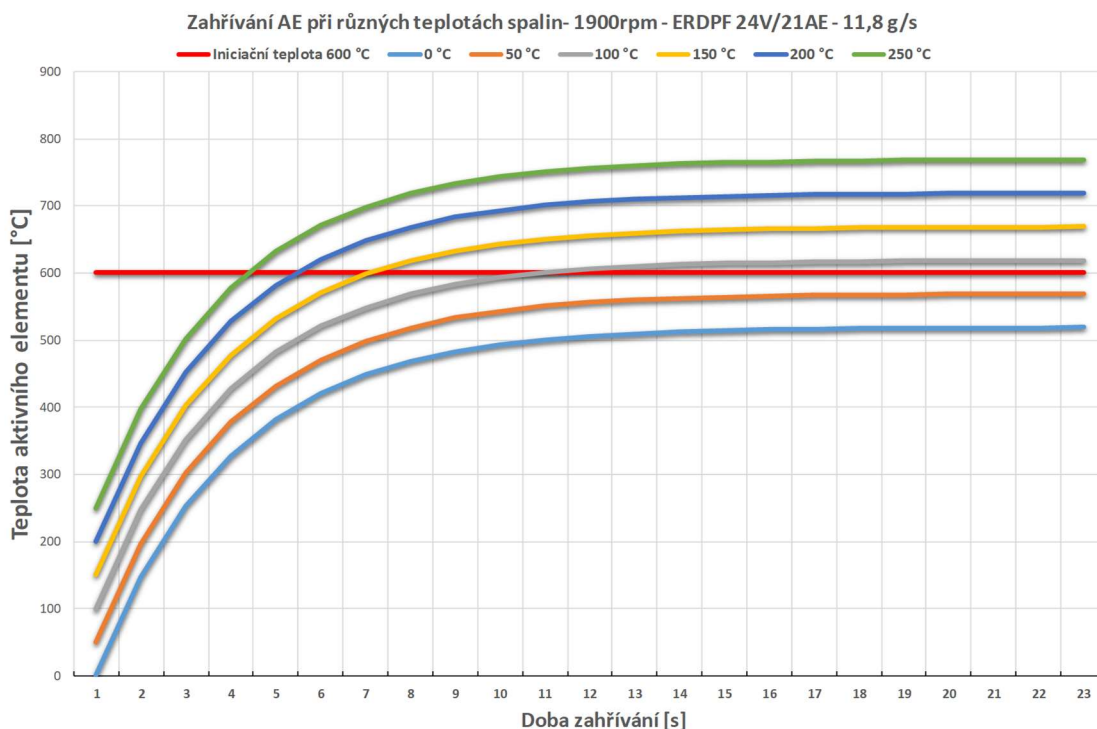
V grafu (Obrázek 6-5) jsou vyneseny hodnoty pro rozdílné vstupní teploty spalin. Konstantní parametry motoru a aktivních elementů jsou pak stejné jako v příkladech výše. Z grafu je patrné, že je dosažení iniciační teploty (v grafu červená limita na 600 °C) při 1900 rpm, což jsou jmenovité otáčky motoru s nejvyšším krouticím momentem, není problematické a systém bude schopen aktivně regenerovat při většině provozních podmínek. Dále je možné podle tohoto matematického vztahu určit přibližnou dobu, která je nezbytná k dosažení iniciační teploty. Z grafu je zřejmé, že tento čas pro jednotlivé teploty je značně odlišný, při teplotě 250 °C je dosaženo iniciační teploty po čtyřech sekundách. Naopak při nastartování studeného motoru, kdy se teplota spalin pohybuje kolem 50 °C, je nutné nechat zahřívát aktivní element po dobu minimálně deseti sekund.

V dalším grafu (Obrázek 6-6) jsou vyneseny průběhy pro stejný motor při volnoběžných otáčkách (800 rpm), je možné pozorovat, že maximální teploty dosahují hodnot vyšších než 950 °C. Takovéto teploty už způsobují degradaci materiálu samotných aktivních elementů a tím i celkové životnosti celého ERDPF filtru. V případě, že selže systém kontroly a regenerace by probíhala po delší časový úsek (15 sekund a více), tak dojde ke zničení aktivního elementu, jehož materiál při teplotách přesahujících 1300 °C přechází do kapalného stavu.

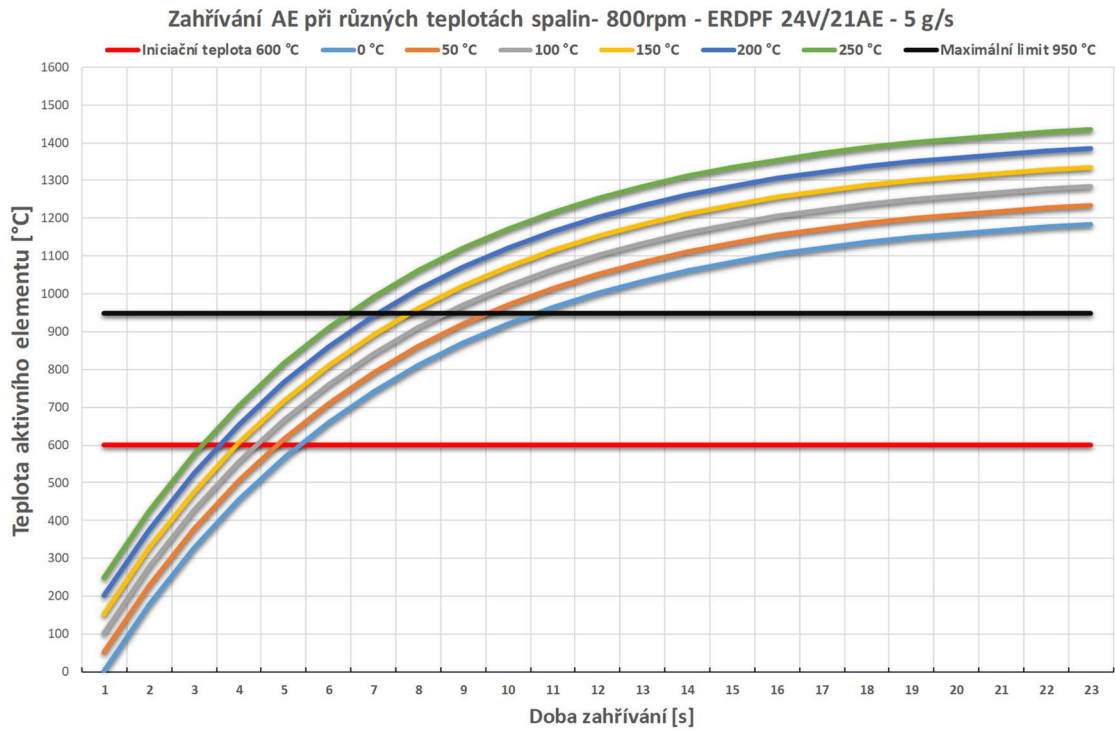
Ideální teploty pro iniciaci aktivní rychlé regenerace se pohybují v rozmezí 650–800 °C. Jak je patrné z prvního grafu, tak systém v podstatě nemůže zničit aktivní element, protože je dostatečně ochlazován spalinami. Naopak v situaci, kdy motor pracuje při volnoběžných otáčkách, je nebezpečí zničení aktivního elementu mnohem pravděpodobnější. Nicméně pokud porovnáme časy nezbytné k zahřátí aktivního elementu na iniciační teploty, tak je jednoznačně energeticky výhodnější regenerovat při nižších otáčkách motoru.

Shrnutím uvedeného lze předpokládat, že je možné vypočítat přibližnou dobu požadovaného ohřátí a současně maximální teplotu aktivního elementu za daných podmínek ve výfuku. Tyto kalkulace nezohledňují nerovnoměrné zaplnění ERDPF filtru jak v rámci jediného aktivního elementu, tak průměrné zaplnění všech aktivních elementů. Tyto parametry budou též významně ovlivňovat rychlost a maximální hodnotu ohřátí aktivního elementu v průběhu iniciace aktivní regenerace. Aby bylo možné spolehlivě řídit průběh regenerace, je nezbytné mít v systému zavedenou zpětnou vazbu, pomocí které bude možné vyhodnotit průběh regenerace. Možnosti zpětnovazebního systému v rámci systému ERDPF filtru jsou rozebrány v další podkapitole.

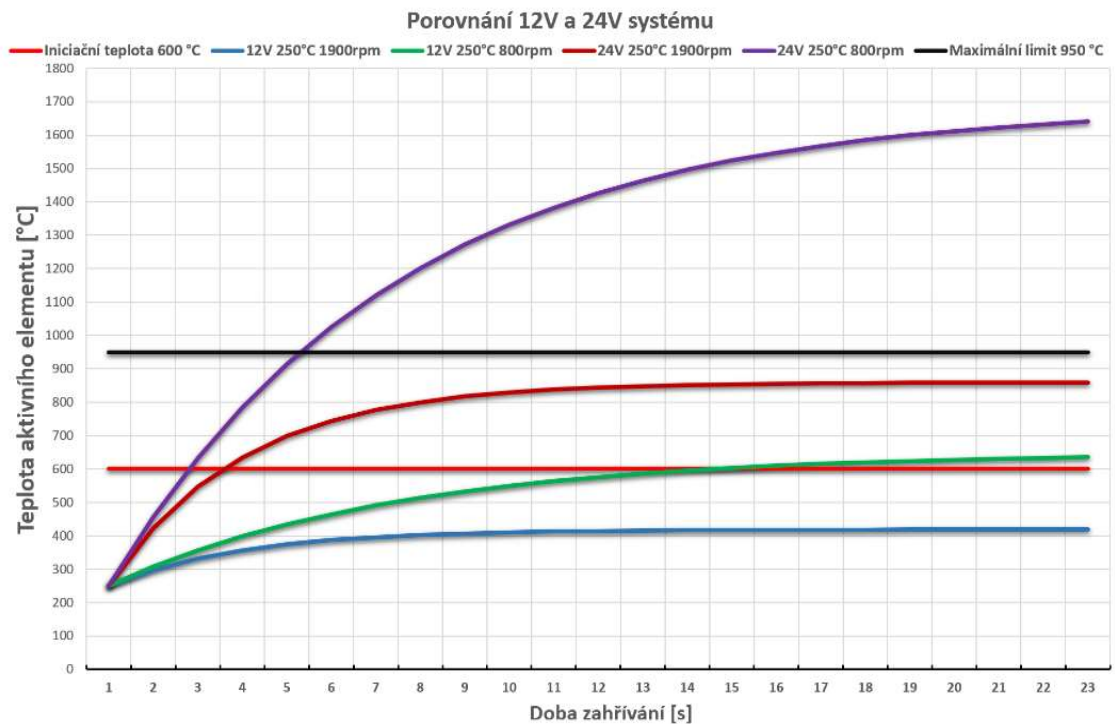
V grafu (Obrázek 6-7) jsem provedl srovnání modelových hodnot teplot v průběhu iniciace regenerace z 12 V a 24 V. Na první pohled je patrný velký rozdíl, kdy při otáčkách motoru 1900 rpm 12V systém není schopen dosáhnout požadované teploty a při volnoběžných otáčkách je dosažení iniciační teploty více jak 4x rychlejší u 24V systému.



Obrázek 6-5 Průběhy ohřívání aktivního elementu při různých teplotách spalin a 1900 rpm 260kW motoru



Obrázek 6-6 Průběhy ohřívání aktivního elementu při různých teplotách spalin a 800 rpm 260kW motoru



Obrázek 6-7 Porovnání 12V a 24V systému ve dvou konstantních režimech motoru.(800rpm a 1900rpm)

6.2.3 Vyhodnocení průběhu regenerace

Aby mohl systém spolehlivě fungovat, je důležité, aby nedošlo k poškození aktivních elementů v průběhu aktivní regenerace překročením maximální přípustné teploty 950 °C. Na úrovni systému je proto důležité zavést metodiku vyhodnocení iniciace regenerace a ukončení fáze vyhřívání substrátu záhy po zregenerování zachycených sazí.

V předchozím projektu napájeném z 12 V se tato problematika opomíjela, protože dosažení mezních teplot nebylo možné díky nízkému výkonu aktivních elementů. Řízení regenerace obsahovalo pouze časování sepnutí na 20 sekund, tato doba byla dostatečná pro iniciaci regenerace pouze za optimálních podmínek ve výfuku. Návaznost systému na aktuální podmínky ve výfuku a odhad pravděpodobnosti úspěšné regenerace nebyl řešen.

Poté, co byl iniciován přechod systému na 24 V, byly provedeny první experimenty s tímto zdrojem energie, který poskytoval čtyřnásobný výkon tepelné energie pro ohřátí aktivního elementu oproti předchozímu řešení. Hned na počátku se ukázaly nedostatky mechanické konstrukce, která dostatečně nezohledňovala tepelnou roztažnost aktivního elementu při takovémto výkonu. V průběhu testu došlo k prodloužení aktivního elementu do té míry, že došlo ke zkratu a následnému svaření rámu filtru s aktivním elementem.



Obrázek 6-8 Zkrat mezi rámem filtru a aktivním elementem v průběhu iniciace regenerace.

Dalším nelichotivým výsledkem testování bylo přehoření aktivního elementu při překročení teploty tání AE. Tou dobu probíhal vývoj velmi intenzivně a testy nebyly podloženy teoretickými předpoklady, pokud využiji rovnice (6.4) z předchozí kapitoly

a dosadím testovací podmínky (aktivním elementem neprotékal žádný proud vzduchu a regenerační proud dosahoval hodnot kolem 500 A), tak vyjde, že dosažení iniciační teploty při tomto výkonu trvá přibližně jednu sekundu. Ovšem během testu byl element ohříván po dobu pěti sekund, což způsobilo jeho destrukci, neboť bylo dosaženo teplot, při kterých se již taví samotný materiál aktivního elementu (1300 °C).



Obrázek 6-9 Zničený aktivní element v průběhu iniciace regenerace.

Další testy byly zaměřeny na nalezení vhodné metody, jež by umožňovala konstrukci zpětnovazebního systému, který by měl informaci o aktuální teplotě aktivního elementu nebo její ekvivalent. Výchozím bodem bylo zjištění, že značná teplotní roztažnost filtračního substrátu je přímo úměrná teplotě aktivního elementu. Byl definován a sestaven ověřovací experiment, kde byl pohyblivý konec aktivního elementu spojen s lineárním potenciometrem. To umožnilo elektronický odečet mechanického posunu volného konce a časovou korelaci naměřených dat z osciloskopu. Výstupem experimentu byl graf, který potvrdil správnost předpokladu, že tepelná roztažnost je přímo úměrná teplotě elementu. V grafu (Obrázek 6-10) je tato tepelná roztažnost vynesena červenou křivkou. Následovaly úvahy o tom, zda by tohoto jevu nešlo využít jako zpětné vazby. Nicméně hlavním cílem bylo co nejjednodušší řešení a všechny návrhy na využití tepelné roztažnosti se s tímto požadavkem striktně vylučovaly.

Naměřená data byla podrobena další analýze a bylo zjištěno, že se při zahřívání aktivního elementu mění kromě délky i jeho vnitřní odpor. Změna byla řádově v jednotkách $m\Omega$, což není běžnými metodami během provozu filtru jednoduše měřitelná hodnota s dostatečnou přesností. Ale při takto vysokých proudech, jaké jsou využívány pro iniciaci regenerace (řádově stovky ampér), je tento princip použitelný i pro takovéto malé difference odporu. Data z experimentů z testování tepelné roztažnosti obsahují též údaje o napětí i proudu na aktivním elementu a přímo se tak nabízí srovnání výstupu z předchozího testu tepelné roztažnosti s vnitřní rezistivitou aktivního elementu. Tyto



Obrázek 6-10 Měření vnitřního odporu a tepelné roztažnosti aktivního elementu

hodnoty jsou též vyneseny v grafu (Obrázek 6-10) ve formě jednotlivých bodů, které reprezentují jednotlivé hodnoty proudu a napětí v průběhu sepnuté proudové regenerační smyčky.

Tento princip zpětné vazby byl vyhodnocen jako perspektivní metoda zejména proto, že neobnáší další dodatečné měřicí senzory, které by bylo nezbytné implementovat do elektronického návrhu řídicího systému pro ERDPF filtry.

6.3 Měření teploty pomocí změny odporu aktivních elementů

Důležitost schopnosti systému měřit teplotu aktivních elementů, potažmo jejich rezistivitu, byl ozřejměn v předchozích kapitolách. Oproti předchozímu projektu, který

regeneroval z napětí 12 V, je v případě 24V systému dosahováno dvojnásobné hodnoty regeneračního proudu. Při laboratorních testech byly využity baterie Optima Yellow Top, které při sériovém zapojení dodávají do regenerační smyčky proud o hodnotách převyšujících 500 A. Z tohoto důvodu bylo nezbytné přijít s jiným řešením snímání hodnoty proudu oproti předchozímu řešení, kde se využívalo paralelního spojení proudových senzorů ASC758, jejichž celkové maximální proudové zatížení bylo 300 A.

6.3.1 Princip měření odporu AE

Princip měření je poměrně jednoduchý, je nezbytné mít k dispozici aktuální hodnotu napětí na aktivním elementu a velikost regeneračního proudu. Z těchto veličin pak pomocí Ohmova zákona dopočteme jeho odpor.

V praktickém nasazení této metody je nezbytné pokrýt značný rozsah regeneračního proudu a spolu s měřením napětí dosáhnout dostatečné přesnosti, která musí umožnit rozlišení měření odporu s přesností na desetinu $m\Omega$.

Při návrhu elektronického obvodu snímání regeneračního proudu pro systém 24V ERDPF V1 jsem nechtěl využít předchozí řešení, kde byly využity senzory ASC758, kterými protéká samotný regenerační proud a jejich pouzdro musí být proto dostatečně dimenzováno (tento typ není dostatečně dimenzován a muselo by se použít více paralelně řazených senzorů, což by bylo značnou komplikací pro návrh PCB). Navíc každý další vývod v PCB, jehož rozměry jsou limitovány, znamená zvětšení celkového odporu hlavní proudové smyčky. Při návrhu PCB s takovýmto proudovým zatížením se již projeví sebemenší napěťový úbytek v proudové cestě ve formě významné tepelné zátěže.

Po průzkumu trhu jsem zvolil řešení, které je dostatečně naddimenzované a zároveň umožňuje efektivní implementaci senzoru do PCB, protože se jedná o galvanicky oddělený proudový senzor LEM HTFS 400-P pracující na Hallově principu.

6.3.2 Výpočet velikosti odporu aktivního elementu

Proudový senzor má definovaný rozsah měření pro stejnosměrné proudy ± 600 A. Výrobce dále udává přesnost $\pm 0,4$ A, což je pro tuto aplikaci postačující. Abych mohl konstatovat, že definované měření bude mít dostatečnou rozlišovací schopnost, musím také kalkulovat s rozlišením užitého ADC převodníku.

$$V_{out} = V_{ref} \pm \left(1,25 * \frac{I_P}{I_{PN}}\right) \quad (6.5)$$

$$I_P = (V_{out} \pm V_{ref}) \left(\frac{I_{PN}}{1,25}\right) \quad (6.6)$$

$$\frac{I_{PN}}{\frac{2^{ADC_{bits}}}{2}} = \frac{600}{2^{11}} \doteq 0,3 \text{ A na 1 LSB bit ADC} \quad (6.7)$$

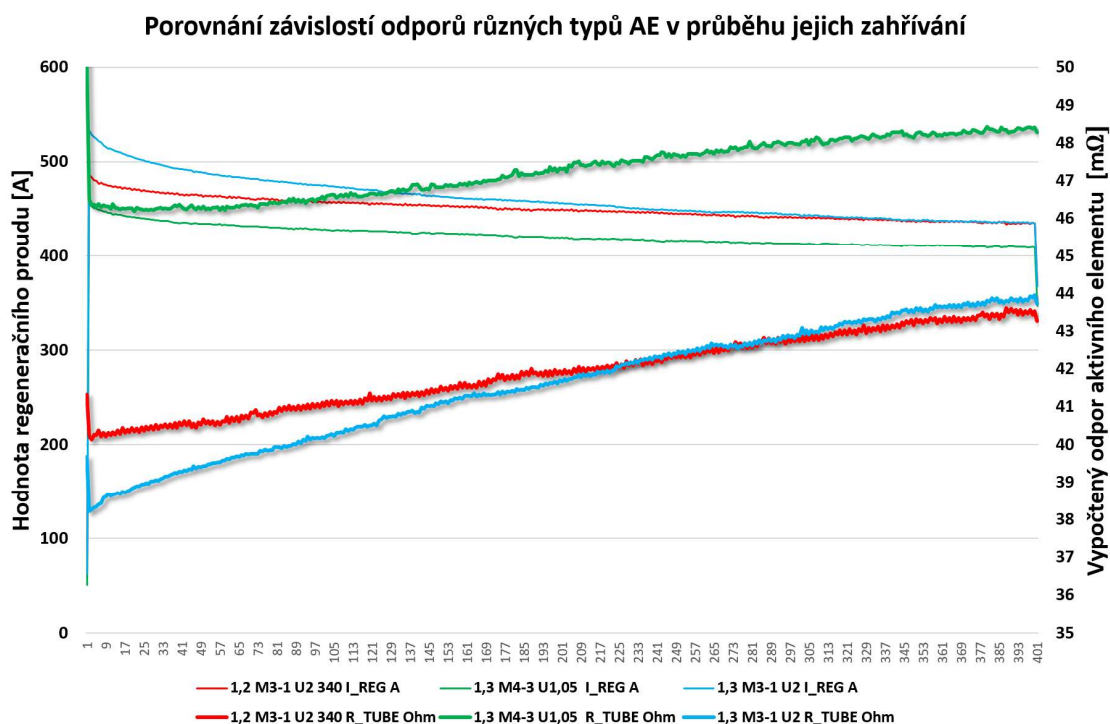
~	V_{out}	[V]	- výstupní napětí senzoru proudu
~	V_{ref}	[V]	- referenční napětí senzoru proudu
~	I_P	[A]	- výsledná výstupní hodnota naměřeného proudu
~	I_{PN}	[A]	- maximální rozsah měřeného proudu
~	ADC_{bits}	[-]	- počet bitů ADC převodníku

Velikost regeneračního proudu měřeného pomocí senzoru LEM HTFS 400-P je dána vztahem (6.6), kde I_{PN} je efektivní nominální rozsah senzoru 400 A. V_{out} a V_{ref} je napětí měřené pomocí ADC převodníku s rozsahem 5 V na 12 bitů. Z toho plyne kvantizační úroveň: $\frac{U_{MAX}}{2^{12}} \doteq 1,2 \text{ mV}$ na 1 bit. Měření napětí na regeneračním elementu je realizováno děličem 8:1, a proto minimální rozlišovací schopnost skutečného napětí je $1,2 * 8 = 9,6 \text{ mV}$. V případě měření regeneračního proudu je nastavena referenční úroveň na $\frac{1}{2} V_{cc}$ (přibližně 2,5 V – senzor umožňuje měření $\pm 600 \text{ A}$), tak ze vztahu (6.7) vyplyne výsledná rozlišovací schopnost měření proudu 0,3 A.

Tento výsledek svojí hodnotou koresponduje s maximální chybou samotného senzoru ($\pm 0,4 \text{ A}$), a proto ADC převodník významně nezhorší parametry měřicího řetězce a zapojení svými parametry tudíž vyhovuje předpokladům pro úspěšné nasazení této metody využívající k detekci teploty aktivního elementu změnu jeho vlastního odporu.

6.3.3 Výstup měření

Pro nový návrh systému (24V ERDPF V1) jsem tyto předpoklady ověřoval na třech rozdílných vzorcích aktivních elementů, které měly odlišnou mechanickou konstrukci. V grafu (Obrázek 6-11) je zachycena fáze ohřátí těchto elementů z pokojové teploty na iniciační teplotu (přibližně 700–800 °C), tučné křivky znázorňují odpor, tenčí se stejnou barvou odpovídají velikosti regeneračního proudu měřeného pomocí senzoru LEM HTFS 400-P. Jak je patrné z těchto průběhů, tak rozdíly mezi jednotlivými elementy jsou značné a projeví se jak rozdílným výchozím odporem, tak i gradientem růstu odporu v průběhu zahřívání.



Obrázek 6-11 Porovnání změn odporů různých typů AE v průběhu jejich zahřívání – měřeno 24V ERDPF V1

Za těchto podmínek není možné počítat s konstantními parametry jednotlivých elementů použitých pro výrobu ERDPF filtrů. Z toho důvodu algoritmus řízení aktivní regenerace pracuje na základě unikátních dat pro každý aktivní element zvlášť. Při první inicializaci systému se provede regenerace všech elementů nezátížených výfukovými plyny (vypnutý motor). Pro každý jednotlivý element se během regeneračního cyklu dodá stejné množství energie odpovídající zahřátí na iniciační teplotu. Hodnota odporu každého elementu je následně uložena v EEPROM paměti. Další regenerační cyklus už je možné provést se zatíženým filtrem a iniciační teploty každého elementu je dosaženo při rozdílném odporu.

6.4 Dopady na ekonomiku provozu vozidla

Dopad emisního systému do celkové spotřeby vozidla by měl být minimální. Pokud by byl ERDPF filtr dále nabízen jako OEM produkt, tak je ze strany výrobce vozidla kladen důraz na celkovou spotřebu vozidla, jež by měla být emisními technologiemi ovlivněna co možná nejméně. Je tedy nezbytné věnovat této problematice patřičnou pozornost.

6.4.1 Vliv zpětného tlaku na spotřebu paliva

Vysoký zpětný tlak má nepříznivé účinky jak na samotnou spotřebu vozidla, tak i na jeho životnost. Předchozí prací na tomto projektu bylo ověřeno, že velikost zpětného tlaku je značně závislá na mechanickém provedení samotného DPF filtru a jeho aerodynamických parametrech.

Dále bylo exaktně verifikováno, že pokud jsou aktivní elementy nainstalovány v dostatečném počtu, významně nezvyšují difuzní odpor samotného filtru. Nicméně tento parametr se logicky zhoršuje s rostoucím zatížením aktivních elementů zachycených PM emisemi. S tímto přímo vyvstává otázka, jak často a za jakých podmínek iniciovat regeneraci jednotlivých elementů; jedná se o tzv. „regenerační strategii“, která musí být co nejefektivnější a rozhoduje o celkovém hodnocení této technologie.

6.4.2 Regenerační strategie

Při návrhu vhodné regenerační strategie vycházím z podkladů, které mi poskytl přímo výrobce samotných aktivních elementů. Aby byl návrh nového filtru intuitivní, sestavil jsem rovnici (6.8), která dává do souvislostí základní parametry jak samotné motorové jednotky, tak i konfiguraci samotného elektricky regenerovatelného filtru pevných částic.

Základním určujícím parametrem aktivních elementů je MLOE (maximální přípustná zátěž PM na jeden element „Maximum Load per One Element“) udávaný v gramech, který je přímo definovaný výrobcem ve vztahu k velikosti aerodynamického odporu, jenž je kladen procházejícím spalinám (velikost zpětného tlaku).

Pro kalkulaci je nezbytné mít podklady o hodnotách jednotlivých emisí daného typu motorové jednotky, na kterou se provádí kalkulace návrhu nového filtru. Standardně se vychází z měření emisí podle harmonizovaných testů a podklady dodává zákazník, který může při výběru testu zohlednit cílovou aplikaci tak, aby se výsledky co nevíce shodovaly s reálným provozem. V krajním případě, kdy není dostatek podkladů od výrobce motoru, lze vyjít z emisní normy, kterou daný motor plní bez dodatečných emisních opatření, a použít maximální dovolené limity dané normy pro výpočet konfigurace ERDPF filtru. Tento způsob ale nemusí odpovídat reálnému provozu a filtr může být poddimenzován, nebo naopak.

Ze vztahu níže uvedené rovnice pak vyplývá údaj NROE („Number of Regeneration of One Element per One Hour“), který poskytuje informaci o průměrné četnosti iniciací regenerací každého aktivního elementu za jednu hodinu provozu motorové jednotky. Dalším stupněm v určení energetické náročnosti je samotný výpočet spotřebované elektrické energie na jeden regenerační cyklus, který je uveden v následující kapitole (6.4.3 Vliv regenerace na celkovou spotřebu paliva).

$$\frac{P * P_m * \frac{e_F}{100}}{NE * MLOE} = NROE \quad (6.8)$$

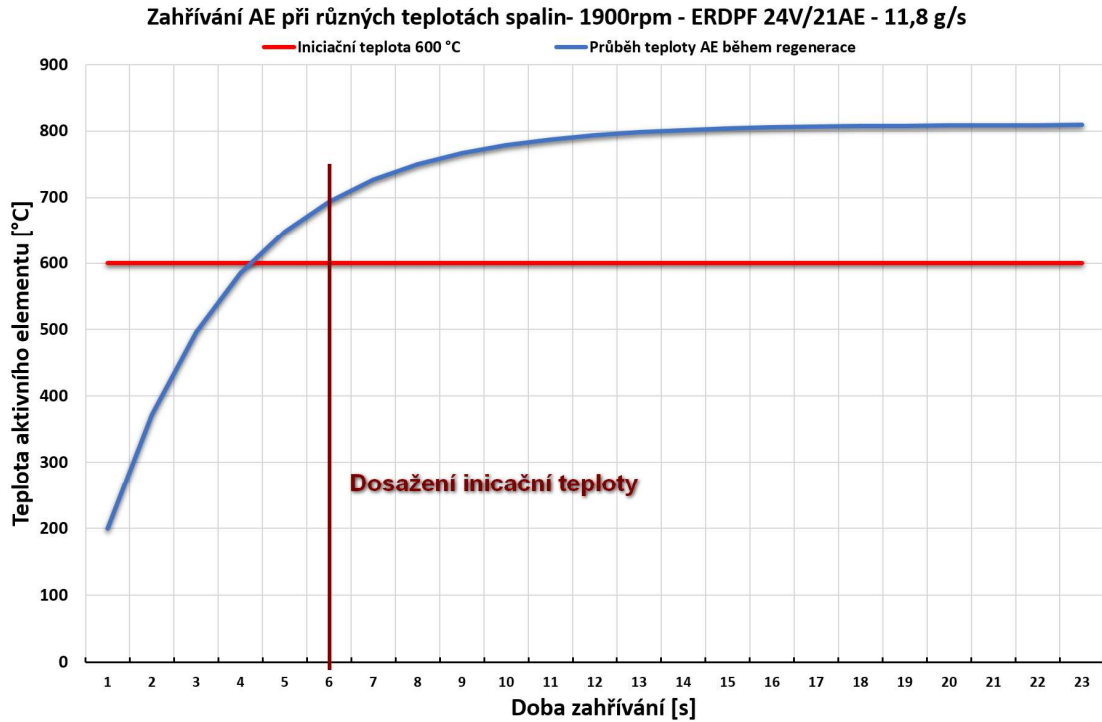
~	P	[kW]	- výkon motoru
~	P _m	[g*kWh ⁻¹]	- emise PM daného motoru
~	e _F	[%]	- účinnost filtrace PM
~	NE	[-]	- počet elementů ERDPF filtru
~	MLOE	[g]	- maximální přípustná zátěž PM na jeden element
~	NROE	[h ⁻¹]	- počet regenerací každého elementu za hodinu provozu motoru

6.4.3 Vliv regenerace na celkovou spotřebu paliva

Majoritní podíl na celkové spotřebě vykazuje samotná elektricky iniciovaná regenerace aktivních elementů oproti vlastní spotřebě elektronického systému, kterou v kalkulaci zanedbávám.

V praktickém případě výpočtu spotřeby elektrické energie vycházím z reálného měření, kde 260kW motor vykazoval emise PM 0,2 g*kWh⁻¹. Při dosazení do rovnice (6.8) pro ERDPF filtr s 21 aktivními elementy vyjde přibližná četnost regenerací 1,5x za hodinu, pokud je maximální přípustná zátěž elementu PM frakcemi 1,5 g.

Spotřebu energie pro jednotlivou regeneraci lze odhadnout pomocí následujících vztahů. V prvním kroku je nezbytné určit dobu potřebnou pro regeneraci, která vychází z rovnice (6.9) a grafu (Obrázek 6-12). Pro podmínky při 1900 otáčkách motoru vychází doba ohřátí t_{FIN} přibližně za 6 s, po dosazení do rovnice (6.10) dostanu celkovou potřebnou energii k regeneraci 43 320 J. V průběhu iniciace regenerace je pak integrován dodaný výkon dle rovnice (6.11), jež je jedním z principů odhadu iniciace aktivního elementu.



Obrázek 6-12 Průběh iničiační fáze aktivního elementu – doba regenerace je cca 6 s

Výpočet vlastní spotřeby lze založit na odběru z regeneračních baterií – pokud je při zatížení baterií proud 380 A, tak z výpočtu (6.12) lze určit odběr z kapacity akumulátorů C_{bat} , který v tomto případě vyjde přibližně na 0,65 Ah.

Dosažením do rovnice (6.13) lze určit celkový odběr elektrické energie ERDPF filtru z vozidla za hodinu provozu pro regeneraci v případě, že budou všechny regenerace probíhat za stejných podmínek. Výsledný odběr vyjde 41 Ah, to znamená přibližné průměrné zatížení alternátoru vozidla 2 kW (při účinnosti alternátoru a nabíjení baterií 50 %).

Hodnota 2 kW je počítána při konstantních nepříznivých podmínkách, které by v reálné aplikaci neměly nastat, protože jízdní profil vozidla nebude odpovídat plně konstantní zátěži.

$$T_n = \frac{c_{AE} * m_{AE} * T_{n-1} + c_{MF} * m_{MF} * T_{exh} + P_{REG}}{c_{AE} * m_{AE} + c_{MF} * m_{MF}} \quad (6.9)$$

$$Q_{REG} = P_{REG} * t_{FIN} \quad (6.10)$$

$$\sum \left\{ U_{bat}(t) * I_{REG}(t) * \frac{T_{SAMPL}}{1000} \right\} > Q_{REG} \quad (6.11)$$

$$C_{bat} = I_{REG} * \frac{t_{FIN}}{3600} \quad (6.12)$$

$$I_{LOAD} = \frac{NROE * NE * C_{bat}}{\frac{\eta_{bat}}{100}} \quad (6.13)$$

~	P_{REG}	[W]	- regenerační výkon
~	R_{iAE}	[Ω]	- vnitřní odpor aktivního elementu
~	m_{MF}	[g*s ⁻¹]	- hmotnostní průtok spalin
~	c_{MF}	[J*g ⁻¹ *°C ⁻¹]	- měrná tepelná kapacita spalin
~	m_{AE}	[g*s ⁻¹]	- hmotnost aktivního elementu
~	c_{AE}	[J*g ⁻¹ *°C ⁻¹]	- měrná tepelná kapacita aktivního elementu
~	T_{exh}	[°C]	- aktuální teplota spalin
~	T_n	[°C]	- teplota dosažená za sekundu ohřívání
~	T_{n-1}	[°C]	- teplota dosažená v předchozím kroku
~	t_{FIN}	[s]	- doba potřebná k iniciaci regenerace
~	Q_{REG}	[J]	- minimální energie potřebná k iniciaci aktivní regenerace
~	$U_{bat}(t)$	[V]	- aktuální napětí baterií
~	$I_{REG}(t)$	[A]	- aktuální hodnota regeneračního proudu
~	T_{SAMPL}	[ms]	- perioda vzorkování ADC převodníku
~	C_{bat}	[Ah]	- odběr energie z akumulátoru na regeneraci
~	η_{bat}	[%]	- účinnost nabíjení akumulátorů

6.5 Přehled obdobných řešení DPF filtrů ve světě a jejich srovnání s ERDPF

Z dostupných informačních zdrojů jsem dohledal pouze dva existující projekty, které pracují na podobném principu jako ERDPF filtry a zároveň byly dovedeny do komerční fáze produktu nabízeného jako technologie pro retrofitting. Bohužel jsem neměl možnost provést bližší analýzu těchto zařízení, a tak vycházím pouze ze strohých informací, které jsem získal.

6.5.1 PROVENTIA EMISSION CONTROL

Systém PROVENTIA CHILI™ se svou ideou nejvíce blíží ERDPF filtru, měl jsem možnost shlédnout pouze prezentaci pro potenciálního zákazníka, a proto je otázkou, do jaké míry je systém ověřen a otestován, neboť na oficiálních webových stránkách jsem o něm žádné informace nenašel. Tyto filtry dle zhlédnuté prezentace cílí na trh s vysokozdvížnými vozíky, které se vyznačují nízkou teplotou spalin a jsou zde často využívány jednorázové pasivní filtry (4.3 Jednorázové DPF filtry), které je nutné měnit.

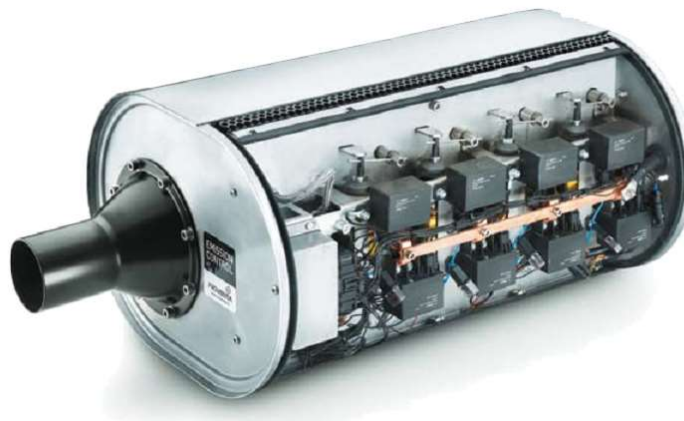
Z obrázku (Obrázek 6-13), který daný systém zachycuje, je patrné, že vývojáři šli cestou výkonových relé pro jednotlivé regenerační prvky se společným napájecím rozvodem. Dále je zřejmé, že každý regenerační prvek má škrticí klapku ovládanou solenoidovým ventilem. Z mého pohledu je systém mechanicky velmi složitý a předpokládám drahou výrobu, nezodpovězenou otázkou pak zůstává spolehlivost celého systému. O metodách vyhodnocení zaplnění a regenerační strategii se žádné informace dohledat nepodařilo. Vzhledem k tomu, že byl systém uveden v roce 2010 a nedošlo k jeho rozšíření, můžeme se domnívat, že nebyl moc úspěšný. Přičítal bych to vysoké ceně a nízké spolehlivosti, kterou takto mechanicky složitá zařízení jistě bude mít.

Pokud bych měl porovnat mnou navržený systém s tímto, tak z omezených informací jsem schopen vyhodnotit, že systém PROVENTIA CHILI™ je především mnohem složitější po mechanické stránce. Elektronika jde cestou separátních relé, což je v porovnání s modulárním systémem ERDPF filtru mnohem jednodušší na návrh samotné elektroniky, nicméně cena výroby a zejména náročnost na montáž bude časově mnohem náročnější a dražší. Podle mého názoru je systém primárně postaven pro emise s nízkou teplotou,

a pokud by byl připojen ke zdroji emisí s vysokou teplotou, zapříčinilo by to jeho následné zničení.

Na obrázku (Obrázek 6-13) je zachycen filtr určený pro nejvyšší výkonnostní třídu motorů v rozsahu 56–130 kW. To je zhruba polovina aktuálního výkonnostního rozsahu ERDPF filtru, který je ve svojí maximální variantě s 24 aktivními elementy schopen provozu s motory o výkonu 300 kW a zároveň splňuje normu EURO III.

Udávaná spotřeba elektrické energie je přibližně $8 \text{ Ah} \cdot \text{h}^{-1}$ s tím, že není definováno, za jakých provozních podmínek (výkon motoru ani jeho emise), nelze tedy provést přímé srovnání obou technologií. Nicméně kalkulace ERDPF filtru s 21 aktivními elementy, jenž je určen pro 260kW motor splňující emisní normu EURO III, a po započtení efektivity nabíjení akumulátoru vyšel průměrný odběr z alternátoru 41A při nepříznivých podmínkách pro regeneraci.



Obrázek 6-13 DPF filtr od firmy PROVENTIA CHILI™ [19]

6.5.2 RYPOS Inc.

O filtru RYPOS Inc. je dostupných informací ještě méně, ale je patrné, že systém cílí na stacionární aplikace, neboť je z veřejně dostupných zdrojů možné dohledat pouze informace o několika referenčních zakázkách. Systém byl vyvinut v USA a na Evropském trhu jsem žádnou aplikaci nedohledal.

Na internetu je dostupné video s animací principu systému, ze kterého je patrné, že systém pracuje na mechanicko-elektrickém principu výběru regeneračního elementu.

Systém je navržen jako stacionární aplikace, kde lze očekávat mnohem příznivější podmínky pro provoz systému.

Nedohledal jsem informaci o tom, zda systém využívá elektrickou energii generovanou samotným motorem, nebo je nutné napojení na elektrickou síť. Z dostupných zdrojů je také patrné, že systém využívá zcela odlišnou mechanickou konstrukci samotných aktivních elementů, která se podobá klasickému skládanému filtru.

Porovnání se systémem ERDPF nemohu provést, protože nemám dostatek podkladů. Nicméně podle toho, jak se tento systém prezentuje, bude mechanicky velmi složitý a navíc určen pro použití v mobilních aplikacích na vozidle, protože ho limitují veliké rozměry. Zajímavý je z mého pohledu spíše segment trhu, který tyto filtry pokrývají, neboť ERDPF systém by zde také mohl nalézt své uplatnění.



Obrázek 6-14 DPF filtr od firmy RYPOS Inc. [20]

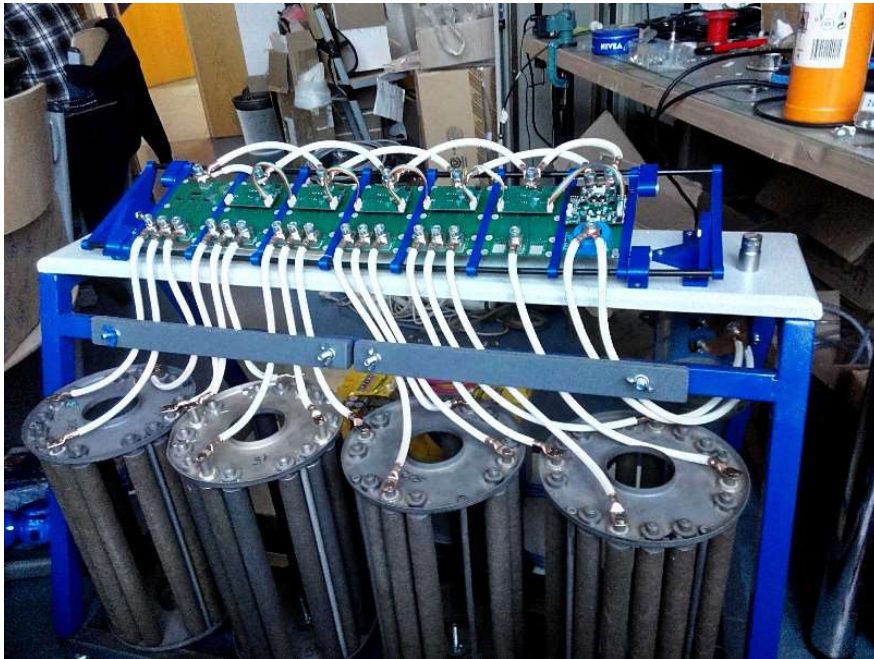
7 Mechanický návrh ERDPF filtrů

Má práce se zaměřuje na návrh metod řízení i na samotný vývoj hardwaru elektronického systému. Nicméně svou předchozí prací na různých projektech jsem si osvojil využívání vývojových prostředí CAD softwarů a v průběhu práce na tomto projektu jsem byl okolnostmi opět nasměrován k vývoji mechanických návrhů jak samotných prototypů ERDPF filtrů, tak i přípravků na testování prototypů.

7.1 ERDPF testovací stolice

Na základě svých předchozích zkušeností jsem si byl vědom toho, že testování takto rozsáhlého systému vyžaduje důkladnou přípravu ve formě testovacího přípravku, který by eliminoval nehody způsobené při manipulaci se zařízením. Vzhledem k rozsáhlosti systému, jakým ERDPF filtr bezesporu je, jsem se rozhodl vyvinout univerzální testovací stolici, která by umožňovala spolehlivé testování různorodých experimentálních konfigurací ERDPF filtrů při zachování variability a bezpečnosti jak obsluhy, tak zařízení.

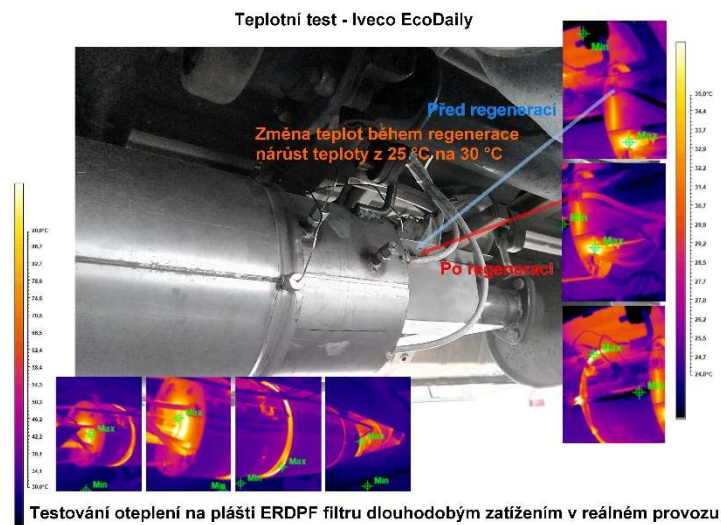
Navrhl a vyrobil jsem zařízení, které dovoluje uchytit až sedm plošných spojů, čtyři DPF filtry a integruje též dvě regenerační baterie se dvěma laboratorními zdroji pro jejich dobíjení. Platforma je vybavena otočnými kolečky, která zajišťují snadnou mobilitu i přes velkou váhu celého zařízení.



Obrázek 7-1 Testovací stolice elektronického systému 24V ERDPF filtrů

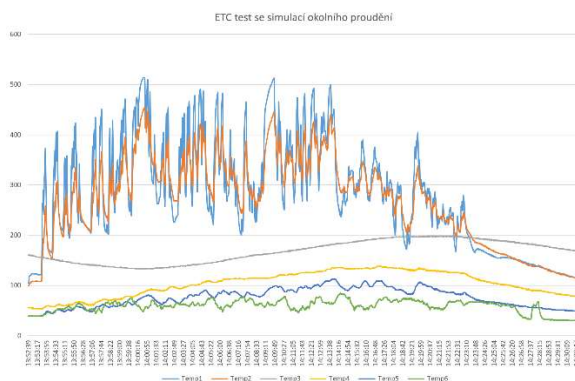
7.2 Testování provozních podmínek a simulace ohřátí

Jednou z velkých výzev celého projektu bylo navržení kompaktního ERDPF filtru, který by integroval i elektronický systém do jednoho pláště. Vývoj započal mapováním teplot u již hotových ERDPF filtrů, které měly elektroniku umístěnou vně pláště. Testy byly prováděny pomocí teplotních senzorů a termokamery (Obrázek 7-2). Výsledkem bylo, že pokud chceme integrovat elektroniku přímo do těla ERDPF filtru, tak musí být navržena zcela nová konstrukce celého filtru.

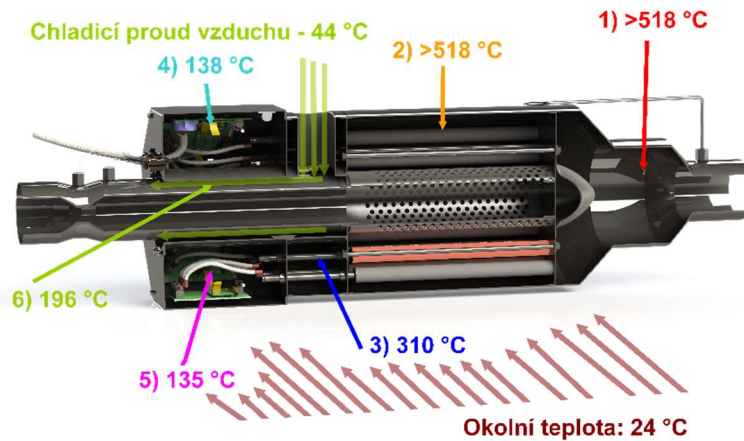


Obrázek 7-2 Testování rozsahů teplot ohřátí pláště na vozidle

V dalším vývojovém kroku jsem přišel s návrhem filtru, u kterého jsem předpokládal, že by mohl tyto požadavky splnit. Byl vyroben prototypový vzorek, který byl následně podroben testování (Obrázek 7-3), při kterém se ukázalo, že i toto řešení nevyhovuje a v prostoru pro zástavbu elektroniky se teplota pohybuje nad kritickou hranicí 100 °C (Obrázek 7-4), kdy už elektronika není schopná provozu.

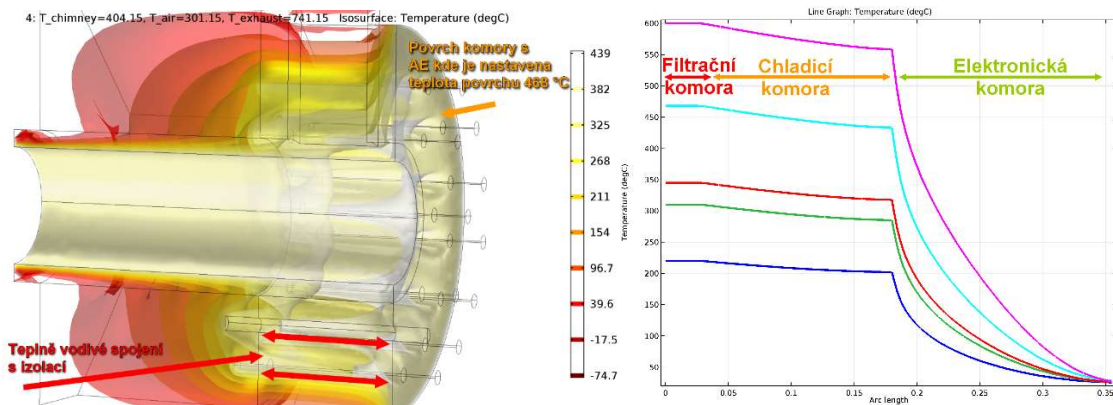


Obrázek 7-3 Testování teplotního rozložení u prototypu ERDPF filtru v laboratoři TÜV SÜD Czech s.r.o.



Obrázek 7-4 Maximální dosažené teploty v těle filtru během ETC testu

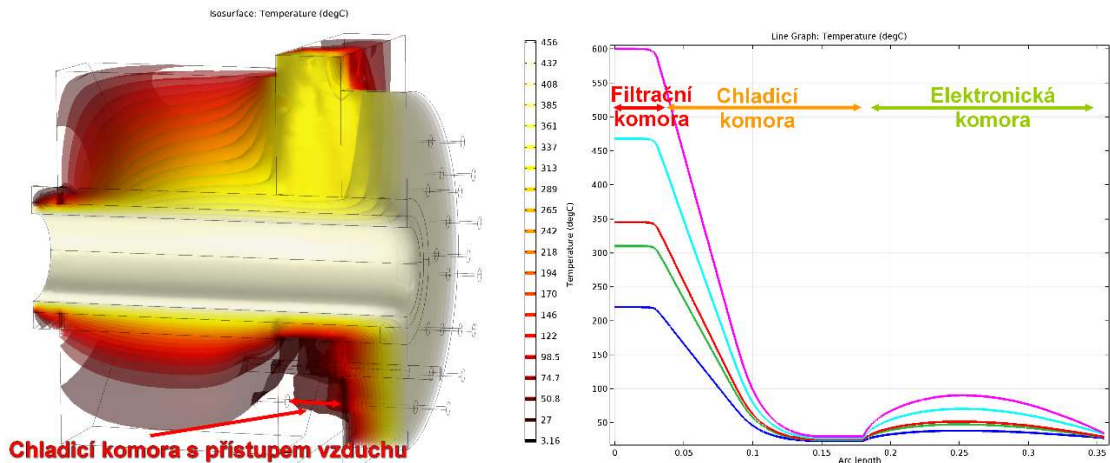
Jelikož testy nepotvrdily použitelnost této koncepce, provedl jsem termální simulaci celého systému, pro kterou jsem využil software COMSOL Multiphysics®. Simulace odhalila chybu v samotné koncepci, která spočívala v přenosu tepla přes izolační komoru s tyčovými vodiči (Obrázek 7-5). Izolace v přechodové komoře udržovala teplo uvnitř tyčí a tím umocňovala efekt přenosu tepla z prostoru komory s AE do elektronické komory. V grafu této simulace jsou vyneseny teploty na tyčových vodičích pro různé hodnoty teploty spalin, které byly nastaveny v rozmezí od 225 °C do 600 °C.



Obrázek 7-5 Výstup simulace, hlavní příčina přenosu tepla do komory s elektronikou pro různé teploty spalin

Dalším krokem bylo simulování možných řešení tohoto nedostatku, který limitoval jinak zajímavou koncepci, kde v současnosti neexistuje obdobné konkurenční řešení na trhu s DPF filtry. Pomocí simulace (Obrázek 7-6) jsem ověřil ideu, že je nezbytné vytvořit prostor s volným přístupem okolního proudícího vzduchu mezi komorou elektroniky a izolační komorou, který zajistí ochlazení výkonových vodičů. Tato změna

ovšem představuje značný zásah do koncepce celého systému, protože zesložituje mechanickou konstrukci celého filtru, nicméně bez tohoto zásahu je tato koncepce v praxi nepoužitelná. Tyto nabyté poznatky byly využity při návrhu nového prototypu filtru 12 AE ARYAN, kde se podařilo dosáhnout potřebného chlazení elektronické komory tak, aby maximální přípustná teplota 100 °C nebyla překročena za žádných běžných provozních podmínek.



Obrázek 7-6 Výstup simulace možného řešení prostupu tepla do komory s elektronikou pro různé teploty spalin

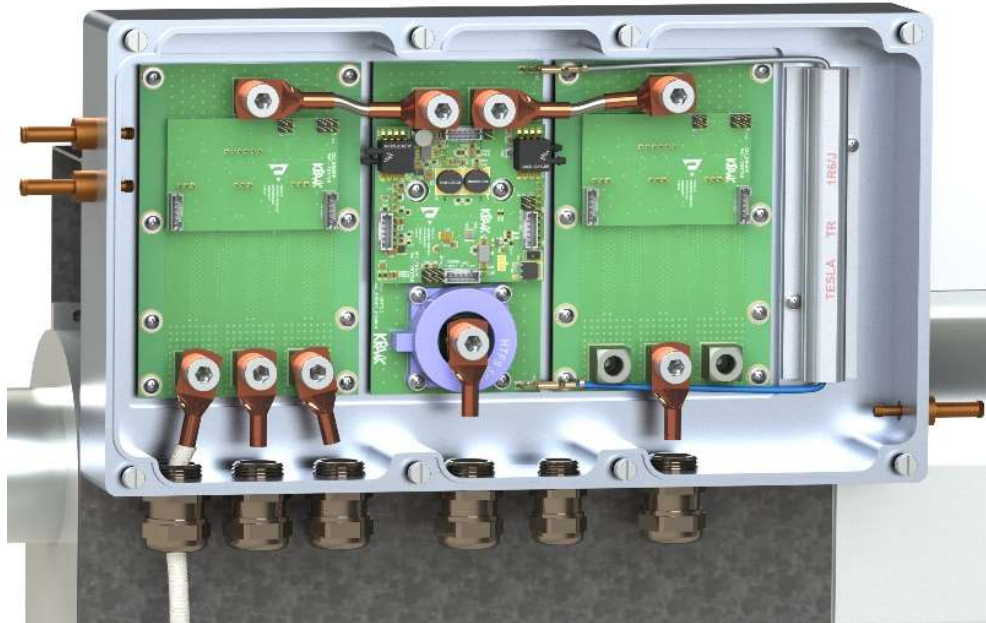
7.3 Mechanické návrhy prototypů ERDPF filtrů

V průběhu mé práce jsem navrhl i několik prototypů mechanických návrhů ERDPF filtrů, některé byly využity pouze k prezentačním účelům, jiné se dostaly až do výrobní fáze a byly otestovány jak v laboratorních, tak reálných podmínkách za běžného provozu. V poslední podkapitole (7.3.5 12 AE ARYAN) je popsán finální návrh prototypu, který jsem byl mimo jiné prezentovat a testovat u potenciálního zákazníka v Íránské islámské republice.

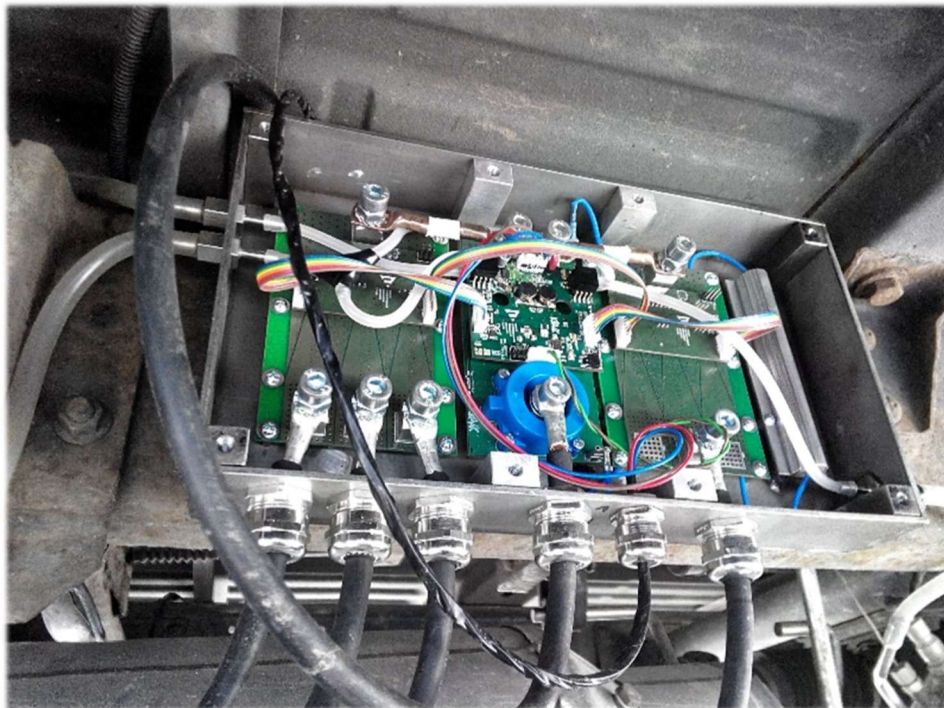
7.3.1 Testovací box elektroniky 24V ERDPF

Jeden z mých prvních realizovaných mechanických návrhů v rámci tohoto projektu byl universální testovací box, který pojme jeden hlavní a dva sekundární moduly 24V ERDPF V1 systému. Návrh byl původně určen pro zástavbu do vozidla Mitsubishi Grandis (Obrázek 7-7), na kterém jsme prováděli testování vyhodnocovacího algoritmu (popsáno v kapitole 6.1.3 Detekce zaplnění DPF filtru). Nicméně automobil byl stažen z testovacích jízd a testovací box byl následně nainstalován na automobil Iveco Daily. Testování

na tomto vozidle bylo zajímavé tím, že probíhalo současně s vývojem SCR systému a oba systémy se tak testovaly současně.



Obrázek 7-7 Testovací box elektroniky 24V ERDPF V1 – CAD návrh boxu s elektronikou



Obrázek 7-8 Testovací box elektroniky 24V ERDPF V1 – montáž na testovacím vozidle Iveco Daily

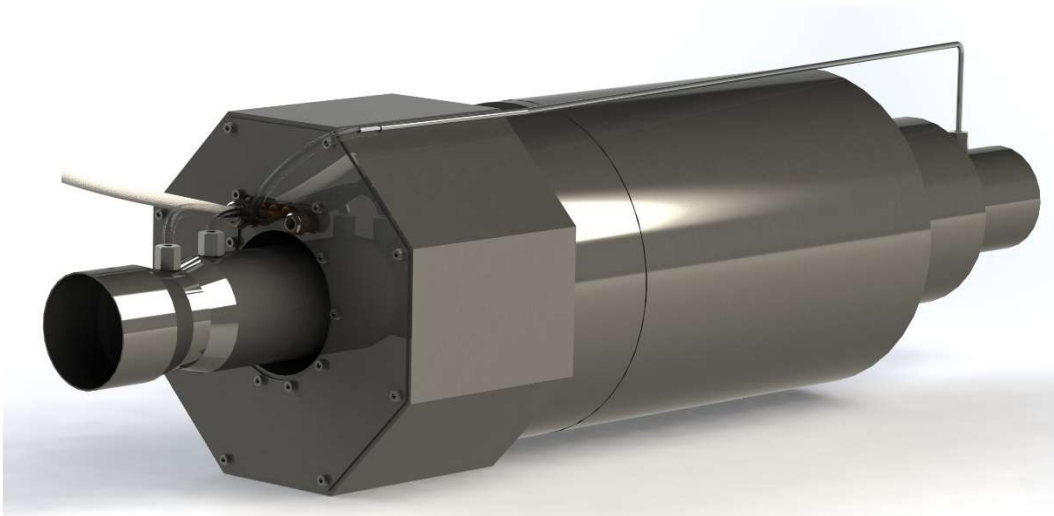
7.3.2 21 AE ERDPF prototyp

Tento prototyp jsem navrhl pro 21 aktivních elementů s tím, že v návrhu nejsou využity žádné další pasivní elementy, které byly využívány v předchozím řešení. Důvodem pro využití pasivních elementů bylo zejména to, že původní elektronický systém měl pevnou konfiguraci, která umožňovala aktivní regeneraci pouze čtyř aktivních elementů. Návrh modulárního elektronického systému 24V ERDPF V2 umožňuje využití až 24 aktivních elementů a výsledné zařízení tak může být mnohem kompaktnější.

Tento návrh (Obrázek 7-9) řeší implementaci elektronického systému přímo do těla samotného ERDPF filtru. Jak bylo popsáno v předchozím textu (7.2 Testování provozních podmínek a simulace ohřátí), tento pokus nebyl zcela úspěšný vzhledem k provozním teplotám v elektronické komoře.



Obrázek 7-9 Řez návrhem 21AE ERDPF filtru s osazenou elektronikou 24V ERDPF V1 – CAD

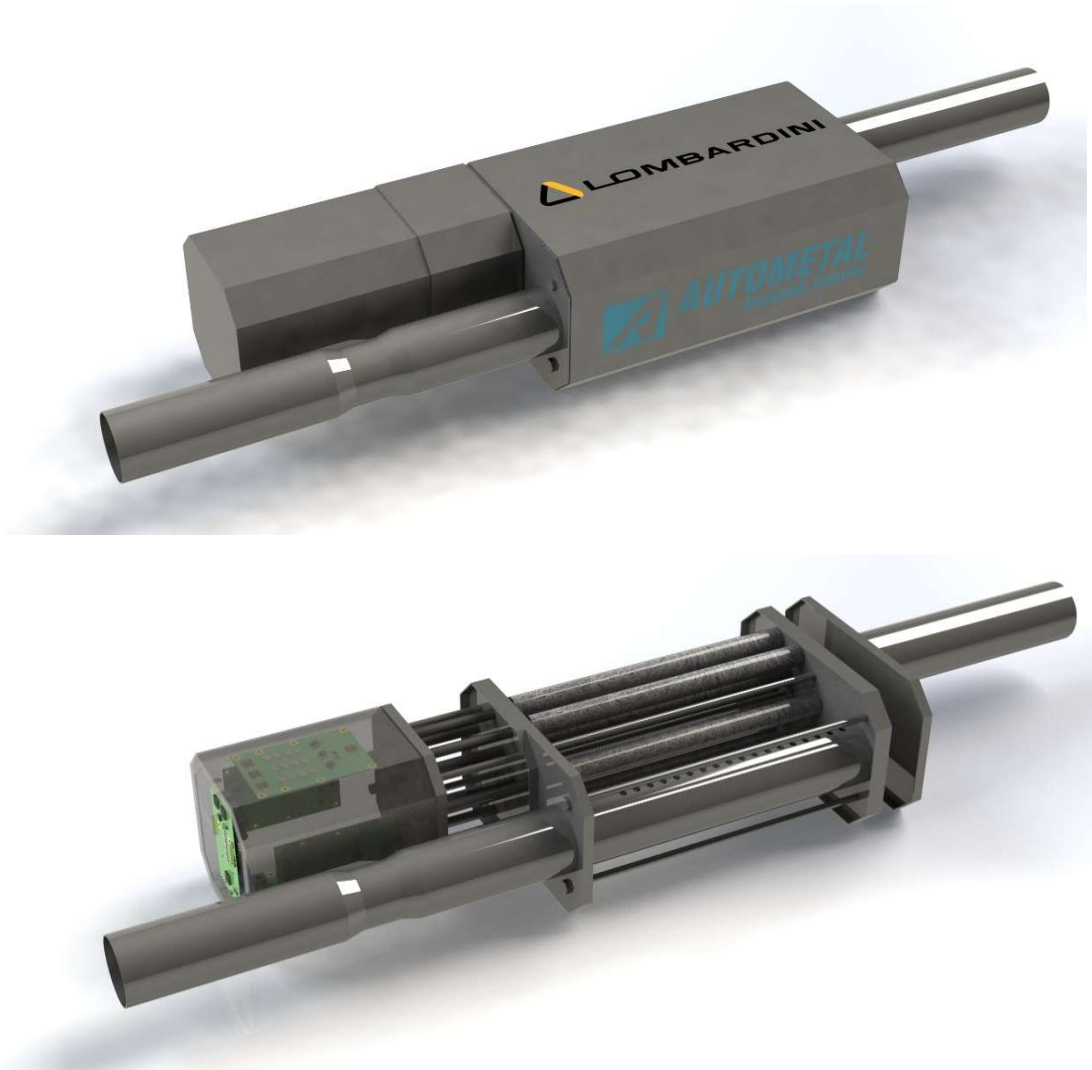


Obrázek 7-10 Model zakrytovaného 21AE ERDPF filtru - CAD

7.3.3 12 AE ERDPF Lombardiny

Další návrh, kterým jsem se zabýval, vycházel ze zkušeností z testování rozložení tepla v opláštění filtru. Jednalo se o návrh filtru pro stacionární motory firmy Lombardini Group. V návrhu jsem již zapracoval myšlenku oddělené elektroniky od komory s aktivními elementy s tím, že výstupní spalínová cesta je vedena bokem mimo komoru s elektronikou.

Nicméně studie filtru byla využita pouze jako podklady pro obchodní jednání o možné budoucí spolupráci a k výrobě prototypu nedošlo.



Obrázek 7-11 Studie návrhu 12 AE ERDPF Lombardiny filtru - CAD

7.3.4 21 AE ERDPF flat

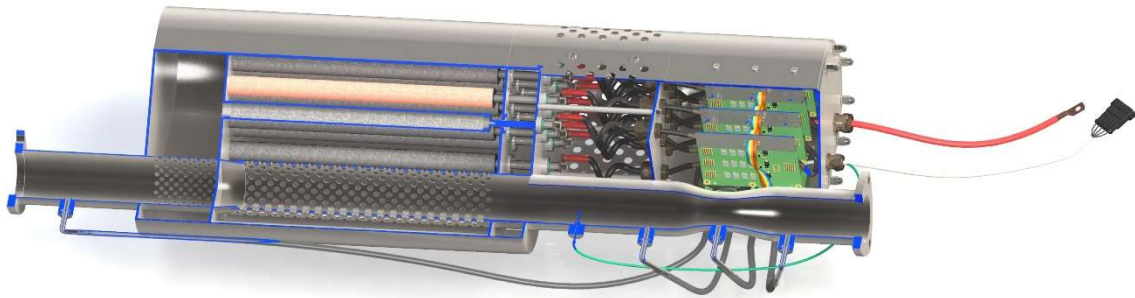
Návrh mechanického uspořádání, který zohledňuje všechny mé nabyté předchozí zkušenosti, je 21 AE ERDPF flat, který je určen pro 12l motory s výkonem kolem 250 kW. Návrh filtru již obsahuje ventilační prostor mezi elektronickou a izolační komorou. V návrhu bylo třeba vyřešit dilataci a napojení pohyblivých konců aktivních elementů na výkonové vodiče. Provedl jsem několik laboratorních pokusů a následně zvolil řešení, které využívá spirálovitého stočení výkonového kabelu. To umožňuje snadný pohyb volného konce v rozsahu 10 mm při současném zachování prostorové nenáročnosti. Tento princip řešení tepelné roztažnosti je jednoduchým a levným řešením, nicméně bylo třeba otestovat jeho spolehlivost při značném tepelném namáhání. Elektronický systém 24V ERDPF V1 je umístěn v tepelně odstíněném prostoru díky proudění okolního vzduchu. Samotné desky plošných spojů sekundárních modulů CUx jsou pak umístěné svisle v jedné řadě, to sice není tak elegantní řešení jako v případě 21 AE ERDPF filtru zejména pro složitější montáž a delší kabelové propojení jednotlivých modulů, ale usnadňuje to cirkulaci vzduchu v tomto prostoru. Tento filtr nebyl fyzicky vyroben, ale zkušenosti byly využity pro návrh dalšího menšího typu filtru 12 AE ARYAN.



Obrázek 7-12 Návrh 21 AE ERDPF flat filtru se vzduchovou mezerou - CAD

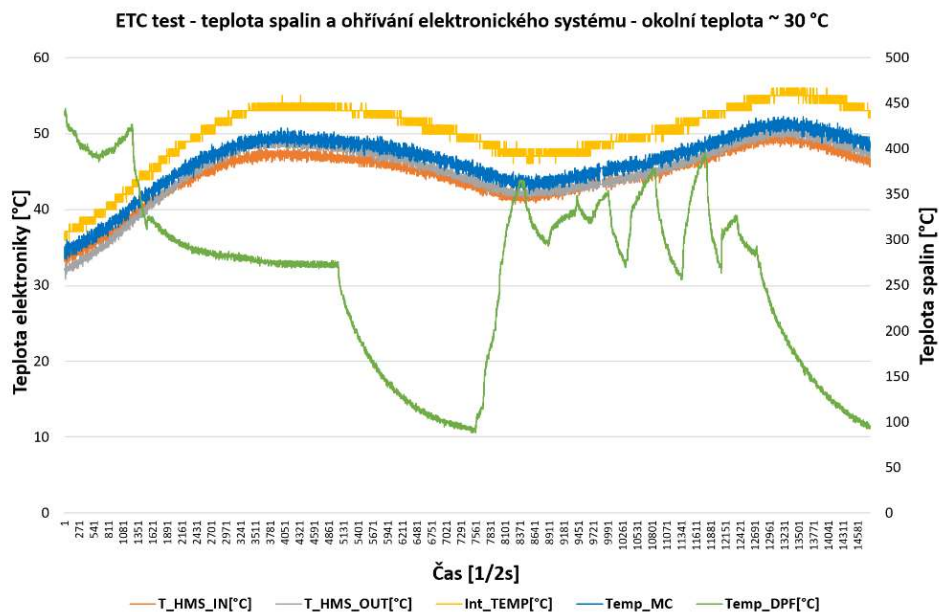
7.3.5 12 AE ARYAN

Má práce na mechanických návrzích ERDPF filtrů byla završena návrhem a výrobou filtrů 12 AE ARYAN (Obrázek 7-13). V tomto filtru jsem využil všechny zkušenosti, které jsem během participace na tomto projektu během vývoje ERDPF filtrů nabyl.

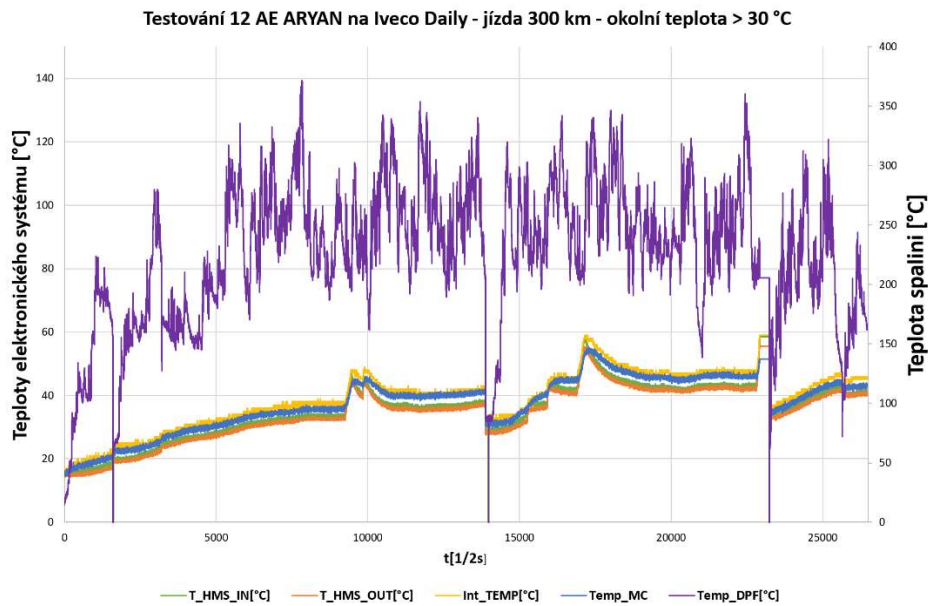


Obrázek 7-13 Řez 3D modelem navrženého filtru 12 AE ARYAN - CAD

Filtr je osazen 12 aktivními elementy, které jsou propojeny přes kabelové smyčky s elektronikou 24V ERDPF V2 v chladicí komoře. To zajišťuje dostatečnou izolaci elektronické komory od primárního zdroje tepla, tedy spalin. Tento fakt byl potvrzen testováním v laboratoři i reálnými testy na vozidle. V grafu (Obrázek 7-14) je zachycen průběh testování v laboratořích IDEM (Iran Diesel Engine Manufacturing) v Íránské islámské republice. Tento test probíhal více jak dvě hodiny a teplota v elektronické komoře filtru nepřesáhla 50 °C. Okolní teplota se pohybovala kolem 30 °C. Tento návrh filtru prošel teplotními testy a umožňuje zástavbu elektroniky v těle samotného filtru.



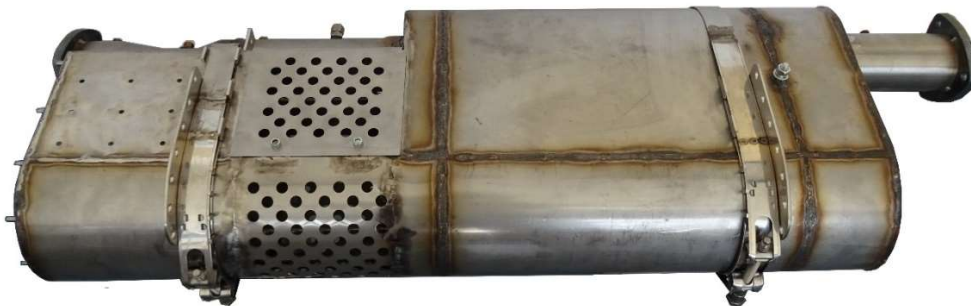
Obrázek 7-14 Testování filtru 12 AE ARYAN v laboratoři IDEM s motorem Cummins ISF3.8s3154



Obrázek 7-15 Testování 12 AE ARYAN filtru v reálném provozu - měření teplot elektroniky

Filtr byl následně podroben testům v reálném provozu za teplotně nepříznivých podmínek a dlouhodobé zátěže. V grafu (Obrázek 7-15) je zachycen průběh jízdy, která byla vykonána za běžného provozu v parném letním dnu, kdy odpolední teplota přesahovala 30 °C a cesta byla přibližně 300 km dlouhá. Teplotní špičky jsou způsobeny teplem z výkonových prvků během aktivní regenerace. Z grafu je patrné, že teplota i při provádění aktivní regenerace nepřesáhla 60 °C a zůstala tak hluboko pod maximálním teplotním limitem 100 °C pro provoz elektroniky.

Na obrázku (Obrázek 7-16) je zachycen první vyrobený prototyp ERDPF filtru 12 AE ARYAN. Tělo filtru je vyrobeno z plechů martenzitické korozivzdorné oceli 1.4031, to zajišťuje dobré mechanické vlastnosti, tvarovou stálost a spolehlivost při vysokých teplotách. Implementace elektronického systému do filtru je popsána v kapitole 8.7.



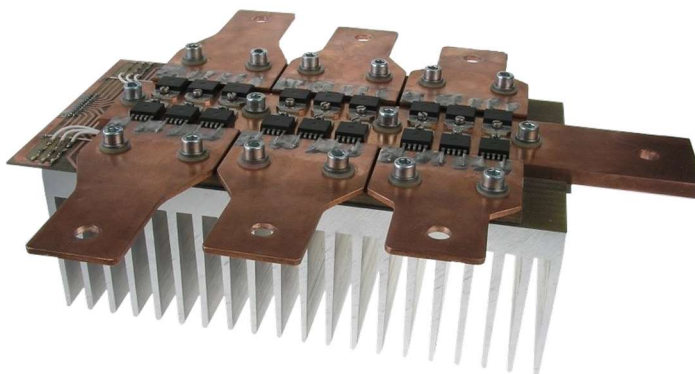
Obrázek 7-16 Jeden z prvních prototypů 12 AE ARYAN filtru

8 Elektronický systém 24V ERDPF V2

Elektricky regenerovatelné filtry pevných částic jsou založeny na elektrické regeneraci aktivních elementů. Ta je iniciována elektrickým proudem dosahujícím řádově stovek ampérů. Spínání této regenerační proudové smyčky je stěžejní funkcí elektronického systému. Pokud má být navíc ERDPF filtr plně nezávislý na informační síti vozidla, je nutné, aby byl systém schopen měřit celou řadu neelektrických veličin z proudu spalin. Vývoj takového komplexního systému, který je spolehlivý a splňuje všechny požadavky, byl náročným úkolem. Současně bylo při vývoji nezbytné zohlednit podmínky sériové výrobitelnosti a s tím spojené výrobní náklady. Nebyl to jednoduchý úkol a v rámci historického vývoje tohoto projektu bylo zkonstruováno značné množství prototypů elektronického řídicího systému. Pro představu jsou v úvodu této kapitoly zmíněna některá předchozí řešení. Ovšem až současná verze elektronického systému 24V ERDPF V2 v sobě snoubí všechny aspekty, které z ERDPF filtru dělají komplexní plně integrovanou variabilní technologii.

8.1 Původní řešení – historický vývoj

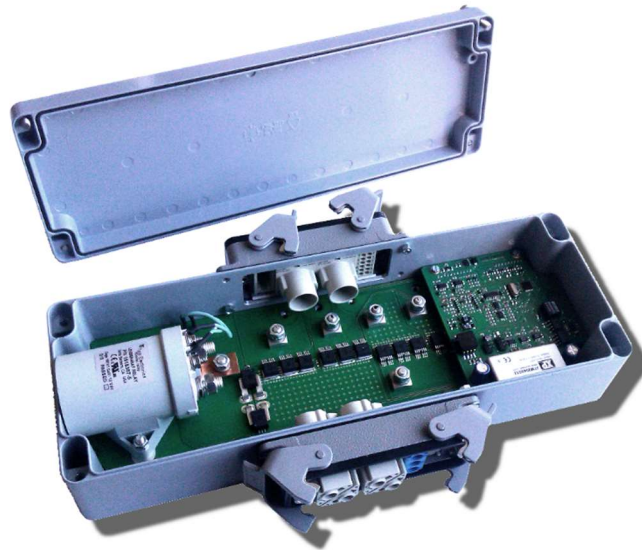
Jeden z prvotních systémů, jehož výkonová část je zachycena na obrázku (Obrázek 8-1), byl určen pro spínání až šesti aktivních elementů. Jednalo se o zajímavé řešení, které bylo založeno na technologii PROFET[®], využívající tři paralelně spojené horní spínače BTS555



Obrázek 8-1 Prototyp pro 6 aktivních elementů založený na technologii PROFET[®]

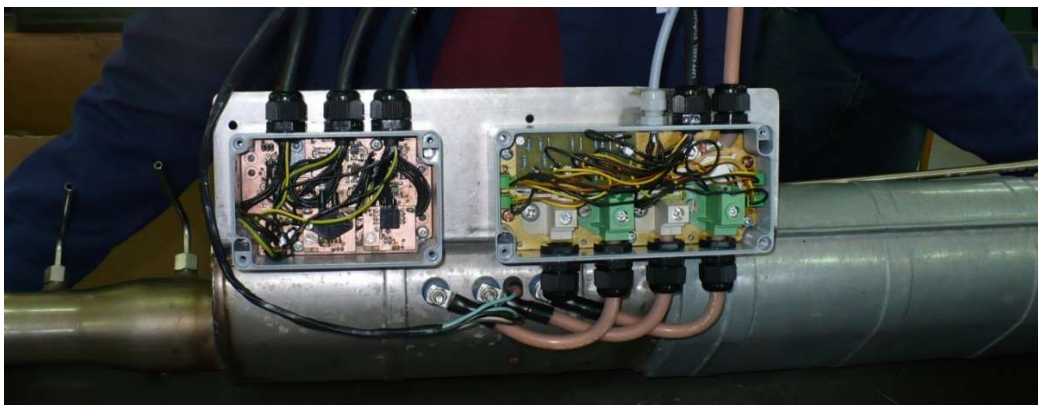
s integrovanou nábojovou pumpou a měřením proudu. To umožňovalo velmi jednoduché řízení spínačů (jednodušší návrh vzhledem k množství použitých elektronických součástek nebyl v historii projektu představen), nicméně jejich přechodový odpor (přibližně 3 mΩ

při jmenovité zátěži 120 A) znamenal značné tepelné ztráty na samotných spínačích v průběhu regenerace, které znamenaly řešení dodatečného chlazení celého systému.



Obrázek 8-2 Řídicí jednotka ERDPF filtru určeného pro vlak

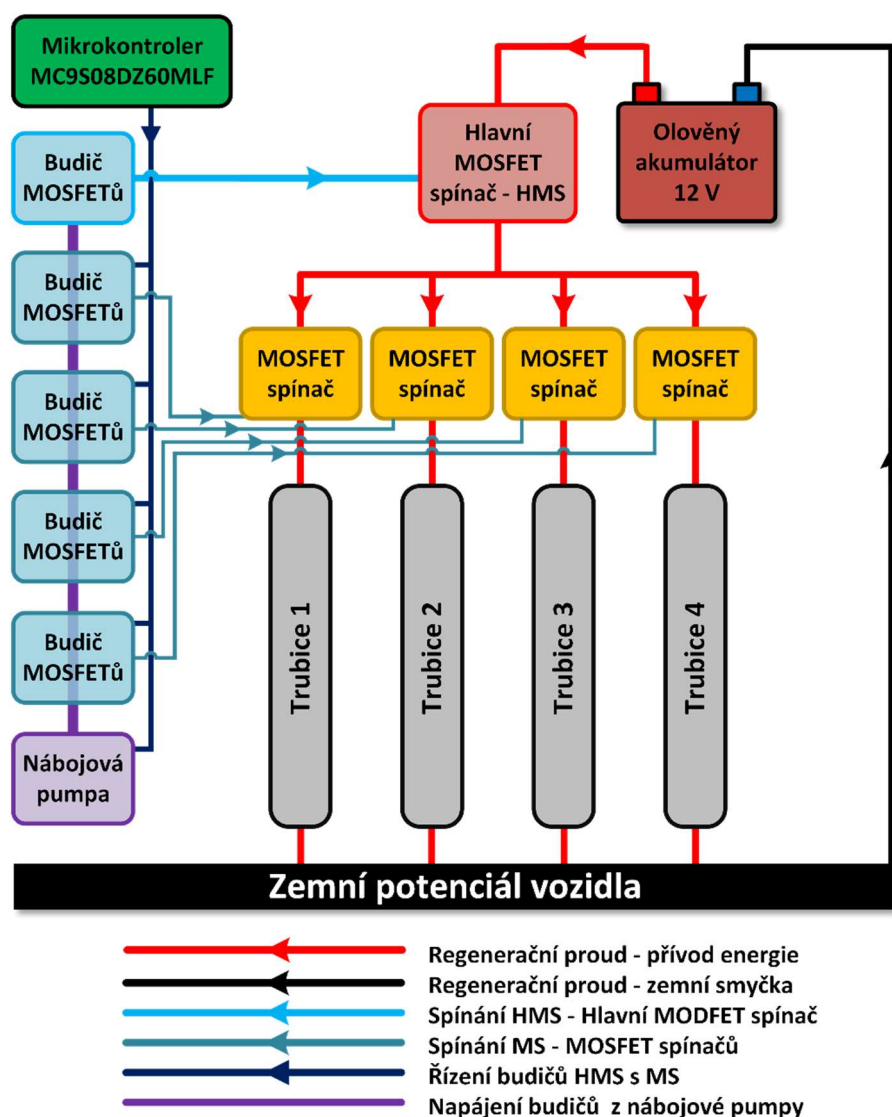
Práce na projektu elektricky regenerovatelných filtrů pevných částic vyvrcholila řešením projektu FR-TI1/089. V rámci tohoto projektu byly zaznamenány značné úspěchy, které byly kladně hodnoceny při obhajobě tohoto projektu. Jedním z mnoha měřitelných výstupů byl prototyp ERDPF filtru určený pro nasazení ve vlakové dopravě. Řídicí elektronika byla určena pro čtyři bloky sériového spojení dvou aktivních elementů (Obrázek 8-2). V rámci vývoje tohoto projektu bylo vyřešeno mnoho technických problémů. Bylo také provedeno rozsáhlé testování spolehlivosti celé koncepce ERDPF filtrů. Velká část testování probíhala na vozidle Mitsubishi Grandis, na kterém byl nainstalován filtr se čtyřmi aktivními elementy a třemi pasivními.



Obrázek 8-3 Řídicí elektronika ERDPF filtru určeného pro vozidlo Mitsubishi Grandis

8.2 Bez-reléová elektronika

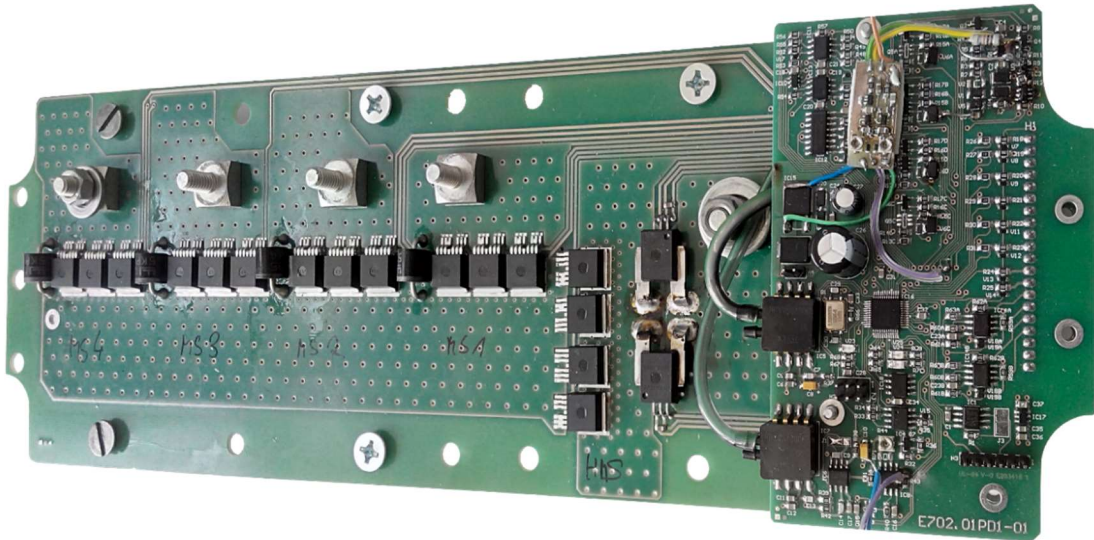
Po iniciaci přechodu celého elektronického systému na polovodičovou spínací technologii bylo nezbytné ověřit, zda je tato idea úspěšně realizovatelná. Hlavní změnou byla záměna výkonového relé LEV200A4NAF, které zajišťovalo spínání hlavní proudové regenerační smyčky, MOSFET tranzistory, které by umožnily použití elektronického systému za horších provozních podmínek (zejména teplotních a vibračních), které při integraci systému do těla samotného ERDPF filtru vyvstanou.



Obrázek 8-4 Blokové schéma elektroniky ERDPF filtru bez výkonového relé

Nový návrh (Blokové schéma Obrázek 8-4) jsem založil na sérioparalelním řazení výkonových tranzistorů IPB011N04N, výkonové relé tak bylo nahrazeno čtveřicí těchto tranzistorů a jednotlivé odbočky pro dílčí aktivní elementy byly složeny z trojice těchto

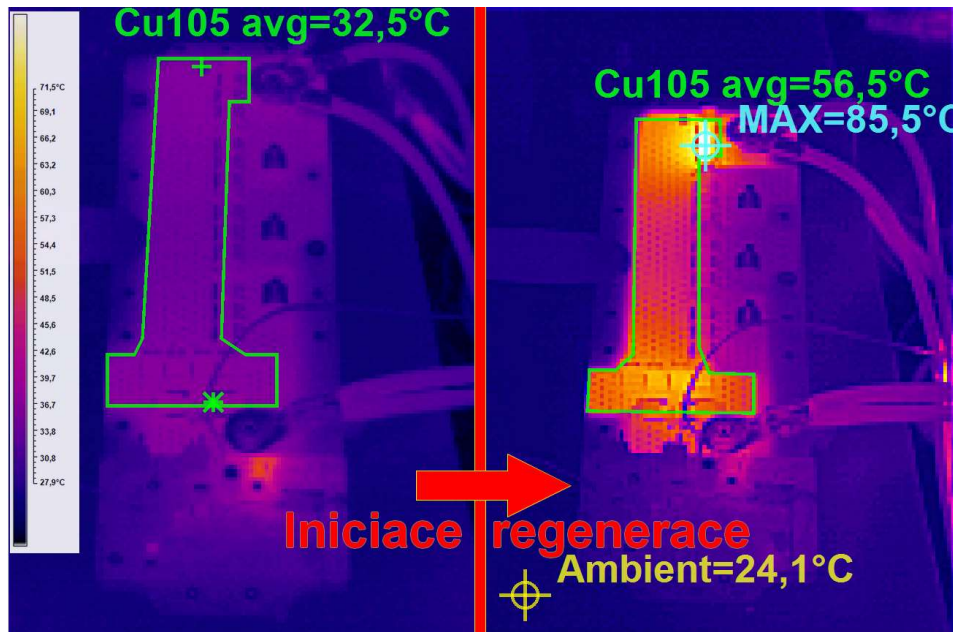
tranzistorů. Zde vyvstala otázka buzení jednotlivých spínačů, které jsou řazeny sériově a principiálně se po sepnutí obvodu chovají jako horní spínače. Správná velikost budící napětí je generována pomocí jediné nábojové pumpy, jež je detailně popsána ve finálním návrhu elektroniky (8.4 Spínání regenerační proudové smyčky).



Obrázek 8-5 Prototyp bez-reléové koncepce spínání ERDPF filtru

Po dokončení schématu byly následně navrženy desky plošného spoje (Obrázek 8-5). V průběhu laboratorního testování se ukázaly některé nedostatky principiálních funkcí elektronického systému. K hlavním nedostatkům patřilo nedostatečně výkonově dimenzované řízení MOSFET tranzistorů spolu s generováním „dead-time“ pro jednotlivé výkonové větve. Zde se projevovaly značné spínací ztráty způsobené překrýváním pracovních fází horních a spodních tranzistorů. Bylo nutné provést dodatečné úpravy zapojení a otestování celého elektronického ERDPF systému. To potvrdilo možnost přechodu zařízení na bez-reléový systém. V rámci testů jsem provedl termální analýzu plošného spoje v průběhu iniciace regenerace (Obrázek 8-6), která ukázala, že systém je schopný této funkce. Nicméně návrh plošného spoje vychází z původní koncepce (Obrázek 8-2) a není optimalizován zejména z hlediska dlouhých vzdáleností hlavní proudové smyčky na plošném spoji, to má za následek větší zahřívání desky plošného spoje a tudíž snížení použitelnosti systému při vyšších okolních teplotách (50 °C). Vzhledem k tomu, že regenerační proud při napájení ze dvou olověných akumulátorů bude dosahovat přibližně dvounásobné hodnoty oproti 12V verzi, tak by deska plošného výkonového spoje byla zatížena 4x větším ztrátovým a výkonem a tím by se překročila

mez maximální teploty 100 °C. Dalším limitujícím faktorem této koncepce je využívání stejné proudové cesty na plošném spoji pro všechny aktivní elementy a tím způsobené akumulace tepelné energie z jednotlivých regeneračních cyklů.



Obrázek 8-6 Termální analýza prototypu v průběhu iniciace aktivní regenerace nejvzdálenějšího AE

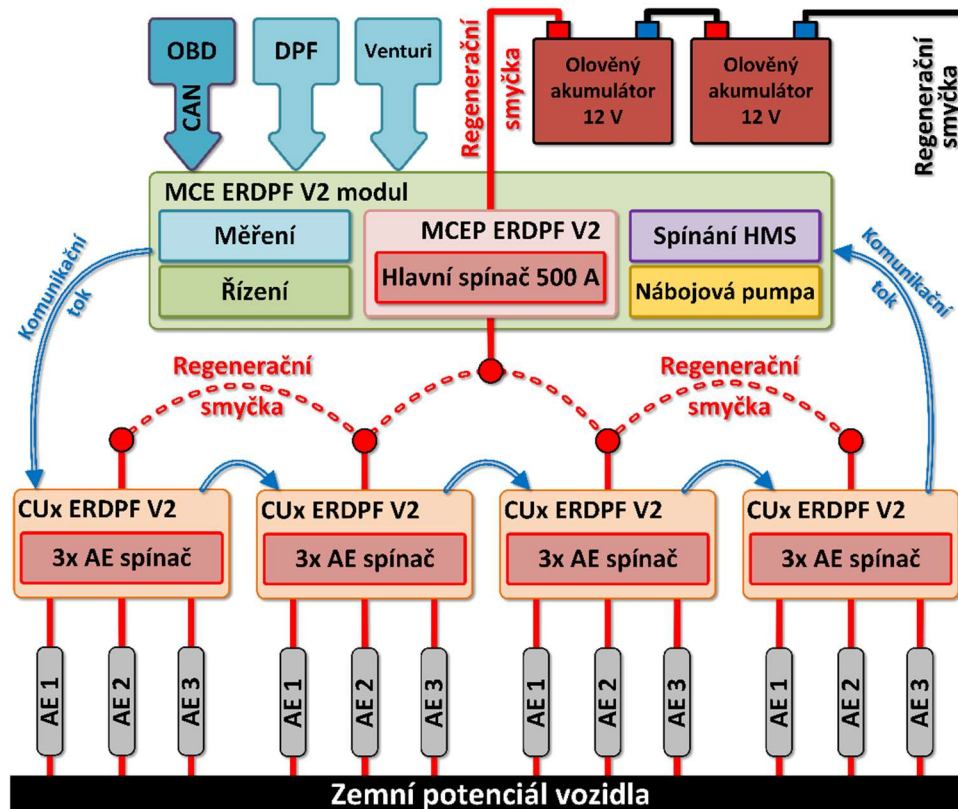
Dalším nedostatkem této koncepce bylo omezení maximálního počtu aktivních elementů čtyřmi sekundárními spínači. To nebylo dostatečné množství pro nainstalování filtru na motory s velkým objemem, z výpočtů emisních požadavků jsem odvodil, že je nezbytné použít přibližně jeden aktivní element na 0,5 l celkového objemu motoru. Celá koncepce založená na integraci všech výkonových prvků v rámci jediného plošného spoje tak nespĺňovala předpoklady pro potřebnou variabilitu produktové řady vhodné pro retrofitting.

Z těchto podnětů jsem vytvořil podklady pro návrh nové koncepce elektroniky 24V ERDPF V1, která by měla vyřešit nedostatky původního systému a umožnit nasazení filtru pro široké portfolio výkonostních tříd dieselových motorů.

8.3 Základní popis elektronického systému

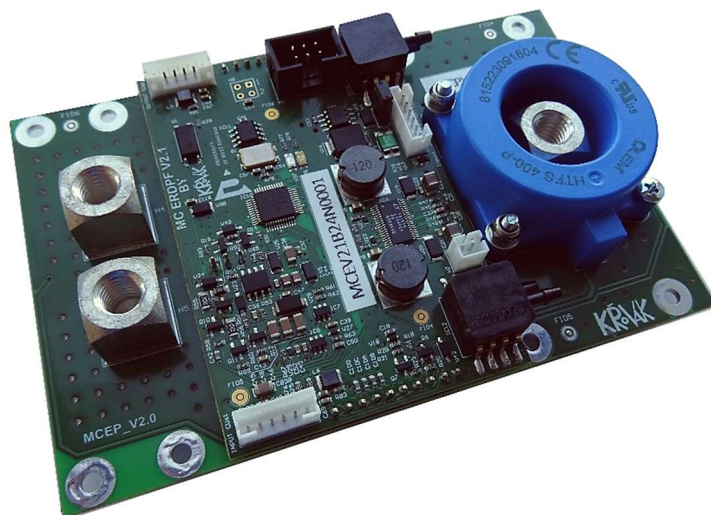
Koncepce elektronického systému 24V ERDPF V2 je rozdělena do dvou základních typů elektronických modulů. Hlavní modul, který slouží jako hlavní spínač proudové regenerační smyčky, a pak až 8 sekundárních modulů, kdy každý může řídit až tři aktivní elementy. To umožňuje maximální konfiguraci filtru s 24 aktivními elementy, které jsou schopné odfiltrovat PM z motoru o objemu 12 l, splňující normu Euro III. Systém je konstruován na připojení k 24V napájení v podobě dvou olověných akumulátorů (standartní vybavení nákladních vozidel).

Oba typy elektronických modulů jsou tvořeny dvěma plošnými spoji, jeden výkonový a jeden s elektronickým řízením. Oba moduly jsou nerozebíratelně propojeny pomocí pájených hřebíkových konektorů. Výkonový hlavní modul je osazen malým chladičem, který akumuluje teplo ze spínacích tranzistorů při iniciaci regenerace. Ten je dimenzován na obsluhu 24 aktivních elementů tak, aby během jedné hodiny mohla proběhnout regenerace všech aktivních elementů i při nepříznivých teplotných podmínkách v elektronické komoře (60–70 °C). Sekundární moduly jsou navrženy tak, aby umožnily



Obrázek 8-7 Blokové schéma zapojení 24 ERDPF V2 s 12 aktivními elementy

iniciaci regenerace všech tří připojených AE v jednom regeneračním cyklu, kdy jednotlivé regenerace AE následují hned po sobě. V praxi se však využívá postupné rozložení tepelné zátěže mezi jednotlivé sekundární moduly v rámci jednoho regeneračního cyklu, to znamená, že se regenerují na přeskáčku mezi všemi sekundárními moduly.



Obrázek 8-8 Hlavní modul 24V ERDPF V2 – kompletní set výkonové i řídicí elektroniky

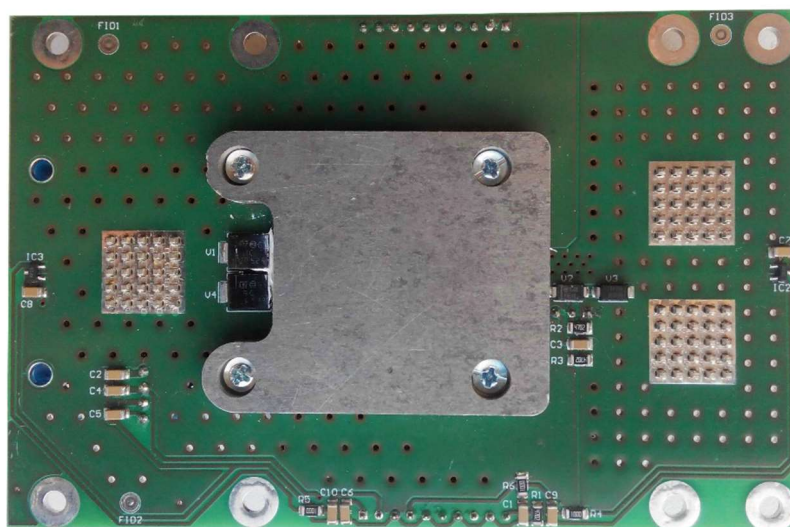
Konfigurace elektroniky pro jednotlivé výkonnostní typy filtrů je tvořena vždy jedním hlavním modulem a jedním až osmi sekundárními moduly. Celý systém je vzájemně propojen do kruhové topologie, kde jsou sekundární moduly vybaveny přerušovačem sběrnice. Takto zvolená hardwarová koncepce pak umožňuje rozpoznání a inicializaci předem nedefinovanému počtu sekundárních modulů (více v kapitole 9.2 Metoda autonomní inicializace).

Zpracování analogových výstupů ze sensorického vybavení ERDPF filtru je zpracováno v hlavním modulem. Stěžejní pro správnou funkci jsou údaje o hodnotách zpětných tlaků a o teplotě spalin. Navíc je systém vybaven analogovými zpětnovazebními signály, které monitorují provozní stav důležitých elektrických veličin samotného elektronického systému (více v kapitole 8.6 Sensorické vybavení).

Elektronický systém je umístěn v těle samotného ERDPF filtru a ve vozidle je integrován do palubní sítě velmi jednoduše. Hlavní výkonové napojení na palubní síť je realizováno dvěma kabely o průřezu 25 mm². Dále je systém vybaven datovým kabelem se 6 pinovým automobilovým konektorem, který obsahuje komunikační rozhraní CAN (high-speed 500 kbit/s) a napájením řídicí elektroniky (24 V) spolu s napojením na KL.15 vozidla, ze které má systém informaci o zapnutém klíčku v zapalovací skřínce vozidla.

8.4 Spínání regenerační proudové smyčky

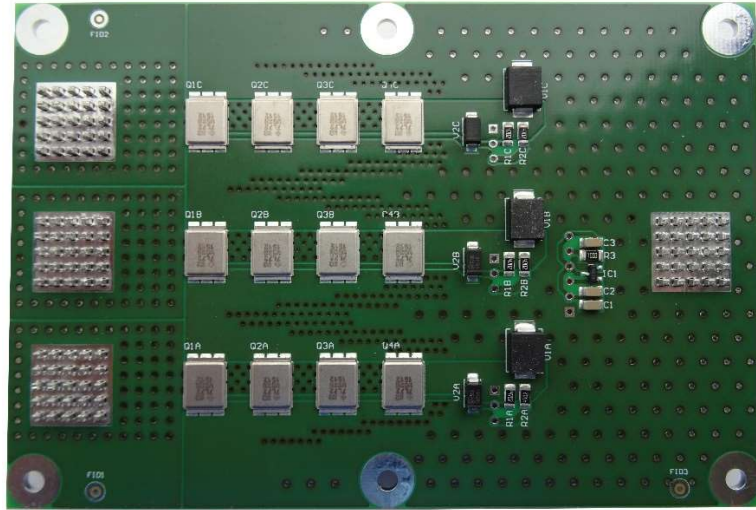
Stěžejním úkolem elektronického systému je připojování aktivních elementů ke zdroji elektrické energie v podobě dvou olovených akumulátorů spojených do série. Tím dojde ke spojení obvodu regenerační proudové smyčky a vybraným aktivním elementem začne protékat proud dosahující hodnot až 600 A (hlavním limitujícím faktorem je kvalita autobaterií). Doba sepnutí se pohybuje v rozmezí od 2 do 10 sekund a závisí na aktuálních provozních podmínkách panujících ve výfukovém systému (více v kapitole 6.2 Metody odhadu schopnosti dosažení iniciační teploty).



Obrázek 8-9 Detail výkonové elektroniky hlavního modulu MCEP ERDPF V2 - osazen chladičem

Spínání elektrického proudu je řešeno sériovou kombinací dvou horních spínačů. Hlavní spínač je součástí 24V MCEP ERDPF V2 modulu a je tvořen 5 directFET tranzistory IRF7749L2TRPBF, jejichž maximální proud jedním kanálem je 200 A a odpor kanálu s kvalitním řízením dosahuje hodnot $\approx 1,1 \text{ m}\Omega$ (elektronické schéma je v příloze 8.4 Spínání regenerační proudové smyčky). Jednotlivé aktivní elementy jsou připojovány pomocí sekundárních spínačů, které jsou součástí 24V CUxP ERDPF V2 modulů. Tyto moduly jsou tvořeny čtyřmi directFETy IRF7739L2TR1PBF, jejichž maximální hodnota proudu na kanál je 250 A (příloha 12.9 CUxP_ERDPF_V2 Sekundární spínač). Oba výkonové moduly jsou tak postavené na technologii „HEXFET® Power MOSFET“ s pouzdry DirectFET™, jedná se o produktovou řadu firmy International Rectifier a lze tak předpokládat dostatečnou podporu ze strany výrobce pro dlouhodobé využívání těchto elektronických komponent při výrobě. Výhodou je univerzalita pouzdra součástek, která dává značný příslib pro

budoucí inovace. Již při testování prototypu jsem vyzkoušel několik typů těchto součástek (IRF7739L2TR1PBF, IRF7749L1TRPBF, IRL7472L1TRPBF a IRF7749L2TRPBF) na stejném návrhu plošného spoje.



Obrázek 8-10 Detail výkonové elektroniky sekundárního modulu CUxP ERDPF V2

8.4.1 Centrální nábojová pumpa

Mechanická konstrukční omezení filtru neumožňují spínat aktivní elementy do zemního potenciálu (každý AE by musel být galvanicky oddělený od těla filtru), je tedy nutné, aby oba spínače byly buzeny jako horní spínač. Metoda spínání pomocí „bootstrapového“ kondenzátoru je určena pro periodické spínání bez trvalého sepnutí a spínání aktivních elementů, z důvodu velkých svodových proudů ji nelze využít. V době počátku vývoje 24V elektroniky v roce 2014 jsem provedl analýzu trhu s elektronickými součástkami a nepodařilo se mi dohledat použitelnou variantu integrovaného řízení horního spínače s potřebným minimálním ztrátovým výkonem.

Z výše uvedených důvodů byla navržena nábojová pumpa, jejíž výstupem je plovoucí napětí, které má o 13 V větší úroveň, než napěťová hladina mezi hlavním a sekundárním spínačem „U_S_HMS“. Tato úroveň napětí odpovídá v průběhu spínací fáze napětí zatížených olověných akumulátorů $\approx 16-20$ V. Elektrické schéma zapojení z vývojového prostředí Altium Designer je uvedeno v příloze (12.3 MCE_ERDPF_V2 Nábojová pumpa). Nábojová pumpa je založena na kondenzátorové topologii. Její výstupní napětí je pak pomocí kabelových propojení rozvedeno i do všech sekundárních modulů.

8.4.2 Řízení hlavního spínače

Průběh sepnutí regeneračního obvodu je postupný proces, kde jako první dojde k sepnutí sekundárního spínače vybraného aktivního elementu. Následně je sepnut spínač v hlavním modulu (HMS), který připne akumulátory na vstupy sekundárních modulů a regeneračním obvodem začne protékat proud.

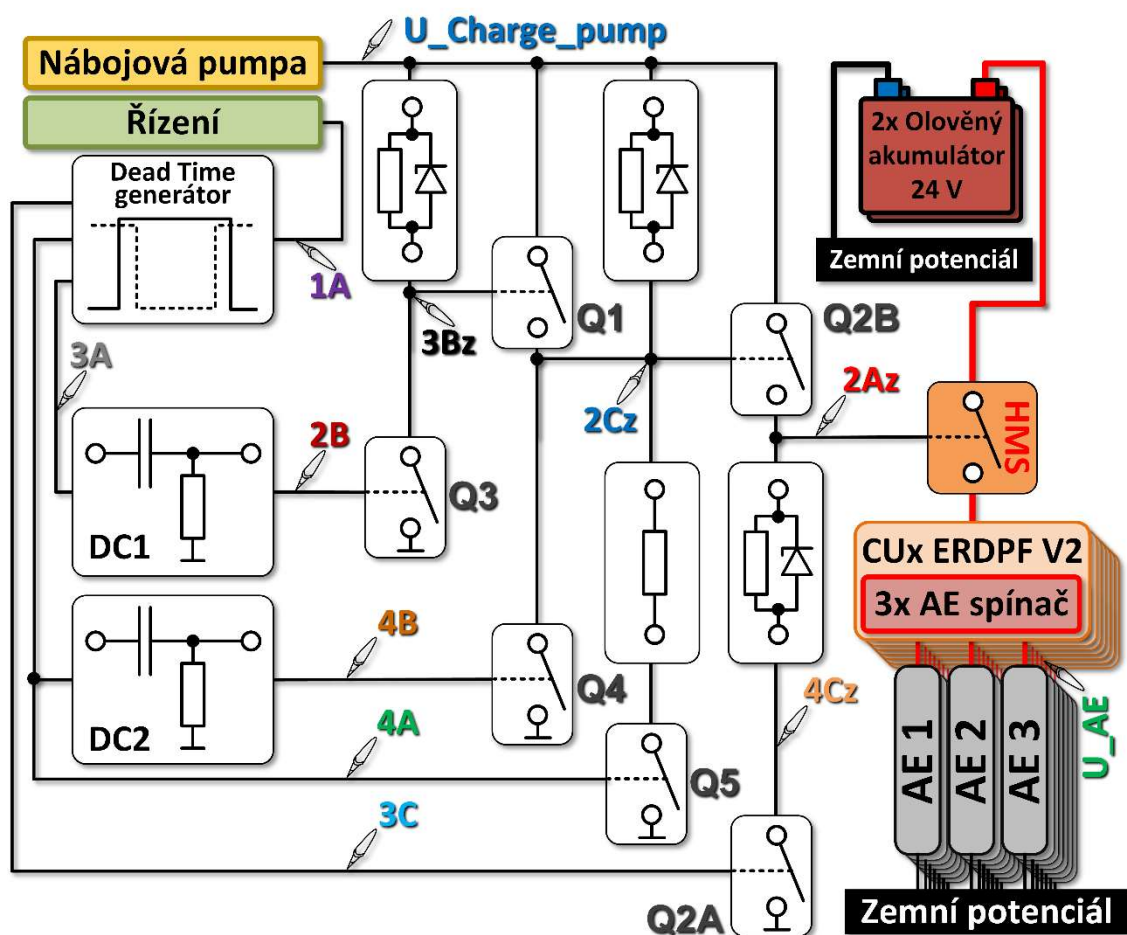
HMS je tvořen 5 tranzistory IRF7749L2TRPBF spojenými paralelně. Z katalogového listu vychází, že jejich společná kapacita hradla, která se musí nabít při sepnutí zatížené regenerační smyčky, je přibližně 100 nF. Pokud vycházíme z časové konstanty (τ) nejrychlejšího možného sepnutí 60 ns, které je definované výrobcem, tak po dosazení ve vztahu (8.1) vyjde maximální přípustný odpor pro spínací smyčku obvodu 0,6 Ω . To znamená, že řízení HMS by mělo být schopné pracovat s proudy okolo 23 A.

$$R_{HMS} [\Omega] = \frac{\tau [ns]}{C_{HMS\ Gate} [nF]} = \frac{60}{100} = 0,6 [\Omega] \quad (8.1)$$

Dalším faktorem limitujícím elektronický návrh je prahové napětí tranzistorů U_{GS} , kde se podle katalogových údajů začíná tranzistor otevírat již při napětí ≈ 2 V. Vzhledem k hodnotě regeneračního proudu se nesmí tyto hodnoty na tranzistorech objevit (mimo spínací a rozpínací fáze), jinak dojde v řádu milisekund ke zničení všech tranzistorů HMS, případně CUX modulů; experimentálně ověřeno.

Takovéto parametry se nedají dosáhnout pomocí běžné komplementární dvojice MOSFET tranzistorů, kde horní tranzistor (s kanálem typu P) připojuje řídicí napětí generované z nábojové pumpy a jeho řízení je realizováno pomocí tranzistoru a pull-up rezistoru. Takovéto zapojení umožní rychlé otevření tranzistoru, ale jeho zavření je omezeno maximálním proudem přes pull-up rezistor. Při snížení hodnoty rezistoru pak dochází k jeho zahřívání větším proudovým zatížením.

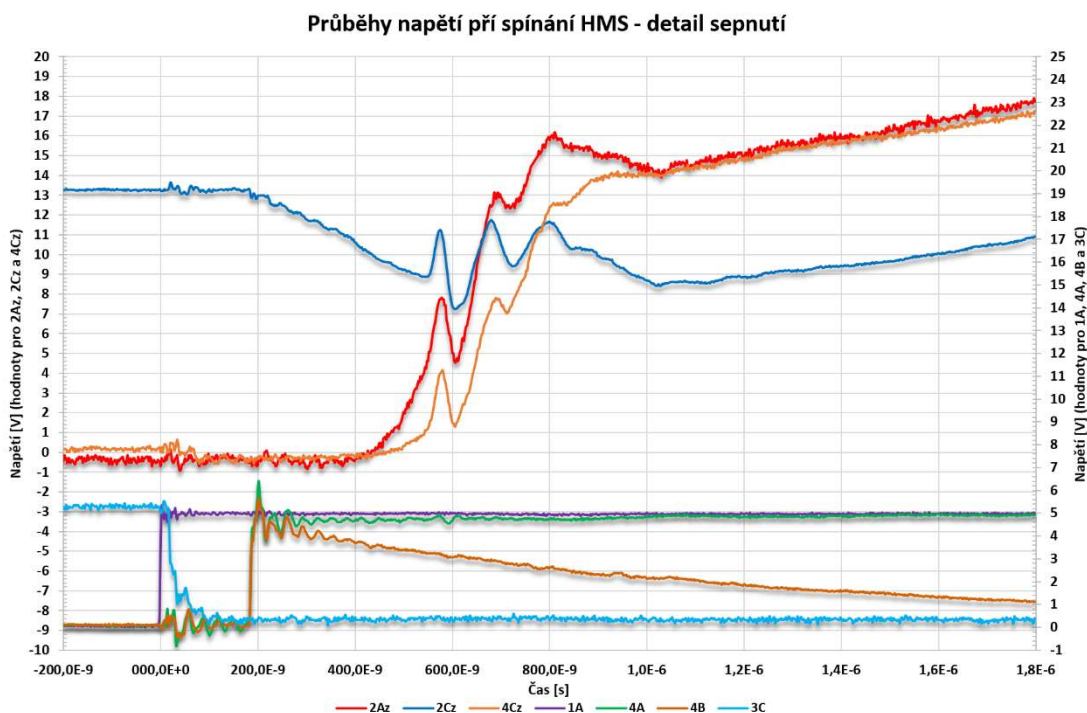
V rámci vývoje elektroniky jsem tak vyvinul zapojení, které nedokonalost výše zmíněného zapojení eliminuje. Idea vychází z toho, že nabíjení a vybíjení kapacity řídicího hradla tranzistoru je pouze krátký přechodový děj (řádově desítky ns) a pak již stačí udržovat definovaný stav, který není nijak výkonově závislý. Využil jsem tedy diskrétní řešení generátoru časového zpoždění, kde jsem jednotlivé mezifázové výstupy použil k řízení pomocných obvodů buzení. V zapojení (12.2 MCE_ERDPF_V2 Řízení HMS) jsem využil dva derivační členy, které zajišťují hranové spínání pomocných tranzistorů.



Obrázek 8-11 Blokové schéma řízení HMS s označenými signály - odpovídající grafům napěťových průběhů spínání

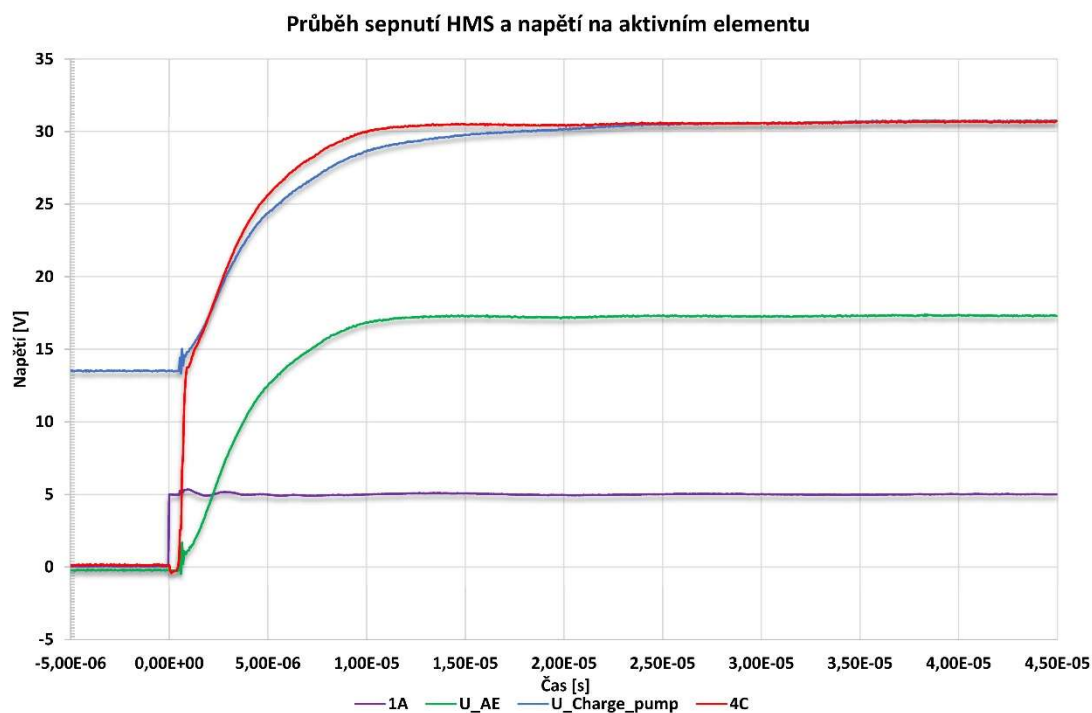
Funkce HMS je řízena pomocí signálu 1A, který generuje mikrokontrolér, a jeho hodnota může být ovlivněna pomocí bezpečnostních signálů přerušení (CUs_INT a EN_BURN_DIS).

Během sepnutí (Obrázek 8-12) dochází k přechodu signálu 1A do stavu log.1 (5 V). Aby mohl být otevřen horní tranzistor Q2B, který přivede na řídicí elektrodu HMS napětí nábojové pumpy, musí být nejprve uzavřen tranzistor Q2A pomocí signálu 3C. Následně je se zpožděním přibližně 200 ns sepnut tranzistor Q5 pomocí signálu 4A. Tento tranzistor pomocí rezistorového děliče udržuje trvale sepnutý tranzistor Q2B. Rychlé sepnutí tohoto tranzistoru Q2B je však zajištěno pomocí derivačního článku DC2, který je řízen stejným signálem 4A. Jeho výstup 4B následně ovládá tranzistor Q4, tím je zajištěno jak jeho rychlé sepnutí, tak i sepnutí trvalé. Tranzistor Q2B je tedy spínán tranzistorem Q4 a Q5 pomocí signálu 2Cz. Výsledné řídicí napětí HMS je vyneseno v grafu pod označením 2Az.



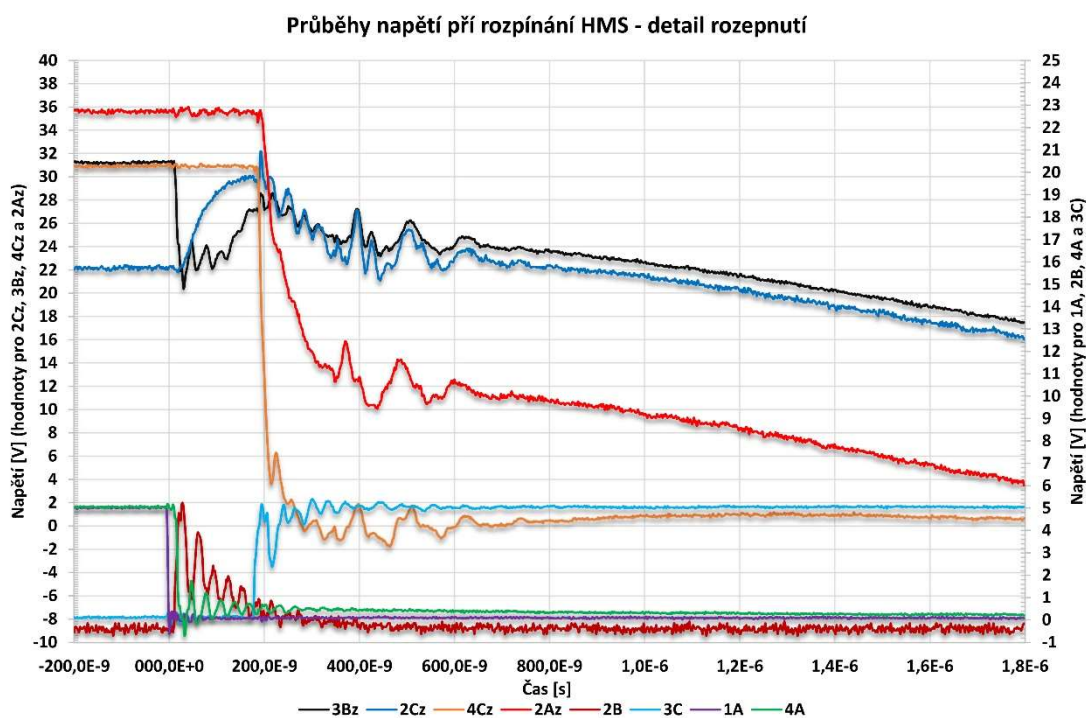
Obrázek 8-12 Detail řízení sepnutí HMS s jednotlivými řídicími signály (200ns/dílek)

Z průběhů v grafu (Obrázek 8-13) lze vidět spínací fázi regeneračního cyklu v menším časovém rozlišení (5 μ s/dílek), je zde již vidět náběh napětí na aktivním elementu U_AE. V grafu je též vynesena průběh napětí výstupu nábojové pumpy U_Charge_pump, která má výstupní hodnotu přibližně 13 V nad řídicím napětím HMS.

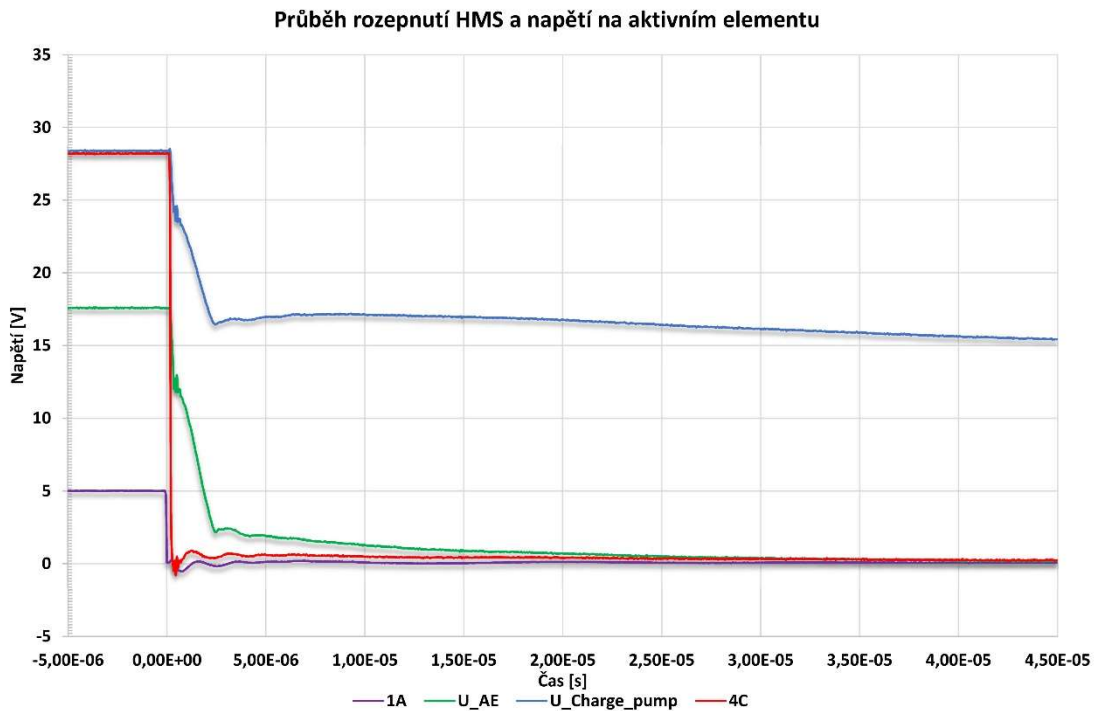


Obrázek 8-13 Průběh sepnutí HMS a průběh napětí na aktivním elementu (5 μ s/dílek)

Data průběhu rozepnutí HMS jsou vynesena v grafu (Obrázek 8-14). Prvotní impulz je přechod řídicího signálu 1A do stavu log. 0. Následuje rozepnutí tranzistoru Q5, který držel sepnutý tranzistor Q2B. Protože zavření tohoto tranzistoru jenom pomocí proudu přes rezistor R4 by trvalo násobně déle, tak je v obvodu využito dalšího derivačního článku DC1. Jeho výstupní signál 2B řídí spínání tranzistoru Q3 a ten následně sepne tranzistor Q1 pomocí signálu 3Bz. Tím dojde k rychlému zavření tranzistoru Q2B (200 ns), napěťový průběh je vynesena v grafu jako signál 2Cz. Po uzavření tranzistoru Q2B je pomocí zpožděného signálu 3C otevřen tranzistor Q2A, který uzemní napojení na řídicí elektrodu HMS přes paralelní kombinaci rezistoru se Zenerovo diodou, průběh 4Cz. Tento meziobvod je důležitý, protože jinak by došlo k překročení maximálního dovoleného napětí -20 V na řídicí elektrodě a zničení celého spínače. Průběh na řídicí elektrodě HMS je v grafu vynesena jako signál 2Az, z něj je patrná závislost tohoto napětí na postupném uzavírání HMS se současným poklesem napětí 3Bz a 2Cz, které kopírují po rozepnutí napětí nábojové pumpy U_Charge_pump. K rozepnutí a útlumu proudové regenerační smyčky tak dojde přibližně se zpožděním 1,8 μ s za řídicím signálem 1A. Rozepnutí měřené s delší časovou konstantou (5 μ s/dílek) je vyneseno v grafu (Obrázek 8-15). Jsou zde zaznamenány průběhy napětí na aktivním elementu U_AE a výstupu nábojové pumpy.

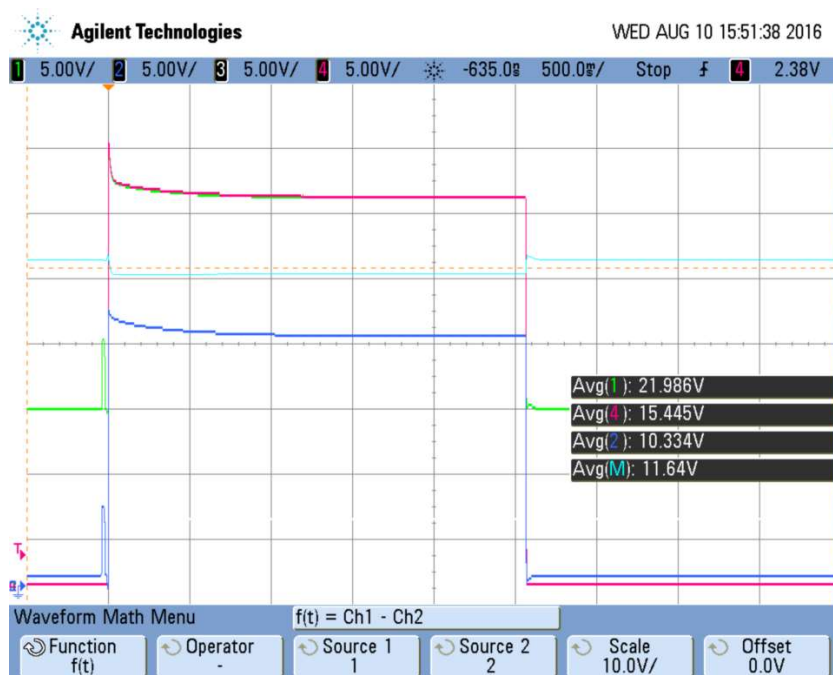


Obrázek 8-14 Detail řízení rozepnutí HMS s jednotlivými řídicími signály (200ns/dílek)



Obrázek 8-15 Průběh rozeptnutí HMS a průběh napětí na aktivním elementu (5 μ s/dílek)

Na snímku z osciloskopu (Obrázek 8-16) je zaznamenán celý průběh regenerace s časovou konstantou 500 ms/dílek, je zde již patrný pokles napětí na bateriích. Sonda (1) měří napětí nábojové pumpy, (4) napětí na řídicí elektrodě HMS a (2) je průběh napětí na vstupu sekundárního modulu (napětí aktivního elementu) během regenerace. Krátký napěťový impulz na začátku průběhu testuje funkčnost všech sekundárních modulů.



Obrázek 8-16 Sepnutí a rozeptnutí HMS s připojenou zátěží – Osciloskop

8.5 Kruhová topologie

Elektronický systém 24V ERDPF V2 je koncipován pro zapojení do kruhové topologie. Hlavním stavebním prvkem systému je hlavní modul MCE ERDPF V2, který má v sobě implementováno mimo jiné komunikační rozhraní ať už s palubní sítí vozidla nebo např. s SCR systémem (více v kapitole 8.10 Kompatibilita s SCR systémem). Je zde též umístěno řízení komunikačního rozhraní se sekundárními moduly v podobě IIC sběrnice.

Idea je založena na přerušovači hodinového signálu sběrnice (SCL) v každém sekundárním modulu v podobě OR hradla. Každý sekundární modul tak má možnost tuto sběrnici přerušit do dalšího připojeného modulu. Poslední modul je pak propojen zpět do hlavního modulu a tím je kruh propojení uzavřen. Více je popsáno v metodě autonomní inicializace ERDPF filtru (9.2.2 Způsob detekce modulů).



Obrázek 8-17 Vizualizace propojení modulů v kruhové topologii v těle ERDPF filtru - CAD

8.6 Senzorické vybavení

Aby byl systém schopný autonomního provozu bez napojení na informační síť vozidla (více v kapitole 9.1 Nezávislost na informační síti vozidla), je nezbytné, aby měl řídicí algoritmus všechny potřebné provozní údaje z vlastního sensorického vybavení.

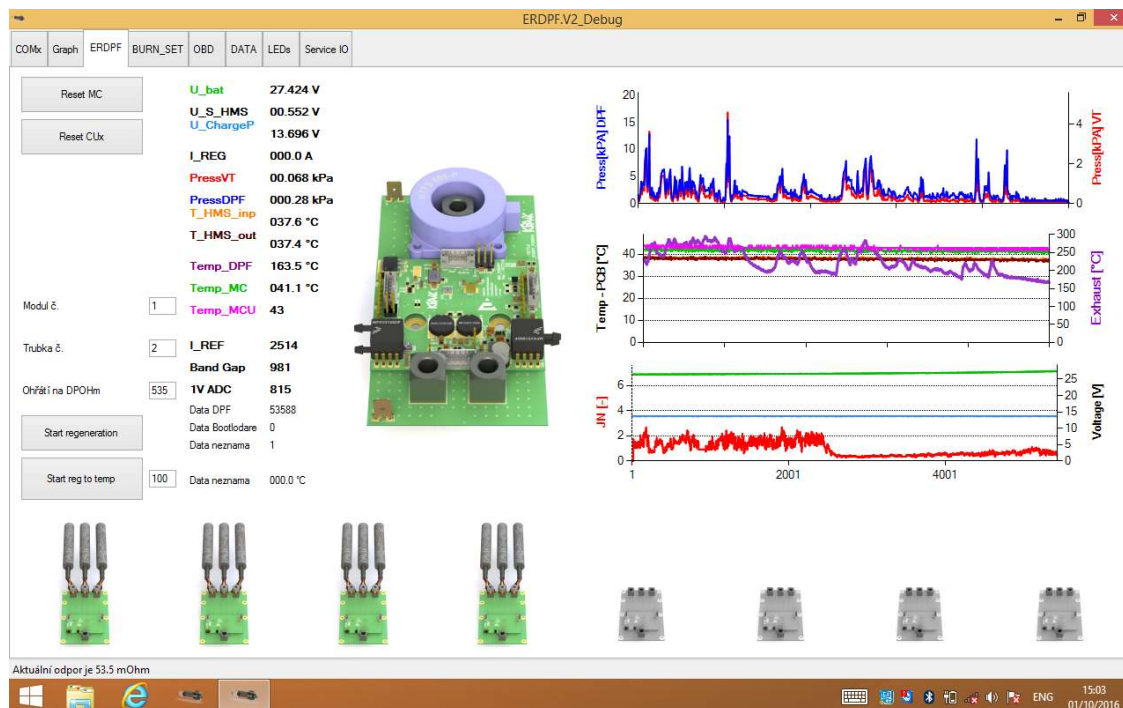
Systém je tedy mimo jiné vybaven dvojicí diferenciálních tlakoměrů MPXV5100DP a MPXV5010DP. MPXV5100DP je určen pro měření zpětného tlaku ve výfukovém potrubí, který je způsoben samotným ERDPF filtrem. Umožňuje měření v rozsahu 0–100 kPa, analogový výstup senzoru je zpracován ADC převodníkem v hlavním řídicím modulu. MPXV5010DP měří diferenciální tlak průtokoměru pracujícího na principu Venturiho

efektu s rozlišením tlaku 0–10 kPa. To je využito ke zpětné vazbě o aktuální zátěži motoru (ekvivalent hmotnostního průtokoměru).

Mezi další sensorické vybavení patří řada senzorů teplot jak spalin, kde je využito termočlánku typu K, tak teplot v různých částech elektronického systému. Měří se převážně teplota jednotlivých plošných spojů jak řídicích, tak výkonových, pro tento účel jsou využity teploměry MCP9700AT-E/TT s analogovým napěťovým výstupem, které jsou rovněž zpracovány mikrokontroléry jednotlivých modulů.

V neposlední řadě je systém rovněž vybaven snímáním napěťových úrovní v jednotlivých částech systému. Mezi nejdůležitější patří snímání napětí baterie, napětí na výstupu HMS a regeneračního proudu (více v kapitole 6.3 Měření teploty pomocí změny odporu aktivních elementů). Tyto údaje jsou nezbytné pro správnou funkci celého systému.

Pro potřeby otestování funkčnosti celého systému jsem naprogramoval řídicí/kontrolní aplikaci v programovacím jazyce C#. Aplikace je postavena převážně na grafických prvcích a řidič má tak stále aktuální přehled o jednotlivých provozních parametrech ERDPF filtru. Tato aplikace umožňuje i přímé řízení ERDPF filtru během jízdy vozidla, kde lze v manuálním režimu dotykově aktivovat regeneraci jednotlivých aktivních elementů. Data jsou během jízdy neustále logována.



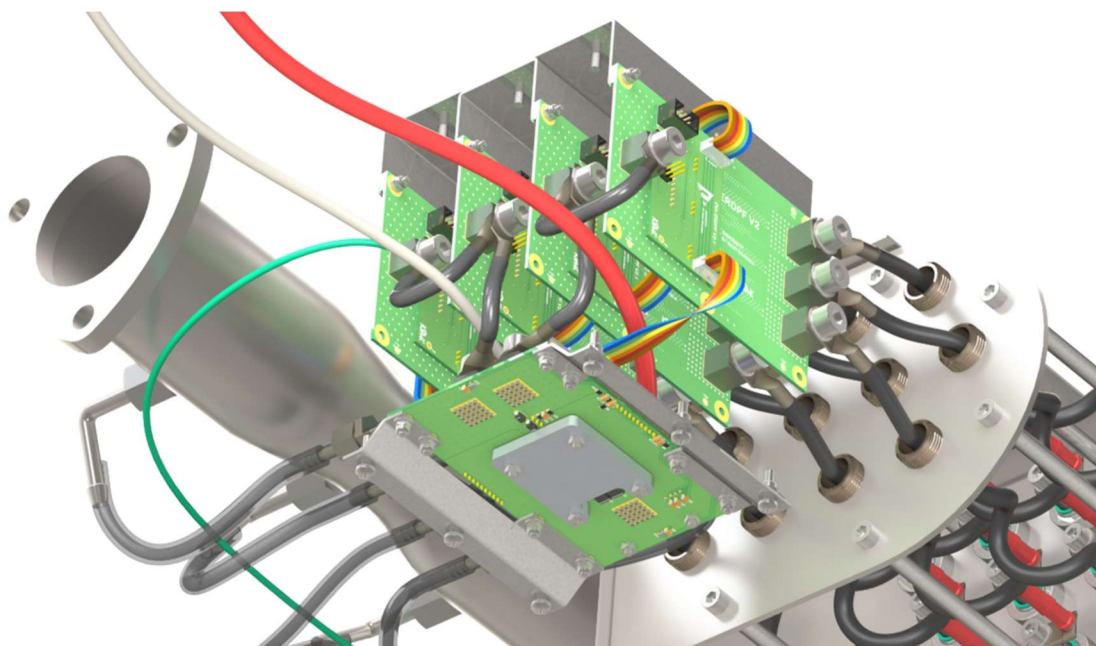
Obrázek 8-18 Snímek obrazovky z testovací aplikace určené pro ovládání ERDPF filtru

8.7 Instalace elektroniky ve filtru 12 AE ARYAN

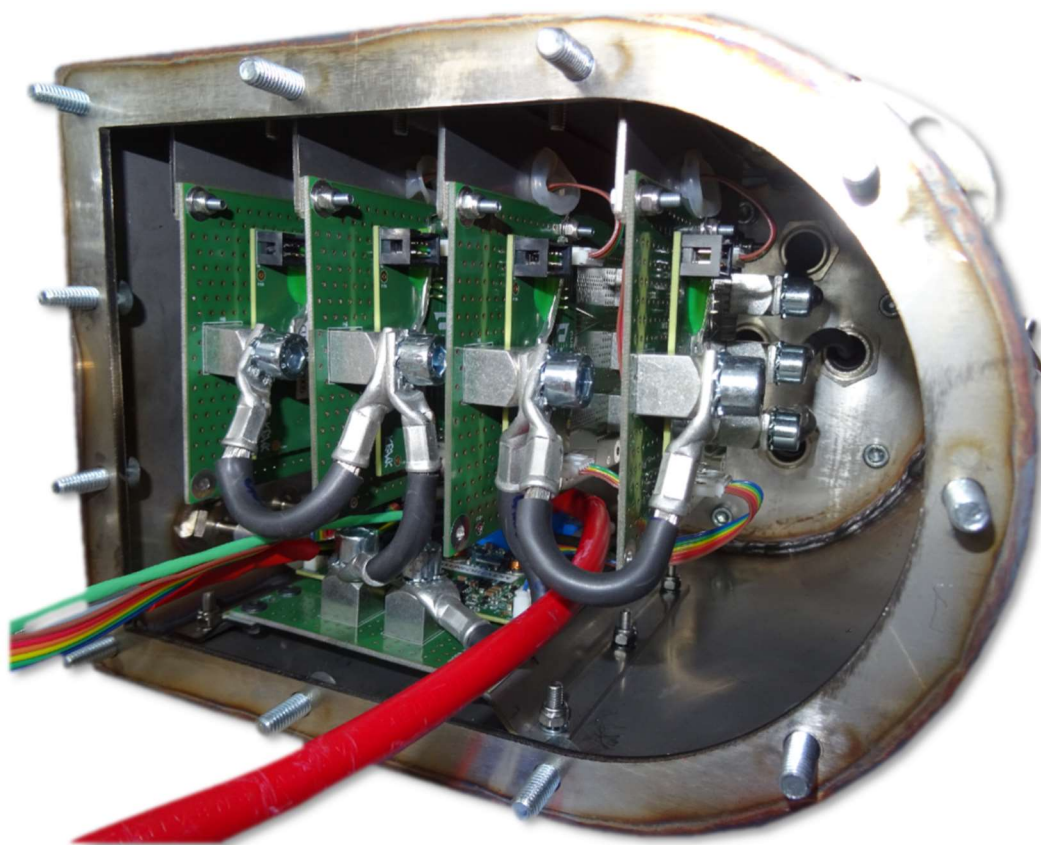
Filtr 12 AE ARYAN je posledním vývojovým článkem ERDPF filtrů, na kterém jsem ve svém disertačním projektu pracoval (7.3.5 12 AE ARYAN). V rámci tohoto návrhu filtru byly vyřešeny všechny výrobní a provozní aspekty na úrovni ověřovacích prototypů. Vývoj jak mechanické, tak elektronické koncepce jsem prováděl současně, tím jsem mohl docílit kompaktního integrovaného návrhu, který je vyrobitelný i provozuschopný.

Elektronický systém 24V ERDPF V2 je zde zapojen v konfiguraci pro 12 aktivních elementů, je tvořen jedním hlavním modulem a čtyřmi sekundárními moduly. Na modelu (Obrázek 8-19) je zachycena studie instalace systému včetně kabeláže, pro přehlednost scény byly zneviditelněny stěny elektronické komory.

Hlavní modul je umístěn na spodní straně elektronické komory pomocí dvoudílného držáku, ten zajišťuje bezpečný odstup spodní strany výkonového plošného spoje osazeného chladičem od stěny filtru. Držák jsem navrhl tak, aby byl po dotažení šroubových spojení samosvorný a nedocházelo tak k uvolňování spojení. Tento modul je propojen přes tlakové průchodky a silikonové hadice s diferenčními tlaky spalínové cesty. Výkonový vstup, který je přiveden středem snímače proudu LEM HTFS 400-P, je napájen pomocí kabelu o průřezu 25 mm². Výkonový výstup je zdvojený a je paralelně rozveden do jednotlivých sekundárních modulů pomocí dvou 16mm² kabelů.



Obrázek 8-19 Studie instalace elektroniky v těle 12 AE ARYAN filtru – CAD (bez stěn elektronické komory)



Obrázek 8-20 Instalace elektroniky 24V ERDPF V2 v těle filtru 12 AE ARYAN – prototyp pro IDEM

Sekundární moduly jsou přišroubovány ke zdvojenému držáku, který má v sobě vyřezané průchodky pro propojovací kabely. Ten je přišroubován k horní stěně filtru, sekundární moduly jsou tak pozičně umístěny nad hlavním modulem. Vzájemně jsou všechny sekundární moduly propojeny pomocí šestižilového plochého datového a výkonového 16mm² kabelu. Na jednotlivé výkonové výstupy CUxP ERDPF V2 modulů jsou připojeny kabely o průřezu 16 mm². Ty procházejí zadní stěnou elektronické komory kabelovými průchodkami a pokračují přes chladicí komoru k tyčovým koncům jednotlivých aktivních elementů. V chladicí komoře jsou všechny kabely vybaveny dilatační smyčkou, aby kompenzovaly značnou teplotní roztažnost aktivních elementů (7.2 Testování provozních podmínek a simulace ohřátí).

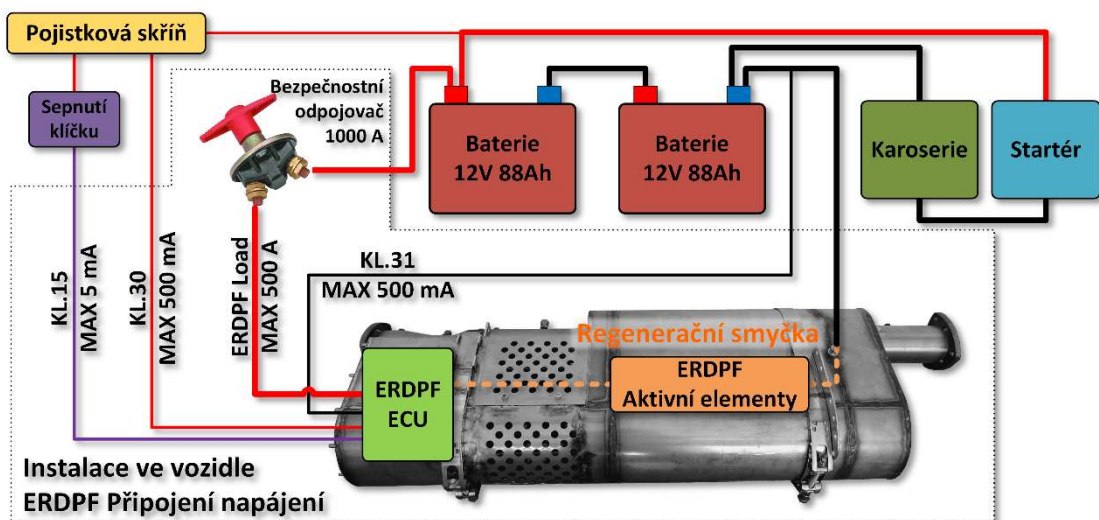
Elektronická komora je v konečné fázi výroby osazena šroubovacím krytem se dvěma kabelovými průchodkami. Elektronika je tak chráněna před průnikem vody do tohoto prostoru.

8.8 Zástavba filtru ve vozidle

Jedním z hlavních cílů bylo navržení celého systému tak, aby jeho implementace do vozidla byla co možná nejjednodušší. To se myslím povedlo splnit. ERDPF filtr je napojen na vozidlo pouze datovým šestižilovým kabelem a dvěma výkonovými kabely o průřezu 25 mm². Napojení na elektrickou síť vozidla je zachyceno v blokovém diagramu (Obrázek 8-21).

Výkonová kabeláž pro regenerační proudovou smyčku je na vozidle vybavena bezpečnostním odpojovačem s maximálním dovoleným proudovým zatížením 1 kA. Odpojovač je určen pro odpojení ERDPF filtru od baterie při odstavení vozidla. Kabely jsou připojeny přímo k vývodům baterie vozidla, jejich délka tedy záleží na vzdálenosti pozice umístění ERDPF filtru od autobaterií.

Elektronický systém ERDPF filtru dále využívá ke svému napájení elektrické potenciály přímo z pojistkové skříně vozidla KL. 30 a KL. 31. Navíc je do systému připojen signál ze spínací skřínky vozidla KL. 15. Pokud je ERDPF propojen s SCR systémem nebo palubní sítí vozidla, tak je navíc využit kroucený pár vodičů pro CAN sběrnici.

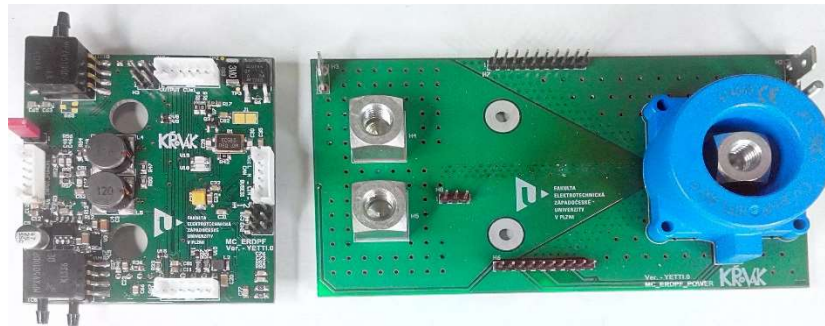


Obrázek 8-21 Zástavba 24V ERDPF V2 ve vozidle - propojení kabelů

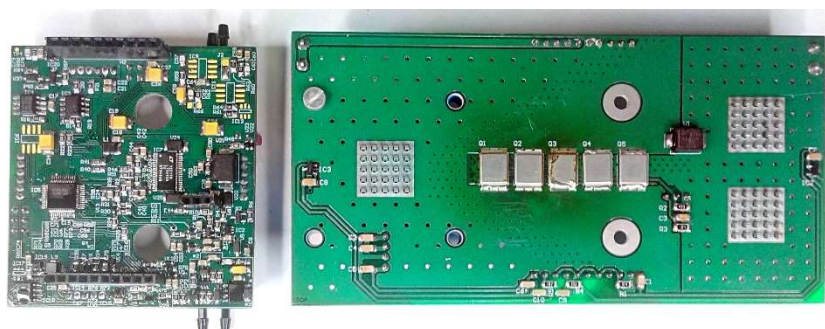
8.9 24V ERDPF V1

Tato verze elektronického systému byla prvním vývojovým stupněm 24V modulární elektroniky, kterou jsem navrhl v rámci mé disertační práce. Byla využita k ověřování jak elektronických, tak mechanických technologií. Verze 24V ERDPF V2 se liší pouze některými detaily elektronického zapojení. Kompletně jsem však přepracoval návrh všech plošných spojů. Hlavní důraz pak kladen na sériovou výrobu elektroniky na osazovací lince.

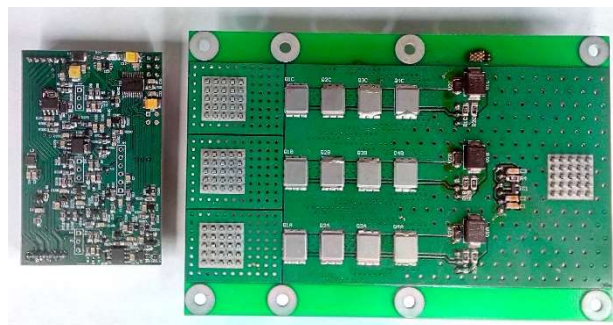
Mechanický návrh plošných spojů rovněž doznal změn po mechanické stránce, kde bylo zohledněno rozmístění montážních otvorů vzhledem ke konstrukci nového filtru 12 AE ARYAN.



Obrázek 8-22 Prototyp 24V ERDPF V1 MC modulu – hlavní modul TOP



Obrázek 8-23 Prototyp 24V ERDPF V1 MC modulu – hlavní modul BOT



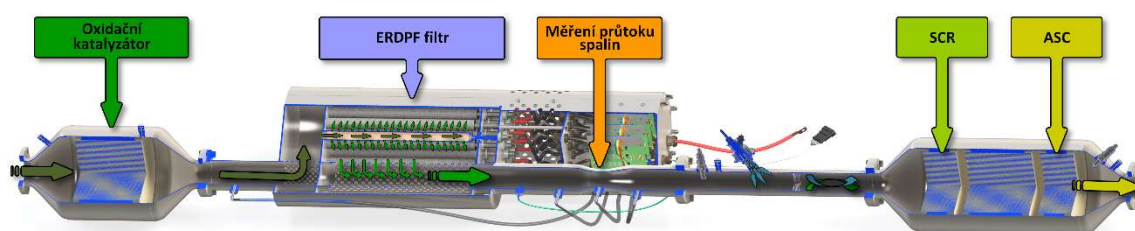
Obrázek 8-24 Prototyp 24V ERDPF V1 CUx modulu – sekundární modul BOT

8.10 Kompatibilita s SCR systémem

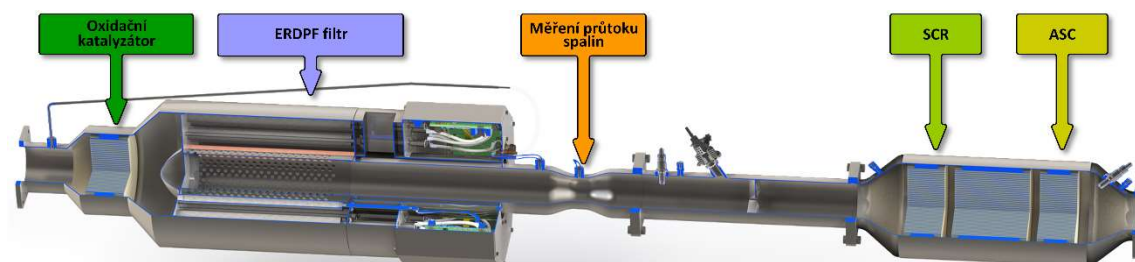
Návrh ERDPF filtru je v rámci aplikací snižujících emise úzce spjat s vývojem SCR systému. Cílem bylo navrhnout kompletní emisní systém, který bude nezávislý na provozních datech z řídicích jednotek vozidla. Systém tak bude schopen eliminovat všechny druhy škodlivých emisí vzhledem k aktuálním legislativním požadavkům.

Při vývoji jednotlivých částí byl kladen důraz na možnost synergie obou emisních systémů. Při nasazení na vozidle s oběma technologiemi využívají oba systémy stejné vstupní informace o spalínách (teplota a průtok). Byl proto definován společný komunikační protokol pro CAN sběrnici. Elektronický systém ERDPF filtru, který tyto informace primárně zpracovává, je následně distribuuje pomocí CAN sběrnice do řídicího SCR systému.

V případě navrhovaného filtru 21 AE ERDPF byl umístěn oxidační katalyzátor přímo v těle DPF filtru, ale vzhledem k výsledkům teplotních zkoušek tohoto filtru bylo od této koncepce nakonec upuštěno (7.2 Testování provozních podmínek a simulace ohřátí).



Obrázek 8-25 Propojení ERDPF filtru 12 AE ARYAN s SCR systémem - CAD (řez filtry)



Obrázek 8-26 Propojení ERDPF filtru 21 AE ERDPF s SCR systémem - CAD (řez filtry)

9 Metody autonomie ERDPF systému

Základní myšlenkou, na které je vystavěná celá koncepce systému elektricky regenerovatelných filtrů pevných částic, je autonomní provoz bez potřeby externích zdrojů informací z ostatních systémů vozidla. Jeden z hlavních impulzů pro vznik této ideje je složité získávání dokumentace ke komunikačnímu protokolu v rámci stávající informační infrastruktury vozidla, pokud nejste přímo OEM dodavatelem technologie.

Výzvou pro mne bylo navržení systému, který bude vykazovat znaky autonomní funkčnosti a umožní následnou produkci nových typů ERDPF filtrů bez nutnosti dalšího vývoje elektroniky, čímž se sníží výrobní náklady. Klíčové z tohoto pohledu je, aby byl systém schopen bez dodatečných úprav fungovat s širokou škálou různých typů dieselových pohonných jednotek a s tím spojenou různorodostí mechanických návrhů ERDPF filtrů. Nejdůležitější je v tomto ohledu vyhodnocení zaplnění filtru PM frakcemi a s tím související schopnost iniciovat aktivní regeneraci.

Dále jsem se zaměřil na vývoj automatické inicializace nově sestaveného ERDPF filtru, která nebude vyžadovat žádná externí vstupní data o konfiguraci celého systému. Elektronický systém tak sám rozpozná, z kolika sekundárních CUx modulů a aktivních elementů se skládá, a sám provede kalibraci ERDPF filtru až po zkompletování.

9.1 Nezávislost na informační síti vozidla

Jak již bylo řečeno, získat podklady k rozklíčování obsahu datové komunikace pro již prodané vozidlo je velmi složité, což je jeden z hlavních důvodů, proč musí být ERDPF filtr schopen pracovat bez těchto informací a může tak být nabízen jako produkt pro retrofitting. Aby systém mohl správně fungovat, je nezbytné mít data o aktuálním provozním stavu vozidla, nejdůležitější je informace o aktuálním výkonu vozidla. Ten je dobře vyjádřitelný pomocí hmotnostního průtoku plynu před motorem nebo až za ním (z hlediska emisní technologie je vhodnější druhá varianta). Běžně se k tomuto účelu využívá zařízení, které měří hmotnostní průtok vzduchu v samotném sání vozidla, jež je přímo integrováno do potrubí za prachovým filtrem (váha vzduchu). Tento způsob ovšem

vyžaduje komunikaci s řídicími jednotkami vozidla, na které nemůže být ERDPF systém závislý, a tak je nezbytné využít jinou metodu.

Tato problematika provází projekt již od svého počátku, v mém návrhu využívám metodu užívanou již v předchozích řešení ERDPF filtrů. Ta je založena na využití měření hmotnostního průtoku spalin na principu Venturiho efektu (Obrázek 9-1). DPF Venturiho trubice (VTDPF) není standardizovaná dle matematických předpokladů pro její funkci, a tak výstup z diferenčního tlakového senzoru není přímo úměrný skutečnému hmotnostnímu průtoku, nicméně průběh je korelovatelný s váhou vzduchu a dostatečný pro detekci aktuálního stavu vozidla (rozsah zátěže motoru).

Ve spojení s diferenčním tlakem na samotném ERDPF filtru má elektronický systém základní vstupní data pro vyhodnocení zatížení filtru PM frakcemi. Tato metoda má i své nesporné výhody, integrace celého systému do vozidla pak obnáší pouze zabudování samotného filtru do spalinové cesty a připojení filtru ke zdroji energie (nejčastěji samotné baterie vozidla).



Obrázek 9-1 Výroba prototypu měření hmotnostního průtoku spalin na principu Venturiho efektu

9.2 Metoda autonomní inicializace

Cílem mé práce bylo mimo jiné navržení takového produktu, který bude vyrobitelný v podmínkách sériové výroby. To znamená, že zařízení bude kompletováno pouze proškolenými pracovníky bez odborných znalostí. Nelze tedy očekávat možnost erudovaného nastavování jednotlivých parametrů ERDPF filtru dle dané mechanické konstrukce. Za těchto předpokladů byl navržen celý systém tak, aby byla kompletace filtru co nejjednodušším souborem rutinních nenáročných úkolů.

9.2.1 Základní předpoklad - univerzální elektronický systém

Metoda je založená na univerzalitě elektronického návrhu 24V ERDPF V2, což byl jeden z klíčových požadavků pro úspěšné nasazení systému do výroby. Z hlediska výrobních nákladů je neúnosné velké množství typů elektronických systémů. Pokud by tedy znamenala jiná mechanická konstrukce (počet aktivních elementů) jiný typ elektroniky, tak by se takové zařízení velmi prodražilo jak samotným elektronickým a softwarovým návrhem, tak i výrobními náklady. Více v kapitole o elektronickém systému (8 Elektronický systém 24V ERDPF V2).

9.2.2 Způsob detekce modulů

Po náběhu napájení jsou všechny sekundární moduly ve výchozím definovaném stavu, ve kterém jsou všechny výstupy odpojené a přerušovač IIC sběrnice je zapnutý – hodinový signál IIC sběrnice do dalšího modulu neprojde. Nejprve dojde k inicializaci hlavního modulu v kroku 1, kdy systém mimo jiné analyzuje úroveň napětí v měřených místech, zejména je důležité napětí akumulátorů, nábojové pumpy a signálu na kl.15.

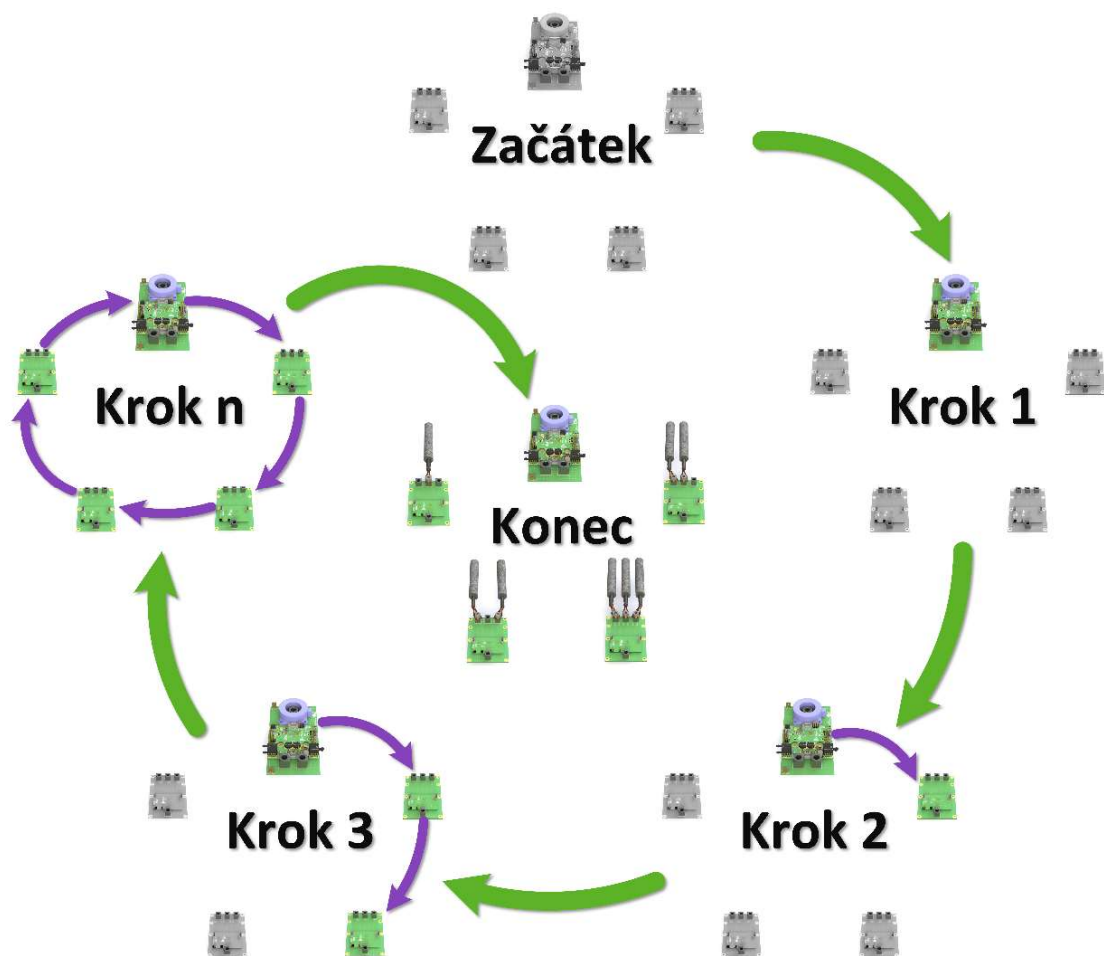
Po inicializaci hlavního modulu je nejprve ověřena neprůchodnost sběrnice IIC, při správném zapojení elektronického systému je signál SDA průchozí zpět do hlavního modulu a signál SCL ne. Poté je vyslána první inicializační zpráva v kroku 2. Pokud první sekundární modul odešle korektní data, je mu přiřazena unikátní IIC adresa, na které je mu následně poslán příkaz k uvolnění přerušovače IIC sběrnice. Poté hlavní modul vyzkouší, jestli je průchozí signálová smyčka SCL zpět do hlavního modulu, pokud ne, pokračuje systém v inicializaci dalšího sekundárního modulu.

V dalším kroku 3 systém vyšle stejnou inicializační zprávu jako v kroku 2, ale reaguje na ni již druhý modul (jako první neinicializovaný v pořadí), který tak dostane také svoji

unikátní IIC adresu. Též je mu na této nové adrese poslán příkaz ke zprůchodnění signálu SCL a je otestována jeho průchodnost zpět do hlavního modulu.

Tento cyklus se opakuje do té doby, dokud není průchozí signál SCL v maximálním počtu osmi kroků, který vyplývá z maximální možné mechanické konfigurace ERDPF filtru. Pokud není tento inicializační cyklus dokončen, tak je to vyhodnoceno jako chybový stav, který může být zapříčiněn několika poruchami. Například, že je špatně zapojené kabelové propojení nebo je některý ze sekundárních modulů v chybovém stavu.

V mikrokontroléru v hlavním modulu jsou tyto údaje o počtu připojených sekundárních modulů následně uloženy v EEPROM paměti. Při opakovaném zapnutí ERDPF filtru jsou tyto údaje porovnány s výsledkem nového inicializačního cyklu. Sekundární moduly nemají uložené žádné údaje v EEPROM paměti. Zde se ze servisních důvodů počítá s jednoduchou výměnou kteréhokoliv modulu za jiný bez jakýchkoliv zásahů do firmwaru nebo nastavení hlavního modulu.



Obrázek 9-2 Diagram principu postupné inicializace 24V ERDPF V2 elektronického systému

9.2.3 Způsob detekce přítomnosti aktivních elementů

Na konci inicializačního cyklu v případě úspěšného načtení všech sekundárních modulů jsou postupně spínány všechny potencionální regenerační proudové cesty (pro každý sekundární modul existují 3). Vždy je krátkodobě připojen pull-up rezistor na výstup HMS a následně sepnuté všechny tři výstupy aktivních elementů pro každý sekundární modul. V těch případech, kdy je připojen AE, je hodnota napětí na výstupu HMS, pokud připojen není, tak je zde změřeno napětí nábojové pumpy (přibližně 13 V).

Údaje o připojených AE jsou rovněž uloženy v EEPROM paměti hlavního modulu.

9.2.4 Inicializace iniciačního odporu aktivních elementů

Inicializace jednotlivých limitních hodnot odporu AE pro určení dosažení bodu iniciační teploty je založena na výpočtu potřebného dodaného výkonu k ohřátí daného AE (kapitola 6.2.2 Odhad potřebného času pro regeneraci). Pro inicializaci se počítá s tím, že přes ERDPF filtr neprotékají žádné spaliny a AE tak nejsou ochlazovány. Tím je zajištěno, že lze inicializaci provést jak ve výrobním prostředí, tak i v terénních podmínkách při instalaci na vozidle.

Systém má v sobě pevně definované množství energie, které musí být dodáno aktivnímu elementu pro dosažení iniciační teploty. Pro každý element je tak spuštěna regenerace a v jejím průběhu se integruje dodaná energie s krokem 20 ms. Po dodání potřebné energie je uložena aktuální hodnota odporu daného AE. Ta pak řídicímu algoritmu slouží jako výchozí hodnota odporu, které systém musí během regenerace dosáhnout.

9.3 Metoda SBMMAF – detekce zaplnění DPF filtru

Díky Venturiho efektu má systém k dispozici relativní údaj o aktuálním výkonu motoru v podobě diferenčního tlaku P_{VTDPF} , který ve spojení s velikostí zpětného tlaku před samotným ERDPF filtrem a teplotou spalin musí dostačovat ke spolehlivému řízení celého filtru.

Nicméně tyto hodnoty tlaků, mimo maximální dovolené limity (více v kapitole 5.2 Maximální hodnoty zpětného tlaku), nemají sami o sobě vypovídající hodnotu o aktuálním stavu DPF filtru při různorodých provozních podmínkách.

Je nezbytné navrhnout spolehlivé softwarové vyhodnocení aktuálního stavu ERDPF filtru. V ideálním případě by navržená metoda měla být univerzální a využitelná pro všechna mechanická provedení ERDPF filtru s různými konfiguracemi spalinové cesty.

9.3.1 Důvody pro návrh jiné metody detekce zaplnění

Jak bylo popsáno v předchozím textu v kapitole o testování původního elektronického systému určeného k řízení ERDPF filtrů (6.1.3 Detekce zaplnění DPF filtru), předchozí využívaná metoda nebyla optimální. Byla založená na rozdělení výkonových pásem motoru dle tlaku na VTDPF trubici a k jednotlivým pásmům byly nastaveny limity zpětných tlaků na ERDPF filtru. Vzorkování tlaků probíhalo s konstantní periodou, a pokud byla překročena definovaná suma nadlimitních tlaků za definované časové okno, stav filtru byl vyhodnocen jako plný a došlo k iniciaci aktivní regenerace. Pokud bylo vozidlo v konstantní zátěži, byl tento přístup funkční. Nicméně v reálném provozu (zejména městském) docházelo k situacím, kdy bylo již téměř dosaženo hranice regenerace, ale při delším čekání na semaforu nadlimitní tlaky dosahovány nebyly a sledované okno tlaků se během čekání posunulo, takže stav zaplnění filtru klesl a byl opět vyhodnocován jako prázdný.

Tyto výsledky byly rozporuplné, a proto jsem se zaměřil na vývoj nových algoritmů, které by poskytovaly relevantní status zaplnění filtru za jakýchkoli provozních podmínek.

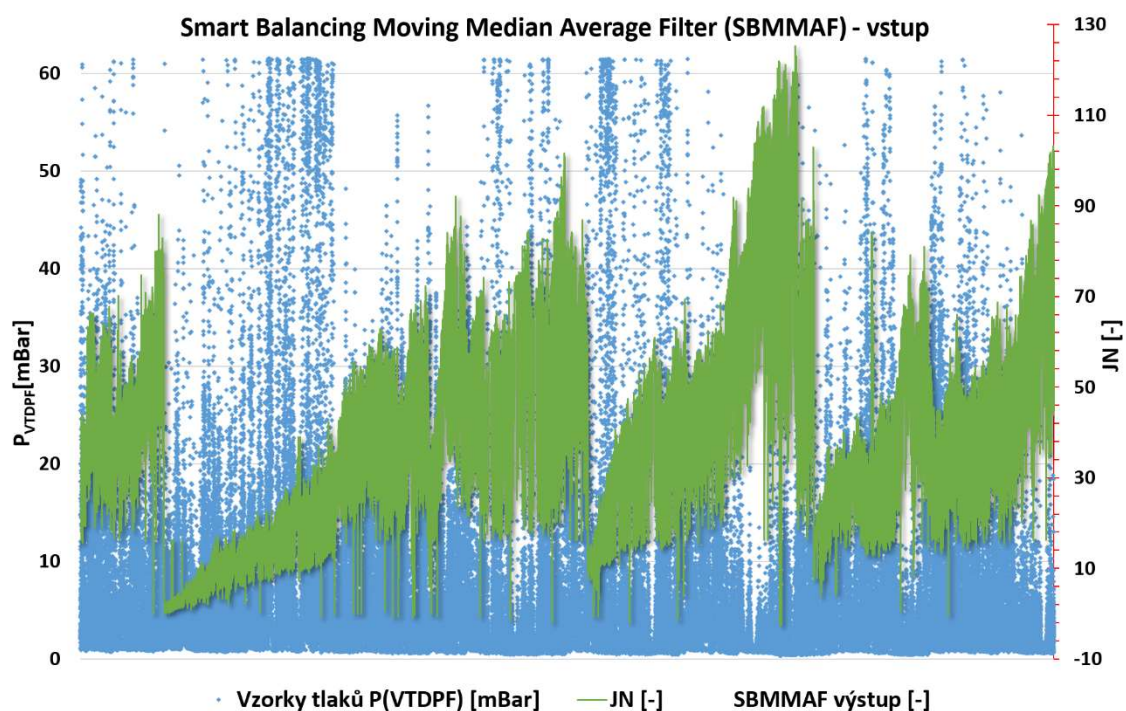
9.3.2 Idea nového přístupu

Při návrhu nové metody jsem se zaměřil na univerzálnost řešení využívající jednoduché matematické operace. To proto, aby navržený algoritmus nadměrně nezatěžoval řídicí mikrokontrolér v hlavním MC modulu.

Zaměřil jsem se na poměr obou měřených tlaků (P_{VTDPF} a P_{DPF}). Provedl jsem statistické zpracování naměřených dat pomocí jednoduchého vztahu (9.1), jehož výstup je označován jako „JN“. V grafu (Obrázek 9-3) je vynesena výstup této funkce, z níž je na první pohled patrné postupné zaplňování ERDPF filtru zachycenými PM frakcemi. Nicméně z průběhu je též patrné, že se vrůstajícím plněním filtru roste také rozptyl výstupních hodnot pro různé zatížení motoru, což znesnadňuje stanovení limitu pro iniciaci aktivní elektrické regenerace.

$$JN(t) = \frac{P_{DPF}(t)}{P_{VTDPF}(t)} \quad (9.1)$$

- ~ P_{DPF} [mBar] - diferenční tlak na ERDPF filtru
- ~ P_{VTDPF} [mBar] - diferenční tlak na hmotnostním průtokoměru
- ~ JN [-] - poměr výše uvedených tlaků (ekvivalent zaplnění filtru)

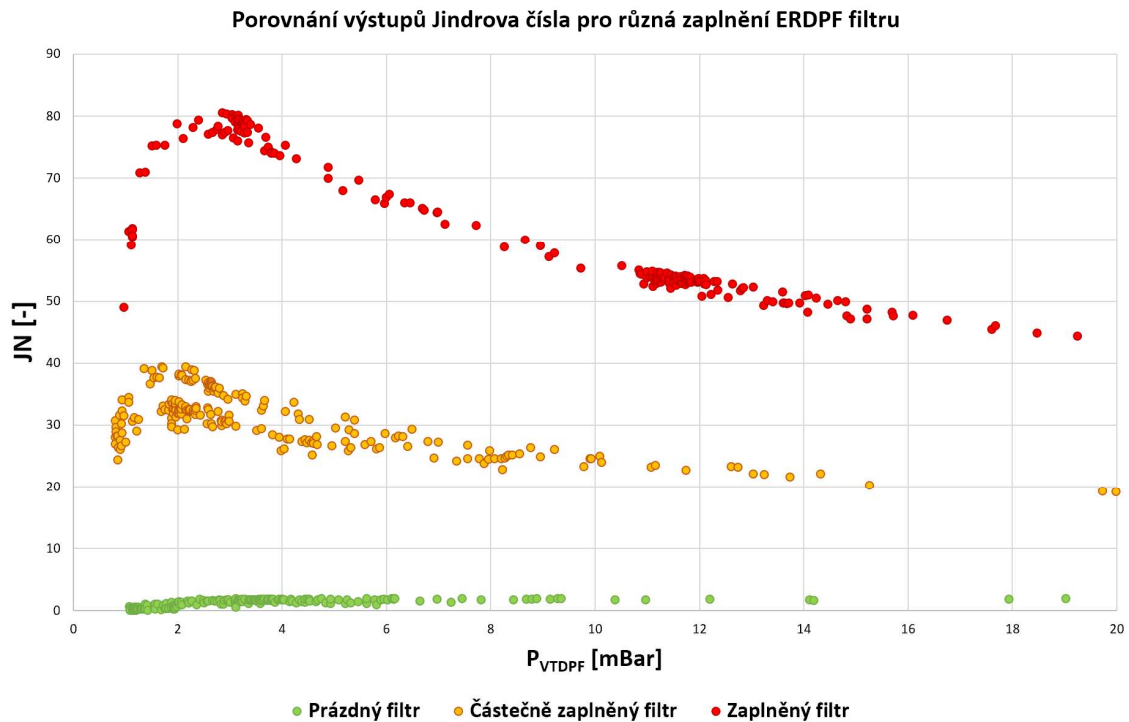


Obrázek 9-3 Průběhy výstupních hodnot JN pro tři cykly zaplnění a regenerace ERDPF filtru (cca 2tis km)

Na základě této interpretace dat bylo rozhodnuto, že směr vývoje algoritmu založeného na tomto základním vztahu je perspektivní metodou. Nicméně bylo nezbytné vyvinout rozšířenou metodu zpracování dat, která bude eliminovat rozptyl výstupních hodnot algoritmu pro celou škálu vstupních tlaků.

9.3.3 Výchozí úvaha o funkci SBMMAF filtru

Zaměřil jsem se tedy na hledání algoritmu, který by takovéto předpoklady splňoval. Na počátku jsem provedl srovnání rozptylu výstupních hodnot JN pro různé fáze zaplnění filtru (prázdný, středně zaplněný a plný), které jsem vynesl do grafu (Obrázek 9-4). Z grafu je též patrné, že se vzrůstajícím zaplněním filtru se zvyšuje rozptyl výstupních hodnot JN.



Obrázek 9-4 Porovnání výstupů JN pro různá zaplnění ERDPF filtru

Po rozsáhlé analýze naměřených dat jsem usoudil, že by vhodnou cestou mohla být metoda s klouzavým průměrem výstupů JN funkce (9.2), nicméně výstupy funkce byly zkreslovány lokálními extrémy. Navíc tento princip stále neřeší konstantní provozní podmínky (například volnoběh) a následný přechod do jiné zátěže motoru.

$$JN_{SMA_{out}} = \frac{\sum_{t=1}^{t_{MAX}} \frac{P_{DPF}(t)}{P_{VTDPF}(t)}}{t_{MAX}} \quad (9.2)$$

- ~ P_{DPF} [mBar] - diferenční tlak na ERDPF filtru
- ~ P_{VTDPF} [mBar] - diferenční tlak na hmotnostním průtokoměru
- ~ $JN_{SMA(out)}$ [-] - poměr výše uvedených tlaků (ekvivalent zaplnění filtru)
- ~ t_{MAX} [-] - velikost okna klouzavého průměru

V dalším kroku jsem volil mezi dvěma směry. V prvním jsem zvažoval omezení vstupních hodnot do algoritmu, což by odstranilo lokální extrémy. Současně by šlo vyřešit konstantní zátěž motoru v duchu fuzzy logiky a definovat odbočky algoritmu pro tyto

stavy. Nicméně by se tak stal algoritmus méně univerzálním, což se nejevilo jako optimální řešení, a tak jsem se rozhodl pro návrh zcela nové metody.

Tu jsem založil na ideji mediánového filtru, u kterého jsem předpokládal odstranění lokálních extrémů. Vytvořil jsem program ve vývojovém prostředí Visual Basic, který implementoval konfigurovatelný mediánový filtr. Ten jsem postupně vylepšoval, až jsem dospěl k výsledku, který jsem pojmenoval „Smart Balancing Moving Median Average Filter” (SBMMAF).

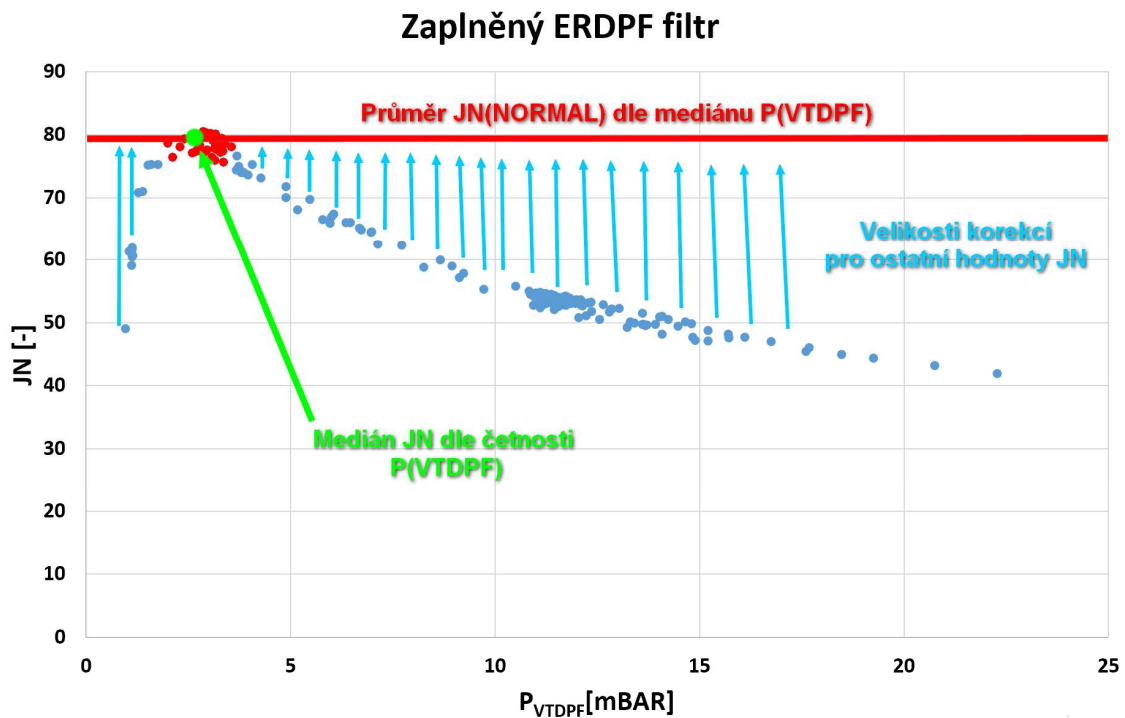
9.3.4 Inicializace algoritmu SBMMAF

Filtr je založen na výpočtu klouzavého průměru JN z hodnot mediánového filtru. Idea je taková, že algoritmus v průběhu své inicializace loguje data do mediánového filtru a po dosažení dostatečného počtu vstupních dat (parametrická veličina algoritmu) dojde k výpočtu průměrné hodnoty JN_{NORMAL} dle mediánu P_{VTDPF} a hodnot jemu blízkých k_{dif} (definováno jako procentní odchylka z rozsahu senzoru měření P_{VTDPF}) dle matematického vztahu (9.3), který odpovídá vyobrazení v grafu (Obrázek 9-5).

Po výpočtu JN_{NORMAL} je následně dopočtena korekční hodnota pro všechny vstupní tlaky P_{VTDPF} v mediánovém filtru kromě těch, které byly použity jako vstupní veličina normálových tlaků (v grafu znázorněny červenými body).

$$JN_{NORMAL} = \sum \left\{ \begin{array}{l} \frac{P_{DPF}(n)}{P_{VTDPF}(n)}; \forall n \in P_{VTDPF}(n) > \widetilde{P_{VTDPF}} * \left(1 - \frac{k_{dif}}{100}\right) \\ \wedge P_{VTDPF}(n) < \widetilde{P_{VTDPF}} * \left(1 + \frac{k_{dif}}{100}\right) \end{array} \right\} \quad (9.3)$$

~	P_{DPF}	[mBar]	- diferenční tlak na ERDPF filtru
~	P_{VTDPF}	[mBar]	- diferenční tlak na hmotnostním průtokoměru
~	$\widetilde{P_{VTDPF}}$	[mBar]	- referenční tlak (medián všech tlaků ve filtru)
~	JN_{NORMAL}	[-]	- referenční výstupní hodnota (zaplnění filtru)
~	k_{dif}	[%]	- vstupní poměr hodnot do výpočtu vztahený k mediánu $\widetilde{P_{VTDPF}}$ tlaku



Obrázek 9-5 Grafické znázornění výpočtu JN_{NORMAL} dle mediánu vstupních hodnot tlaků P_{VTDPF}

9.3.5 Nová vstupní hodnota

Po inicializaci algoritmu se každý příchozí údaj JN_{ACT} zařadí dle své hodnoty tlaku P_{VTDPF} do posloupnosti mediánového filtru. Jelikož je rozsah mediánového filtru omezen s tím, že všechny hodnoty jsou po inicializaci zaplněny, je nezbytné některou z nich nahradit nově příchozí.

Navrhl jsem tuto proceduru následovně. Každá vstupní hodnota má definován maximální počet cyklů, během kterých může ovlivnit výstupní hodnotu JN_{OUT} , a pokud je tato doba překročena, je nahrazena nově příchozím údajem. Ovšem pokud žádný z prvků tuto dobu nepřekročil, je nový údaj vřazen do posloupnosti seřazených prvků v rámci mediánového filtru na místo prvku, který je buď prvním, anebo posledním prvkem této řady. O tom, který z těchto dvou prvků bude nahrazen, rozhoduje umístění nového prvku, pokud je údaj P_{VTDPF} větší než aktuální prvek mediánu (střed řady), pak je nahrazen

poslední prvek a naopak. Tento princip spolehlivě eliminuje lokální extrém, které jsou z řady mediánového filtru odstraněny velmi záhy.

Takže v tomto bodě algoritmu má nově přichodící prvek definované své umístění v rámci řady mediánového filtru, nicméně aby mohl být součástí výpočtu výsledné hodnoty algoritmu JN_{OUT} , musí být dopočtena jeho korekční konstanta.

9.3.6 Výpočet korekční konstanty

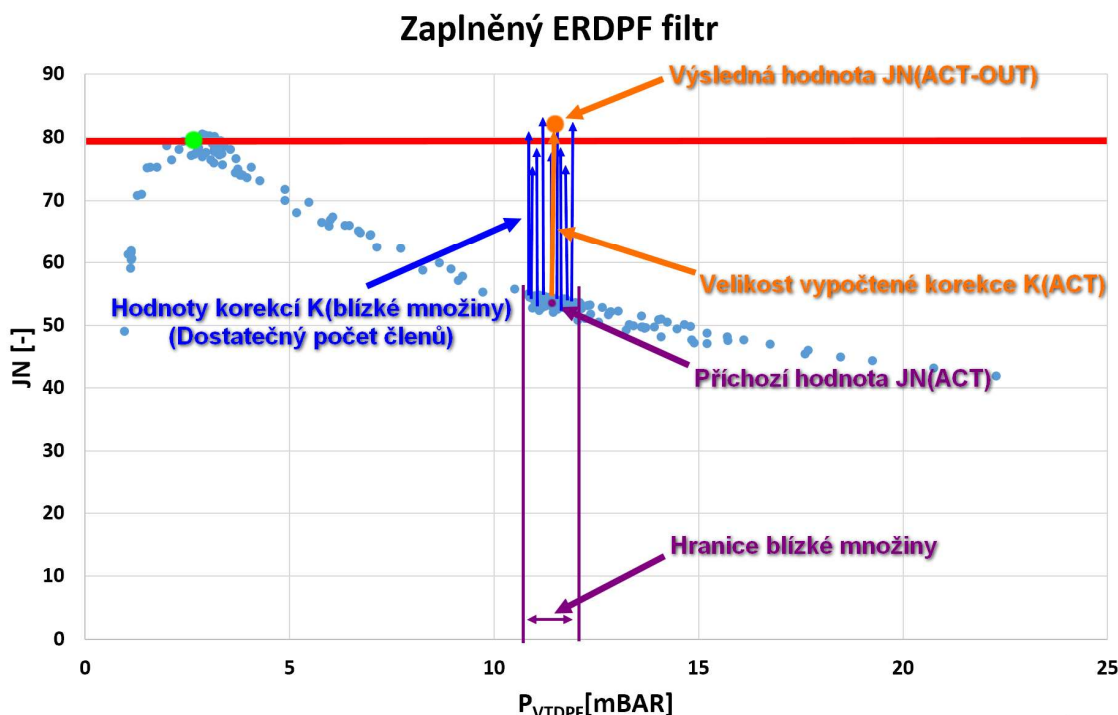
Každý vstupní údaj má svoji unikátní korekční konstantu, aby celý rozsah vstupních tlaků P_{VTDPF} udával ve stejné fázi zaplnění filtru obdobné výsledky. Návrh výpočtu této konstanty představuje náročný úkol, neboť to vyžaduje velké množství naměřených dat. Algoritmus je možné zdokonalovat v průběhu testování ERDPF filtrů na vozidlech tak, aby byl následně splněn předpoklad pro jeho univerzalitu a možné využití v široké škále aplikací.

Korekční konstantu v současnosti dopočítávám třemi způsoby odvislými od četnosti výskytu tlaků P_{VTDPF} v okolních množinách právě dopočítávané korekce. Tyto množiny jsou definovány dvě: blízká a vzdálená. Pokud je aktuální hodnota P_{VTDPF} blízkou hodnotou velké množiny blízkých tlaků, tak je z množiny blízkých tlaků dopočtena přímo korekce pro aktuální údaj ($K_K(t)$) jako aritmetický průměr korekcí této blízké množiny. Matematické vyjádření výpočtu korekce je dle vzorce (9.4), výsledná hodnota $JN_{ACT(OUT)}$ je dopočtena dle vzorce (9.5). Tato hodnota je pak započítána do celkového výsledku algoritmu SBMMAF, která odpovídá znázornění v grafu červenou linií (Obrázek 9-6).

$$K_K(t) = \sum \left\{ \frac{K_K(n)}{n}; \forall n: \in P_{VTDPF}(n) > (P_{VTDPF}(t) - K_{NEAR}) \right. \\ \left. \wedge P_{VTDPF}(n) < (P_{VTDPF}(t) + K_{NEAR}) \right\} \quad (9.4)$$

$$JN_{ACTOUT}(t) = K_K(t) + JN_{ACT}(t) \quad (9.5)$$

- ~ P_{DPF} [mBar] - diferenční tlak na ERDPF filtru
- ~ P_{VTDPF} [mBar] - diferenční tlak na hmotnostním průtokoměru
- ~ $K_K(t)$ [-] - korekce aktuální vstupní hodnoty $JN_{ACT}(t)$
- ~ $K_K(n)$ [-] - korekce pro danou hodnotu v mediánovém filtru
- ~ K_{NEAR} [mBar] - rozsah blízké množiny dle tlaků P_{VTDPF}
- ~ $JN_{ACT}(t)$ [-] - hodnota JN čísla pro aktuální vstupní tlaky
- ~ $JN_{ACTOUT}(t)$ [-] - výsledná výstupní hodnota pro aktuální vstupní tlaky



Obrázek 9-6 Výpočet korekční hodnoty $K_K(t)$ pro $JN_{ACT}(t)$ z blízké množiny dle hodnot P_{VTDPF} tlaků

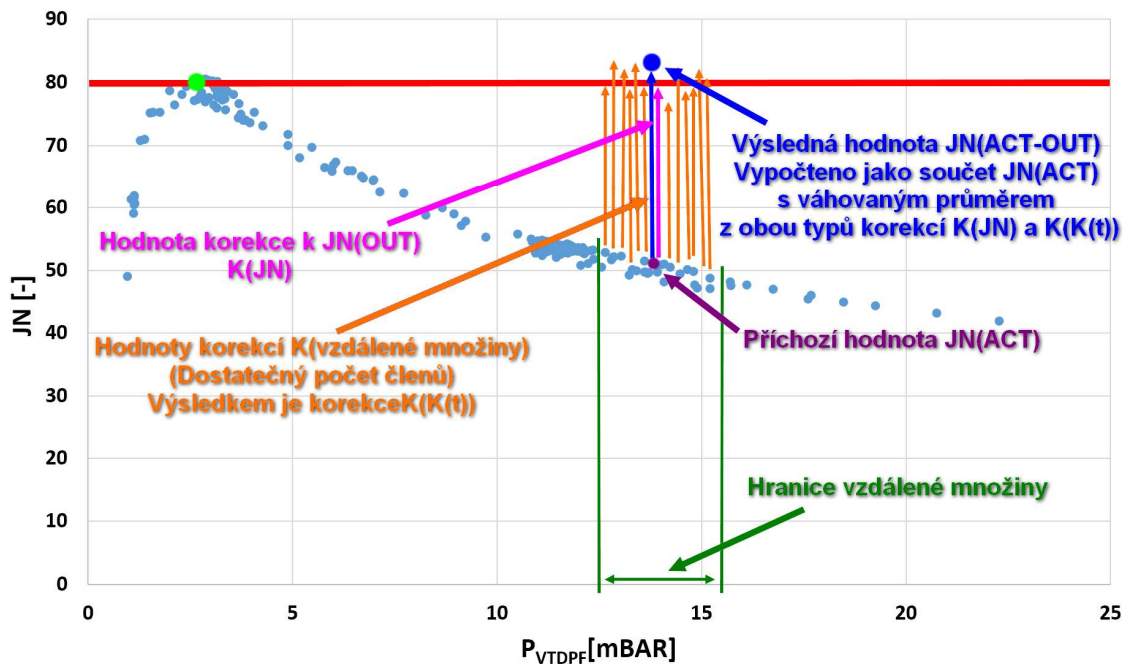
Pokud není v blízké množině dostatečný počet prvků, ale je dostatečný počet prvků ve vzdálené množině, tak je korekce dopočtena v definovaném poměru z aritmetického průměru korekcí vzdálené množiny (9.6) a výstupní hodnotě JN_{OUT} SBMMAF algoritmu. Tento princip částečně respektuje plnění filtru i normalizaci hodnoty vůči ostatním prvkům v mediánovém filtru (9.7).

$$K_K(t) = \sum \left\{ \frac{K_K(n)}{n}; \forall n \in P_{VTDPF}(n) > (P_{VTDPF}(t) - K_{DIST}) \right. \\ \left. \wedge P_{VTDPF}(n) < (P_{VTDPF}(t) + K_{DIST}) \right\} \quad (9.6)$$

$$JN_{ACT_{OUT}} = \frac{K_K(t) * W_{ACT} + \{JN_{ACT}(t) - JN_{OUT}(t-1)\} * W_{JN}}{W_2 + W_{JN}} + JN_{ACT}(t) \quad (9.7)$$

- ~ P_{DPF} [mBar] - diferenční tlak na ERDPF filtru
- ~ P_{VTDPF} [mBar] - diferenční tlak na hmotnostním průtokoměru
- ~ $K_K(t)$ [-] - korekce aktuální vstupní hodnoty $JN_{ACT}(t)$
- ~ $K_K(n)$ [-] - korekce pro danou hodnotu v mediánovém filtru
- ~ K_{DIST} [mBar] - rozsah vzdálené množiny dle tlaků P_{VTDPF}
- ~ W_{ACT} [-] - váhový koeficient korekce vzdálené množiny
- ~ W_{JN} [-] - váhový koeficient rozdílu $JN_{ACT}(t)$ k výstupu SBMMAF algoritmu
- ~ $JN_{ACT}(t)$ [-] - hodnota JN čísla pro aktuální vstupní tlaky
- ~ $JN_{ACT_{OUT}}(t)$ [-] - výsledná výstupní hodnota pro aktuální vstupní tlaky
- ~ $JN_{OUT}(t-1)$ [-] - celková výstupní hodnota SBMMAF algoritmu z předchozího kroku

Zaplněný ERDPF filtr

Obrázek 9-7 Výpočet korekční hodnoty $K_K(t)$ pro $JN_{ACT}(t)$ ze vzdálené množiny podle P_{VTDPF} tlaků

Třetím případem je situace, kdy ani vzdálená množina neposkytuje dostatečný počet prvků pro výpočet korekce (Obrázek 9-8). Pak je korekce dopočtena jako rozdíl výstupní hodnoty JN_{OUT} a JN_{ACT} (9.8). Tato výsledná hodnota nerespektuje plnění filtru a pouze normalizuje aktuální hodnotu vůči ostatním prvkům v mediánovém filtru (9.9).

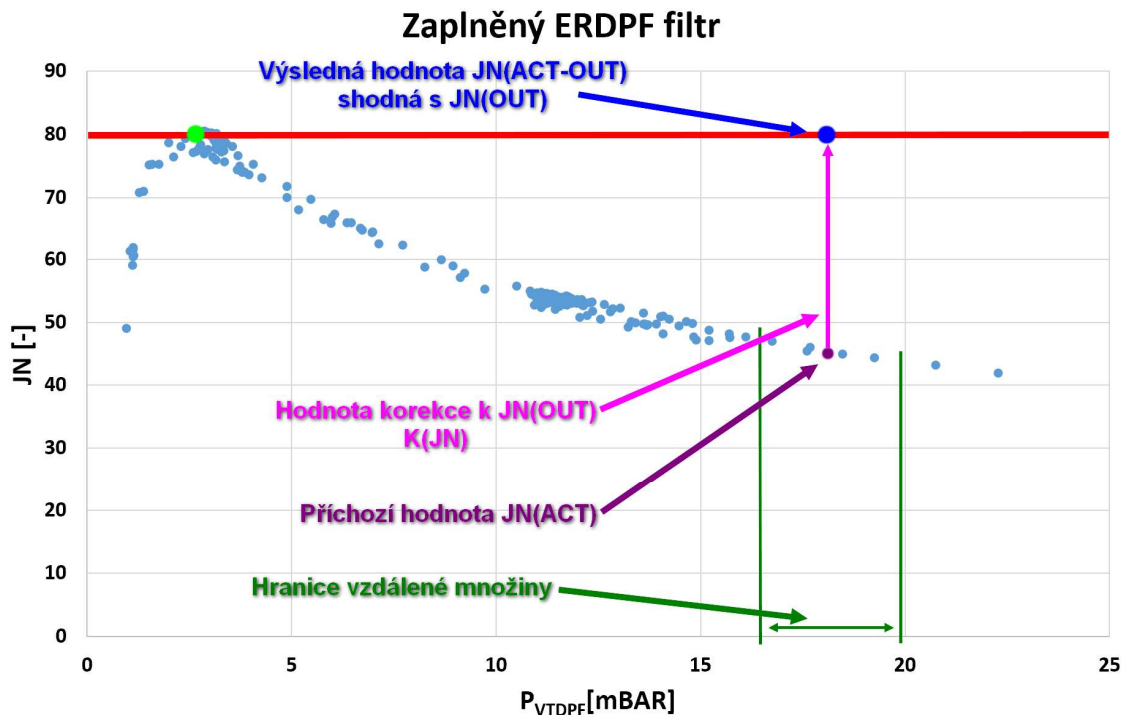
$$K_K(t) = \frac{P_{DPPF}(t)}{P_{VTDPF}(t)} - JN_{OUT}(t-1) \quad (9.8)$$

$$JN_{ACT_{OUT}}(t) = K_K(t) + JN_{ACT}(t) = JN_{OUT}(t-1) \quad (9.9)$$

- ~ P_{DPPF} [mBar] - diferenční tlak na ERDPF filtru
- ~ P_{VTDPF} [mBar] - diferenční tlak na hmotnostním průtokoměru
- ~ $K_K(t)$ [-] - korekce aktuální vstupní hodnoty $JN_{ACT}(t)$
- ~ $JN_{ACT}(t)$ [-] - hodnota JN čísla pro aktuální vstupní tlaky
- ~ $JN_{ACT_{OUT}}(t)$ [-] - výsledná výstupní hodnota pro aktuální vstupní tlaky
- ~ $JN_{OUT}(t-1)$ [-] - celková výstupní hodnota SBMMAF algoritmu z předchozího kroku

Tato situace by nastala například při dlouhém provozu při volnoběžných otáčkách (nákladní automobil čeká na naložení s nastartovaným motorem), kdy následně dojde k prudké změně jízdního profilu (naložený nákladní automobil se rozjede). Pak jsou nově příchozí data nejprve plně korigována vzhledem k předchozímu stavu zaplnění filtrů a následně po naplnění mediánového filtru dostatečným množstvím referenčních dat již

probíhá výpočet s korekcemi dopočítávanými pouze z blízké množiny. To znamená, že algoritmus již respektuje plnění filtru.

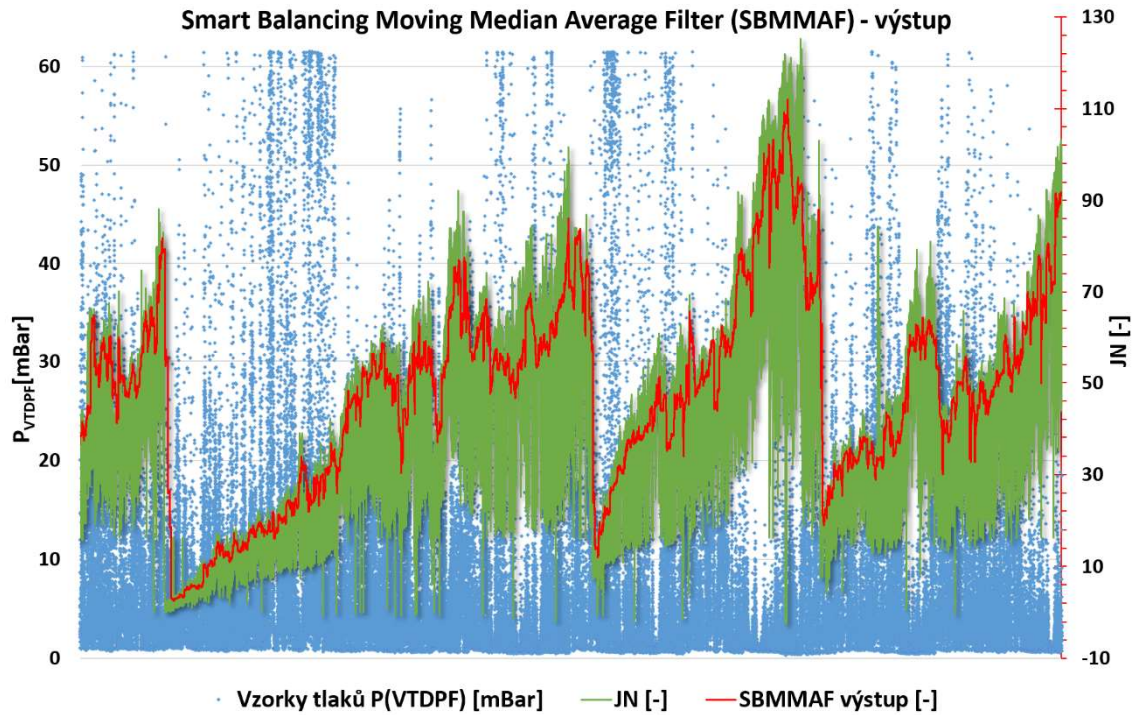


Obrázek 9-8 Výpočet korekční hodnoty $K_k(t)$ pro $JN_{ACT}(t)$ bez dostatečného počtu P_{VTDPF} tlaků

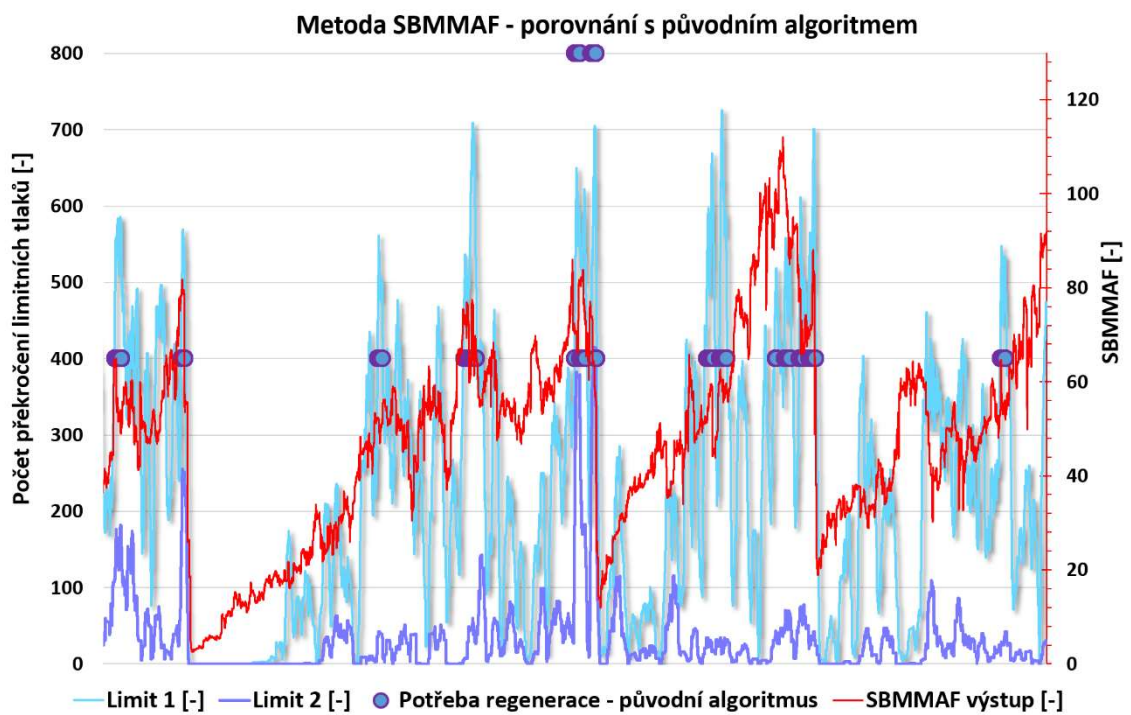
9.3.7 Výstup metody SBMMAF

Algoritmus jsem testoval na naměřených datech z předchozích testů na vozidle Mitsubishi Grandis (tisíce najetých kilometrů). Zjistil jsem, že SBMMAF filtr musí obsahovat minimálně 100 prvků, aby byl výsledek uspokojivý (Obrázek 9-9). V grafu je zelenou barvou vynesena průběh bez korekce $JN(t)$ a červený průběh je průběh výstupu $JN_{OUT}(t)$.

Porovnání této metody s předchozím řešením je zachyceno v grafu níže (Obrázek 9-10), kde červená křivka představuje výstup JN_{OUT} , modrý průběh znázorňuje počet nadlimitních zpětných tlaků (Limit 1) a fialová křivka pak počet překročení pro limit plného DPF filtru (Limit 2). V grafu jsou dále ještě vyneseny body, kde původní algoritmus vyhodnotil nezbytnost iniciace aktivní regenerace. Je zjevné, že nová metoda SBMMAF daleko lépe reflektuje postupné plnění filtru v celém rozsahu výkonu motoru i tam, kde původní algoritmus selhával.



Obrázek 9-9 Výstup JN_{OUT} z algoritmu SBMMAF definující plnění DPF filtru



Obrázek 9-10 Porovnání původního výstupu detekce zaplnění filtru s novým přístupem SBMMAF

10 Závěr

Hlavní definovaný cíl, navržení kompletního kompaktního emisního systému ERDPF filtru s aktivní regenerací, se podařilo splnit. Nejprve jsem nastudoval oblast vývoje DPF filtrů, potažmo emisí dieselových motorů obecně, využil jsem rozsáhlé odborné databáze DieselNet.com. Jsem přesvědčen, že ERDPF filtr má i dnes značný potenciál. Jeho výhoda oproti jiným řešením filtrace PM je zejména v širším rozsahu provozních teplot a průtoků spalín, při kterých je filtr schopen iniciovat aktivní regeneraci. Další výhodou je odolnost filtračního substrátu proti síranům, které velmi limitují životnost keramických substrátů.

Po seznámení se s předchozím rozsáhlým vývojem ERDPF filtru jsem rozhodl o přechodu z 12V na 24V napájení. Vedl mne k tomu výsledný čtyřnásobný tepelný výkon na aktivním elementu oproti 12V systému, jenž umožňuje iniciaci regenerace za mnohem nepříznivějších provozních podmínek (teplota a hmotnostní průtoky spalín).

Přechod na 24V napájení znamenal návrh zcela nového elektronického systému, do kterého jsem měl možnost zapracovat nové inovační podněty, které ve spojení s unikátními metodami řízení znamenají významný pokrok v rámci projektu ERDPF filtrů.

Pro nový elektronický ERPDF systém jsem zvolil modulární stavebnicovou koncepci, zařízení se skládá ze dvou typů modulů. Hlavní MC modul, který v sobě implementuje hlavní spínač proudové regenerační smyčky a většinu sensorického vybavení, a sekundární CUX modul, který zajišťuje připojení až tří aktivních elementů. Plná konfigurace, která je definována s ohledem na největší potencionální aplikace s 12l motory, je složena z jednoho hlavního modulu a osmi sekundárních modulů, což umožňuje použití maximálně 24 aktivních elementů v jednom filtru.

Hlavní funkce elektronického systému, iniciace aktivní regenerace, je založena na spínání proudových regeneračních smyček pro jednotlivé aktivní elementy. Maximální hodnota regeneračního proudu je odvislá od použitých baterií a může dosahovat hodnot až 600 A. Systém pracuje principiálně jako výkonový analogový multiplexor, kdy sekundární modul nejprve připojí konkrétní aktivní element k hlavnímu modulu. Následně je sepnuta regenerační proudová smyčka hlavním modulem, který zároveň vyhodnocuje dosažení iniciační teploty aktivní regenerace.

Elektronika je vybavena tak, aby umožňovala autonomní inicializaci filtru o libovolné konfiguraci. Tato funkcionalita je založena na kruhové topologii propojení jednotlivých

modulů, ty jsou vybaveny přerušovači sběrnice. Systém při svém uvedení do provozu rozpozná počet připojených sekundárních modulů a identifikuje jednotlivé připojené aktivní elementy.

Pro řízení průběhu aktivní regenerace jsem zpracoval metodu založenou na měření odporu aktivních elementů, který je úměrný jeho teplotě. Princip byl nejprve experimentálně ověřen v laboratorních podmínkách a následně implementován do nově vyvíjeného elektronického 24V systému. Elektronický systém je díky tomu schopný identifikovat dosažení iniciační teploty aktivního elementu a nedochází tak k degradaci aktivního elementu jeho přehříváním. Tato metoda detekce dosažení iniciační teploty během regenerace byla ověřena v rámci testování prototypových filtrů 12 AE ERDPF.

Současně s vývojem elektroniky jsem se zaměřil i na návrh samotného ERDPF filtru z mechanického hlediska. Hlavními limitujícími faktory byla vyrobiteľnost a integrace elektronického systému v těle samotného filtru. Po prvotním neúspěchu s 21 AE ERDPF filtrem jsem provedl termální simulaci dané problematiky. Na základě této simulace jsem navrhl konstrukci nového typu filtru 12 AE ARYAN, který je oproti předchozímu řešení vybaven chladicí komorou s kabelovými smyčkami kompenzujícími teplotní dilataci aktivních elementů. Tento kompaktní návrh s plně integrovaným elektronickým systémem v těle samotného ERDPF filtru jsem dokončil do fáze prototypové výroby. Jednotlivé vzorky pak byly podrobeny testování.

Důležitou součástí celého řešení byl návrh unikátní metody SBMMAF, která umožňuje interpretaci poměru diferenčních tlaků ve spalinové cestě jako ekvivalent zaplnění ERDPF filtru při jakémkoliv zatížení motoru. To oproti předchozímu řešení umožňuje snadnou a spolehlivou detekci bodu zaplnění filtru pro iniciaci aktivní regenerace.

Navržený elektronický systém osazený v těle 12 AE ARYAN ERDPF filtru jsem podrobil rozsáhlému testování jak v laboratorních, tak reálných podmínkách v instalaci na testovacím vozidle. Filtr jsem rovněž testoval u potenciálního zákazníka v Íránské islámské republice v laboratořích IDEM. Zdejší infrastruktura ropného průmyslu neumožňuje využití stávajících emisních technologií zejména z důvodu vysokého obsahu sirných složek v palivu. Testování prokázalo, že elektronický systém dokáže spolehlivě spínat regenerační proudové špičky dosahující hodnot až 600 A.

Literatura

- [1] *Assessment of Workplace Diesel Exhaust Exposure and Health Effects*. **Jian, Le, Meyerkort, Phillip and Jansz, Janis. Wuhan** : IEEE, 2011. Bioinformatics and Biomedical Engineering, (iCBBE) 2011 5th International Conference on. pp. 1-4. ISBN: 978-1-4244-5088-6.
- [2] *Occupational exposure to diesel engine exhaust: A literature review*. **Pronk, Anjoeka, Coble, Joseph a Stewart, Patricia A.** 2009. stránky 443-457. ISSN 1559-0631.
- [3] **Majewski, Addy W a Jääskeläinen, Hannu.** DieselNet "Environmental Effects of Emissions". *Environmental Effects of Emissions*. [Online] 2004.01j, 2004. [Citace: 19. 3 2016.] http://www.dieselnet.com/tech/env_effect.php.
- [4] **United States Environmental Protection Agency - EPA.** *Health*. [Online] 24.2.2016, 216. [Citace: 19. 3 2016.] <https://www3.epa.gov/pm/health.html>.
- [5] **Majewski, Addy W.** DieselNet "What Are Diesel Emissions". *What Are Diesel Emissions*. [Online] 2012.08a, 2008. [Cited: 3 5, 2016.] https://www.dieselnet.com/tech/emi_intro.php.
- [6] **Majewski, Addy W.** DieselNet "Diesel Particulate Matter". *Diesel Particulate Matter*. [Online] 2013.08b, 2013. [Citace: 12. 3 2016.] <https://www.dieselnet.com/tech/dpm.php>.
- [7] **Burtscher, Heinz a Majewski, Addy W.** DieselNet "Particulate Matter Measurements". *Particulate Matter Measurements*. [Online] 2012.03, 2012. [Citace: 13. 03 2016.] http://dieselnet.com/tech/measure_dpm.php.
- [8] **THE EUROPEAN COMMISSION.** COMMISSION REGULATION (EU) 2017/1151. *Official Journal of the European Union*. 7. 7 2017. L 175/1.
- [9] **Kittelson, D B, Arnold, M a Watts, W F.** *Review of Diesel Particulate Matter Sampling Methods*. Department of Mechanical Engineering, University of Minnesota. Minneapolis, MN : autor neznámý, 1999. Final Report.
- [10] **Kittelson, D B, Watts, W F a Johnson, J.** *Diesel Aerosol Sampling Methodology - CRC E-43: Final Report*. University of Minnesota. University of Minnesota, 2002. Report for the Coordinating Research Council.
- [11] **Majewski, Addy W.** DieselNet "Diesel Filter Regeneration". *Diesel Filter Regeneration*. [Online] 2005.06b, 2005. [Citace: 20. 3 2016.] http://dieselnet.com/tech/dpf_regen.php.
- [12] *Metal Fibre Diesel Particulate Filter: Function and Technology*. **Brillant, S a Zikoridse, G.** 2005. SAE 2005 World Congress & Exhibition. doi:10.4271/2005-01-0580.
- [13] **Blackthorn 2015.** Blackthorn. *Disposable Filters*. [Online] 2015. [Cited: 2 21, 2016.] <http://www.blackthorn.net/disposable-filters/>.

- [14] **Majewski, Addy W.** DieselNet "Diesel Filter Systems". *Diesel Filter Systems*. [Online] 2015.03a, 2003. [Cited: 3 5, 2016.] http://dieselnet.com/tech/dpf_sys.php.
- [15] **Richards, Paul.** DieselNet "Filters Using Fuel Borne Catalysts". *Filters Using Fuel Borne Catalysts*. [Online] 2014.12, 2014. [Citace: 1. 4 2016.] http://dieselnet.com/tech/dpf_fbc.php.
- [16] **Majewski, Addy W.** DieselNet "Filters Regenerated by Fuel Combustion". *Filters Regenerated by Fuel Combustion*. [Online] 2009.05a, 2009. [Citace: 1. 4 2016.] http://dieselnet.com/tech/dpf_sys_fuel.php.
- [17] **Ecopoint Inc.** DieselNet "Microwave Regenerated Filters". *Microwave Regenerated Filters*. [Online] 2000.02, 2000. [Citace: 30. 3 2016.] http://dieselnet.com/tech/dpf_microwave.php.
- [18] **Jääskeläinen, Hannu.** DieselNet "Engine Exhaust Back Pressure". *Engine Exhaust Back Pressure*. [Online] 2007.03a, 2007. [Citace: 31. 3 2016.] https://www.dieselnet.com/tech/diesel_exh_pres.php.
- [19] **PROVENTIA EMISSION CONTROL.** *PROVENTIA CHILI TM*. [prezentace] 2010.
- [20] **RYPOS, Inc.** Diesel Particulate Filter Video. [Online] 2009, 2009. [Citace: 31. 3 2016.] <http://www.rypos.com/resources-2/diesel-particulate-filter-video/>.
- [21] *Metodologie spínání sériových spínačů regeneračních elementů v aplikacích ERDPF filtrů. Křivka, Jindřich a Žahour, Jiří.* Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2015. Elektrotechnika a informatika 2015. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika. stránky 165-168. ISBN: 978-80-261-0514-5.
- [22] *Fiber Wound Electrically Regenerable Diesel Particulate Filter Cartridge for Small Diesel Engines. Shirk, Ryan, Bloom, Richard and Kitahara, Yasuhisa.* 1995. doi: 10.4271/950153.
- [23] **Integrovaný registr znečišťování.** Integrovaný registr znečišťování. *Oxidy dusíku (NO_x/NO₂)*. [Online] [Citace: 6. 3 2016.] http://www.irz.cz/repository/latky/oxidy_dusiku.pdf.
- [24] **Khalek, Imad A, Bougher, Thomas L a Merritt, Patrick M.** Coordinating Research Council. *Phase 1 Of The Advanced Collaborative Emissions Study*. [Online] 6 2009. [Citace: 6. 3 2016.] <http://www.crcao.org/reports/recentstudies2009/ACES%20Phase%201/ACES%20Phase1%20Final%20Report%2015JUN2009.pdf>.
- [25] **Khair, Magdi K and Jääskeläinen, Hannu.** DieselNet "Emission Formation in Diesel Engines". *Emission Formation in Diesel Engines*. [Online] 2015.02, 2015. [Cited: 3 6, 2016.] https://www.dieselnet.com/tech/diesel_emiform.php#nox.
- [26] **Nauss, Kathleen a Health Effects Institute (HEI).** DieselNet "Diesel Exhaust: A Critical Analysis of Emissions, Exposure, and Health Effects". *Diesel Exhaust: A Critical Analysis of Emissions, Exposure, and Health Effects*. [Online] 10 1997. [Citace: 3. 13 2016.] <http://dieselnet.com/papers/9710nauss.html>.

- [27] **DieselNet.com. Copyright © Ecopoint Inc.** DieselNet "Gaseous Emissions". *Gaseous Emissions*. [Online] 2010.03d, 2010. [Cited: 03 06, 2016.] https://www.dieselnets.com/tech/emi_gas.php.
- [28] **Majewski, Addy W a Jääskeläinen, Hannu.** DieselNet "What is Diesel Fuel". *What is Diesel Fuel*. [Online] 2013.06a, 2013. [Citace: 12. 3 2016.] https://www.dieselnets.com/tech/fuel_diesel.php.
- [29] **Johnson Matthey.** *Diesel-particulate-filter-muffler-johnson-matthey*. [Online] 2015, 2015. [Citace: 30. 3 2016.] <http://www.jmdpf.com/diesel-particulate-filter-muffler-johnson-matthey>.

11 Seznam autorovo publikací

11.1 Souvisejících s tématem – řazeno chronologicky

- [1] KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K. Elektronické vybavení umožňující řízení aktivní regenerace ERDPF filtru. In *Elektrotechnika a informatika 2018. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2018. s. 69-72. ISBN: 978-80-261-0785-9
- [2] ŽAHOUR, J., KŘIVKA, J., KOSTURIK, K. Emisní testy nezávislého systému pro redukcí NOx. In *Elektrotechnika a informatika 2018. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2018. s. 173-176. ISBN: 978-80-261-0785-9
- [3] ŽAHOUR, J., KŘIVKA, J., KOSTURIK, K. *Řízení škrticí klapky výfukového potrubí*. 2018.
- [4] KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K. *12 AE ERDPF filtr s aktivní regenerací*. 2017.
- [5] KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K. *Sekundární modul CUX V2 ERDPF*. 2017.
- [6] KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K. *Řídicí modul MC V2 ERDPF*. 2017.
- [7] KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J. Koncepce modulárního elektronického systému určeného k řízení ERDPF filtrů s proměnnou topologií. In *Elektrotechnika a informatika 2017. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2017. s. 129-132. ISBN: 978-80-261-0712-5
- [8] ŽAHOUR, J., KŘIVKA, J., KOSTURIK, K. Funkční testy SCR systému. In *Elektrotechnika a informatika 2017. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2017. s. 165-168. ISBN: 978-80-261-0712-5
- [9] ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K., KŘIVKA, J. *Řídicí jednotka SCR systému – PBU 1.1*. 2016
- [10] KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J. Metody návrhu kompaktního ERDPF filtru s důrazem na provozní podmínky elektronického systému. In *Elektrotechnika a informatika 2016. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2016. s. 117-120. ISBN: 978-80-261-0516-9
- [11] ŽAHOUR, J., KŘIVKA, J., KOSTURIK, K. Lightweight bootloader pro mikrokontroléry NXP s jádrem S08. In *Elektrotechnika a informatika 2016. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2016. s. 163-166. ISBN: 978-80-261-0516-9
- [12] KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J., ELIS, L., KOSTURIK, K. *High-speed P-MOSFET driver*. 2015.
- [13] KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J. Metodologie spínání sériových spínačů regeneračních elementů v aplikacích ERDPF filtrů. In *Elektrotechnika a informatika 2015. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2015. s. 165-168. ISBN: 978-80-261-0514-5
- [14] KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K., FREDHOLM, S. Automatic detection of different mechanical ERDPF configurations. In *2015 23rd Telecommunications Forum (TELFOR)*. Piscataway: IEEE, 2015. s. 654-657. ISBN: 978-1-5090-0055-5
- [15] ŽAHOUR, J., KŘIVKA, J., KOSTURIK, K. SCR systém pro univerzální použití. In *Elektrotechnika a informatika 2015. Elektrotechnika, elektronika,*

- elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2015. s. 223-226. ISBN: 978-80-261-0514-5
- [16] ŽAHOUR, J., KŘIVKA, J., KOSTURIK, K., FREDHOLM, S. Self-sufficient system for NOx reduction. In *2015 23rd Telecommunications Forum (TELFOR)*. Piscataway: IEEE, 2015. s. 646-649. ISBN: 978-1-5090-0055-5
- [17] ŽAHOUR, J., KŘIVKA, J., KOSTURIK, K. Engine type independent SCR system. In *Proceedings of the 20th International Conference on Applied Electronics 2015 (APPEL 2015)*. Piscataway: IEEE, 2015. s. 289-292. ISBN: 978-80-261-0385-1 , ISSN: 1803-7232
- [18] ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K., KŘIVKA, J. *Řídící jednotka vstřikovacího systému SCR s CAN rozhraním*. 2014.
- [19] KŘIVKA, J., KOSTURIK, K., ŽAHOUR, J. *Testovací stolice elektricky regenerovatelných filtrů pevných částic*. 2014.
- [20] KŘIVKA, J., KOSTURIK, K., ŽAHOUR, J. *Řídící modul elektricky regenerovatelných filtrů pevných částic*. 2014.
- [21] KŘIVKA, J., KOSTURIK, K., ŽAHOUR, J. *Senzorický komunikační modul pro výfukové aplikace*. 2014.
- [22] KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J., ELIS, L., KOSTURIK, K. *Universální komunikační modul mezi sběrnicemi USB 2.0, USB 1.1 a RS-232*. 2014.
- [23] ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K., KŘIVKA, J. *Bezdrátový sběrníkový gateway*. 2014.
- [24] KŘIVKA, J., KOSTURIK, K., ŽAHOUR, J. *Spínací modul elektricky regenerovatelných filtrů pevných částic*. 2014.
- [25] KŘIVKA, J., ELIS, L., ŽAHOUR, J. Nový řídicí systém pro elektricky regenerovatelné filtry pevných částic. In *Elektrotechnika a informatika 2014. Část 2., Elektronika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2014. s. 37-40. ISBN: 978-80-261-0366-0
- [26] KŘIVKA, J., KŘIBSKÝ, P., VALDA, L., ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K. Autonomous Control System of Electrically Regenerable Diesel Particulate Filter for Light Duty Vehicles. In *2014 22nd TELECOMMUNICATIONS FORUM - (TELFOR) Proceedings of Papers*. Belgrade: IEEE, 2014. s. 706-709. ISBN: 978-1-4799-6190-0
- [27] ŽAHOUR, J., KŘIVKA, J., KOSTURIK, K., KŘIBSKÝ, P., VALDA, L. Electrical glowing of filtering elements in the DPF filter. In *2014 22nd TELECOMMUNICATIONS FORUM - (TELFOR) Proceedings of Papers*. Belgrade: IEEE, 2014. s. 710-712. ISBN: 978-1-4799-6190-0
- [28] ŽAHOUR, J., KŘIVKA, J., ELIS, L. Nepřímé určování tlaku ve vstřikovacím systému. In *Elektrotechnika a informatika 2014. Část 2., Elektronika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2014. s. 93-96. ISBN: 978-80-261-0366-0
- [29] KOSTURIK, K., ELIS, L., KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J. *Manuální spínač pro testování DPF filtrů*. 2013.
- [30] KOSTURIK, K., ELIS, L., KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J. *Řídící elektronika DPF pro 24 voltový systém*. 2013.
- [31] KOSTURIK, K., ELIS, L., KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J. *Systém pro měření vibrací v prostoru výfuku*. 2013.

11.2 Nesouvisejících s tématem – řazeno chronologicky

- [32] KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K., VALENTA, P., SKÁLA, J., GEORGIEV, V. *Funkční vzorek napájecího zdroje s induktivní vazbou*. 2018.
- [33] KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K., VALENTA, P., SKÁLA, J., GEORGIEV, V. *Modul pro bezdrátovou komunikaci s robotem v okolí přenosových sítí pod napětím*. 2018.
- [34] KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K., VALENTA, P., SKÁLA, J., GEORGIEV, V., HAMMERBAUER, J., KUBÍK, Z. *Výzkumná zpráva o napájecím zdroji s induktivní vazbou*. Západočeská univerzita v Plzni, 2018.
- [35] KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K., VALENTA, P., SKÁLA, J., GEORGIEV, V., HAMMERBAUER, J., KUBÍK, Z. *Výzkumná zpráva o bezdrátové komunikaci s robotem v okolí přenosových sítí pod napětím*. Západočeská univerzita v Plzni, 2018.
- [36] ŽAHOUR, J., KŘIVKA, J., KOSTURIK, K. *Polovodičové přidržovací relé s nastavitelnou časovou konstantou*. 2018.
- [37] ŽAHOUR, J., KŘIVKA, J., KOSTURIK, K. *Informační panel s dvojitým e-ink displejem a zálohovaným napájením*. 2018.
- [38] KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K. *Omezovač funkce akceleračního motoru pro bezkartáčové motory*. 2017.
- [39] KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K. *Platforma měření ratiometrických signálů s izolovaným napájením*. 2017.
- [40] KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K. *Šesti kvadrantový lineární převodník dvouosého řízení s výkonovými PWM výstupy*. 2017.
- [41] ŽAHOUR, J., KŘIVKA, J., KOSTURIK, K. *Převodník CAN/Ethernet*. 2017.
- [42] ŽAHOUR, J., KŘIVKA, J., KOSTURIK, K. *Inteligentní záložní zdroj s vícekanálovým výstupem*. 2017.
- [43] SKÁLA, J., HAMMERBAUER, J., KUBÍK, Z., GEORGIEV, V., KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J., VALENTA, P. *Vývoj elektroniky*. Západočeská univerzita v Plzni, 2017.
- [44] ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K., KŘIVKA, J. *Modul specializovaného HIL testeru FELBOX - backplane KBB03*. 2016.
- [45] KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J., ELIS, L., KOSTURIK, K. *Testovací platforma pro automotive aplikace založená na modulech NI USB-6008 OEM - základní provedení*. 2015.
- [46] KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J., ELIS, L., KOSTURIK, K. *Testovací platforma pro automotive aplikace založená na modulech NI USB-6008 OEM - rozšířené provedení*. 2015.
- [47] ŽAHOUR, J., KŘIVKA, J., KOSTURIK, K., ELIS, L. *Řídící jednotka kotle na tuhá paliva*. 2015.
- [48] ŽAHOUR, J., KŘIVKA, J., KOSTURIK, K., ELIS, L. *Řídící jednotka digitálně řízeného audiozesilovače*. 2015.
- [49] ELIS, L., KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K. *Komunikační modul mezi sběrnicemi RS-232 a LIN*. 2015.
- [50] KŘIVKA, J., KOSTURIK, K., ŽAHOUR, J. *Samo-oscilující proudový zdroj definované hodnoty*. 2014.
- [51] ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ELIS, L. *Zařízení pro detekci mechanického opotřebení točivých strojů*. 2014.

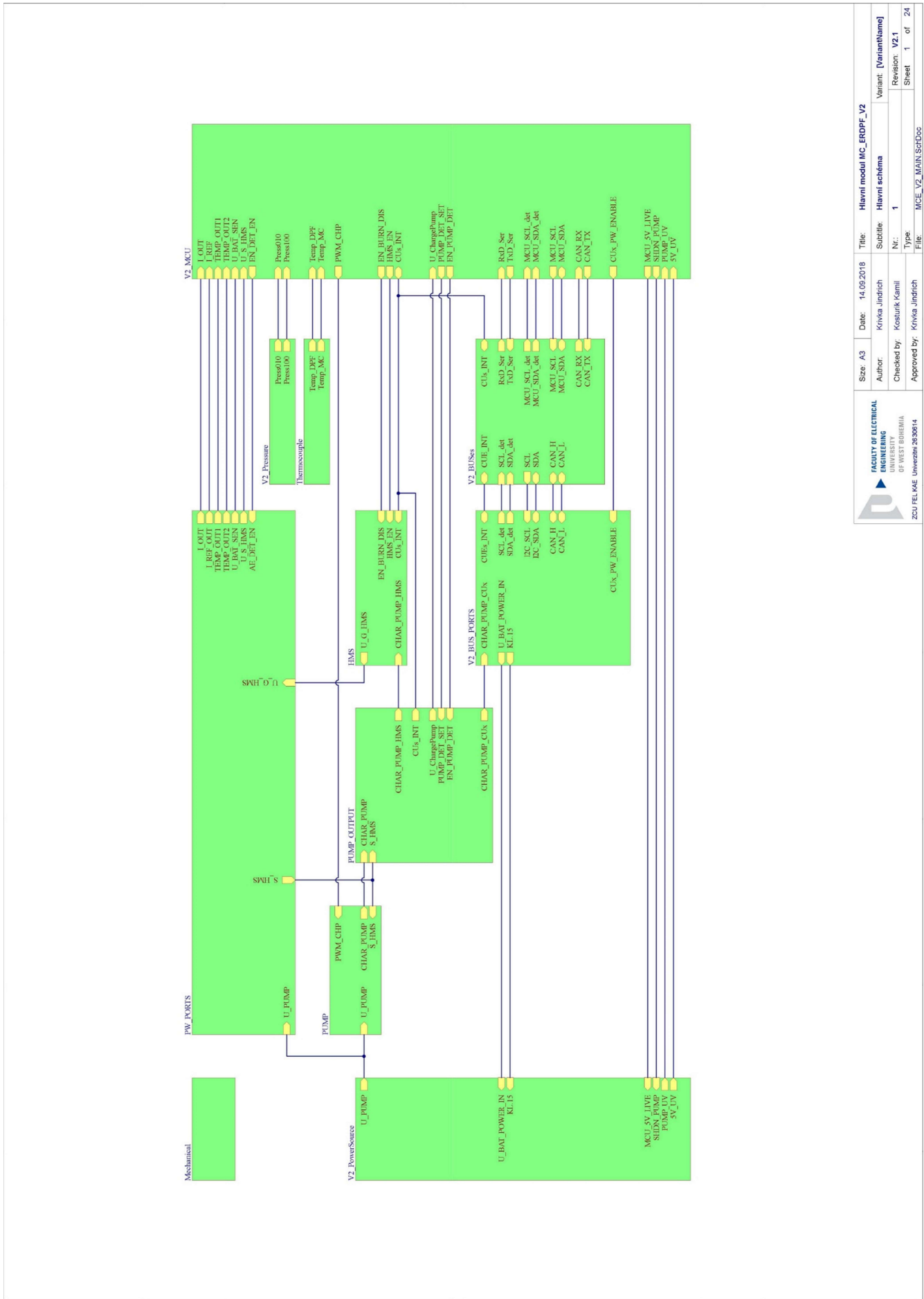
- [52] ELIS, L., KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J. *Lokalizační elektronika pro kolejový simulátor*. 2014.
- [53] ELIS, L., KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J. *Bateriová elektronika monitorovací vzducholodě*. 2014.
- [54] ELIS, L., KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J. *Elektronický šes-ti kanálový signálový přepínač*. 2014.
- [55] ELIS, L., KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J. *Přesný dvoukanálový generátor fázově posunutých pulsů*. 2014.
- [56] ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ELIS, L. *Řídící jednotka akčního členu dveřní jednotky*. 2014.
- [57] VALDA, L., KŘIVKA, J., KŘIBSKÝ, P., ŽAHOUR, J. Replacement of the Mains Voltage by Reconfigurable Li-ion Battery for 4kW Power Inverter. In *2014 22nd TELECOMMUNICATIONS FORUM - (TELFOR) Proceedings of Papers*. Belgrade: IEEE, 2014. s. 645-648. ISBN: 978-1-4799-6190-0
- [58] ELIS, L., KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J. Požadavky na funkční bezpečnost REMCS systému a příkladové DEMO aplikace. In *Elektrotechnika a informatika 2014. Část 2., Elektronika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2014. s. 25-28. ISBN: 978-80-261-0366-0
- [59] KŘIBSKÝ, P., ŽAHOUR, J., KŘIVKA, J., VALDA, L. Li-Ion State of Charge Estimation Methods. In *2014 22nd TELECOMMUNICATIONS FORUM - (TELFOR) Proceedings of Papers*. Belgrade: IEEE, 2014. s. 649-651. ISBN: 978-1-4799-6190-0
- [60] ELIS, L., KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J., GEORGIEV, V. *Vlaková kabina simulátoru kolejových vozidel*. 2013.
- [61] KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ELIS, L., ŽAHOUR, J. *Přípravek pro testování dosahu bezdrátových modulů*. 2013.
- [62] KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ELIS, L., ŽAHOUR, J. *Inovace extruderu pro 3D tiskárnu Ultimaker*. 2013.
- [63] KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ELIS, L., ŽAHOUR, J. *Laserové detekční zařízení*. 2013.
- [64] ELIS, L., KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J. *Lokalizační elektronika monitorovací vzducholodě*. 2013.
- [65] KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ELIS, L., ŽAHOUR, J. *Měřicí elektronika monitorovací vzducholodě*. 2013.
- [66] KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ELIS, L., ŽAHOUR, J., GEORGIEV, V. *Senzory a akční členy kolejového simulátoru*. 2013.
- [67] KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ELIS, L., ŽAHOUR, J., GEORGIEV, V. *Řídící jednotka stanice kolejového simulátoru*. 2013.
- [68] ELIS, L., KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J. *Řídící elektronika monitorovací vzducholodě*. 2013.
- [69] ELIS, L., KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J., GEORGIEV, V. *Elektronická výzbroj modelu kolejového vozidla*. 2013.
- [70] ELIS, L., KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J. *Autonomní solární zavlažovací systém*. 2013.
- [71] KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ELIS, L., ŽAHOUR, J., GEORGIEV, V. *Dispečerské stanoviště simulátoru kolejových vozidel*. 2013.

- [72] KOSTURIK, K., ELIS, L., KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J. *USB vysílač s modulem Xbee PRO*. 2013.
- [73] ELIS, L., KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J. *Nízkonapěťový záložní zdroj s využitím Li-Ion akumulátorů*. 2013.
- [74] ELIS, L., KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J. *Rotační displej*. 2013.
- [75] KŘIVKA, J., ELIS, L., ŽAHOUR, J. Simulátor kolejových vozidel. In *Elektrotechnika a informatika 2013. Část 2., Elektronika*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2013. s. 49-52. ISBN: 978-80-261-0232-8
- [76] ŠTĚTKA, P., KŘIVKA, J., ELIS, L., VLÁŠEK, J., ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K. Control and navigation system for mobile platform. In *21st Telecommunications Forum (TELFOR) Proceedings of Papers*. Bělehrad: IEEE, 2013. s. 584-586. ISBN: 978-1-4799-1419-7
- [77] ELIS, L., KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J. Zabezpečení RC systému vzducholodě. In *Elektrotechnika a informatika 2013. Část 2., Elektronika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2013. s. 21-24. ISBN: 978-80-261-0232-8
- [78] ŽAHOUR, J., KŘIVKA, J., ELIS, L., ŠTĚTKA, P., KOSTURIK, K. Control unit of monitoring airship and his communication interface. In *21st Telecommunications Forum TELFOR 2013 Proceedings of Papers*. Bělehrad: IEEE, 2013. s. 587-589. ISBN: 978-1-4799-1419-7
- [79] KŘIVKA, J., ELIS, L., VLÁŠEK, J., ŽAHOUR, J., ŠTĚTKA, P., KOSTURIK, K. Hardware for rail traffic simulator. In *21st Telecommunications Forum TELFOR 2013 Proceedings of Papers*. Bělehrad: IEEE, 2013. s. 590-593. ISBN: 978-1-4799-1419-7
- [80] VLÁŠEK, J., KŘIVKA, J., ELIS, L., ŽAHOUR, J., ŠTĚTKA, P., KOSTURIK, K. Software for rail traffic simulator. In *21st Telecommunications Forum (TELFOR) Proceedings of Papers*. Bělehrad: IEEE, 2013. s. 594-596. ISBN: 978-1-4799-1419-7
- [81] KŘIVKA, J., KOSTURIK, K. *Modernizování automatizovaného ovládání akvária*. 2012.
- [82] KŘIVKA, J. Modernizování automatizovaného ovládání akvária. In *Elektrotechnika a informatika 2012. Část 2., Elektronika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2012. s. 85-89. ISBN: 978-80-261-0119-2

12 Přílohy

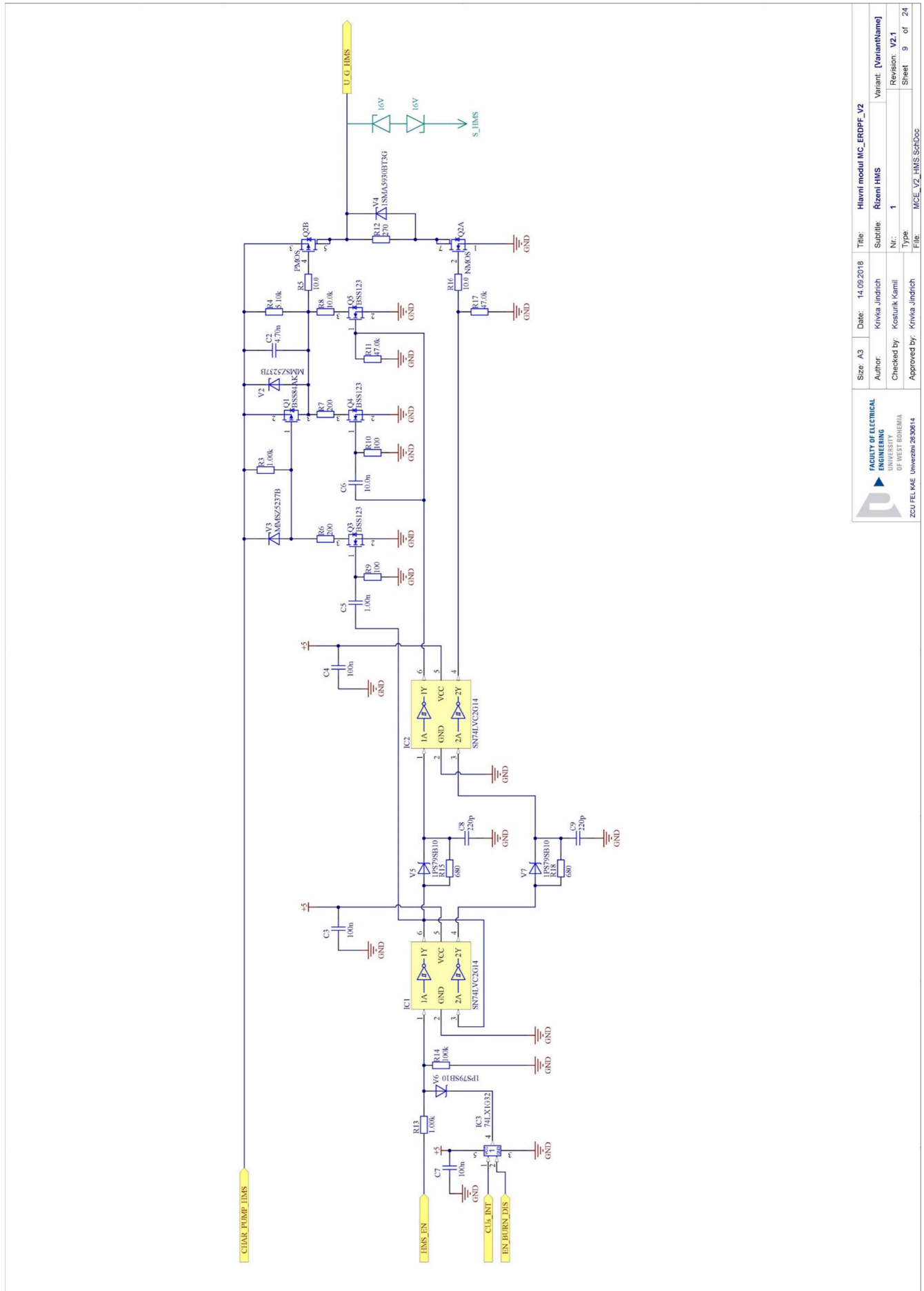
V této části jsou zveřejněny některé dílčí části schémat elektronického systému, které jsou zmiňovány v textu disertační práce. Tato schémata jsou výstupem z návrhového prostředí Altium Designer.

12.1 MCE_ERDPF_V2 Hlavní schéma



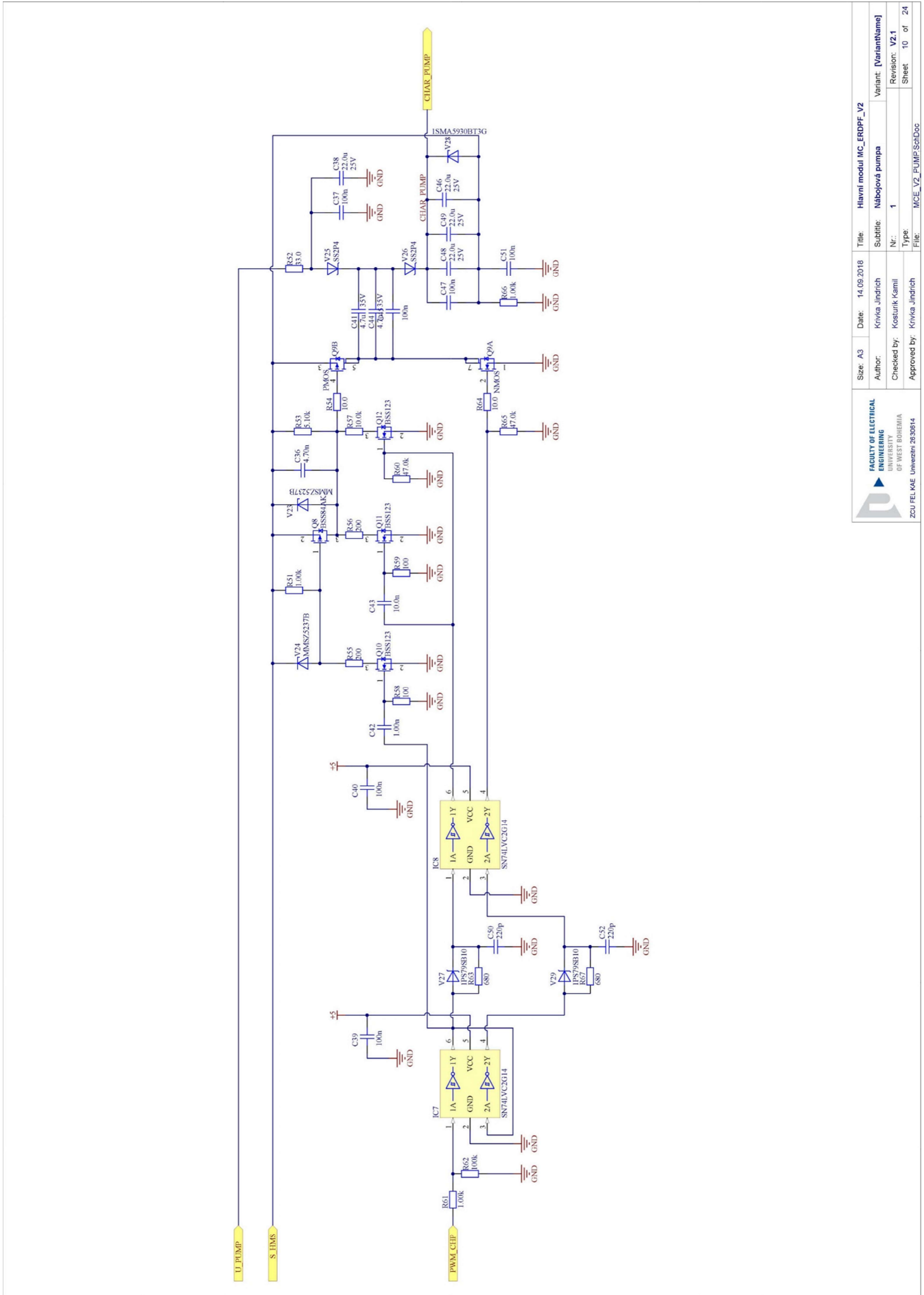
Size: A3	Date: 14.09.2018	Title: Hlavní modul MC_ERDPF_V2	Variant: [VariantName]
Author: Krivka Jindřich	Checked by: Kosturk Kamil	Subtitle: Hlavní schéma	Nr.: 1
Approved by: Krivka Jindřich	File: MCE_V2_MAIN_SCH.DWG		Revision: V2.1
			Sheet 1 of 24

12.2 MCE_ERDPF_V2 Řízení HMS



Size: A3	Date: 14.09.2018	Title: Hlavní modul MC_ERDPF_V2
Author: Krivka Jindřich	SubTitle: Řízení HMS	Variant: [VariantName]
Checked by: Kostařík Kamil	Nr.: 1	Revision: V2.1
Approved by: Krivka Jindřich	Type: 9	Sheet: 24
ZČU FELIAE Univerzita 2630014	File: MCE_V2_HMS_SchDoc	

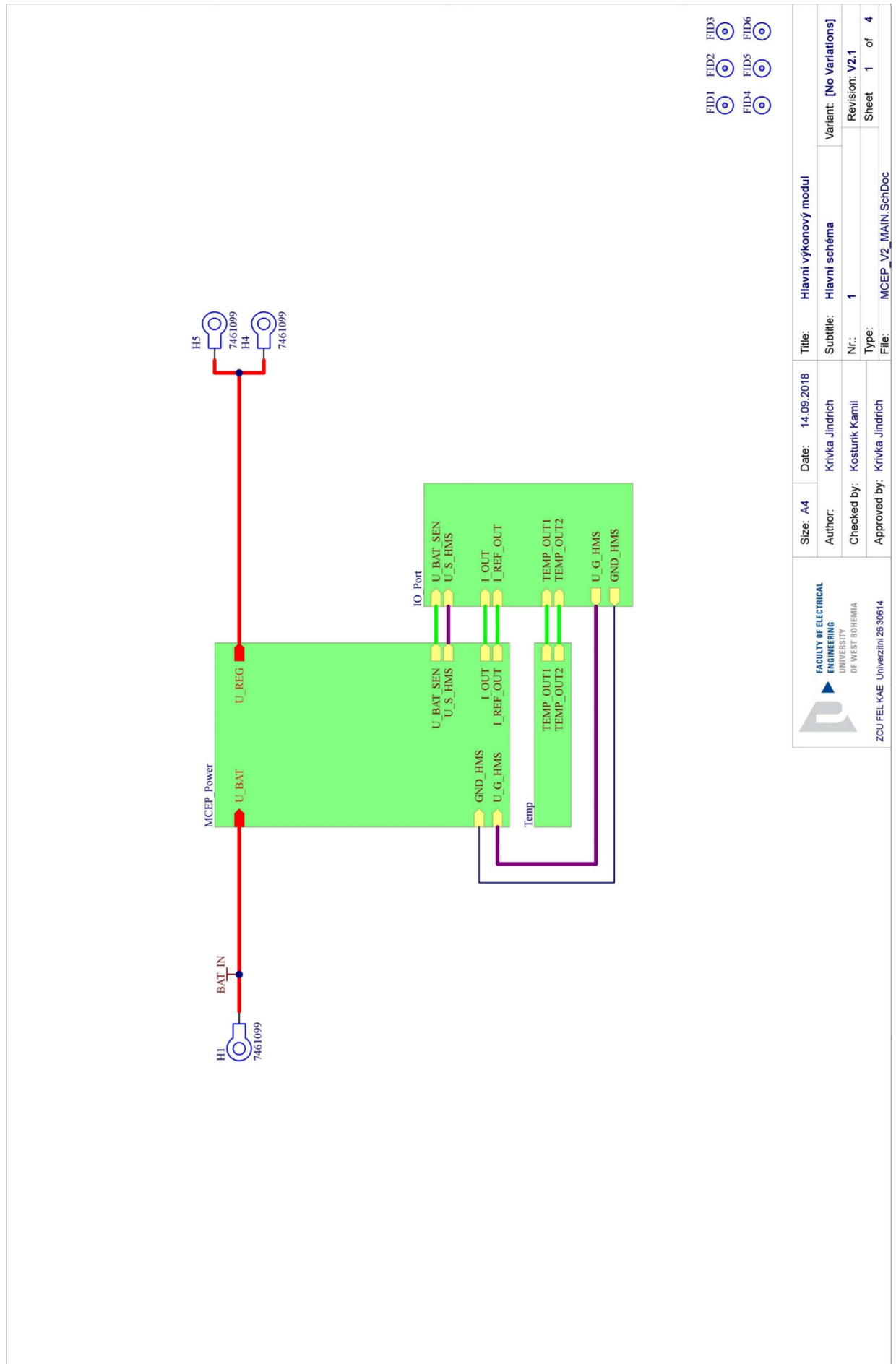
12.3 MCE_ERDPF_V2 Nábojová pumpa



Size: A3	Date: 14.09.2018	Title: Hlavní modul MC_ERDPF_V2
Author: Krivka Jindřich	Subtitle: Nábojová pumpa	Variant: [VariantName]
Checked by: Kostrouk Kamil	Nr.: 1	Revision: V2.1
Approved by: Krivka Jindřich	Type: 10	Sheet: 10 of 24
File: MCE_V2_PUMP_SchDoc		

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING
 UNIVERSITY OF WEST BOHEMIA
 ZCU FEL KAE Univerzita 3030014

12.4 MCEP_ERDPF_V2 Hlavní schéma











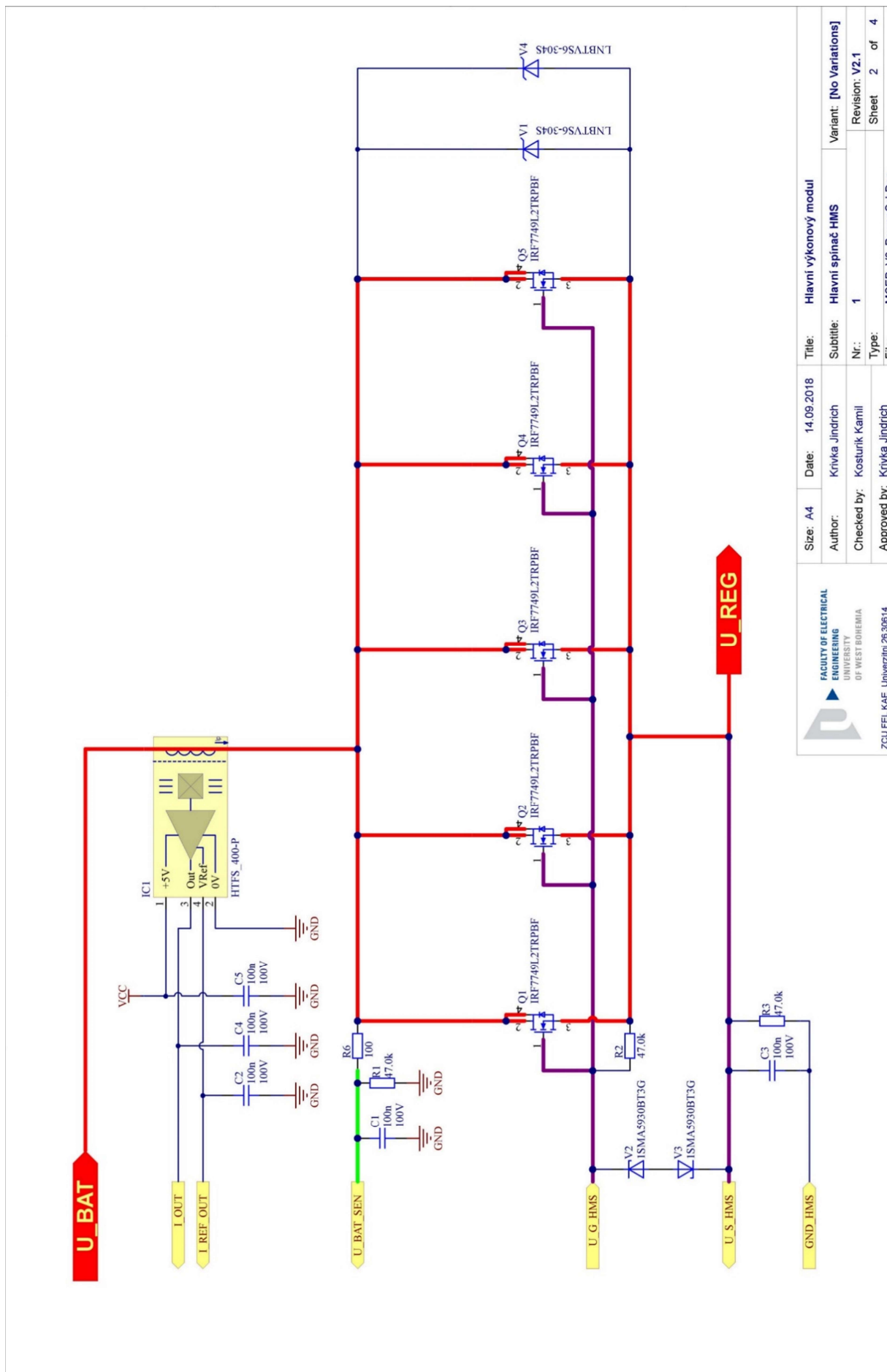
**FACULTY OF ELECTRICAL
 ENGINEERING
 UNIVERSITY
 OF WEST BOHEMIA**

 ZCU FEL KAE Univerzita 26.30614

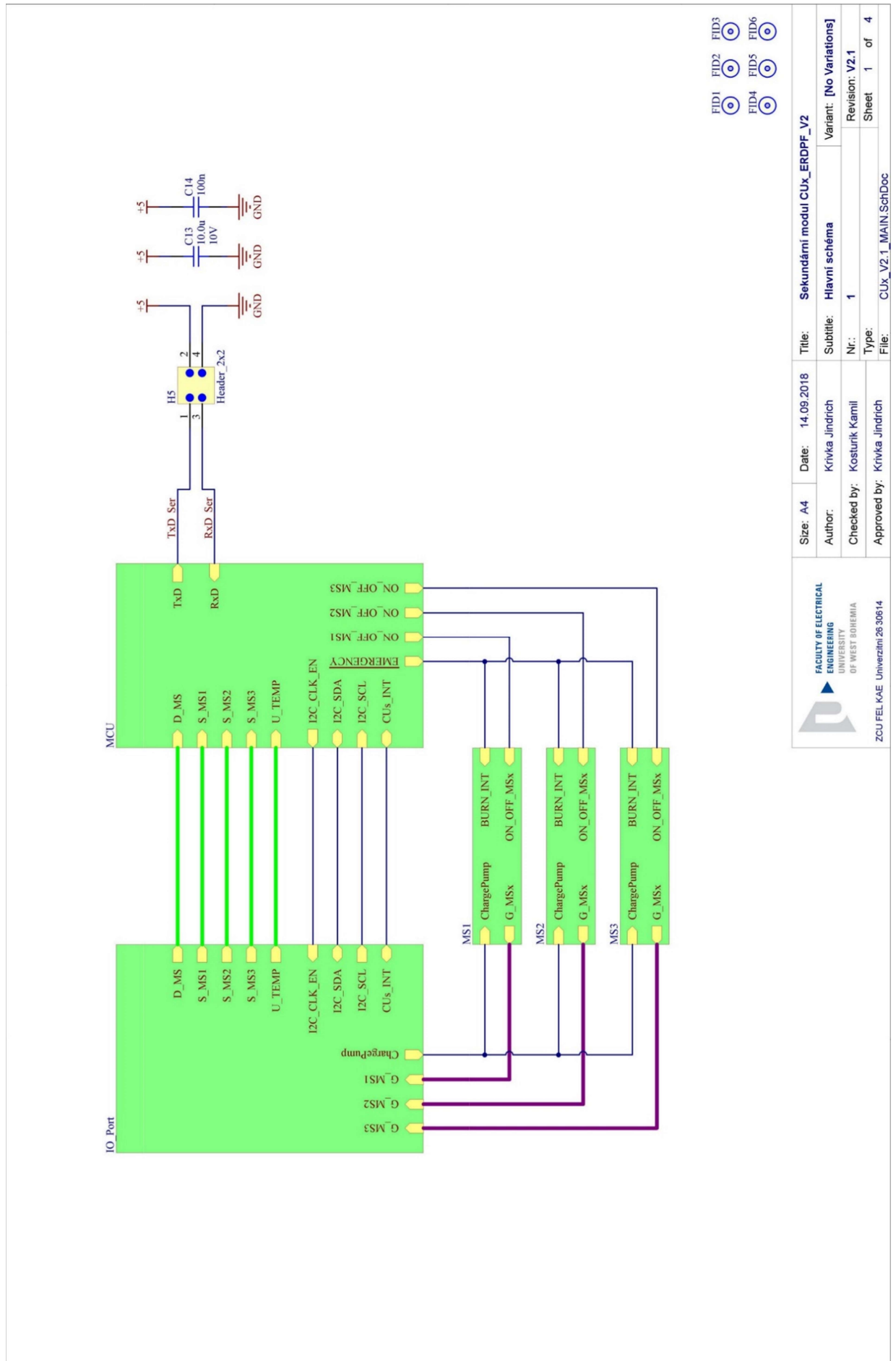
Size: A4	Date: 14.09.2018	Title: Hlavní výkonový modul
Author: Krivka Jindrich	SubTitle: Hlavní schéma	Variant: [No Variations]
Checked by: Kosturik Kamil	Nr.: 1	Revision: V2.1
Approved by: Krivka Jindrich	Type: Sheet 1 of 4	File: MCEP_V2_MAIN_SchDoc

- FID1 
- FID2 
- FID3 
- FID4 
- FID5 
- FID6 

12.5 MCEP_ERDPF_V2 Hlavní spínač HMS



12.6 CUX_ERDPF_V2 Hlavní schéma

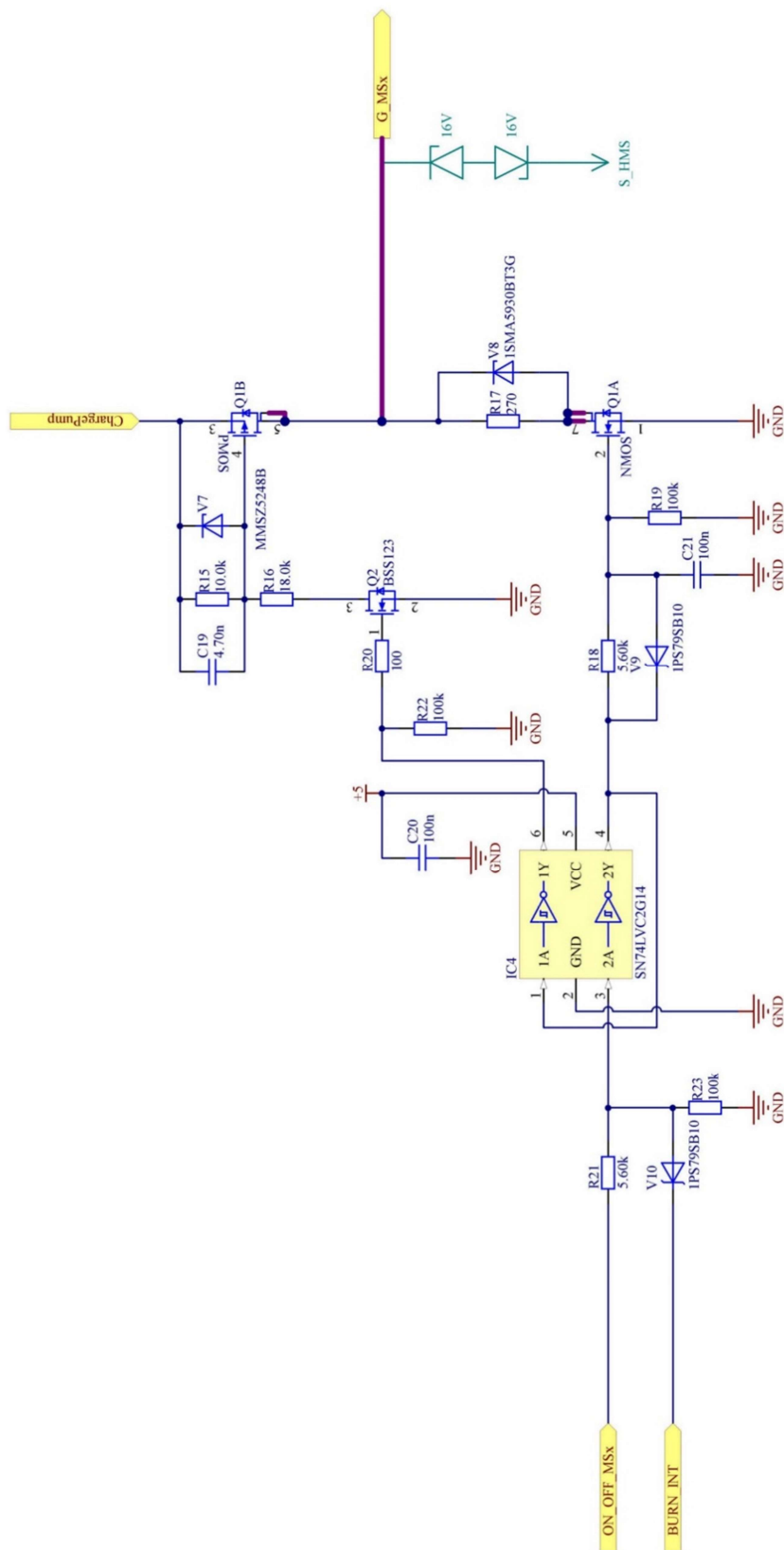


- FID1
- FID2
- FID3
- FID4
- FID5
- FID6

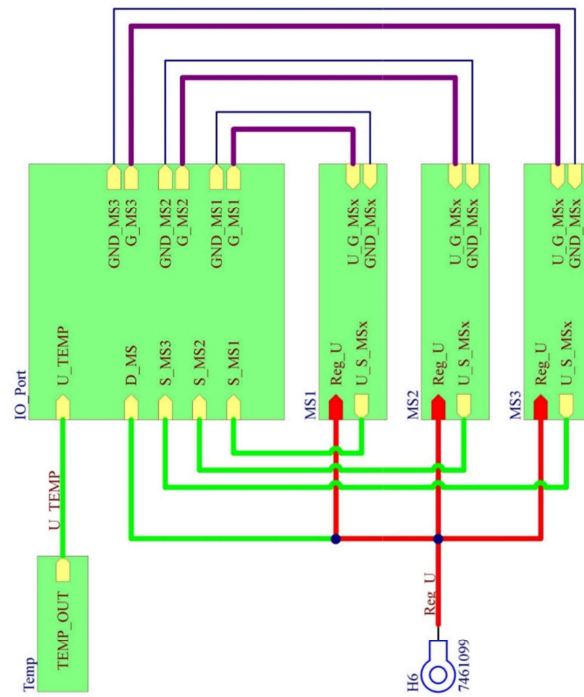
Size: A4	Date: 14.09.2018	Title: Sekundární modul CUX_ERDPF_V2
Author: Krivka Jindrich	SubTitle: Hlavní schéma	Variant: [No Variations]
Checked by: Kostiurik Kamil	Nr.: 1	Revision: V2.1
Approved by: Krivka Jindrich	Type: Sheet 1 of 4	File: CUX_V2.1_MAIN.SchDoc



12.7 CUX_ERDPF_V2 Spínač výkonového modulu



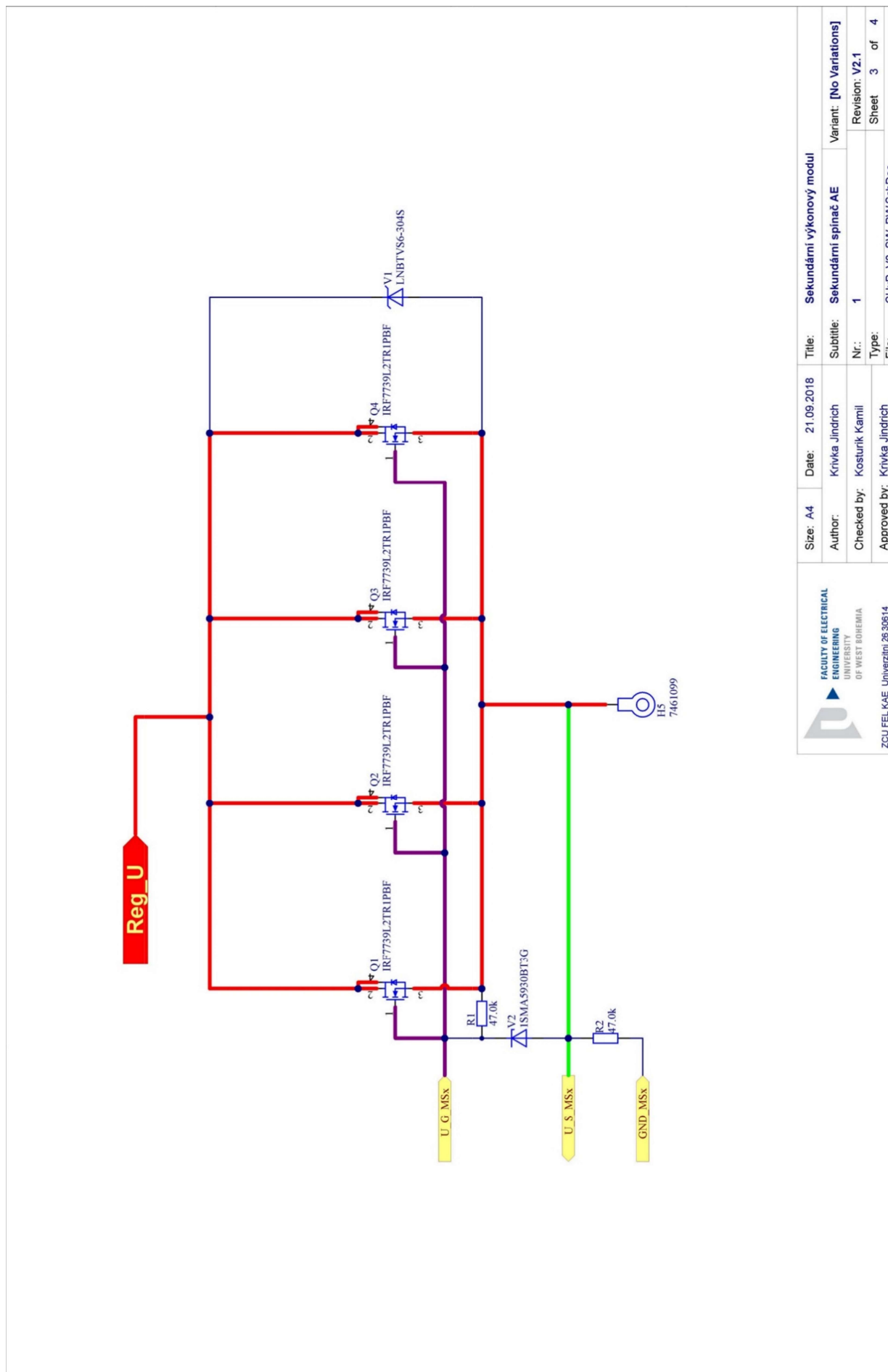
12.8 CUxP_ERDPF_V2 Hlavní spínač



FID1 FID2 FID3
 FID4 FID5 FID6

 FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING UNIVERSITY OF WEST BOHEMIA	Size: A4	Date: 21.09.2018	Title: Sekundární výkonový modul
	Author: Krivka Jindrich	SubTitle: Hlavní schéma	Variant: [No Variations]
	Checked by: Kosturik Kamil	Nr.: 1	Revision: V2.1
	Approved by: Krivka Jindrich	Type: Schéma	Sheet 1 of 4
ZCU FEL-KAE Univerzita 2630614 File: CUxP_V2_MAIN.SchDoc			

12.9 CUxP_ERDPF_V2 Sekundární spínač – jeden AE

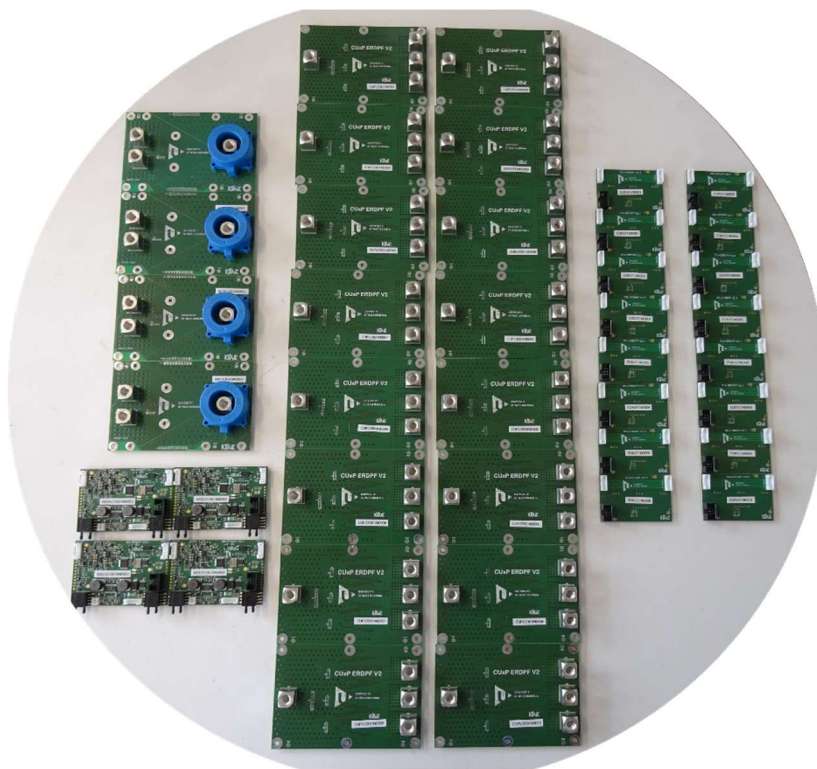


Size: A4	Date: 21.09.2018	Title: Sekundární výkonový modul	Variant: [No Variations]
Author: Krivka Jindrich	SubTitle: Sekundární spínač AE	Nr.: 1	Revision: V2.1
Checked by: Kosturik Kamil	Type: SW	Sheet: 3	of 4
Approved by: Krivka Jindrich	File: CUxP_V2_SW_PW_SchDoc		



 FACULTY OF ELECTRICAL
 ENGINEERING
 UNIVERSITY
 OF WEST BOHEMIA
 ZCU FEL KAE Univerzita 26 30614

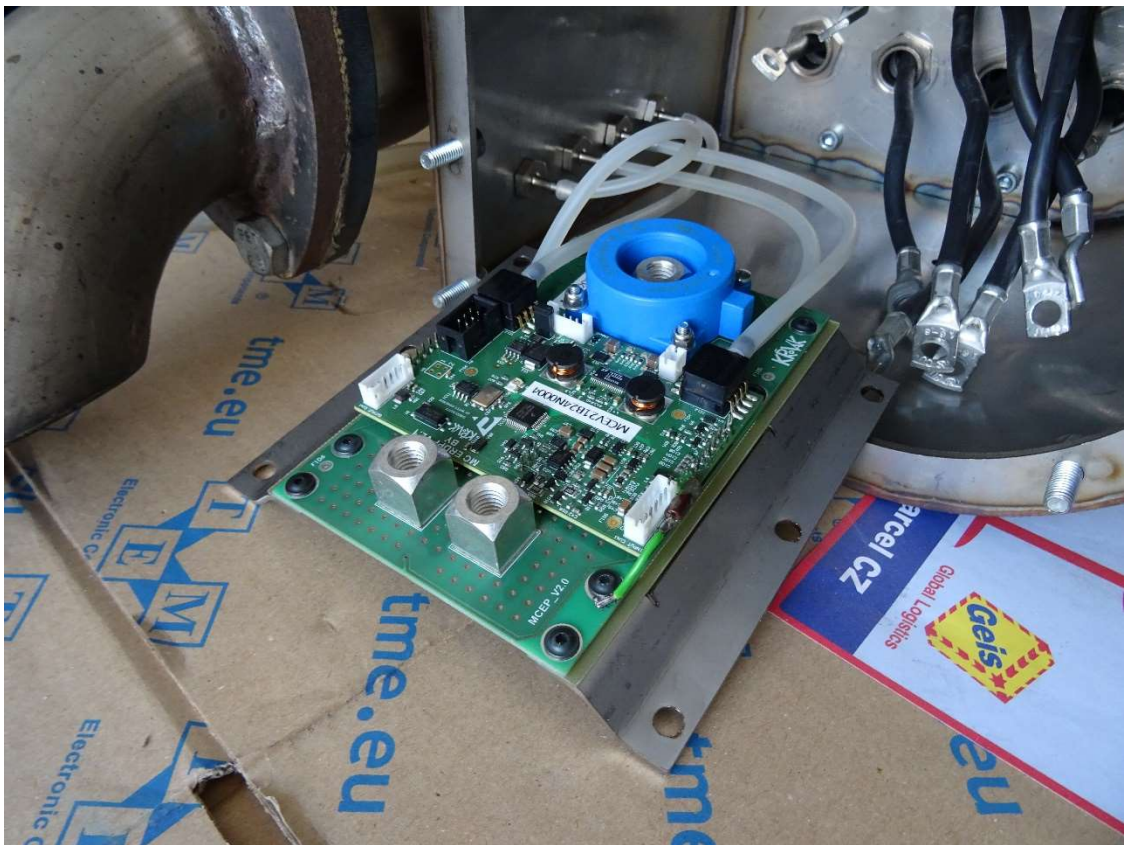
12.10 Fotografie z výroby a testování filtru 12AE ERDPF ARYAN



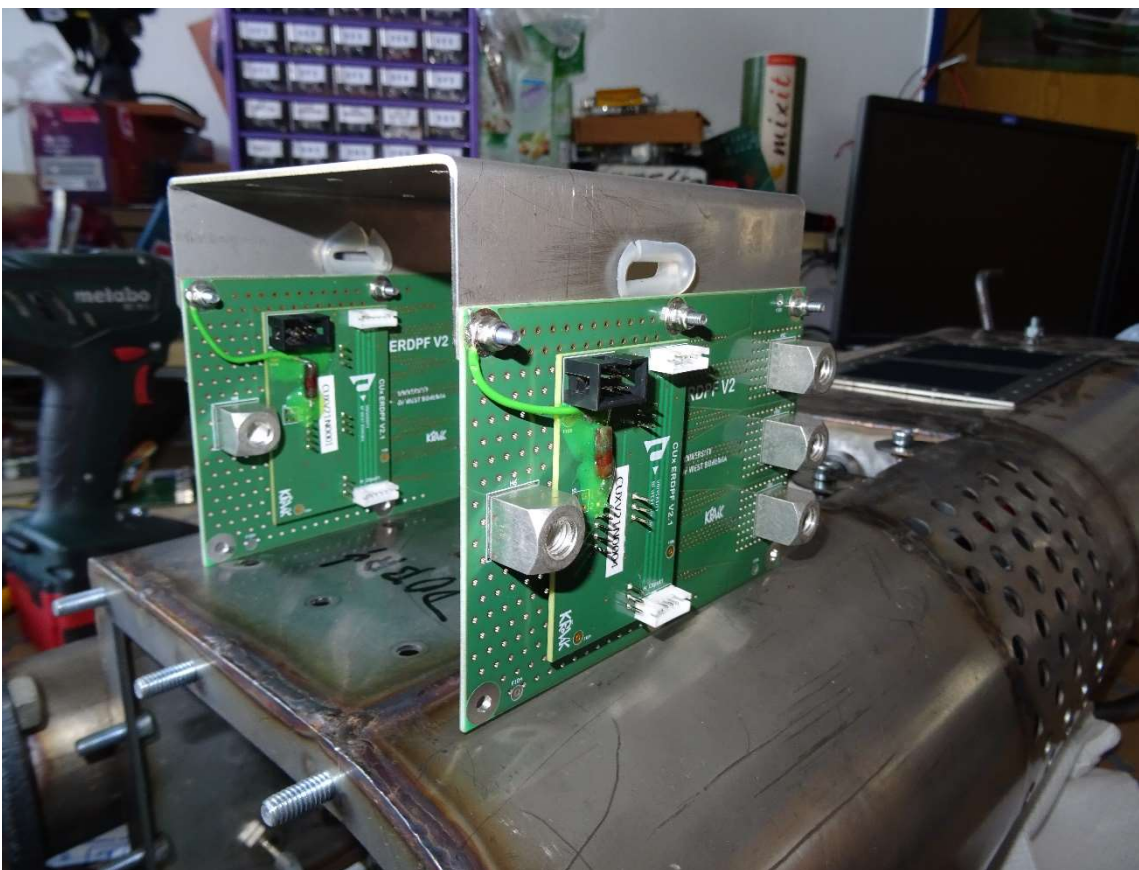
Obrázek 12-1 Kompletní sada čtyř elektronických systémů 24V ERDPF V2



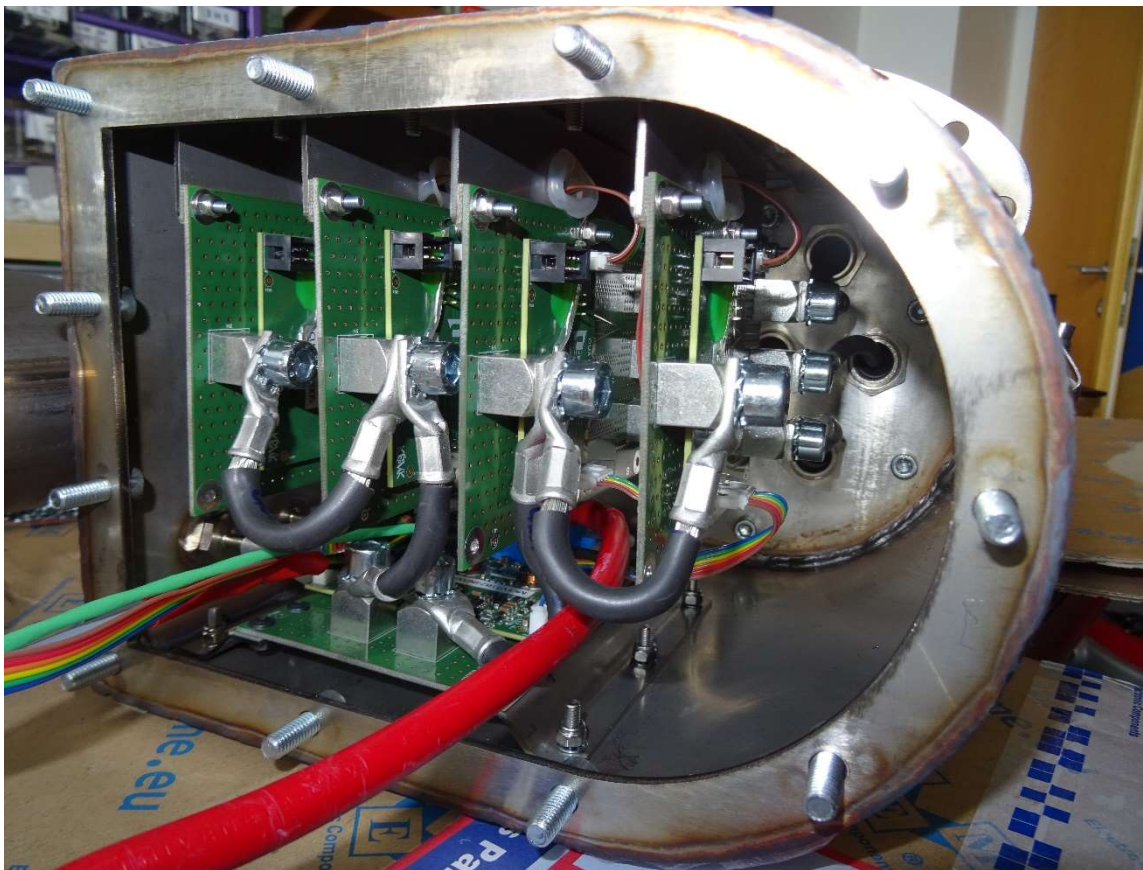
Obrázek 12-2 Detail chladicí komory s dilatačními smyčkami



Obrázek 12-3 Hlavní modul během instalace do těla filtru



Obrázek 12-4 Kompletování sekundárních modulů pro instalaci



Obrázek 12-5 Kompletní osazení elektronického systému



Obrázek 12-6 Zakrytý filtr připravený k instalaci na vozidlo



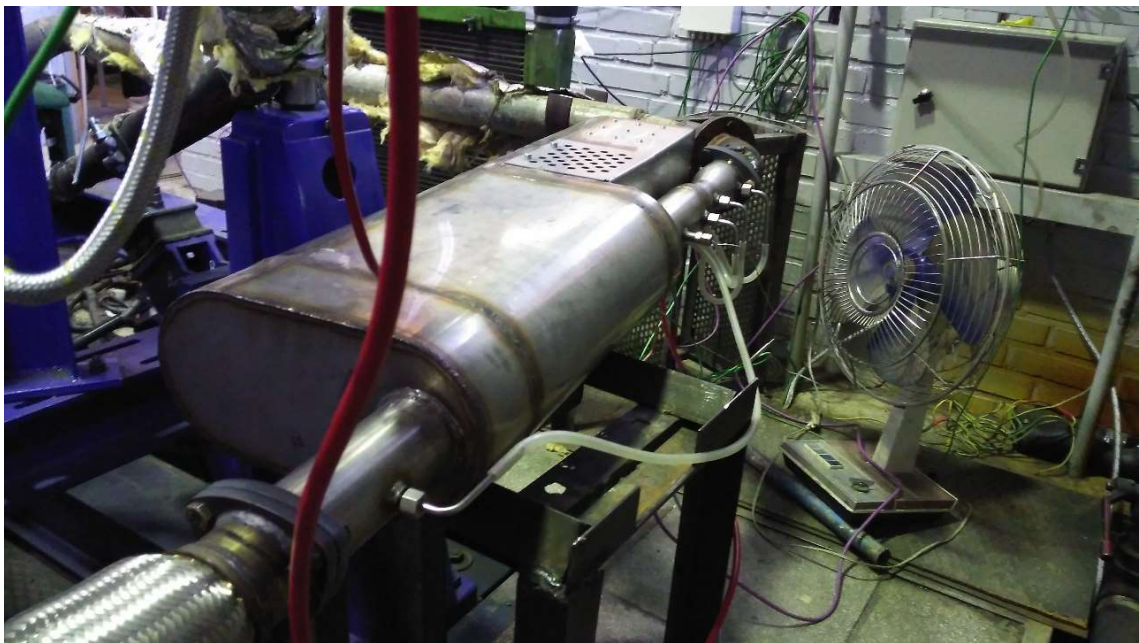
Obrázek 12-7 Transport zkompletovaných filtrů



Obrázek 12-8 Instalace filtru v Iránské islámské republice



Obrázek 12-9 Instalace filtru v Iránské islámské republice



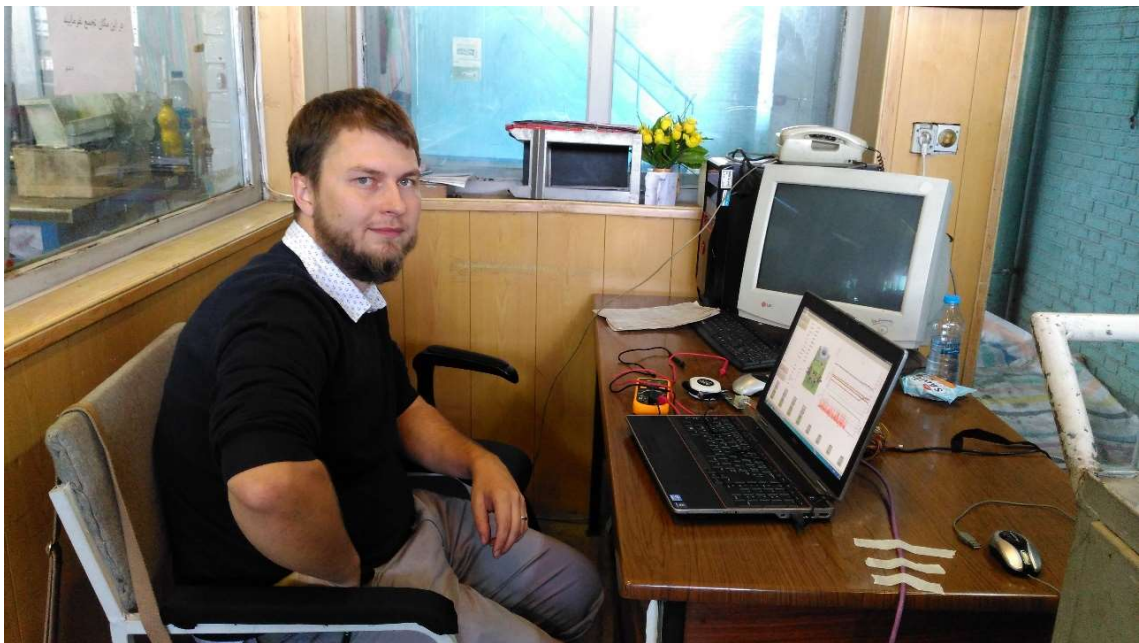
Obrázek 12-10 ERDPF filtr nainstalovaný v testovací laboratoři IDEM



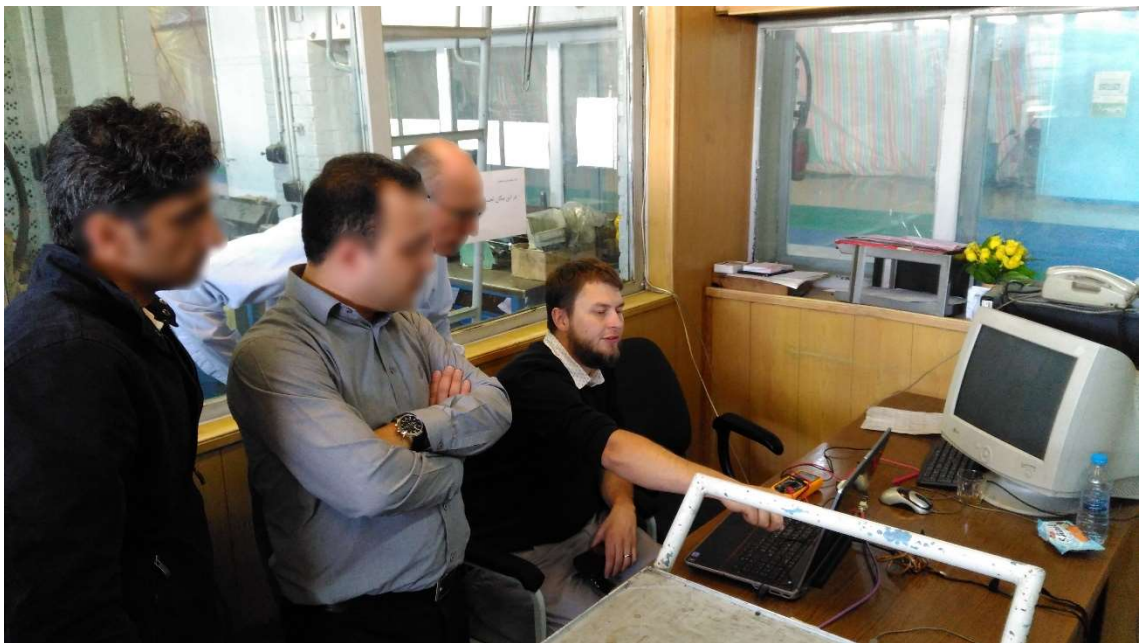
Obrázek 12-11 ERDPF filtr nainstalovaný v testovací laboratoři IDEM



Obrázek 12-12 Celkový pohled na zástavbu v laboratoři IDEM



Obrázek 12-13 Testovací zázemí ve velínu laboratoře



Obrázek 12-14 Diskuze nad probíhajícím testem



Obrázek 12-15 Analýza otestovaného vzorku ERPDF filtru