





VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING



ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO  
INŽENÝRSTVÍ  
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**VÝZKUM PROGRESIVNÍCH METOD SNIŽOVÁNÍ OBSAHU  
ŠKODLIVÝCH LÁTEK VE VÝFUKOVÝCH PLYNECH  
VZNĚTOVÝCH MOTORŮ**

RESEARCH PROGRESSIVE METHODS FOR REDUCTION OF  
EMISSIONS IN CI ENGINE EXHAUST GASSES

**TEZE DIZERTAČNÍ PRÁCE**

SHORT VERSION OF DISSERTATION THESIS

AUTOR  
AUTHOR  
ŠKOLITEL  
SUPERVISOR

Ing. Rudolf Franz  
doc. Ing. Pavel Novotný, Ph.D.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Oxidy dusíku, pevné částice, recirkulace výfukových plynů, dodatečná úprava výfukových plynů, spalování, oxidační katalyzátor, filtr pevných částic, selektivní katalytická redukce.

## **KEYWORDS**

Nitrogen oxides, Particulate matter, Exhaust Gas Recirculation, Combustion process, Diesel Oxidation catalyst, Diesel Particulate Filter, Selective Catalytic Reduction

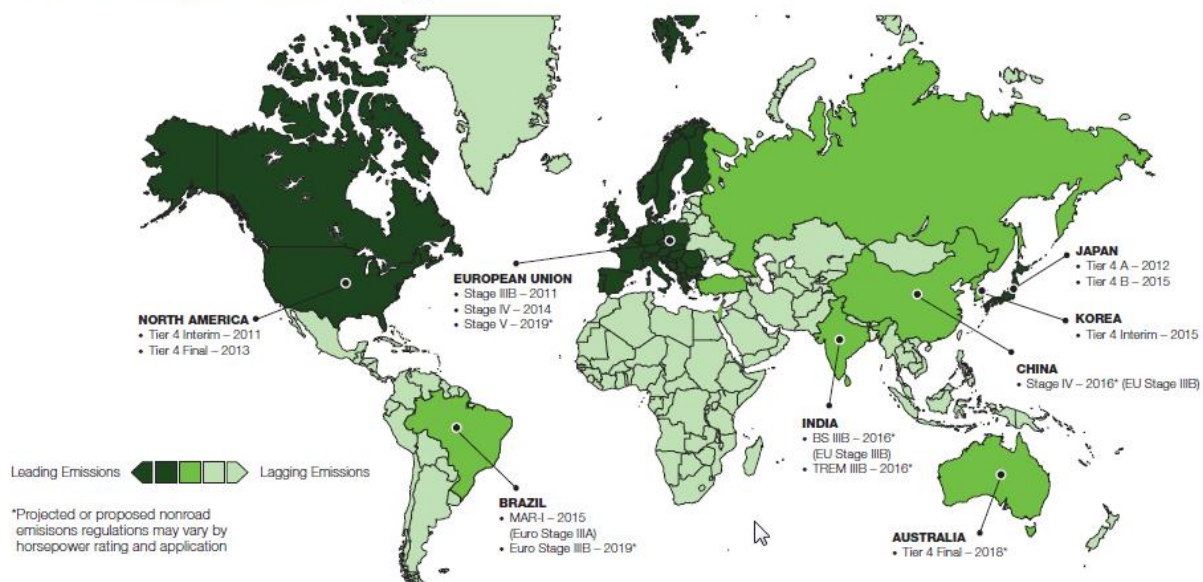
## OBSAH

1	VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY.....	6
2	SHRNUTÍ SOUČ. STAVU EMISNÍCH LIMITŮ PRO VZNĚT. MOTORY	6
2.1	ZKUŠEBNÍ CYKLY PRO MIMOSILNIČNÍ MOTORY.....	6
3	DEFINOVÁNÍ KONCEPCÍ ŘEŠENÍ EMISÍ .....	7
3.1	ZÁKLADNÍ PARAMETRY VÝCHOZÍHO MOTORU A STAV EMISÍ..	7
4	VYMEZENÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE .....	8
5	ASISTOVANÁ REGENERACE DPF FILTRU.....	8
5.1	NÁVRH SYSTÉMU SLEDOVÁNÍ STAVU ZANESENÍ DPF FILTRU...	8
5.2	REGENERACE DPF FILTRU .....	9
5.3	VÝPOČET MN. VSTŘIK. NAFTY PRO REG. DPF FILTRU .....	9
5.4	OVĚŘENÍ REGENERACÍ NA MOTOROVÉ BRZDĚ .....	10
6	SCR KATALYZÁTOR.....	11
6.1	NÁVRH SYSTÉMU SCR.....	11
6.2	DÁVKOVACÍ SYSTÉM MOČOVINY .....	11
6.3	STRATEGIE VSTŘIKOVÁNÍ MOČOVINY.....	12
6.3.1	VÝPOČET MNOŽSTVÍ VSTŘIKOVANÉ MOČOVINY .....	13
6.3.2	OMEZUJÍCÍ PARAMETRY VSTŘIK. MNOŽSTVÍ MOČOVINY ....	14
7	ZÁKLADNÍ MAPOVÁNÍ SUROVÝCH EMISÍ MOTORU .....	17
7.1	HODNOTY PLYNNÝCH EMISÍ MOTORU .....	17
7.2	STRATEGIE EGR NA MĚŘENÉM MOTORU .....	17
7.3	PLYNNÉ EMISE V ZATĚŽOVACÍ CHAR. PŘI 2300 MIN <sup>-1</sup> .....	18
7.4	PLYNNÉ EMISE V ZATĚŽOVACÍ CHAR. PŘI 2200 MIN <sup>-1</sup> .....	20
7.5	PLYNNÉ EMISE V ZATĚŽOVACÍ CHAR. PŘI 1800 MIN <sup>-1</sup> .....	21
7.6	PLYNNÉ EMISE V ZATĚŽOVACÍ CHAR. PŘI 1480 MIN <sup>-1</sup> .....	22
8	MĚŘENÍ EMISÍ MOTORU S AFTERTREATMENTEM .....	23
8.1	MĚŘENÍ V STATICKÉM 8-BODOVÉM EMISNÍM TESTU (NRSC) ...	23
8.2	MĚŘENÍ V TRANZIENTNÍM TESTU (NRTC).....	25
9	ZÁVĚR.....	27
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....	28
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	29
	PŘEDSTAVENÍ AUTORA .....	30
	ABSTRACT .....	31

# ÚVOD

Problematika snižování škodlivých emisí ve výfukových plynech je v současné době vývoje spalovacích motorů jedna z nejvíce diskutovaných otázek. Na snižování emisí spalovacích motorů jsou kladeny čím dál vyšší požadavky. Nejvíce rozvinuté země se snaží snižování emisí řídit pomocí emisních limitů, které musí nově vyráběné motory plnit, jinak jim nebude poskytnuta homologace, tudíž nemohou být sériově vyráběny. Po počátečních emisních limitech, které zvláště u vznětových motorů bylo možno splnit pomocí optimalizace spalování, se nyní přechází k velmi přísným emisním limitům, jejichž splnění již vyžaduje dodatečnou úpravu výfukových plynů. Právě těmito novými progresivními metodami se zabývá tato práce. Práce se soustřeďuje na motory, které se využívají v mimosilničním provozu, speciálně v traktorech.

## Global Emissions Regulations.



Obr. 1 Emisní limity pro mimosilniční aplikace z celosvětového pohledu [1]

# 1 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Vznětové spalovací motory soudobých stavebních strojů a traktorů jsou z hlediska propracovanosti a vývoje na velmi vysoké úrovni, přesto emisní limity předepsané legislativou je pro mnohé výrobce velmi náročné splnit. Z hlediska škodlivosti na zdraví se jako nejvíce škodlivé ukazují u vznětových motorů emise oxidů dusíků, pevných částic, emise oxidu uhelnatého a uhlovodíky [2].

Z hlediska problematiky snižování emisí u vznětového motoru se jako nejhorší ukazuje snížení emisí NO<sub>x</sub> a PM. Tyto emise jsou komplementárně spojeny a na základě provedených experimentů [1] jdou vždy proti sobě.

## 2 SHRUTÍ SOUČASNÉHO STAVU EMISNÍCH LIMITŮ PRO MIMOSILNIČNÍ VZNĚTOVÉ MOTORY

Vývoj emisních limitů pro mimosilniční aplikace dle evropských, amerických a japonských standardů znázorňuje následující Obr. 2. Je zde názorně vidět snížení emisí NO<sub>x</sub> a PM od roku 1996, kdy náběhem emisního stupně STAGE IV došlo k 90% snížení [1].

Power		U.S. EPA Emissions								
[kW]	[HP]	Tier 2		Tier 3		Tier 4i		Tier 4		
		Year								
		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
0-18	0-24	(7,5)/6,6/0,40								
19-37	25-48	(7,5)/5,5/0,30			(4,7)/5,0/0,03					
37-55	49-74	(7,5)/5,5/0,30			(4,7)/5,0/0,03					
56-129	75-173	(4,0)/5,0/0,30		3,4/0,19/5,0/0,02			0,4/0,19/5,0/0,02			
130-560	174-751	(4,0)/5,0/0,20		2,0/0,19/3,5/0,10			0,4/0,19/3,5/0,02			
>560	>751	(6,4)/3,5/0,20		3,5/0,40/3,5/0,10			3,5/0,19/3,5/0,04			

NO<sub>x</sub>/HC/CO/PM  
(NO<sub>x</sub>+HC)/CO/PM

Power		Europe Emissions									
[kW]	[HP]	Stage IIIA		Stage IIIB		Stage IV					
		Year									
		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
19-36	24-48	(7,5)/5,5/0,60									
37-55	49-74	(4,7)/5,0/0,40			(4,7)/5,0/0,025						
56-129	75-173	(4,0)/5,0/0,30		3,3/0,19/5,0/0,025			0,4/0,19/5,0/0,025				
130-560	174-751	(4,0)/3,5/0,20		2,0/0,19/3,4/0,025			0,4/0,19/3,5/0,025				
>560	>751							3,5/0,19/3,5/0,045			

NO<sub>x</sub>/HC/CO/PM  
(NO<sub>x</sub>+HC)/CO/PM

Obr. 2 Vývoj emisních limitů v období roků 2010 až 2018 [1]

### 2.1 ZKUŠEBNÍ CYKLY PRO MIMOSILNIČNÍ MOTORY

Dle směrnice 97/68/ES pro mimosilniční motory jsou stanoveny dva měřicí cykly:

- cyklus NRSC (stacionární zkouška nesilničních pojízdných strojů) se použije pro etapy I, II a III A a u motorů s konstantními otáčkami též pro etapy III B a IV v případě plyných znečišťujících látek a

- b. cyklus NRTC (dynamická zkouška nesilničních pojízdných strojů) se použije k měření emise částic pro etapy III B a IV u všech motorů s výjimkou motorů s konstantními otáčkami. Podle volby výrobce může být tato zkouška použita též pro etapu III A a pro plynné znečišťující látky v etapách III B a IV.

### 3 DEFINOVÁNÍ KONCEPCÍ ŘEŠENÍ EMISÍ

#### 3.1 ZÁKLADNÍ PARAMETRY VÝCHOZÍHO MOTORU A STAV EMISÍ

Na základě zkušeností při řešení emisního motoru v emisním stupni STAGE 3B byl pro základní výzkum použit 16-ventilový čtyřválcový motor Zetor Z1606. Tento motor vykazuje následující parametry:

Počet válců:	4
Zdvihový objem:	4 156 cm <sup>3</sup>
Maximální výkon:	95 kW při otáčkách 2200 min <sup>-1</sup>
Maximální točivý moment:	580 Nm při otáčkách 1480 min <sup>-1</sup>
Palivový systém:	řadové mechanické vstřikovací čerpadlo s mechanickým regulátorem
Plnicí systém:	přepřehování turbodmychadlem s mezichlazením stlačeného vzduchu typu vzduch - vzduch
Emisní systém motoru:	vnější chlazená recirkulace výfukových plynů (EGR), dodatečná úprava výfukových plynů (aftertreatment): DOC+DPF s pasivní regenerací

Emisní parametry motoru bez dodatečné úpravy výfukových plynů byly zmapovány v testu NRSC na zkušebně TÜV SÜD Czech. Získané vstupní hodnoty jsou uvedeny v Tab.1.

Tab. 1 Surové emise motoru Z1606

Varianta motoru	Emise NO <sub>x</sub> surové [g/kWh]	Emise částic surové PM [g/kWh]
Z1606 s EGR, 12° předvstřík	3,83	0,23
Z1606 bez EGR, 12° předvstřík	5,92	0,11
Z1606 s EGR, 14° předvstřík	3,70	0,16
Z1606 bez EGR, 14° předvstřík	5,85	0,07
Z1606 s EGR, 14° předvstřík, vstřík. čerpadlo s vyšším	4,19	0,16
Z1606 bez EGR, 14° předvstřík, vstřík. čerpadlo s	7,41	0,09
<b>POŽADOVANÝ LIMIT EMISÍ</b>	<b>0,4</b>	<b>0,025</b>

Provedené laboratorní testy dokladují, že splnění emisních limitů Stage IV nelze realizovat bez použití SCR technologie, tedy uplatnění principů selektivní katalytické redukce. Pro tak významné snížení množství oxidů dusíku, které je dáno normou Stage IV, již nelze použít systém recirkulace výfukových plynů. Do výfukové soustavy je nutné zařadit SCR katalyzátor spolu se vstřikováním syntetické močoviny (AdBlue). Vzhledem k faktu, že limity emisí pevných částic jsou pro Stage IV stejně přísné jako u Stage 3B, je jejich množství ve výfukových plynech také nutné omezit. Nejjednodušší cestou je filtr pevných částic tak jak bylo použito při řešení emisního stupně Stage 3B.

## 4 VYMEZENÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE

Hlavní cíle disertační práce lze popsat následujícími body:

- Navržení systému úpravy výfukových plynů s cílem dosažení emisních limitů daných 97/68/EC ve stupni STAGE 4,
- experimentální ověření navržených systémů,
- vyvození důsledků a zobecnění na základě experimentů a
- optimalizace systému na základě experimentů.

Pro úspěšné splnění výše zmíněných bodů se předpokládá splnění následujících dílčích úkolů:

- Navržení základních rozměrů systému dodatečné úpravy výfukových plynů zahrnující detailní porozumění problematice, zvolení vhodné koncepce, zpracování konstrukční dokumentace na stavbu funkčního vzorku a poté i prototypu.
- Stavba funkčního vzorku zahrnující vytipování vhodného motoru s emisními parametry pro dosažení emisního stupně STAGE 4, zástavbu aftertreatmentu v motorovém boxu a osazení funkčního vzorku potřebnými čidly a snímači. Experimentální zkoušky na motorové brzdě vhodně vybavené zkušebny, hlavně co se týká analyzátorů výfukových plynů, zpracování metodiky experimentů pro dosažení požadovaných cílů, vyhodnocení získaných výsledků s cílem pro zobecnění a navržení nových postupů pro dosažení požadovaného limitu emisí.

## 5 ASISTOVANÁ REGENERACE DPF FILTRU

### 5.1 NÁVRH SYSTÉMU SLEDOVÁNÍ STAVU ZANESENÍ DPF FILTRU

Z důvodů zabezpečení průchodnosti DPF filtru je nutné, aby řídicí jednotka EAT systému stále hlídala stav zanesení DPF filtru. Jako jedno z možných řešení je zavedení tzv. indexu zanesení sazemí, který je funkcí:

$$SLI = f \left[ \left( \frac{G_{exh}}{F_{size}} \right), P \right] \quad (1)$$

a jednotlivé členy rovnice lze stanovit [5]:

$$G_{exh} = G_{fuel} + G_{air} \quad (2)$$

$$G_{fuel} = \frac{3 \times V_p \times n \times i}{100000} \quad (3)$$

kde  $V_p$  [mg/cykl] je dávka vstřikovaného paliva do válce,  $n$  [ $\text{min}^{-1}$ ] jsou otáčky motoru a  $i$  je počet válců motoru.

Velikost DPF filtru byla zvolena na základě podobných motorů [6]. A dále pak dle podkladů firem dodávající základní substrát např. Nett Technologies Inc. [7].

Řídicí jednotka aftertreatmentu vypočítává množství zanesení sazí SLI (soot load index) ke sledování stavu zanesení DPF filtru. SLI je výsledek výpočtu množství výfukových plynů a protitlaku aftertreatmentu. Velikost protitlaku aftertreatmentu je přímo úměrná zanesení DPF filtru. Další proměnná, která do velikosti protitlaku vstupuje, je teplota. Z provedených měření se ukazuje, že se vzrůstající teplotou výfukových plynů roste i protitlak aftertreatmentu, aniž by došlo ke zvýšenému zanesení DPF filtru. Vztah množství výfukových plynů, protitlaku a teploty je popsán vyhledávací tabulkou v řídicí jednotce aftertreatmentu. Tato tabulka byla doplněna na základě měření na brzdě motoru v zatěžovacích charakteristikách motoru při různých stupních zanesení DPF filtru.

## 5.2 REGENERACE DPF FILTRU

Asistovaná regenerace DPF filtru je spuštěna tak, jak již bylo uvedeno na základě SLI indexu nebo na základě časového intervalu. Doba regenerace byla na základě zkoušek na 10 minut. Asistovaná regenerace zahrnuje dávkovací čerpadlo v kombinaci s naftovým výparníkem (vaporizér) umístěným před oxidačním katalyzátorem (DOC). Když se motorová nafta dostane do kontaktu s DOC katalyzátorem, na tomto katalyzátoru dochází k exotermní reakci, která zvyšuje teplotu v DPF filtru, a to tak, že oxiduje zachycené saze.

## 5.3 VÝPOČET MNOŽSTVÍ VSTŘIKOVANÉ NAFTY POTŘEBNÉ PRO REGENERACE DPF FILTRU

Množství vstřikované nafty vychází z prvního zákona termomechaniky.

$$Q = \Delta U + A_v \quad (4)$$

$$dQ = m \cdot c_p \cdot dT - V \cdot dp \quad (5)$$

Na základě prvního zákona termomechaniky lze pro izobarický děj odvodit rovnici pro vstřikované množství nafty. Potřebnou energii pro zvýšení teploty výfukových plynů lze vypočítat:

$$IDQ_{Basic} = \frac{(G_{in} \cdot R_{VolMassEx} \cdot Heat_{CapEx} \cdot (T_{Des} - T_x))}{Heat_D} \quad , \quad (6)$$

$$G_{in} = \frac{G_{air}}{3,6} \quad , \quad (7)$$

Skutečná hodnota vstřikovaného množství bude korigována na základě korekčních faktorů pro jednotlivé teploty systému.

$$IDQ = IDQ_{Basic} \cdot (ID_{CorT1} \cdot ID_{CorT2} \cdot ID_{CorT3} \cdot ID_{CorT4}) \quad (8)$$

Korekční hodnoty byly poskytnuty dodavatelem aftertreatmentu firmou DEC.

TempT1		TempT2		TempT3		TempT4	
Temp °C	Correction	Temp °C	Correction	Temp °C	Correction	Temp °C	Correction
0	0	170	0	170	0,2	10	1
200	0	180	0,3	180	0,5	20	1
230	0	200	0,5	200	0,8	210	1
240	1	210	0,8	210	0,8	260	1
250	1	220	0,9	290	0,8	280	1
255	1	230	1	300	0,9	510	1
265	1	320	1	350	0,9	515	1
270	1	350	1	380	1	520	1
275	1	400	1,1	450	1,1	525	1
280	1	500	1,1	500	1,2	530	0,9
290	1	535	1,1	535	1,1	535	0,9
300	1	540	1,1	540	1	540	0,6
310	1	550	1,1	545	0,9	545	0,6
320	1	555	1,1	550	0,8	550	0,3
330	1	560	1	550	0,8	555	0
340	1	570	1	570	0,6	560	0
350	1	575	0,9	580	0,3	565	0
360	1	580	0,8	590	0,4	570	0
370	1	590	0,6	600	0	575	0
500	1	600	0,5	610	0	580	0

Obr. 3 Korekční hodnoty  $ID_{CorT1}$ ,  $ID_{CorT2}$ ,  $ID_{CorT3}$ ,  $ID_{CorT4}$  [5]

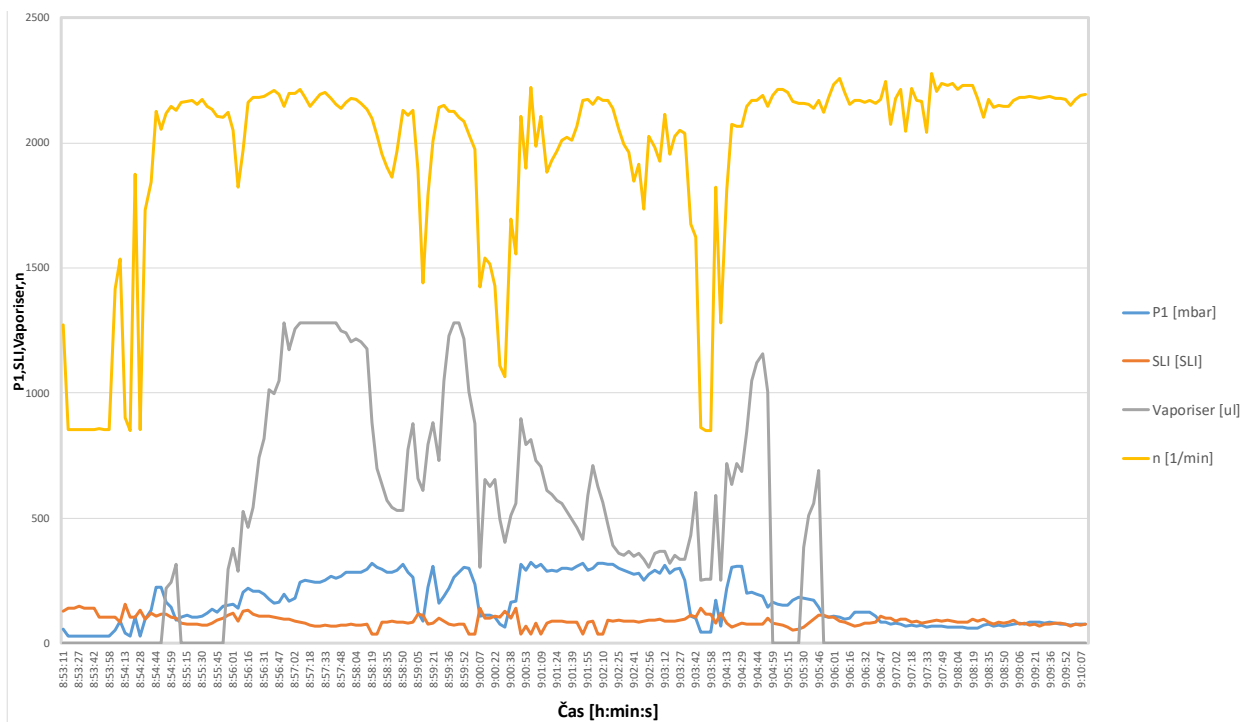
## 5.4 OVĚŘENÍ REGENERACÍ NA MOTOROVÉ BRZDĚ

Měření regenerací a ověření regeneračních schopností systému bylo nejdříve ověřeno na motorové brzdě. Dále byl sledován vliv protitlaku v důsledku zanášení DPF filtru na parametry motoru.

Tab. 2 Vliv zanesení DPF filtru na parametry motoru

Var.	Odpor <sub>PF</sub> [kPa]	Pe [kW]	m <sub>pe</sub> [g/kWh]	V <sub>p</sub> [mg]	t <sub>2T</sub> [°C]	p <sub>0T</sub> [mmHg]	p <sub>2K</sub> [mmHg]	G <sub>in</sub> [g/s]	Poznámka
A	9,56	92,7	251,6	88,2	472	2140	1382	169	PF
B	27,00	88,8	258,6	86,9	488	2271	1364	164	Nutnost regenerace
C	41,23	88,1	261,4	87,0	-	2393	1337	164	Nepříjemný stav PF

Funkční ověření na traktoru již bylo prováděno za provozu traktoru. Jak je ze záznamů pořízených z CAN informací přímo na traktoru vidět. Vstřikováním nafty před DOC dochází ke značnému zvýšení teploty.



Obr. 4 Průběh tlaku, SLI, množství vstříkané nafty při regeneraci DPF filtru při polních testech traktoru

## 6 SCR KATALYZÁTOR

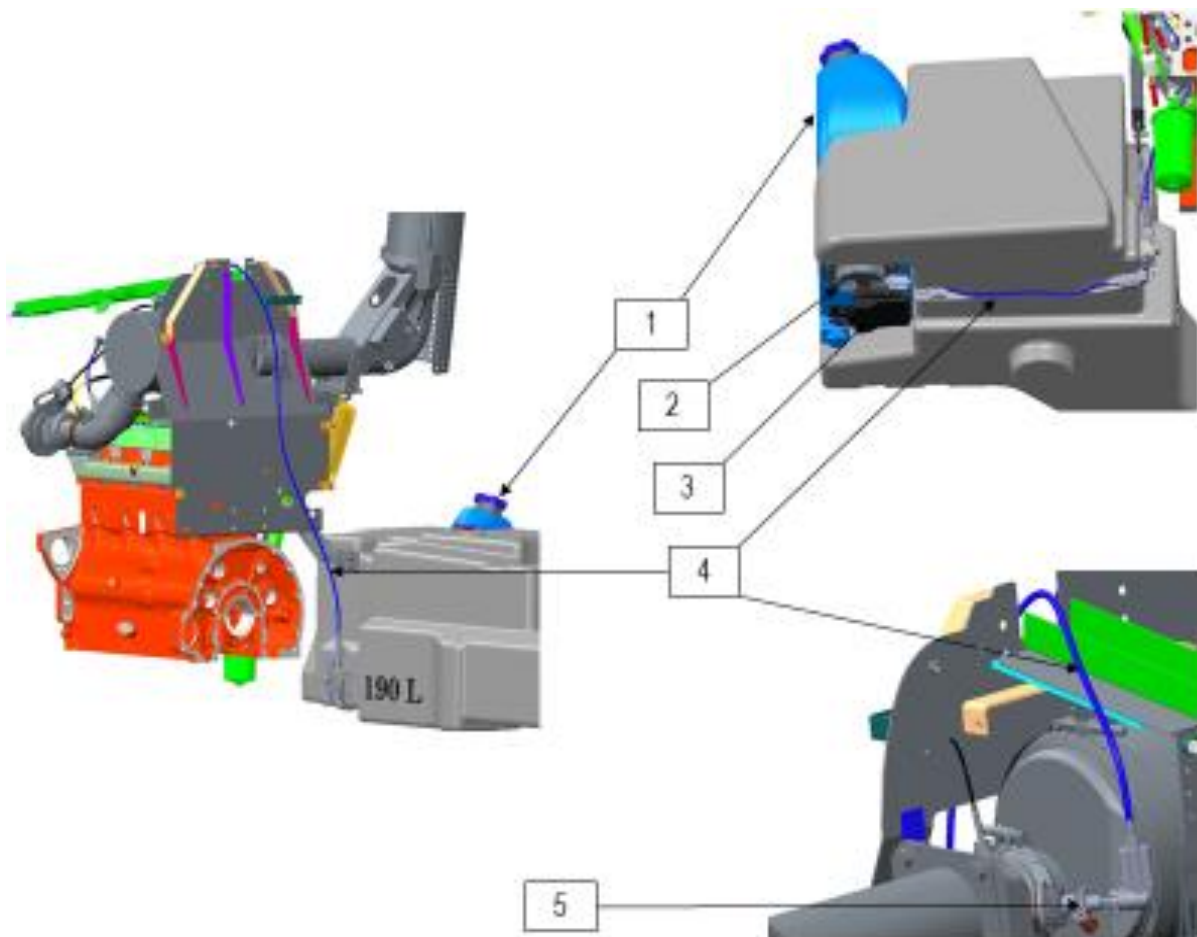
### 6.1 NÁVRH SYSTÉMU SCR

Selektivní katalytická redukce využívá směs amoniaku ( $NH_3$ ) a demineralizované vody ke snížení oxidů dusíku ( $NO_x$ ) za vzniku dusíku ( $N_2$ ), vodní páry ( $H_2O$ ) a oxidu uhličitého ( $CO_2$ ). Katalyzátor se skládá ze dvou matic s vanadiovým povlakem. Poslední matrice je opatřena platinou pro oxidaci amoniaku (AMOX), který nezreagoval na předchozích dvou maticích a unikal by do ovzduší. Systém SCR je velmi účinný, dosahuje až 95% účinnost při teplotách výfukových plynů  $220^{\circ}C$  až  $550^{\circ}C$  [3]. Při konstrukci byly respektovány nejen předpoklady pro správnou funkci systému, ale i zástavbové možnosti použití do traktoru.

### 6.2 DÁVKOVACÍ SYSTÉM MOČOVINY

Dávkovací systém pro močovinu se skládá z nádrže pro močovinu a potrubí, dávkovacího modulu, dávkovací jednotky, směšovacího zařízení a řídicí jednotky. Řídicí jednotka navíc monitoruje celý systém a provádí diagnostiku. Zároveň chrání SCR před možným poškozením.

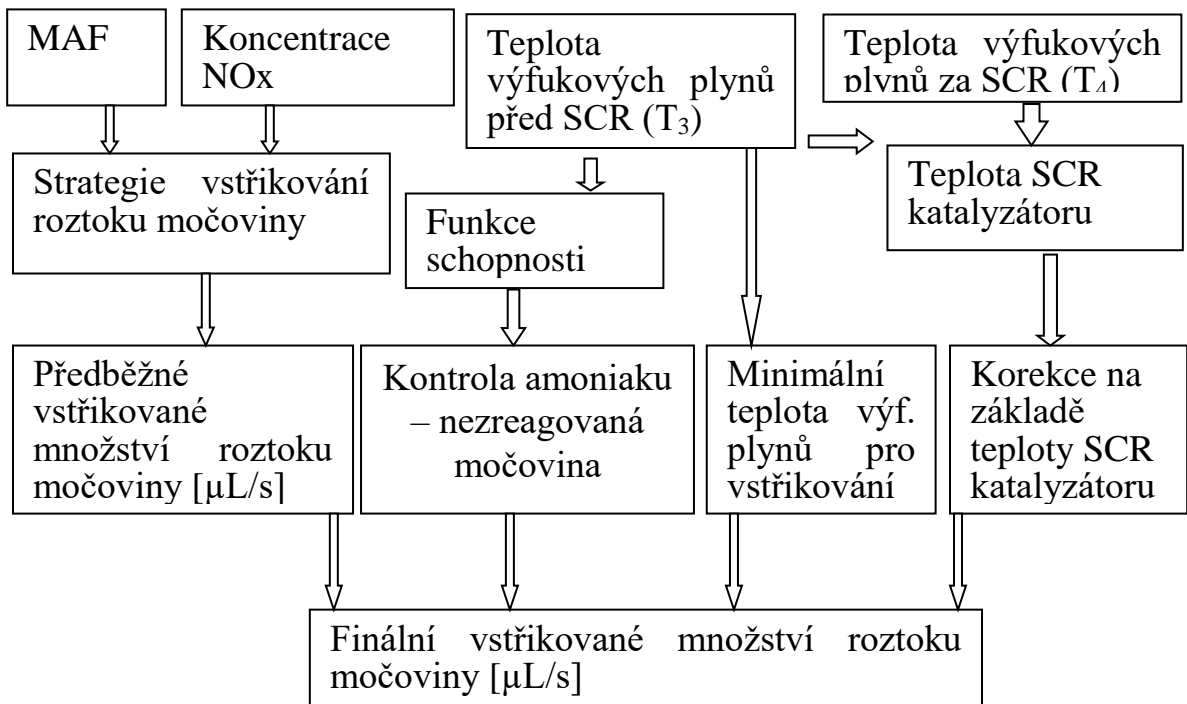
Fyzická dodávka roztoku močoviny do SCR se provádí dávkovacím systémem složeným z komponent viz. Obr. 5.



Obr. 5 Návrh dávkovacího modulu SCR systému (1– nádrž na roztok močoviny, 2– řídicí jednotka, 3– řadič řídicí jednotky, 4– vyhřívané hadice na roztok močoviny, 5–vstřikovač močoviny)

### 6.3 STRATEGIE VSTŘIKOVÁNÍ MOČOVINY

Primárně se dávkování řídí na základě hmotnostního průtoku vzduchu motoru MAF a dále pak naměřené koncentrace emisí na NO<sub>x</sub> senzoru umístěném za turbodmychadlem motoru. Další dodatečné faktory ovlivňující dávkování jsou teplota výfukových plynů jednoznačně určující účinnost katalytické reakce a dále pak kvalita močoviny. NO<sub>x</sub> senzor umístěný na konci SRC katalyzátoru se nevyužívá k ovládní dávkování roztoku močoviny, používá se pouze pro diagnostické sledování a následně pro případné vyvolání režimů omezení dle legislativy. Schéma řízení je znázorněno na Obr. 6 [9].



Obr. 6 Schéma strategie vstřikování močoviny [9]

### 6.3.1 VÝPOČET MNOŽSTVÍ VSTŘIKOVANÉ MOČOVINY

Množství vstřikované močoviny je závislé na těchto snímaných parametrech motoru:

- Množství nasávaného vzduchu (MAF).
- Množství a koncentrace NO<sub>x</sub> ve výfukových plynech motoru.
- Koncentrace a kvalita vstřikované močoviny.
- Teplota výfukových plynů na vstupu do SCR katalyzátoru.
- Teplota výfukových plynů za SCR katalyzátorem.

A dále pak

- Hustotu močoviny.
- Molární množství CO<sub>2</sub>.
- Hustota nasávaného vzduchu.

Základní množství vstřikované močoviny IUQ<sub>BASIC</sub> je počítáno pro virtuální 100% účinnost selektivní katalytické redukce. Výpočet se provádí následovně [8]:

$$NH_3[ppm] = \frac{\frac{DEF [\frac{g}{h}] \times \rho_{moc} \times 2}{M_{H_4N_2CO}}}{\frac{m_{exh} \times 1000}{M_{exh}}} \times 10^6, \quad (9)$$

Ze základního vztahu (14) lze odvodit základní množství vstřikované močoviny:

$$NO_x[ppm] = \frac{IUQ_{BASIC} \left[\frac{g}{h}\right] \times \rho_{moc} \times 2}{\frac{M_{H_4N_2CO}}{G_{exh} \times 1000} \times M_{exh}} \times 10^6, \quad (10)$$

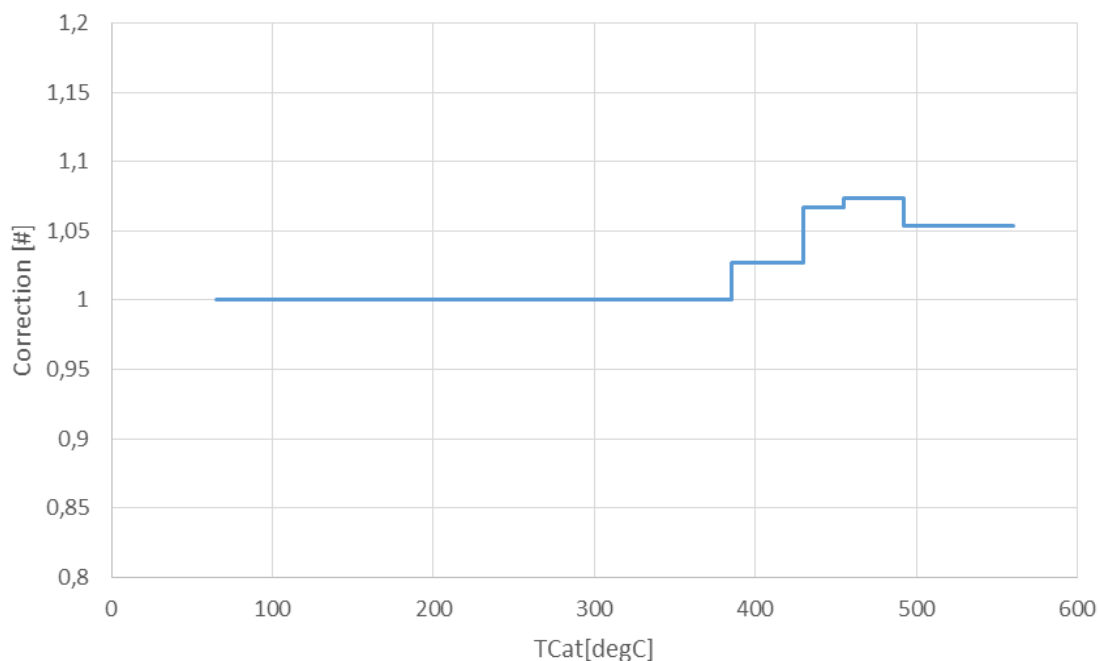
Po úpravě rovnice (15) dostáváme:

$$IUQ_{BASIC} [\mu L/s] = \frac{NO_x[ppm] \times M_{H_4N_2CO} \left[\frac{g}{mol}\right] \times G_{exh} \left[\frac{kg}{h}\right]}{7200 \times \rho_{moc} \times M_{exh} \left[\frac{g}{mol}\right] \times konc_{urea}[-]}, \quad (11)$$

### 6.3.2 OMEZUJÍCÍ PARAMETRY VSTŘIKOVANÉHO MNOŽSTVÍ MOČOVINY

Aspekty ovlivňující vstřikované množství močoviny:

- Z důvodů možnosti krystalizace močoviny je nutná korekce vstřikovaného množství v závislosti na nízké teplotě výfukových plynů
- Pro omezení vzniku  $NH_3$  při vysokých teplotách v SCR katalyzátoru je vstřikované množství močoviny mírně zvýšeno
- Dávkování je upraveno podle změn teploty SCR. Při rychle se měnící teplotě katalyzátoru SCR se dávkování zvyšuje nebo snižuje z důvodů kompenzace ukládání amoniaku v ACS.



Obr. 7 Alpha korekční tabulka [9]

Finální množství vstřikované močoviny s aplikací korekčních faktorů je následující [9]:

$$IUQ = ANR \cdot IUQ_{Basic} \cdot (Alpha \cdot CorrSlope \cdot CorrT2 \cdot CorrT3 \cdot CorrT4), \quad (12)$$

kde  $ANR = 1.15$  – korekční faktor dle použitého typu povrchové úpravy (coatingu) SCR katalyzátoru [9].

Alfa je výstup vyhledávací tabulky většinou založený na  $T_{Cat}$  (teplota katalyzátoru SCR). Teplota SCR katalyzátoru se vypočte jako vážený průměr mezi T3 a T4 takto [9]:

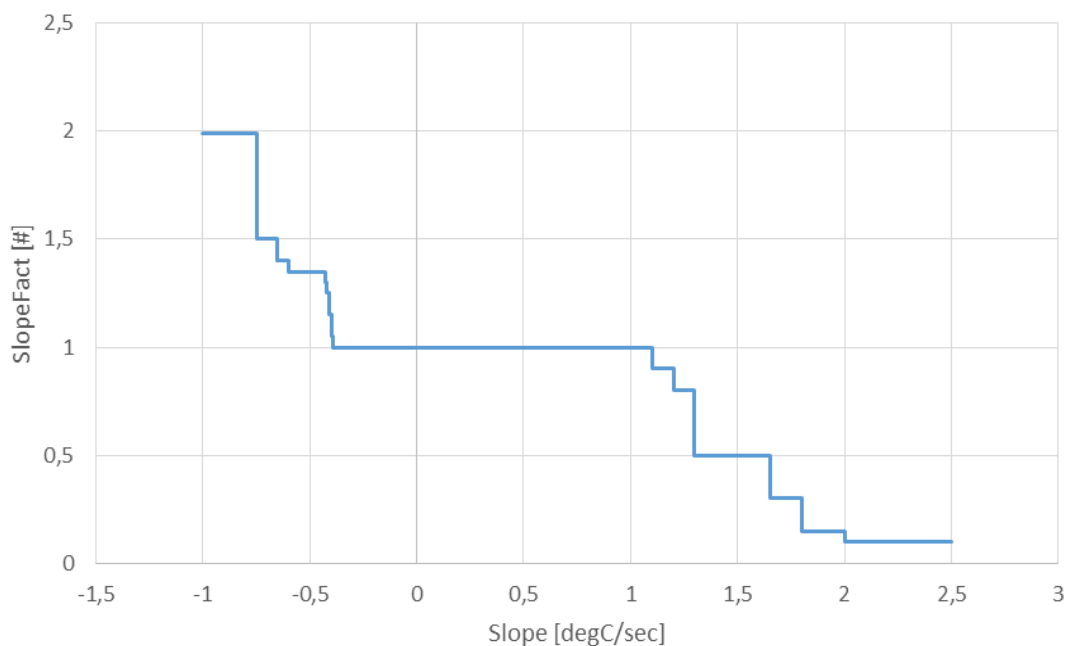
$$T_{Cat} = T3 \cdot 0,75 + T4 \cdot 0,25 \quad (13)$$

Každou sekundu se vypočítá teplota katalyzátoru a příslušná korekční hodnota se aplikuje na vzorec IUQ.

CorrSlope je počítán jako [9]:

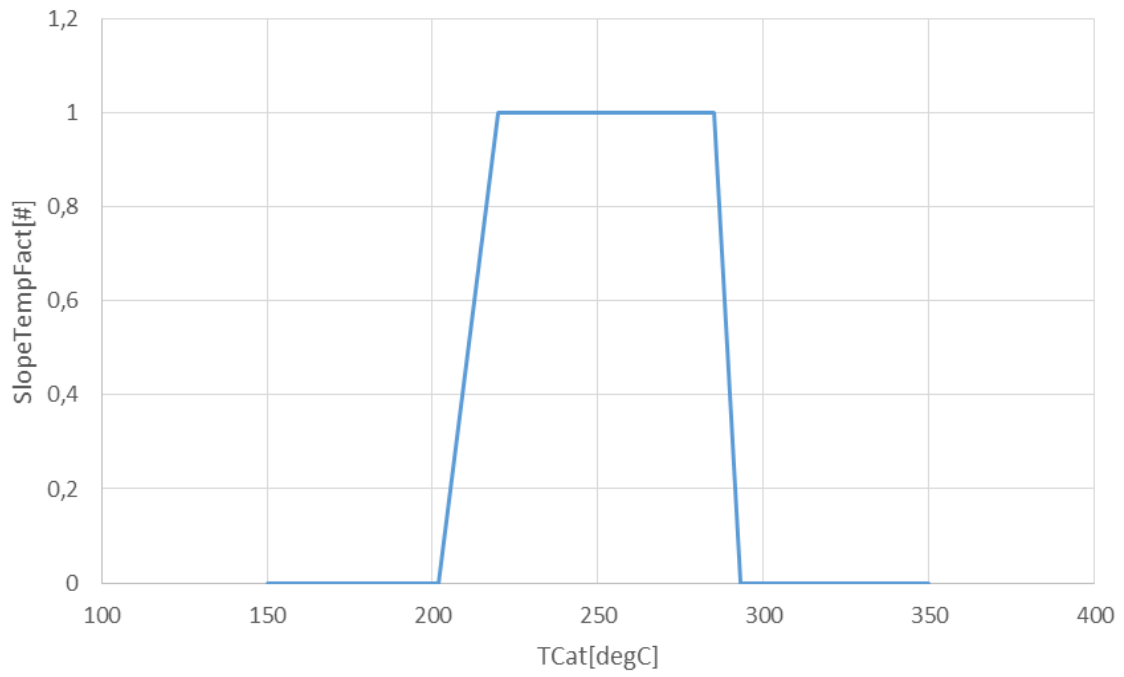
$$CorrSlope = 100 + (SlopeFact - 100) \cdot SlopeTempFact \quad (14)$$

SlopeFact je také získán z vyhledávacího grafu založeného na změně vstupní teploty SCR katalyzátoru.



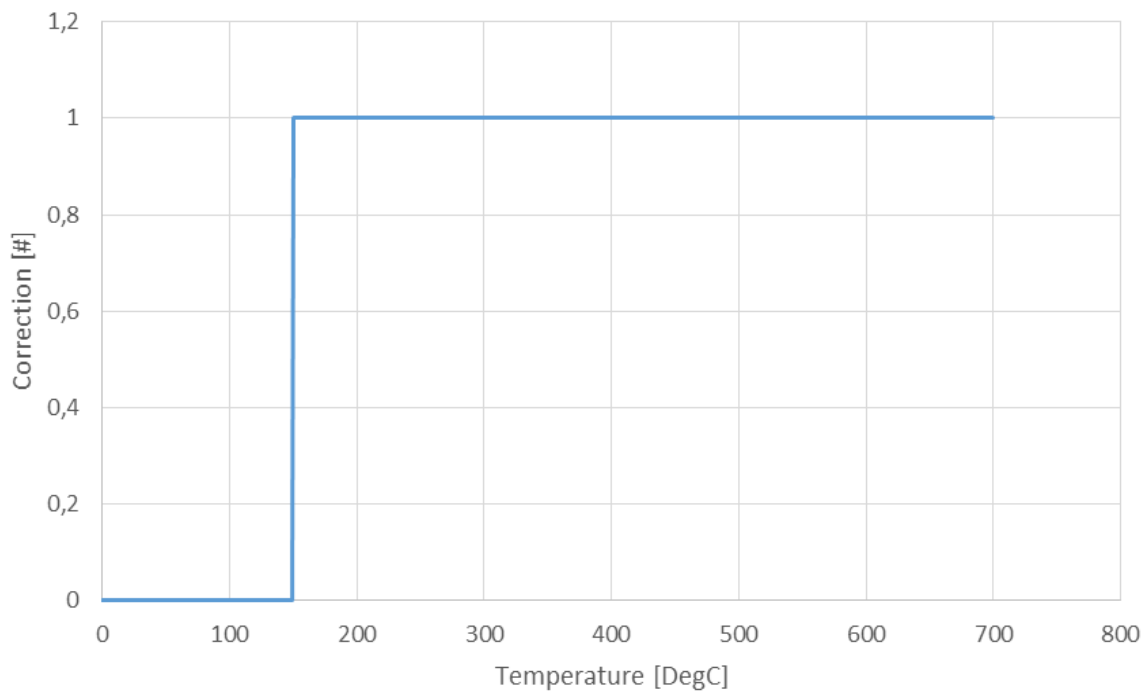
Obr. 8 CorrSlope korekční tabulka [8]

SlopeTempFact je také vybrán z tabulky a definuje vliv rychlosti změny T3 na reakci SCR na základě vlastní teploty SCR.

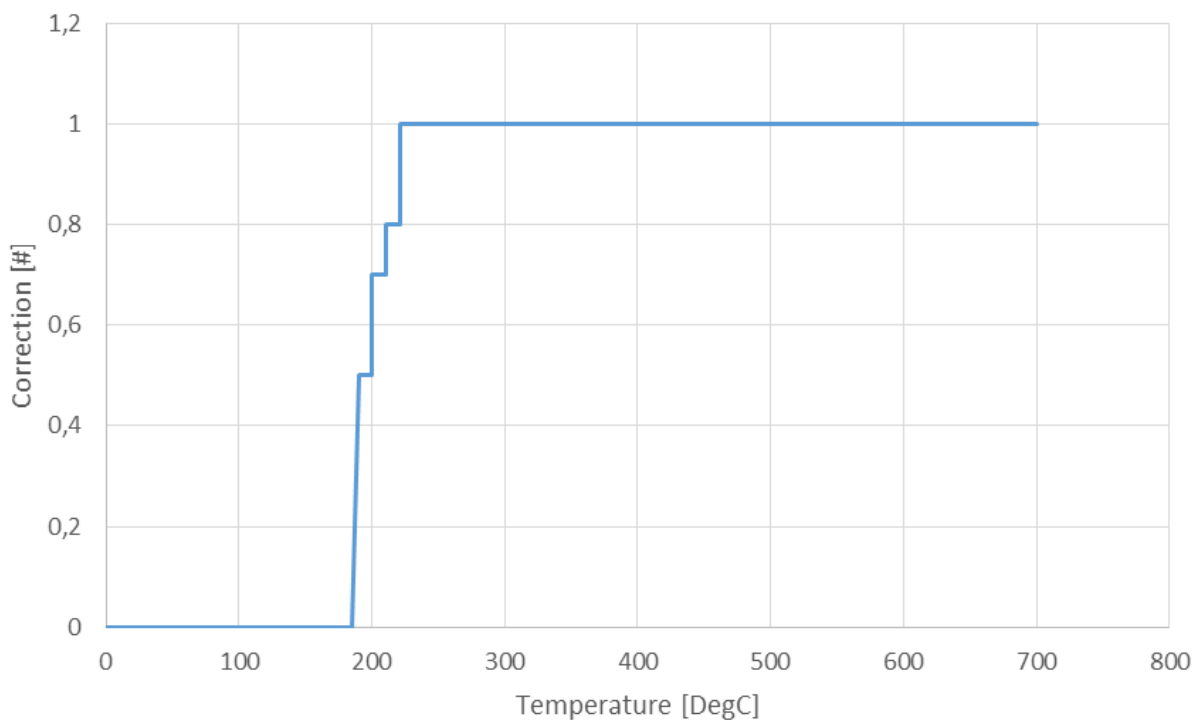


Obr. 9 Faktor pro korekci SlopeTempFact [9]

CorrT2 a CorrT3 jsou korekční faktory na základě teplot T2 a T3.



Obr. 10 CorrT2 korekční tabulka [9]



Obr. 11 CorrT3 korekční tabulka [9]

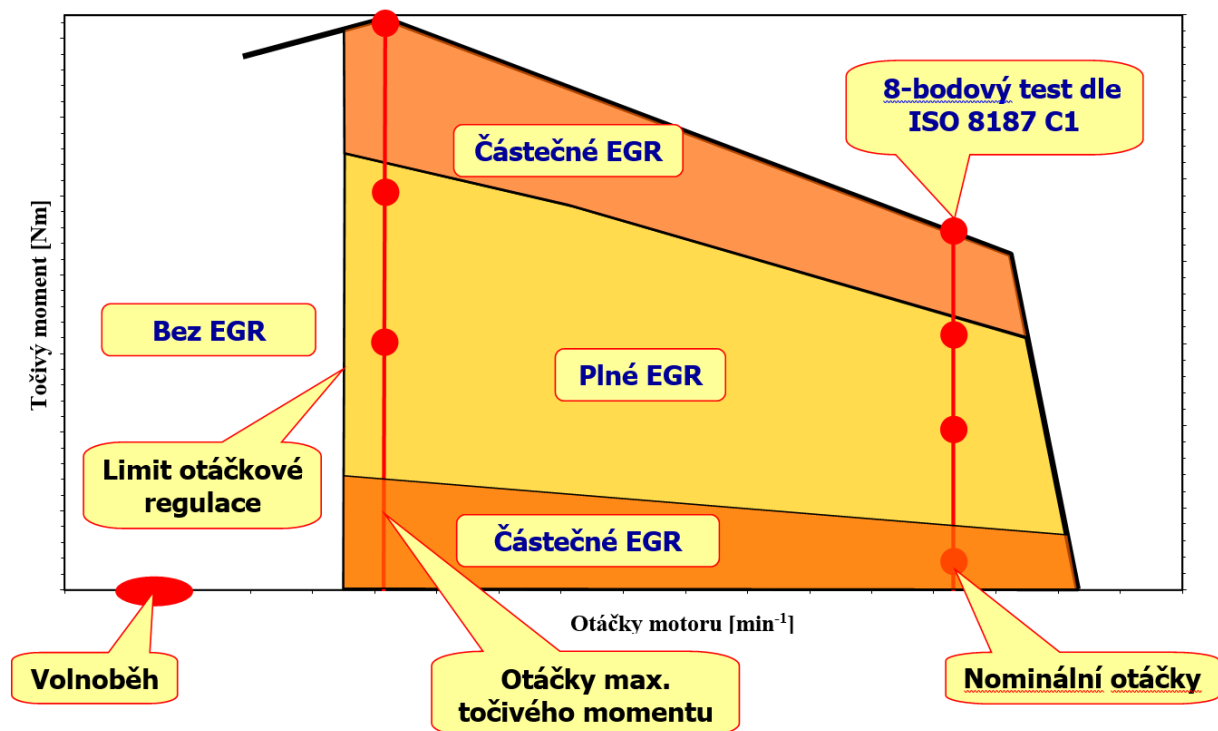
## 7 ZÁKLADNÍ MAPOVÁNÍ SUROVÝCH EMISÍ MOTORU

### 7.1 HODNOTY PLYNNÝCH EMISÍ MOTORU

Pro základní zmapování plynných emisí motoru byl Z1605 změřen na brzdovém stanovišti a byly měřeny plynné emise v zatěžovacích charakteristikách při otáčkách 2300, 2200, 1800, 1480, 1240, 1000 [ $\text{min}^{-1}$ ]. Plynné emise byly změřeny ve dvou konfiguracích, a to v provedení plnicím emisní předpis STAGE 3B, to znamená s EGR systémem, a dále pak bez použití EGR. Použití systému EGR je doporučováno výrobcí motorů z USA pro splnění emisních norem platných pro USA [10] [11] [13].

### 7.2 STRATEGIE EGR NA MĚŘENÉM MOTORU

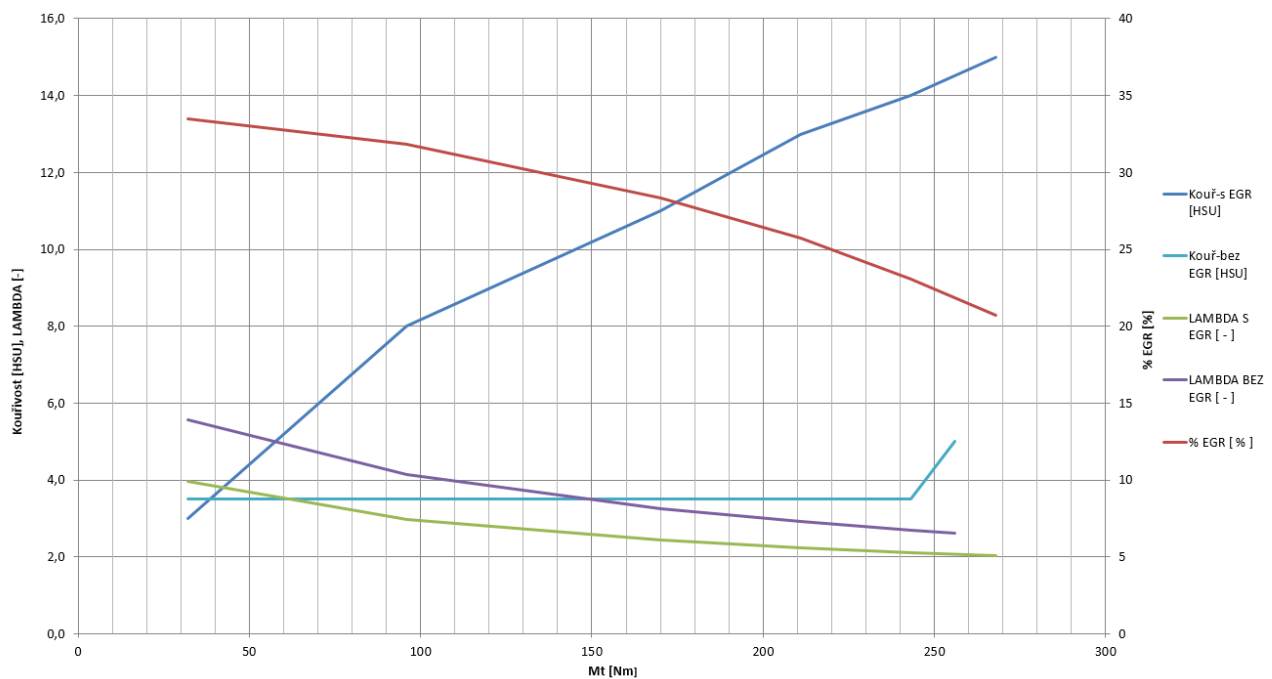
Jak bylo napsáno, motor byl měřen se strategií EGR tak, jak byl homologován pro emisní předpis STAGE 3B. Tato strategie byla zvolena tak, aby akceptovala 8-bodový měřicí cyklus. Obr. 12 zobrazuje strategii EGR z homologačního protokolu motoru Z1606.



Obr. 12 Základní strategie otevírání EGR ventilu vzhledem k NRSC testu

### 7.3 PLYNNÉ EMISE V ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTICE PŘI 2300 MIN<sup>-1</sup>

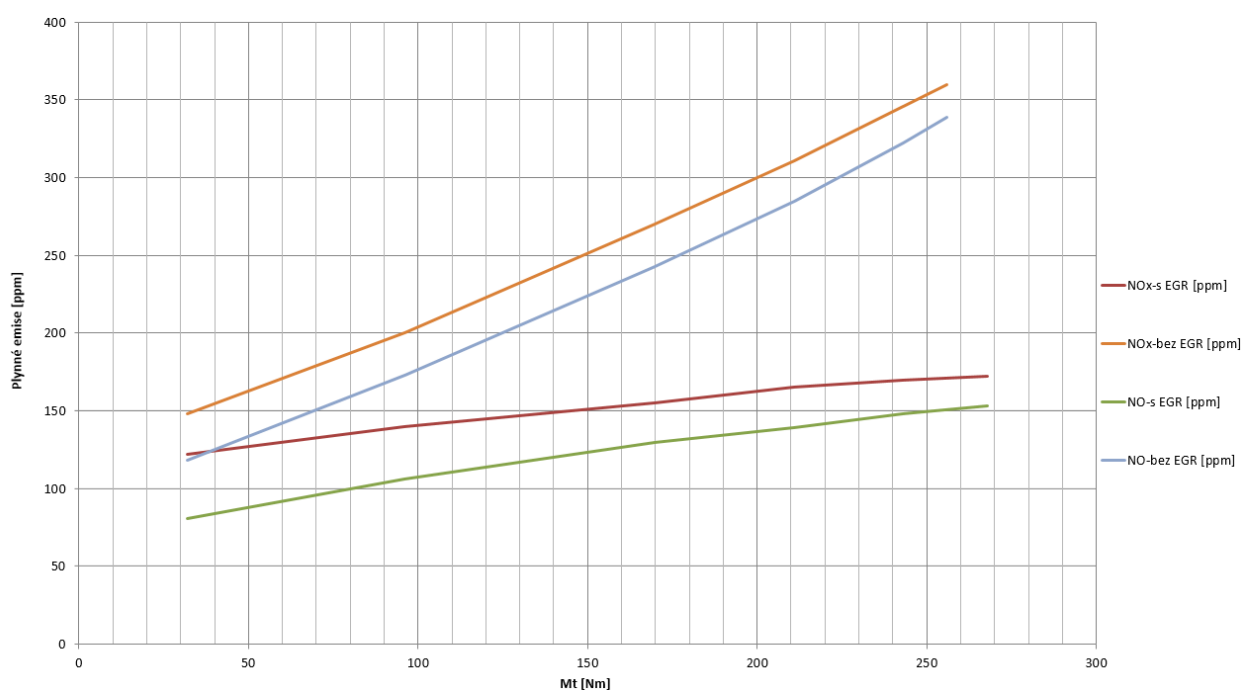
Měření byla prováděna na motorové brzdě s motorem, kterému byl ventil EGR ovládán ručně. Režimy měření vycházela s předepsaných zatížení a otáček motoru dle 8-bodového stacionárního cyklu.



Obr. 13 Kouřivost motoru, LAMBDA a %EGR při 2300 min<sup>-1</sup> v zatěžovací charakteristice

Na Obr. 13 je vidět výrazný nárůst kouřivosti při použití EGR. Jak je patrné, se zvyšujícím se zatížením kouřivost výrazně roste. Zvýšená kouřivost má výrazně negativní dopad na DPF filtr a jeho zanášení, což bude mít zvýšený nárok na regenerace. Zvýšená kouřivost je vysvětlitelná díky součiniteli přebytku vzduchu LAMBDA. Z naměřeného je vidět, že LAMBDA s EGR je o cca 30% nižší. Jako zajímavé vyhodnocení EGR je možnost kvantifikovat EGR pomocí rozdílu změřeného množství nasávaného vzduchu na motoru s EGR a bez EGR. Toto procentuální kvantifikování EGR je vidět v Obr. 13 jako %EGR.

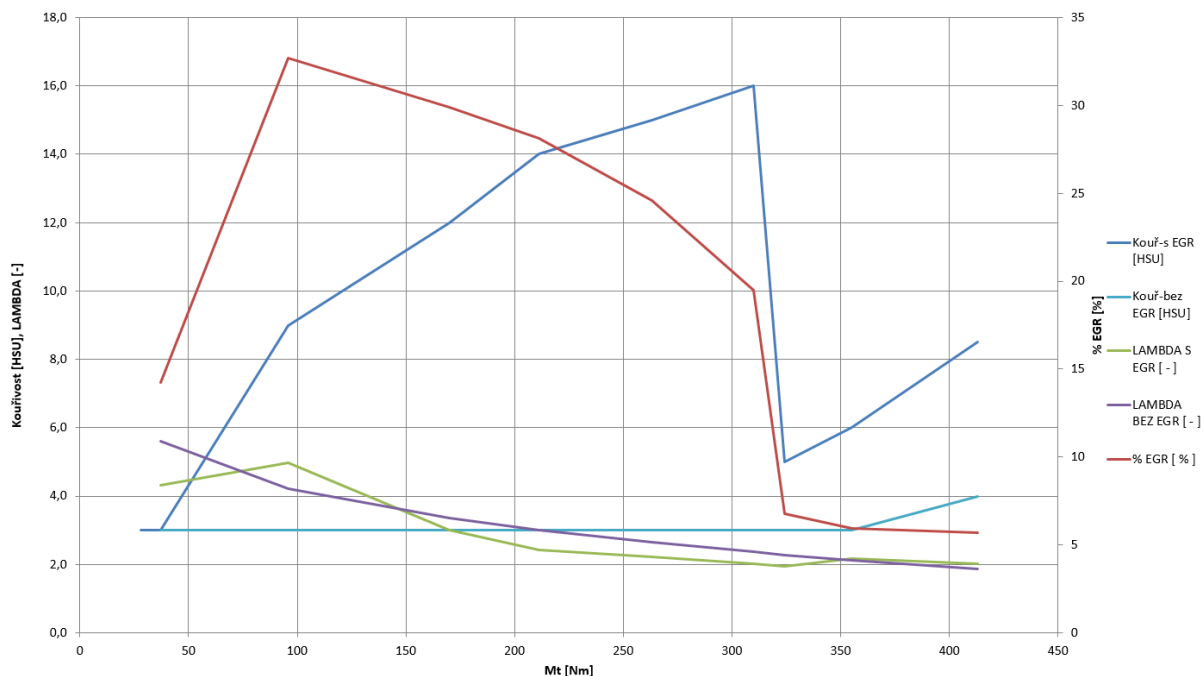
Jako další sledovaný parametr byl sledován vliv EGR na emise NOx a NO Obr. 14. Pro dobrou regeneraci DPF filtru se považuje ideální poměr NOx k NO cca 50% [4]. Jak je patrné pro dobrou regeneraci DPF filtru je užití EGR velmi nevýhodné z důvodu podstatně vyšší kouřivosti Obr. 14.



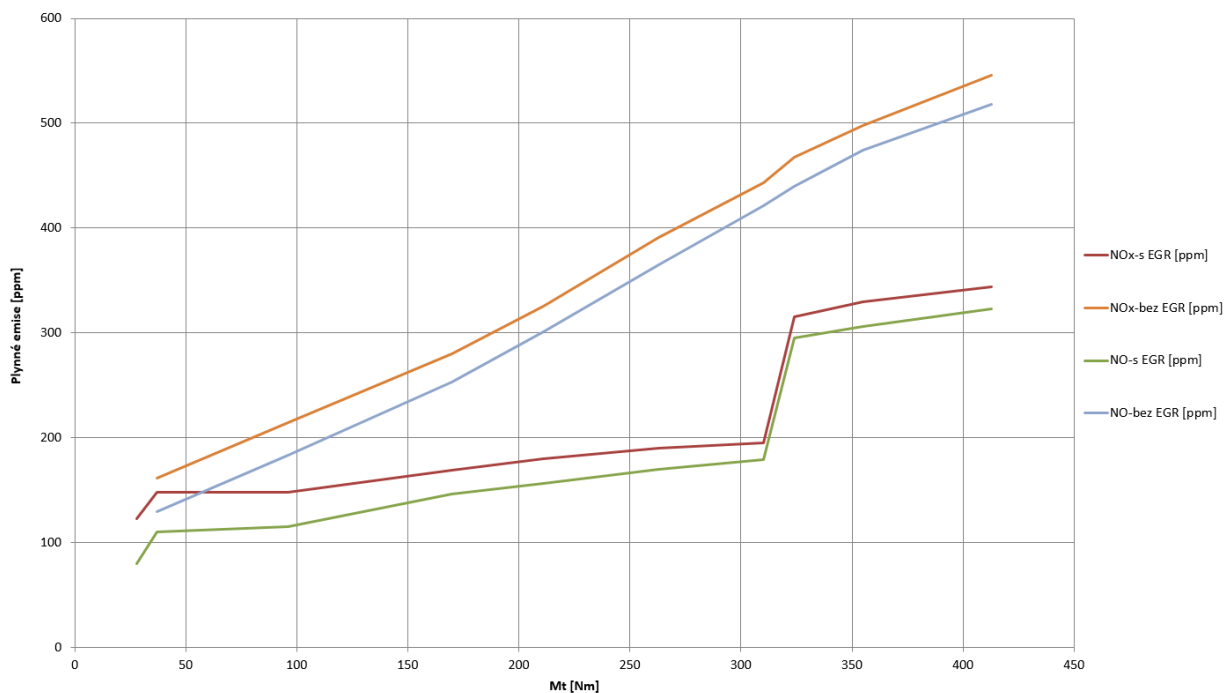
Obr. 14 NOx, NO při 2300 min<sup>-1</sup> v zatěžovací charakteristice motor s EGR a bez EGR

## 7.4 PLYNNÉ EMISE V ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTICE PŘI 2200 MIN<sup>-1</sup> (MAXIMÁLNÍ VÝKON MOTORU)

Popsané vlivy EGR v kapitole 7.3 byly potvrzeny i při otáčkách 2200 min<sup>-1</sup>. V Obr. 15 jsou vidět ostré zlomy v průběhu kouřů i na průběhu součinitele přebytku vzduchu – LAMBDA. Tyto ostré zlomy jsou dány použitou strategií EGR. Stejně je tomu i u emisí NO<sub>x</sub>, NO.



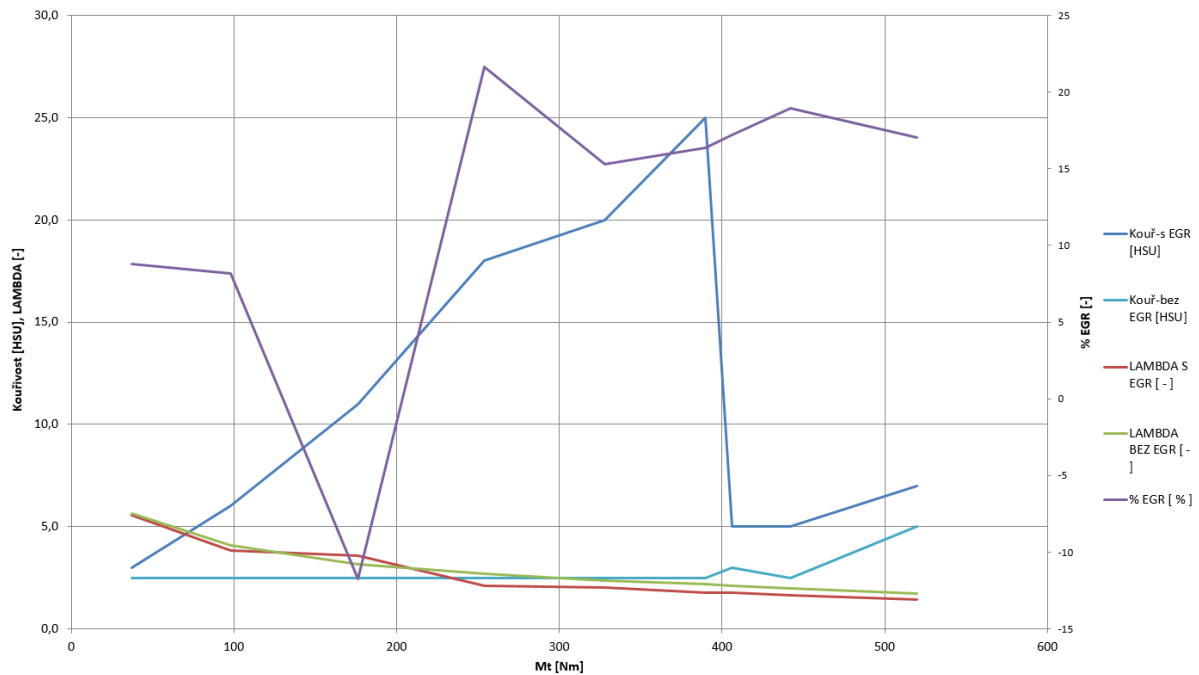
Obr. 15 Kouřivost motoru, LAMBDA a %EGR při 2200 min<sup>-1</sup> v zatěžovací charakteristice



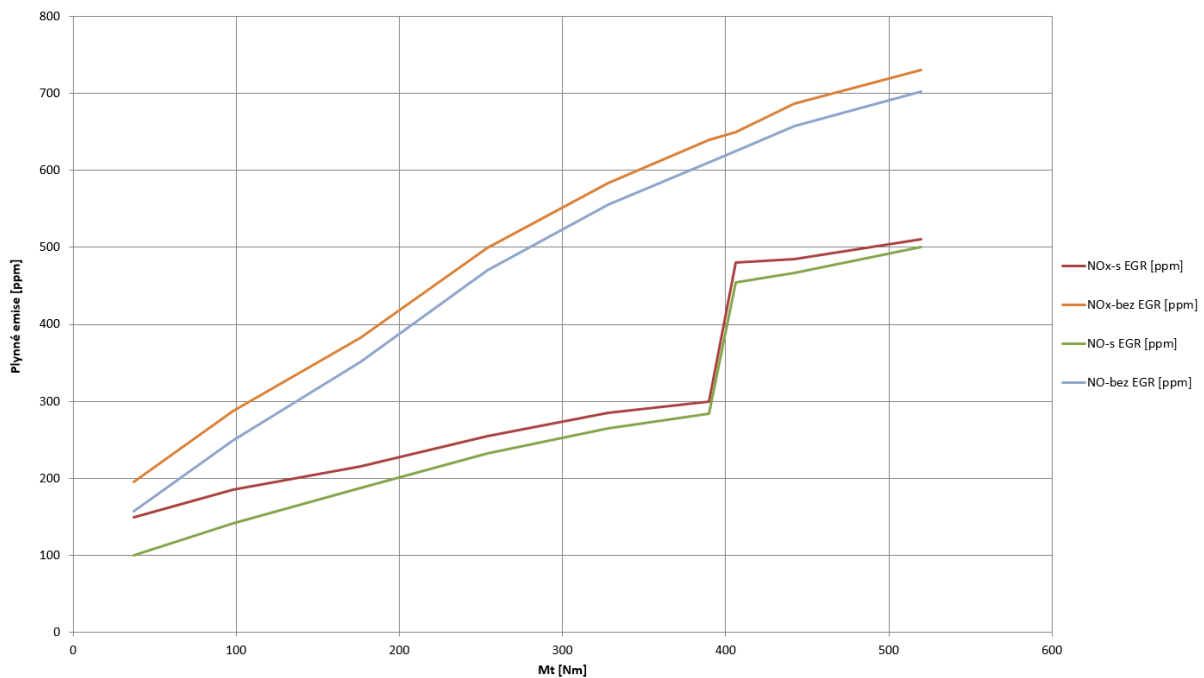
Obr. 16 NO<sub>x</sub>, NO při 2200 [min<sup>-1</sup>] v zatěžovací charakteristice motor s EGR a bez EGR

## 7.5 PLYNNÉ EMISE V ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTICE PŘI 1800 MIN<sup>-1</sup>

Tak jak při otáčkách 2200 min<sup>-1</sup> jsou vidět na Obr. 17 ostré zlomy v průběhu kouřů i na průběhu součinitele přebytku vzduchu - LAMBDA. Důvod těchto ostrých zlomů je stejný jak v předchozí kapitole a je to strategie otevírání EGR ventilu. I při otáčkách 1800 min<sup>-1</sup> je vidět výrazný vliv EGR na kouřivost motoru.



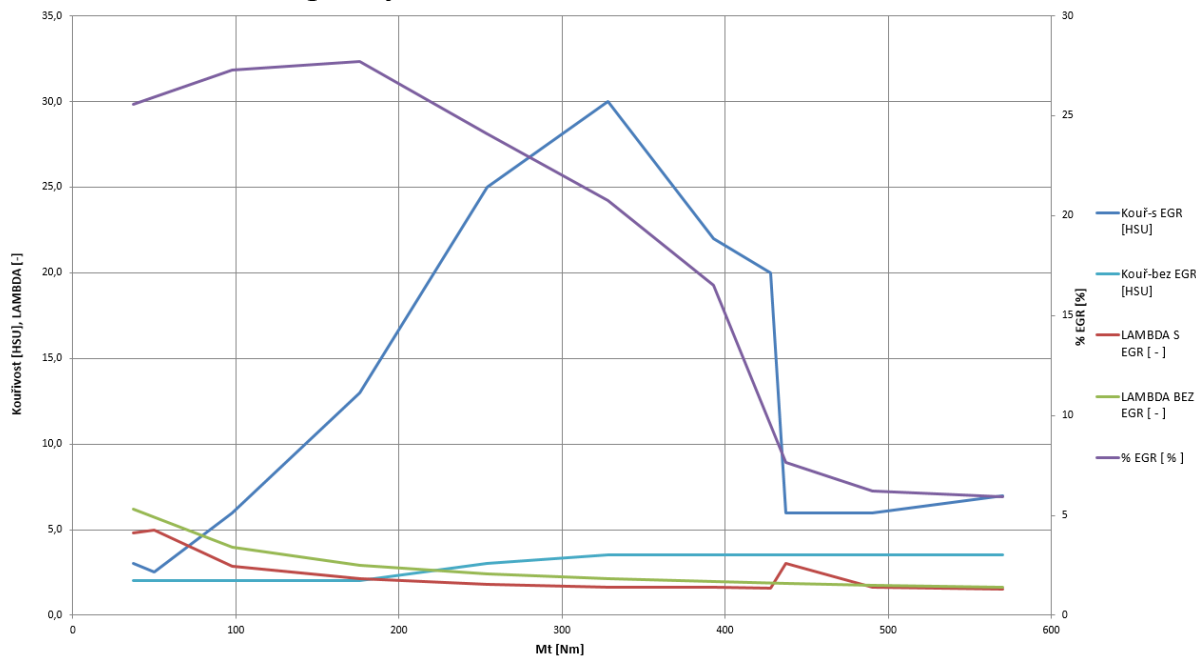
Obr. 17 Kouřivost motoru, LAMBDA a %EGR při 1800 [min<sup>-1</sup>] v zatěžovací charakteristice



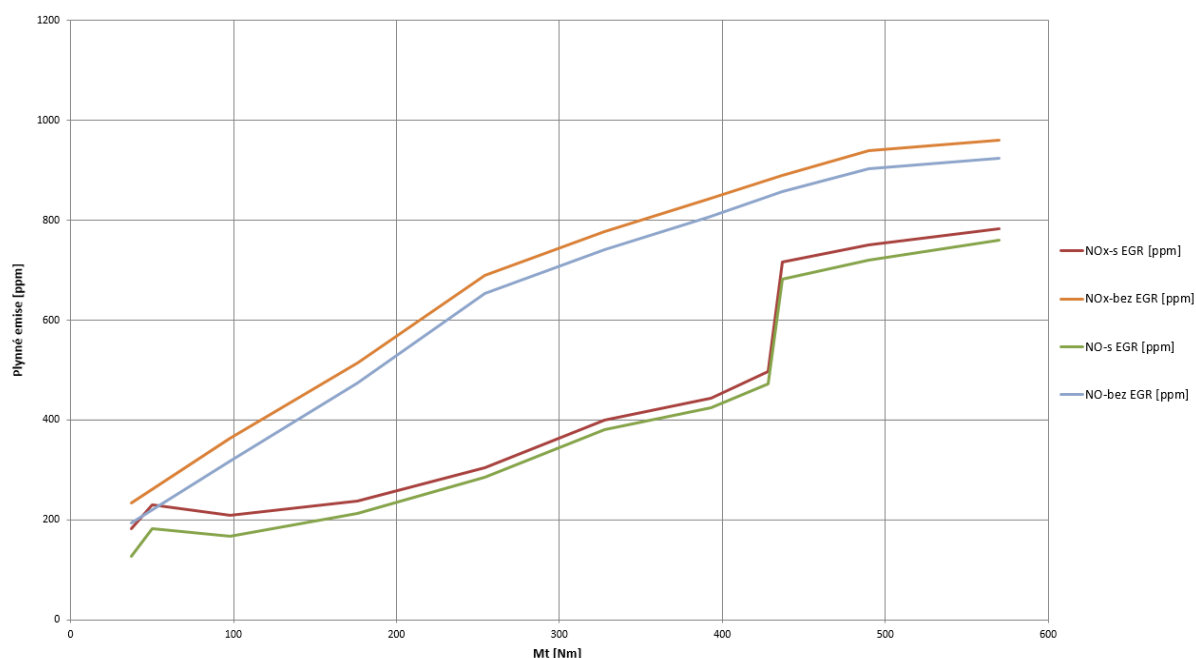
Obr. 18 NOx, NO při 1800 min<sup>-1</sup> v zatěžovací charakteristice motor s EGR a bez EGR

## 7.6 PLYNNÉ EMISE V ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTICE PŘI 1480 MIN<sup>-1</sup> (MAXIMÁLNÍ TOČIVÝ MOMENT)

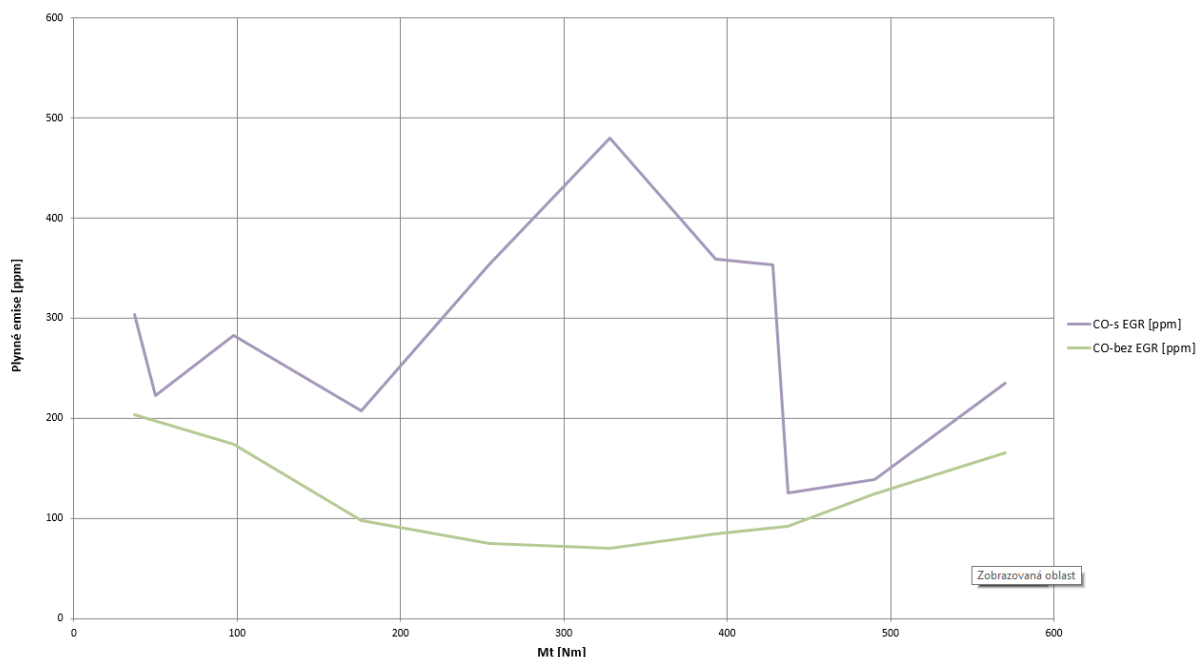
V Obr. 19, 20 je patrné, že průběh kouře, LAMBDA, NOx, koresponduje se strategií otevírání EGR ventilu. LAMBDA klesá s prudkým zvýšením kouřivosti, naopak NOx klesnou z 650 ppm na 500 ppm. Při této změně otevření EGR se zvyšuje i CO. Vliv na HC není patrný.



Obr. 19 Kouřivost motoru, LAMBDA a %EGR při 1480 min<sup>-1</sup> v zatěžovací charakteristice



Obr. 20 NOx, NO při 1480 min<sup>-1</sup> v zatěžovací charakteristice motor s EGR a bez EGR

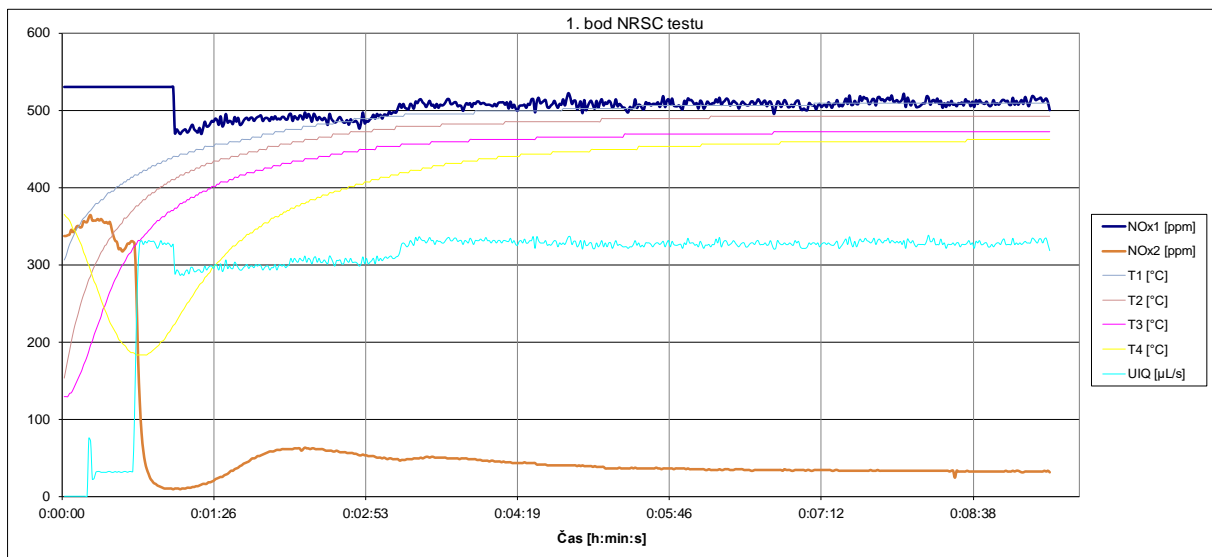


Obr. 21 CO při  $1480 \text{ min}^{-1}$  v zatěžovací charakteristice motor s EGR a bez EGR

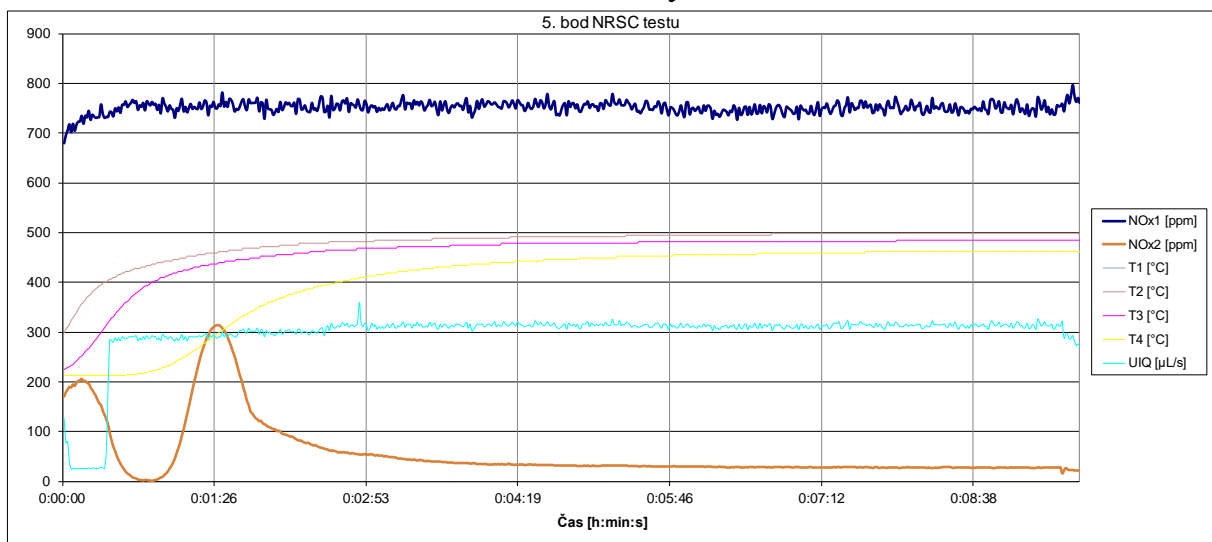
## 8 MĚŘENÍ EMISÍ MOTORU S AFTERTREATMENTEM

### 8.1 MĚŘENÍ V STATICKÉM 8-BODOVÉM EMISNÍM TESTU (NRSC)

Z výsledků měření emisí surového motoru je patrné, že pro splnění emisního limitu STAGE 4 bude nutné snížit emise  $\text{NO}_x$  cca o 90% - 95%. Pro dosažení takové vysoké redukce je potřeba optimalizovat vstřikované množství močoviny pro každý bod. V prvním bodu 8-bodového statického testu bylo spočítáno teoretické množství močoviny. Pro otáčky  $2200 \text{ min}^{-1}$  a zatížení 580 Nm je toto množství  $272,4 \mu\text{L/s}$ . V Obr. 22 jsou znázorněny průběhy sledovaných emisí, a to jak surových  $\text{NO}_x1$ , tak i výsledných  $\text{NO}_x2$ . Teploty na SCR katalyzátoru se ukazují jako důležitý parametr mající podstatný vliv na účinnost redukce  $\text{NO}_x$ . Jak je vidět po zahřátí SCR a ustálení teplot klesly emise  $\text{NO}_x$  z cca 470 ppm na 30 ppm. Což ukazuje velmi dobrou konverzi cca 94%. Při optimalizaci každého bodu 8-bodového cyklu na motorové brzdě bylo využito možnosti změny jak otevření EGR ventilu tak množství vstřikovaného množství močoviny. Optimalizace  $\text{NO}_x$  je velmi zdoluhavá a vyžaduje spoustu hodin měření na brzdě, jelikož je nutná dlouhá stabilizace teplot výfukových plynů na jednotlivé části systému SCR. Z grafu níže je patrné, že stabilizace teplot trvala v jednotlivých bodech více jak 3 minuty.



Obr. 22 NRSC 1-bod, hodnoty NO<sub>x</sub>1, NO<sub>x</sub>2, Teploty na EAT, vstřikované množství močoviny



Obr. 23 NRSC 5-bod, hodnoty NO<sub>x</sub>1, NO<sub>x</sub>2, teploty na EAT, vstřikované množství močoviny

Po optimalizaci jednotlivých bodů bylo přistoupeno k automatickému měření emisí dle legislativy.

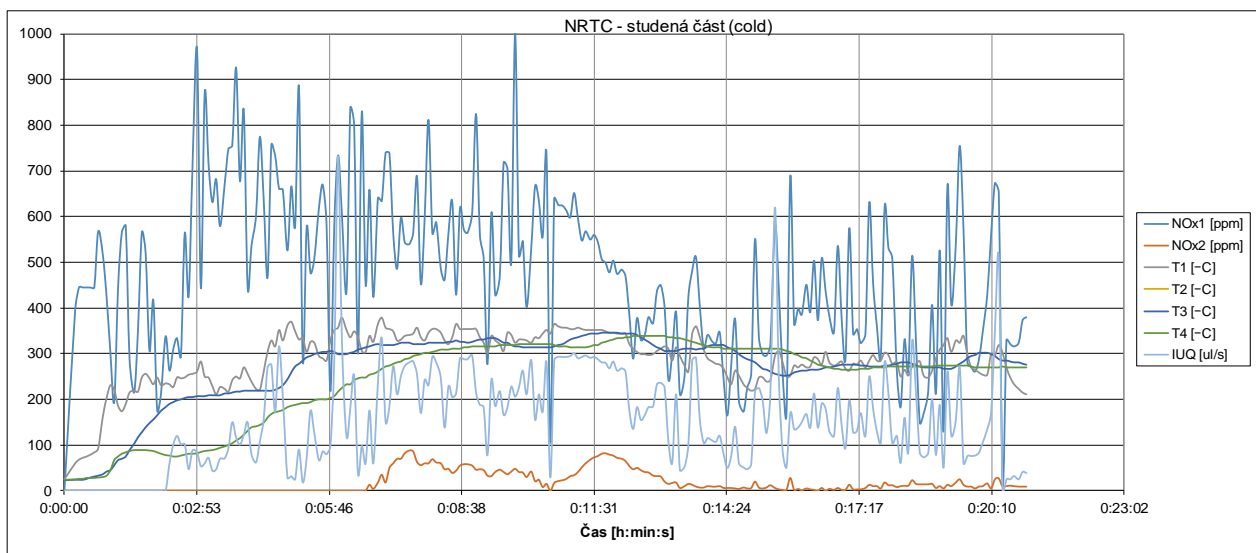
Výsledek daného NRSC testu lze shrnout následovně:

**NO<sub>x</sub> 0,226 g/kWh (limit 0,4 g/kWh)**  
**HC 0,044 g/kWh (limit 0,19 g/kWh)**  
**CO 0,262 g/kWh (limit 5 g/kWh)**  
**PM 0,002 g/kWh (limit 0,025 g/kWh)**

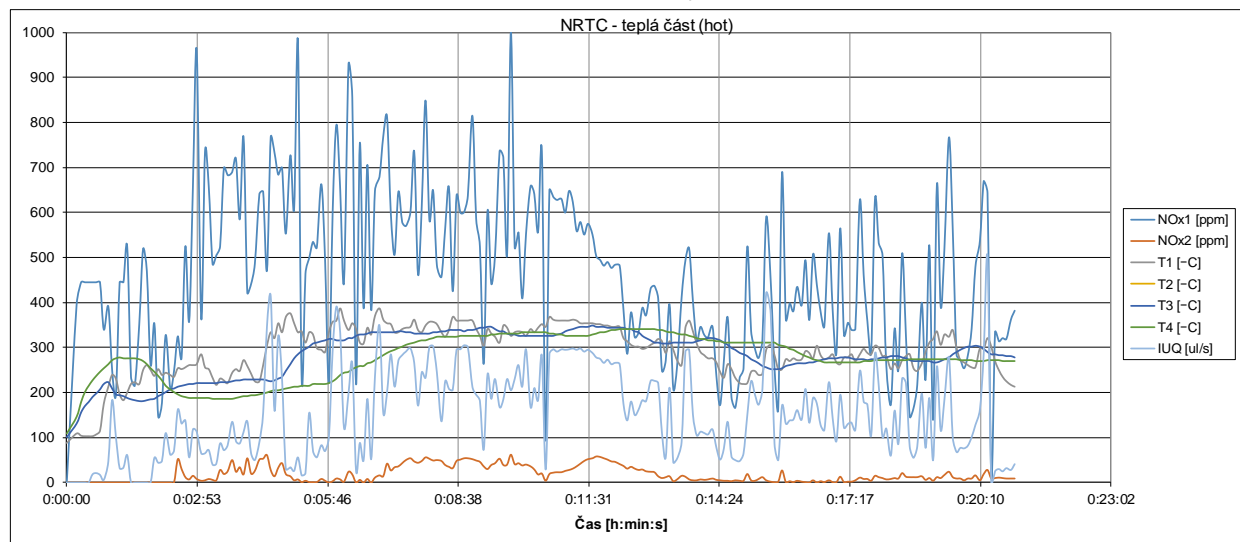
Pro možnosti mapování a následného využití při řešení emisního stupně STAGE 5 byly počítány částice viz. výsledek NRSC testu. Jak je publikováno [12] pro emisní stupeň STAGE 5 bude požadováno i počítání pevných částic. V emisní normě pro USA se s tímto zatím nepočítá [13] [14].

## 8.2 MĚŘENÍ V TRANZIENTNÍM TESTU (NRTC)

Odladění emisí v tranzientním testu je velmi náročné, jelikož je to dynamický test (viz. kapitola 2.1.4). Pro odladění emisí NO<sub>x</sub>, a to zejména množství vstřikování močoviny bylo potřeba na zkušebně provést více jak šedesát NRTC cyklů. Tato velmi náročná činnost zabrala více jak dva roky optimalizací.



Obr. 24 NRTC-cold, hodnoty NO<sub>x</sub>1, NO<sub>x</sub>2, teploty na EAT, vstřikované množství močoviny

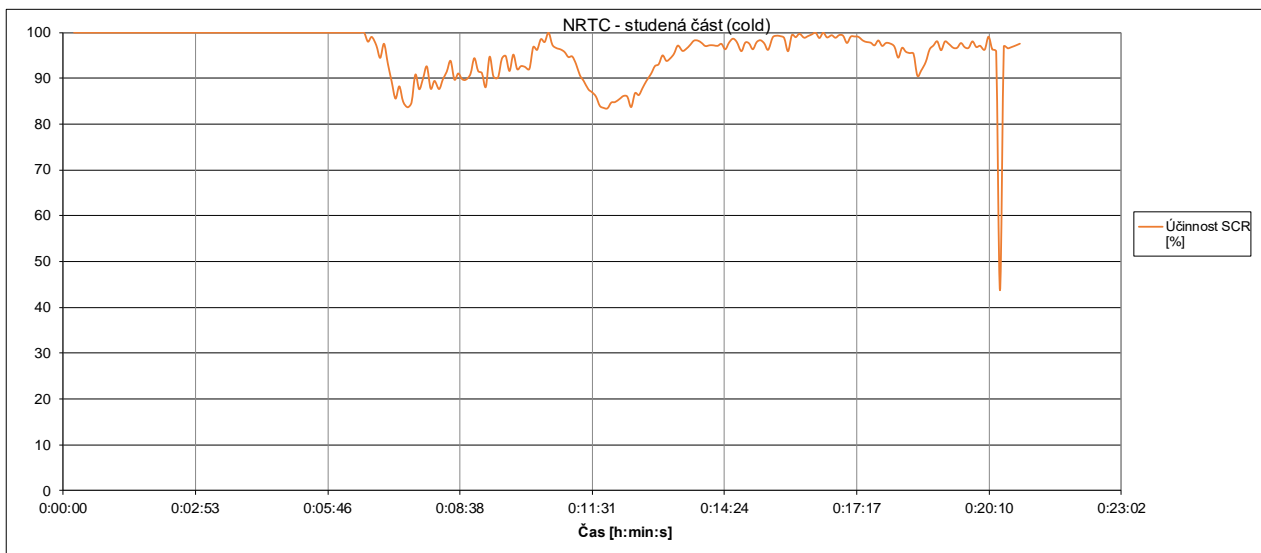


Obr. 25 NRTC-hot, hodnoty NO<sub>x</sub>1, NO<sub>x</sub>2, teploty na EAT, vstřikované množství močoviny

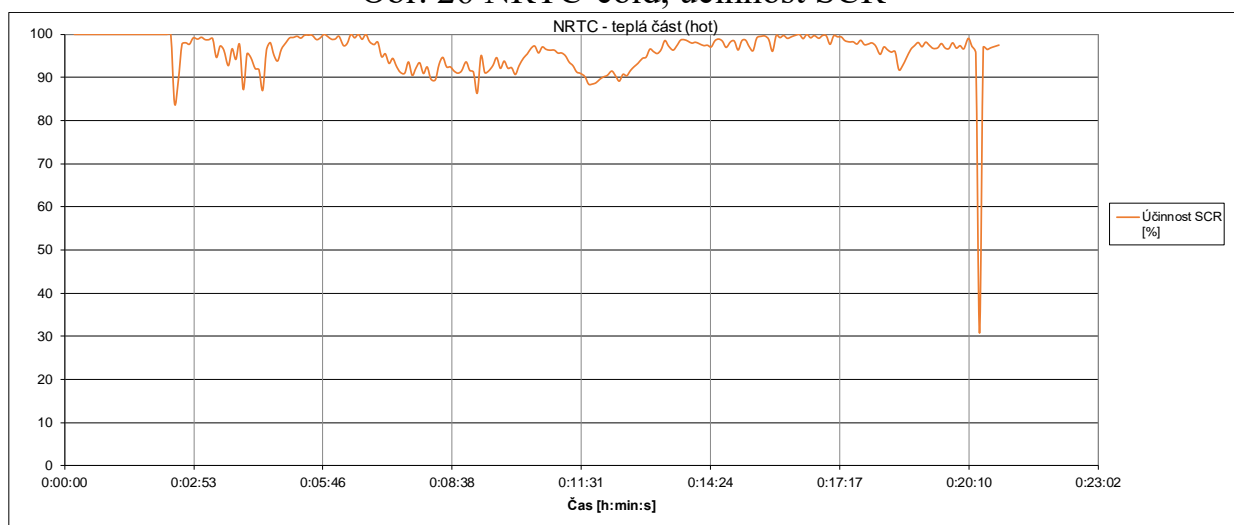
Pro posouzení zda optimalizace systému z hlediska redukce NO<sub>x</sub> se ukazuje jako výhodné vyjádřit účinnost SCR systému jako:

$$\eta_{SCR} = \frac{NO_{x1} - NO_{x2}}{NO_{x1}} \times 100 \quad , \quad (15)$$

V Obr. 26 a 27 je zobrazen průběh účinnosti SCR katalyzátoru během studeného a teplého dynamického testu.



Obr. 26 NRTC-cold, účinnost SCR



Obr. 27 NRTC-hot, účinnost SCR

Jak je z grafů patrné, tak na začátku cyklu je 100% účinnost. Toto ale není pravda, jelikož motor je studený a NOx senzory i vstřikování močoviny je na počátku nefunkční, jelikož teplota T1 nedosáhla více jak 150°C.

Průměrná hodnota účinnosti během studené části je 94,1% a během teplé části 95,6%. Toto je velmi dobrá hodnota pro dobrou redukci NOx. Vyhodnocení NRTC cyklu je prováděno automaticky softwarem brzdy od firmy AVL.

Výsledek NOx daného testu byl 0.203 g/kWh, což je hluboko pod limitem 0.4 g/kWh, který předepisuje legislativa.

## 9 ZÁVĚR

Cílem disertační práce bylo najít řešení snížení emisí požadovaných emisním stupněm Stage 4 pro mimosilniční motory s válcovou jednotkou o objemu okolo jednoho litru. Navržený systém zaručuje při dodržení předpokladu surových emisí  $\text{NO}_x$  (5–6) g/kWh a pevných částic PM (0,12–0,18) g/kWh ve statickém osmibodovém testu dosažení limitů  $\text{NO}_x$  a PM ve stupni Stage 4. Základní uspořádání systému a jeho možnosti zástavby jsou voleny tak, aby byla možná implementace systému do traktorů ve výkonové třídě (56–130) kW. Systém je koncepčně zvolen tak, aby umožnil splnit i ostatní legislativní požadavky kladené na traktor, jako je výhled z kabiny, který je předepsán směrnicí 2008/2/EC.

Všechny komponenty systému jsou voleny tak, aby se maximálně využila možnost použití komponentů vyráběných pro automobilní průmysl. Tyto komponenty jsou většinou validovány pro motory pro dálkovou silniční přepravu v emisním stupni EURO 5 a zejména EURO 6. Jedná se především o substráty pro SRC katalyzátory a dále pak základní matrice pro DPF filtry. Jako nedílnou součástí celého systému je nutné aftertreatment osadit prvky pro možnost diagnostiky a zajištění funkčnosti. Jedná se zejména o  $\text{NO}_x$  senzory, které jsou v současné době hromadně využívány u motorů EURO 6.

Na základě výsledků dosažených na homologační zkušebně v TÜV SÜD Czech lze konstatovat, že limity plyných emisí pro splnění STAGE 4 byly splněny. Dále motor byl připraven i pro splnění dalších požadavků. Navržený aftertreatment má předpoklady plnit limity, které budou přicházet v dalších emisních stupních. Pro STAGE 5 bude požadováno i počítání částic, což navržený systém s DPF plně respektuje. I na základě měření prováděných na homologační zkušebně lze predikovat dosažení limitů v připravované emisní normě STAGE 5. Konstrukční řešení zástavby aftertreatmentu respektují i směrnici pro výhledy z kabiny traktoru dle 2008/2/ES. Celý systém aftertreatmentu byl zastaven do traktoru s cílem co nejmenších změn na kapotáži traktoru. Pro motor byly navrženy kompletní uzly řídicích jednotek pro splnění všech požadavků daných směrnicí. Řídicí jednotka vstřikovacího systému zabezpečuje takzvané omezovací stavy. V případě poruchy emisního systému, kdy dojde k situaci, že motor má zvýšené emise nad limit daný směrnicí STAGE 4, motor musí přejít do prvního, resp. do druhého omezovacího stavu. Hlavní výsledky práce získané homologační měřeními prezentuje Tab. 3.

Tab. 3 Výsledky homologační měření TÜV SÜD

Typ testu	NRTC test	NRSC test	POŽADOVANÝ LIMIT EMISÍ STAGE 4
HC [g/kWh]	0,005	0,044	0,19
CO [g/kWh]	0,074	0,262	5,00
$\text{NO}_x$ [g/kWh]	0,203	0,226	0,40
PM [g/kWh]	0,003	0,002	0,025

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ

- [1] ŠMERDA, Tomáš, ČUPERA. Jiří. Emise vznětového motoru a systém SCR. *Mechanizace zemědělství: Odborný časopis pro zemědělskou a lesnickou techniku*. Praha: Profi Press s.r.o, 2011(7): 6. ISSN 0373-6776. Dostupné také z: <http://www.agrics.cz/obrazky-soubory/emise-vznetoveho-motoru-a-system-scr-4107d3.pdf?redir>
- [2] ROBERT BOSCH GMBH, [Hrsg.[Unternehmensbereich Automotive Aftermarket. *Abgastechnik für Dieselmotoren: Schadstoffminderung und Abgasnachbehandlung, Partikelfilter, DENOXTRONIC, On-Board-Diagnose OBD*. 1. Ausg., Oktober 2004. Plochingen: Bosch, 2004. ISBN 37-782-2061-6.
- [3] *Cummins Emissions Solutions* [online]. [cit. 2015-08-30]. Dostupné z: [http://cumminsemissionsolutions.com/CES/CESContent//SiteContent/en/Binary\\_Asset/PDF/CES\\_Pocketcard\\_Off\\_Highway\\_FINAL.pdf](http://cumminsemissionsolutions.com/CES/CESContent//SiteContent/en/Binary_Asset/PDF/CES_Pocketcard_Off_Highway_FINAL.pdf)
- [4] Andreas Neuper, Jia Juany, Harald Bressler, Wolfgang Albrecht *A Clean Solution Exhaust Gas Treatment* [Http://dc-america.resource.bosch.com/media/us/press\\_kits\\_1/conexpo\\_2014/technical\\_papers\\_and\\_success\\_stories/Rexroth\\_Exhaust\\_Gas\\_Treatment.pdf](http://dc-america.resource.bosch.com/media/us/press_kits_1/conexpo_2014/technical_papers_and_success_stories/Rexroth_Exhaust_Gas_Treatment.pdf) [online]. 2013 [cit. 2015-09-06]. Dostupné z: [http://dc-america.resource.bosch.com/media/us/press\\_kits\\_1/conexpo\\_2014/technical\\_papers\\_and\\_success\\_stories/Rexroth\\_Exhaust\\_Gas\\_Treatment.pdf](http://dc-america.resource.bosch.com/media/us/press_kits_1/conexpo_2014/technical_papers_and_success_stories/Rexroth_Exhaust_Gas_Treatment.pdf).
- [5] *Diesel Emission Control Ltd. 36 Lily Close, St. Pauls Court, London W14 9YA, U.K.:* DPF Regeneration AECD R08 20160705 MD.docx
- [6] *Komatsu* [online]. [cit. 2016-06-25]. Dostupné z: [http://www.komatsu.com/CompanyInfo/profile/report/pdf/149-05\\_E.pdf](http://www.komatsu.com/CompanyInfo/profile/report/pdf/149-05_E.pdf)
- [7] *Nett Technologies Inc.* [online]. [cit. 2016-06-25]. Dostupné z: [https://www.nettinc.com/wp-content/uploads/docs/nett\\_factsheet\\_diesel\\_particulate\\_filter.pdf](https://www.nettinc.com/wp-content/uploads/docs/nett_factsheet_diesel_particulate_filter.pdf)
- [8] NOVA, Isabella a Enrico TRONCONI. *Urea-SCR technology for deNOx after treatment of diesel exhausts*. New York: Springer, [2014]. Fundamental and applied catalysis. ISBN 9781489980700.
- [9] *Diesel Emission Control Ltd. 36 Lily Close, St. Pauls Court, London W14 9YA, U.K.:* Tier IV - Zetor 103kW - SCR Control module - Rev 12\_SerC.docx
- [10] *John Deere Announces Tier 4 Final Engine Technology* [online] [cit.2018-04-26]. Dostupné z: [http://www.oemoffhighway.com/press\\_release/10637093/john-deere-announces-tier-4-final-stage-iv-engine-technology](http://www.oemoffhighway.com/press_release/10637093/john-deere-announces-tier-4-final-stage-iv-engine-technology)
- [11] *Case IH Announces Its Tier 4 Final Solution* [online] [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <http://growingny.com/news/2011/09/case-ih-announces-its-tier-4-final-solution>
- [12] *Emission Standarts: Europe: Nonroad Diesel Engines*[online] [cit. 2012-01-17]. Dostupné z: <http://www.dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php>
- [13] *Emission Standarts: USA: Nonroad Diesel Engines* [online] [cit. 2012-01-17]. Dostupné z: <http://www.dieselnet.com/standards/us/nonroad.php>[14] SCR Technologie VOBOSYSTÉM s.r.o.[online] [cit. 2012-01-17]. Dostupné z: <http://www.vobosystem.cz/scr-technologie>

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

<i>Alpha</i>	[-]	Korekční součinitel
<i>ANR</i>	[-]	Korekční faktor dle použitého typu povrchové úpravy
<i>CorrSlo</i>	[-]	Korekční součinitel
<i>c<sub>p</sub></i>	[Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	Měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku
<i>DEF</i>	[g/h]	Množství vstříkované nafty při regeneraci DPF
<i>dQ</i>	[J]	Změna tepla přivedeného soustavě
<i>dp</i>	[Pa]	Změna tlaku
<i>dT</i>	[K]	Změna teploty
<i>G<sub>air</sub></i>	[kg/hod]	Množství nasávaného vzduchu
<i>G<sub>exh</sub></i>	[kg/hod]	Množství výfukových plynů
<i>G<sub>fuel</sub></i>	[kg/hod]	Množství paliva
<i>G<sub>in</sub></i>	[kg/s]	Množství nasávaného vzduchu
<i>Heat<sub>CapE</sub></i>	[J/gK]	Měrná tepelná kapacita nafty
<i>Heat<sub>D</sub></i>	[J/uL]	Výhřevnost
<i>ID<sub>CorT1</sub></i>	[-]	Korekční faktor dle T1
<i>ID<sub>CorT2</sub></i>	[-]	Korekční faktor dle T2
<i>ID<sub>CorT3</sub></i>	[-]	Korekční faktor dle T3
<i>ID<sub>CorT4</sub></i>	[-]	Korekční faktor dle T4
<i>IDQ</i>	[J]	Teplo potřebné pro zvýšení teploty výfukových plynů
<i>IDQ<sub>Basic</sub></i>	[J]	Základní teplo potřebné pro zvýšení teploty výfukových plynů
<i>IUQ</i>	[μl/s]	Množství vstříkované močoviny
<i>IUQ<sub>BASIC</sub></i>	[μl/s]	Základní množství vstříkované močoviny
<i>konc<sub>urea</sub></i>	[%]	Koncentrace močoviny
<i>MAF</i>	[kg/hod]	Množství nasávaného vzduchu snímané
<i>M<sub>exh</sub></i>	[g/mol]	Molová hmotnost výfukových plynů
<i>M<sub>H4N2CO</sub></i>	[g/mol]	Molekulová hmotnost močoviny
<i>Odpor<sub>PF</sub></i>	[kPa]	Protitlak DPF (roven p1)
<i>p<sub>0T</sub></i>	[mmHg]	Tlak výfukových plynů před turbinou TD
<i>p1</i>	[mbar]	Protitlak aftertreatmentu
<i>p2K</i>	[mmHg]	Tlak vzduchu za kompresorem TD
<i>R<sub>VolMassEx</sub></i>	[g/l]	Hustota výfukových plynů
<i>SlopeFa</i>	[-]	Korekční součinitel
<i>SlopeTe</i>	[-]	Korekční součinitel
<i>T1</i>	[°C]	Teplota výfukových plynů za TD
<i>T2</i>	[°C]	Teplota výfukových plynů za DOC katalyzátorem
<i>t<sub>2T</sub></i>	[°C]	Teplota výfukových plynů za TD (rovna T1)
<i>T3</i>	[°C]	Teplota výfukových plynů před SCR katalyzátorem
<i>T4</i>	[°C]	Teplota výfukových plynů za SCR katalyzátorem
<i>T<sub>Cat</sub></i>	[°C]	Teplota SCR katalyzátoru
<i>T<sub>Des</sub></i>	[°C]	Cílová teplota (požadovaná teplota za DOC/DPF)
<i>T<sub>x</sub></i>	[°C]	Vstupní teplota (je rovna T1)
<i>V</i>	[m <sup>3</sup> ]	Objem
<i>Vaporize</i>	[μl]	Množství vstříkované nafty při regeneraci DPF
<i>Δp<sub>PF</sub></i>	[kPa]	Tlaková ztráta před filtračním elementem DPF filtru
<i>ρ<sub>moc</sub></i>	[kg/l]	Hustota močoviny
<i>CorrT2</i>	[-]	Korekční součinitel
<i>CorrT3</i>	[-]	Korekční součinitel
<i>CorrT4</i>	[-]	Korekční součinitel

## **PŘEDSTAVENÍ AUTORA**

Rudolf Franz se narodil roku 1971 ve Vyškově. Po maturitě na Gymnáziu ve Vyškově studoval na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně obor Spalovací motory. Studium ukončil v roce 1996 diplomovou prací na téma Přepřehování vznětového motoru SLAVIA.

V roce 1996 nastoupil do společnosti Zetor a.s. jako samostatný výzkumně vývojový pracovník v oddělení výzkumu a vývoje motorů. V roce 2000 pracoval ve společnosti Ingenieurteam CZ, s.r.o., kde se podílel na vývoji hlavy válců pro motor Škoda 1.2 HTP. Po návratu do společnosti Zetor a.s. v roce 2001 byl zařazen do oddělení koncepce traktorů, kde se význačnou měrou podílel na vzniku nové traktorové řady Proxima. V rámci vzniku celkové koncepce této nové řady traktorů se hlavní část jeho činností soustředila na uspořádání motorového prostoru. Od roku 2010 působí jako vedoucí skupiny vývoje motorů ve společnosti ZETOR TRACTORS a.s. a v současné době je Rudolf Franz vedoucím vývoje motorů.

Jeho vědecká a odborná činnost je zaměřena především na řešení problematiky emisí vznětových motorů. V letech 2010 až 2014 byl řešitelem grantového úkolu FR-TI3/507 „Výzkum a vývoj pohonných jednotek s progresivními prvky snižování obsahu škodlivých látek ve výfukových plynech“. Mezi roky 2014 a 2018 se jako spoluřešitel podílel na projektu TA04030454 „Výzkum a vývoj pohonných jednotek s moderními akumulacími vstřikovacími systémy s ohledem na minimalizaci škodlivých látek ve výfukových plynech“.

Autor dlouhodobě spolupracuje s Ústavem automobilního a dopravního inženýrství Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně, kde se zapojuje jako vedoucí diplomových a bakalářských prací a jako člen komisí u státních závěrečných zkoušek magisterského studia.

## ABSTRACT

The goal of this dissertation thesis was to find a solution for emission reduction required by Stage 4 emission legislation for non-road mobile machinery for cylinder unit with 1 litre displacement approximately. The proposed system ensures at the following raw emissions assumption NO<sub>x</sub> (5–6) g/kWh and particulate matter PM (0,12–0,18) g/kWh in stationary eight point cycle to meet NO<sub>x</sub> and PM emission level in Stage 4. The basic layout of the system and its possibilities for build-in are chosen to enable implementation into the tractors in ratings (56–130) kW.

All components of the system are chosen to maximally utilize parts dedicated for the automotive industry. These components are mostly validated for engines for long-haul road transport in emission level EURO 5 and particularly EURO 6. It is primarily substrates for SCR catalysts as well as basic mats for DPF. As integral part of the entire system it is necessary to apply features to ensure diagnostics and functionality – NO<sub>x</sub> sensors, which are presently massively used with EURO 6 engines.

Based on results achieved in homologation laboratory in TÜV SÜD Czech, it is possible to state, that the limits of gaseous emissions of Stage 4 has been met. Furthermore, the engine has been prepared to meet also following requirements. The proposed aftertreatment has got all preconditions to meet also next emission limits. In the Stage 5 emission level will be applied also particulate number, which is fully respected by the proposed system. Not only based on measurements carried out in homologation laboratory, we can predict meeting limits of the prepared emission level STAGE 5. The new complete nodes of control units for meeting the requirements given by legislation has been proposed for the engine.

