

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

DISERTAČNÍ PRÁCE

**Nezávislé elektronické systémy pro řízení redukce oxidů
dusíku u spalovacích motorů**

Autor: Ing. Jiří Žahour

Školitel: doc. Ing. Jiří Hammerbauer, PhD.

Plzeň 2019

Klíčová slova

SCR, NO_x, močovina, katalyzátor, emise, výfuk, dieselový motor, systém následného zpracování, dovybavení

Anotace

Práce se zabývá problematikou emisí oxidů dusíku (NO_x) u spalovacích motorů. Cílem je navrhnout koncepci soběstačného systému pro redukci NO_x a prakticky ověřit její funkčnost. V teoretické části jsou popsány základní principy vzniku NO_x a jejich vliv na životní prostředí. Další kapitoly popisují různé technologie pro potlačení těchto emisí. Druhá část práce se zabývá samotným návrhem systému využívající technologii selektivní katalytické redukce (SCR). Zde jsou popsány jednotlivé komponenty systému a jejich vzájemné propojení. Práce se dále zabývá řídicí elektronikou, vlastním principem řízení i diagnostickým rozhraním. V neposlední řadě jsou v závěru práce velmi detailně diskutovány dosažené výsledky v laboratorních testech i v testech z reálného provozu.

Key words

SCR, NO_x, urea, catalyst, emissions, exhaust, diesel engine, aftertreatment system, retrofitting

Abstract

This thesis deals with emissions of nitrogen oxides from combustion engines. The main goal is to design a self-sufficient system for NO_x reduction. In the theoretical part of the thesis, the basic principles of NO_x formation and their influences on environment are described. Next chapters describe various technologies for NO_x reduction. The second part of the thesis deals with designing of the system based on the selective catalytic reduction (SCR) technology. All components and their interconnection are described there. The thesis also deals with design of electronic control system, including the design of electronics units, principle of the control and the diagnostic interface. Finally, the results of emissions tests are detailed discussed.

Prohlášení

Předkládám tímto práci ke státní doktorské zkoušce zpracovanou na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této disertační práce. Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této práce, je legální.

V Plzni dne _____

Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratky

SCR	Selective catalytic reduction - selektivní katalytická redukce
NO _x	Souhrnné označení pro oxid dusnatý a oxid dusičitý
DPF	Diesel particulate filter – filtr pevných částic
PM	Particulate matters – pevné částice
HC	Uhlovodíky
EGR	Exhaust gas recyrculation – recyrculace výfukových plynů
SNCR	Selektivní nekatalytická redukce
NRMM	non-road mobile machinery – nesilniční stroje
HD vehicles	heavy duty vehicles – těžké automobily (nákladní vozy, autobusy)
LNC	Lean NO _x catalyst
LNT	Lean NO _x trap
NAC	NO _x adsorber catalyst
DNT	DeNO _x trap
NSC	NO _x storage catalyst
PNA	pasive NO _x adsorbers
ETC	European tranzient cycle
NRTC	non-road tranzient cycle
NEDC	new European driving cycle
DOC	Diesel oxidation catalyst
ASC	Ammonia slip catalyst
CAN	Controllor area network

Veličiny a jednotky

m	[kg]	Hmotnost
n	[mol]	Látkové množství
M	[kg/mol]	Molární hmotnost
\dot{m}	[kg/s]	Hmotnostní průtok
p_{diff}	[Pa]	Diferenciální tlak
p_{abs}	[Pa]	Absolutní tlak
A_r	[-]	Relativní atomová hmotnost
P	[W]	Výkon
T	[°C]	Teplota
RPM	[ot./min]	Otáčky motoru

Obsah

1	Úvod.....	7
2	Oxidy dusíku.....	8
2.1	Oxid dusný.....	8
2.2	Oxid dusičitý.....	9
2.3	Oxid dusnatý.....	10
2.4	Emisní limity pro osobní a nákladní automobily.....	10
3	Vznik NOx při spalování paliv.....	12
4	Metody pro snižování NOx.....	13
4.1	EGR.....	13
4.2	Adsorbéry NOx.....	15
4.3	Selektivní redukce NOx pomocí uhlovodíků.....	17
4.4	Přidávání vody.....	19
4.5	Selektivní nekatalytická redukce.....	19
4.6	Selektivní katalytická redukce.....	20
4.6.1	Princip SCR.....	21
4.6.2	Druhy SCR katalytických konvertorů.....	23
4.6.3	Výpočet teoretického množství vstříkované močoviny.....	27
5	Prototypový výfukový systém pro snižování NOx.....	30
5.1	Struktura výfukového systému.....	31
5.1.1	Čidlo NOx.....	32
5.1.2	Vstřikovací ventil.....	33
5.1.3	Elektromagnetická pumpa.....	37
5.2	Elektronické uspořádání systému.....	41
5.3	Ladící a diagnostické rozhraní.....	44
6	Laboratorní testy výfukového systému.....	46
6.1	Reálné chování SCR katalytického konvertoru.....	47
6.2	Měření průtoku spalin.....	50
6.3	Tranzientní testy.....	51
6.3.1	ETC test.....	58
6.3.2	Test NRTC.....	61
6.3.3	Test NECD.....	63
7	Testy systému v reálném provozu.....	65
8	Doplňkové funkce systému.....	69
8.1	Diagnostika systému.....	69
8.1.1	Jednoduchý výkonový spínací obvod.....	71
8.1.2	Obvod pro připojení termistoru.....	72
8.1.3	Obvod pro připojení tlakového senzoru.....	72
8.1.4	Obvod řízení membránové pumpy.....	73
8.2	Softwarový zavaděč.....	74
8.2.1	Princip činnosti zavaděče.....	74
8.2.2	Práce se zavaděčem.....	74
8.2.3	Transport protokol.....	76
9	Závěr.....	77
	Příloha A Výkaz ETC testu.....	87
	Příloha B Výkaz NRTC testu.....	89

1 Úvod

Se stále vzrůstajícím počtem obyvatel na planetě a vzrůstající životní úrovni stoupá i počet provozovaných strojů využívajících spalovacích motorů. Tento jev je ještě umocněn vývojem technologií, které snižují cenu, a tím zvyšují dostupnost těchto strojů. Největší početní zastoupení mezi těmito stroji mají zcela jistě osobní a nákladní automobily. Nicméně existuje řada dalších strojů, které by nebylo vhodné opomíjet, například lodě, lokomotivy, zemědělské a stavební stroje, elektrocentrály atd. Všechny tyto stroje během provozu vypouštějí do ovzduší řadu zplodin. Vzhledem ke škodlivosti některých těchto látek pro člověka a životní prostředí vydávají vyspělé státy různé legislativní limity pro emise konkrétních plynů. Tyto normy mají za cíl zlepšit, nebo minimálně udržet, stav životního prostředí.

Cílem této práce je navrhnout koncepci systému pro snižování emisí oxidů dusíku a její použitelnost ověřit na funkčním vzorku. Na rozdíl od běžně dostupných systémů má tento projekt za cíl vytvořit zařízení do značné míry univerzální, s co nejmenším zásahem do samotné konstrukce stroje. Tento požadavek již sám o sobě limituje možné řešení na oblast výfukového, případně sacího systému. Jakýkoliv zásah do samotného motoru je nežádoucí. Vzhledem k velké rozmanitosti způsobů řízení spalovacích motorů požadavek na univerzálnost znamená také nezávislost systému na řídicí jednotce motoru a senzorech ve stroji již zabudovaných. Veškerá data potřebná pro správnou funkci tedy budou měřena samotným zařízením. Je samozřejmé, že jsou zde kladeny nároky na co největší jednoduchost mechanické montáže a s tím související malou velikost zástavbového prostoru.

Funkční systém by umožnil výrobcům strojů jednoduché použití zmiňovaného zařízení bez nutnosti nákladného vývoje vlastního řešení. Toto řešení by bylo zvláště vhodné pro malosériové produkty a úzce specializované stroje. Systém by rovněž splňoval předpoklady pro použití v „retrofitting“ projektech, tedy dovybavení starších strojů moderní technologií. V tomto případě je cílem splnění náročnějších emisních limitů. Zvláště pro úzce specializované stroje s dlouhou životností je toto jedno z mála ekonomických řešení, jak vyhovět stále přísnějším emisním požadavkům.

Paralelně s tímto projektem probíhá vývoj systému pro redukci pevných částic z výfukových plynů, na který jsou kladeny podobné požadavky. Oba systémy mají být navrženy tak, aby mohly pracovat jednak každý samostatně, nebo aby byla možná jejich případná kooperace.

2 Oxidy dusíku

Z chemického hlediska existuje 5 druhů oxidů dusíku. V tabulce je uveden jejich přehled. Z hlediska emisí oxidů dusíku u spalovacích motorů jsou kontrolovány pouze emise oxidu dusnatého a oxidu dusičitého. Tyto dva plyny jsou běžně označovány jako NO_x. Oxidy dusitý a dusičný mají velmi malý význam z hlediska jejich emisí do ovzduší, proto jim bude věnována jen minimální pozornost.

Název	Chemický vzorec
Oxid dusný	N ₂ O
Oxid dusnatý	NO
Oxid dusitý	N ₂ O ₃
Oxid dusičitý	NO ₂
Oxid dusičný	N ₂ O ₅

Tabulka 1: Přehled oxidů dusíku

Oxid dusičný je pevná krystalická látka, ze které při reakci s vodou vzniká kyselina dusičná. Jedná se o látku důležitou pro výrobu výbušnin. Oxid dusičitý sublimuje při teplotě 30 °C, při teplotě 47 °C dochází k jeho rozkladu.

Naopak oxid dusitý nemá pro svou nestabilitu v plynném stavu žádný podstatný technický význam. V kapalném stavu se jedná o tmavě modrou jedovatou látku s teplotou varu 3 °C.

2.1 Oxid dusný

Oxid dusný je všeobecně znám pod názvem „rajský plyn“. Jedná se o bezbarvý plyn, který má lehce nasládlou chuť a příjemnou vůni. Při vdechování způsobuje stavy veselosti, při vyšších dávkách dochází k únavě vedoucí až k anestetickému spánku. Vyšší koncentrace mohou způsobit zástavu dechu či srdce. V lékařství se používá ve směsi s kyslíkem jako anestetikum pro krátkodobé narkózy. Další použití nachází jako oxidační činidlo v raketových pohonech, nebo v některých závodních spalovacích motorech, kde je vstřikován pro zvýšení výkonu. [1]

Z ekologického hlediska je oxid dusný škodlivý ze dvou důvodů. Jednak se jedná o skleníkový plyn, jehož účinky jsou srovnatelné s 200x větším množstvím oxidu uhličitého. Obecně jsou emise skleníkových plynů regulovány Kjótským protokolem. Druhý problém s emisemi N₂O se týká ozonové vrstvy Země. Oxid dusný za přítomnosti ozonu velmi ochotně oxiduje. Produktem je oxid dusnatý. V současnosti je oxid dusný považován za největší hrozbu pro ozonovou vrstvu Země. [2]

Největším umělým zdrojem N_2O jsou hnojiva používaná v zemědělství, nicméně oxid dusný může vznikat také při spalování fosilních paliv. Zajímavé může být, že emise dieselových ani benzinových motorů nejsou pro oxid dusný regulovány. Je ovšem pravdou, že vypouštěné množství N_2O je velmi nízké – pro naftové motory jsou to jednotky ppm, u benzinových je množství nepatrně vyšší.

2.2 Oxid dusičitý

Jedná se o červenohnědý, zapáchající a prudce jedovatý plyn. Pro životní prostředí představuje riziko ze dvou hlavních důvodů. Jedním z problémů je, že plyn reaguje s vodou za vzniku kyseliny dusičné. V praxi to znamená, že v atmosféře reaguje s vodní párou a přímo tak napomáhá vzniku takzvaných „kyselých dešťů“.

Druhým problémem je jeho rozklad na kyslík a oxid dusnatý. Působením ultrafialového záření dochází k chemické reakci dle chemické rovnice 1. Samotný atom kyslíku je velmi reaktivní a dochází ke spojování s atmosférickým kyslíkem, za vzniku ozonu. Takto vzniklý ozon je nazýván jako troposférický (nebo někdy přízemní) ozon a na rozdíl od stratosférického ozonu se považuje za znečišťující látku. Má škodlivé účinky na rostliny i živočichy a dokonce poškozují některé materiály. Mezi nejvýznamnější účinky na lidský organismus patří dráždění dýchacího ústrojí, stahování dýchacích cest, napadání plicních cév přímo v plicních sklípcích, poškozování ochranných komponent očí a poškozování tělových bílkovin. Vyšší koncentrace přízemního ozonu bývají naměřeny za teplých a slunečných dnů. [3]



Samotný děj může v atmosféře probíhat i zpětně, kdy je ozon rozkládán pomocí oxidu dusnatého zpět na oxid dusičitý a kyslík dle chemické reakce 3. Tento fakt by měl za následek vytvoření rovnovážného stavu mezi ozonem a poměrem NO_2 a NO .



Nicméně vyskytují-li se v atmosféře volné peroxylové radikály, tak se podílejí na zpětné oxidaci mnohem účinněji než ozon. Peroxylové radikály se do atmosféry dostávají jak z přírodních zdrojů, tak ze zdrojů umělých. Oxidaci NO popisuje chemická rovnice 4. [3]



Z hlediska ochrany lidského zdraví jsou v České republice pro NO_2 stanoveny maximální limity $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ při průměrování po dobu jedné hodiny. Limitu mezi horní mezí pro posuzování (tj. $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$) a maximální hladinou je povoleno dosáhnout maximálně 18x za rok. Maximální roční průměrná koncentrace je $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. [4]

2.3 Oxid dusnatý

Za normální teploty se jedná o bezbarvý plyn, který je bez zápachu a je pro člověka jedovatý. Zajímavé ale je, že se v lidském organismu podílí na řadě biologických procesů. Jeho funkce a vliv na lidský organismus byla popsána Dr. Louisem J. Ignarrem, který za to dostal v roce 1998 Nobelovu cenu. [5] Oxid dusnatý velmi snadno oxiduje s kyslíkem. Výsledkem oxidace je poté oxid dusičitý, jehož vliv na životní prostředí je popsán výše.

2.4 Emisní limity pro osobní a nákladní automobily

V Evropě jsou definovány emisní limity pro osobní a nákladní automobily normami označovanými jako „EURO x“. Normy rozdělují vozidla do kategorií, pro které udávají maximální emise jednotlivých složek výfukových plynů. V tabulce 2 jsou k vidění emisní limity NO_x pro silniční motorová vozidla se vznětovým motorem, v tabulce 3 se zážehovým motorem. [6]

	M1 diesel [g/km]	N1 class I [g/km]	N1 class II [g/km]	N1 class III [g/km]	N2 [g/km]	HD [g/kWh]
Euro 1	-	-	-	-	-	8
Euro 2	-	-	-	-	-	7
Euro 3	0,5	0,5	0,65	0,78	-	5
Euro 4	0,25	0,25	0,33	0,39	-	3,5
Euro 5	0,18	0,18	0,0235	0,28	0,28	2
Euro 6	0,08	0,08	0,105	0,125	0,125	0,4

Tabulka 2: Evropské emisní limity NO_x pro motorová vozidla se vznětovým motorem

	M1 [g/km]	N1 class I [g/km]	N1 class II [g/km]	N1 class III [g/km]	N2 [g/km]
Euro 1	-	-	-	-	-
Euro 2	-	-	-	-	-
Euro 3	0,15	0,15	0,18	0,21	-
Euro 4	0,08	0,08	0,1	0,11	-
Euro 5	0,06	0,06	0,075	0,082	0,082
Euro 6	0,06	0,06	0,075	0,082	0,082

Tabulka 3: Evropské emisní limity NO_x pro motorová vozidla se zážehovým motorem

Evropské emisní předpisy rovněž definují limity jednotlivých složek zplodin pro takzvané „nesilniční stroje“, často označované zkratkou NRMM (non-road mobile machinery). Jednotlivé normy jsou označovány jako „stage I“ až „stage V“. Původní normy „stage I až IV“ definovaly maximální emise pouze pro stroje s dieselovým motorem, nicméně evropská komise vydala v roce 2002 dodatek, který k normám „stage I a II“ přidává limity pro malé benzinové stroje s výkonem menším než 19 kW. Nejnovější norma „stage V“ kromě veškerých vznětových strojů definuje také limity pro benzinové stroje s výkonem nad 56 kW. V normách „stage I až IV“ jsou stroje rozděleny do kategorií dle výkonu a zároveň je zde specifikováno jejich použití. Norma „stage V“ předpisy značně zjednodušuje, protože definuje limity pro všechny motory bez rozdílu použití. Z hlediska emisí NO_x normy určují limity pro samotné NO_x nebo dohromady NO_x a uhlovodíky (HC). V tabulkách 4 a 5 je zobrazen souhrn emisních limitů pro nesilniční stroje rozdělených dle výkonnostních tříd. Tyto tabulky mají jen informativní charakter, protože nerespektují konkrétní aplikace a tedy existuje řada výjimek. Mají se pokusit nastínit povědomí o jinak, dle mého názoru nepřehledných, emisních limitech. [7] [8]

	18 ≤ P < 37	37 ≤ P < 75	56 ≤ P < 130	75 ≤ P < 130	130 ≤ P ≤ 560	P > 560
	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]
stage I	-	9,2	-	9,2	9,2	-
stage II	8	7	-	6	6	-
stage III B	-	-	-	3,3	2	-
stage IV	-	-	0,4	-	0,4	-
stage V	-	-	0,4	-	0,4	3,5

Tabulka 4: Emisní limity NO_x pro nesilniční stroje

	P < 8	8 ≤ P < 19	19 ≤ P < 37	37 ≤ P < 56	37 ≤ P < 75	75 ≤ P < 130	130 ≤ P ≤ 560
	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]
stage III A	-	-	7,5	-	4,7	4	4
stage III B	-	-	-	4,7	-	-	-
stage V	7,5	7,5	4,7	4,7	-	-	-

Tabulka 5: Emisní limity NO_x+HC pro nesilniční stroje

3 Vznik NO_x při spalování paliv

Emise oxidů dusíku, vzniklé při spalování paliv, ovlivňuje řada faktorů a existují různé mechanismy jejich vzniku. Primárně vzniká oxid dusnatý a z něj se poté může formovat oxid dusičitý. Mezi faktory ovlivňující mechanismy pro vznik NO_x patří teplota během spalování, tlak, způsob hoření, doba trvání hoření a koncentrace jednotlivých prvků vstupujících do chemických reakcí. Mechanismy vzniku NO_x můžeme rozdělit do tří následujících skupin:

- 1) Palivové
- 2) Promptní
- 3) Termické

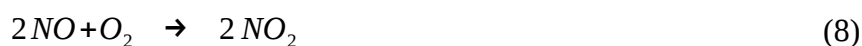
Palivové oxidy dusíku vznikají oxidací dusíku obsaženém v samotném palivu. Tato složka například tvoří až 80 % celkových emisí NO_x při spalování uhlí. Použitím bezdusíkatých paliv lze tuto složku zcela potlačit. Vzhledem k tomu, že paliva běžně používaná ve spalovacích motorech neobsahují dusíkaté látky, nebude jim v této práci věnována další pozornost. [9] [10]

Promptní mechanismus vzniku NO_x (někdy též nazývaný Fenimorův mechanismus dle svého objevitele) je založen na reakci molekulárního dusíku obsaženém v nasávaném vzduchu s uhlovodíkovými radikály pocházejícím z paliva. Touto cestou vznikají meziprodukty, které se dále podílejí na tvorbě NO_x. Obecně se promptní mechanismus podílí jen velmi malou měrou na celkových emisích NO_x a jeho potlačení je značně problematické.

Termické oxidy dusíku mají největší podíl na celkových emisích NO_x u klasických spalovacích motorů. Formují se z dusíku obsaženým v samotném vzduchu. Chemické reakce 5, 6 a 7 zobrazují základní princip formování oxidu dusnatého.



Všechny tyto reakce jsou velmi závislé na teplotě. Při teplotách pod cca 1400 °C se projevují již velmi málo, naopak při překročení teplot přes 1700 °C dojde k prudkému nárůstu vzniku NO termickou cestou. Tato velká závislost na teplotě má za následek, že během ochlazení válce motoru po expanzním taktu produkce NO okamžitě ustává. Oxid dusičitý se může formovat oxidací z NO dle chemické rovnice 8.



4 Metody pro snižování NOx

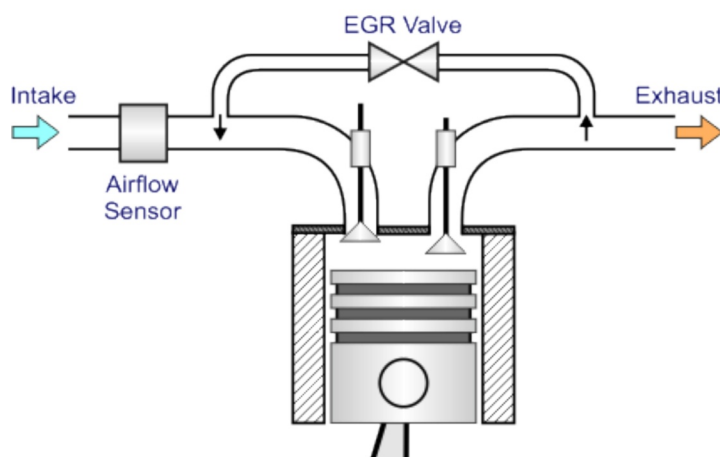
Metody pro snižování NOx dělíme do dvou základních kategorií:

- 1) primární
- 2) sekundární

Primární metody se zabývají potlačením samotného vzniku NOx, tedy potlačením podmínek vhodných pro tvorbu těchto plynů. **Sekundární** metody se naopak zabývají odstraněním NOx až z výfukových plynů, tedy nijak neovlivňují samotný spalovací proces.

4.1 EGR

Technologie EGR „Exhaust Gas Recirculation“, tedy recirkulace spalin, patří mezi primární metody odstraňování NOx. Základní princip je založen na opětovném přivedení části výfukových plynů do spalovacího prostoru motoru. Tento princip je schématicky znázorněn na obrázku 1. Část výfukových plynů je zde zpětným potrubím přiváděna do nasávacího potrubí. Množství takto recirkulovaných plynů je regulováno pomocí EGR ventilu. Výfukové plyny jsou poté smíchávány s čistým vzduchem v proměnném poměru v závislosti na provozních podmínkách motoru. [11]



Obrázek 1: Schématické znázornění EGR systému [11]

Smíchání čerstvého vzduchu s výfukovými plyny má za následek úbytek kyslíku v nasávané směsi, naopak množství oxidu uhličitého se ve směsi zvyšuje. Cílem celého procesu je snížit teplotu během spalování a tím zhoršit podmínky pro formování termických NOx. Snížení teploty lze popsat pomocí 4 jevů – ředící efekt, efekt přidané hmoty, termický efekt a chemický efekt. Tyto jevy spolu velmi úzce souvisí, nicméně pro snadné vysvětlení je lze oddělit.

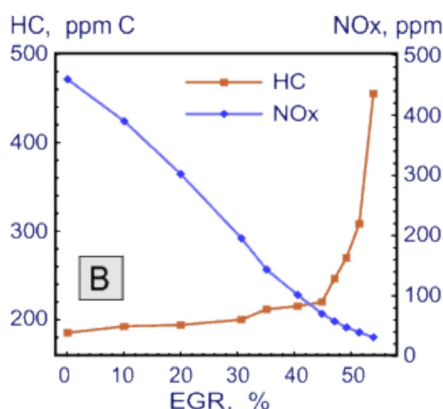
Ředící efekt je způsoben menší koncentrací kyslíku v nasávané směsi. Je patrné, že pro dokonalé spálení určitého množství paliva je zapotřebí jisté konkrétní množství kyslíku. Nicméně toto potřebné množství je u směsi s řidší koncentrací situováno do větší objemové plochy. To má za následek, že po zapálení směsi paliva se „vzduchem“, musí palivo hořet v daleko větším objemu, tak aby mělo dostatek kyslíku pro úplné spálení. Toto rozložení hoření do vyššího objemu má za následek také rovnoměrnější rozložení teploty, a proto se zde dosahuje lokálně nižších teplotních extrémů.

Ukázalo se, že nižší koncentrace kyslíku, a tedy jeho menší dostupnost pro chemické reakce odpovědné za tvorbu NO_x, má velmi malý přímý vliv na jeho tvorbu. Tedy tyto reakce probíhají přibližně ve stejné míře při různých koncentracích kyslíku a rozdíl závisí převážně na dosahované teplotě. [11]

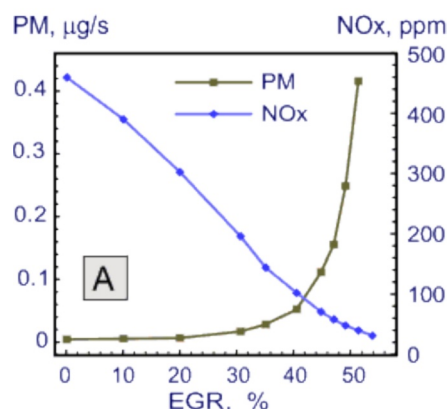
Efekt přidané hmoty je způsoben přidáním rychle proudících výfukových plynů do nasávacího potrubí. Tím se zvýší celkový průtok plynů proudících do spalovací komory, což má za následek vyšší hustotu směsi. Společně s hustotou vzroste i tepelná kapacita nasáté směsi, čímž se opět omezí maximální teplota, které je dosaženo. [11]

Termický efekt je také založen na změně tepelné kapacity. Ovšem nemění se zde hmota, ale druh vstupních plynů. Výfukové plyny obsahují hodně oxidu uhličitého a vodní páry. Oba tyto plyny mají tepelnou kapacitu vyšší než čistý nasávaný vzduch. [11]

Část výfukových plynů znovu zavedených do spalovacího prostoru se nicméně může podílet na chemických reakcích probíhajících během spalování a tím ovlivňovat samotný proces hoření. Mluvíme zde o **chemickém efektu**. Některé chemické reakce mohou vést k ochlazení plamene. Tomu může docházet endotermickou reakcí, jako je například disociace CO₂ a H₂O. [11]



Obrázek 2: Graf emisí NO_x a HC v závislosti na otevření EGR ventilu [12]



Obrázek 3: Graf emisí NO_x a PM v závislosti na otevření EGR ventilu [12]

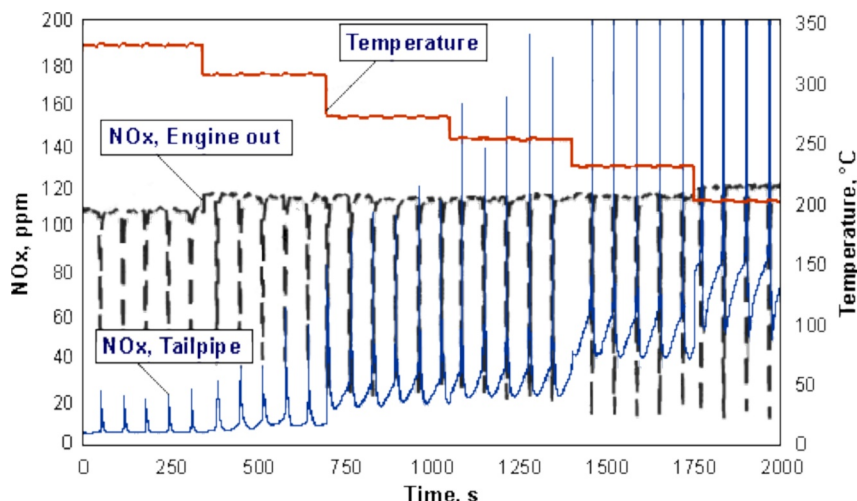
Použitím systému EGR lze dosáhnout velmi vysoké efektivity redukce oxidů dusíku. Existuje několik variant s různým uspořádáním zpětného potrubí, kde každá varianta přináší určité výhody a nevýhody. Bohužel, obecně dosažení nízkých emisí oxidů dusíku touto technologií je vykoupeno zhoršením jiných parametrů. Jedná se o zvýšení emisí pevných částic (PM), zvýšení emisí uhlovodíků (HC) a v neposlední řadě zvýšení spotřeby paliva. Na obrázcích 2 a 3 jsou velmi dobře znázorněny protichůdné parametry emisí NO_x proti pevným částicím a proti uhlovodíkům. Proto správné nastavení EGR systému vyžaduje určité kompromisy. [12]

4.2 Adsorbéry NO_x

Tato technologie využívá principu adsorpce a desorpce NO_x na povrchu pevné látky za určitých podmínek. Můžeme též mluvit o „dočasném ukládání“ NO_x na povrchu adsorbentu. Adsorbéry NO_x lze rozdělit do dvou základních skupin:

- 1) aktivní
- 2) pasivní

Aktivní adsorbéry se používají v režimu periodické adsorpce a desorpce NO_x. K adsorpci dochází v režimu „chudé směsi“, tedy když ve výfukových plynech nejsou žádné zbytky paliva. Naopak bohatá směs způsobí uvolnění nahromaděného NO_x na povrchu adsorbentu, tento děj bývá také označován jako „regenerace adsorbéru NO_x“. V praxi se používá frekvence regenerace přibližně jednou za minutu a v porovnání s fází adsorbování je doba potřebná pro regeneraci násobně kratší. Po regeneraci jsou uvolněné oxidy dusíku katalyticky redukovány na klasickém třicestném katalyzátoru. Vzhledem k tomu, že třicestný katalyzátor může pracovat jen v úzkém pásmu poměru vzduchu a paliva, je jeho použití u dieselových motorů problematické. NO_x adsorbér tento problém odstraňuje právě tím, že během fáze „plnění“ zachytává NO_x a třicestný katalyzátor nemá co redukovat (a ani nemůže, protože je ve výfukových plynech velký přebytek kyslíku). Pro regeneraci změni řídicí jednotka krátce chod motoru tak, aby na krátký okamžik vznikla bohatší směs, tím dojde k uvolnění nahromaděných NO_x v adsorbéru, a protože ve výfukových plynech není přebytek kyslíku, může dojít na třicestném katalyzátoru k redukci NO_x na dusík a oxid uhličitý. Důležité je dodržet teplotní rozsah (někdy nazýván „teplotním oknem“), ve kterém je adsorbér schopen pracovat. Provozní teplota adsorbéru se pohybuje v rozmezí cca 200 °C – 450 °C, kde maximální účinnosti dosahuje přibližně ve středu tohoto pásma. Obrázek 4 ukazuje průběhy emisí oxidů dusíku při použití NO_x adsorbéru. Jsou zde patrné emisní špičky na výstupu systému v okamžiku regenerace. Nicméně i tyto maximální hodnoty výstupní koncentrace NO_x jsou znatelně menší než hodnoty koncentrace na výstupu motoru. Z grafu je rovněž patrná zhoršená účinnost při nižších teplotách. [13]



Obrázek 4: Emise NOx při použití NOx adsorbentu [13]

Použití NOx adsorbéru se vyznačuje dvěma nevýhodami. První je, že k regeneraci dochází nejen v režimu bohaté směsi, ale i nezávisle za vysokých teplot. Vysoké teploty tedy neumožňují výše popsanou funkci periodického ukládání a uvolňování NOx a tím znemožňují (nebo velmi limitují) použití NOx adsorbérů u těžkých nákladních automobilů, které běžně dosahují těchto vysokých teplot. Druhou nevýhodou je nutnost periodicky měnit režim motoru. S tímto požadavkem je nutno počítat už při samotném návrhu řízení motoru a proto nelze tuto technologii použít pro retrofitting aplikace.

Pro tento způsob odstranění emisí NOx se vžilo hned několik názvů. „NOx adsorber catalyst“ (NAC), „DeNOx trap“ (DNT), „NOx storage catalyst“ (NSC), „NOx storage-reduction catalyst“ (NSR) nebo „Lean NOx trap“ (LNT). Všechny tyto názvy patří stejné technologii. [13]

Druhou skupinou jsou takzvané **pasivní** NOx adsorbéry, označované zkratkou PNA (Passive NOx adsorbers). Pasivní adsorbéry jsou značně novější technologií než výše zmiňovaná aktivní verze. Jedním z rozdílů PNA je schopnost ukládat NOx již při teplotách nad 100 °C. Dále zde k regeneraci nedochází pomocí bohaté palivové směsi, ale pouze zvýšením teploty nad určitou mez. Teplota potřebná k regeneraci se pohybuje kolem 250 °C. PNA tedy svými vlastnostmi může velmi vhodně doplnit technologii, která nefunguje za nízkých teplot, a tím tedy snížit emise NOx v době ohřevu systému. Nabízí se zde použití se systémem SCR, který funguje od teplot cca 200 °C. [13]

4.3 Selektivní redukce NO_x pomocí uhlovodíků

V devadesátých letech bylo objeveno, že některé katalytické konvertory jsou schopné selektivní katalytické redukce NO_x za pomoci uhlovodíků. Pro tyto katalytické konvertory se vžil název LNC „lean NO_x catalysts” nebo „DeNO_x katalyzátor”. Chemická reakce 9 zobrazuje základní princip LNC katalyzátoru. Dochází zde k reakci uhlovodíků s NO_x za vzniku dusíku, oxidu uhličitého a vodní páry. U aplikací s naftovými motory může být zdrojem uhlovodíků s výhodou samotné palivo. [14]



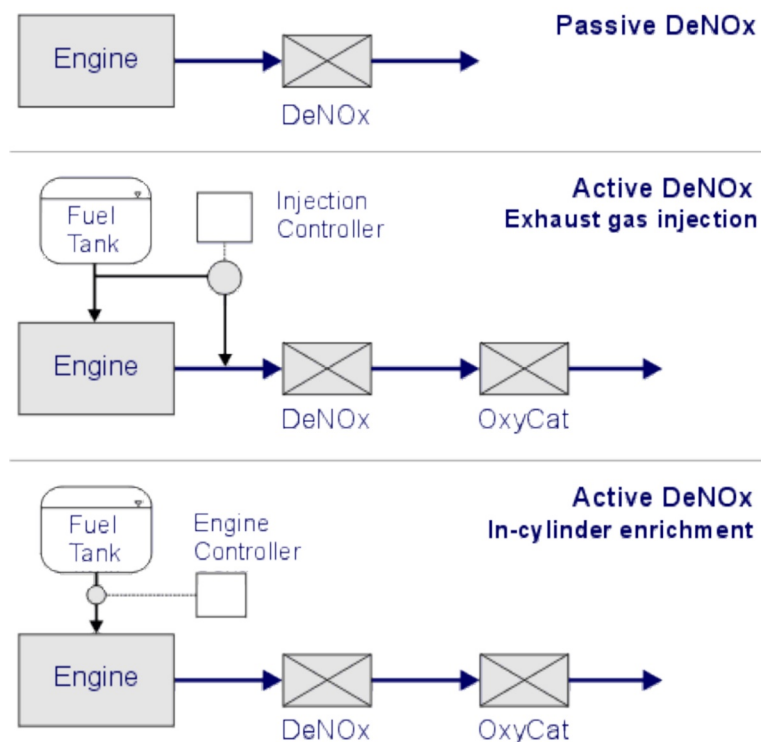
Důležitou vlastností těchto katalyzátorů je selektivita. Je žádoucí, aby katalyzátor „upřednostňoval“ chemickou reakci 9 před oxidací uhlovodíků (reakce 10), tedy před reakcí probíhající v běžných oxidačních katalyzátorech. Samotná selektivita z hlediska upřednostnění jedné reakce před druhou je ovlivněna mnoha faktory. Kromě způsobu provedení vlastního katalytického konvertoru, je závislá na teplotě, obsahu kyslíku ve výfukových plynech, složení uhlovodíků a poměru uhlovodíků ku NO_x. V ideálním případě bude probíhat pouze chemická reakce 9, jejímž produktem je čistý dusík. V praxi se ale na výstupu systému bude vyskytovat mix dusíku a oxidu dusného. I zde se určuje selektivita, ovšem ta se vypočítává z poměru molárních hmotností čistého dusíku a oxidu dusného. [14]

LNC lze rovněž rozdělit na aktivní a pasivní. Rozdělení se určuje na základě zdroje uhlovodíku potřebných pro zmíněné chemické reakce. Pasivní systém využívá skutečnosti, že samotný motor vždy produkuje určité množství uhlovodíků. Tento systém je velmi jednoduchý a vlastně nepotřebuje žádnou součinnost s ostatními prvky stroje. Jeho účinnost je ale značně limitována množstvím produkovaných uhlovodíků, které je dnes běžně značně menší, než množství produkovaných NO_x. Kromě toho je celková účinnost ještě ovlivněna selektivitou vlastního katalytického konvertoru. [14]

Tuto nevýhodu odstraňují aktivní LNC systémy. Ty uměle zvyšují množství uhlovodíků ve výfukových plynech tak, aby jich zde byl dostatek pro požadované chemické reakce. Toho lze dosáhnout dvěma základními principy. První z nich je vstřikování paliva přímo do výfukového potrubí. Toto řešení je velmi spolehlivé, ovšem přináší jisté zvýšení nákladů při výrobě systému. Druhým způsobem je změna řízení vstřikování paliva do válců. U motorů využívajících systém common rail, může být použito dodatečné vstříknutí paliva ke konci spalovacího cyklu. U klasického mechanického vstříku může být nastavena pouhá pozdější injekce paliva. Obě varianty sebou nesou jen velmi nízké náklady na implementaci, protože se jedná jen o softwarovou změnu řízení, či případné mechanické přenastavení motoru. [14]

Aktivní obohacování výfukové směsi sebou pochopitelně nese velkou nevýhodu v podobě vyšší spotřeby paliva. V případě použití vstřikování paliva na konci spalovacího cyklu u systému common rail, dochází vlivem kontaktu paliva a stěny válce ke smývání olejového ochranného filmu a tím ke snižování životnosti motoru. Tato problematika je blíže popsána v [15]. U zpožděného vstřikování paliva není tento problém tak výrazný, ovšem zde je efektivita obohacování výfukové směsi nižší, protože dochází k částečnému spálení paliva dříve než opustí prostor válce. [14]

Obrázek 5 znázorňuje výše popsané možnosti využití LNC technologie.



Obrázek 5: Způsoby využití LNC [14]

4.4 Přidávání vody

Ačkoliv se může zdát přidávání vody do spalovacího procesu kontraproduktivní, jedná se o zvládnutou primární metodu pro potlačení vzniku NO_x. Základním problémem vody ve spalovacím prostoru je fakt, že voda při kontaktu se stěnou válce okamžitě ničí ochranný olejový film, což má za následek velmi rychlé opotřebení motoru. Toto ale platí pouze pro vodu v kapalném skupenství, vodní pára je v tomto ohledu neškodná. Další negativní vliv může přijít s kondenzací vodní páry, případně kondenzací kyseliny sírové, a s tím spojené problémy s korozí. Nicméně vzhledem k tomu, že i při vysokých koncentracích vody v poměru k palivu je rosný bod velmi nízký, tak pro zahřátý motor tyto problémy nehrozí. [16]

Obecně přidávání vody vede ke zvýšení hmoty spalované směsi. To má za následek její větší setrvačný moment při vstupu do válce a tím dojde i k lepšímu promíchání. Protože v takto promíchané směsi se ke každé molekule paliva dostane snáze potřebný počet molekul kyslíku, zvýší se současně rychlost a kvalita hoření. To vede ke zvýšení množství uvolněného tepla a s tím související nárůst tlaku. Jak bylo popsáno v kapitole 3, vysoká teplota a tlak jsou hlavní příčinou vzniku NO_x, tedy popsáný efekt se zdá být kontraproduktivní. Je však potřeba si uvědomit, že voda díky své velké tepelné kapacitě značnou část uvolněného tepla akumuluje, a tím potlačí tepelné špičky primárně zodpovědné za formování NO_x (tento jev je velmi podobný procesu který využívá EGR). Díky rychlejšímu hoření je také kratší doba, kdy jsou vhodné podmínky pro formování NO_x. Uvádí se, že touto technologií lze dosáhnout až 50% redukce oxidů dusíku. [16]

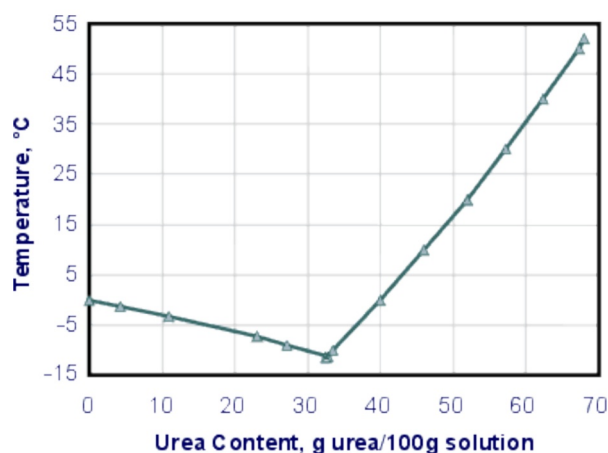
4.5 Selektivní nekatalytická redukce

Selektivní nekatalytická redukce (SNCR) je reakcí čpavku s oxidy dusíku. Produktem této reakce je v ideálním případě pouze dusík, vodní pára a oxid uhličitý. K reakci dochází ale až při značně vysokých teplotách. Nejvyšší účinnosti se dosahuje v rozmezí cca 800 – 1100 °C. Výfukové plyny v automobilech jen těžko dosáhnou těchto teplot, proto se SNCR používá u kotlů například v elektrárnách.

4.6 Selektivní katalytická redukce

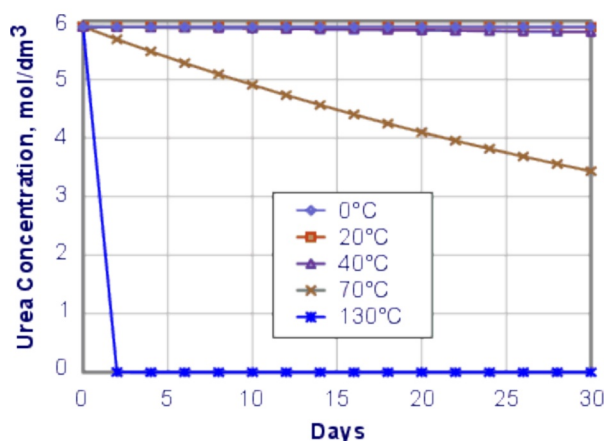
Selektivní katalytická redukce (SCR) je rovněž založena na principu dodávání čpavku do výfukových plynů. Na rozdíl od SNCR zde čpavek reaguje s oxidy dusíku za pomoci katalyzátoru. To umožňuje funkci za daleko nižších teplot. Problémem u této technologie (zvláště pak použití ve vozidlech) může být zdroj čpavku. Skladovat čistý čpavek v nějaké zásobní tlakové nádobě může být riskantní, protože čpavek je velmi toxická a nebezpečná látka. Proto se v praktickém použití jako zdroj čpavku začal používat vodný roztok močoviny. Tento bezbarvý roztok je komerčně označován jako „AdBlue“, nicméně původní název je AUS32 (Aqueous Urea Solution 32.5%). Ten splňuje požadavky pro použití v dopravních prostředcích – je levný, snadno se s ním manipuluje a je bezpečný. Mezi nevýhody tohoto roztoku můžeme zařadit jeho větší hmotnost a nutnost vyšších teplot ve výfukovém systému pro jeho dekompozici. [17]

Další nevýhodou může být jeho malá odolnost proti mrznutí. I když lze čistou močovinu namíchat v poměru 50:50, v praxi se používá 32,5% roztok. Jak ukazuje obrázek 6, právě při této koncentraci má močovina nejnižší teplotu tuhnutí, která je rovna $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$. Roztok o této koncentraci se nazývá eutektický. Znamená to, že při tuhnutí se krystaly vody a močoviny vytváří společně. To má za následek, že při částečném zamrznutí roztoku v nádrži, se nezmění koncentrace stále kapalného roztoku. [17]



Obrázek 6: Teploty mrznutí vodného roztoku močoviny pro různé koncentrace [17]

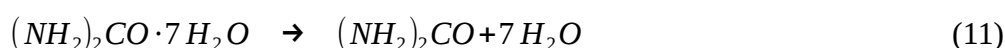
Močovina v roztoku se časem rozkládá na čpavek a oxid uhličitý. Rychlost rozkladu závisí na jeho teplotě. To v praxi znamená, že roztok „stárne“ a snižuje se jeho koncentrace. Obrázek 7 zobrazuje tento děj pro různé teploty. Je evidentní, že rychlost rozkladu razantně stoupá s teplotami nad $40\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Obrázek 7: Snižování koncentrace močoviny za různých teplot [17]

4.6.1 Princip SCR

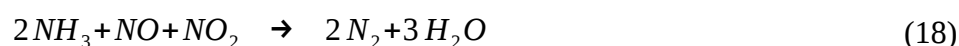
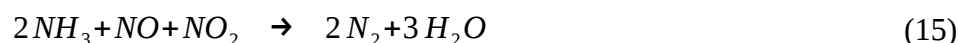
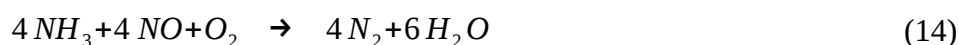
Níže zmíněné chemické rovnice popisují základní princip SCR. Vodný roztok močoviny je vstřikován do výfukového systému. Pokud jsou teploty výfukových plynů dostatečně vysoké, způsobí okamžité odpaření vody a následný termální rozklad močoviny na čpavek a kyselinu isokyanatou. Děj je popsán reakcemi 11 a 12. Samotný termální rozklad močoviny popsán v rovnici 12 potřebuje teplotu minimálně 160 °C. Nicméně tato teplota nestačí, aby se močovina rozložila ještě v plynné fázi, velká většina se rozloží až za pomoci katalyzátoru. Při teplotě 330 °C se v plynné fázi rozloží pouze 20 % močoviny, při 450 °C asi 50 %. [17] [18]



Rovněž k rozkladu kyseliny isokyanaté dochází především až na povrchu katalytického konvertoru. Obecně kyselina isokyanatá v kombinaci s vodou hydrolyzuje a protože po injekci roztoku močoviny je ve výfukových plynech dostatek vodní páry, tak k tomuto ději dochází i zde. Jak ukazuje chemická reakce číslo 13, produktem hydrolyzy je čpavek a oxid uhličitý.



Čpavek se dále usazuje na povrchu katalytického materiálu, kde reaguje s oxidy dusíku dle reakcí 14 až 18. Reakce 14 se nazývá „normální SCR reakce“ a na redukci NO se podílí nejvyšší měrou. Reakce 15 je nazývána „rychlá SCR reakce“ a reakce číslo 16 „pomalá SCR reakce“.



Nežádoucím dějem, probíhajícím v SCR katalyzátoru, je oxidace čpavku za vzniku NO_x dle chemických reakcí 19, 20 a 21. To má za následek zvýšení emisí NO_x, v případě reakce 20 „pouze“ plýtvání amoniakem.



Za nízkých teplot může docházet k reakci oxidu dusičitého se čpavkem za vzniku dusičnanu amonného. Ten se může dále usazovat v pórech katalytického materiálu a tím způsobovat jeho trvalou deaktivaci. Vznik dusičnanu amonného lze minimalizovat provozní teplotou vyšší než 200 °C. Dalším faktorem je dodržení maximálního stechiometrického poměru mezi čpavkem a oxidy dusíku. Jinými slovy, nedodávat do systému více čpavku než je zapotřebí.

Velkou výhodou systému SCR je oproti konkurenčním technologiím fakt, že nijak neovlivňuje chod motoru. Motor tedy může být naladěn pomocí vysokotlakého vstřikování paliva a pokročilým systémem časování na nízké emise pevných částic a malou spotřebu paliva, aniž by se zásadním způsobem hledělo na emise oxidů dusíku. Vzniklé NO_x jsou poté redukovány samotnou katalytickou reakcí. To znamená, že se zde neřeší kompromisy s emisemi NO_x a PM, jako například u konkurenčního systému EGR. Proto použití SCR umožňuje splnit náročné požadavky na emise pevných částic i oxidů dusíku. Další nespornou výhodou je, že použitím SCR se prakticky nezvyšuje spotřeba paliva. Na druhou stranu jsou zde vyžadovány jisté provozní náklady na spotřebovanou močovinu, jejíž spotřeba je rovna přibližně 3 – 7 % spotřebovávaného paliva.

4.6.2 Druhy SCR katalytických konvertorů

Každý katalytický konvertor se obecně skládá ze substrátu a vlastního katalytického materiálu. Substrát katalytického konvertoru slouží jako nosná část pro samotný katalytický materiál. Na substráty jsou kladeny tyto požadavky:

- velká plocha povrchu pro katalytický materiál
- velký celkový průřez kanálků pro vedení spalin
- malá teplotní kapacita
- malá hmotnost
- velká teplotní odolnost
- odolnost vůči oxidaci
- malá teplotní roztažnost
- mechanická odolnost
- kompatibilita s katalytickým materiálem a jeho snadné nanášení

Běžně se používají 2 základní typy substrátů – keramický a kovový. Keramický substrát se vyrábí převážně ze syntetického kordieritu. Základní materiály a případná aditiva jsou rozmělněny na prášek a rozmíchány s vodou. Vzniklá hmota je poté extrudována do požadovaného tvaru. Příklad katalytického konvertoru je zobrazen na obrázku 8. Naopak kovové substráty, jak je patrné z obrázku 9, jsou tvořeny tenkou kovovou fólií, která má profil vlnovce. Tato fólie může být uspořádána různými způsoby, vždy tak aby se dosáhlo maximální plochy pro samotnou katalytickou vrstvu. Obecně se dá s kovovými substráty dosáhnout menší tloušťky stěny než u keramických, čímž se sníží odpor pro proudění výfukových plynů.

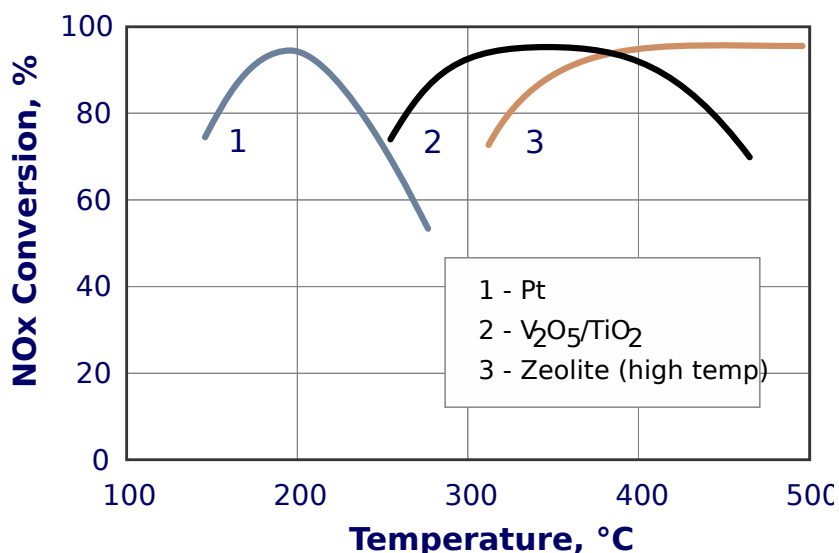


Obrázek 8: Katalytický konvertor s keramickým substrátem



Obrázek 9: Katalytický konvertor s kovovým substrátem

Pro technologii SCR bylo vyvinuto několik typů katalyzátorů. Hlavním požadavkem na SCR katalyzátor je vysoká selektivita, tedy aby upřednostňoval chemické reakce čpavku s oxidy dusíku (reakce 14 až 18) před oxidací čpavku (reakce 19 až 21). Poprvé byla selektivní katalytická redukce objevena na platinovém katalyzátoru. Postupným vývojem byly objeveny další typy katalyzátorů vhodných pro SCR. Nejprve byly objeveny dva typy kovových katalyzátorů, oba založené na vanadiu, a dále novější typ založený na zeolitu. Zeolitový katalyzátor existuje opět ve dvou provedeních. Po praktické stránce je nejvýznamnější rozdíl mezi jednotlivými technologiemi v teplotním rozsahu, kdy katalyzátory pracují s vysokou účinností. Obrázek 10 zobrazuje průběhy účinnosti pro základní typy SCR katalyzátorů. [17]

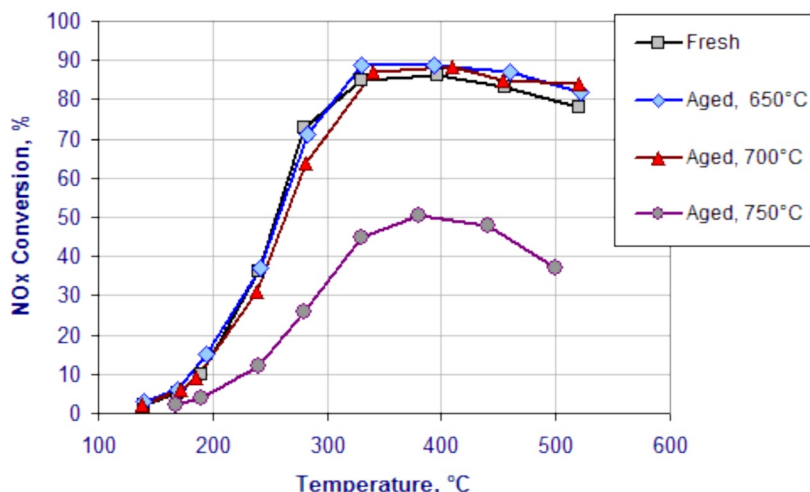


Obrázek 10: Efektivita redukce NO_x pro různé typy katalyzátorů [17]

Je patrné, že **platinový katalyzátor** má teplotní okno velmi úzké, efektivně funguje v rozmezí přibližně 175 – 225 °C. Na vyšších teplotách již začne převládat oxidace čpavku (reakce 19 až 21) a efektivita rapidně klesá. Dalším problémem je vznik dusičnanu amonného, který, jak bylo zmíněno výše, může katalyzátor zničit. Z podmínky pro omezení jeho vzniku vyplývá, že pracovní teplota nesmí klesnout pod 200 °C. Tento problém tedy dále zužuje pracovní okno na 200 – 225 °C. Použití tohoto typu katalyzátoru v mobilních aplikacích je tedy značně problematické. [17]

Označení „**Vanadiový katalyzátor**“ náleží katalytickému konvertoru, který má na základním katalytickém materiálu nanesenu vrstvu oxidu vanadičného. Poprvé byl použit jako základní materiál oxid hlinitý. Takto vytvořený katalytický konvertor ovšem nemůže být použit v aplikacích, kde se ve výfukových plynech vyskytuje síra. Ta totiž reaguje s oxidem hlinitým za vzniku síranu hlinitého, který způsobuje deaktivaci katalyzátoru. Řešením tohoto problému bylo nahrazení oxidu hlinitého oxidem titaničitým (TiO_2). [17]

Obecně katalyzátor založený na vanadiu má daleko širší teplotní okno než platinový katalyzátor. Nejvyšší účinnosti dosahuje mezi 260 až 400 °C. I zde při vyšších teplotách dochází ke ztrátě selektivity a začíná převládat oxidace čpavku před redukcí oxidů dusíku. Pokud je jako základní materiál použit TiO_2 , může při vysokých teplotách nastat ještě jeden problém. Obecně oxid titaničitý existuje ve více krystalových strukturách. Pro základní katalytický materiál se používá struktura, která se nazývá anatas. Při dosažení teplot přes 550 °C se ale struktura anatasu začne přeměňovat na strukturu zvanou rutil. Anatas se oproti rutilu vyznačuje několikanásobně vyšší plochou povrchu. Tedy následkem přehřátí je trvalé snížení povrchové plochy katalyzátoru, čímž se značně omezí jeho funkčnost. Výrobci katalytických konvertorů začali pro omezení tohoto jevu s přidáváním různých příměsí. Nejčastěji se používá oxid wolframový (WO_3), který dokáže katalytický konvertor stabilizovat až do cca 700 °C. Na obrázku 11 jsou znázorněny účinnosti různých zaběhlých katalyzátorů. Křivka označená jako „fresh“ odpovídá novému katalyzátoru. Zbylé tři katalyzátory byly v klimatické komoře vystaveny různým teplotám po dobu 100 hodin. Z grafu je dobře patrná ztráta účinnosti u katalyzátoru který byl vystaven teplotě 750 °C. Posledním problémem tohoto typu katalyzátoru je teplotní nestálost vanadia. To se při teplotách nad cca 450 °C začíná uvolňovat a vylétá do ovzduší společně s výfukovými plyny. Protože se vanadium považuje za karcinogenní látku, je použití tohoto typu katalyzátoru omezené. Znemožňuje například použití filtru pevných částic (DPF) před SCR systémem, protože během regenerace klasického DPF filtru dojde k prudkému nárůstu teploty. [17] [19]



Obrázek 11: Teplotní degradace katalytických konvertorů založených na $V_2O_5WO_3/TiO_2$

Třetí známá technologie pro výrobu SCR katalytických konvertorů je založena na **zeolitovém katalytickém materiálu**. Na tento materiál může být nanesena vrstva železa (Fe) nebo mědi (Cu). Zeolit může existovat ve stovkách variant, je ovšem problém detailně popsat strukturu v praxi používaných variant, protože to bývá ostře střežené tajemství výrobců těchto katalytických konvertorů.

Jak je vidět na obrázku 10, zeolitové katalyzátory s příměsí železa pracují od teplot cca 350 °C. Horní hranice účinnosti není omezena jejich selektivitou (bodem kdy začne převládat oxidace čpavku) jako u předchozích typů, ale pouze jejich teplotní odolností. Proto tento typ katalytického konvertoru našel uplatnění u stacionárních aplikací s vysokými teplotami odpadních plynů. Možnou nevýhodou může být nestabilita za vysokých teplot, pokud výfukové plyny obsahují velké množství vodní páry. Tyto podmínky způsobí, že při teplotách nad 600 °C kationty hliníku mají tendenci opouštět nosnou mřížku zeolitu. Tím dochází k dočasné deaktivaci katalyzátoru a teoreticky v extrémním případě může dojít až ke zborcení krystalové struktury.

Naproti tomu zeolitové katalyzátory s příměsí mědi byly vyvinuty pro použití v nižších teplotních pásmech. Během vývoje se pro tento účel vystřídal několik typů zeolitů. První SCR katalytický konvertor tohoto typu byl založený na zeolitu ZSM-5. Tento typ byl použitelný v rozsahu přibližně 200 – 400°C, nicméně jeho životnost v horní části teplotního okna byla nízká. Novější technologie využívala takzvaný „beta zeolit“, který vykazoval lepší teplotní odolnost a měl o něco širší teplotní okno. Bohužel i tento typ zeolitu vykazuje jisté nedostatky. Asi nejvýraznějším nedostatkem je tendence k absorbování uhlovodíků, kde následně docházelo k jejich oxidaci. Tato reakce je silně exotermní, což mělo za následek deaktivaci katalyzátoru. Další vývoj se proto zaměřil na hledání vhodnějších typů zeolitů. Řada běžně používaných konvertorů dnes využívá chabazit. Jeho póry jsou totiž moc malé pro absorbování uhlovodíků a jeho teplotní odolnost je dostačující. [20] [17]

4.6.3 Výpočet teoretického množství vstřikované močoviny

Pro vytvoření algoritmu schopného redukce NO_x je nutné znát správný poměr množství vstřikované močoviny ku množství oxidů dusíku tak, aby mohly probíhat chemické reakce popsané výše, ale zároveň aby žádná ze sloučenin nebyla v přebytku. Proto pro výpočet byla použita následující úvaha:

Z rovnic pro SCR reakci (rovnice 14 a 15) je patrné, že počet molekul amoniaku vstupujícím do reakce odpovídá počtu molekul oxidu dusnatého či dusičitého. V chemické reakci 16 je tento poměr rozdílný, nicméně průměrně 95 % emisí NO_x je tvořeno oxidem dusnatým, takže reakce 16 probíhá v minimální míře. [21] Předpokládejme tedy, že počet molekul NH₃ potřebný pro redukcí NO_x je stejný, jako je počet molekul, které mají být redukovány. Vzhledem k tomu, že nejsme schopni přímo měřit počet molekul NO_x proudících výfukovým potrubím, stejně tak množství vstřikovaných molekul močoviny (NH₂)₂CO, musíme jejich počet určovat nepřímo pomocí hmotnosti. V tabulce jsou uvedeny relativní atomové hmotnosti, vyjádřené v gramech na mol. Připomeňme, že látkové množství mol udává počet entit prvku nebo sloučeniny vzhledem k počtu částic ve 12 g nuklidu uhlíku ¹²₆C. Tento počet je označován jako Avogadrova konstanta.

Prvek	Relativní atomová hmotnost A _r [-]
Kyslík - O	15,9994
Dusík - N	14,0067
Vodík -H	1,00797
Uhlík - C	12,01115

Tabulka 6: Relativní atomové hmotnosti vybraných prvků

Z relativních atomových hmotností lze snadno dopočítat molární hmotnost jednotlivých sloučenin. Ta se spočte jako součet hmotností všech atomů v dané molekule (vzorec 22).

$$M = \sum A_r \quad [g/mol] \quad (22)$$

Vzorec 23 ukazuje příklad pro výpočet molární hmotnosti oxidu dusičitého.

$$M = \sum A_{r_N} + \sum A_{r_O} = 14,0067 + 15,994 + 15,994 = 46,0055 \quad g/mol \quad (23)$$

Sloučenina	Molární hmotnost M [g/mol]
Voda - H ₂ O	18,01534
Oxid dusnatý - NO	30,0061
Oxid dusičitý - NO ₂	46,0055
Oxid uhelnatý - CO	28,01055
Oxid uhličitý - CO ₂	44,00995
Čpavek - NH ₃	17,03061
Močovina - (NH ₂) ₂ CO	60,05583

Tabulka 7: Molární hmotnosti vybraných sloučenin

Z tabulky 7 můžeme vyčíst molární hmotnosti sloučenin, které figurují v SCR reakcích. Uvažujme, že ve výfukovém potrubí je 1 g oxidů dusíku. To se bude skládat přibližně z 0,95 g NO a 0,05 g NO₂, protože, jak již bylo zmíněno, NO se podílí na 95 % emisí NO_x [21]. Dále budeme potřebovat spočítat látkové množství těchto plynů.

$$M_1 = \frac{0,95}{M_{NO}} = \frac{0,95}{30,0061} = 0,031660229 \text{ mol} \quad (24)$$

$$M_2 = \frac{0,05}{M_{NO_2}} = \frac{0,05}{46,0055} = 0,001086827 \text{ mol} \quad (25)$$

Nyní známe počet molekul pro obě složky obsažené v „jednom gramu NO_x“. Součet obou hodnot je poté roven minimálnímu množství molekul NH₃, který je potřeba pro redukci všech oxidů dusíku.

$$M_{NO_x} = M_1 + M_2 = 0,031660229 + 0,0010868266 = 0,0327470557 \text{ mol} \quad (26)$$

Hmotnost 0,032 molu NH₃ vypočteme pomocí vzorce 27.

$$m_{NH_3} = M_{NO_x} * M_{NH_3} = 0,0327470557 * 17,03061 = 0,5577023336 \text{ g} \quad (27)$$

Z tabulky 7 víme, že molární hmotnost močoviny je 60,05583 g/mol. Nicméně močovina je po vstříknutí rozkládána dle chemické reakce 12 na čpavek a kyselinu isokyanatou (HNCO), která se dále rozkládá dle reakce 13 na čpavek a oxid uhličitý. Tedy z jednoho molu $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ získáme 2 moly NH_3 , které celkem tvoří přibližně polovinu molární hmotnosti močoviny. Pro výpočet požadované hmotnosti čisté močoviny na redukci 1 g NO_x použijeme tedy vzorec 28.

$$m_{(\text{NH}_2)_2\text{CO}} = \frac{M_{(\text{NH}_2)_2\text{CO}} * m_{\text{NH}_3}}{2 * M_{\text{NH}_3}} = \frac{60,05583 * 0,5577023336}{2 * 17,03061} = 0,9833258039 \text{ g} \quad (28)$$

Posledním krokem je přepočítání hmotnosti čisté močoviny na jeho vodný roztok („AdBlue“). Koncentrace vodného roztoku je 32.5 %. Vlastní hmotnost „AdBlue“ lze tedy spočítat podle vzorce 29.

$$M_{\text{AdBlue}} = \frac{m_{(\text{NH}_2)_2\text{CO}}}{0,325} = \frac{0,98332}{0,325} = 3,02561 \text{ g} \quad (29)$$

Z výše uvedeného vyplývá, že na každý 1 g NO_x ve výfukových plynech, je teoreticky potřeba dodat 3,025 g roztoku „AdBlue“.

5 Prototypový výfukový systém pro snižování NOx

Z výše uvedených způsobů redukce oxidů dusíku byl pro tento projekt zvolen systém selektivní katalytické redukce, který umožňuje dosáhnout vysoké efektivity a zároveň nevyžaduje výrazné zásahy do konstrukce samotného stroje. Jak bylo zmíněno v úvodu, tento projekt si klade za cíl vytvořit systém relativně nezávislý na konkrétní aplikaci. Tato vlastnost bude zároveň systém odlišovat od jiných komerčních produktů, které pro svoji funkci běžně vyžadují napojení na řídicí jednotku motoru a další senzory. Toto propojení sice přináší výhody v podobě dostupnosti většího množství dat o aktuálních provozních podmínkách motoru, ale zároveň vyžaduje přizpůsobení řízení konkrétní aplikaci.

Ve spolupráci s komerčním partnerem byl tedy pro tuto technologii vyvinut prototypový výfukový systém. Zatímco práce komerčního partnera byla zaměřena na mechanickou část, naším úkolem bylo vyvinout a zrealizovat kompletní řízení celého systému. Mechanické práce zahrnovaly návrh tvaru potrubí, jeho napojení na katalytické konvertory, vhodné umístění vstřikovacího ventilu, návrh „mixéru“ plynů, design „Venturiho“ trubice a v neposlední řadě vyřešení napojení na konkrétní aplikaci. Všechny části byly nakonec vyrobeny a smontovány v prototypových dílnách komerčního partnera.

Vývoj řídicího systému zahrnuje vytipování vhodných senzorů a akčních členů, návrh měřicích a řídicích jednotek, vyřešení komunikace mezi nimi a senzory, analýzu chování katalytických konvertorů v reálné aplikaci a následný vývoj řídicích algoritmů. Za doplňkové práce se dá označit návrh kabeláže a vyřešení diagnostiky funkce celého systému.



Obrázek 12: První prototyp SCR + DOC katalytického konvertoru s částí výfukového potrubí

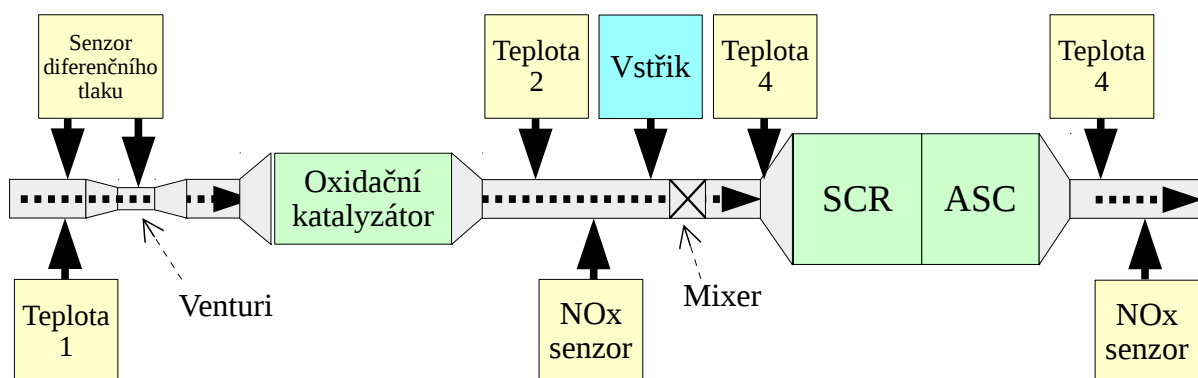
5.1 Struktura výfukového systému

Na obrázku 13 je zobrazeno blokové schéma výfukového systému. Výfukové plyny proudí ve směru přerušované šipky zleva doprava. Jako první je v systému umístěna Venturiho trubice. Ta se používá pro měření objemového průtoku výfukových spalin. Z objemového průtoku je následně vypočítáván průtok hmotnostní. Měření průtoku výfukových plynů funguje na principu měření diferenčního tlaku mezi dvěma místy potrubí s rozdílným průměrem. Odlišný průměr má za následek odlišnou rychlost proudění v daných místech. V místě vyšší rychlosti poté naměříme menší tlak, než v místě s průměrem vyšším. Jejich rozdíl je pak úměrný průtoku. Protože se hustota plynu mění s teplotou, je nutné v tomto bodě měřit i teplotu.

Za Venturiho trubicí následuje oxidační katalyzátor (DOC). Oxidační katalyzátory pracují až po dosažení určité teploty. Tento katalyzátor má poměrně malé rozměry, takže je lze umístit blízko motoru a umožnit tak rychlé zahřátí po startu motoru. Jeho hlavní činností je pomáhat oxidaci nespálených uhlovodíků a přeměňovat oxid uhelnatý na oxid uhličitý.

Na výstupu před-katalyzátoru je umístěno teplotní čidlo, které je zde umístěno spíše z důvodu podrobnější teplotní analýzy chování výfukového systému, ve finálním produktu se s ním nepočítá. Následuje první senzor koncentrace oxidů dusíku, který je umístěn těsně před vstřikovacím ventilem. Vstřikovací ventil slouží pro dávkování močoviny do systému. Pro co možná nejlepší rozptýlení aerosolu močoviny je v potrubí umístěn „mixér“. V principu se jedná o soustavu natočených lopatek, které způsobí turbulentní proudění výfukových plynů.

Výfukové plyny dále proudí do SCR katalytického konvertoru, na jehož vstupu je umístěno teplotní čidlo. K SCR katalyzátoru je připojen druhý oxidační katalyzátor „ammonia slip catalyst“ (ASC), který pomáhá oxidaci čpavku nepoužitého v SCR reakci. Na výstupu systému je umístěno další teplotní čidlo a druhý senzor NO_x pro zpětnou vazbu.



5.1.1 Čidlo NOx

Pro měření koncentrace oxidů dusíku bylo vybráno čidlo firmy Bosch. Toto čidlo je konstruováno přímo pro použití v automobilech. Čidlo je vybaveno vlastní řídicí jednotkou, která se stará o převod signálu ze samotné sondy, řídí její vyhřívání, stará se o kalibraci, diagnostiku atd. Řídicí jednotka komunikuje po sběrnici CAN bus, což velmi usnadňuje samotnou práci s čidlem. Čidlo je schopno měřit koncentraci NOx do hodnoty 4000 ppm. Drobným nedostatkem může být skutečnost, že sonda měří koncentraci oxidu dusnatého a oxidu dusičitého dohromady, tedy nelze rozeznat konkrétní koncentrace NO a NO₂. Dále je sonda schopna měřit koncentraci kyslíku.



Obrázek 14: Senzor BOSCH pro měření koncentrace NOx

5.1.2 Vstřikovací ventil

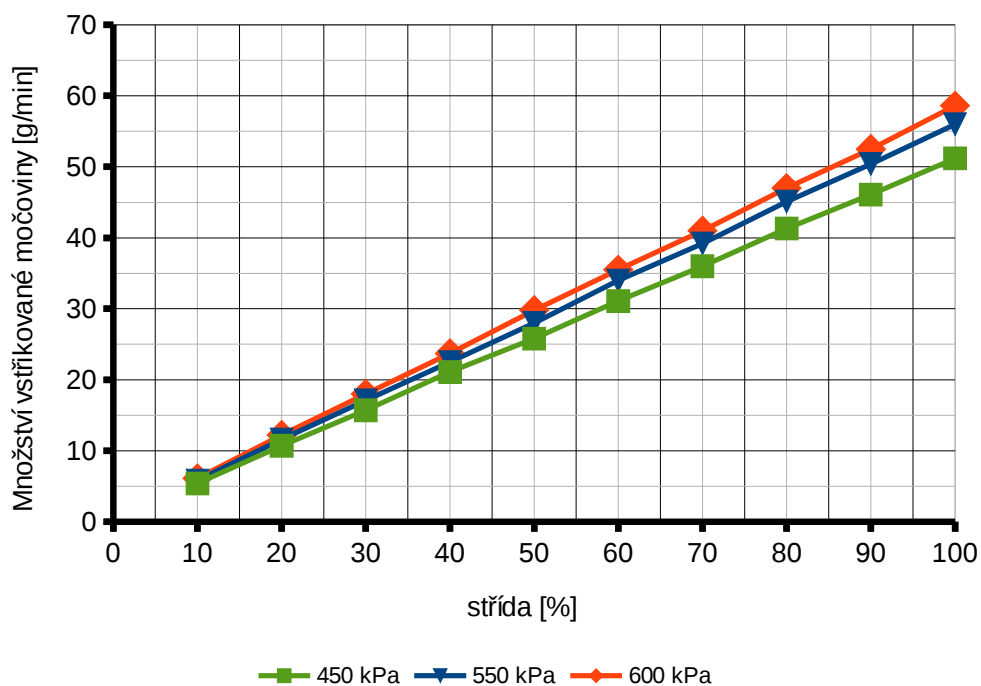
Pro injekci močoviny do systému byl zvolen elektromagnetický vstřik firmy Bosch. Základní funkcí elektromagnetického vstřiku je přesně dávkovat močovinu do systému. Vstřik je konstruován tak, aby na jeho výstupu vznikl co nejjemnější aerosol, který umožní rychlé odpaření močoviny a její rovnoměrné rozmíchání ve výfukových plynech. Vstřik je konstruován na pracovní tlak 5-6 barů. Vstřik je řízen stejnosměrným napětím 12 V a má pouze 2 polohy – plně otevřen/plně zavřen. V sepnutém stavu má odběr přibližně 1 A.

Pro možnost přesného dávkování množství vstříknuté močoviny bylo potřeba změřit závislosti doby otevření vstřiku na množství vstříknuté močoviny. Tato závislost poté byla změřena pro různé pracovní tlaky. Měření probíhalo tak, že v potrubí před vstřikem byl udržován konstantní pracovní tlak. Vstřik byl řízen prototypovou řídicí jednotkou tak, aby udržoval konstantní poměr doby otevření a zavření vstřiku (v grafech níže označovaný jako „duty cycle“). Močovina byla dávkována do nádoby, která byla před měřením zvážena prázdná. Pro každou hodnotu střídavy se močovina vstřikovala do nádoby po dobu půl minuty. Následně byla nádoba opět zvážena a hodnota zaznamenána. Toto se opakovalo nejen pro různé hodnoty střídavy, ale i pro různá nastavení pracovního tlaku.



Obrázek 15: Vstřikovací ventil

Závislost průtoku močoviny na střídě



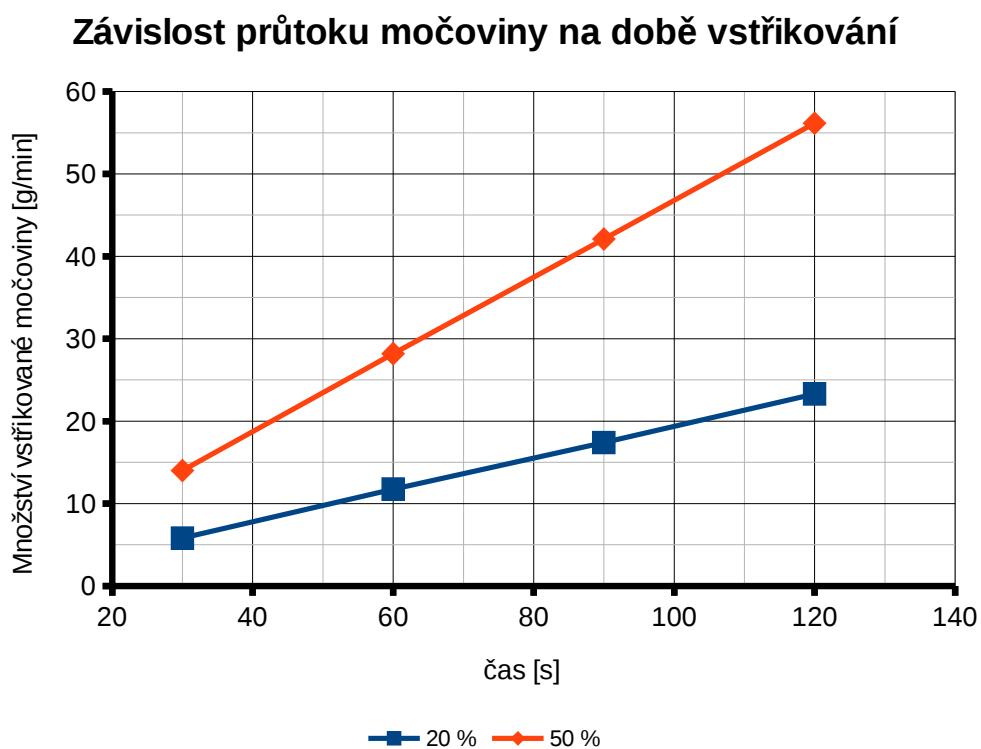
Obrázek 16: Graf závislosti množství vstříkované močoviny na střídě otevírání elektromagnetického ventilu pro různé pracovní tlaky

Obrázek 16 ukazuje závislost množství vstříkované močoviny (lze hovořit rovněž o průtoku) na střídě. Je dobře patrné, že množství se mění lineárně a je závislé na pracovním tlaku. Z hodnot byl poté odvozen vztah 30 pro výpočet střídy v závislosti na tlaku a požadovaném průtoku.

$$D = \frac{136500 \dot{m} + 63 p - 84 p \dot{m} - 76000}{50000} [\%] \quad (30)$$

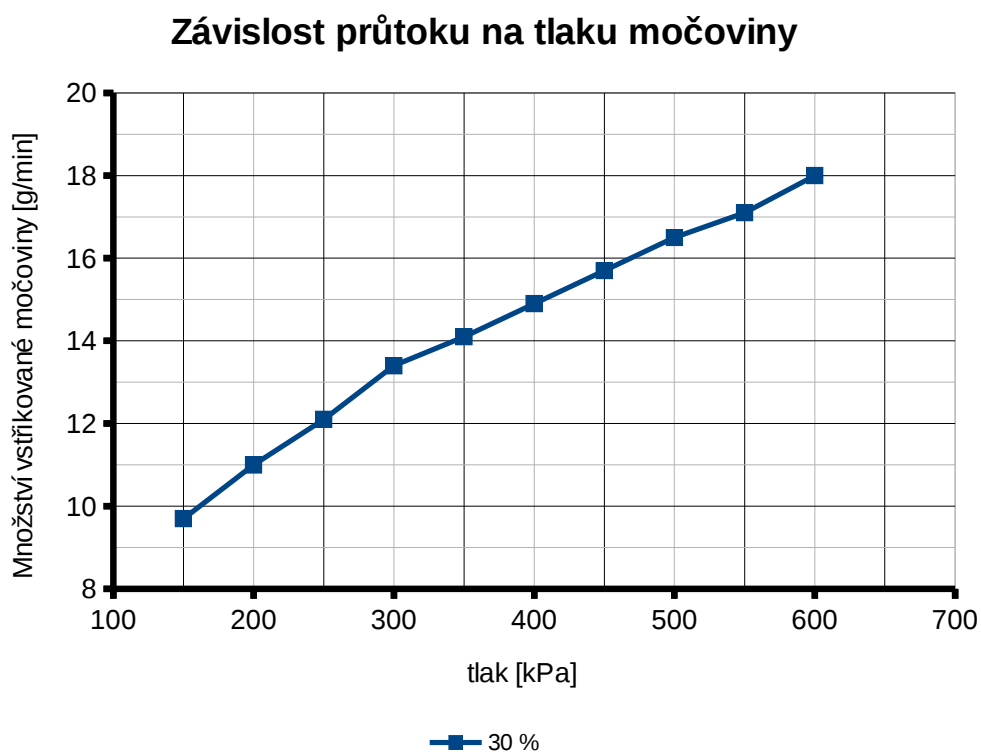
D	-	střída	[%]
\dot{m}	-	hmotnostní průtok močoviny	[g/min]
p	-	pracovní tlak	[kPa]

Pro ověření linearity v časové oblasti vstřiku, byla změřena závislost zobrazená na obrázku 17. Závislosti byly změřeny pro střídu otevření 20 % a 50 %. Výsledek potvrdil předpoklad, že množství dávkované močoviny se mění v čase lineárně. Naopak byla vyvrácena obava, že delší pracovní doba vstřiku může například vlivem ohřátí ovlivnit vstřikované množství.



Obrázek 17: Graf závislosti množství vstřikované močoviny na délce pracovní doby vstřiku

Jako poslední byla změřena závislost průtoku na pracovním tlaku močoviny při konstantní střídě. Z křivky znázorněné na obrázku 18 je patrné, že charakteristika je složena ze dvou lineárních částí se zlomem na hodnotě 300 kPa. Vzhledem k oblasti použití, která se pohybuje na hodnotě cca 550 kPa, můžeme průběh považovat za lineární. Pokud zařízení bude někdy pracovat s tlaky nižšími než 300 kPa, bude se stejně jednat o chybový stav, takže nepřesná informace o vstříkovaném množství je nepodstatná.



Obrázek 18: Závislost množství vstříkované močoviny na pracovním tlaku

5.1.3 Elektromagnetická pumpa

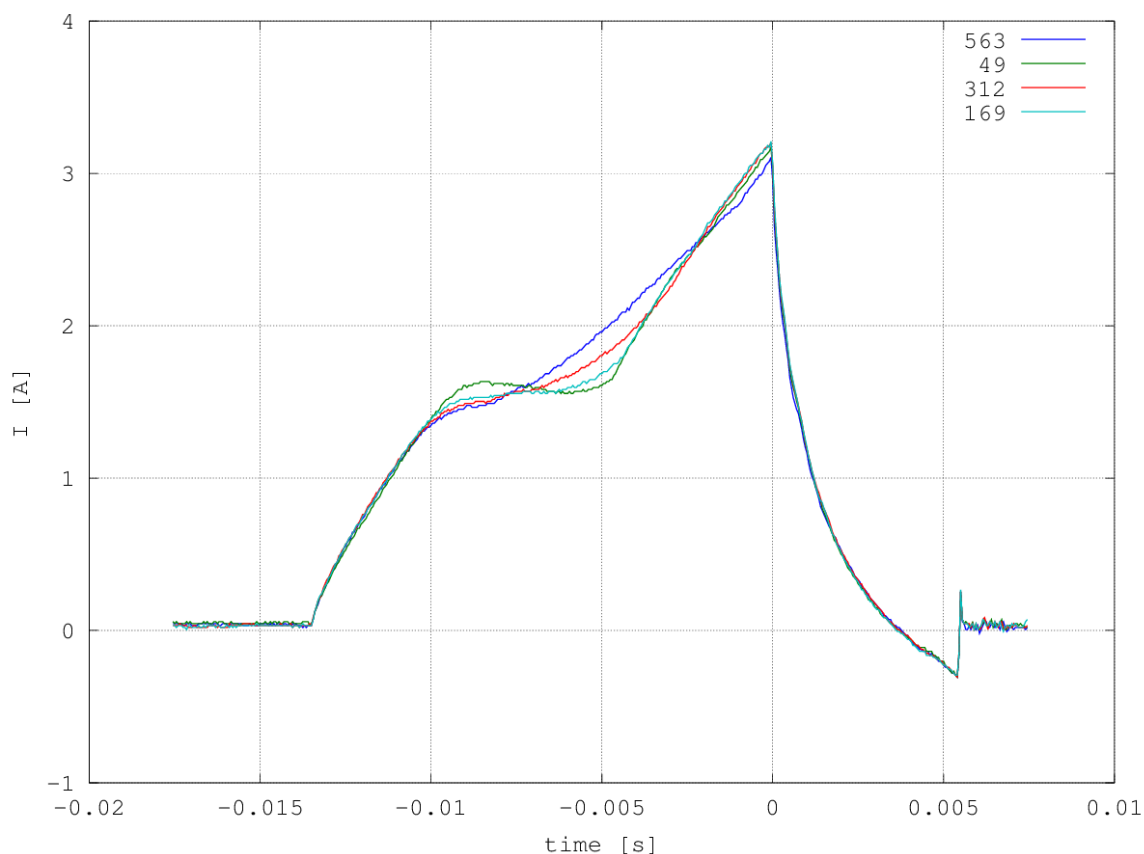
Pro dosažení potřebného tlaku močoviny před elektromagnetickým vstříkem bylo nutno vytipovat vhodnou pumpu. Z několika kandidátů byla nakonec zvolena pumpa P800 od výrobce Thomas Magnete. Tato pumpa je schopna dosáhnout pracovního tlaku až 1000 kPa a dosáhnout průtoku až 50 l/hod. Pumpa je řízena napětovými pulzy, jejichž parametry ovlivňují rychlost čerpání. Pumpa je vybudována kladným impulzem, trvajícím dle doporučení výrobce 13 ms. Pumpa představuje indukční zátěž obvodu, takže proud je zde stavovou veličinou. Toto má za následek, že po skončení napětového pulzu proud pumpou neklesne ihned. Nicméně pro další pracovní cyklus je nezbytné, aby budící proud byl blízký nule. Z tohoto důvodu výrobce doporučuje řídit pumpu pomocí H-můstku, kdy po budícím napětovém pulzu dojde na krátkou dobu k přepólování pumpy. Toto řízení by mělo zajistit rychlejší odčerpání energie z cívky, tedy rychlejší pokles proudu. S tím je pak spojena maximální frekvence pracovních cyklů, výrobce udává až 50 Hz.

Při měřeních průběhu proudu pumpou během jejího pracovního cyklu byla pozorována změna tohoto průběhu v závislosti na pracovním tlaku. Vzhledem k nutnosti řízení tlaku na výstupu se nabídl otázka, zda nelze této vlastnosti využít. Proto byl tento fakt podroben hlubšímu zkoumání.

Během testů se měřil tlak močoviny tlakovým senzorem a takto naměřená hodnota byla porovnávána s průběhy proudu. Na obrázku 20 lze vidět ukázkou takto naměřených hodnot. Jednotlivé proudové křivky odpovídají tlakům v legendě. Je patrné, že při nižších tlacích je charakteristika ve střední části více plochá. První algoritmus byl proto založen na principu hledání nejmenší derivace v náběžné hraně proudového impulzu. Tato metoda se ovšem ukázala jako velmi nepřesná pro vyšší tlaky (od cca 200 kPa), kde je změna derivace již velmi malá.



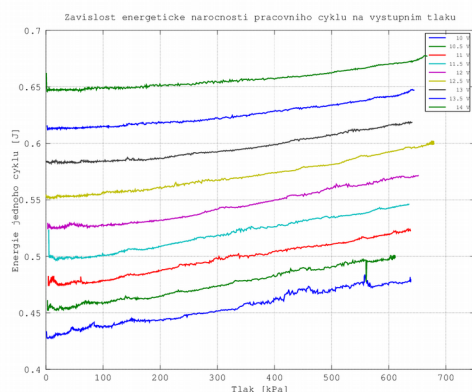
Obrázek 19: Membránová pumpa Thomas Magnete P800



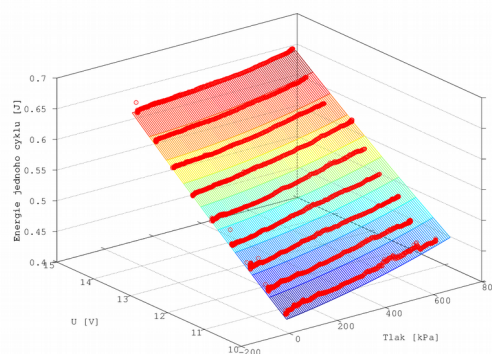
Obrázek 20: Časové průběhy proudu při různých výstupních tlacích – porovnání [29]

V dalším kroku se výzkum pokusil zaměřit na změnu velikosti plochy pod křivkou. Proud byl po dobu náběžné hrany integrován a tedy odpovídal množství energie potřebné na jeden pracovní cyklus pumpy. Zde nastal nový problém, protože spotřebovaná energie se pochopitelně měnila i s napájecím napětím.

Na grafu 21 jsou znázorněny výsledky měření. Je patrné, že energie skutečně stoupá s tlakem, ovšem sklon křivek se rovněž mění s napětím. To znamená, že závislost energie na napětí při konstantním tlaku není lineární. Tento fakt má za následek větší komplikovanost výsledného výpočtu tlaku.



Obrázek 21: Závislost množství energie jednoho pracovního cyklu pumpy na tlaku pro různá napětí [29]

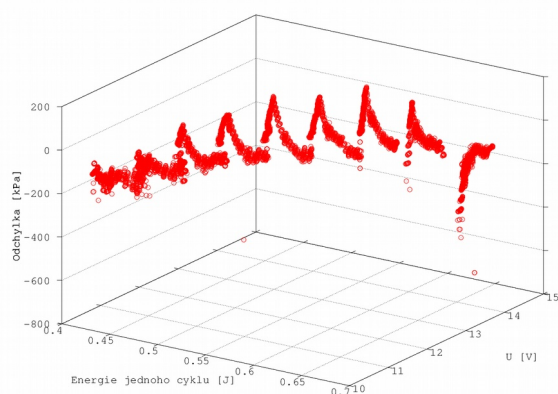


Obrázek 22: Naměřená data interpolovaná plochou [29]

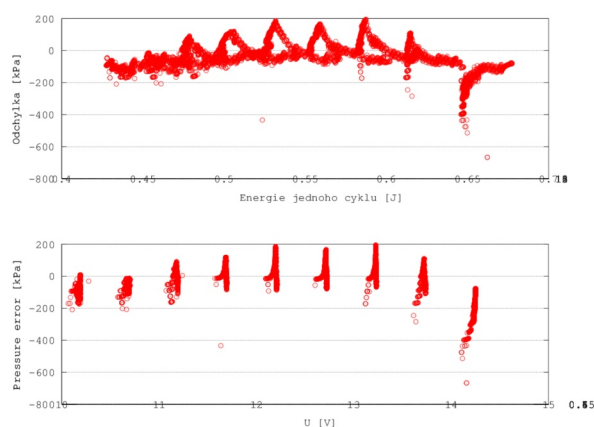
V dalším kroku byla naměřená data proložena plochou. Toto proložení proběhlo pouze lineárním pospojováním bodů, bez jakékoliv interpolace funkcí. Metodou nejmenších čtverců pak byla hledána funkce, která by nejlépe interpolovala tuto proloženou plochu. Nakonec byla vybrána funkce znázorněná na obrázku 22, popsaná vzorcem 31.

$$E = \frac{89U^2 + (600000 - 40p)U + 6p^2 + 93000p}{100000} \quad (31)$$

Na základě těchto poznatků byl vyvinut patřičný software, který prováděl výpočet tlaku z naměřených hodnot proudu a napětí. Tyto hodnoty byly porovnávány s hodnotami měřeními přímo tlakoměrem a vypočítával se rozdíl mezi těmito hodnotami. Po prvním testu bylo patrné, že pouhé vyjádření tlaku z rovnice není zcela vhodné. Je zřejmé, že v tomto vyjádření bude figurovat odmocnina. Bohužel, poměrně malý sklon plochy způsobuje, že i malá změna naměřené energie má velký vliv na výsledný vypočtený tlak. To mělo za následek, že se vlivem nepřesnosti metody mohla sporadicky objevit záporná hodnota pod touto odmocninou. Z tohoto důvodu byla změněna filosofie výpočtu. Nová metoda předpokládá, že výsledný tlak musí být v rozsahu 0-800 kPa a počítá s možnou odchylkou energie od interpolované plochy. Následně pak hledá bod, který má nejmenší odchylku od této plochy a tento bod poté určí výsledný tlak. Grafy 23 a 24 znázorňují velikost chyby této metody.



Obrázek 23: Velikost chyby při určení tlaku integrační metodou (3D pohled) [29]

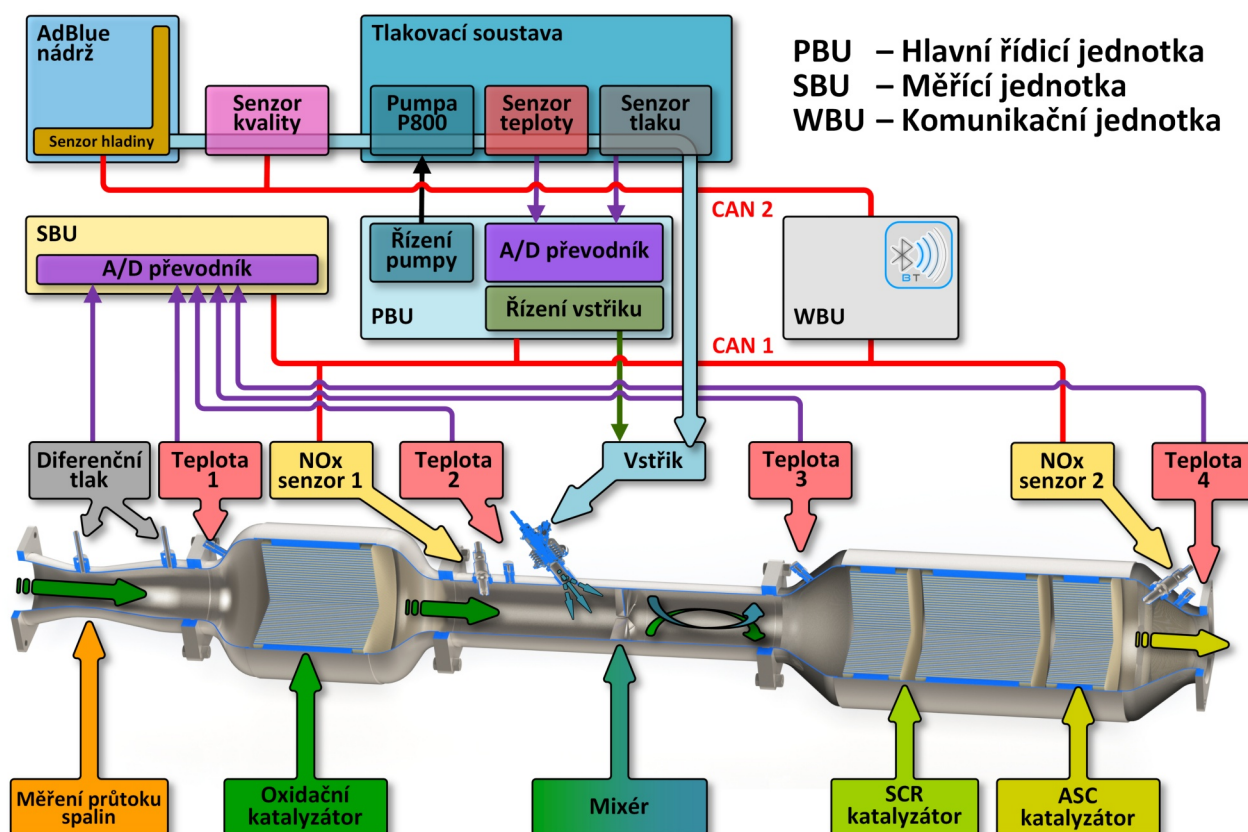


Obrázek 24: Velikost chyby při určení tlaku integrační metodou (boční pohledy na 3D graf) [29]

Z grafů je patrné, že tlak tímto způsobem lze určovat, ovšem ne zcela přesně. V kombinaci s metodou hledání minimální derivace jde toto nepřímé určení tlaku zpřesnit, ale i tak se metoda nedá pokládat za dostatečně přesnou pro zamýšlenou aplikaci. Je rovněž otázkou, jakým způsobem se projeví různé pracovní teploty pumpy. V každém případě však tento dílčí výzkum nepřímého určování tlaku nebyl zbytečný, jelikož dosažené výsledky ukazují na možnost použití metody pro diagnostiku správné funkce tlakového čidla.

5.2 Elektronické uspořádání systému

Obrázek 25 zobrazuje blokové schéma celého řídicího systému. Základem systému jsou 3 samostatné elektronické jednotky označené jako PBU (pump bus unit), SBU (sensor bus unit) a WBU (wireless bus unit), které byly vyvinuty cíleně pro tuto aplikaci. Topologie oddělených jednotek byla zvolena především za účelem snazších zásahů do systému v případě nutnosti úprav některé části. Všechny elektronické jednotky komunikují po sběrnici CAN.



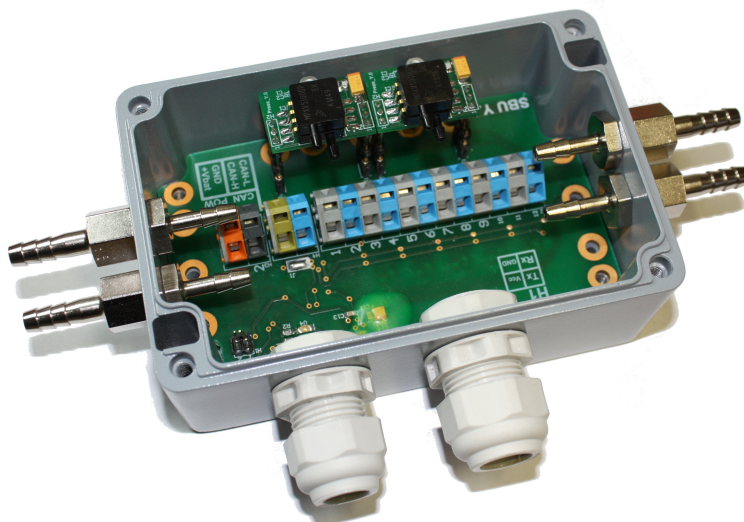
Obrázek 25: Blokové schéma prototypového systému pro snižování NOx

PBU jednotka řídí samotné vstřikování močoviny a jedná se tedy o nejdůležitější část řídicího systému. Jednotka řídí spínání membránové pumpy tak, aby udržovala stálý pracovní tlak močoviny. Zpětnou vazbu zde tvoří analogový tlakový senzor výrobce SensPro Electronics, vyvinutý pro použití přesně v této aplikaci. Druhým úkolem jednotky je samotné dávkování močoviny. Pro ulehčení vývoje se dá jednotka přepnout do režimu, kdy konkrétní množství vstřikované močoviny nevypočítává sama PBU, ale je vypočítávána v nadřazeném systému a jednotka pouze poslouchá příkazy zaslány po sběrnici CAN. Nadřazeným systémem se zde myslí soustava programů běžících na PC přímo připojeném ke sběrnici CAN.



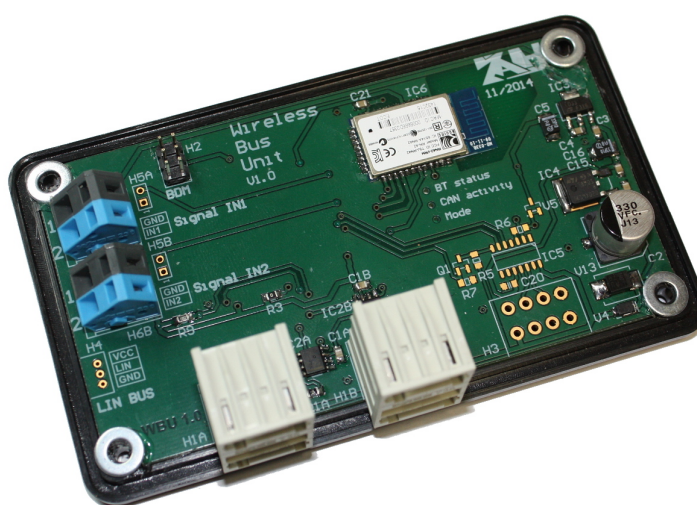
Obrázek 26: Řídicí jednotka "PBU"

SBU jednotka slouží pro připojení teplotních a tlakových senzorů ve výfuku. Jednotka umožňuje připojení až šesti termočlánků a dvou tlakových senzorů (diferenčních nebo absolutních). Naměřené údaje přepočítává a poté periodicky vysílá na sběrnici CAN.



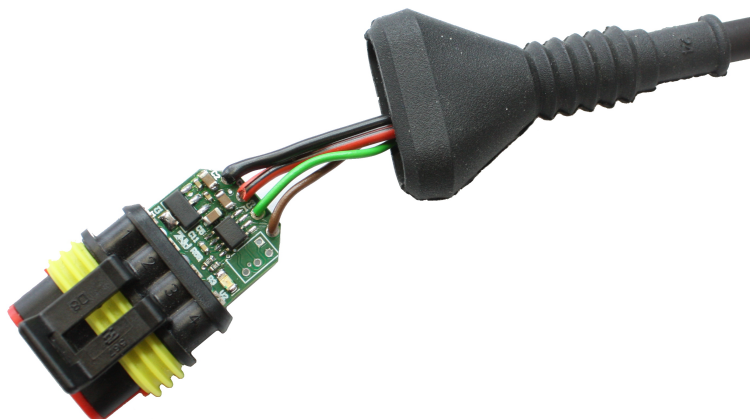
Obrázek 27: Sensorová jednotka "SBU"

WBU jednotka zde tvoří funkci především sběrnice gateway. Z blokového schématu na obrázku 25 je patrné, že systém obsahuje dvě oddělené sběrnice CAN. Toto oddělení je způsobeno tím, že vzorky nádrže a senzoru kvality močoviny komunikují na rozdílné přenosové rychlosti než čidla NOx. Pro případnou sériovou výrobu tento problém odpadne, jelikož dodavatel komponent je schopen toto nastavení změnit, nicméně přenastavení je samozřejmě podmíněno závazkem zákazníka odebrat určitý počet kusů, což v případě vzorků pro vývoj splněno není. Ve výsledku to znamená, že v tomto prototypovém systému je nutno zprávy mezi sběrnici překládat. Při vývoji tohoto zařízení bylo implementováno i bluetooth rozhraní, což umožňuje bezdrátové čtení i zápis CAN zpráv.



Obrázek 28: Sběrnice gateway "WBU"

Mezi vedlejší prvky systému lze zařadit senzor kvality močoviny, který dokáže rozpoznat koncentraci roztoku „AdBlue“ a případně zjistit i jeho záměnu za palivo nebo čistou vodu. Senzor, jak již bylo zmíněno výše, komunikuje rovněž po sběrnici CAN. Dalším prvkem je nádrž na močovinu. V průběhu vývoje byly využívány dva druhy této nádrže. První zmiňovaná je sama schopna vysílat po sběrnici CAN informaci o zbývajícím množství roztoku a jeho teplotě. Druhý typ (znatelně levnější) pouze implementuje měření těchto údajů jako analogovou veličinu. Pro použití tohoto typu nádrže byla vyvinuta vlastní elektronická jednotka schopná měřit tyto veličiny a data vysílat po sběrnici CAN. Z elektronického hlediska se nejedná o nijak zvláště složitá zařízení, je zde mikrokontrolér, který měří zmiňované hodnoty elektrického odporu, údaje přepočítává na reálné veličiny a periodicky je odesílá po datové sběrnici CAN. Nastavovací zprávou lze měnit periodu vysílání. Samotný modul byl navržen tak, aby ho bylo možné zabudovat přímo do konektoru. Prototyp lze vidět na obrázku 29.



Obrázek 29: Komunikační modul pro nádrž na AdBlue

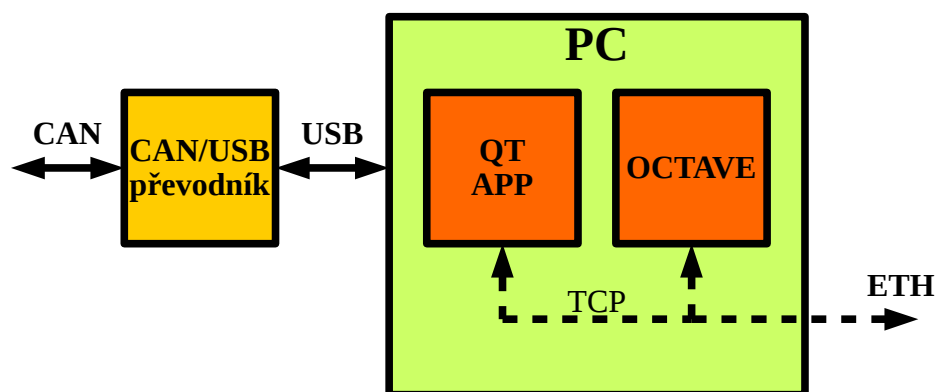
5.3 Ladící a diagnostické rozhraní

Pro vývoj softwarového řízení bylo nezbytně nutné vytvořit rozhraní, které bude schopno ukládat veškerá provozní data pro pozdější analýzu a základně řídit celý systém do doby, než bude naprogramováno autonomní řízení. Pro laboratorní testy bylo zvoleno řešení, při němž jsou data odposlouchávána přímo ze sběrnice CAN. Pro tento účel může částečně posloužit bluetooth implementovaný v jednotce WBU, nicméně vzhledem k potencionální nespolehlivosti bezdrátového přenosu a relativně vysokému datovému toku, byla zvolena jiná topologie. Přímo pro tento účel byl vyvinut převodník CAN/USB, pomocí kterého se připojil PC přímo na sběrnici systému. Toto „drátové“ spojení sice vyžaduje dodatečnou kabeláž, nicméně ta však není pro laboratorní použití žádnou překážkou. Tuto nevýhodu vyvažuje spolehlivost přenosu. Zmiňovaný převodník byl sestaven tak, aby umožnil univerzální použití se sběrnici CAN a je tedy jakýmsi vedlejším produktem tohoto projektu.

Pro PC byla vytvořena aplikace v jazyce C++ za použití grafických knihoven QT. Základním úkolem této aplikace je zaznamenávat data přijatá po sběrnici CAN a základně řídit hlavní jednotku PBU. Data ze sběrnice jsou zapisována do souboru v pořadí, ve kterém přichází, a to včetně časových značek. Z hlediska řízení byla nejdůležitější funkce ovládání vstřikovacího ventilu. Jednotka PBU tedy umožňuje přijímat datový paket, kterým lze měnit její nastavení.

Postupným vývojem byla do aplikace implementována řada dalších funkcí. Aplikace například dekóduje řadu provozních zpráv, vizualizuje aktuální data z čidel, či vypisuje diagnostické zprávy včetně poruchových stavů. Velmi zajímavou funkcí je vytvoření TCP serveru, na který se lze připojit z libovolné jiné aplikace a nechat si přeposílat přijímaná data (případně i odesílat data do aplikace i sběrnice CAN). Tato funkce umožnila připojení matematického softwaru Octave (GNU

program velmi podobný Matlabu) a následné on-line zpracování dat za použití vestavěných matematických funkcí. Použití spojení pomocí TCP protokolu dokonce umožňuje, aby matematický software běžel na jiném PC, který je s „měřícím“ spojen pomocí sítě ethernet (zde nicméně vzrůstá jistá latence). Popisovaná topologie je znázorněna na obrázku 30. Toto propojení umožňuje pohodlné vytváření řídicích algoritmů v prostředí Octave. Algoritmy jsou až v případě potřeby portovány do samotné řídicí jednotky.



Obrázek 30: Schématické znázornění ladícího rozhraní

6 Laboratorní testy výfukového systému

Po mechanickém sestavení prototypového výfukového systému bylo potřeba ověřit základní funkčnost celého systému a verifikovat, zda je navržená koncepce schopna dostát požadavkům. Bylo využito služeb certifikované laboratoře pro měření emisí motorů a osobních vozidel, ve které byl prototypový systém několikrát zkoušen. Vůbec první zkoušky se uskutečnily na motorové stoličce, kde byl systém připojen na šestiválcový motor Iveco. Celý další vývoj popsany v této práci se zabýval prototypovou aplikací pro malé nákladní automobily, nicméně uvedené principy jsou aplikovatelné i na různé další stroje.



Obrázek 31: Prototypový výfukový systém na motorové stoličce

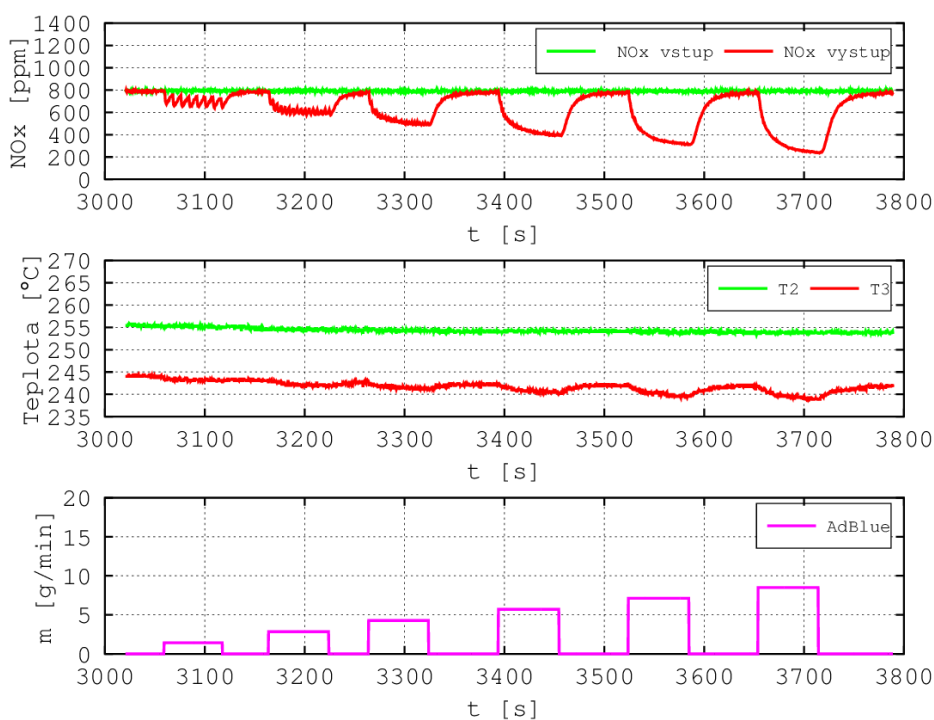
Zkušební motor	
Výrobce	Iveco
Rodina motoru	TECTOR (F4A00A)
Číslo motoru	224050
Modelový rok	2003
Počet válců	6
Zdvihový objem	5900 cm ³
Vstřikování	přímý vstřik
Druh motoru	vznětový

Tabulka 8: Parametry zkušebního motoru

6.1 Reálné chování SCR katalytického konvertoru

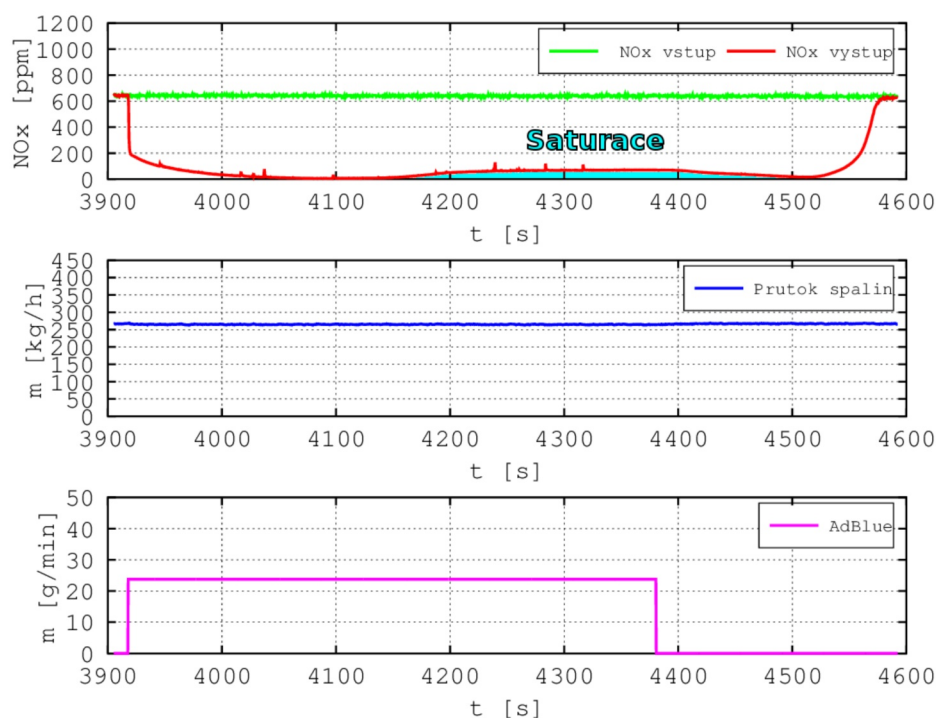
Po sestavení prototypového výfukového systému, včetně vyřešení základního řízení a sběru dat, bylo nutné provést první reálné zkoušky a zmapovat reálné chování katalyzátoru, respektive celého systému. Systém byl namontován na zkušební motor, který je součástí specializované laboratoře na měření emisí.

Jedním z prvních testů bylo měření odezvy systému na různá množství vstřikované močoviny při ustálených podmínkách. Obrázek 32 ukazuje průběhy vybraných veličin během testu. Na prvním grafu jsou zobrazeny koncentrace NO_x na vstupu a výstupu systému. Z průběhu vstupního signálu je dobře patrné, že se měřilo za ustálených podmínek. Dále lze z grafu dobře vidět odezvy systému na měnící se množství vstřikované močoviny. Druhý graf zobrazuje teplotu před vstřikem (T2) a teplotu těsně za vstřikem (T3). Z grafu je patrné, že močovina, dle předpokladu, výfukové plyny lehce ochlazuje. Poslední graf zobrazuje množství samotné močoviny, kdy na ose Y je hodnota odpovídající hmotnostnímu průtoku vodného roztoku močoviny.



Obrázek 32: Odezva systému na různé množství vstřikované močoviny při konstantním zatížení [28]

Dalším inicializačním testem, který měl potvrdit teoretické předpoklady, bylo přesycení katalytického konvertoru. Jak bylo popsáno v kapitole 4.6.1, čpavek vzniklý po injekci močoviny má tendenci se ukládat na povrchu katalytického substrátu. Takto se tomu děje, dokud nedojde k jeho nasycení. To má za následek, že další čpavek se již nemůže ukládat a začne prolétat „skrz“. Na výstupu SCR katalyzátoru je umístěn oxidační katalyzátor, kde dochází k oxidaci čpavku. Produktem jsou opět oxidy dusíku. Tedy přesycení by se mělo na výstupu systému jevit jako zvýšené emise NOx.

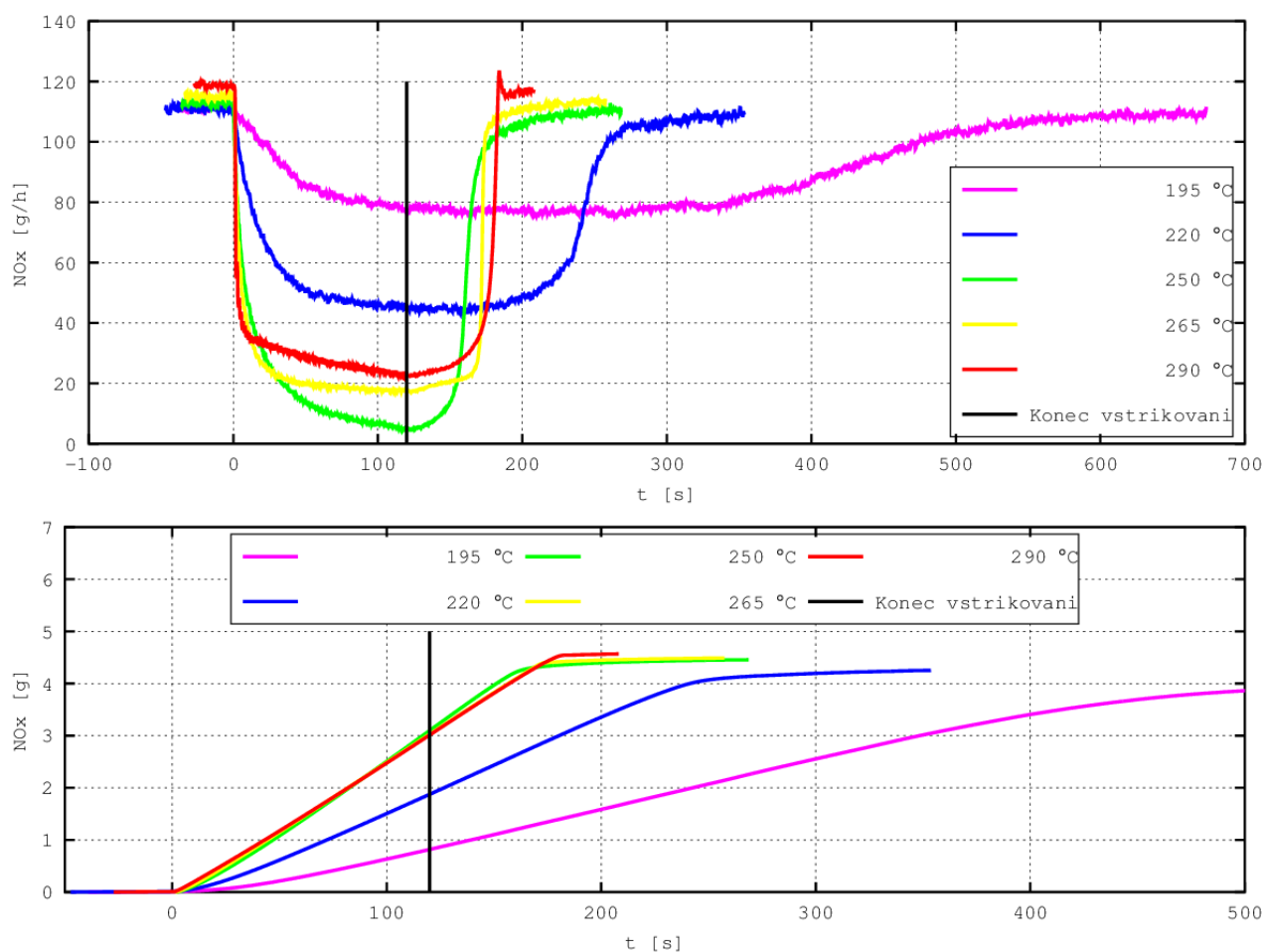


Obrázek 33: Chování katalytického konvertoru během přesycení [28]

Obrázek 33 ukazuje výsledek tohoto testu. V prvním grafu lze vidět hodnoty koncentrace NOx na vstupu a výstupu SCR katalytického konvertoru, druhý graf znázorňuje hmotnostní průtok spalin, třetí množství vstříkované močoviny. Během tohoto testu bylo do systému dodáváno vysoké konstantní množství močoviny. Je dobře patrné, že ihned po začátku vstříkování močoviny klesají výstupní emise NOx. Ty se postupně dostanou až na nulu, a v tuto chvíli lze říci, že systém pracuje se 100% účinností. Po jistém čase ovšem zde dochází k nasycení katalyzátoru a výstupní emise NOx se zvyšují, což plně potvrzuje teoretický předpoklad.

Velmi zajímavá se ukázala reakce katalytického konvertoru na rozdílné teploty výfukových plynů. Při testu byla snaha udržovat konstantní průtok oxidů dusíku při různých teplotách výfukových plynů. Výsledek zobrazuje obrázek 34. V tomto testu bylo vždy v čase $t = 0$ započato vstřikování vodného roztoku močoviny. Vstříkovalo se se střídou 15 % (tzn. cca 8,6 g/min) po dobu dvou minut. V grafu je konec vstřikování označen černou čarou. První graf zobrazuje odezvu systému na výstupu při různých teplotách. Je dobře patrné, že nízké teploty nevedou k vysoké redukci NOx, nicméně chemické reakce probíhají i dlouho po ukončení vstřikování. Se zvyšující se teplotou roste maximální účinnost redukce. Zajímavé je, že maximální účinnosti redukce jsme dosáhli při teplotě 250 °C. Při vyšších teplotách se účinnost opět pomalu snižovala.

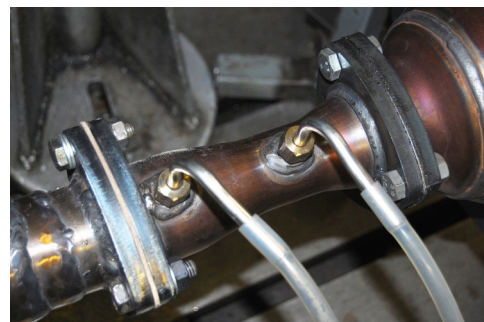
Tvar průběhu průtoku NOx na výstupu nabádá k zamyšlení, kolik gramů škodlivin bylo redukováno při jednotlivých teplotách. Obsahy pomyslných ploch ohraničených jednotlivými křivkami jsou rovny množství redukovaných NOx. Toto množství ukazuje druhý graf na obrázku 34. Je dobře vidět, že konečné množství redukovaných NOx je prakticky stejné, konkrétně cca 4,5 g. Lze tedy říci, že pro aktuální účinnost redukce je velmi důležitým faktorem teplota. Dalším důležitým závěrem je, že i při nízké účinnosti systému se ve výsledku zredukuje prakticky stejné množství NOx, nicméně k tomu dojde za delší časový interval.



Obrázek 34: Odezva katalytického konvektoru při různých teplotách výfukových spalin

6.2 Měření průtoku spalín

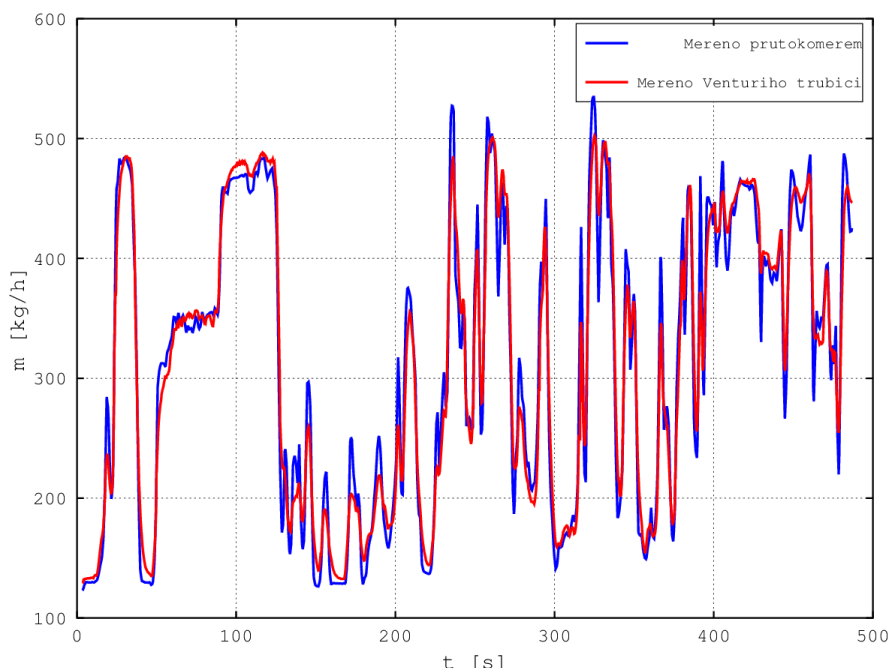
Pro správný výpočet množství vsřikované močoviny je nezbytné znát hmotnostní průtok výfukových plynů. Jak již bylo nastíněno v kapitole 5.1, hmotnostní průtok spalín se v prototypovém systému měří nepřímo pomocí Venturiho trubice. Jedná se o řešení robustní, schopné velmi dobře odolat vysokým teplotám i chemickým vlivům výfukových plynů. Hmotnostní průtok je vypočítáván na základě znalosti teploty výfukových plynů, diferenčního tlaku a absolutního tlaku v potrubí.



Obrázek 35: Venturiho trubice, zde varianta pro průměr 60 mm

Pro cejchování Venturiho trubice byl zvolen experimentální postup. Testovací motor, na kterém byl namontován prototypový výfukový systém, byl vybaven hmotnostním průtokoměrem nasávaného vzduchu a palivovým průtokoměrem. Součet těchto dvou hodnot odpovídá hmotnostnímu průtoku výfukových spalín. Na základě změřených dat z teplotních a tlakových čidel a k nim korespondujícím hodnotám z průtokoměrů byla pomocí evolučních algoritmů sestavena rovnice 32. Tato rovnice tedy slouží pro výpočet průtoku výfukových spalín pouze pomocí čidel umístěných ve výfuku. Odchylka této metody je zanedbatelná, což je dobře patrné z obrázku 36.

$$\dot{m} = \frac{604000 * p_{abs} + 23 * p_{abs}^2 + 600 * p_{abs} * p_{diff} + 1940000 * T}{2000 * p_{abs}} \text{ [kg/h]} \quad (32)$$



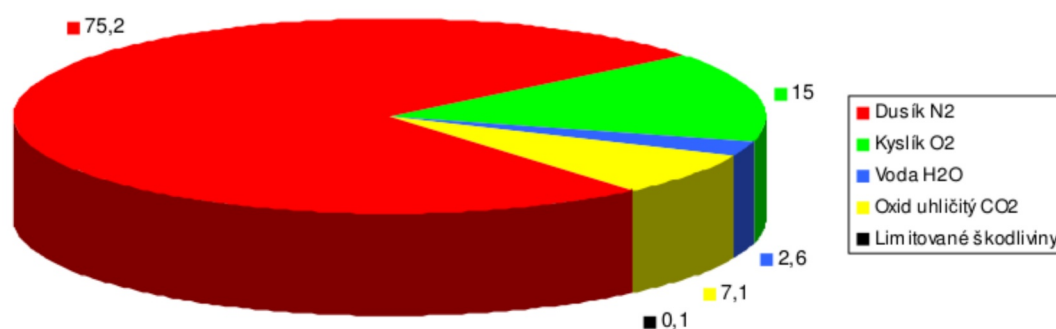
Obrázek 36: Porovnání hmotnostních průtoků měřených pomocí venturiho trubice a pomocí průtokoměru v sacím systému motoru

6.3 Tranzientní testy

Pro splnění hlavního cíle projektu je nutné systém dostat do stavu, kdy bude sám schopen vysoké účinnosti redukce oxidů dusíku při rychle se měnících vstupních parametrech, tak jak je tomu při reálném provozu většiny spalovacích motorů. Existuje celá řada standardizovaných laboratorních tranzientních testů, které mají co nejdříve simulovat reálné podmínky. Každé nově vyráběné vozidlo musí projít jedním z těchto testů. Druh testu závisí na druhu vozidla a oblasti homologace. Pro účely vývoje popisovaného systému bylo využito těchto standardizovaných testů. Vzhledem k faktu, že tyto testy zpravidla pokrývají celou škálu zatížení motoru a emisní laboratoř je na ně připravena, bylo by zcela zbytečné programovat nějaké vlastní profily zatížení.

Pro rychlejší vývoj řídicího algoritmu schopného pracovat v tomto tranzientním režimu byla využita možnost dálkového řízení hlavní jednotky PBU, tak jak je popsáno v kapitole 5.3. V praxi to znamená, že nadřazená aplikace v PC čte data z datové sběrnice výfukového systému, vyhodnocuje je a posílá povely řídicí jednotce PBU, která ovládá akční členy. Základními vstupními parametry algoritmu pro autonomní řízení vstřikování AdBlue jsou hmotnostní průtok výfukových spalin, vstupní koncentrace NO_x a vstupní teplota spalin.

Sonda NO_x měří z principu koncentraci plynu, tedy poměr jednotlivých elementů (molekul), nikoliv hmotnostní poměr. Proto bylo potřeba alespoň přibližně určit, kolik gramů NO_x je obsaženo v 1 kilogramu výfukových plynů při dané koncentraci. Na tuto otázku neexistuje jednoznačná odpověď, protože je třeba znát přesné složení výfukových plynů. Pro přibližný výpočet můžeme uvažovat složení vyobrazeném na obrázku 37, který byl převzat z [22]. Položka „limitované škodliviny“ zde bude pro zjednodušení představovat pouze NO_x, přestože se ve výfukových plynech vyskytují i další látky. I samotný poměr NO ku NO₂ je neznámý, proto bude uvažováno s poměrem NO_x 95 %, jak již bylo použito ve výpočtu v kapitole 4.6.3. Molární hmotnosti jednotlivých složek jsou v tabulce 9.



Obrázek 37: Typické složení výfukových plynů [22]

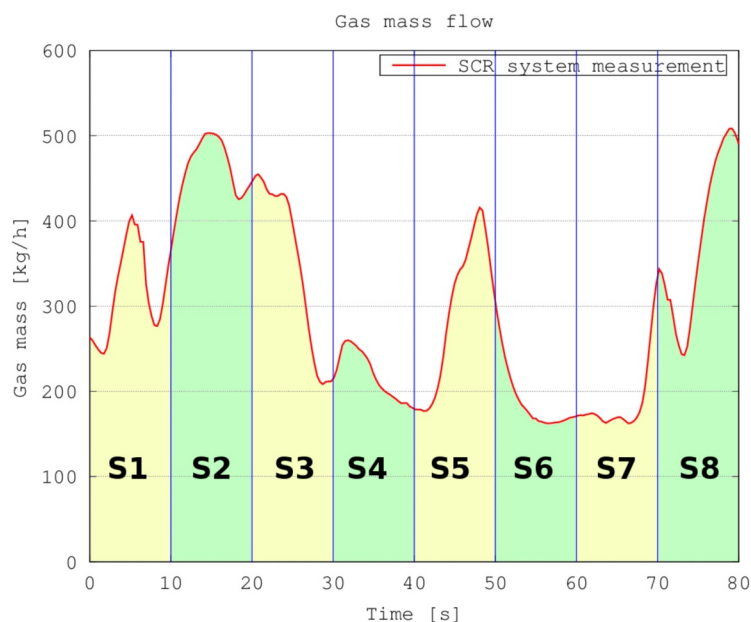
N ₂	28,01348	g/mol
H ₂ O	18,01528	g/mol
CO ₂	44,0095	g/mol
O ₂	31,9988	g/mol
NO	30,0061	g/mol
NO ₂	46,0055	g/mol

Tabulka 9: Molární hmotnosti vybraných složek výfukových plynů

Z předpokládané koncentrace můžeme spočítat, jaké množství (hmotnost) zastupují jednotlivé složky v jednotkovém molárním množství výfukových plynů. Výsledek je v prvním sloupci tabulky 10. Sumou jednotlivých hmotností tedy dostaneme molární hmotnost směsi výfukových plynů, která vyšla 29,49 g/mol. Lze tedy říci, že molární množství 1 kg směsi výfukových plynů je 33,9 molů. Vynásobíme-li tedy tuto hodnotu množstvím jednotlivých složek v 1 molu směsi, dostaneme hmotnost všech složek v 1 kg výfukových plynů (druhý sloupec tabulky 10). Sečtením hmotností NO a NO₂ dostaneme hodnotu souhrnně pro NO_x. Lze tedy říci, že v modelovém příkladu, při koncentraci NO_x 1000 ppm, je v 1 kg výfukových plynů 1,045 g NO_x.

	1 mol směsi	1kg směsi	
N ₂	21,066 g	714,352 g	
H ₂ O	0,468 g	15,883 g	
CO ₂	3,125 g	105,958 g	
O ₂	4,800 g	162,762 g	
NO	0,029 g	0,967 g	celkem NO_x
NO ₂	0,002 g	0,078 g	
celkem	29,490 g	1 000,000 g	
1kg směsi	33,910 mol		

Tabulka 10: Přehled molárních množství a hmotností jednotlivých složek výfukových plynů



Obrázek 38: Příklad integrace množství spalin

Jak je patrné z testů popsanych v kapitole 6.1, katalytický konvertor má jisté „zpoždění“ odezvy na výstupu, takže jeho chování lze s jistou mírou abstrakce přirovnat k frekvenčnímu filtru typu „dolní propust“ s relativně dlouhou časovou konstantou. Toto chování usnadňuje řízení vstřikování, protože není potřeba reagovat na každou „krátkou špičku“ v signálu, stačí pouze korespondovat s jakousi střední hodnotou. Algoritmus pracuje tak, že každý vzorek hmotnostního průtoku výfukových plynů je vynásoben aktuální hodnotou koncentrace NOx dle vzorce 33.

$$\dot{m}_{NOx} = m_{exhgas} * \omega_{NOx} [kg/h] \quad (33)$$

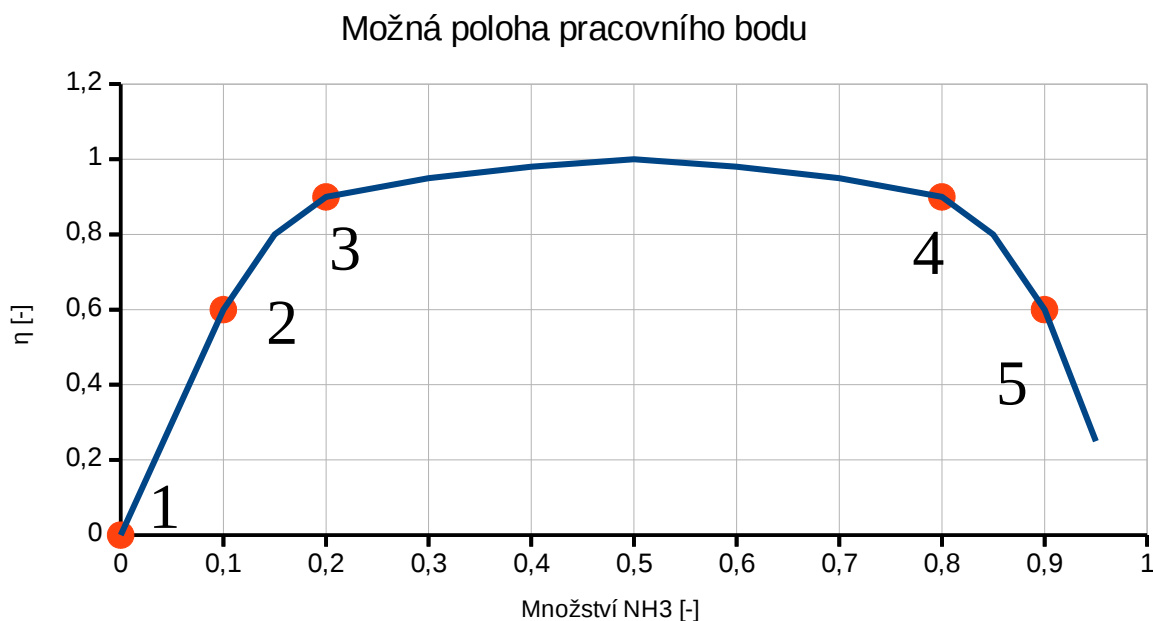
Tento součin je integrován po dobu deseti vteřin. Obrázek 38 názorně ilustruje tento princip. Jednotlivé plochy S_x odpovídají množství procházejícího plynu, na které je nutné dodat patřičné množství AdBlue. Velikost plochy S_x je počítána numericky z přijatých číslicových vzorků dle vzorce 34. Byla zvolena lichoběžníková aproximace reálného signálu. Velikost plochy se tedy počítá jako suma všech polovin součtu dvou sousedních vzorků krát časová diference mezi nimi. Protože nelze s jistotou říci, zda jednotlivé vzorky budou vzorkovány s konstantní periodou (například dojde k výpadku vzorku při komunikaci) je součástí každého dílčího prvku časový rozestup mezi sousedními vzorky Δt .

$$m_{NOx} = S_x = \sum_{k=1}^N \frac{\dot{m}_{k-1} + \dot{m}_k}{2} \Delta t_k * 1000 [g/h] \quad (34)$$

Z množství proteklého NOx se dále vypočítá nová střída pro řízení vstřiku na dalších 10 vteřin dle vzorce 35. Vychází se zde z výpočtu teoretického množství močoviny na gram NOx (kapitola 4.6.3) a z pracovních charakteristik vstřikovacího ventilu (strana 34). Korekční faktor α je na začátku běhu roven jedné a slouží k drobné korekci množství vstřikovaného AdBlue během chodu systému. Použití této korekce je nezbytné, už jen proto, že zde popsané výpočty kalkulují s jistým teoretickým předpokladem složení plynů, který nemusí zcela odpovídat reálnému stavu. Dále lze kompenzovat chyby způsobené nepřesným měřením vstupních veličin.

$$D = \frac{m_{NOx} * m_{AdBlue}}{m_{MaxInj}} * 100 * \alpha = \frac{m_{NOx} * 3,02561}{56} * 100 * \alpha [\%] \quad (35)$$

Pozn. vzorec platí pro pracovní tlak močoviny 550 kPa

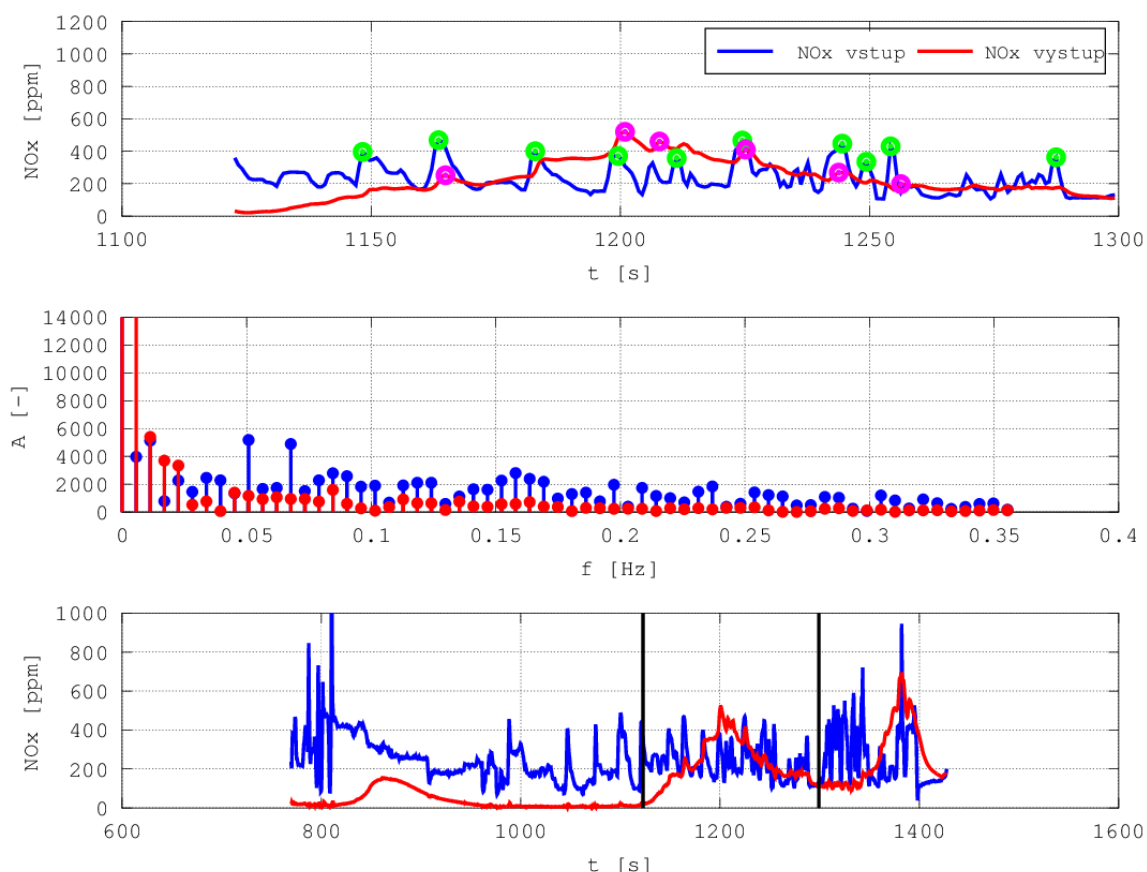


Obrázek 39: Polohy pracovního bodu SCR katalytického konvertoru

Jak již bylo několikrát zmíněno, s množstvím vstříkované močoviny (tedy množství NH₃ v katalytickém konvertoru) se mění účinnost redukce NO_x celého systému. Obrázek 39 ukazuje možnou závislost účinnosti na relativním množství vstříkované močoviny. Pokud v katalyzátoru není žádný NH₃, je účinnost pochopitelně nulová (pracovní bod 1). Se zvyšujícím se množstvím NH₃ se účinnost zvyšuje a lze dosáhnout prakticky 100% účinnosti. Další zvyšování má již za následek opačný efekt, tedy že další zvyšování množství snižuje účinnost. Cílem je tedy vytvoření takového algoritmu, který udrží polohu pracovního bodu ideálně mezi body 3 a 4. Vystává ovšem otázka, jak v případě nízké účinnosti systému rozeznat, zda se systém nachází v pracovním bodě 2 nebo 5, tedy zda se vstříkuje močoviny mnoho, nebo málo. Samozřejmě nízká účinnost může nastat i v důsledku jiných vlivů, například díky nedostatečné teplotě výfukových plynů, takže je potřeba brát v potaz i tuto možnost.

Jedním ukazatelem může být „tvar“ (respektive rychlost odezvy) výstupního signálu koncentrace NO_x v porovnání se vstupním. Budeme-li se pohybovat v oblasti pracovního bodu 2, bude výstupní signál s jistým ztlumením korespondovat se vstupním signálem. Naopak v pracovním bodě 5 výstupní signál koncentrace NO_x nebude příliš podobný tvaru vstupního signálu a nebudou se zde projevovat rychlé změny na vstupu. Jinými slovy, při přesycení nebudou procházet na výstup „vyšší frekvence“. Za určitých okolností je tedy možné, na základě frekvenční analýzy vstupního a výstupního signálu určit, zda je systém přesycen, nebo naopak. Tato metoda nebude ovšem

fungovat například při konstantním zatížení, protože ve vstupním signálu nebudou žádné výrazné změny. Pro tuto analýzu je potřeba mít zaznamenány signály v určité minimální délce (alespoň jednotky minut), takže vyhodnocení přesycení má značné zpoždění. Spolehlivější metodou detekce přeplnění by bylo umístit senzor koncentrace NH_3 přímo za SCR katalytický konvertor. Tato varianta ale nebyla zvolena kvůli vysoké ceně této sondy.

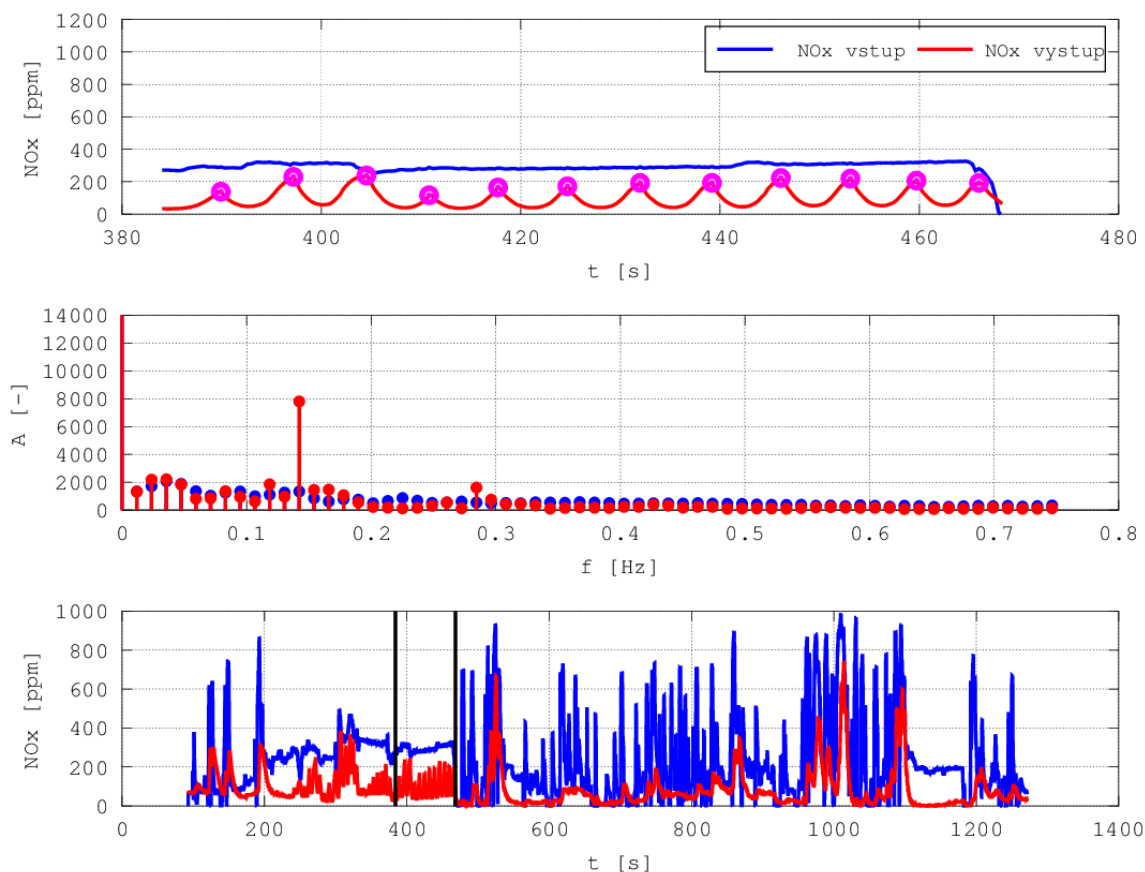


Obrázek 40: Ukázka saturace katalytického konvertoru v reálných datech

Na obrázku 40 je ukázka reálných dat při saturaci katalytického konvertoru. První graf je detailem signálu zobrazeného ve třetím grafu v intervalu mezi černými kurzory. Druhý graf je výsledek rychlé Fourierovy transformace signálu tohoto detailu. Jak bylo řečeno, je dobře patrné, že většina „špiček“ ve vstupním signálu se na výstupu téměř neprojeví. Zobrazené zelené a růžové body v signálu jsou lokální maxima definované minimální velikostí. Dobrým ukazatelem přeplnění je, pokud nějaké lokální maximum vstupního signálu je pod úrovní signálu výstupního, což v tomhle případě nastává například v čase 1200 s.

Další možností, jak za určitých podmínek poznat polohu pracovního bodu, je sledování odezvy systému na vstříknutí močoviny. Pokud bude systém v rozmezí pracovních bodů cca 1 až 2, tedy bude zde značný nedostatek NH_3 , projeví se vstříknutí močoviny rychlým poklesem koncentrace NO_x na výstupu. Tato metoda je naopak snáze aplikovatelná při konstantním zatížení. Příklad na reálných datech je zobrazen na obrázku 41. Celkem pochopitelný je fakt, že frekvence

vstřikování je dobře viditelná ve spektru výstupního signálu. Protože je frekvence vstřikování známá, je teoreticky možné tuto harmonickou složku v signálu cíleně hledat (s přihlédnutím ke spektru vstupního signálu) a na základě toho detekovat nedostatečné množství NH_3 v systému.



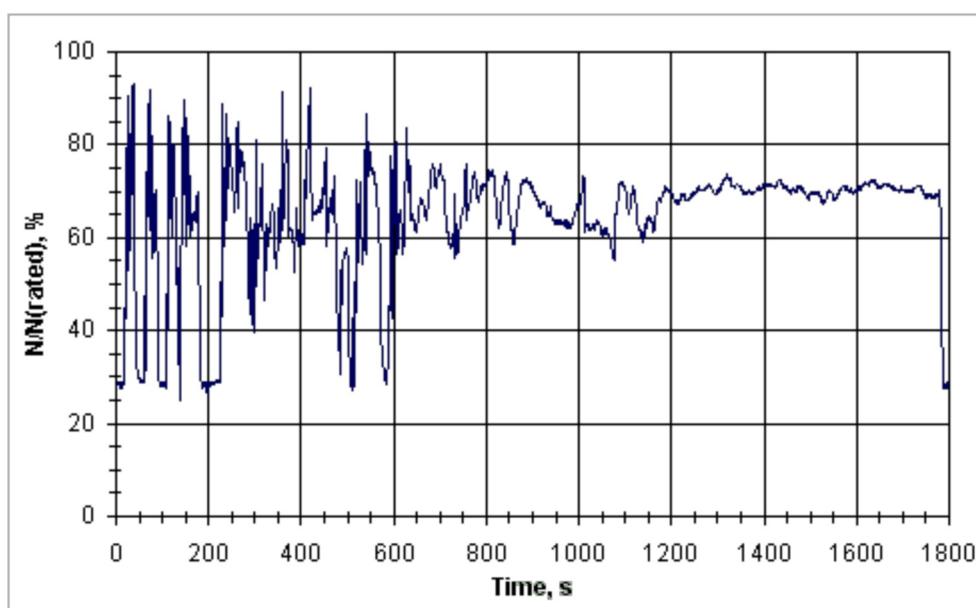
Obrázek 41: Odezva systému na vstřikování močoviny při malém množství NH_3

Obrázek 42 zobrazuje princip fungování softwaru pro řízení vstřikování. Na začátku nekonečné smyčky programu se kontroluje stav HW. Pokud je detekována jakákoliv chyba ovlivňující správnou funkci systému vstřikování a regulace, tak se vstřikování zastavuje (diagnostika je blíže popsána v kapitole 8.1). V opačném případě se integruje množství NO_x způsobem, který je popsán výše. Zároveň se ohodnocuje účinnost systému za poslední minutu (obecně lze samozřejmě všechny tyto konstanty měnit). V dalším kroku se zkontroluje teplota výfukových plynů. V případě nedostatečné teploty se zastavuje vstřikování a smyčka se vrací na začátek. Pokud je teplota dostatečná, ověří se účinnost za poslední 2 minuty.

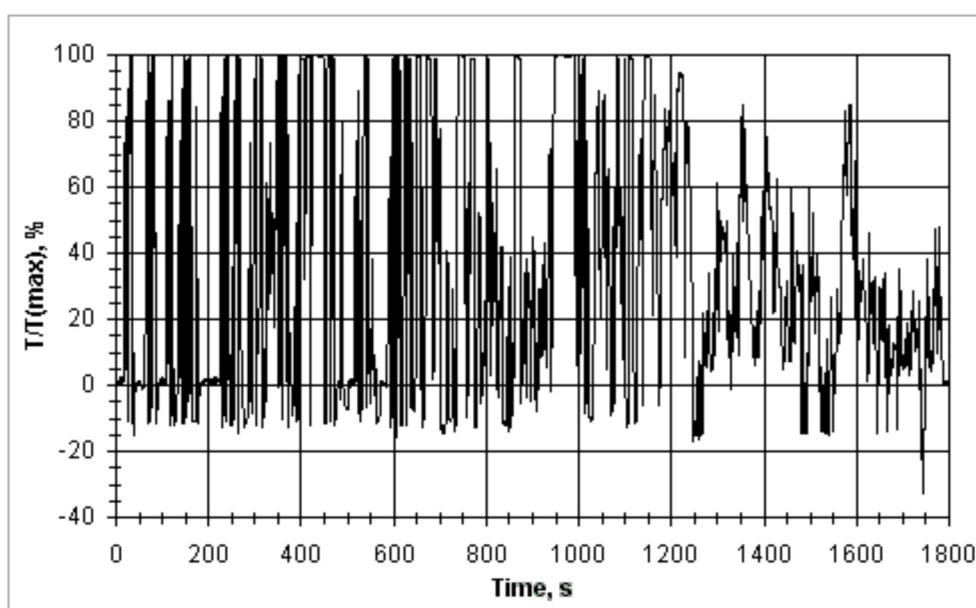
Pokud je účinnost příliš nízká, volá se funkce pro detekci přeplnění, jejíž funkce využívá principu popsaném v předchozím odstavci. Pokud detekuje přeplnění, jedná se o chybový stav a vstřikování se ihned zastavuje na dobu 2 minut. Zároveň se změní korekční faktor α ze vzorce 35 na hodnotu 0,8, což by po uvolnění blokace vstřiku mělo zajistit vstřikování menšího množství močoviny, než je teoretický předpoklad. To v praxi znamená téměř jistotu v přesunu pracovního bodu před bod číslo 3 na obrázku 39.

6.3.1 ETC test

European Transient Cycle (ETC) test byl zaveden pro testování motorů autobusů a velkých nákladních vozidel v roce 2000. Test se skládá ze tří částí, kdy každá trvá 10 minut. První část simuluje městský provoz s častými rozjezdy, brzděním a stání na volnoběh s maximální rychlostí 50 km/h. Druhá část testu simuluje mimoměstský provoz, průměrná rychlost zde je přibližně 72 km/h. Poslední část simuluje vysoké zatížení dálničního provozu. [23] Test byl navržen ve dvou variantách. První je pro klasickou válcovou brzdu, kdy je rychlost funkcí času, druhý definuje průběh poměrných otáček a točivého momentu v čase. Tedy pro testování výfukového systému na samotném motoru bylo využito druhé varianty.



Obrázek 43: Definice ETC testu - průběh otáček [23]

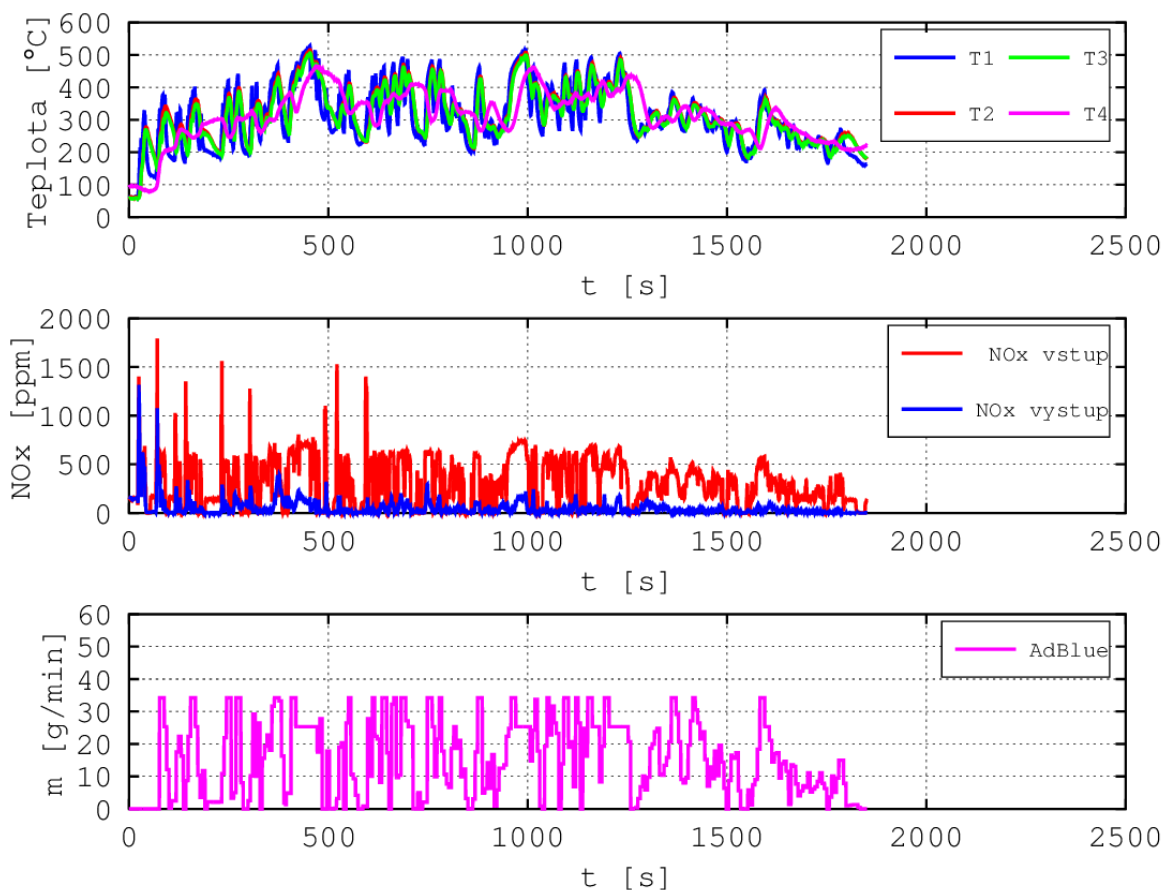


Obrázek 44: Definice ETC testu - průběh točivého momentu [23]

Teplota v laboratoři	33 °C
Tlak vzduchu	100,50 kPa
Relativní vlhkost	40 %
Teplota paliva	29 °C

Tabulka 11: Podmínky v laboratorním prostředí během ETC testu

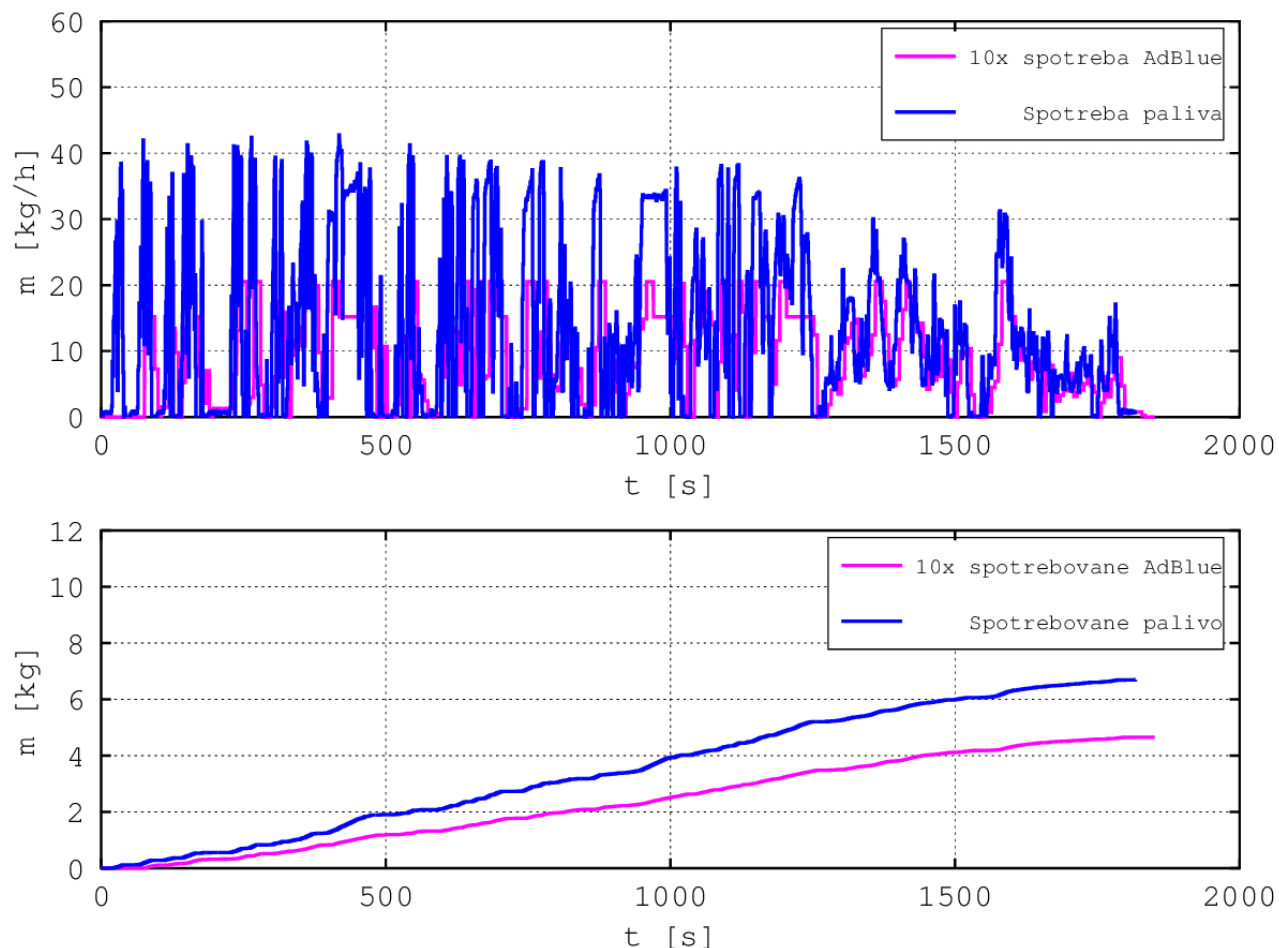
Průběh ETC testu lze vyčíst z grafů na obrázku 45. Na prvním grafu jsou průběhy teplot v jednotlivých částech systému. Druhý graf zobrazuje koncentraci NOx na vstupu (červený průběh) a na výstupu výfukového potrubí. Je dobře patrné, že systém po zahřátí na pracovní teplotu vykazoval velmi vysokou účinnost NOx. Poslední graf zobrazuje aktuální spotřebu močoviny. Celková efektivita redukce NOx během tohoto testu byla přibližně 90 %, což se dá považovat za úspěch. Příloha A na straně 87 obsahuje podrobné výsledky celého testu.



Obrázek 45: Průběhy veličin během ETC testu

Protože měřicí laboratoř je vybavena i měřičem aktuální spotřeby paliva, bylo zajímavé porovnat tato data s údajem o spotřebě močoviny. Obrázek 46 v prvním grafu zobrazuje aktuální spotřeby paliva a vstříkované močoviny (v grafech vynásobena 10x kvůli snazšímu porovnání). Je dobře

patrné, že průběh vstřikování močoviny je úměrný spotřebovávanému palivu. Tento jev je logickým důsledkem faktu, že pokud není spotřebováváno palivo, nevznikají NOx, a je dalším důkazem, že systém pracuje správně. Na druhém grafu je zobrazena integrace obou veličin, tedy absolutní spotřeba od začátku testu. Zde lze vyčíst, že poměr vstříknuté močoviny vůči palivu byl cca 6,9 %.



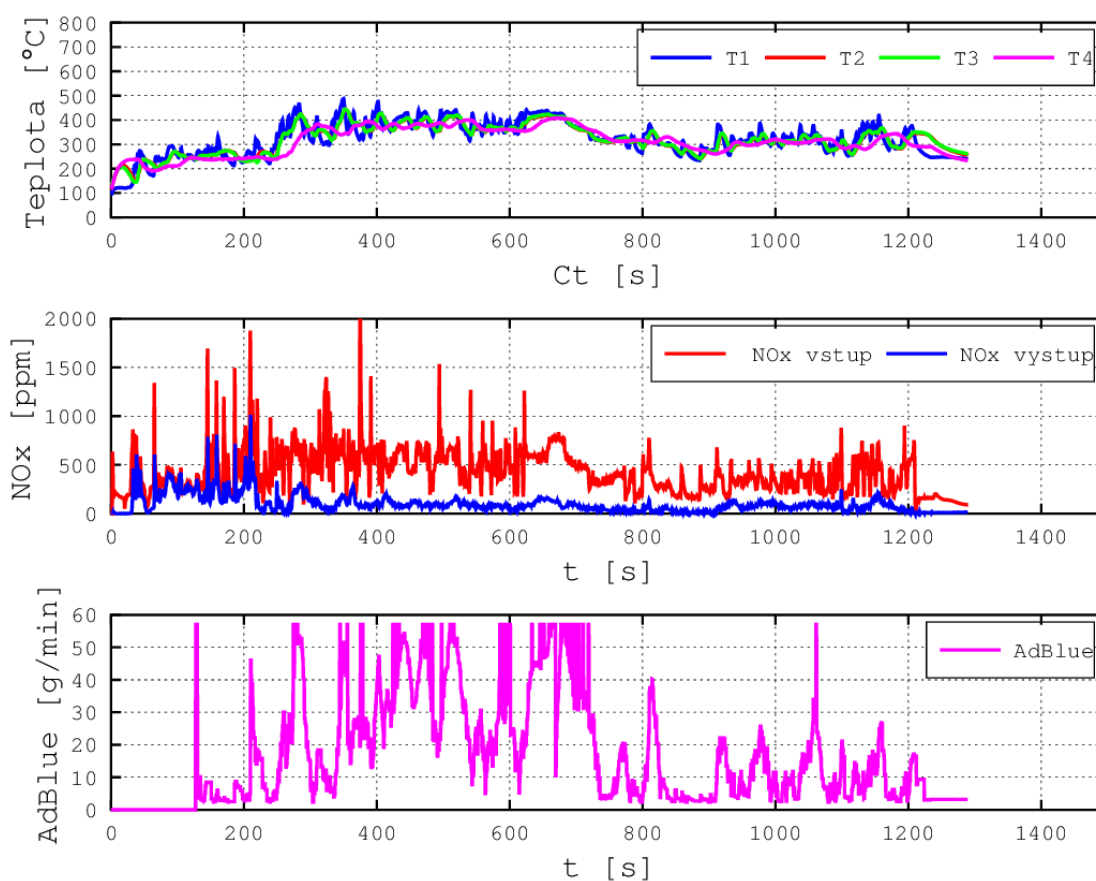
Obrázek 46: Spotřeba paliva a spotřeba močoviny během ETC testu

6.3.2 Test NRTC

Obdobně jako ETC test byl proveden test NRTC (non road test cycle), který byl vytvořen pro testování motorů nesilničních strojů (například traktory). Měřeno bylo opět na motoru uvedeném v tabulce 8 na straně 46. Podmínky ve zkušební laboratoři jsou uvedeny v tabulce 12. Obrázek 47 zobrazuje průběh vybraných veličin během testu.

Teplota v laboratoři	25 °C
Tlak vzduchu	100,94 kPa
Relativní vlhkost	40 %
Teplota paliva	26 °C

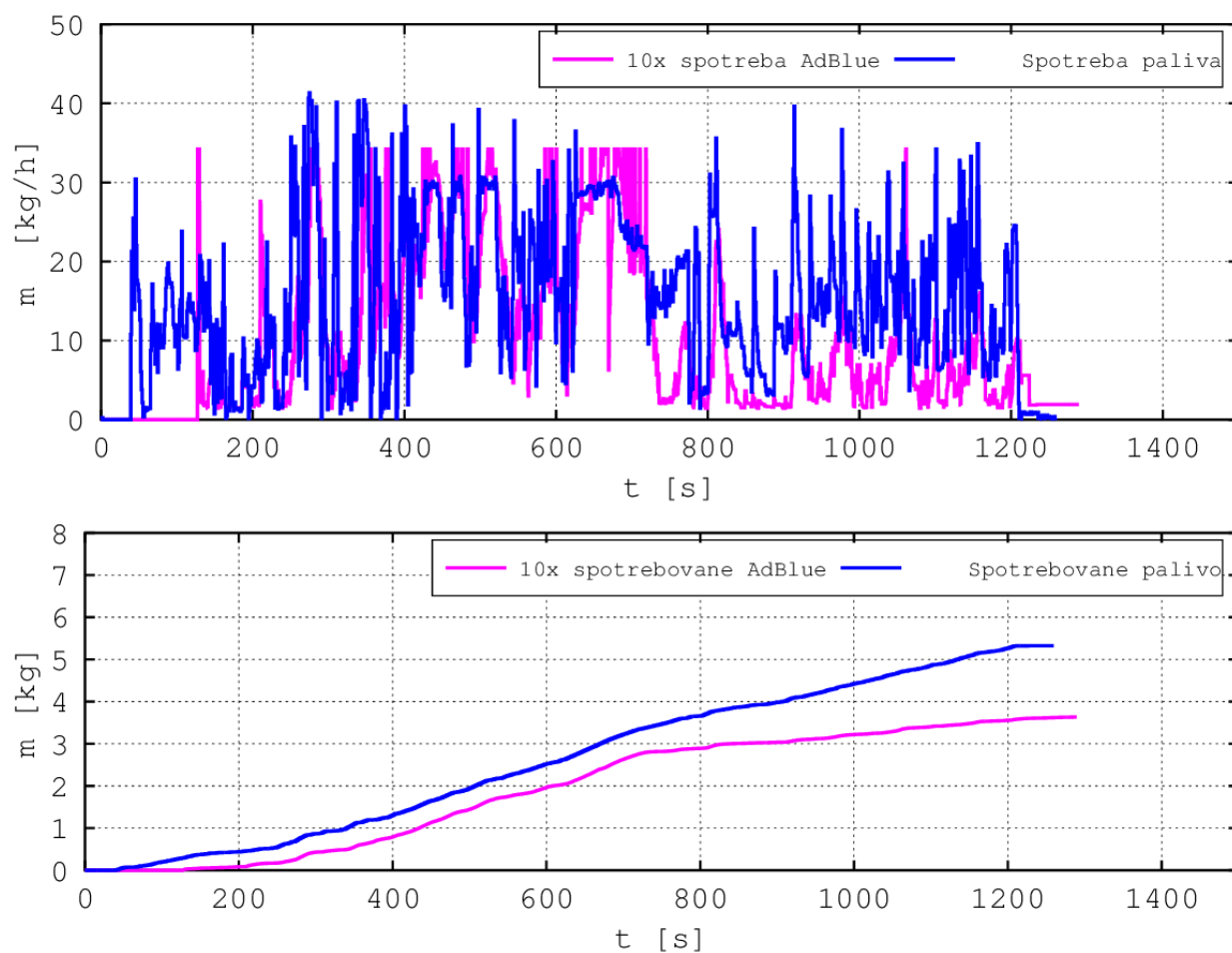
Tabulka 12: Podmínky v laboratoři během NRTC testu



Obrázek 47: Průběh veličin při NRTC testu

Podobně jako u předešlého testu je zde na začátku oblast s poměrně nízkou účinností. Přibližně ve druhé čtvrtině je oblast velmi vysokého zatížení motoru (lze poznat z vysokých teplot a velkého množství vstřikované močoviny). Je pozitivní, že i při této vysoké zátěži bylo dosaženo poměrně dobré účinnosti redukce NOx. Celková účinnost redukce po NRTC testu vyšla 85 %, podrobné výsledky obsahuje Příloha B na straně 89.

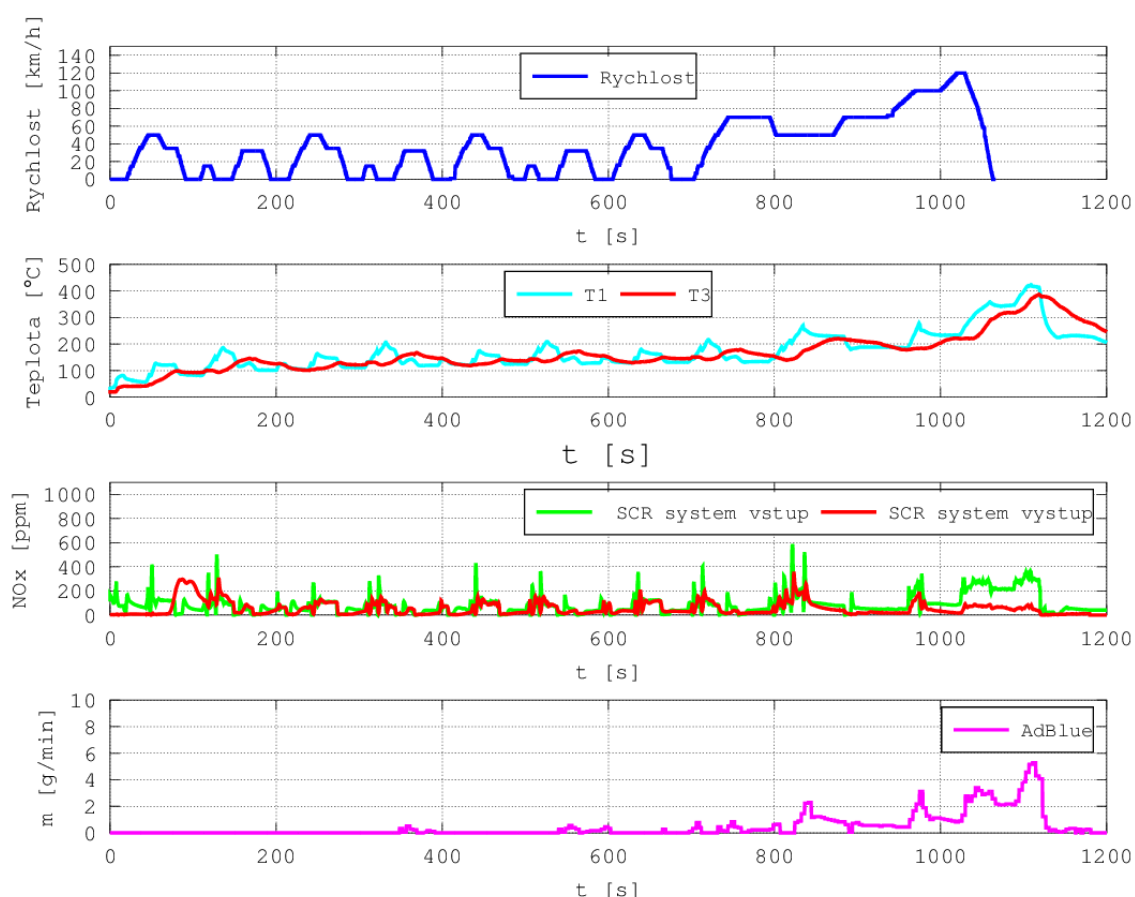
Obrázek 48 zobrazuje spotřebu paliva a močoviny. Poměr spotřebované močoviny vzhledem k palivu vyšel stejně jako u ETC testu 6,9 %.



Obrázek 48: Porovnání spotřeby močoviny a spotřeby paliva při NRTC testu

6.3.3 Test NECD

Pro ověření výfukového systému i na jiném typu motoru byl celý prototyp instalován do lehkého dodávkového vozidla Iveco Daily 2,3 HPT (parametry vozu v tabulce 13 na straně 65). Takto upravený vůz byl podroben zkouškám na válcové brzdě. Testován byl tranzientním testem NEDC (New European Driving Cycle). Test NEDC se skládá ze tří částí, kde každá podobně jako v testu ETC simuluje jistý druh provozu. První část městský provoz, kde se dosahuje malých rychlostí a často se stojí na volnoběh. Druhá část simuluje střední zatížení mimo městského provozu a poslední dálniční zatížení. Výsledek testu je znázorněn na obrázku 49. Modrá křivka v prvním grafu znázorňuje rychlost vozidla, druhý graf teplotu na začátku výfukového potrubí a teplotu na vstupu SCR katalyzátoru, třetí graf koncentrace NO_x a poslední množství vstříkované močoviny. Již na první pohled je patrné, že z důvodu pomalého ohřívání systému byla výsledná efektivita redukce NO_x velmi nízká.



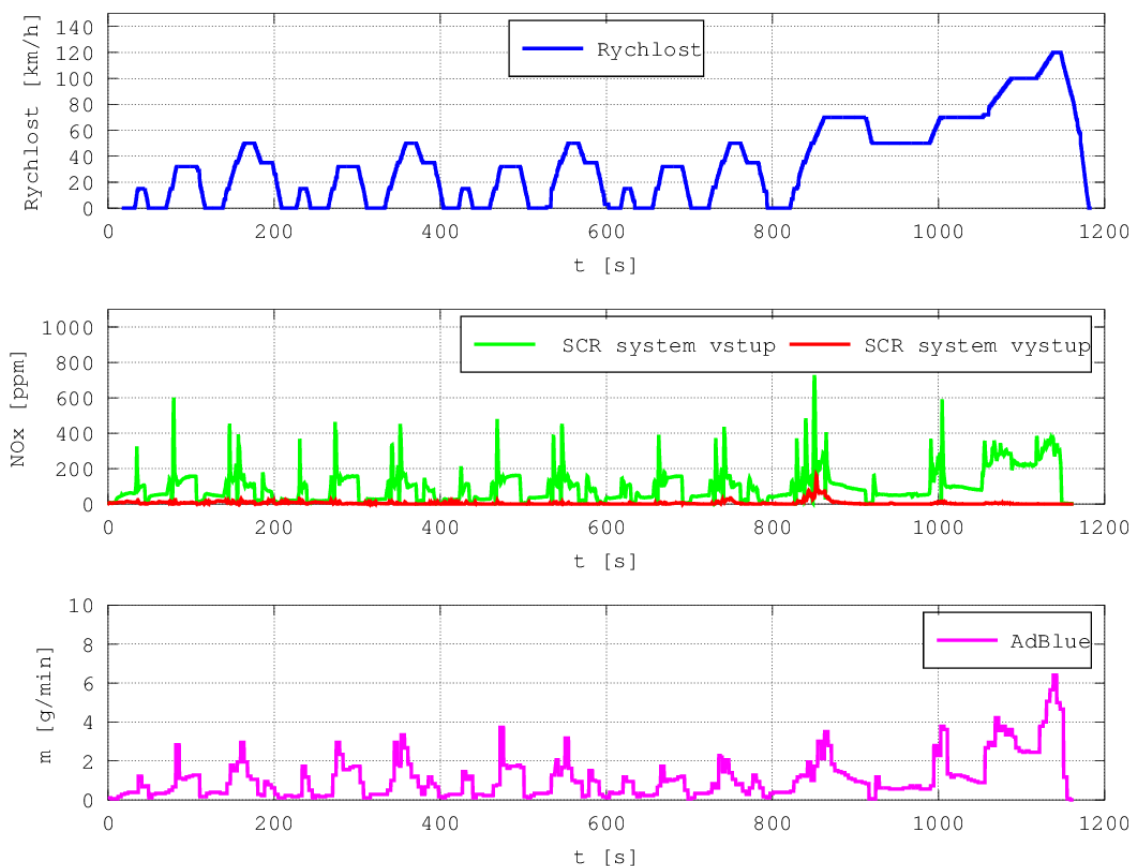
Obrázek 49: Výsledek testu NEDC se "studným startem"

Díky tomuto nelichotivému výsledku se naskytla otázka, zda je základním problémem pouze teplota, či nikoliv. Proto byl motor „zkušební jízdou“ nejprve zahřát a poté se test NEDC opakoval. Výsledek lze spatřit na obrázku 51. Je patrné, že zde je redukce NOx velmi vysoká. Proto lze konstatovat, že vlastní systém pracuje správně, jen se bohužel nedokáže během testu NEDC dostat dostatečně rychle na provozní teplotu. Z druhého grafu na obrázku 49 je vidět, že teploty bohužel nejsou dostatečné ani na vstupu systému, takže případné zkrácení potrubí, či zmenšení ohřívané hmoty by příliš nepomohlo.

Test s přehřátým motorem ovšem nelze považovat za průkazný, protože NEDC jasně definuje počáteční podmínky vozidla, které mimo jiné určují startovní teplotu 20 až 30 °C.



Obrázek 50: Testované vozidlo na válcové brzdě



Obrázek 51: Výsledek tranzientního testu dle NEDC s přehřátým motorem

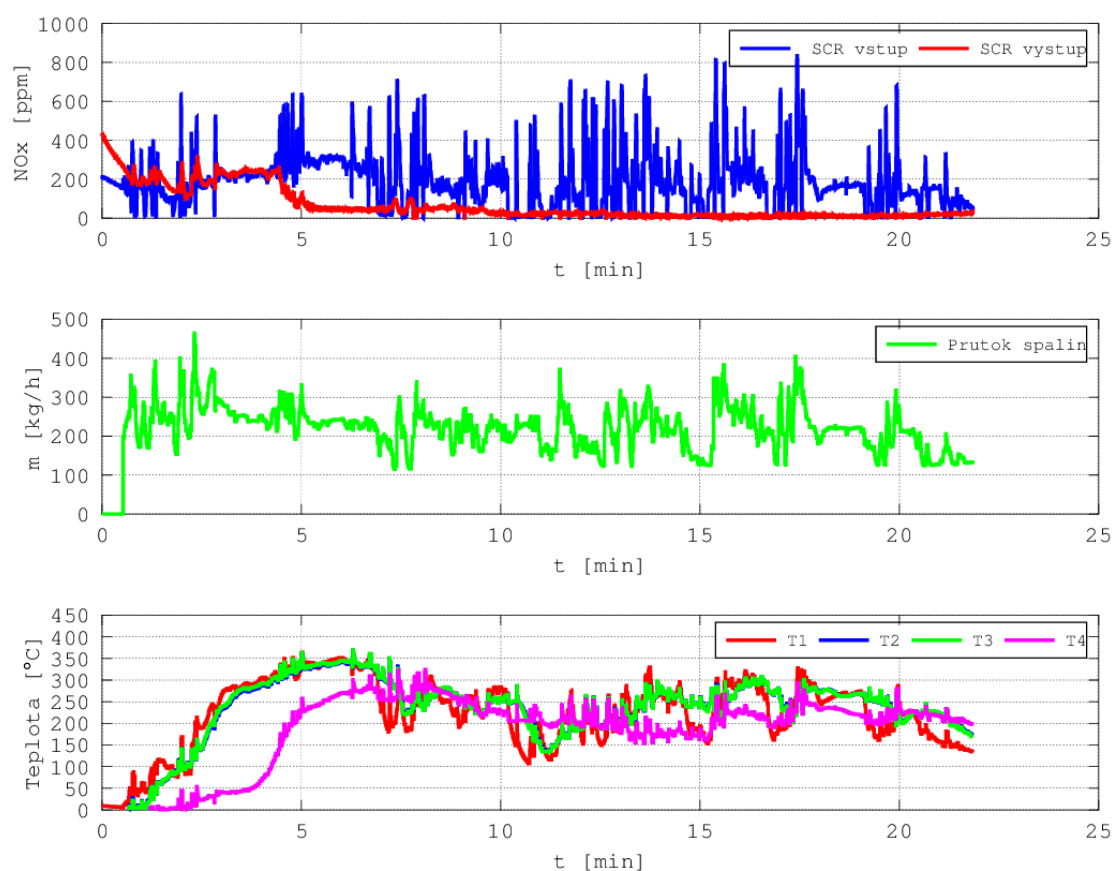
7 Testy systému v reálném provozu

Pro testy prototypového výfukového systému v reálném provozu bylo použito stejné vozidlo jako pro testy NEDC popisované v kapitole 6.3.3. Konkrétní parametry vozidla jsou uvedeny v tabulce 13. Oproti laboratorním testům museli být učiněny jisté mechanické úpravy, nicméně ty nikterak nezměnily strukturu systému použitou v laboratoři. Jednalo se především o vedení kabeláže, hadic a umístění elektroniky tak, aby byly jednotlivé komponenty mechanicky chráněné před všemi nástrahami reálného provozu.

Značka	Iveco
Typ	C30V (obchodní označení Daily)
Rok výroby	2008
Zdvihový objem	2287 cm ³
Maximální povolená hmotnost	3500 kg
Maximální výkon	66 kW

Tabulka 13: Parametry zkušebního vozidla

Vzhledem k problémům s ohřevem systému během testů NEDC byly s napětím očekávány výsledky prvních testů z reálného provozu. Do jaké míry průběh testu NEDC odpovídá reálnému zatížení a zda zde budou stejné problémy. Obrázek 52 zobrazuje výsledek tohoto testu. Vozidlo bylo startováno se studeným motorem a ihned se započala jízda. Jízda probíhala v městském prostředí, bez jakéhokoliv nákladu. Je patrné, že se dosáhlo ohřátí motoru již za cca 150 vteřin, což je výsledek o mnoho lepší než z válcové brzdy. Tato skutečnost evokuje podezření ze špatného nastavení válcové brzdy, nicméně to bylo několikrát kontrolováno a nastaveno přesně dle příslušných tabulek.

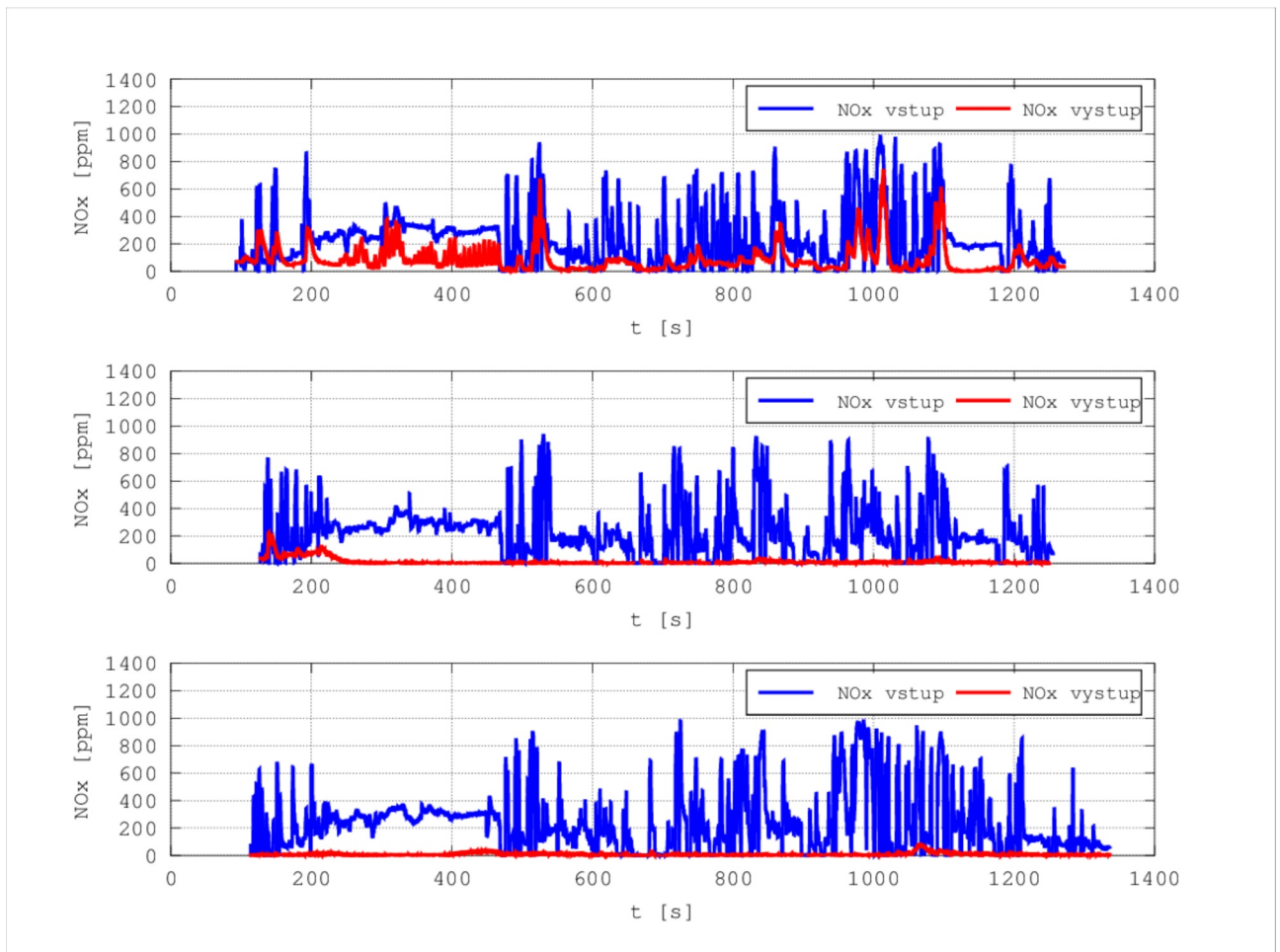


Obrázek 52: Test v reálném provozu se studeným startem v městském prostředí

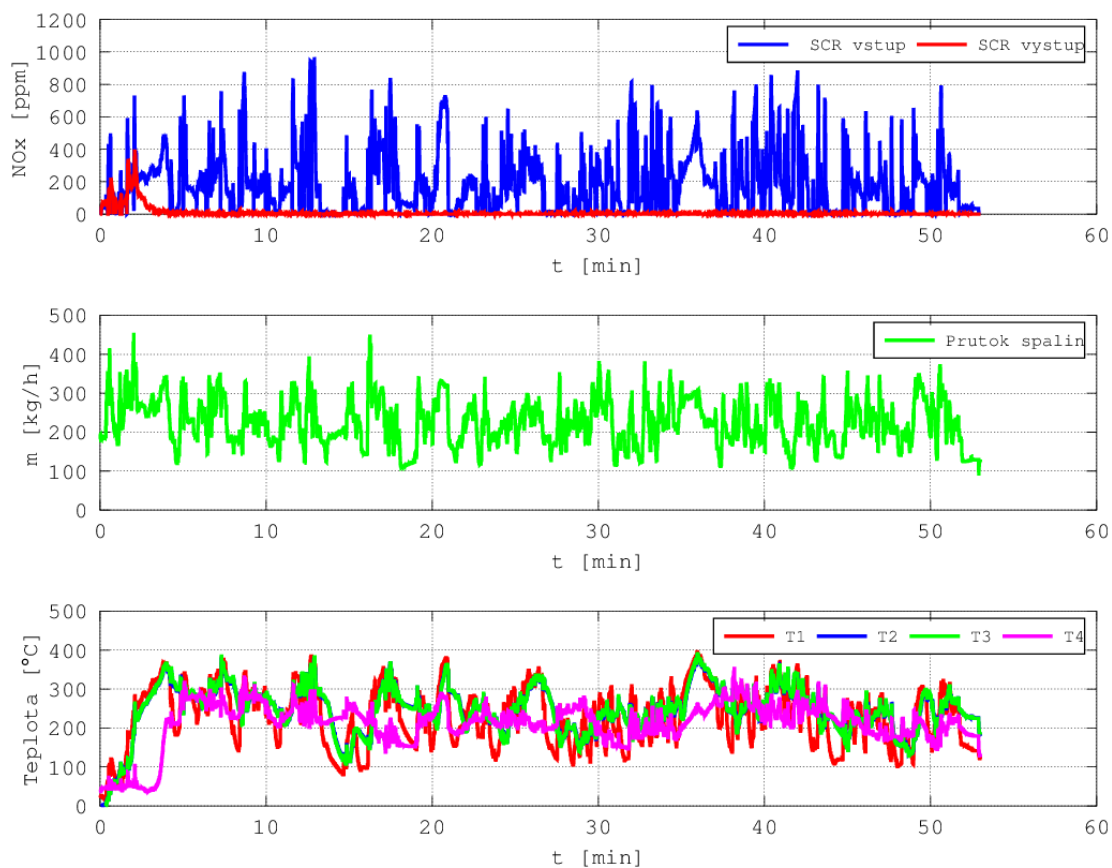
Pro testování v mimoměstském prostředí byla mimo jiné využita trasa z obrázku 53. Unifikovaná trasa umožnila do jisté míry opakovatelnost testovací jízdy, což bylo výhodné pro testování různých nastavení systému. Na obrázku 54 jsou zobrazeny příklady různých jízd s různým nastavením korekčního faktoru α pro úpravu množství vstříkované močoviny (vzorec 35 na straně 53). Při těchto jízdách byla vypnuta funkce automatické úpravy této korekce. První graf zobrazuje jízdu s nízkou hodnotou korekčního faktoru. Je dobře patrné, že účinnost systému nebyla vysoká. Prostřední graf zobrazuje jízdu s ideálně nastaveným systémem. Ve třetí jízdě byl korekční faktor vysoký, což znamená že do systému bylo vstříkováno zbytečně velké množství močoviny. Zde je v časech přibližně 450 a 1050 vteřin vidět lehký nárůst výstupní koncentrace NO_x, který je způsoben saturací katalytického konvertoru. Tento stav je silně nežádoucí.



Obrázek 53: Referenční trasa pro testování mimoměstského provozu [24]



Obrázek 54: Porovnání různých nastavení při provozu na referenční trase



Obrázek 55: Reálná data reprezentující jízdu v mimoměstském prostředí (cca 60 km)

Jako příklad funkčnosti systému i při jízdě na delší vzdálenost jsou na obrázku 55 jsou zobrazeny data naměřené v reálném provozu na trase Plzeň – Horažďovice. Tato trasa měří cca 60 km a jak je z obrázku patrné, tak testovací vozidlo tuto trasu urazilo přibližně za hodinu. Velmi pozitivně lze hodnotit účinnost celého systému. Je dobře patrné, že po zahřátí systém pracoval s téměř sto procentní účinností. Celková účinnost přes celý tento test vyšla přibližně 95 %.

8 Doplnkové funkce systému

8.1 Diagnostika systému

Protože pro správnou funkci systému je nezbytné, aby senzory a akční členy fungovaly správně, je nutné detekovat jejich případnou poruchu. Řídicí jednotka PBU implementuje řadu metod pro detekci různých poruchových stavů.

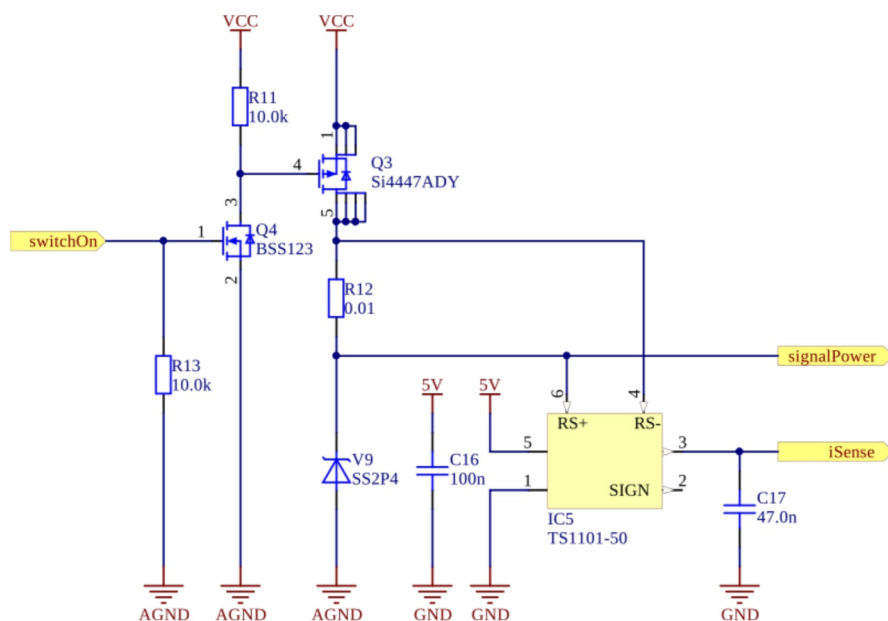
Číslo chyby	Projev	Možná příčina	Bitová maska
1	Nejsou přijímány CAN zprávy od senzoru NOx 1	Odpojené napájení NOx senzoru, porucha senzoru, vada na kabeláži sběrnice	0x00000001
2	Nejsou přijímány CAN zprávy od senzoru NOx 2	Odpojené napájení NOx senzoru, porucha senzoru, vada na kabeláži sběrnice	0x00000002
3	Nadlimitní proud snímacím odporem vstřikovacího ventilu při sepnutém ventilu	Zkrat výstupního pinu na GND	0x00000004
4	Nulový proud snímacím odporem vstřikovacího ventilu při sepnutém ventilu	Odpojen vstřikovací ventil, přerušená kabeláž, vadné vinutí vstřikovacího ventilu	0x00000008
5	Pokles tlaku močoviny při zavřeném ventilu	Netěsnící vysokotlaké potrubí, porucha vstřikovacího ventilu (trvale otevřen)	0x00000010
6	Nemění se hodnota tlaku močoviny při otevřeném ventilu	Porucha vstřikovacího ventilu, případně zanesení trysky	0x00000020
7	Napětí na vstupu A/D převodníku kanálu pro měření teploty močoviny je rovno VDD (5 V - horní saturace)	Odpojené teplotní čidlo močoviny nebo zkrat na VCC	0x00000040
8	Napětí na vstupu A/D převodníku kanálu pro měření teploty močoviny je nulové	Zkrat mezi svorkami teplotního čidla močoviny (zkrat na zem)	0x00000080
9	Napětí na vstupu A/D převodníku kanálu pro měření tlaku močoviny je rovno 0 V	Zkrat vstupu na GND	0x00000100
10	Napětí na vstupu A/D převodníku kanálu pro měření tlaku močoviny je v rozsahu 0 – 0,5 V	Odpojené tlakové čidlo močoviny	0x00000200
11	Nadlimitní proud membránovou pumpou	Porucha membránové pumpy (zkrat)	0x00000400
12	Nulový proud membránovou pumpou	Odpojená pumpa, přerušená kabeláž	0x00000800

13	Nulové napětí na vstupu pro připojení termistoru 1	Zkrat kabeláže, porucha termistoru	0x00001000
14	Napětí 5 V na vstupu termistoru 1	Odpojený termistor, přerušená kabeláž, porucha termistoru	0x00002000
15	Nulové napětí na vstupu pro připojení termistoru 2	Zkrat kabeláže, porucha termistoru	0x00004000
16	Napětí 5 V na vstupu termistoru 2	Odpojený termistor, přerušená kabeláž, porucha termistoru	0x00008000
17	Nulové napětí na vstupu pro připojení termistoru 3	Zkrat kabeláže, porucha termistoru	0x00010000
18	Napětí 5 V na vstupu termistoru 3	Odpojený termistor, přerušená kabeláž, porucha termistoru	0x00020000
19	Podpětí napájecí sítě	Chyba napájecí soustavy	0x00040000
20	Jiná chyba		0x00080000
21	Rezerva		0xXXX00000

Tabulka 14: Chybové stavy a jejich kódy

8.1.1 Jednoduchý výkonový spínací obvod

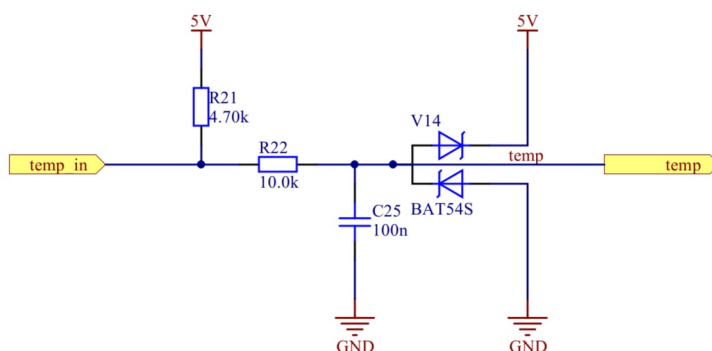
Jednoduchý výkonový spínací obvod je v PBU použit celkem třikrát. Využívá se pro ovládání elektromagnetického vstřikovacího ventilu a volitelně pro 2 vyhřívané tlakové hadice na močovinu. Schéma zapojení je zobrazeno na obrázku 56. Proud výkonovým tranzistorem je snímán pomocí diferenčního zesilovače IC5 na snímacím rezistoru R12. Na základě vyhodnocení velikosti proudu lze diagnostikovat chyby v tabulce 14.



Obrázek 56: Schéma zapojení jednoduchého výkonového spínacího prvku

8.1.2 Obvod pro připojení termistoru

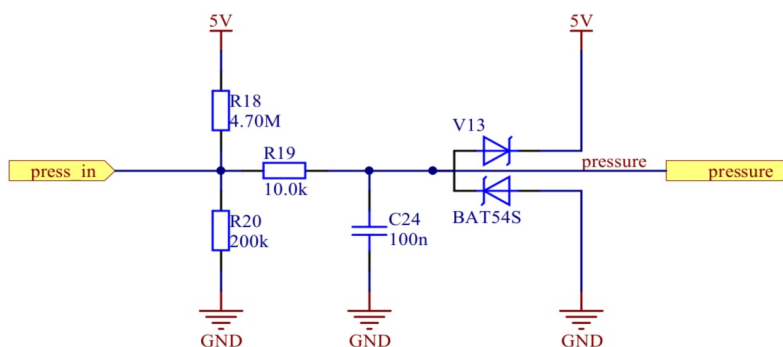
Tento obvod se používá pro připojení termistoru pro měření teploty. PBU obsahuje 3 vstupy pro připojení těchto senzorů. Z hlediska diagnostiky zde lze vyhodnotit zkrat na GND a odpojené čidlo. Dále je možné vyloučit teploty mimo reálný rozsah měřené veličiny a hlásit poruchu termistoru.



Obrázek 57: Vstupní obvod pro připojení termistoru

8.1.3 Obvod pro připojení tlakového senzoru

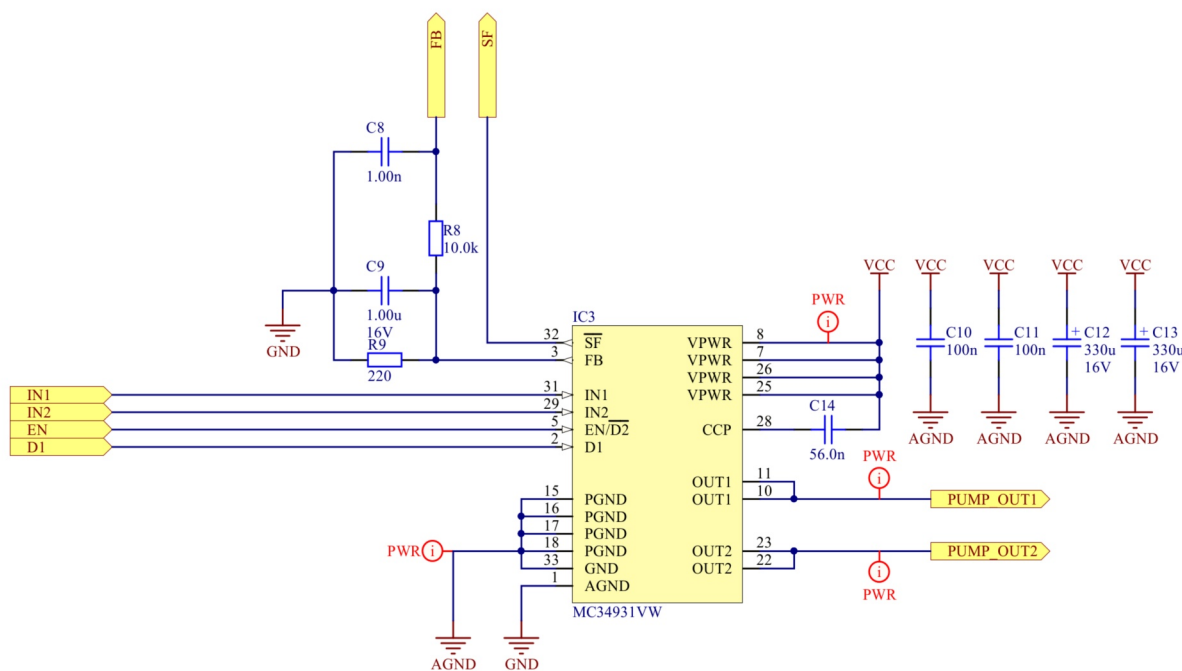
Senzor tlaku močoviny má napěťový výstup s rozsahem 0,5 V – 4,5 V. Této vlastnosti bylo využito pro účely diagnostiky tak, že byl na vstup obvodu umístěn odporový dělič, jehož klidový výstup je mimo tento rozsah. Dělič je zároveň tvořen rezistory vysoké hodnoty tak, aby výstup čidla příliš nezatěžoval. Pokud bude výstupní napětí obvodu rovno klidovému napětí děliče, znamená to že tlakový senzor je odpojen. Pokud bude výstupní napětí 0, znamená to, že je výstup zkratován na GND, pokud bude v saturaci, znamená to zkrat na plus.



Obrázek 58: Vstupní obvod pro připojení tlakového senzoru

8.1.4 Obvod řízení membránové pumpy

Základem spínacího obvodu membránové pumpy je integrovaný H-můstek MC34931. Tento můstek je určen pro spínání indukční zátěže (typicky motorů) s maximálním trvalým proudem 5 A. Můstek již v sobě obsahuje nadproudovou i tepelnou ochranu, chybový stav signalizuje pomocí logického výstupu do nadřazeného obvodu (řídícího mikrokontroléru). Můstek v sobě rovněž implementuje obvod pro snímání proudu, jehož výstup je rovněž připojen na řídicí mikrokontrolér.



Obrázek 59: Obvod pro buzení membránové pumpy

8.2 Softwarový zavaděč

Pro zajištění možnosti softwarových úprav bylo potřeba do všech mikrokontrolérů v systému implementovat softwarový zavaděč (bootloader), který umožní aktualizovat firmware bez nutnosti demontáže konkrétní elektronické jednotky. K tomuto účelu se využívá komunikační sběrnice CAN. Bootloader je tedy program, jehož hlavním úkolem je pracovat s programovou pamětí. Je velice vhodné aby byl samostatný, tedy oddělen od hlavního programu tak, aby jakákoliv chyba v hlavním programu nemohla ovlivnit správný chod bootladeru a hlavní program mohl být přehrán funkční verzí.

8.2.1 Princip činnosti zavaděče

Poslední prototyp systému je založen na mikrokontroléru Kinetis EA s jádrem ARM Cortex-M0+. Tento mikrokontrolér má tabulku vektorů umístěnou hned na začátku programové oblasti. Hned prvními vektory v této tabulce je „stack pointer“ následovaný „reset vektorem“ (tedy adresou začátku programu), několika dalšími systémovými vektory a nakonec vektory jednotlivých přerušení. Velká výhoda této architektury oproti například starším 8-bitovým mikrokontrolérům s jádrem S08 je, že tabulku vektorů lze přemapovat a to i za chodu programu. Přemapování se provádí pomocí registru VTOR, který udává offset tabulky vektorů od základního umístění. Další důležitou vlastností je, že mikrokontrolér umožňuje některé oblasti paměti zamknout proti přepisu. Nastavení této zamčené oblasti probíhá hned s inicializací jádra mikrokontroléru (tedy velmi krátce po startu) a nelze ji již za chodu měnit.

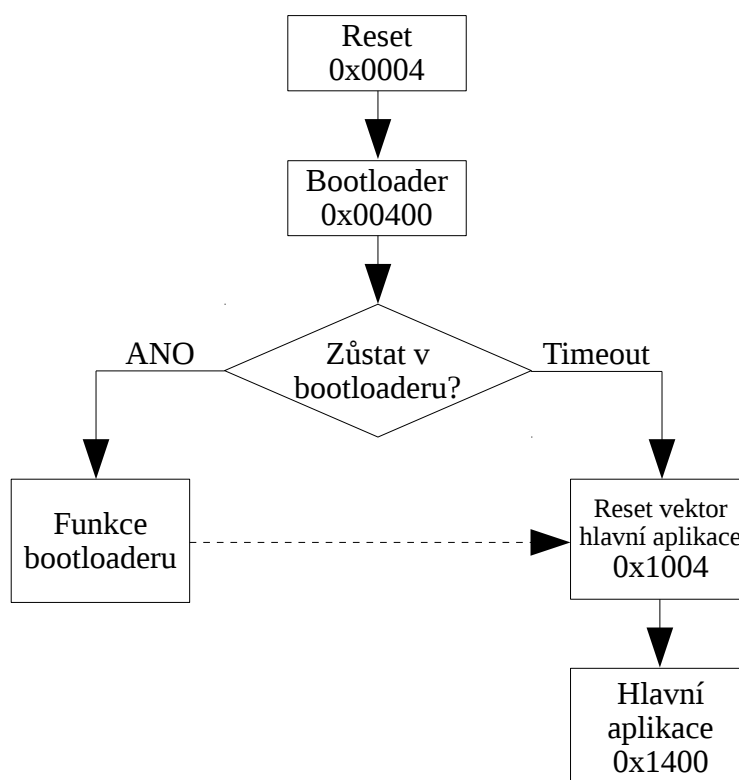
Struktura celého programového systému je tedy taková, že do první oblasti FLASH paměti se nahraje bootloader a tato oblast se „zamkne“ proti přepisu. Je pochopitelné, že bootloader se do této oblasti musí vejít celý. Nezamčená část za touto oblastí je dále vyhrazena pro hlavní program. Stejně jako bootloader, i hlavní program začíná tabulkou vektorů, za kterou následuje zbytek instrukcí. Při překladu hlavního programu je důležité zanést patřičný offset do nastavení projektu tak, aby začátek byl již mimo uzamčenou oblast. Skok mezi bootladerem a hlavním programem probíhá zjednodušeně tak, že se vypnou všechna přerušení, přepíše se registr VTOR patřičným offsetem tak, aby ukazoval na novou tabulku vektorů a provede se skok na adresu udanou v reset vektoru této druhé tabulky.

8.2.2 Práce se zavaděčem

Zařízení po náběhu napájení (případně po resetu mikrokontroléru) vyšle na sběrnici zprávu „I am alive“, která dá diagnostickému zařízení informaci, že elektronická jednotka je v režimu „bootladeru“. Pokud na tuto zprávu jednotka nedostane žádnou odpověď během jedné sekundy, automaticky se přepne do normálního režimu, ve kterém běží hlavní program. V případě, že obdrží odpověď „stay in bootlader“, zůstane v režimu bootladeru, který umožňuje pracovat s obsahem programové paměti. Bootlader využívá 2 různé po sobě jdoucí CAN ID. První je určeno pro vykonávání příkazů, druhé slouží pro přesun bloků dat.

Bootloader umožňuje vykonat následující operace:

- Vyčíst aktuální verzi firmware
- Vyčíst celou programovou paměť
- Vymazat programovou paměť
- Vyčíst libovolnou adresu v paměti EEPROM
- Zapsat na libovolnou adresu v paměti EEPROM
- Nahrát nový hlavní program
- Skok na hlavní program (přepnutí do normálního režimu)



Jak bylo popsáno výše, zařízení zůstane v režimu „bootloader“ jen pokud dostane po sběrnici CAN patřičnou instrukci v jistém časovém okně. Je tedy jasné, že na sběrnici musí současně být aktivní zařízení, které čeká na signál „I am alive“ a odešle odpověď. Pro tento účel byla vyvinuta grafická aplikace pro PC, s intuitivním uživatelským rozhraním. Pro propojení PC a sběrnice CAN se využívá převodníku USB/CAN vlastní konstrukce. Aplikace je napsána v jazyce C++ a využívá knihovny QT. Umožňuje provádět všechny výše zmíněné instrukce.

8.2.3 Transport protokol

Z principu komunikace po sběrnici CAN je jasné, že jedna CAN zpráva může obsahovat maximálně 8 datových bytů. Vzhledem k faktu, že jednotlivé blokové záznamy ve zdrojovém souboru mohou být delší, bylo zde nutné implementovat transport protokol, který takovýto záznam dokáže na vysílací straně rozdělit a v cílovém mikrokontroléru zase složit.

Princip protokolu je založen na vytvoření jakéhosi „paketu“ ve vlastních datových bytech CAN zprávy. Tento paket vždy obsahuje hlavičku a užitečné data. Jsou zde implementovány 3 typy zpráv (paketů):

- Jednoduchý paket – slouží pro přenos zpráv dlouhých 7 bytů nebo méně
- První paket – slouží pro první paket při přenosu zpráv delších jak 7 bytů
- Následný paket – slouží pro každý další paket ve zprávách delších jak 7 bytů

Typ paketu	Byte 0	Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4	Byte 5	Byte 6	Byte 7
Jednoduchý paket	Typ 00	Dél- ka	Data	Data	Data	Data	Data	Data
První paket	Typ 01	Dél- ka	Délka	Data	Data	Data	Data	Data
Následný paket	Typ 02	SN	Data	Data	Data	Data	Data	Data

Tabulka 15: Struktura jednotlivých zpráv transport protokolu

Vysílací strana odesílá vždy celý záznam („řádek“) zdrojového „S-REC“ souboru, jehož struktura je popsána v [24], příloha C. Tento záznam je na vysílací straně v závislosti na své délce rozdělen do jednotlivých zpráv transport protokolu a postupně odesílán. Komunikace běží v režimu „ping pong“, tedy každé přijetí CAN zprávy přijímací stranou je zpětně potvrzováno vysílací straně. Přijmutí potvrzení umožní odeslání další části dat, až do odeslání kompletního záznamu. V případě nedoručení potvrzení se opakuje odeslání poslední CAN zprávy s nastavitelným maximálním počtem opakování. Na přijímací straně je zpráva postupně skládána v paměti RAM. Po kompletaci celého záznamu je ověřena integrita dat pomocí kontrolního součtu, který je součástí každého S-record záznamu. V případě, že kontrolní součet vyjde správně, jsou data zapsána do programové paměti FLASH. V opačném případě si přijímací strana vyžádá celý záznam znovu.

9 Závěr

V teoretickém úvodu této práce byly vysvětleny základní principy formování oxidů dusíku ve spalovacích motorech. Současně s tím zde byly popsány známé metody pro potlačení vzniku NO_x (primární metody) a metody pro jejich dodatečné odstranění (sekundární metody). Jak bylo zmíněno v úvodu, cílem projektu bylo navrhnout a zrealizovat systém do značné míry univerzální a soběstačný. Pro tento účel byla vybrána metoda selektivní katalytické redukce (SCR). Jedná se o sekundární metodu, u které není nutno nikterak zasahovat do řízení motoru a lze s ní dosáhnout účinnosti vyšší než 90 %. Koncepce „nezávislého“ zařízení je v porovnání s komerčně dostupnými běžně používanými systémy poměrně unikátní.

Ve spolupráci s komerčním partnerem byl sestaven kompletní výfukový systém zahrnující mimo jiné potrubí, katalytické konvertory či mixér pro míchání výfukových plynů. Z elektronické části systému řízení bylo vyvinuto několik elektronických jednotek navzájem spolu kooperujících. Systém využívá komerčně běžně dostupná čidla a akční členy.

Samotný systém byl úspěšně testován na motorové stolici v certifikované laboratoři s motorem Iveco tector o objemu 5900 cm³. Během ETC testu dosáhl systém účinnosti 90 %, při NRTC o několik procent méně (kompletní výsledky testů lze najít v přílohách). V dalším kroku byl prototypový systém implementován do testovacího vozidla Iveco Daily 2.3 HPT. Vozidlo bylo následně testováno na válcové brzdě testem NEDC. Výsledky tohoto testu se „studeným“ startem nebyly moc povzbudivé, protože systému trvalo velmi dlouho než se zahřál na pracovní teplotu. Při opakování testu se zahřátým motorem bylo dosaženo účinnosti opět přes 90 %, nicméně tento test kvůli počátečním teplotám nesplňuje testovací předpis.

V reálném provozu bylo s prototypem najeto několik tisíc kilometrů. Během těchto testovacích jízd se ukázalo, že k ohřevu systému v reálném provozu dochází daleko rychleji než na válcové brzdě, což je vzhledem k množství vypouštěných NO_x pozitivní zjištění. Na dlouhých trasách lze dosáhnout účinnosti převyšující 95 %.

Systém rovněž implementuje diagnostiku chybových stavů, popsaných v závěru této práce. Dále je umožněna úprava firmware přes společnou komunikační sběrnici bez nutnosti demontáže elektronických jednotek.

Celkově lze konstatovat, že se podařilo splnit cíle tohoto projektu. K finálnímu produktu chybí důsledné dlouhodobé testování i za různých klimatických podmínek a na základě těchto nových poznatků implementovat případné změny. Více dat z reálného provozu bude rovněž použito k dalšímu vylepšení algoritmu pro detekci saturace katalytického konvertoru. Dále je potřeba vyřešit několik „mechanických problémů“ a případné legislativní záležitosti, což ovšem nebylo součástí této disertační práce.

Seznam použité literatury

- [1] DieselNet. Gaseous Emissions [online]. DieselNet: 2010 [cit. 25.2.2016]. Dostupné z: http://dieselnet.com/tech/emi_gas.php
- [2] UNFCCC. Kyoto protocol reference manual [online]. UNFCCC: [cit. 10.2.2016]. Dostupné z: http://unfccc.int/resource/docs/publications/08_unfccc_kp_ref_manual.pdf
- [3] CHMI. Přízemní (troposférický) ozon [online]. CHMI: [cit. 5.2.2016]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/om/weather_links/Pocasi/Navody/Prizemni_ozon/text_ozon.htm
- [4] CHMI. Přehled imisních limitů a povolený počet překročení, horních a dolních mezí [online]. CHMI: 2012 [cit. 5.2.2016]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/tab_roc/2014_enh/pdf/limity_CZ.pdf
- [5] IGNARRO, Louis J., Program Ano NO: skutečný zachránce života, 2005, ISBN 80-7252-113-6
- [6] DieselNet. Emission Standards - European Union - Cars and Light Trucks [online]. DieselNet: [cit. 1.2.2016]. Dostupné z: <http://dieselnet.com/standards/eu/ld.php>
- [7] DieselNet. Emission Standards - European Union - Nonroad Engines [online]. DieselNet: [cit. 1.2.2016]. Dostupné z: <http://dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php>
- [8] DieselNet. Emission Standards - European Union - Nonroad SI Engines [online]. DieselNet: [cit. 1.2.2016]. Dostupné z: http://dieselnet.com/standards/eu/nonroad_si.php
- [9] KHAIR, Magdi K., JÄÄSKELÄINEN, Hannu. Emission Formation in Diesel Engines [online]. DieselNet: 2015 [cit. 3.3.2016]. Dostupné z: http://dieselnet.com/tech/diesel_emiform.php#nox
- [10] MŽP ČR. Oxidy dusíku (NOx/NO2) [online]. MŽP ČR: [cit. 10.2.2016]. Dostupné z: http://www.irz.cz/repository/latky/oxidy_dusiku.pdf
- [11] KHAIR, Magdi K., JÄÄSKELÄINEN, Hannu. Exhaust Gas Recirculation [online]. DieselNet: 2014 [cit. 8.3.2016]. Dostupné z: http://dieselnet.com/tech/engine_egr.php
- [12] KHAIR, Magdi K., JÄÄSKELÄINEN, Hannu. Effect of EGR on Emissions and Engine Performance [online]. DieselNet: 2015 [cit. 8.3.2016]. Dostupné z: http://dieselnet.com/tech/engine_egr_performance.php
- [13] MAJEWSKI, W. Addy. NOx Adsorbers [online]. DieselNet: 2015 [cit. 10.3.2015]. Dostupné z: http://dieselnet.com/tech/cat_nox-trap.php
- [14] MAJEWSKI, W. Addy. Lean NOx Catalyst [online]. DieselNet: 2004 [cit. 5.3.2015]. Dostupné z: http://dieselnet.com/tech/cat_lean-nox.php
- [15] PETERS, A., H.-J. LANGER, B. JOKL, W. MÜLLER, H. KLEIN a K. OSTGATHE. Catalytic NOx Reduction on a Passenger Car Diesel Common Rail Engine [online]. : 1998 [cit. 5.3.2015]. Dostupné z: <http://papers.sae.org/980191/>

- [16] MAJEWSKI, W. Addy. Water in Diesel Combustion [online]. DieselNet: 2002 [cit. 15.3.2016]. Dostupné z: http://dieselnet.com/tech/engine_water.php
- [17] MAJEWSKI, W. Addy. Selective Catalytic Reduction [online]. DieselNet: 2005 [cit. 25.2.2016]. Dostupné z: http://dieselnet.com/tech/cat_scr.php
- [18] KOEBEL, Manfred, STRUTZ, Ernst Olav, Thermal and Hydrolytic Decomposition of Urea for Automotive Selective Catalytic Reduction Systems: Thermochemical and Practical Aspects[online] 2003,
- [19] DieselNet. Catalytic Coating & Materials [online]. DieselNet: 2005 [cit. 10.3.2016]. Dostupné z: http://dieselnet.com/tech/cat_mat.php
- [20] BAERLOCHER Ch., McCuske L.B., Olson D.H.. Atlas of zeolite framework types [online]. : 2007 [cit. 10.3.2016]. Dostupné z: http://www.iza-structure.org/databases/books/Atlas_6ed.pdf
- [21] LINGSHAN, Chen, WEIJIANG Zhang, Simulation modeling and experiment to reduction of NO_x emission by using SCR control system[online] 2011, <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5777604>
- [22] Šmerda T., Čupera J.. Emise vznětového motoru a systém SCR [online]. AGRI CS a. s.: 2011 [cit. 10.10.2017]. Dostupné z: <http://www.agrics.cz/obrazky-soubory/emise-vznetoveho-motoru-a-system-scr-4107d3.pdf?redir>
- [23] DieselNet. European Transient Cycle (ETC) [online]. DieselNet: 2000 [cit.]. Dostupné z: <https://www.dieselnet.com/standards/cycles/etc.php>
- [24] . Mapy.cz [online]. Mapy.cz: 2018 [cit. 20.5.2017]. Dostupné z: <https://mapy.cz>
- [25] MOTOROLA INC.. MOTOROLA M68000 FAMILY - Programmer's Reference Manual [online]. MOTOROLA INC.,: 1992 [cit. 20.2.2017]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/reference-manual/M68000PRM.pdf>

Seznam publikací autora

Seznam publikací souvisejících s tématem

- [26] 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
- [27] 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
- [28] ŽAHOUR, J., KŘIVKA, J., KOSTURIK, K., FREDHOLM, S. Self-sufficient system for NOx reduction. In *Proceedings of the 23rd Telecommunications Forum (TELFOR 2015)*. Piscataway: IEEE, 2015. s. 646-649. ISBN: 978-1-5090-0055-5
- [29] ŽAHOUR, J., KŘIVKA, J., ELIS, L. Nepřímé určování tlaku ve vstříkovacím systému. In *Elektrotechnika a informatika 2014. Část 2., Elektronika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2014. s. 93-96. ISBN: 978-80-261-0366-0
- [30] KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K., FREDHOLM, S. Automatic detection of different mechanical ERDPF configurations. In *Proceedings of the 23rd Telecommunications Forum (TELFOR 2015)*. Piscataway: IEEE, 2015. s. 654-657. ISBN: 978-1-5090-0055-5
- [31] 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
- [32] KŘIVKA, J., KŘIBSKÝ, P., VALDA, L., ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K. Autonomous Control System of Electrically Regenerable Diesel Particulate Filter for Light Duty Vehicles. In *Proceedings of the 22nd Telecommunications Forum (TELFOR 2014)*. Belgrade: IEEE, 2014. s. 706-709. ISBN: 978-1-4799-6190-0
- [33] ŽAHOUR, J., KŘIVKA, J., KOSTURIK, K., KŘIBSKÝ, P., VALDA, L. Electrical glowing of filtering elements in the DPF filter. In *Proceedings of the 22nd TELECOMMUNICATIONS FORUM – (TELFOR 2014)*. Belgrade: IEEE, 2014. s. 710-712. ISBN: 978-1-4799-6190-0
- [34] 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

- [35] 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
- [36] 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
- [37] 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
- [38] 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
- [39] ŽAHOUR, J., KŘIVKA, J., KOSTURIK, K. Emisní testy nezávislého systému pro redukci NO_x. In *Elektrotechnika a informatika 2018. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2018. s. 173-176. ISBN: 978-80-261-0785-9
- [40] 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

Publikace v recenzním řízení

KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K., FREDHOLM, S., Independent System for Lowering Of Harmful Exhaust Emissions, *Serbian Journal of Electrical Engineering*, ISSN 1451-4869

Seznam publikací nesouvisejících s tématem

- [41] KŘIBSKÝ, P., ŽAHOUR, J., KŘIVKA, J., VALDA, L. Li-Ion State of Charge Estimation Methods. In *Proceedings of the 22nd TELECOMMUNICATIONS FORUM (TELFOR 2014)*. Belgrade: IEEE, 2014. s. 649-651. ISBN: 978-1-4799-6190-0
- [42] 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

- [43] VALDA, L., KŘIVKA, J., KŘIBSKÝ, P., ŽAHOUR, J. Replacement of the Mains Voltage by Reconfigurable Li-ion Battery for 4kW Power Inverter. In *Proceedings of the 22nd Telecommunications Forum (TELFOR 2014)*. Belgrade: IEEE, 2014. s. 645-648. ISBN: 978-1-4799-6190-0
- [44] ŠTĚTKA, P., KŘIVKA, J., ELIS, L., VLÁŠEK, J., ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K. Control and navigation system for mobile platform. In *Proceedings of the 21st Telecommunications Forum (TELFOR 2013)*. Bělehrad: IEEE, 2013. s. 584-586. ISBN: 978-1-4799-1419-7
- [45] ŽAHOUR, J., KŘIVKA, J., ELIS, L., ŠTĚTKA, P., KOSTURIK, K. Control unit of monitoring airship and his communication interface. In *Proceedings of the 21st Telecommunications Forum (TELFOR 2013)*. Bělehrad: IEEE, 2013. s. 587-589. ISBN: 978-1-4799-1419-7
- [46] KŘIVKA, J., ELIS, L., VLÁŠEK, J., ŽAHOUR, J., ŠTĚTKA, P., KOSTURIK, K. Hardware for rail traffic simulator. In *Proceedings of the 21st Telecommunications Forum (TELFOR 2013)*. Bělehrad: IEEE, 2013. s. 590-593. ISBN: 978-1-4799-1419-7
- [47] VLÁŠEK, J., KŘIVKA, J., ELIS, L., ŽAHOUR, J., ŠTĚTKA, P., KOSTURIK, K. Software for rail traffic simulator. In *Proceedings of the 21st Telecommunications Forum (TELFOR 2013)*. Bělehrad: IEEE, 2013. s. 594-596. ISBN: 978-1-4799-1419-7
- [48] 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
- [49] 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
- [50] ŽAHOUR, J. řídicí jednotka vzducholodě a její komunikační rozhraní. In *Elektrotechnika a informatika 2013. Část 2., Elektronika*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2013. s. 101-104. ISBN: 978-80-261-0232-8
- [51] ŽAHOUR, J. Senzorické vybavení pro kolovou mobilní platformu do těžkého terénu. In *Elektrotechnika a informatika 2012. Část 2., Elektronika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2012. s. 151-154. ISBN: 978-80-261-0119-2
- [52] SKÁLA, J., HAMMERBAUER, J., KUBÍK, Z., GEORGIEV, V., KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J., VALENTA, P. Technická zpráva: *Vývoj elektroniky*. Západočeská univerzita v Plzni, 2017.

Seznam funkčních vzorů autora

Seznam funkčních vzorků vzniklých v souvislosti s tématem

- [100] ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K., KŘIVKA, J. *Bezdrátový sběrníkový gateway*. 2014. 22110-FV015-2014
- [101] ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K., KŘIVKA, J. *řídící jednotka vstřikovacího systému SCR s CAN rozhraním*. 2014. 22110-FV018-2014
- [102] KŘIVKA, J., KOSTURIK, K., ŽAHOUR, J. *Senzorický komunikační modul pro výfukové aplikace*. 2014. 22110-FV022-2014
- [103] KŘIVKA, J., KOSTURIK, K., ŽAHOUR, J. *Spínací modul elektricky regenerovatelných filtrů pevných částic*. 2014. 22110-FV020-2014
- [104] KŘIVKA, J., KOSTURIK, K., ŽAHOUR, J. *Testovací stolice elektricky regenerovatelných filtrů pevných částic*. 2014. 22110-FV021-2014
- [105] KŘIVKA, J., KOSTURIK, K., ŽAHOUR, J. *Řídící modul elektricky regenerovatelných filtrů pevných částic*. 2014. 22110-FV019-2014
- [106] KOSTURIK, K., ELIS, L., KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J. *Manuální spínač pro testování DPF filtrů*. 2013. 22110-FV007-2013
- [107] KOSTURIK, K., ELIS, L., KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J. *Systém pro měření vibrací v prostoru výfuku*. 2013. 22110-FV036-2013
- [108] KOSTURIK, K., ELIS, L., KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J. *řídící elektronika DPF pro 24 voltový systém*. 2013. 22110-PR001-2013
- [109] KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J., ELIS, L., KOSTURIK, K. *High-speed P-MOSFET driver*. 2015. 22110-FV003-2015
- [110] ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K., KŘIVKA, J. *Řídící jednotka SCR systému – PBU 1.1*. 2016. 22110-FV003-2016
- [111] KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K. *Řídící modul MC V2 ERDPF*. 2017. 22110-FV013-2017
- [112] KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K. *Sekundární modul CUx V2 ERDPF*. 2017. 22110-FV014-2017
- [113] KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K. *12 AE ERDPF filtr s aktivní regenerací*. 2017. 22110-PR001-2017

- [114] ŽAHOUR, J., KŘIVKA, J., KOSTURIK, K. Řízení škrticí klapky výfukového potrubí. 2018. 22110-FV003-2018

Seznam funkčních vzorků nesouvisejících s tématem



- [115] ELIS, L., KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K. *Komunikační modul mezi sběrnicemi RS-232 a LIN*. 2015. 22110-FV008-2015
- [116] KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J., ELIS, L., KOSTURIK, K. *Testovací platforma pro automotive aplikace založená na modulech NI USB-6008 OEM - rozšířené provedení*. 2015. 22110-FV005-2015
- [117] KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J., ELIS, L., KOSTURIK, K. *Testovací platforma pro automotive aplikace založená na modulech NI USB-6008 OEM - základní provedení*. 2015. 22110-FV004-2015
- [118] ŽAHOUR, J., KŘIVKA, J., KOSTURIK, K., ELIS, L. *řídící jednotka digitálně řízeného audiozesilovače*. 2015. 22110-FV006-2015
- [119] ŽAHOUR, J., KŘIVKA, J., KOSTURIK, K., ELIS, L. *řídící jednotka kotle na tuhá paliva*. 2015. 22110-FV007-2015
- [120] ELIS, L., KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J. *Bateriová elektronika monitorovací vzducholodě*. 2014. 22110-FV026-2014
- [121] ELIS, L., KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J. *Elektronický šes-ti kanálový signálový přepínač*. 2014. 22110-FV028-2014
- [122] ELIS, L., KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J. *Lokalizační elektronika pro kolejový simulátor*. 2014. 22110-FV025-2014
- [123] ELIS, L., KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J. *Přesný dvoukanálový generátor fázově posunutých pulsů*. 2014. 22110-FV027-2014
- [124] KŘIVKA, J., KOSTURIK, K., ŽAHOUR, J. *Samo-oscilující proudový zdroj definované hodnoty*. 2014. 22110-FV023-2014
- [125] KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J., ELIS, L., KOSTURIK, K. *Universální komunikační modul mezi sběrnicemi USB 2.0, USB 1.1 a RS-232*. 2014. 22110-FV024-2014
- [126] ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ELIS, L. *Zařízení pro detekci mechanického opotřebení točivých strojů*. 2014. 22110-FV016-2014



- [127] ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ELIS, L. *řídící jednotka akčního členu dveřní jednotky*. 2014. 22110-FV017-2014
- [128] ELIS, L., KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J. *Autonomní solární zavlažovací systém*. 2013. 22110-FV026-2013
- [129] KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ELIS, L., ŽAHOUR, J., GEORGIEV, V. *Dispečerské stanoviště simulátoru kolejových vozidel*. 2013. 22110-FV014-2013
- [130] ELIS, L., KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J., GEORGIEV, V. *Elektronická výzbroj modelu kolejového vozidla*. 2013. 22110-FV017-2013
- [131] KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ELIS, L., ŽAHOUR, J. *Inovace extruderu pro 3D tiskárnu Ultimaker*. 2013. 22110-FV020-2013
- [132] ŽAHOUR, J., WEISSAR, P. *Komunikační modul pro robotické aplikace*. 2013. 22110-FV033-2013
- [133] KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ELIS, L., ŽAHOUR, J. *Laserové detekční zařízení*. 2013. 22110-FV021-2013
- [134] ELIS, L., KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J. *Lokalizační elektronika monitorovací vzducholodě*. 2013. 22110-FV024-2013
- [135] KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ELIS, L., ŽAHOUR, J. *Měřicí elektronika monitorovací vzducholodě*. 2013. 22110-FV019-2013
- [136] ELIS, L., KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J. *Nízkonapěťový záložní zdroj s využitím Li-Ion akumulátorů*. 2013. 22110-FV027-2013
- [137] KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ELIS, L., ŽAHOUR, J. *Přípravek pro testování dosahu bezdrátových modulů*. 2013. 22110-FV023-2013
- [138] ELIS, L., KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J. *Rotační displej*. 2013. 22110-FV025-2013
- [139] KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ELIS, L., ŽAHOUR, J., GEORGIEV, V. *Senzory a akční členy kolejového simulátoru*. 2013. 22110-FV018-2013
- [140] KOSTURIK, K., ELIS, L., KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J. *USB vysílač s modulem Xbee PRO*. 2013. 22110-FV031-2013
- [141] ŽAHOUR, J., WEISSAR, P., SKÁLA, J. *Univerzální modul periférií pro aplikace jednočipových mikropočítačů*. 2013. 22110-FV032-2013

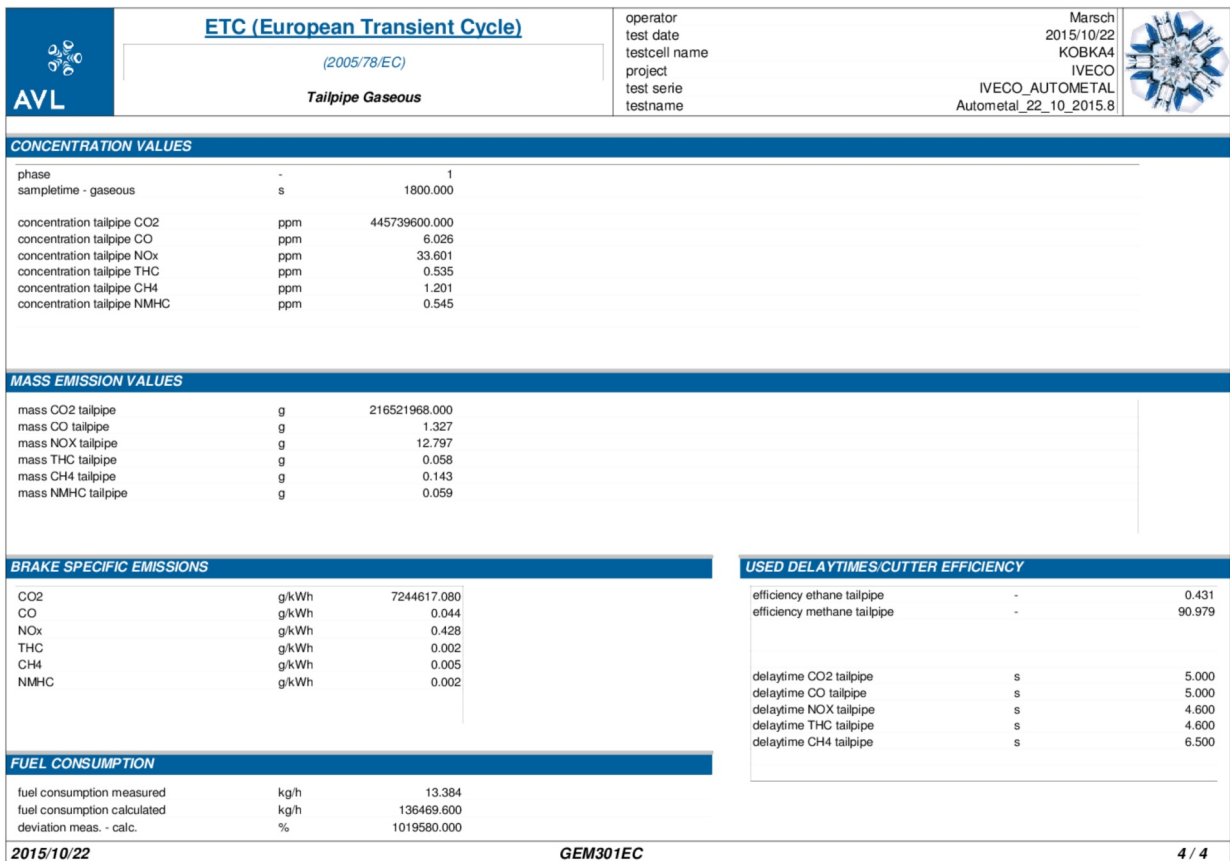
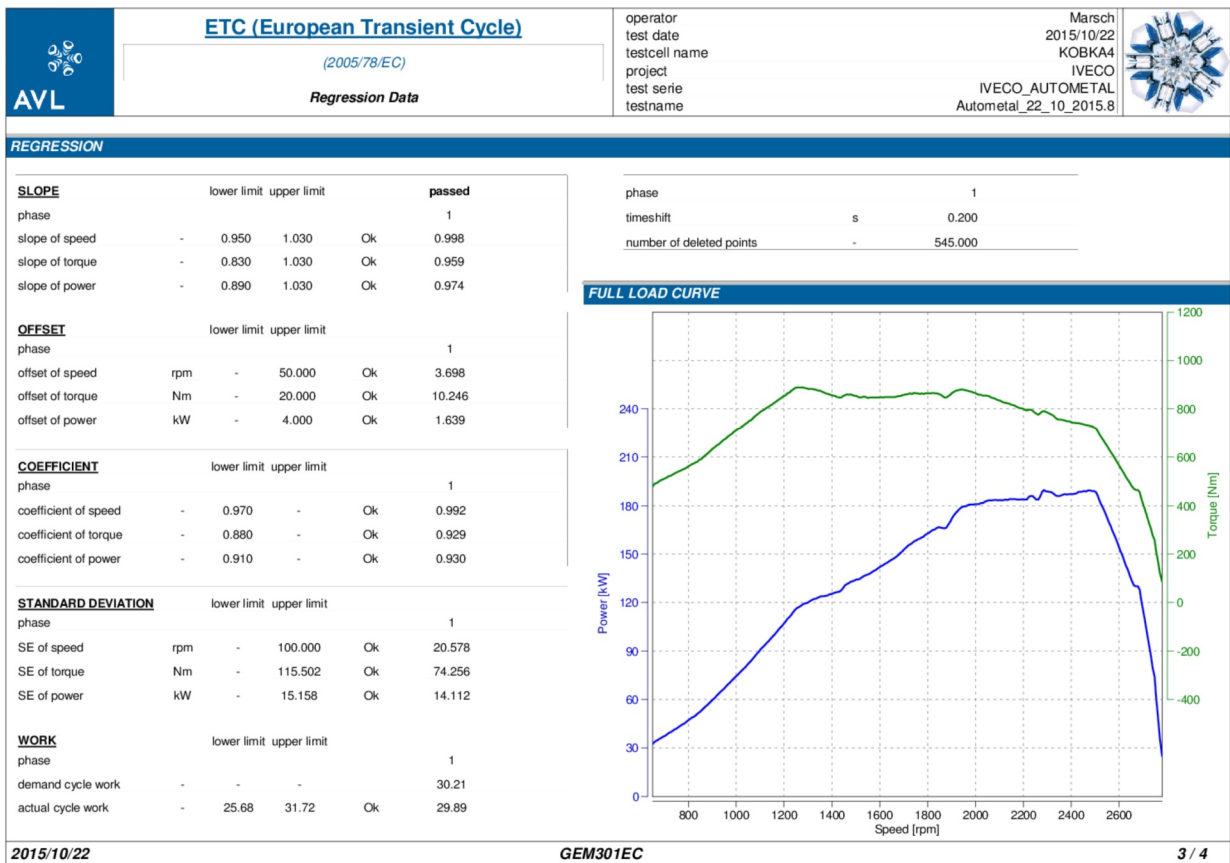
- [142] ELIS, L., KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J., GEORGIEV, V. *Vlaková kabina simulátoru kolejových vozidel*. 2013. 22110-FV015-2013
- [143] ELIS, L., KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J. *Řídicí elektronika monitorovací vzducholodě*. 2013. 22110-FV022-2013
- [144] KOSTURIK, K., KŘIVKA, J., ELIS, L., ŽAHOUR, J., GEORGIEV, V. *Řídicí jednotka stanice kolejového simulátoru*. 2013. 22110-FV016-2013
- [145] ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K. *Inteligentní řídicí jednotka pro BLDC motory*. 2012. 22110-FV030-2012
- [146] ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K. *Univerzální bezdrátový USB transceiver s modulem Nordic*. 2012. 22110-FV033-2012
- [147] ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K. *řídicí jednotka kolové mobilní platformy do těžkého terénu*. 2012. 22110-FV036-2012
- [148] ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K., KŘIVKA, J. *Modul specializovaného HIL testeru FELBOX - backplane KBB03*. 2016. 22110-FV004-2016
- [149] KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K. *Šesti kvadrantový lineární převodník dvouosého řízení s výkonovými PWM výstupy*. 2017. 22110-FV011-2017
- [150] ŽAHOUR, J., KŘIVKA, J., KOSTURIK, K. *Převodník CAN/Ethernet*. 2017. 22110-FV008-2017
- [151] KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K. *Platforma měření ratiometrických signálů s izolovaným napájením*. 2017. 22110-FV010-2017
- [152] KŘIVKA, J., ŽAHOUR, J., KOSTURIK, K. *Omezovač funkce akcelérátoru pro bezkartáčové motory*. 2017. 22110-FV012-2017
- [153] ŽAHOUR, J., KŘIVKA, J., KOSTURIK, K. *Inteligentní záložní zdroj s vícekanálovým výstupem*. 2017. 22110-FV009-2017
- [154] 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.
- [155] ŽAHOUR, J., KŘIVKA, J., KOSTURIK, K. *Polovodičové přidržovací relé s nastavitelnou časovou konstantou*. 2018. 22110-FV001-2018
- [156] ŽAHOUR, J., KŘIVKA, J., KOSTURIK, K. *Informační panel s dvojitým e-ink displejem a zálohovaným napájením*. 2018. 22110-FV002-2018

Přílohy



Příloha A Výkaz ETC testu



ETC (European Transient Cycle)		(2005/78/EC)		Overall Test Data	
		operator		Marsch	
		test date		2015/10/22	
		testcell name		KOBKA4	
		project		IVECO	
		test serie		IVECO_AUTOMETAL	
		testname		Autometal_22_10_2015.8	
					
TEST IDENTIFICATION					
start time of test	hhmmss	15:33:50	system parameter	-	SYS_CVUT_GEM_IVECO
end time of test	hhmmss	16:14:58	unit under test parameter	-	UUT_CVUT_GEM_IVECO_FLG_BOSCH
			test facility parameter	-	TFP_CVUT_GEM_IVECO
			test parameter	-	TST_GEM301EC_ECE_ETC
ENGINE DATA					
manufacturer	-	IVECO	rated speed	rpm	2700.00
engine number	-	224050	maximum engine speed	rpm	3000.00
engine family	-	TECTOR (F4A00A)	idle speed	rpm	810.00
injection system	-	DI	model year	-	2003
transmission type	-	Manual	number of cylinders	-	6
engine type	-	compression ignition	engine displacement	dm3	5.9000
FUEL DATA					
fuel name	-	Diesel	massfraction H	-	0.13400
fuel id	-	123	massfraction C	-	0.86600
fuel density	g/cm3	0.800	massfraction O	-	0.00000
molar mass fuel	-	13.869	massfraction W	-	0.00000
H/C ratio	-	1.942	massfraction N	-	0.00000
stoichiometric factor	-	13.486	massfraction S	-	0.00000
BRAKE SPECIFIC RESULT TEST					
			LIMIT Euro 4		
CO2	g/kWh	7244617.080	0.000	-	
CO	g/kWh	0.044	4.000	Ok	
NOx	g/kWh	0.428	3.500	Ok	
THC	g/kWh	0.002	0.550	Ok	
CH4	g/kWh	0.005	1.100	Ok	
NMHC	g/kWh	0.002	0.550	Ok	
			0.000		
			0.030		
NMHC+NOX	g/kWh	0.43016	0.000	-	
2015/10/22		GEM301EC		1 / 4	

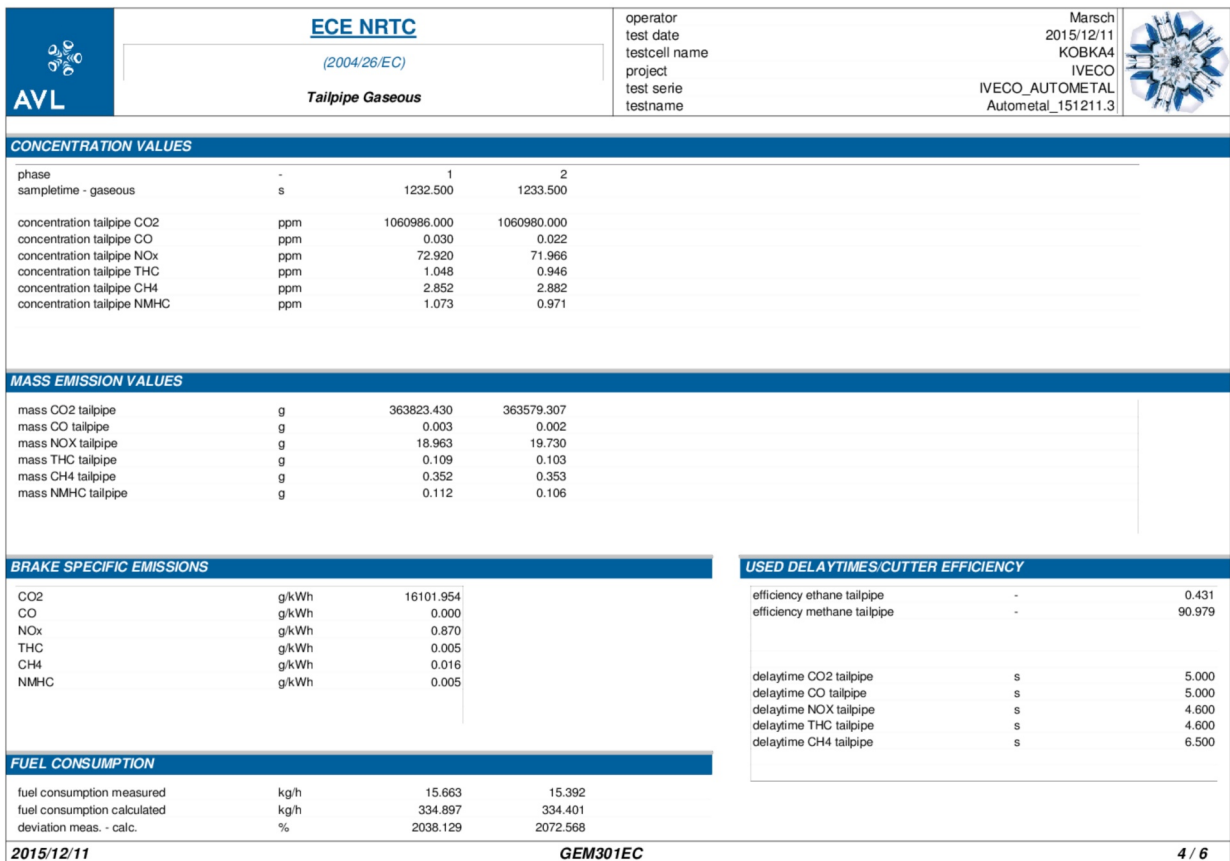
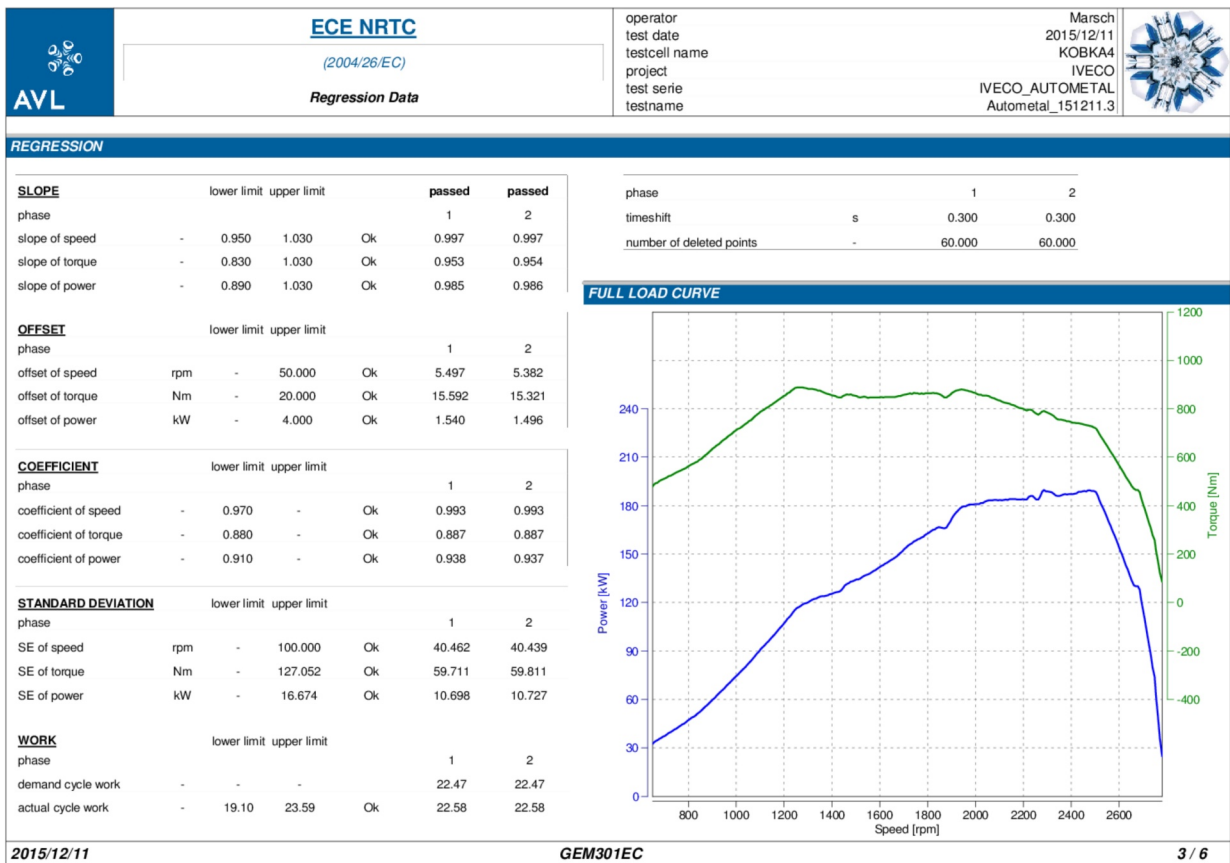
ETC (European Transient Cycle)		(2005/78/EC)		Environment Data	
		operator		Marsch	
		test date		2015/10/22	
		testcell name		KOBKA4	
		project		IVECO	
		test serie		IVECO_AUTOMETAL	
		testname		Autometal_22_10_2015.8	
					
TESTCELL DATA					
phase	-	1			
temperature air testcell	°C	33.211			
pressure air testcell	kPa	10050.820			
relative humidity of testcell	%	40.000			
ENGINE INFO					
phase	-	1			
temperature of engine inlet air	°C	33.211			
pressure air engine inlet	kPa	10050.820			
relative humidity air engine inlet	%	40.000			
absolute humidity	g/kg	0.126			
fuel temperature	°C	29.370			
correctionfactor NOx	-	0.813			
F - Factor	-	0.041			
F - Factor limit check	-	NOK			







Příloha B Výkaz NRTC testu

		ECE NRTC (2004/26/EC) Overall Test Data		operator test date testcell name project test serie testname		Marsch 2015/12/11 KOBKA4 IVECO IVECO_AUTOMETAL Autometal_151211.3				
TEST IDENTIFICATION										
start time of test	hhmmss	11:02:28	system parameter	-	SYS_CVUT_GEM_IVECO					
end time of test	hhmmss	12:15:46	unit under test parameter	-	UUT_CVUT_GEM_IVECO_FL_C_BOSCH					
			test facility parameter	-	TFP_CVUT_GEM_IVECO					
			test parameter	-	TST_GEM301EC_ECE_NRTC					
ENGINE DATA										
manufacturer	-	IVECO	rated speed	rpm	2700.00					
engine number	-	224050	maximum engine speed	rpm	3000.00					
engine family	-	TECTOR (F4A00A)	idle speed	rpm	810.00					
injection system	-	DI	model year	-	2003					
transmission type	-	Manual	number of cylinders	-	6					
engine type	-	compression ignition	engine displacement	dm3	5.9000					
FUEL DATA										
fuel name	-	Diesel	massfraction H	-	0.13400					
fuel id	-	123	massfraction C	-	0.86600					
fuel density	g/cm3	0.800	massfraction O	-	0.00000					
molar mass fuel	-	13.869	massfraction W	-	0.00000					
H/C ratio	-	1.942	massfraction N	-	0.00000					
stoichiometric factor	-	13.486	massfraction S	-	0.00000					
BRAKE SPECIFIC RESULT TEST										
					LIMIT	NRC Stage 3B				
CO2	g/kWh	733.228	0.000	-						
CO	g/kWh	-0.040	3.500	Ok						
NOx	g/kWh	0.879	2.000	Ok						
THC	g/kWh	-0.015	0.190	Ok						
CH4	g/kWh	-0.017	0.000	-						
NMHC	g/kWh	-0.015	0.000	-						
			0.000	-						
			0.025	-						
NMHC+NOX	g/kWh	0.86393	0.000	-						
2015/12/11		GEM301EC						1 / 6		

		ECE NRTC (2004/26/EC) Environment Data		operator test date testcell name project test serie testname		Marsch 2015/12/11 KOBKA4 IVECO IVECO_AUTOMETAL Autometal_151211.3			
TESTCELL DATA									
phase	-	1	2						
temperature air testcell	°C	24.626	25.165						
pressure air testcell	kPa	10094.150	10096.020						
relative humidity of testcell	%	40.000	40.000						
ENGINE INFO									
phase	-	1	2						
temperature of engine inlet air	°C	24.626	25.165						
pressure air engine inlet	kPa	10094.150	10096.020						
relative humidity air engine inlet	%	40.000	40.000						
absolute humidity	g/kg	0.076	0.079						
fuel temperature	°C	26.323	26.535						
correctionfactor NOx	-	0.839	0.837						
F - Factor	-	0.039	0.039						
F - Factor limit check	-	NOK	NOK						
DILUTION SYSTEM									
phase	-	1	2						
temperature primary dilution air	°C	24.626	25.165						
pressure primary dilution air	kPa	10094.150	10096.020						
relative humidity of primary dilution air	%	40.000	40.000						
absolute humidity diluted	g/kg	0.076	0.079						
dilutionfactor	-	24.157	24.174						
massflow dilution air	kg/h	6032.418	6017.053						
massflow exhaust diluted	kg/h	6292.916	6276.697						



	ECE NRTC (2004/26/EC) Diluted Gaseous	operator test date testcell name project test serie testname	Marsch 2015/12/11 KOBKA4 IVECO IVECO_AUTOMETAL Autometal_151211.3						
	CONCENTRATION VALUES		CONCENTRATION VALUES AMBIENT						
phase sampletime - gaseous concentration CO2 diluted concentration CO diluted concentration NOx diluted concentration THC diluted concentration CH4 diluted concentration NMHC diluted	- s ppm ppm ppm ppm ppm	1 1232.500 5544.861 -1.056 6.932 3.189 2.411 3.204	2 1233.500 5541.156 -1.156 7.060 3.089 2.375 3.104	concentration CO2 ambient concentration CO ambient concentration NOx ambient concentration THC ambient concentration CH4 ambient concentration NMHC ambient	ppm ppm ppm ppm ppm ppm	453.04 -0.68291 0.19756 3.4371 2.6984 3.4541	453.32 -0.69165 0.13331 3.3686 2.6543 3.3853		
MASS EMISSION VALUES		BRAKE SPECIFIC EMISSIONS		USED DELAYTIMES/CUTTER EFFICIENCY					
mass CO2 diluted mass CO diluted mass NOx diluted mass THC diluted mass CH4 diluted mass NMHC diluted	g g g g g g	16600.234 -0.743 19.404 -0.311 -0.392 -0.313	16552.497 -0.932 19.905 -0.348 -0.386 -0.350	CO2 CO NOx THC CH4 NMHC	g/kWh g/kWh g/kWh g/kWh g/kWh g/kWh	733.228 -0.040 0.879 -0.015 -0.017 -0.015	efficiency ethane diluted efficiency methane diluted delaytime CO2 diluted delaytime CO diluted delaytime NOx diluted delaytime THC diluted delaytime CH4 diluted	- - s s s s s	0.704 100.000 10.000 11.000 9.000 9.000 10.000
FUEL CONSUMPTION		fuel consumption measured fuel consumption calculated deviation meas. - calc.		kg/h kg/h %		15.663 15.278 -2.456	15.392 15.222 -1.106		
2015/12/11		GEM301EC		5 / 6					

	ECE NRTC (2004/26/EC) Bag Gaseous	operator test date testcell name project test serie testname	Marsch 2015/12/11 KOBKA4 IVECO IVECO_AUTOMETAL Autometal_151211.3							
	CONCENTRATION VALUES BAG SAMPLE		CONCENTRATION VALUES BAG AMBIENT							
phase sampletime - bag concentration bag CO2 sample concentration bag CO sample concentration bag NOx sample concentration bag THC sample concentration bag CH4 sample concentration bag NMHC sample	- s ppm ppm ppm ppm ppm ppm	1 1232.500 5501.265 -1.040 6.882 3.274 2.437 3.288	2 1233.500 5511.119 -1.144 6.956 3.166 2.394 3.181	concentration bag CO2 ambient concentration bag CO ambient concentration bag NOx ambient concentration bag THC ambient concentration bag CH4 ambient concentration bag NMHC ambient	ppm ppm ppm ppm ppm ppm	453.04 -0.68291 0.19756 3.4371 2.6984 3.4541	453.32 -0.69165 0.13331 3.3686 2.6543 3.3853			
CONCENTRATION VALUES BAG CORRECTED		MASS EMISSION VALUES		CUTTER EFFICIENCY						
concentration bag CO2 corrected concentration bag CO corrected concentration bag NOx corrected concentration bag THC corrected concentration bag CH4 corrected concentration bag NMHC corrected	ppm ppm ppm ppm ppm ppm	5048.2 -0.35714 6.6845 -0.16350 -0.26154 -0.16565	5057.8 -0.45239 6.8223 -0.20255 -0.26003 -0.20457	mass CO2 bag corrected mass CO bag corrected mass NOx bag corrected mass THC bag corrected mass CH4 bag corrected mass NMHC bag corrected	g g g g g g	16848.084 -0.762 19.503 -0.160 -0.307 -0.163	16875.328 -0.963 19.822 -0.202 -0.306 -0.204	efficiency ethane diluted efficiency methane diluted	- -	0.704 100.000
BRAKE SPECIFIC EMISSIONS		CO2 CO NOx THC CH4 NMHC		g/kWh g/kWh g/kWh g/kWh g/kWh g/kWh		747.192 -0.042 0.876 -0.009 -0.014 -0.009				
2015/12/11		GEM301EC		6 / 6						