



# 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

## SYSTÉM PRO SNÍŽENÍ NOX

NOX REDUCTION SYSTEM

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Pavel Karafa

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Svída, Ph.D.

BRNO 2017

# Zadání diplomové práce

|                   |  |
|-------------------|--|
| Ústav:            | Ústav automobilního a dopravního inženýrství |
| Student:          | <b>Bc. Pavel Karafa</b>                      |
| Studijní program: | Strojní inženýrství                          |
| Studijní obor:    | Automobilní a dopravní inženýrství           |
| Vedoucí práce:    | <b>Ing. David Svída, Ph.D.</b>               |
| Akademický rok:   | 2015/16                                      |

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## **System pro snížení NOx**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Pro zadaný vznětový spalovací motor navrhnete systém pro snižování NOx ve výfukových plynech.

### **Cíle diplomové práce:**

1. Proveďte rozbor systémů pro snižování NOx u současných vznětových motorů.
2. Pro zadaný vznětový spalovací motor sestavte zařízení pro snižování NOx. Bude dostačující když bude provedena pouze zástavba na motorové zkušebně.
3. Proveďte dostupná měření pro ověření funkčnosti systému.
4. Zhodnoťte získané výsledky.

### **Seznam literatury:**

Kraftfahrzeug - Kurbelwellen: Konstruktion, Berechnung, Herstellung. 2001. Auflage. Landsberg/Lech Verlag Moderne Industrie 2001. 70 s. ISBN 3-478-93243-2.

Heisler, H. Advanced Engine Technology. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2002. 794 s. ISBN 1-56091-734-2.

Stotsky, A.: Automotive Engines: Control, Estimation, Statistical Detection. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. 209 s. ISBN 978-3-642-00163-5.

Hiereth, H., Prenninger, P.: Charging the Internal Combustion Engine. Springer-Verlag, Wien, 2007. 260 s. ISBN 978-3-211-33033-3.

Macek, J.: Spalovací motory I. ČVUT, První vydání, Praha, 2007. ISBN 978-80-01-03618-1.

Pavelek, M.: Termomechanika: Termodynamika proudění,  
[http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/termo/11\\_Proudeni.pdf](http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/termo/11_Proudeni.pdf), 2015.

Štětina, J.: Podzvukové a nadzvukové proudění, <http://ottp.fme.vutbr.cz/vyuka/sat/SeminatAT-09.pdf>,  
2015.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty



## ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá problematikou emisí oxidů dusíku ve výfukových plynech a možnostmi jejich snížení. Úkolem práce je rozbor systémů pro snižování NO<sub>x</sub> u soudobých vznětových motorů, konstrukční návrh a sestavení zařízení pro snižování NO<sub>x</sub> pro zadaný vznětový motor, následně pak ověření funkčnosti tohoto systému sestaveného z komerčně dostupných komponent. V poslední části práce budou provedeny dostupná měření s analýzou dosažených výsledků.

## KLÍČOVÁ SLOVA

SCR, Selektivní katalytická redukce, NO<sub>x</sub>, emise, Denox, AdBlue, redukční činidlo

## ABSTRACT

This diploma thesis deals with the issue of nitrogen oxides emissions in exhaust gases and possibilities of their reduction. The task of the thesis was analysis of systems for NO<sub>x</sub> reduction by contemporary diesel engines, design and construction of NO<sub>x</sub> reduction device for given diesel engine, then verify functionality of this system compiled from commercially available components. In the last part of thesis available measurements will be made with an analysis of achieved results.

## KEYWORDS

SCR, Selective Catalytic Reduction, NO<sub>x</sub>, emissions, Denox, AdBlue, Reducing agent



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

Karafa, P. *Systém pro snížení NO<sub>x</sub>*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 70 s. Vedoucí diplomové práce Ing. David Svída, Ph.D.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Davida Svídy, Ph.D a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25. května 2017

.....

Pavel Karafa



## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval Ing. Davidu Svidovi, Ph.D za cenné rady a připomínky při tvorbě mé diplomové práce a také za pomoc s řešením jednotlivých problémů.

Mé poděkování patří také Ing. Martinu Beranovi za rady a pomoc při kalibraci zařízení.

Závěrem děkuji své rodině za velkou podporu a trpělivost po celou dobu mého studia.



## OBSAH

|   |    |
|---|----|
| Úvod .....  | 10 |
| 1 Legislativní předpisy .....                               | 11 |
| 1.1 Emisní normy .....                                      | 11 |
| 1.2 Emisní zkoušky vozidel – testovací cykly .....          | 13 |
| 2 Spalovací procesy uvnitř vznětového motoru .....          | 17 |
| 2.1 Složení výfukových plynů .....                          | 17 |
| 2.2 Jednotlivé škodliviny výfukových plynů .....            | 19 |
| 2.3 Metody měření emisí výfukových plynů .....              | 22 |
| 2.3.1 Infračervená metoda .....                             | 22 |
| 2.3.2 Analýza pevných částic ve výfukových plynech .....    | 22 |
| 3 Snižování emisí vznětového motoru .....                   | 24 |
| 3.1 Aktivní prostředky .....                                | 24 |
| 3.1.1 Tvorba směsi vznětového motoru .....                  | 25 |
| 3.1.2 Vstřikování paliva .....                              | 25 |
| 3.1.3 Víření náplně .....                                   | 26 |
| 3.1.4 Přepřehování .....                                    | 26 |
| 3.2 Pasivní prostředky .....                                | 29 |
| 3.2.1 Recirkulace výfukových plynů .....                    | 29 |
| 3.2.2 Oxidační katalytický konvertor .....                  | 32 |
| 3.2.3 Filtr pevných částic .....                            | 34 |
| 3.2.4 Selektivní katalytická redukce .....                  | 36 |
| 3.2.5 Zásobníkový katalyzátor NO <sub>x</sub> .....         | 40 |
| 3.2.6 Hydrocarbon SCR .....                                 | 40 |
| 3.2.7 SCRT Systém .....                                     | 40 |
| 3.2.8 Cold Start Catalyst .....                             | 41 |
| 3.3 Dodavatelé NO <sub>x</sub> aftertreatment systémů ..... | 41 |
| 3.3.1 Bosch .....   | 41 |
| 3.3.2 Nett Technologies INC .....                           | 43 |
| 3.3.3 Delphi .....  | 43 |
| 3.3.4 Cummins Emmison Solutions .....                       | 43 |
| 4 Konstrukční návrh .....                                   | 44 |
| 4.1 Návrh zařízení k redukci NO <sub>x</sub> .....          | 44 |
| 4.1.1 PTC Creo Parametric .....                             | 44 |
| 4.1.2 Návrh zásobovacího modulu .....                       | 44 |
| 4.1.3 SCR katalyzátor .....                                 | 46 |



|       |   |    |
|-------|---|----|
| 4.1.4 | Zástavbový model.....                               | 48 |
| 5     | Použité komponenty .....                            | 49 |
| 5.1.1 | Vysokotlaké čerpadlo .....                          | 49 |
| 5.1.2 | Elektromagnetické ventily .....                     | 49 |
| 5.1.3 | Vstříkovač.....                                     | 50 |
| 5.2   | Motor Zetor.....                                    | 50 |
| 6     | Kalibrace vstříkování AdBlue .....                  | 53 |
| 6.1   | Metodika kalibrace.....                             | 53 |
| 6.2   | Kalibrační stanoviště.....                          | 56 |
| 6.3   | Celková zástavba na motoru .....                    | 57 |
| 7     | Ověření funkčnosti systému a analýza výsledků ..... | 59 |
| 7.1   | Metodika měření .....                               | 59 |
| 7.2   | Výsledky měření emisí .....                         | 59 |
| 7.2.1 | Hodnoty emisí bez použití technologie SCR.....      | 60 |
| 7.2.2 | Hodnoty emisí s použitím technologie SCR.....       | 61 |
| 7.3   | Analýza výsledků.....                               | 63 |
|       | Závěr.....  | 64 |
|       | Seznam použitých zkratk a symbolů .....             | 69 |
|       | Seznam příloh.....                                  | 70 |



## ÚVOD

V důsledku neustále rostoucího technického rozvoje dnešní společnosti dochází k nenávratným klimatickým přeměnám našeho okolního prostředí. Tyto negativní dopady na prostředí je třeba mírnit, v nejlepším případě je úplně pozastavit. V dnešní době jsou ve vyspělých zemích kladeny vysoké nároky na všechna průmyslová odvětví, aby splňovala důležité ekologické limity a normy. Tyto normy jsou stanoveny Evropskou komisí, Americkou agenturou pro ochranu životního prostředí (EPA) či Kanadskou agenturou pro ochranu životního prostředí (CEPA). Jedním z cílů těchto organizací je průběžné snižování emisí v průmyslu, zvláště pro dopravní prostředky a pracovní techniku.

Ke značnému omezování složek emisí dochází u automobilové dopravy, jež ve velkých městech patří k největším znečišťovatelům ovzduší. Normy předepisují maximální množství oxidů dusíku, uhelnatého, uhlovodíků a jemných pevných částic ve výfukových plynech. Pro dosažení lepších emisních výsledků již dnes nestačí zlepšení spalovacího procesu, který vede ke zvýšení výkonu a snížení spotřeby paliva. Je třeba využít sofistikovanějších prostředků k eliminaci těchto negativních složek. A to například pomocí systémů zakomponovaných vně spalovacího prostoru – ve výfukovém potrubí. Mezi tyto komponenty tzv. aftertreatmentu se řadí zejména filtry pevných částic či katalyzátory odstraňující oxidy dusíku.

Tato diplomová práce se zabývá problematikou snižování emisních hodnot oxidů dusíku ve výfukových plynech u vznětových spalovacích motorů s využitím technologie selektivní katalytické redukce.

V úvodu je práce složena z teoretické části týkající se jednotlivých norem, vznikajících škodlivých emisí při spalování, principy snižování těchto emisí a systémy pro jejich redukci. Dále je pak vytvořen 3D konstrukční návrh zásobovacího modulu pro systém snižování oxidů dusíku ve výfukových plynech pro zadaný vznětový motor nacházející se v laboratořích ÚADI. Poslední část se skládá z kalibrace celého systému, ověření jeho funkčnosti pro daný motor a provedení dostupných měřících zkoušek při režimech vycházejících z normovaného stacionárního cyklu využívaného pro měření emisí.



# 1 LEGISLATIVNÍ PŘEDPISY

S neustálým technologickým pokrokem a neustávající produkcí automobilů na světový trh stoupá riziko znečištění ovzduší. V celosvětovém měřítku podíl automobilových výfukových zplodin na znečištění není příliš významný, avšak při lokálním zaměření, zejména ve velkých městech či aglomeracích se výfukové zplodiny významně podílí na kvalitě okolního ovzduší. Důsledkem toho jsou emisní předpisy pro škodliviny obsažené ve výfukových plynech stále více zpřísňovány.

## 1.1 EMISNÍ NORMY

Dnešní produkce vozidel musí splňovat závazná emisní kritéria platná v místě a době prodeje. Emisní normy stanovují hodnoty škodlivin ve výfukových exhalacích zážehových a vznětových motorů v závislosti hmotnosti škodlivin na ujeté vzdálenosti. Jedná se o limity množství oxidu uhelnatého (CO), uhlovodíků (HC), oxidů dusíku (NO<sub>x</sub>) a pevných částic (PM). Nezabývají se však oxidem uhličitým (CO<sub>2</sub>) ani sloučeninami síry.

Soudobé vznětové motory produkují při spalování pohonných hmot zhruba o 96 % méně emisí NO<sub>x</sub> než vozidla produkovaná před rokem 1990. Dále se pak využitím systému SCR (Selective Catalytic Reduction) daří snížit emise NO<sub>x</sub> o dalších 95 %.

Hodnoty emisních norem pro území Evropy, USA, Japonska jsou do jisté míry podobné, avšak nejsou úplně shodné. Pro výrobce pak tato kritéria představují dodatečné náklady na výrobu k následné homologaci na daném trhu. První emisní norma začala platit v roce 1968 na území USA (Kalifornie).

## EURO

Na území Evropy jsou jednotlivé emisní normy schvalovány na základě národních vyhlášek. Po založení EU, či vstupu mezi členské státy, se emisní normy sjednotily pod název Euronormy. Ty jsou označovány u osobních vozidel římskými, u nákladních automobilů a autobusů, arabskými číslicemi. První evropskou normou byla norma EHK 15 z roku 1971.

Vývoj Euro norem: **Euro I** (1992); **Euro II** (1996); **Euro III** (2000); **Euro IV** (2005); **Euro V** (09/2009); **Euro VI** (08/2014)

| Emission limits for new vehicles with diesel engine |            |           |           |                        |                           |       |
|---|------------|-----------|-----------|------------------------|---------------------------|-------|
|   | valid from | CO (g/km) | HC (g/km) | NO <sub>x</sub> (g/km) | HC+NO <sub>x</sub> (g/km) | PM    |
| <b>Euro I</b>                                       | 01/92      | 3,16      | -         | -                      | 1,13                      | 0,14  |
| <b>Euro II</b>                                      | 01/96      | 1,00      | 0,15      | 0,55                   | 0,70                      | 0,08  |
| <b>Euro III</b>                                     | 01/00      | 0,64      | 0,06      | 0,50                   | 0,56                      | 0,05  |
| <b>Euro IV</b>                                      | 01/05      | 0,50      | 0,05      | 0,25                   | 0,30                      | -     |
| <b>Euro V</b>                                       | 09/09      | 0,50      | 0,05      | 0,18                   | 0,23                      | 0,005 |
| <b>Euro VI</b>                                      | 08/14      | 0,50      | 0,09      | 0,08                   | 0,17                      | 0,005 |

Obr. 1: Emisní limity vznětových motorů osobních vozidel [13]



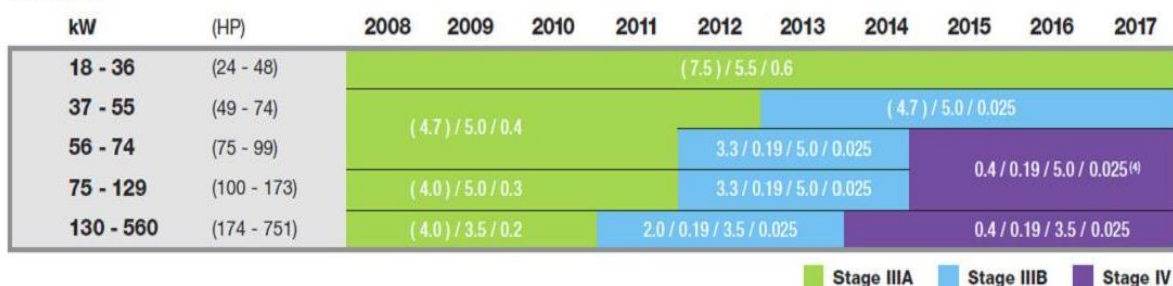
## STAGE

Pro nesilniční vozidla na území EU jsou emisní normy označovány pod názvem Stage. Členské státy EU mají rozdílné požadavky oproti nečlenským – ty nejsou nuceny vyžadovat stejné předpisy.

Na území EU vyšla v platnost od 01/2014 norma Stage IV. Je charakteristická přísnými limity ohledně oxidů dusíku (NO<sub>x</sub>) s limitní hodnotou 0,4 g/kWh pro motory nad 130 kW. Od podzimu téhož roku platí také pro motory o výkonu 56 – 129 kW. Při přechodu ze Stage IIIB na Stage IV došlo k redukci oxidů dusíku o 80 %.

Stage V, jako další fáze emisních norem pro nesilniční vozidla, vstoupí v platnost na přelomu let 2019/2020. Norma bude dále pokračovat ve významné redukci pevných částic a oxidů dusíku. [14]

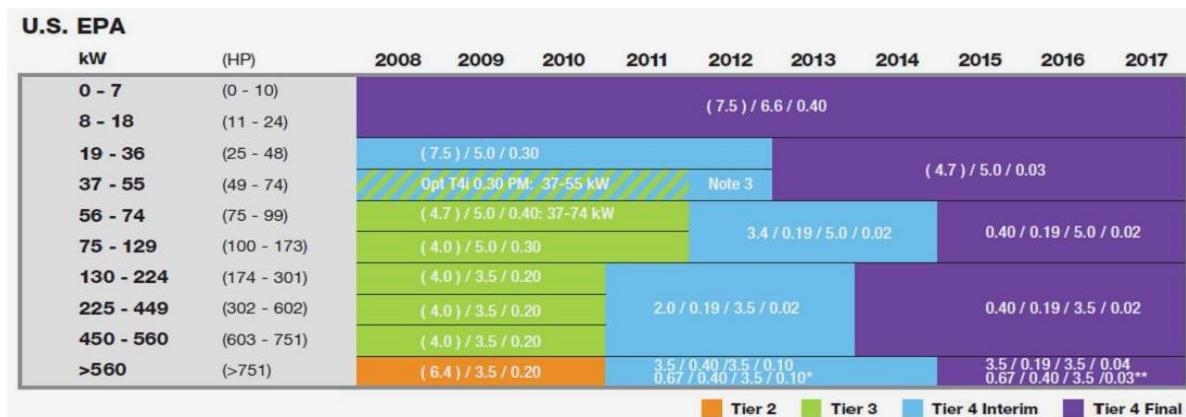
### EUROPE



Obr. 2: Vývoj emisních limitů Stage nesilničních vozidel dle výkonových tříd (NO<sub>x</sub> / HC / CO / PM) [g/kWh] [12]

## TIER

Emisní normy Tier jsou platné pro nesilniční vozidla na území USA. Jsou ekvivalentem evropských norem Stage. Úroveň Stage IV, která vzešla v platnost v roce 2014, odpovídá normě Tier 4 Final. Normy Tier se stejně jako Stage zabírají redukcí NO<sub>x</sub>, pevných částic a jsou také přísnější co se týče obsahu uhlovodíků (zejména Tier 4).



Obr. 3: Vývoj emisních limitů Tier nesilničních vozidel dle výkonových tříd (NO<sub>x</sub> + HC / CO / PM) [g/kWh] [12]



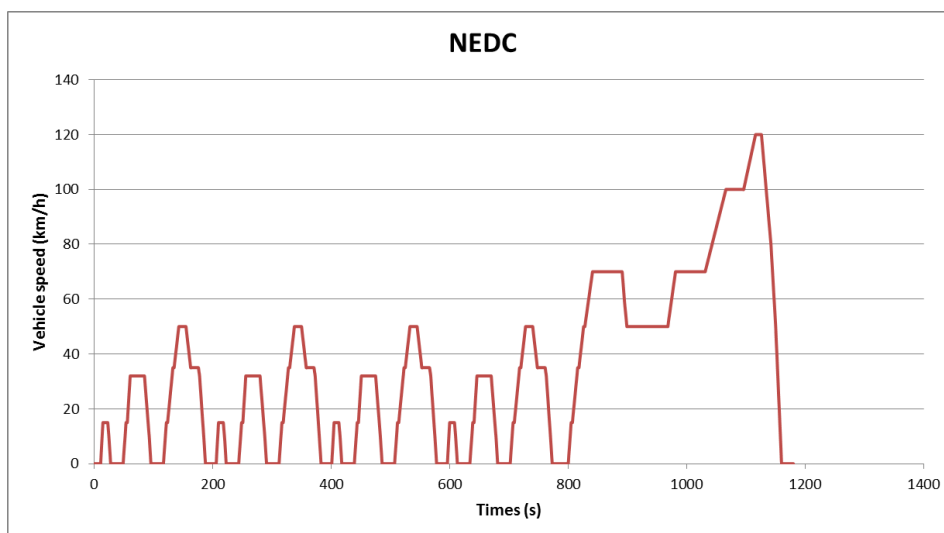
## 1.2 EMISNÍ ZKOUŠKY VOZIDEL – TESTOVACÍ CYKLY

Měření emisních zkoušek vozidel se provádějí na válcových zkušebnách. Jízdní odpory jsou zde nahrazeny odporem valení válců, jež se počítají pro každé vozidlo zvlášť. Záleží zde na hmotnosti, aerodynamickém odporu karoserie či odporu valení. Naopak zkoušky větších motorů nákladních vozidel a nesilničních strojů se provádí na motorové brzdě. Výchozí limitní hodnoty emisí jsou pro osobní vozidla uváděny v g/km, u nákladních vozidel a traktorů v g/kWh.

### OSOBNÍ VOZIDLA

Původní testovací cyklus byl určen pro simulaci městského, meziměstského a dálničního provozu. Byl označován jako ECE + EUDC (někdy také jako MVEG-A cyklus). Tento cyklus je prováděn na dynamometru a skládá se ze čtyř ECE cyklů a jednoho EUDC segmentu. ECE je cyklus, který simuluje jízdní podmínky podobné v městském prostředí. Vyznačuje se nízkou rychlostí vozidla, nízkým zatížením motoru a nízkými teplotami výfukových plynů. EUDC je doplňující cyklus simulující důraznější jízdu (mimoměstskou, dálniční) s maximální rychlostí 120 km/h.

Od roku 2000 je tento cyklus pojmenován jako NEDC (New European Driving Cycle). Do procesu testování je navíc zahrnut vliv studeného startu a zahřívání motoru během městského provozu. Cyklus je užíván pro homologaci automobilů pro kategorii Euro 6. Celková doba testu probíhá 1180 s, a automobil urazí dráhu 11 023m. Průměrná rychlost činí 33,6 km/h. Automobil má však v určitých pasážích konstantní rychlost, zrychlení a decelerace jsou velice pozvolné, a tak je experty kritizován kvůli obtížné dosažitelnosti reálných jízdních podmínek. Hovoří se o jeho nahrazení novými testovacími cykly – WHLD (World Harmonized Light Duty Test Procedure) nebo RDE (Real Driving Emission). Tyto cykly pro osobní a lehká užitková vozidla jsou celosvětově rovnocenné a měly by najít využití s nástupem normy Euro 7. [15]





## NÁKLADNÍ VOZIDLA

Pro testování užitkových a nákladních vozidel splňujících normy Euro I a II se používal do roku test 2000 dle ECE R 49. Následné Euro III, IV, V byly testovány dle cyklů ESC a ETC.

ESC (European Stationary cycle) testuje motor na dynamometru ve třinácti ustálených režimech po určitou dobu, při různém zatížení v určitém režimu. Emise jsou měřeny v každém režimu a na konci zprůměrovány pomocí váhového faktoru.

ETC (European Transient Cycle) simuluje různé jízdní podmínky: městskou jízdu s častými starty a zpomaleními s maximální rychlostí 50 km/h; mimoměstský režim charakterizovaný strmým zrychlením s průměrnou rychlostí 72 km/h a dálniční cyklus s průměrnou rychlostí kolem 88 km/h. Celková doba testování je 1800 s, přičemž jednotlivé cykly mají stejný čas – 600 s.

S nástupem normy Euro VI využívá Evropská unie, USA, Japonsko a Austrálie podobných testovacích cyklů - WSHC a WHTC. Oba cykly jsou definovány celosvětovým technickým předpisem (GTR č. 4).

World Harmonized Stationary Cycle probíhá na dynamometru podobně jako ESC. Je sledem ustálených zkušebních motorových režimů. Každý z těchto režimů je definovaný určitými otáčkami motoru a točivým momentem.

World Harmonized Transient Cycle je přechodný test s dobou trvání 1800 s podobně jako u ETC. Hodnoty otáček motoru a jeho zatížení se během průběhu testu liší. Testovací cyklus začíná se studeným motorem, poté nastává pauza s vypnutým motorem. Následně je cyklus testován s motorem napůl zahřátým na provozní teplotu. Pro dosažení objektivních výsledků je vhodné systémy DPF a SCR tepelně izolovat. [16]

Měření emisí dle norem typu Euro V a VI se zdá být podobné, avšak existují zde určité rozdíly: zejména rychlost, zatížení a otáčky motoru jsou rozdílné. Měření emisí podle WHTC (Euro VI) probíhá při nižší průměrné rychlosti, zatížení a také zahrnuje studený start motoru. Tím je zkoumán vliv zahřívání výfukové soustavy na eliminaci pevných částic a oxidů dusíku, chlazení výfuku před teplým startem a vliv na účinnost přeměny NO<sub>x</sub> při selektivní katalytické redukci. K dostatečné přeměně NO<sub>x</sub> v SCR dochází při teplotách vyšších než 250°C. [16]

## MIMOSILNIČNÍ VOZIDLA

Měření emisí mimosilničních vozidel probíhá pomocí Non-Road Steady (NRSC) a Non-Road Transient cyklů (NRTC).

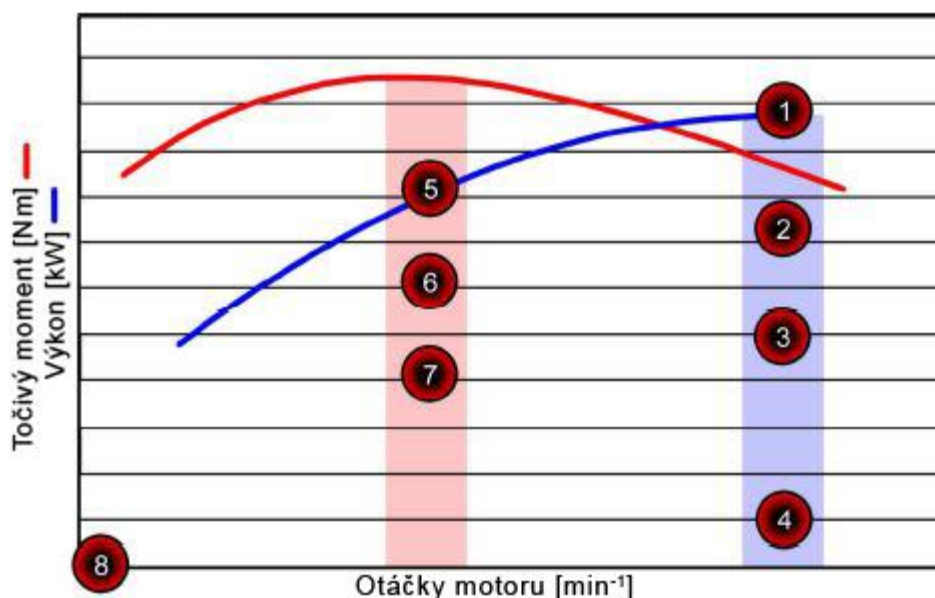
NRSC jako stacionární zkouška nesilničních strojů je využívána pro měření emisí norem Stage I, II, IIIa, ale také IIIb a IV (pro motory s konstantními otáčkami). Tento cyklus plně odpovídá normě ISO 8178-4 C1 a měření probíhá pomocí tzv. 8 bodového testu. Motor je zatěžován na zkušebním stojanu při různých otáčkách a točivém momentu, přičemž jednotlivé body mají svou váhu vyjádřenou charakteristickou konstantou, jež násobí naměřené emisní hodnoty. Přehled velikosti momentů, otáček motoru a výkonových konstant je uvedena v tab. 1. a obr. 5.



Tab. 1 Zatěžovací cyklus osmibodového testu pro měření emisí traktorového motoru

| Číslo režimu | Otáčky motoru | Zatížení | Váhový faktor |
|--------------|---------------|----------|---------------|
| 1            | Jmenovité     | 100      | 0,15          |
| 2            | Jmenovité     | 75       | 0,15          |
| 3            | Jmenovité     | 50       | 0,15          |
| 4            | Jmenovité     | 10       | 0,1           |
| 5            | Mezilehlé     | 100      | 0,1           |
| 6            | Mezilehlé     | 75       | 0,1           |
| 7            | Mezilehlé     | 50       | 0,1           |
| 8            | Volnoběžné    | -        | 0,15          |

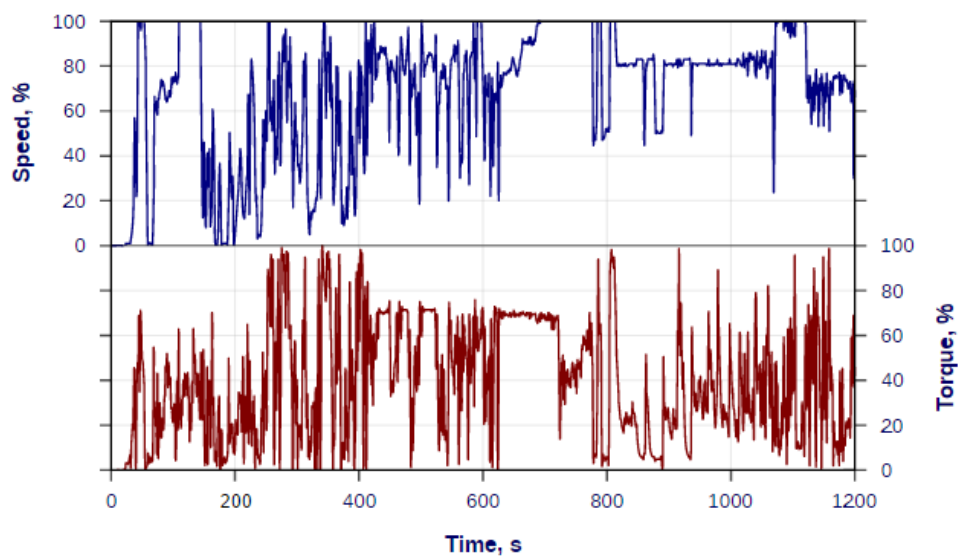
Mezilehlé otáčky jsou stanoveny na základě velikosti otáček při nejvyšším točivém momentu ve vztahu ke jmenovitým otáčkám motoru. Možnosti určení těchto otáček jsou specifikovány v normě 97/68/EC. Jednou z možností je použití otáček při maximálním točivém momentu, jestliže leží v intervalu 60 – 75 % jmenovitých otáček motoru. Každý bod je měřen minimálně 10 minut.



Obr. 5: Rozložení měřících bodů v NRSC cyklu [41]

NRSC byl vyvinut na území USA organizací EPA (Environment Protection Agency) ve spolupráci s EU. Zkoušky probíhají na motorové brzdě a cyklus je využíván pro normy Stage III a Stage IV (v Japonsku, USA odpovídá normě Tier 4).

Cyklus je prováděn dvakrát, poprvé se studeným motorem, po kterém následuje časová prodleva (cca 20 min) pro částečné vychladnutí. Následně probíhá test s polozahřátým motorem. Délka celého cyklu je 1238 s. Oproti cyklu WHTC jsou zde použity vyšší rychlosti a zatížení při testování. Výsledky testu se nepatrně liší na území USA a Evropy. Vliv studeného startu pro dosažení optimálních výsledků je pro EU 10% a pro USA 5%. [18]



Obr. 6: Grafické znázornění normalizované rychlosti a točivého momentu NRTC cyklu [18]



## 2 SPALOVACÍ PROCESY UVNITŘ VZNĚTOVÉHO MOTORU

Funkce spalovacího motoru je založena na spalování směsi paliva se vzduchem, a tedy přeměnou chemické energie paliva na mechanickou práci. Tento proces probíhá za rychlé změny teplot a tlaků uvnitř spalovacího prostoru. Oxidací hořlavých látek paliva spolu s kyslíkem obsaženým ve vzduchu a palivu dochází ke vzájemným interakcím jednotlivých složek a následnému uvolňování množství tepelné a tlakové energie. Těmito reakcemi dochází ke tvorbě plynných, kapalných i pevných složek proudících ze spalovacího prostoru sběrným a následně výfukovým potrubím ven. Některé složky výfukových plynů vznikají a reagují až zde ve výfukovém potrubí.

Na celkový proces spalování má markantní vliv zejména způsob vstřikování, kvalita dodávaného paliva, tvarové uspořádání spalovacího prostoru, ale také tepelné a vírové vlastnosti spalovacího prostoru.

Díky své vyšší účinnosti si vznětové motory získaly nemalou oblibu. Oproti zážehovým motorům je výkon řízen kvalitativně. Množství nasáté směsi (paliva se vzduchem) není omezeno škrticí klapkou. K největšímu rozdílu v účinnostech dochází v oblasti nízkého zatížení motoru. Z termodynamického hlediska je žádoucí rychlé zapálení směsi uvnitř spalovacího prostoru.

Na konci komprese je palivo vstříknuto do válce, kde dochází během krátkého časového intervalu k promíchání, vypaření a vzplanutí. Procesy se dějí souběžně, a tak je značně ovlivněna rychlost vznícení a šíření plamene. Nafta jako palivo oproti benzínu obsahuje těžší uhlovodíky (vyšší uhlíkové číslo, složitější molekuly paliva), které potřebují vyšší teplotu ke vznícení a delší dobu pro správné vypaření uvnitř spalovacího prostoru. Je tedy žádoucí vytvoření co nejmenších kapiček paliva, které jsou docíleny díky vysokým vstřikovacím tlakům, v dnešní době výhradně pomocí systémů common rail. Pro dosažení lepší účinnosti promíchání směsi je ideální vstříkovat kapičky do vířivého prostředí vytvořeného vlivem optimální geometrie spalovacího a sacího potrubí. Tím se částičky paliva se vzduchem dostanou i do míst, kam trysky vstřikovače nemíří.

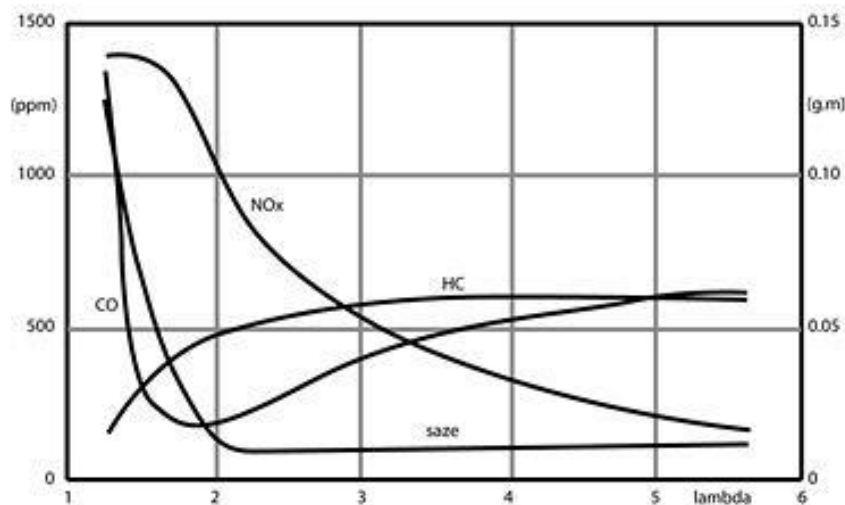
V důsledku nedokonalého spalování vznikají saze – ty jsou v moderních vozech zachycovány filtrem pevných částic (DPF), který se čas od času musí regenerovat. Činnost regenerace DPF probíhá spalováním uhlíku v podobě sazí. Pokud teplota výfukových plynů přesáhne hodnotu 200°C, začne ve filtru probíhat nízkoteplotní regenerace - oxidace sazí a redukce dusíku. Tato regenerace probíhá v rozmezí teplot od 200 - 300°C. K aktivní regeneraci DPF dochází za teplot výfukových plynů vyšších 500°C. Z důvodu rychlejšího ohřevu výfukových plynů a tím rychlejšího nastartování reakcí se filtr umísťuje co nejblíže výfukovým svodům. [11]

### 2.1 SLOŽENÍ VÝFUKOVÝCH PLYNŮ

Výfukové plyny jako heterogenní směs chemických látek vznikají při spalování uhlovodíkových paliv uvnitř spalovacích motorů. Jednotlivé prvky vznikají chemickými reakcemi kyslíku s dalšími složkami obsaženými v palivu. Jejich nejvýznamnější složkou je dusík (N<sub>2</sub>). Za optimálních podmínek (dokonalým spalováním) probíhá spalování uhlovodíkových sloučenin za vzniku oxidu uhličitého (CO<sub>2</sub>) a vody (H<sub>2</sub>O).



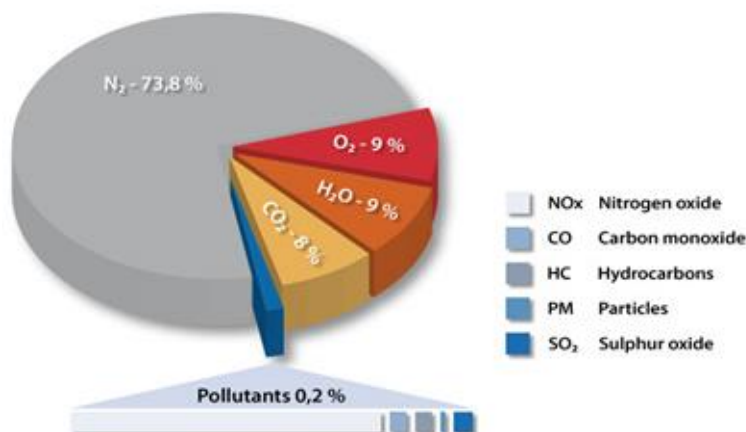
Vznětový motor však pracuje při nedokonalém spalování, a to za různých režimů – s malým přebytkem vzduchu ( $\lambda > 1$ ), při plném zatížení motoru ( $\lambda > 1,3$ ), v oblasti částečného zatížení a při volnoběhu – zde s velkým přebytkem vzduchu ( $\lambda > 8$ ).



Obr. 7.: Vliv součinitele přebytku vzduchu  $\lambda$  na složení emisí u vznětového motoru [19]

Procesem nedokonalého spalování jsou emitovány do ovzduší také další složky výfukových plynů – oxid uhelnatý (CO), nespálené uhlovodíky (HC), oxidy dusíku (NO<sub>x</sub>), oxidy síry (SO<sub>x</sub>) a pevné částice (PM – z angl. Particulate Matter). Ty jsou složeny ze sazí s usazenými nečistotami (např. oxidy kovů, palivové přísady, maziva, sloučeniny síry). [16]

Zdraví škodlivé emise představují jen velmi malý podíl na celkových emisích moderních spalovacích motorů. V ideálním případě je to pouze 0,2 % ze složení výfukových plynů u vznětových a 1,1 % u zážehových motorů, jak je patrné z obr. 8. Je však důležité, aby se i poměrně malé množství emisí dalo zredukovat v co největší míře. [17]



Obr. 8: Složení výfukových plynů vznětového motoru [17]



## 2.2 JEDNOTLIVÉ ŠKODLIVINY VÝFUKOVÝCH PLYNŮ

### OXID UHELNATÝ (CO)

Oxid uhelnatý je bezbarvý, prudce jedovatý hořlavý plyn, bez zápachu a chuti. Vzniká spalováním uhlovodíkových paliv za nízké teploty a nedostatečného přístupu vzduchu (kyslíku). Jeho smrtelná koncentrace je okolo 500 ppm, při nižších koncentracích okolo 50 – 100 ppm způsobuje bolesti hlavy, závratě a zvracení. Při běžné koncentraci v ovzduší probíhá přeměna na oxid uhličitý (CO<sub>2</sub>). CO se váže v krvi na hemoglobin, vytváří karboxyhemoglobin (COHb) a znemožňuje přesun kyslíku z plic do krevního oběhu.

Množství emisí CO u vznětových motorů jsou většinou malé, jelikož motor pracuje v režimu chudé směsi ( $\lambda > 1$ ). Jeho vyšší koncentrace však nastávají za nepříznivých podmínek, například při studeném startu motoru. Teploty ve spalovacím prostoru nejsou tak vysoké, aby palivo stačilo dostatečně zoxidovat a dojít k přeměně na CO<sub>2</sub>. Jako další důvod zvýšených emisí CO lze považovat konstrukční chyby, či závady ve spalovacím prostoru.

V dnešní době jsou koncentrace CO ve výfukových plynech poměrně zanedbatelné, avšak pro lepší průběh oxidace CO je používán oxidační katalyzátor – DOC (Diesel Oxidation Catalyst). Tento katalyzátor mimo jiné spaluje i organické částice zkondenzované na sazích a redukuje tak jejich výskyt až o 30 %, a navíc se prodlužuje interval regenerace DPF. [13]

### OXID UHLIČITÝ (CO<sub>2</sub>)

Oxid uhličitý je bezbarvý plyn, bez chuti a zápachu. Produkuje jej vše, co hoří a dýchá. Člověku není nijak jedovatý, avšak značnou mírou se podílí na vzniku skleníkového efektu. Množství emitovaného CO<sub>2</sub> do ovzduší je přímo úměrné spálenému palivu. Snaha snižování emisí CO<sub>2</sub> je možná pouze se snižováním spotřeby paliva. Oxid uhličitý není normami nijak omezován. [13]

### OXID SIŘIČITÝ (SO<sub>2</sub>)

Oxid siřičitý je bezbarvý, štiplavý, člověku jedovatý plyn. Vzniká při spalování síry, která je obsažena naftě. Množství oxidu siřičitého emitovaného ve výfukových plynech není omezeno přímo legislativně, ale normy Evropské unie stanovují maximální množství síry obsažené v motorové naftě. Mezní hodnoty jsou v motorové naftě vyšší než u benzínu.

### OXIDY DUSÍKU (NO<sub>x</sub>)

Mezi oxidy dusíku se řadí oxid dusnatý (NO) - bezbarvý plyn, bez zápachu, a oxid dusičitý (NO<sub>2</sub>) - červenohnědý štiplavě zapáchající plyn. Vznikají hořením směsi paliva za vysokých teplot s dostatečným přístupem vzduchu (hlavně O<sub>2</sub>). Dochází přitom k oxidaci vzdušného dusíku N<sub>2</sub> na NO<sub>x</sub>. Tento proces probíhá zejména u vznětových motorů, popřípadě u zážehových s přímým vstřikováním, které pracují s chudou směsí. Pro člověka jsou nebezpečné v případě styku s dýchacími cestami – při velkých koncentracích způsobují záněty sliznicí, průdušek, otoky plic.



Koncentrace  $\text{NO}_x$  se liší dle podmínek vzniku – prvotní produkt spalování je  $\text{NO}$ . Při dostatečném množství volného kyslíku oxiduje v atmosféře na  $\text{NO}_2$ . Oxid dusičitý jako takový zaujímá jen desetinu z celkového množství emitovaných  $\text{NO}_x$ , má však výrazný podíl na vznik městského smogu. Sloučeniny oxidu s těkavými organickými látkami za působení slunečního záření reagují v atmosféře s vodou a vracejí se na zemský povrch v podobě kyselých dešťů.

Oxid dusný ( $\text{N}_2\text{O}$ ) se nezapočítává do celkového množství emitovaných  $\text{NO}_x$  a vzniká v konstrukčně špatných katalyzátorech. [11]

Z hlediska produkce emisí je sledováno množství oxidů dusíku z **tepelných procesů**, které vznikají hořením dusíku při vysokých teplotách a **palivových procesů** (obsažených v palivu).

Snížení produkce  $\text{NO}_x$  lze dvěma způsoby:

### Úprava spalovacího procesu

Úprava spalovacího procesu u vznětových motorů je provedena snížením spalovací teploty pomocí systému EGR, či pozdějším vstřikem paliva. V tomto případě kapičky paliva nestačí ideálně prohořet a do výfukového traktu se dostávají nespálené částice v podobě sazí, které je posléze nutno odstranit pomocí filtru pevných částic. Nižší teploty znamenají pokles tlaku ve válci, a tedy menší kroutící moment a výkon. V tomto režimu výrazně roste podíl sazí ve výfukových plynech. Tento princip úpravy spalovacího procesu se využívá zejména v režimu částečného zatížení.

### Úprava výfukových plynů (aftertreatment)

Proces úpravy výfukových plynů probíhá za pomoci systému SCR (Selective Catalytic Reduction) ve výfukovém potrubí. Motor je naladěn tak, aby teplota spalování dosahovala vysokých hodnot, při kterých je produkce sazí co nejmenší. Na druhou stranu výrazně rostou emise  $\text{NO}_x$ , které jsou posléze eliminovány systémem SCR.

$\text{NO}_x$  vznikají za dostatečně vysoké teploty v konečné fázi hoření, kdy je většina paliva již spáleného, ale stále je k dispozici dostatečné množství volného kyslíku. Dle literatury je jednodušší a ekonomičtější provozovat motor v režimu s menší produkcí  $\text{NO}_x$  a větší produkcí sazí, které následně zredukuje filtr pevných částic oproti použití systému SCR. Výraznější snížení  $\text{NO}_x$  emisí u soudobých motorů lze však dosáhnout pouze katalytickou redukcí, tj. vstřikováním močoviny do výfukových plynů. V Evropě známé pod obchodním názvem AdBlue, v USA označené jako DEF – Diesel Exhaust Fluid. Z důvodu přísnějších emisních limitů se používají systémy EGR a DPF spolu v kombinaci s SCR současně.

### UHLOVODÍKY (HC)

Jako uhlovodíky se jsou souhrnně označovány nespálené nebo částečně spálené části paliva, produkty jejich následné oxidace s  $\text{NO}_x$  a částice vzniklé termochemickými reakcemi během spalování. Poslední zmíněné jsou asi největším problémem z hlediska znečištění ovzduší. Jejich reakce s  $\text{NO}_x$  v atmosféře za podpory slunečního záření vytváří tzv. fotochemický smog. Ten obsahuje množství organických sloučenin, které dráždí oči a dýchací systém.



Některé z nich jsou pro člověka také toxické. Zvláště pak ty, jež obsahují karcinogenní benzen.

Další skupinou uhlovodíků obsažených ve spalínách jsou polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU). Mají bílou či nažloutlou barvu, jsou špatně rozpustné ve vodě a mají karcinogenní účinky. Řadí se mezi ně: naftalen, acenaften, acenaftylen, antracen, fluoranten, fluoren a pyren. [10]

I přes malé množství emisí HC je ve výfukovém traktu použitý oxidační katalyzátor. Tento katalyzátor dodatečně oxiduje reakci HC společně s CO.

### **PEVNÉ ČÁSTICE (PM)**

Pevné částice, označovány také jako saze (emitovaný černý kouř), jsou částice pevného a kapalného (zkondenzovaného) charakteru velké několik nanometrů až po 0,5 mm. Tvoří je spálené nebo částečně spálené částice obsažené v palivu a mazivu, popř. vznikají otěrem a opotřebením částí uvnitř motoru. Obsahují množství nebezpečných aromatických složek – PAH (PolyAromaticHydrocarbon), které jsou pro člověka vysoce karcinogenní. Normami omezená je pouze hmotnost zachycených sazí, jejich původ a mechanismus vzniku nikoliv. [13]

#### **Vznik sazí:**

Vznětový motor pracuje v režimu chudé směsi, ale při neideálním spalování vznikají lokálně velmi bohaté oblasti paliva. Vstříknuté palivo do spalovacího prostoru se musí vlivem teploty a tlaku rovnoměrně vypařit, aby došlo k jeho dobrému prohoření při plynné fázi. K vypařování dochází na povrchu, kapičky paliva se stále zmenšují a jeho nejtěžší uhlovodíkové sloučeniny se vypařují až naposledy. Za nízké teploty hoření a nedostatečného času potřebného k vypaření nedochází k ideálnímu prohoření a tyto sloučeniny proudí výfukovým potrubím ve formě sazí do ovzduší. Při hoření s přebytkem vzduchu se emise CO u vznětových motorů skoro nevyskytují, avšak za vyšších spalovacích teplot výrazně roste produkce NO<sub>x</sub>.

Saze se tvoří ve formě kuliček uhlíku, které se formují během spalovacího procesu. Tyto kuličky mají průměr okolo 50 nm a vytvářejí spolu delší řetězce s délkou 0,1 – 1 μm. Uhlík ve formě kuliček absorbuje během ředění vzduchem různé části výfukových plynů, částičky kovů z opotřebením motoru, sloučeniny síry z paliva, aditiva, a také na nich kondenzují páry uhlovodíků z paliva i motorového oleje. K dostatečnému odpaření těžkých uhlovodíků lze docílit vyššími teplotami s tzv. předvstříkem a pomocí turbodmychadla. [11]

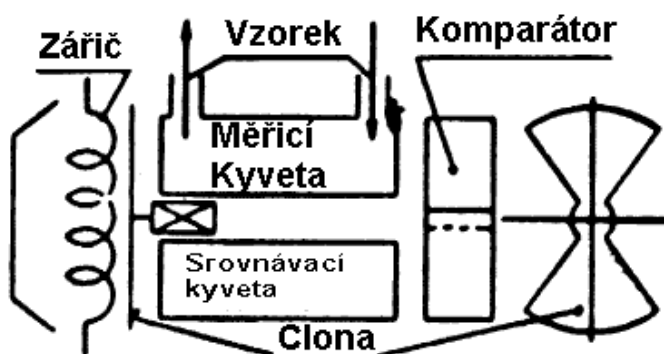


## 2.3 METODY MĚŘENÍ EMISÍ VÝFUKOVÝCH PLYNŮ

Mezi významnou součástí experimentální etapy vývoje spalovacích motorů patří analýza obsahu spalin. Emise jsou sledovány z etických, a hlavně z legislativních důvodů při následné homologaci vozidla. Mimo jiné složení emitovaných spalin je dobrý ukazatel kvality spalování.

### 2.3.1 INFRAČERVENÁ METODA

Tato nedispersní infračervená spektroskopie, jak je občas nazývána, se používá pro měření obsahu CO a CO<sub>2</sub> u zážehových motorů. Měření je založeno na vlastnosti pohlcování infračerveného záření emisemi výfukových plynů. Každý plyn absorbuje určitou vlnovou délku záření. Tato metoda je vhodná pro měření koncentrace CO a CO<sub>2</sub>. Hodnoty obsažených HC jsou zde pouze orientační. [6]

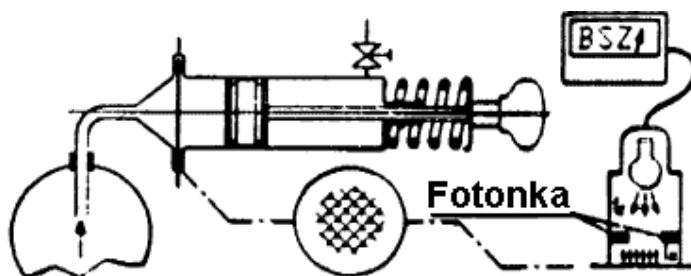


Obr. 9: Schéma infraanalyzátoru výfukových plynů [6]

### 2.3.2 ANALÝZA PEVNÝCH ČÁSTIC VE VÝFUKOVÝCH PLYNECH

K měření množství pevných částic u vznětových motorů se používá několik různých metodik: Filtrační metoda, Opacimetrie a Gravimetrie. Analýza pevných částic (kouřivosti) motoru je tzv. ukazatel kvality procesu spalování.

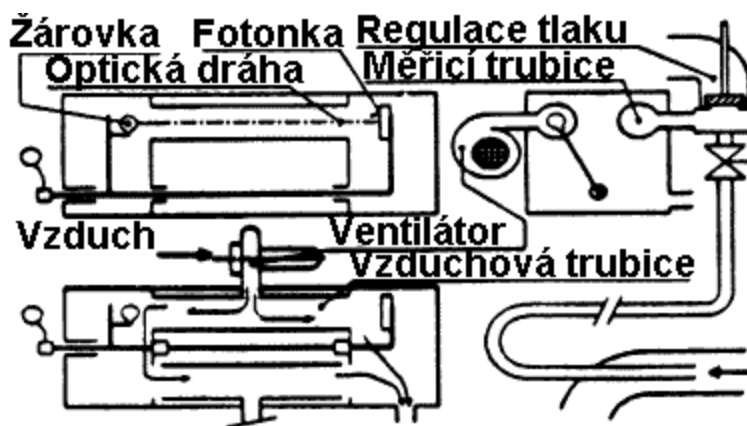
**Filtrační metoda** je založena na zachycování výfukových plynů a pevných částic na filtračním papírku. Kontaminovaný papírek se dále opticky vyhodnocuje reflektivním fotometrem citlivým na odraz světla od plochy sazí.



Obr. 10: Schéma filtračního kouřoměru Bosch [6]



**Opacimetrie** slouží k měření kouřivosti motoru díky absorpci světla sloupcem výfukových plynů definované délky (430 nm). Měřicí přístroj se nazývá opacimetr. Při měření je nutné žárovku s fotočlánkem přesunout do osy trubice se spalinami k odečtení hodnoty kouřivosti a výpočtu absorpčního koeficientu dle stupnice. Pro dosažení optimálních výsledků měření je nutné neustálé obtékání čerstvého vzduchu kolem žárovky i fotočlánku pro zamezení jejího znečištění. [6]



Obr. 11: Schéma opacimetru Hartridge [6]

Princip gravimetrie spočívá v prosátí měřeného vzorku přes filtrační element, jež je složen ze skelných vláken potažených teflonem (Pallflex). Po proběhlém měření se zvaží filtrační element se vzorkem spalin a odečte se hmotnost samostatného filtračního elementu. Výsledný rozdíl udává hmotnost pevných částic. [6]

Metody měření pevných částic se neustále vyvíjí, avšak stále jsou založeny na principech jako zmíněné metody – změna intenzity nebo absorpce světla.



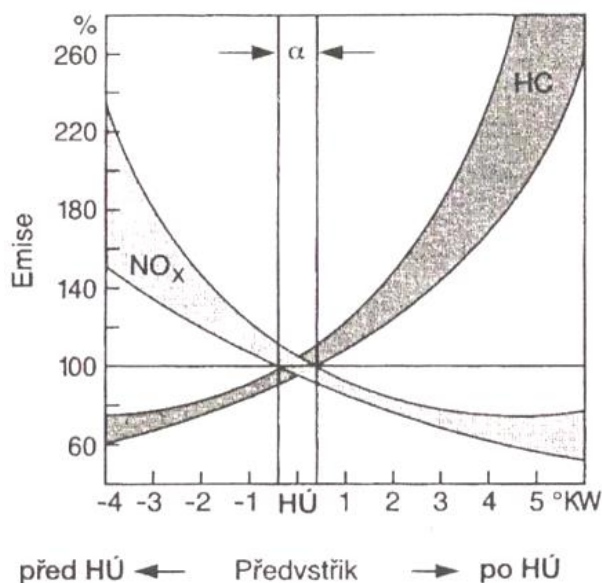
### 3 SNIŽOVÁNÍ EMISÍ VZNĚTOVÉHO MOTORU

Redukce celkové hmotnosti, zlepšení aerodynamických vlastností, valivého odporu vozidla – to vše jsou prostředky kterými lze do určité míry snížit produkci emisí. Pro dosažení mezních hodnot stále se zvyšujících nároků na emisní limity je zapotřebí souběžně sladit procesy uvnitř i vně motoru. U vznětových motorů je pro splnění náročných norem pozornost zaměřena především na emise pevných částic, stejně tak jako snížení emisí oxidu dusíku. S redukcí emitovaných škodlivin je spjatý i trend snižování produkovaného oxidu uhličitého a s tím související snižování spotřeby paliva.

Prostředky ke snižování emisí lze rozdělit na aktivní a pasivní. Aktivní prostředky ovlivňují proces spalovacího procesu uvnitř motoru, pasivní zmenšují množství vzniklých škodlivin ve výfukových plynech při jejich cestě ven z motoru. Pro dosažení nejlepší účinnosti odstranění škodlivých složek výfukových plynů je zapotřebí aplikace aktivních i pasivních prostředků současně.

#### 3.1 AKTIVNÍ PROSTŘEDKY

Tento princip je založen na optimalizaci přípravy směsi a procesu spalování. Při použití kvalitnější směsi paliva dochází k jejímu rovnoměrnějšímu prohoření, účinnost paliva se zvýší a klesá jeho spotřeba, a také emise pevných částic a nespálených uhlovodíků. Naopak spalováním kvalitnější směsi paliva narůstají teploty spalování a s tím související větší produkce emisí oxidů dusíku. Proces tvorby emisí  $\text{NO}_x$  funguje přesně opačně než spalování za vzniku pevných částic. Je tedy zapotřebí tyto emise oxidů dusíku současně s dalšími prostředky úpravy spalín eliminovat.



Obr. 12: Schéma vzniku  $\text{NO}_x$  a HC emisí v závislosti na předvstříku paliva



Vstřikovací zařízení, jeho provozní parametry a způsob řízení, přeplňování, tvar spalovacího prostoru, tvar sacích a výfukových kanálů, druh a časování rozvodu, kompresní poměr atd. - to vše jsou podstatní činitele ovlivňující průběh tvoření a samostatné vznícení směsi. Jejich výsledný vliv na množství emisí nelze přesně specifikovat. Konstruktivní řešení jednotlivých pohonných jednotek jsou vykoupena určitým kompromisem mezi výkonem, cenou, spotřebou paliva a množstvím emisí.

### 3.1.1 TVORBA SMĚSI VZNĚTOVÉHO MOTORU

Vznětové motory jsou charakteristické kvantitativní regulací výkonu, tzn. dávkování paliva probíhá v širokém rozsahu směšovacího poměru palivo – vzduch, který by měl být v ideálním případě homogenní. V dnešní době převládá přímý vstřik paliva do spalovacího prostoru vytvořeném ve dnu pístu. Přímé vstřikování je více účinnější a ekonomičtější oproti dříve používanému nepřímému.

Těžší uhlovodíky obsažené v motorové naftě mají menší odpařivost, z toho důvodu je palivo vstřikováno koncem kompresního zdvihu do spalovacího prostoru. Důsledkem vysoké teploty stlačeného vzduchu uvnitř válce (800 - 900°C) se jemně rozprášené palivo odpaří a vytvoří se vzduchem hořlavou směs a dojde k jeho vznícení. [12]

Jedním z důležitých faktorů ovlivňující teplotu spalování, a tedy vzniklé množství emisí oxidů dusíku je kompresní poměr. Jeho snížením lze dosáhnout poklesu spalovací teploty a zmiňovaných oxidů, avšak na druhou stranu se sníží termická účinnost motoru a tím se zhorší start motoru v chladných podmínkách. Kupříkladu dnes produkované vznětové motory koncernu VW používají nižší kompresní poměr (16:1) oproti starším koncernovým motorům (18,5:1) a produkují nižší hodnoty emisí NO<sub>x</sub>. [7]

Jako další vlivy na tvorbu směsi a průběh spalování lze označit dobu a průběh vstřiku, počátek vstřiku, vstřikovací tlak, množství vstříknutého paliva, intenzitu víření náplně, množství vzduchu a jeho teplotu.

### 3.1.2 VSTŘIKOVÁNÍ PALIVA

Čím je vstříknutá směs vzduchu a paliva homogennější, tím je dosaženo vyšší účinnosti spalování. Je žádoucí, aby palivo bylo do prostoru rozprášeno co nejjemněji. To je realizováno vstřikovači, jež pracují za vysokých vstřikovacích tlaků – je tak umožněna přesná regulace průběhu vstřikování. Paprsek vstříknutého paliva by měl dosáhnout i do těch nejvzdálenějších míst spalovacího prostoru. Na druhou stranu by palivo nemělo dopadat na povrch stěn válce. Důsledkem toho rostou emise HC a pevných částic. Průběh vstřiku a jeho počátek značně ovlivňuje množství emisí výfukových plynů a spotřebu paliva. [1]

Zpoždění počátku vstřikování a s tím spojené nižší spalovací teploty (nárůst teploty výfukových plynů) vedou ke snížení emisí NO<sub>x</sub>. Tohoto jevu se využívá k regeneraci filtru pevných částic. Například zpoždění o 2°otočení klikové hřídele zvyšuje teplotu výfukových plynů o 20°C. Naopak dřívější vstřik způsobuje zvýšení tlaku ve válci.

Regulace množství vstříknutého paliva je pro dosažení co nejlepšího průběhu spalování velice důležitá. Před hlavním vstřikem dochází k jednomu i více předvstřikům malého množství



paliva pod malým tlakem. Tímto jevem dochází ke zvýšení teploty, nepatrnému zvýšení tlaku uvnitř válce a ulehčuje se tak vznícení paliva vstříknutého během hlavního vstříku. Použitím předvstříku se napomáhá ke zkrácení tzv. průtahu vznícení (prodleva mezi počátkem vstříku a vznícením směsi), pozvolnému nárůstu tlaku uvnitř válce a následně jemnějším chodem motoru. Při vstříku většího množství paliva bez použití předvstříku by došlo ke skokovému nárůstu tlaku, což má za následek tvrdý chod motoru a zvýšení emisí  $\text{NO}_x$ . Po hlavním vstříku probíhají v systému ještě další dva vstříky, tzv. dostřiky, jež zvyšují teplotu výfukových plynů a napomáhají tak regeneraci filtru pevných částic. [1]

Moderní vysokotlaké vstřikovací systémy Common Rail pracují s tlaky až 2500 barů a umožňují až šest vstříků paliva během jednoho cyklu. Celý systém je plně variabilní a umožňuje naprogramování průběhů vstřikování na různé provozní režimy motoru [7]

### 3.1.3 VÍŘENÍ NÁPLNĚ

Dalším důležitým faktorem pro ideální prohoření směsi je její rotace ve válci během sání a komprese. Reagující látky se lépe promísí a napomáhají ke stejnoměrnému rozložení teplot po stěnách spalovacího prostoru. Víření náplně na druhou stranu zvyšuje spotřebu energie a způsobuje větší tepelné ztráty. Proces víření je důležité optimalizovat vhodným tvarem sacích kanálů v hlavě válců, geometrií dna pístů a v neposlední řadě zharmonizovat pohyb vzduchu s průběhem vstřikování paliva. V případě zkřížení paprsků vstřikovaného paliva pak vzniká riziko nehomogenity směsi vedoucí k nárůstu emisí CO, HC a PM.

Postupným vývojem se z hlediska množství emisí jeví jako nejideálnější použití přímého vstřikování se čtyřventilovou technikou na válec, dva sací a dva výfukové ventily. Sací kanály se používají přímé, tangenciální či spirálové, jež umožňují vytvoření intenzivního radiálního víru. Vstřikovač je nejčastěji umístěn symetricky, centrálně nad střední prohlubni dna pístu. Vhodná geometrie dna pístu je rovněž důležitý faktor během přípravy náplně a při průběhu hoření směsi. S přímým vstřikováním se používají výhradně prstencové (toroidní) spalovací prostory. [1,3]

### 3.1.4 PŘEPLŇOVÁNÍ

Přeplňování vznětových motorů je realizováno pomocí turbodmychadel poháněných výfukovými plyny. Může být jednostupňové, popřípadě dvoustupňové. Význam přeplňování spočívá v přívodu většího množství vzduchu ke spalování a zvýšit tak vstřikovanou dávku paliva. Během stlačování roste teplota vzduchu, proto je plnicí vzduch ochlazován v mezichladiči za kompresorem. Tím dochází ke zvětšení objemové účinnosti. Vyšší teploty spalování způsobené vyšším plnicím tlakem vedou k produkci menšího množství CO, HC a PM. Negativně se však odráží na emisích z pohledu vzniku  $\text{NO}_x$ .

Ve srovnání s motory nepřeplňovanými mají přeplňované vyšší výkon a již zmíněné menší emisní hodnoty.

Dalším důvodem použití přeplňování je dosažení maxima točivého momentu již za nízkých otáček motoru. Je proto nutná regulace přeplňování. Mezi limitní faktory přeplňování patří



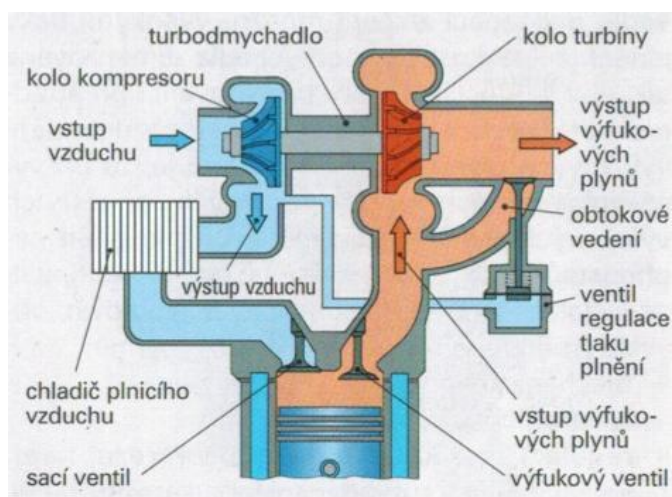
maximální spalovací tlaky, spalovací teploty, maximální otáčky rotorové skupiny turbodmychadla, ale také teploty výfukových plynů před turbínou.

Jako nejčastější způsob regulace se využívá:

- Odpuštění výfukových plynů před turbínou (Waste-gate)
- Natáčení lopatek statoru u turbodmychadla s variabilní geometrií (VNT)
- Změna šířky statoru turbíny (VGT)

### ODPOUŠTĚNÍ VÝFUKOVÝCH PLYNŮ PŘED TURBÍNOU

Tento způsob se používá u turbodmychadel s pevnou geometrií turbínového kola. Regulace probíhá pomocí obtokového ventilu (ozn. Waste-Gate) s membránou a pružinou, popř. elektromagneticky. Ventil je vřazen mezi kanál pro odběr tlaku za kompresorem a membránou pro vychýlení odpouštěcí klapky. Pro tuto regulaci je nutné použití malé turbíny, aby při otáčkách počátku regulace motoru (např. otáčky maximálního kroutícího momentu) dodával kompresor maximální plnicí tlak. Činnost ventilu závisí na tlaku v plnicím či výfukovém potrubí. [20]



Obr. 13: Schéma obtokového ventilu [20]

### NATÁČENÍ ROZVÁDĚCÍCH LOPATEK TURBÍNY

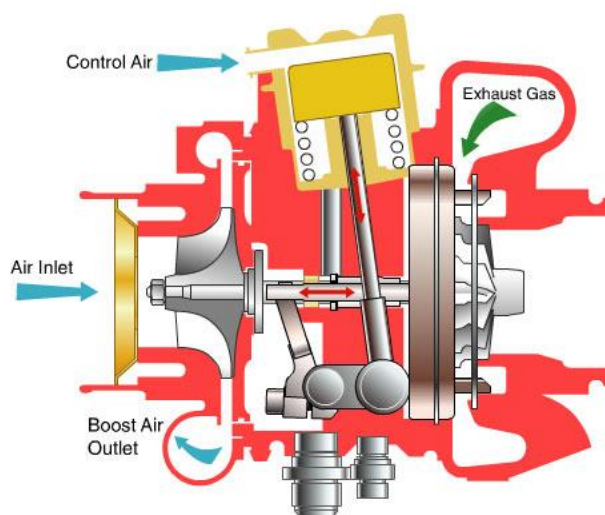
Tímto konstrukčním řešením VNT (Variable Nozzle Turbine) se reguluje plnicí tlak turbodmychadla plynulou změnou úhlu náběhu a rychlosti zplodin vstupujících na kolo turbíny. Turbínou protéká plný hmotnostní tok spalin a musí být navržena na maximální průtok. Proud výfukových plynů je usměrňován, a tak turbína pracuje nezávisle na okamžitém objemu výfukových plynů dle otáček motoru. Ve srovnání s regulací pomocí obtokového ventilu jsou při regulaci pomocí natočení lopatek turbíny dosaženy větší hodnoty točivého momentu při nízkých hodnotách otáček motoru. [7,8]



Obr. 14: Funkce VNT [21]

### ZMĚNA ŠÍŘKY STATORU TURBÍNY (VARIABLE-GEOMETRY TURBOCHARGER)

Tato zdánlivě jednoduchá regulace probíhá změnou průtočné plochy statoru axiálně posuvným rozváděcím kolem s lopatkami. Mechanismus je ovládán pneumaticky, či dnes ve většině případů pomocí elektrických akčních členů. Výhodou je využití velkého množství energie díky průchodu celého hmotnostního toku výfukových plynů turbínou. Rozváděcí lopatky jsou nepohyblivé a jsou optimalizovány pro ideální úhel náběhu proudu na oběžné kolo. To platí v celém rozsahu regulace. [9]

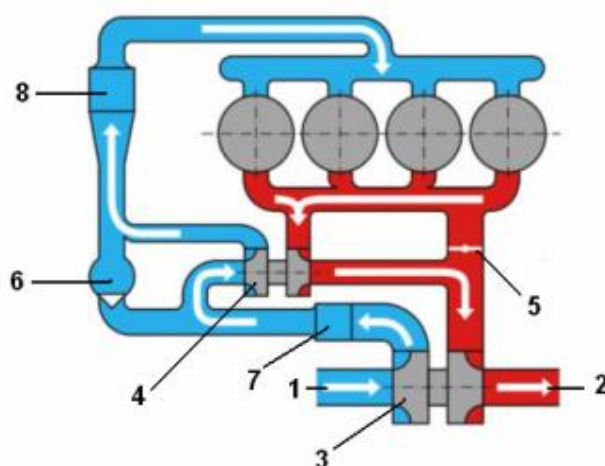


Obr. 15: Schéma VGT [22]



## DVOUSTUPŇOVÉ PŘEPLŇOVÁNÍ (TWIN TURBO, BI-TURBO)

Přeplňování dvěma turbodmychadly zvyšuje střední efektivní tlak a účinnost motoru, jelikož umožňují dodávku vyššího přetlaku plicního vzduchu než turbodmychadlo jedno. Při takové zástavbě jsou použity buď dvě rozdílně velká, sériově řazená (Twin-Turbo), nebo stejně velká turbodmychadla (BiTurbo) s použitím dvou mezichladičů stlačeného vzduchu pro dosažení optimální teploty plicního vzduchu. Sériově zapojená turbodmychadla jsou regulována pomocí obtokového ventilu s klapkou. Při použití dvou stejných turbodmychadel je práce přeplňování rozdělena současně mezi obě turbodmychadla. Každé z nich je poháněno polovinou výfukových plynů z motoru a stlačený vzduch je smíšen ve společném sacím potrubí. Sériově zapojená turbodmychadla snižují tzv. “turboefekt“ (zpoždění turbodmychadla) bez ohrožení výstupního výkonu motoru.



Obr. 16: Schéma dvoustupňového přeplňování, sériově uspořádaná turbodmychadla [7]

- 1) Nasávaný vzduch, 2) Výstup spalin, 3) Nízkotlaké turbodmychadlo, 4) Vysokotlaké turbodmychadlo, 5) Obtokový ventil výfukového potrubí, 6) Obtokový ventil plicního vzduchu 7) Nízkotlaký mezichladič, 8) Vysokotlaký mezichladič

## 3.2 PASIVNÍ PROSTŘEDKY

### 3.2.1 RECIRKULACE VÝFUKOVÝCH PLYNŮ

Princip recirkulace výfukových plynů, označován také jako EGR (Exhaust Gas Recirculation), je založen na mísení čerstvého nasávaného vzduchu se vzniklými výfukovými plyny a jejich společném spalování ve směsi s palivem. Dochází tak ke zmenšení koncentrace kyslíku, rychlosti hoření a snížení hodnoty maximální teploty čela plamene, což vede k významnému poklesu emisí oxidů dusíku. Se snižující se spalovací teplotou exponenciálně klesá koncentrace  $\text{NO}_x$ . Recirkulované plyny se spalování neúčastní, chovají se ve směsi inertně, absorbují část uvolněného tepla spalováním a tím dochází z termodynamického hlediska ke zvětšení měrné tepelné kapacity směsi. Je však nutné předpokládat s určitým chemickým vlivem na proces spalování. Podíl recirkulovaných plynů zpět do sání činí 10 – 20 % z celkového objemu nasátého vzduchu a emise  $\text{NO}_x$  lze touto metodou snížit až o 40 %. [1,10]



Samostatnou recirkulací je zmenšováno také množství emitovaných výfukových plynů. Na druhou stranu nižší teploty spalování a menší koncentrace kyslíku znamenají menší účinnost spalování. Proto u soudobých motorů dochází k ochlazování těchto recirkulovaných plynů, aby horké spaliny nesnižovaly objemovou účinnost motoru. Snížením teploty lze docílit větší hustoty plynů, čímž lze dosáhnout recirkulace většího objemu spalin.

Recirkulaci lze z hlediska přívodu plynů zpět do spalovacího prostoru rozdělit na vnitřní a vnější. Vnitřní recirkulaci lze použít jen u zážehových motorů s variabilně řízeným rozvodovým mechanismem, jelikož při překrytí ventilů dochází úniku části spalin ze spalovacího prostoru zpět do sacího potrubí, kde je během dalšího sacího zdvihu vrácena zpět do válce, promíchána s novou směsí a následně spálena. Fázovým natočením vačkových hřídelí a zdvihem ventilů lze regulovat toho množství plynů zůstávající ve válci. [3, 7]

U soudobých přeplňovaných vznětových motorů se využívá řízené vnější recirkulace s chlazením výfukových plynů. Při nízkém a částečném zatížení motoru se pomocí zpětného vedení výfukové plyny přivádí zpět do sání a následně spalovacího prostoru. Objem recirkulovaných spalin je určován řídicí jednotkou a jejich množství závisí na provozním režimu motoru. Do určitého poměru spalin (< 40 %) a plnicího vzduchu má objem spalin pozitivní vliv na přeměnu energie a snižování emisí NO<sub>x</sub>. Maximální možná recirkulace je na druhou stranu omezena hranicí, při které dochází k nárůstu emisí pevných částic. Při dosažení určitého poměru dochází k nedostatku kyslíku vedoucí nedokonalému spalování, a tedy značnému vzniku CO, HC a sazí. [12]

Zpětné vedení s ventilem EGR je umístěno mezi výfukovým a sacím potrubím. Řídicí jednotka motoru ovládá ventil podle otáček, zatížení, teploty chladící kapaliny, nasávaného vzduchu a dalších parametrů. Při plném výkonu, nebo například za studeného startu bývá zcela uzavřen.

Výhodou EGR systému je nízká zástavbová hmotnost, jednoduchá instalace a absence aditiv pro jeho funkci. Negativní stránkou je však určité snížení výkonu motoru díky menšímu množství kyslíku při spalování, zanášení sacího potrubí a spalovacího prostoru nečistotami výfukových plynů. Tím, že recirkulované plyny nejsou z hlediska emisí nijak upraveny, jsou značně agresivní. Látky obsažené ve spalinách – saze, sirné kondenzáty či karbonové usazeniny se usazují v okruhu zpětného vedení, snižují jeho průchodnost, zkracují životnost částí motoru, nebo značně vystavují degradaci pohyblivé části motoru. Problém také může nastat i se zajištěním dostatečného tlakového spádu recirkulovaných plynů. Tento nedostatek lze však řešit regulací pomocí turbodmychadla či škrcením výfukových plynů [7,10,11]

Z pohledu odběru spalin z výfukového potrubí se EGR dělí na vysokotlakou a nízkotlakou recirkulaci.

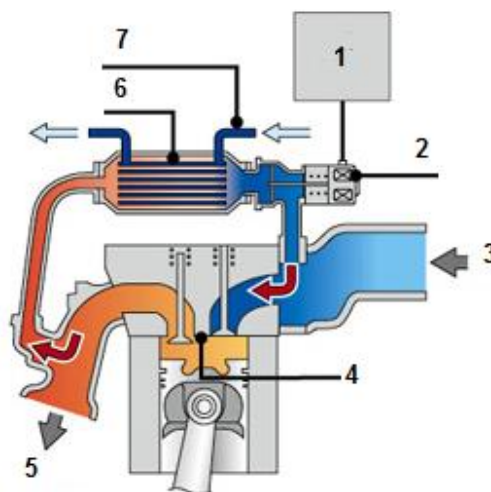
### VYSOKOTLAKÁ RECIRKULACE

Systém vysokotlaké EGR je umístěn ve vysokotlaké oblasti motoru. Místo pro odběr spalin je situováno ve sběrném výfukovém potrubí mezi válci motoru a turbínou turbodmychadla. Spaliny následně procházejí přes tepelný výměník, kde jsou ochlazeny a vráceny zpět do sacího potrubí. Zde dochází k jejich promíchání se stlačeným nasávaným vzduchem. Promíchaná recirkulovaná směs je nasáta do spalovacího prostoru.



EGR ventil sloužící k odebírání spalin je umístěn před tepelným výměníkem, ale může být i za ním. Řídicí jednotka měří množství nasátého vzduchu, porovná jej s požadovanou hmotností vzduchu pro daný režim, zatížení motoru a dopočítává množství použití spalin. Poté otevírá EGR ventil pro potřebné nasávané množství. Nejčastěji jsou používány elektromagneticky řízené podtlakové ventily.

Při recirkulaci většího množství výfukových plynů je obtížné současně zajistit dostatečný přísun čerstvého vzduchu. Aby nedocházelo ke ztrátě energie výfukových plynů na turbíně (jejich odběrem před turbínou) a následnému snížení plnicího tlaku nasávaného vzduchu, je potřeba tento nedostatek optimalizovat. Množství recirkulovaných plynů nesmí přesáhnout určité hodnoty. Řídicí jednotka tedy vyhodnocuje zpětnou vazbu o množství recirkulovaných spalin a reguluje přepřívání – turbodmychadlem s obtokovým ventilem nebo s variabilní geometrií. Tato metoda je proto omezena možnostmi turbodmychadel a chladicím výkonem EGR výměníku. [7]



Obr. 17: Vysokotlaký systém recirkulace výfukových plynů [24]

- 1) Řídicí jednotka motoru, 2) EGR ventil, 3) Přívod vzduchu, 4) Hlava válců, 5) Výfukové sběrné potrubí, 6) Mezichladič výfukových plynů 7) Chladicí kapalina

### NÍZKOTLAKÁ RECIRKULACE

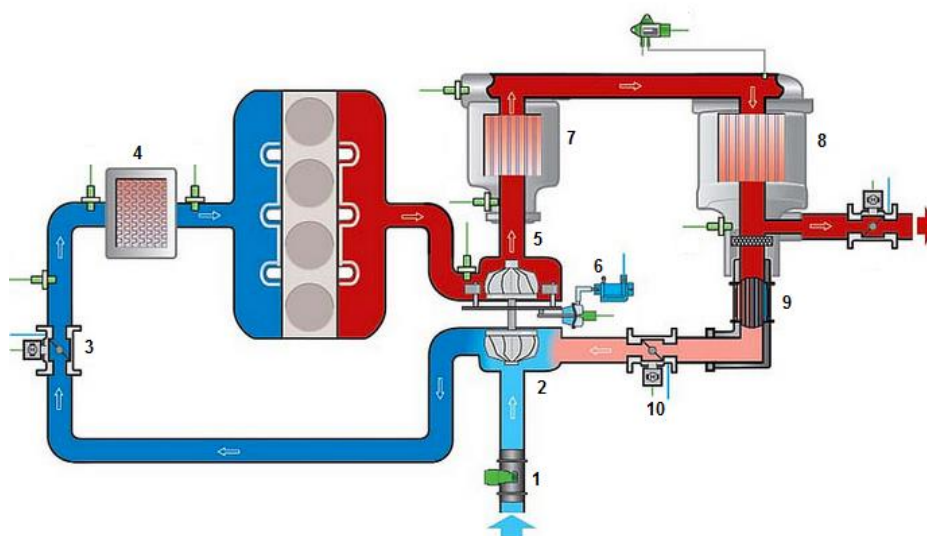
Systém nízkotlaké recirkulace výfukových plynů se snaží odstranit nedostatky výše zmíněné vysokotlaké recirkulace. K odběru výfukových plynů k jejich recirkulaci dochází až za prostředky dodatečné úpravy spalin (oxidační katalyzátor, filtr pevných částic). Tím se eliminují problémy zanášení sazími, nedokonalého spalování v recirkulovaných spalinách či pronikání sazí do oleje, jelikož spaliny jsou už relativně čisté. Výfukové plyny mají po průchodu turbínou, katalyzátorem a filtrem částic nižší tlak a také teplotu, tudíž nevyžadují tak velké chlazení jako u vysokotlaké recirkulace. Spaliny jsou následně promíchány s nasátým vzduchem, společně stlačeny, ochlazeny a jejich výsledná teplota se pohybuje kolem 50 °C, což pozitivně ovlivňuje objemovou účinnost motoru.

Oproti vysokotlakému systému umožňuje nízkotlaká recirkulace přívod většího množství spalin za stejného součinitele přebytku vzduchu. Se zvyšujícím se množstvím spalin je



potřeba dostatku čerstvého vzduchu, což u nízkotlaké recirkulace není problém zajistit. Nedochozí zde k poklesu energie plynů roztáčejících turbínu, ani ke snižování plnicího tlaku díky odběru spalin za filtrem pevných částic.

Jediný větší problém tohoto systému tkví v kondenzaci vodních par výfukových plynů v mezichladiči. Je zde nasnadě využití sofistikovanějších materiálů pro výrobu mezichladiče k zamezení koroze, způsobené např. sirnými kondenzáty. Kompresorové kolo je z důvodu přívodu většího množství recirkulovaných spalin oproti vysokotlakému systému více namáháno a musí být schopno odolávat únavovému namáhání. V dnešní době jsou už tyto příčiny obtíží překonány a motory kombinují nízkotlaký systém s vysokotlakým pro jejich využití v určitých provozních režimech – při recirkulaci velkého množství spalin snižuje vysokotlaká recirkulace průtočné množství systémem nízkotlakým a nezatěžuje tak turbodmychadlo. [7]



Obr. 18: Schéma nízkotlakého systému recirkulace výfukových plynů [24]

- 1) Přívod vzduchu, 2) Kompresorové kolo, 3) Řídicí modul škrtící klapky, 4) Mezichladič stlačeného vzduchu, 5) Turbinové kolo, 6) Obtokový ventil (Wastegate), 7) Oxidační katalyzátor, 8) Filtr pevných částic, 9) Mezichladič výfukových plynů, 10) EGR ventil

### 3.2.2 OXIDAČNÍ KATALYTICKÝ KONVERTOR

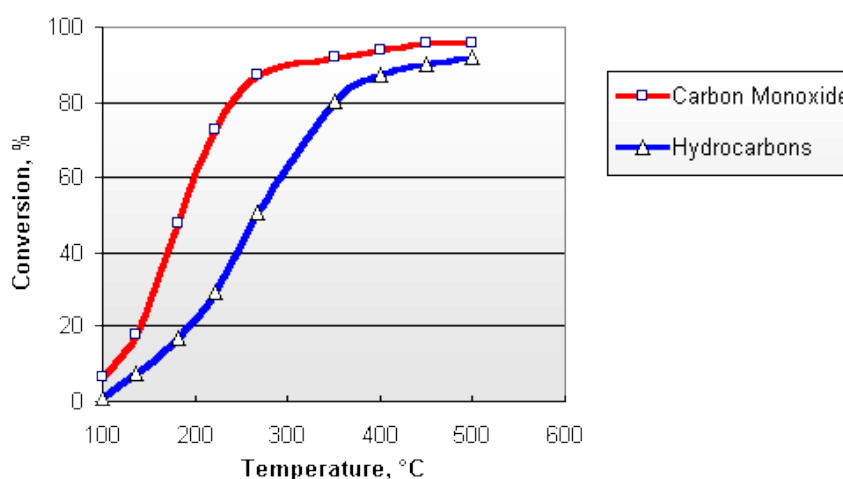
Oxidační katalyzátor známý také pod označením DOC (Diesel Oxidation Catalyst) dodatečně spaluje plynné fáze nespálených uhlovodíků, jedovatý oxid uhelnatý a rozpustné organické složky SOF (Soluble Organic Fractions) za vzniku oxidu uhličitého a vodní páry.

Výfukové plyny vznětových motorů obsahují přebytek vzduchu (kyslíku), jelikož motory pracují s chudou směsí ( $\lambda > 1$ ). Oxidací uvnitř katalyzátoru dochází k přeměně CO na CO<sub>2</sub> a nespálených HC na vodní páru. Díky velkému množství kyslíku obsaženého ve spalinách probíhají tyto reakce v katalyzátoru s velkou účinností. K oxidaci HC i CO dochází při teplotě již od 160°C a se vzrůstající teplotou do určité hodnoty (cca 500°C) roste i účinnost katalyzátoru. Na druhou stranu při vyšších teplotách začínají převažovat reakce SO<sub>2</sub> na SO<sub>3</sub>, jež reaguje s vodní párou na korozivní kyselinu H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.



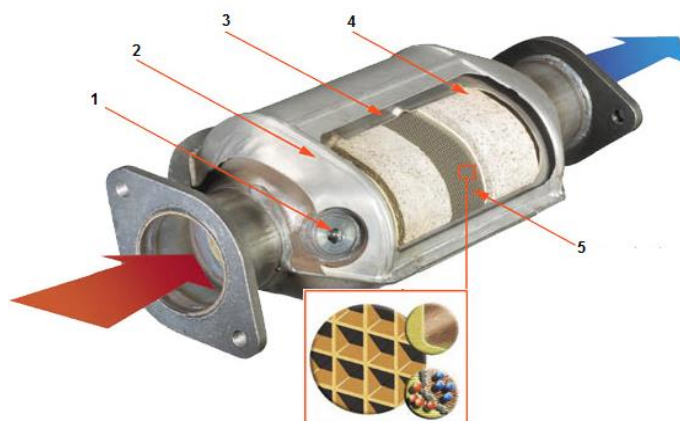
Emise CO jsou zredukovány zhruba o 50 - 60% a HC o 30 - 50%. K redukci pevných částic ani NO<sub>x</sub> zde nedochází, jelikož k eliminaci oxidů je potřeba redukční atmosféry. [23, 11]

### Probíhající reakce:



Obr. 19: Účinnost katalytické přeměny CO a HC v závislosti na teplotě [23]

Oxidační katalyzátor je sestaven z nosného obalu z nerezového plechu a keramického nosiče s axiálně průchozími kanálky ve kterých proudí výfukové plyny. Kvůli křehkosti keramického nosiče je mezi něj a obal, z důvodu tepelných změn, vložena elastická vložka. Povrch kanálků tvoří mezivrstva oxidu hlinitého (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), která je pokryta vrstvou ušlechtilého kovu platiny či paladia. Kovy působí katalyticky a snižují tak aktivační energii reakcí. Katalyzátor bývá ve výfukovém traktu umístěn co nejbližší motoru, další prvky aftertreatmentu se umísťují až za něj. [7]



Obr. 20: Oxidační katalyzátor [37]

1) Lambda sonda, 2) Tepelný štít, 3) Ocelové pouzdro, 4) Izolátor, 5) Aktivní část katalyzátoru

### 3.2.3 FILTR PEVNÝCH ČÁSTIC

Vznětové motory disponují nízkou spotřebou, relativně vysokým výkonem a točivým momentem při nízkých otáčkách motoru. Avšak spalování motorové nafty s obsahem těžších uhlovodíků produkuje vyšší obsah karcinogenů v podobě pevných částic. Ty se snižují instalací filtru pevných částic do výfukového systému. Filtr pevných částic, často označován jako DPF (Diesel Partikel Filter) nebo FAP (Filtre A Particules) a byl použit poprvé v roce 2000 koncernem PSA u automobilu Peugeot 607 HDI.

Filtr pevných částic funguje na principu zachycování částic výfukových plynů prostupem přes porézní filtrační materiál uvnitř filtru. Nespálené částice se uvnitř hromadí a během provozu dochází k zaplnění kapacity filtru, která zvyšuje odpor filtru. Po dosažení limitní hranice je žádoucí regenerace filtru, a tedy vypálení usazených částic pomocí ohřevu filtru. K regeneraci filtru dochází při dostatečné teplotě výfukových plynů ( $> 350^{\circ}\text{C}$ ). [7, 10]

Regenerace filtru pevných částic probíhá jako:

#### PASIVNÍ REGENERACE:

Regenerace probíhá automaticky při trvalém zatížení motoru s teplotou výfukových plynů v rozmezí od  $350 - 550^{\circ}\text{C}$ . Probíhá bez jakéhokoliv zásahu řídicího systému vozidla.

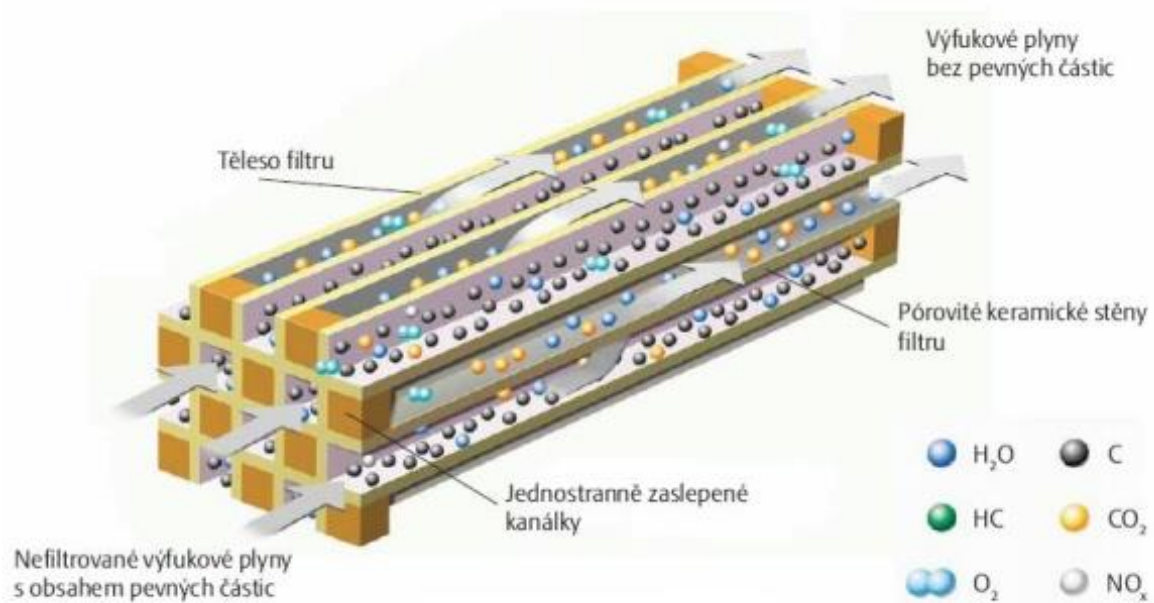
#### AKTIVNÍ REGENERACE:

Probíhá při umělé navýšené teplotě výfukových plynů na zhruba  $600^{\circ}\text{C}$  změnou časování vstříků motoru s přidávkem většího množství paliva, či aditiva. Celkový proces trvá 2 – 3 minuty a opakuje se po ujetí 300 – 1000 km v závislosti na zatížení motoru; jeho činnost není nijak omezena.

Z konstrukčního hlediska je tvořen pórovitým filtračním prvkem uvnitř nerezového pouzdra. Těleso filtračního prvku je tvořeno kovovým pletivem ze žáruvzdorné CrNi oceli, keramickou vložkou nebo křemičitou tkaninou s nerezovou přízí obohacenou o drahé kovy (nevyužívá se však u mobilních jednotek). [11]



Vlnité kovové pletivo je srolováno do tvaru válce pro dosažení co největšího povrchu a obaleno pláštěm z perforovaného plechu. Výfukové plyny proudí přes jednotlivé vrstvy pletiva dovnitř válce odkud následně proudí ven z filtru. Částice sazí se usazují a zachycují na jednotlivých vrstvách. Regenerace tohoto typu filtru je prováděna elektrickým proudem, jež při průchodu vlákna rozžhává a dochází k vypálení částic. V dnešní době jsou však více využívány jiné typy vložek, např. voštinová keramická z karbidu křemíku, či spékáných kovových materiálů. Filtrace spalín probíhá nápodobně jako u předchozí varianty jen s rozdílem, že spaliny proudí přes množství paralelních porézních kanálků, které jsou střídavě vždy z jedné strany zaslepeny. Jeden je otevřen ve směru proudění od motoru, paralelní je ve stejném směru uzavřen a otevřen ve směru výstupu jako na obr. 21. Výfukové plyny proudí v kanálkách pouze bočními stěnami s pórovitostí 10-15  $\mu\text{m}$ , čímž umožňují průchod pouze plynným složkám. Pevné částice jsou zachycovány uvnitř kanálků. [7,11].



Obr. 21: Princip filtru pevných částic s keramickou vložkou [25]

Dle typu zástavby ve výfukovém potrubí se pak filtry pevných částic dělí na:

### System s aditivem

Použití u vozů se zástavbou DPF dále od motoru. Kvůli nedostatečným teplotám pro správné vyhoření pevných částic z filtrů se využívá kapalného aditiva, které snižuje bod vzplanutí sazí zachycených uvnitř DPF. Aditivum obsahuje sloučeniny na bázi železa a ceru.

### System bez aditiva

Continuous Regenerating Technology (CRT) je používán u vozidel se zástavbou DPF blíže k motoru, tudíž výfukové plyny mají dostatečnou teplotu ke spálení usazenin. DPF je umístěn kontinuálně za oxidačním katalyzátorem a tvoří spolu kompaktní celek. Oproti systému bez aditiva je povrch kanálků uvnitř filtru opatřen povlakem oxidu hlinitého ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) s nanesenou



vrstvou platiny nebo palladia. Ušlechtilé kovy působí jako katalyzátory a snižují teplotu vznícení usazenin.

### **System se vstřikovačem nafty ve výfukovém potrubí**

Tento systém je oproti předchozím nejnovější. Ve výfukovém traktu před DOC je umístěn vstřikovač nafty se žhavicí svíčkou, která během aktivní regenerace odpařuje vstříknutou naftu (obohacuje jí výfukové plyny). Odpařené palivo s kyslíkem se díky prudké reakci v oxidačním katalyzátoru vznítí a plamen sahá až do DPF a vypálí tak usazené částice.

Konečná účinnost snížení emisí se pohybuje v okolo 95 %, záleží na dané konstrukci DPF, provozních podmínkách a stáří filtru.

### **3.2.4 SELEKTIVNÍ KATALYTICKÁ REDUKCE**

Jako další způsob vedoucí ke snížení emisí  $\text{NO}_x$  obsažených ve výfukových plynech se používá systém SCR (Selective Catalytic Reduction). Principem této technologie je vstřikování redukčního činidla na bázi dusíku, obchodně označovaného jako AdBlue, do horkých spalin. Toto kapalné aditivum je 32,5 % vodný roztok močoviny. Při vstřikování dochází uvnitř filtru k chemickým reakcím amoniaku spolu s oxidy dusíku za vzniku vodní páry a dusíku. Díky katalyzátoru, jež snižuje teploty reakcí, dochází až k 90 % účinnosti redukce  $\text{NO}_x$ . Katalytická redukce probíhá spolu s úpravou časování vstřikování paliva, čímž se dodatečně redukuje množství pevných částic ve výfukových plynech.

Díky vysokým teplotám výfukových plynů dochází při vstřiku AdBlue zpočátku k vypaření vody, následné termolýze močoviny a hydrolýze kyseliny isokyanaté ( $\text{HNCO}$ ). Těmito reakcemi vzniká amoniak reagující s oxidy dusíku za vzniku  $\text{N}_2$ . Při vstřikování činidla má velký význam umístění samotného vstřikovače (Dosing Modul). Vlastnosti vstřikované kapaliny, rychlost jejího odpařování, či proudění výfukových plynů výrazně ovlivňuje účinnost reakcí. [7, 11]

### **AdBLUE (DEF)**

AdBlue, na území USA - DEF (Diesel Exhaust Fluid), je bezbarvá, člověku netoxická kapalina, složená z demineralizované vody a močoviny o vysoké chemické čistotě v poměru 32,5 % močoviny a 67,5 % vody. Tato koncentrace byla zvolena z důvodu dosažení jejího nejnižšího bodu tuhnutí  $-11\text{ }^\circ\text{C}$ . Specifické složení je určeno normou ISO 22241. Při vypnutém motoru či provozu za nižších teplot musí být nádrž elektricky nebo chladícím okruhem motoru vyhřívána, aby nedošlo k zamrznutí média v systému a poškození jednotlivých komponent. Naopak při dlouhodobějším skladování za vysokých teplot může docházet k vypařování vody a následné změně poměru složení. [10,11]

AdBlue je umístěno v samostatné nádrži oddělené od palivové nádrže, a přetlakem vstřikováno do proudu stlačeného vzduchu spojeného s výfukovým potrubím, nebo rovnou do výfukových plynů před SCR katalyzátor. K účinné redukci  $\text{NO}_x$  ve výfukových plynech je potřebný amoniak ( $\text{NH}_3$ ). Avšak z důvodu jeho toxicity a špatné skladovatelnosti se využívá močovina ( $\text{NH}_2$ ), která není zvláště škodlivá. Močovina se vlivem reakcí za vyšších teplot – odpaření vody, termolýzy a hydrolýzy rozkládá na potřebný amoniak.



Rozklad močoviny na amoniak je závislý na teplotě, ideálně probíhá v rozmezí od 250 °C do 360°C. Při vyšších teplotách dochází k nežádoucím reakcím (vedoucím někdy až ke korozi), vyšší spotřebě amoniaku a následnému usazování částí močoviny na stěnách výfuku a uvnitř katalyzátoru. Využitím katalyzátoru se teplotní spektrum snižuje a k rozkladu močoviny dochází za nižších teplot.

Po vstříknutí močoviny do spalin před katalyzátorem dochází k termolýze – z močoviny vznikne amoniak a kyselina isokyanatá:



K následné hydrolytické reakci dochází až uvnitř katalyzátoru. Přítomnost vodní páry urychluje proces hydrolýzy. Reakce nejefektivněji probíhá za teplot do 250 °C, které jsou však pro další reakce nedostatečné.

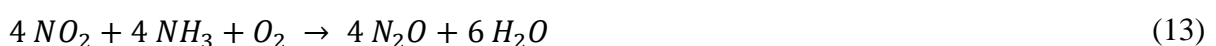


Během samotného procesu redukce oxidů dusíku vzniká v katalyzátoru mnoho reakcí. Níže uvedené reakce reprezentují žádoucí přeměnu  $\text{NO}_x$  na elementární dusík. Rovnice (8) představuje dominantní reakci celého procesu. Rovnice reakce (9 – 11) charakterizují reakční složku oxidu dusičitého, přičemž reakce (11) probíhá nejrychleji a probíhá již za nižších teplot. [26]

#### Rovnice reakcí [26]:



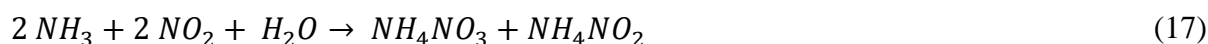
V případě že nastane situace, kdy úroveň obsahu  $\text{NO}_2$  ve výfukových plynech přesáhne množství  $\text{NO}$ , redukcí oxidu dusičitého s amoniakem vzniká oxid dusný s vodní parou, jak je uvedeno v rovnicích níže:





Při procesu selektivní redukce mohou nastat také nežádoucí reakce, jako například neselektivní reakce amoniaku s volným kyslíkem, který je v systému obsažen ve velké míře. Tyto reakce mohou produkovat další emise, popřípadě spotřebovávat amoniak, jakožto redukční činidlo.

Amoniak může také reagovat s  $\text{NO}_2$  a vzniku výbušného dusičnanu amonného. Tato reakce (17) však nastává při nižších teplotách (100 – 200 °C) než jsou provozní teploty SCR. [26]

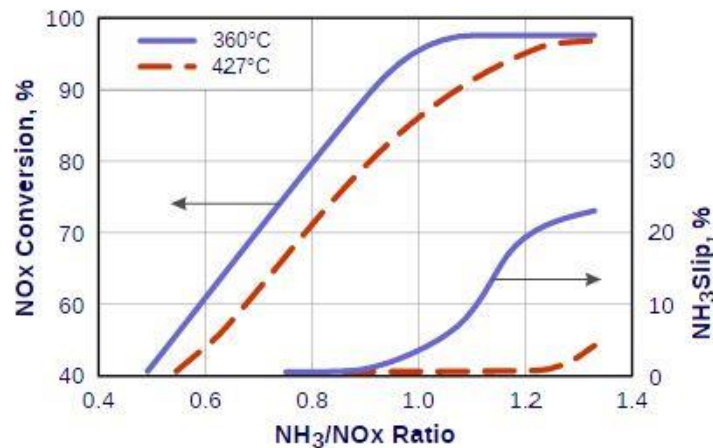


Motorová nafta jako palivo vznětových automobilů obsahuje také množství síry. Po spálení směsi v motoru se ve výfukových plynech vyskytuje zejména ve formě  $\text{SO}_2$ , který oxiduje na  $\text{SO}_3$  a následně může vznikat  $\text{H}_2\text{SO}_4$  při reakci s vodní párou. Tyto reakce se dějí v oxidačním katalyzátoru, avšak zde během selektivní redukce  $\text{SO}_3$  s  $\text{NH}_3$  formují  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  a  $\text{NH}_4\text{HSO}_4$ , jež se usazují v potrubí a katalyzátoru a způsobují tak jeho degradaci. Tyto reakce nastávají za nižších teplot, obvykle do 250 °C a vedou k zanesení celého systému a jeho následné deaktivaci. [26]



Účinnost reakcí systému SCR je závislá na množství vstřikované močoviny do výfukových plynů; teplotě probíhajících reakcí a také na materiálu konstrukce katalyzátoru.

Při nedostatečném množství vstřikovaného AdBlue dochází k nízké účinnosti redukce  $\text{NO}_x$ , naopak při vyšších dávkách vstřikování dochází k nespotebování močoviny a následnému úniku amoniaku skrz katalyzátor do ovzduší, tzv. ammonia slip. Hodnoty jsou uváděny v poměru potřebného amoniaku k redukci  $\text{NO}_x$  ( $\text{NH}_3/\text{NO}_x$ ). [11,26]



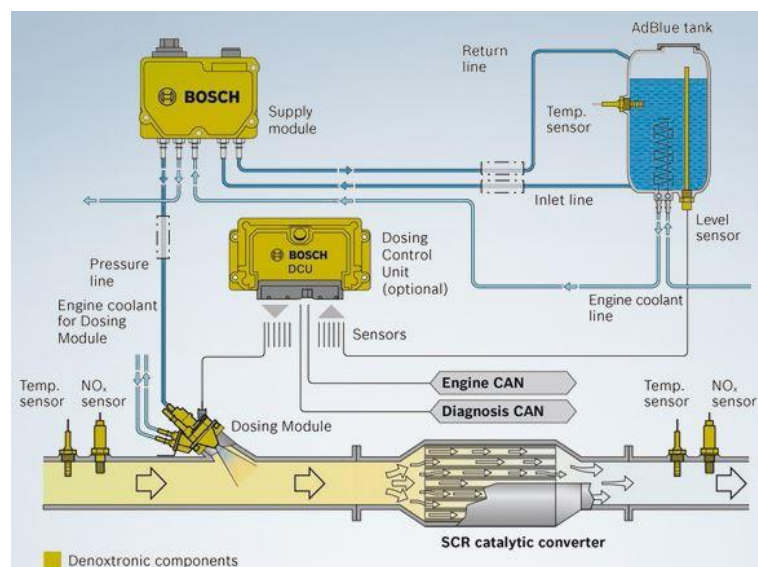
Obr. 22: Křivky efektivní přeměny  $\text{NO}_x$  při odlišných teplotách pro různý poměr  $\text{NH}_3/\text{NO}_x$  [26]

## KOMPONENTY SCR

Systém SCR se skládá z vyhříváné nádrže pro aditivum AdBlue, SCR katalyzátoru, zásobovacího a vstřikovacího modulu, samostatné řídicí jednotky, snímače obsahu  $\text{NO}_x$  ve výfukových plynech, několika druhů filtrů a elektrické kabeláže.

Z vyhříváné nádrže je redukční činidlo AdBlue přes soustavu filtrů čerpadlem nasáto do vstřikovací jednotky, odkud je posléze vstřikováno jeho potřebné množství v závislosti na teplotě spalin a obsažených emisích  $\text{NO}_x$  do výfukového potrubí. Proces vstřikování je řízen samostatnou řídicí jednotkou (ECU). Aby se zamezilo případnému zamrznutí kapaliny v potrubí, je zbylá kapalina odčerpána zpět do nádrže.

Emise výfukových plynů, především  $\text{NO}_x$  jsou monitorovány pomocí množství snímačů ( $\text{NO}_x$  snímačem) před i za SCR katalyzátorem. Při teplotě spalin nižší než  $200\text{ }^\circ\text{C}$  není systém funkční – docházelo by k nežádoucím reakcím vedoucím k degradaci katalyzátoru.



Obr. 23: Schéma systému SCR [27]



### 3.2.5 ZÁSOBNÍKOVÝ KATALYZÁTOR NO<sub>x</sub>

Principem zařízení, označovaného jako LNT (Lean NO<sub>x</sub> Trap) či NAC (NO<sub>x</sub> Absorber Catalyst), je kontinuální ukládání oxidů dusíku uvnitř zásobníku. Ukládání probíhá při chodu motoru s přebytkem vzduchu – spalování chudé směsi. V okamžiku kdy dojde k naplnění kapacity, je nutná regenerace zásobníku spalováním bohaté směsi. Mimo využití vznětových motorů se systém zásobníkového katalyzátoru používá u zážehových motorů s přímým vstřikováním, jež pracují přebytkem vzduchu.

Svou konstrukcí je zásobníkový katalyzátor podobný oxidačnímu. Je tvořen nosičem z keramického nebo kovového monolitu s kanálky, jimiž proudí výfukové plyny. Povrch těchto kanálků je potažen vrstvou platiny, rhodia a oxidu barnatého; poslední zmíněný na sebe váže oxidy dusíku k přechodnému uložení. To vše je uloženo uvnitř obalu z nerezového plechu.

Díky aktivní platinové vrstvě jsou NO<sub>x</sub> oxidovány na NO<sub>2</sub>, ten dále reaguje s O<sub>2</sub> a BaO a vzniká dusičnan barnatý Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>. Tyto reakce probíhají při teplotách od 250 – 500 °C. V případě regenerace katalyzátoru prostřednictvím spalování bohaté směsi se přechodně uložené dusičnany v redukčním prostředí s přebytkem CO a HC stanou nestabilní a rozpadnou se na NO, který dále reaguje s CO za vzniku N<sub>2</sub>. Kvůli přítomnosti síry v palivu dochází k nežádoucímu zanášení zásobníkového katalyzátoru jejími sloučeninami, které jsou chemicky stálejší nežli NO<sub>x</sub> a zhoršují jejich rozpad. BaO se přeměňuje na Ba(SO<sub>4</sub>). Systém je nucen zkracovat intervaly regenerace a pracovat v režimu za teplot kolem 650 °C, aby došlo k vypálení těchto sloučenin. [28]

### 3.2.6 HYDROCARBON SCR

Tato metoda je založena na redukci NO<sub>x</sub> pomocí uhlovodíků, namísto močoviny. Uhlovodíky, jako reduktant, jsou přirozený produkt spalování, popřípadě se do výfukového traktu vstříkuje palivo, jako u systému DPF se vstřikovačem nafty. Výhodou této technologie je absence dalšího zdroje redukčního činidla (močoviny) a s tím souvisejících potřebných komponent. Na druhou stranu systém nedosahuje zdaleka takové účinnosti jako výše uvedený systém SCR. [29]



Další systémy redukce emisí pracují na principu kombinace výše zmíněných aftertreatment systémů. Jedná se například o SCRT systém či Cold Start Catalyst.

### 3.2.7 SCRT SYSTÉM

SCRT spojuje technologii CRT (Continuously Regenerating Technology) a SCR v jeden celek. Tímto systémem lze zpětně dovybavit starší vozidla a snížit tak hodnoty emisí motoru na úroveň Euro VI. Množství pevných částic, oxidů dusíku, uhlovodíků a oxidu uhelnatého jsou zredukovány až o 95 %.



### 3.2.8 COLD START CATALYST

Dosažení provozních teplot katalytických komponent vznětových motorů, zejména při studeném startu, může trvat několik minut. Během této doby nabývají emise vyšších hodnot než při běžném provozu, proto je nasnadě vývoj koncepce katalyzátorů fungujících při studeném startu (CSC). Tato metoda kombinuje nízkoteplotní zachycování HC a pasivní NO<sub>x</sub> adsorpce na principu CO a NO oxidace. Metoda je zatím ve vývoji pod společností Johnson Matthey. [30]

## 3.3 DODAVATELÉ NO<sub>x</sub> AFTERTREATMENT SYSTÉMŮ

### 3.3.1 BOSCH

Jeden z prvních výrobců, dodávající systémy pro redukci oxidů dusíku ve výfukových plynech, byla od roku 2004 firma Bosch s produktem Denoxtronic.

Kompaktní celek tvoří elektronickou řídicí jednotku Bosch DCU15/17, dávkovací modul (Dosing module – obsahující vstříkovač, tlakové a vratné potrubí), zásobovací modul (Supply module – obsahující čerpadlo, rozvaděč, snímače tlaku a teploty, hlavní filtr a vyhřívací element), teplotní a NO<sub>x</sub> senzory před i za SCR katalyzátorem a nádrž AdBlue.

### DENOXTRONIC 2.2

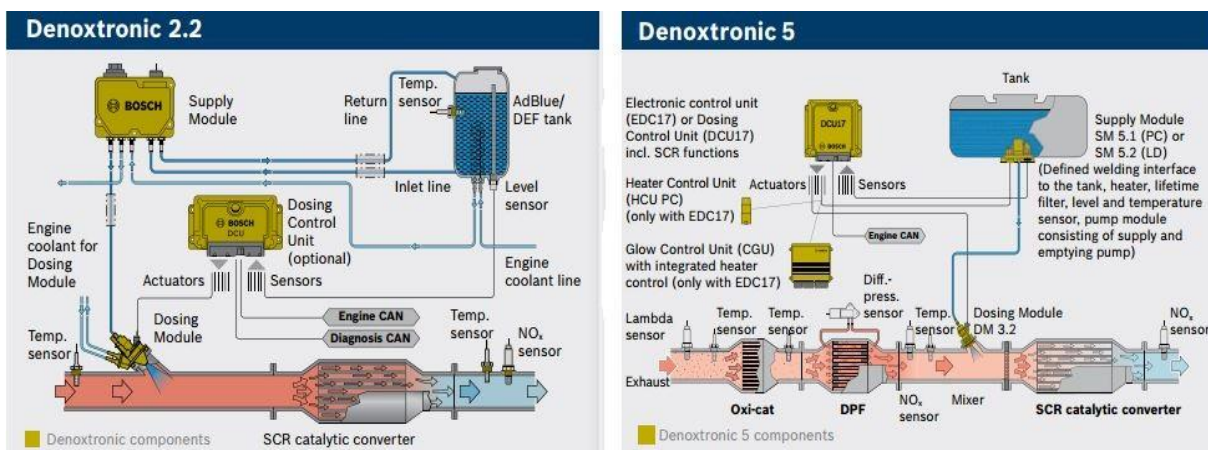
Tato třetí generace vyvinuta pro střední, těžká nákladní vozidla, zemědělské a stavební stroje byla uvedena na trh v roce 2009 a umožňuje plnit emisní normy Euro V/VI a Stage 4. Technologie oproti první verzi vstříkuje redukční činidlo bez pomoci stlačeného vzduchu do proudu spalin, nikoliv za pomoci tlakového atomizéru použitého u Denoxtronic 1 (2004). [31]

### DENOXTRONIC 3.1/5

Bosch v roce 2008 představil pro osobní vozidla o výkonu 56 – 110 kW systém Denoxtronic 3.1. S jeho pomocí se podařilo snížit emise NO<sub>x</sub> o dalších 95 % a automobily splňují emisní limity Euro 6.

Denoxtronic 5 se konstrukčně od systému Denoxtronic 3.1 nijak neliší, rozdíly jsou pouze v pracovním tlaku systému, ten se pohybuje od 4,5 – 8,5 barů. Systém pracuje pod napětím 12 V.

Na rozdíl od Denoxtronicu pro nákladní vozidla je systém pro použití u osobních automobilů ochuzen o samostatný zásobovací modul - ten se zde nachází přímo v nádrži pro AdBlue, což má kladný vliv na celkovou velikost zástavby. [32,33]



Obr. 24: Schémata jednotlivých systémů Denoxtronic [31,33]

### DENOXTROINC 6.5/6.9

Tento systém je využíván pro traktory, mimo silniční vozidla, stavební a zemědělskou techniku. Oproti předchozím, došlo k výraznému zmenšení zástavbových rozměrů, čímž došlo také k úspoře hmotnosti. Systém Denoxtronic 6.5 pracuje s provozním tlakem 5 barů, přičemž Denoxtronic 6.9 s 9 bary.

Tab. 2 Porovnání technických parametrů jednotlivých systémů Bosch Denoxtronic

|                                      | Bosch Denoxtronic |                  |                   |            |            |                   |                   |
|--------------------------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------|------------|-------------------|-------------------|
| Model                                | 1                 | 2.2              | 2.2               | 3.1        | 5.1        | 6.5               | 6.9               |
| Rok uvedení                          | 2004              | 2008             | 2009              | 2008       | 2012       | 2012              | 2016?             |
| Tlak [bar]                           | -                 | 5                | 9                 | 5          | 4,5 - 8,5  | 5                 | 9                 |
| Napětí [V]                           | -                 | 12/24            | 12/24             | 12         | 12         | 12/24             | 12/24             |
| Vstříkované množství (min/max) [g/h] | -                 | 17,3             | 36/7 200          | 15/3 120   | 200/2 000  | 100/5 400         | 80/15 000         |
| Chlazení vstřikovače                 | elektricky        | elektricky       | chladičí kapalina | elektricky | elektricky | chladičí kapalina | chladičí kapalina |
| Životnost [h]                        | -                 | 3 000            | 30 000            | 6 000      | 8 000      | 12 000            | 35 000            |
| Emisní norma                         | Euro VI, Stage 4  | Euro VI, Stage 4 | Euro VI, Stage 4  | Euro 6     | Euro 6     | Euro VI, Stage 4  | Euro VI, Stage 4  |



### 3.3.2 NETT TECHNOLOGIES INC

#### BLUEMAX™

Technologie vyvinutá společností Nett využívá ke vstřikování močoviny do výfukových spalin kompresorem stlačený vzduch. K dosažení potřebných provozních hodnot je zde použit kompresor s příkonem 440 W (24 V), jež zajišťuje tlak 7 barů. Maximální průtok AdBlue je 7,2 l/hod při tlaku 6 – 10 barů. Použití kompresoru má výhodu ve vytvoření jemnějšího rozstříku močoviny. Na druhou stranu s ním souvisí většina servisních úkonů. [34]

### 3.3.3 DELPHI

Výrobce komponentů Delphi nabízí vysoce výkonný kompaktní SCR systém pro oblast osobních vozidel s motory o objemu do 3000 cm<sup>3</sup>. Systém pracuje při 12 nebo 24 V s tlakem vstřikování až 50 barů, což výrazně zlepšuje rozstřík kapiček AdBlue (<30 μm) a jejich mísení s výfukovými plyny. Díky tomu si společnost Delphi slibuje řadu výhod jako např.: redukci o 10 – 15 % stávajících hodnot NO<sub>x</sub>, redukci CO<sub>2</sub> o 0,5g/km, nižší vstřikovací teploty 160 – 175 °C bez rizika krystalizace uvnitř katalyzátoru, či minimální kondenzace vodného roztoku čínidla na stěnách výfuku atd. [35]

### 3.3.4 CUMMINS EMMISON SOLUTIONS

#### ECOFit™ SINGLE MODULE

Firma Cummins Inc vyrábí aftertreatment systémy zejména pro vlastní motory středních a těžkých nákladních vozidel na americkém kontinentu. Vývojem tohoto modulárního systému směřuje na potřeby splnění emisních limitů Tier 4 dle EPA 2017. Tryska je zde chlazena redukčním činidlem pomocí recirkulace a samostatné vstřikování je realizováno stlačeným vzduchem, který pomocí atomizéru vytváří vír. Díky tomu lze dosáhnout vysokých průtoků vstřikovací tryskou, až do 20 000 g/h. [36]



## 4 KONSTRUKČNÍ NÁVRH

Zkušební stanoviště pro zařízení sloužící k redukci oxidů dusíku ve výfukových plynech bylo navrženo a následně sestaveno na Ústavu automobilního a dopravního inženýrství, fakulty Strojního inženýrství na Vysokém učení technickém v Brně. Zařízení je založeno na principu selektivní katalytické redukce (SCR) - vstřikování redukčního činidla AdBlue do proudu spalin před SCR katalyzátor. Důvodem pro návrh a sestavení tohoto systému byl požadavek na snížení emisí škodlivin ve výfukových plynech u zadaného traktorového motoru, především množství emisí  $\text{NO}_x$  s použitím SCR katalyzátoru i bez něj.

Hlavním úkolem byl návrh a sestavení zařízení pro přípravu redukčního činidla k jeho aplikaci před katalyzátor, označované jako dávkovací modul. Tento modul má s pomocí samostatné řídicí jednotky za úkol připravit potřebné množství redukčního činidla a dopravit jej z nádrže přes jednotlivé potrubí ke vstřikování do proudu spalin před katalyzátor.

Zkušební stanoviště určené pro tento experiment se nachází v laboratořích Ústavu automobilního a dopravního inženýrství. Jedná se o plně vybavenou motorovou zkušebnu se zkušební stolicí pro připevnění motoru, vířivou brzdou, systémem pro odvod spalin a kontrolním stanovištěm.

### 4.1 NÁVRH ZAŘÍZENÍ K REDUKCI $\text{NO}_x$

#### 4.1.1 PTC CREO PARAMETRIC

Jako nástroj pro vymodelování návrhu systému pro redukci  $\text{NO}_x$  jsem použil 3D modelovací program PTC Creo Parametric 2.0. Tento program jsem si vybral z důvodu jeho četného využití v oblasti návrhu komponentů v automobilním odvětví. Jeho rozhraní má univerzální možnosti využití při modelování od nejjednodušších součástí až po důmyslné sestavy.

S neustálým technologickým pokrokem společnosti zabývající se vývojem a výrobou jednotlivých komponent, či celkových systémů pro vstřikování redukčního činidla zjednodušují a seskupují jednotlivé díly dohromady. Děje se to zejména díky použití lepších materiálů, požadavkům cílového zákazníka a v neposlední řadě také kvůli lepším zástavbovým rozměrům a celkovému vzhledu automobilu. V mém případě však bylo dostačující sestavit funkční dávkovací modul z komerčně dostupných dílů, bez ohledu na velikost jeho zástavby.

#### 4.1.2 NÁVRH ZÁSOBOVACÍHO MODULU

Navržený konstrukční návrh 3D modelu vychází z principu současně používaných vstřikovacích jednotek. Okruh kapaliny jako takový se skládá z nádrže pro AdBlue, zásobovacího modulu a vstřikovací trysky umístěné ve výfukovém potrubí před katalyzátorem.

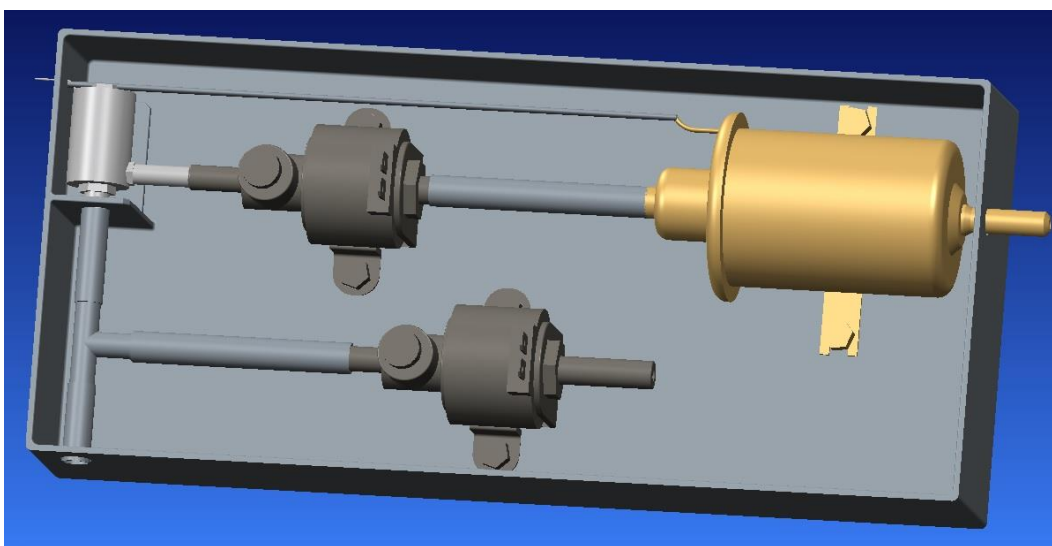
Po konzultaci s vedoucím práce jsem se vydal cestou využití dvou elektromagnetických benzinových ventilů pro dávkování požadovaného množství redukčního činidla ve spojení se vstřikovačem kapalné fáze LPG. Tento vstřikovač má za úkol cyklovat požadované množství kapalného média do trysky umístěné ve výfukovém potrubí k jejímu rozprašení. Kapalné



médium je zde dopravováno pomocí vysokotlakého čerpadla. Do celého systému je pak navíc přiváděn kompresorem stlačený vzduch sloužící k pročištění vstřikovací trysky před katalyzátorem.

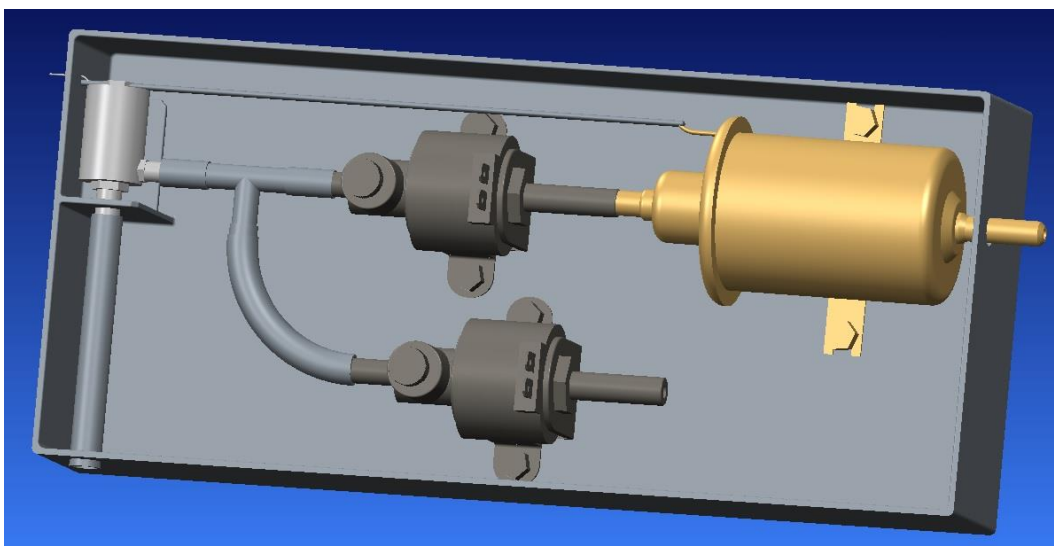
Podle způsobu přívodu vzduchu do systému jsem vymodeloval dvě varianty zásobovacího modulu:

První variantou je sériové zapojení čerpadla, elektromagnetického ventilu a vstřikovače s paralelním přívodem vzduchu přes druhý elektromagnetický ventil, umístěný mezi vstřikovačem a rozprašovací tryskou. Tato varianta je vyobrazena na obr. 25.



Obr. 25: Návrh zásobovacího modulu, varianta s přívodem vzduchu mezi vstřikovač a trysku

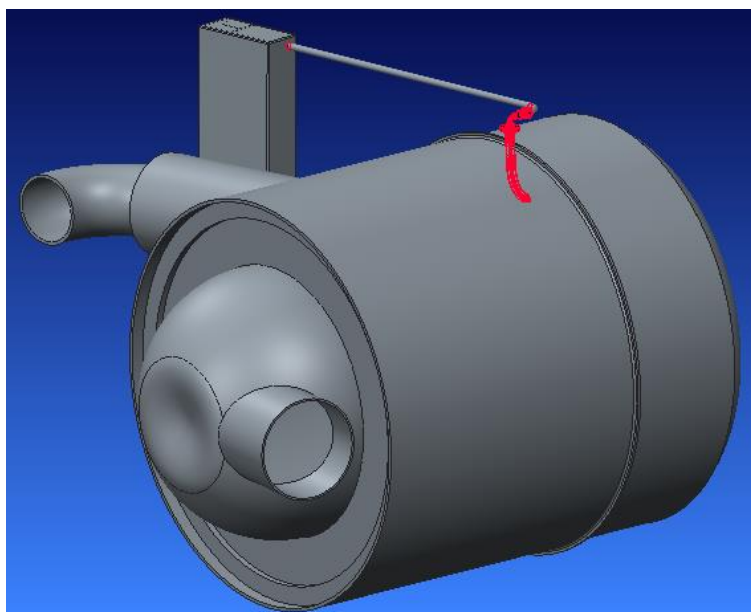
Druhá varianta, zobrazena na obr. 26, je založena na přívodu stlačeného vzduchu mezi elektromagnetický ventil a vstřikovač. Tato varianta do jisté míry umožňuje vyšší pracovní tlak vstřikování zajištěný přívodem stlačeného vzduchu před vstřikovač. Navíc slouží také k pročištění vstřikovače od eventuálních krystalických usazenin čínidla AdBlue.



Obr. 26: Návrh zásobovacího modulu, varianta s přívodem stlačeného vzduchu před vstřikovač

#### 4.1.3 SCR KATALYZÁTOR

Jednou ze stěžejních součástí k provedení experimentu na zkušebním stanovišti byl SCR katalyzátor. Katalyzátor obecně slouží k urychlení reakcí (např. snížením jejich teplot). V tomto případě lze použitím SCR katalyzátoru snížit teploty probíhajících reakcí na rozmezí 250 – 400 °C a docílit tím co nejlepší účinnosti chemických reakcí přeměny NO<sub>x</sub> na dusík a vodní páru.



Obr. 27: Model SCR katalyzátoru s umístěnou vstřikovací tryskou, v pozadí se zásobovacím modulem

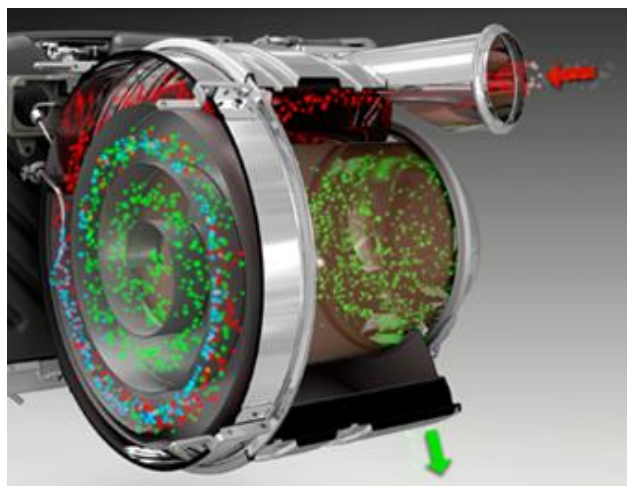


V případě tohoto experimentu byl použit SCR katalyzátor s integrovanou vstříkovací tryskou pro AdBlue z nákladního automobilu Scania. Svou konstrukcí je určen pro použití u motorů s objemem nad 4000 cm<sup>3</sup> a výkonem do 480 kW. Tento katalyzátor byl vybrán z důvodu možnosti změny (zmenšení) aktivní plochy v místě vstupu výfukových plynů dovnitř filtru katalyzátoru pro regulaci účinnosti reakcí uvnitř filtru.



Obr. 28: Vnitřní konstrukce katalyzátoru, pohled na vnitřní část pláště katalyzátoru s aktivní plochou filtru z keramického substrátu

Proudění výfukových plynů uvnitř SCR katalyzátoru je znázorněno na obr. 29. Spaliny proudí z motoru vstupem shora a obtékají vnitřní stěnu pláště katalyzátoru. Při pohledu z boku vytvářejí vír a dostávají se do prostoru se vstříkovačem redukčního činidla. Tento prostor má tvar spirály pro usměrnění proudu spalin, obohacených vstříknutým AdBlue. Spirála se stáčí směrem do středu katalyzátoru, kde probíhají žádoucí reakce oxidů dusíku na samostatný dusík a vodní páru. Střed je tvořen filtrem z keramického substrátu a dodatečně může být pokrytý vrstvou oxidů vanadu, molybdenu, wolframu či jejich kombinací.



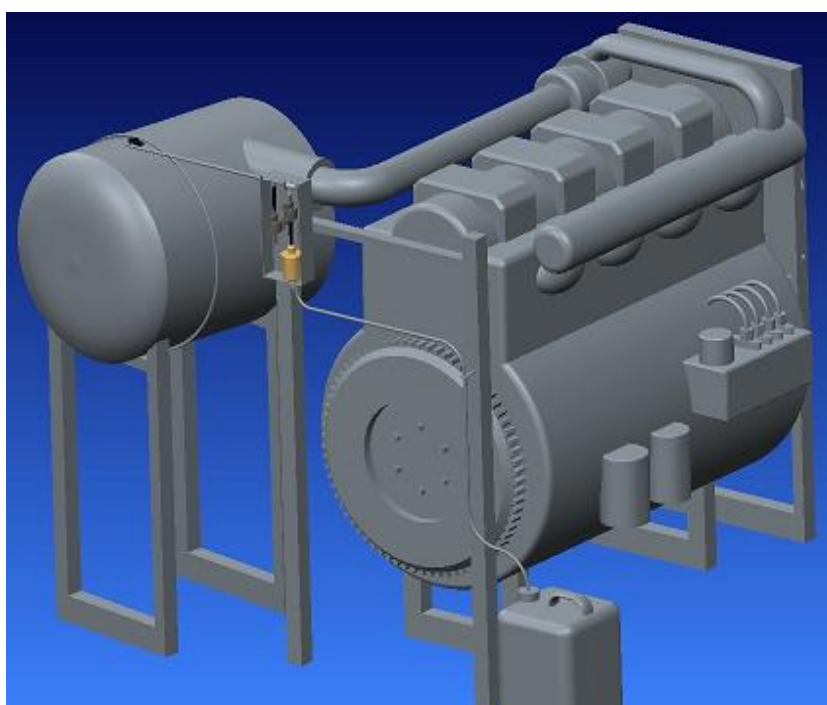
Obr. 29: Proudění výfukových plynů uvnitř SCR katalyzátoru [39]



Obr. 30: Použitý SCR katalyzátor s otvorem pro trysku

#### 4.1.4 ZÁSTAVBOVÝ MODEL

Měření hodnot emisí probíhalo na měřicí stolici v laboratořích ÚADI. Jelikož se jedná pouze o laboratorní zástavbu, nebylo nutné dbát na co nejmenší zástavbové rozměry. Na obr. 30 je znázorněn model umístění motoru a jednotlivých komponentů systému pro redukci  $\text{NO}_x$ . Zásobovací modul je umístěn na rámu zkušební stolice a zároveň je situován co nejblíže ke vstřikovací trysce. Kvůli lepšímu upevnění na stojan a také pro lepší proudění výfukových spalin jsme zvolili horizontální polohu katalyzátoru. Výhodou je také nejmenší vzdálenost mezi tryskou a zásobovacím modulem (obr. 31)



Obr. 31: Model zástavby zkušebního stanoviště



## 5 POUŽITÉ KOMPONENTY

### 5.1.1 VYSOKOTLAKÉ ČERPADLO

Pro zajištění přívodu redukčního činidla do systému a k jeho následné aplikaci slouží vysokotlaké palivové čerpadlo. Jediným požadavkem na toto palivové čerpadlo byla schopnost pracovního tlaku do 5 bar. Jeho parametry jsou uvedeny v tab. 4 níže.

Tab. 3 Parametry vysokotlakého čerpadla

| Vysokotlaké čerpadlo |     |
|----------------------|-----|
| Pracovní tlak [bar]  | 5   |
| Průtok [l/min]       | 3,8 |
| Napětí [V]           | 12  |



Obr. 32: Vysokotlaké čerpadlo

### 5.1.2 ELEKTROMAGNETICKÉ VENTILY

Elektromagnetický ventil jako součást zásobovacího modulu slouží k přepínání mezi dávkováním redukčního činidla a přívodem stlačeného vzduchu z kompresoru. Pro náš experiment byly využity dva elektromagnetické ventily od firmy Lovtec – jeden pro dávkování AdBlue a druhý pro stlačený vzduch. Stejně jako u čerpadla zde byl požadavek pro schopnost práce do tlaku 5 bar.



Obr. 33: Elektromagnetické ventily Lovtec



### 5.1.3 VSTŘIKOVAČ

Kvůli potřebnému množství dávkovaného činidla v závislosti na zatížení a otáčkách motoru bylo nutné tuto dávku přesně odcyklovat. K tomu nám posloužil vstřikovač pro kapalnou fázi LPG Magic FX. Tento vstřikovač je aktivován způsobem "peak and hold", při kterém je pístek vstřikovače rychle otevřen průtokem vyššího proudu a následně udržován po určitou dobu otevřený při zhruba poloviční hodnotě proudu. Hodnoty těchto proudů a další parametry vstřikovače jsou uvedeny v tab. 5.

Tab. 4 Parametry vstřikovače Magic FX

| Vstřikovač Magic FX       |           |
|---------------------------|-----------|
| Pracovní tlak [bar]       | 0 - 6     |
| Průtok [l/min]            | 2,5       |
| Napětí [V]                | 13,6      |
| Čas otevření při 14V [ms] | 1,6 - 1,7 |
| Odpor [Ohm]               | 1,6       |
| Otevírací proud [A]       | 6         |
| Udržovací proud [A]       | 3         |
| Maximální proud [A]       | 9         |



Obr. 34: Vstřikovač Magic FX

## 5.2 MOTOR ZETOR

Společnost Zetor je v současné době nejspíše jediný výrobce vznětových motorů využívající pro dopravu paliva řadové vstřikovací čerpadlo, a to i pro splnění norem Stage IV.



Pro splnění emisních limitů Stage IV má komerčně prodáváný motor Zetor Forterra (obr. 34) šestnáctiventilovou techniku, optimalizovaný tvar spalovacího prostoru v pístu, elektronicky ovládané řadové vstřikovací čerpadlo a další prvky aftertreatmentu jako filtr pevných částic, oxidační katalyzátor amoniaku a také využívá technologii selektivní katalytické redukce. Jeho technické parametry jsou uvedeny v tab. 5.

Tab. 5 Parametry motoru Zetor Forterra

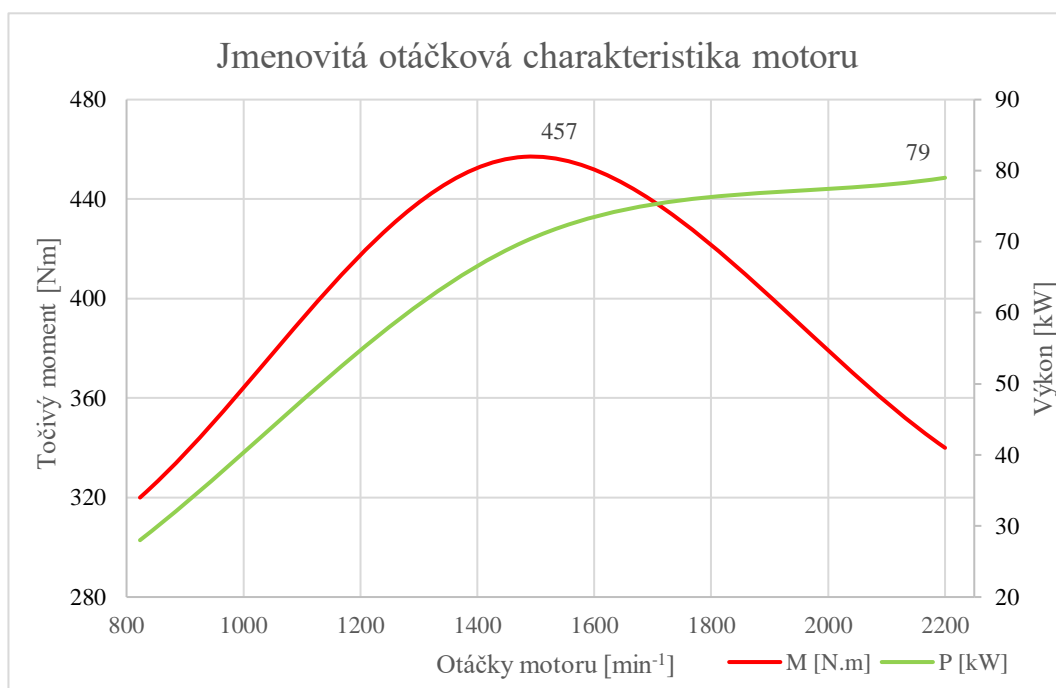
| Zetor Forterra                           |                 |
|--|-----------------|
| Homologovaný výkon [kW]<br>(2000/25/EC)  | 78,4            |
| Homologovaný výkon [HP]<br>(2000/25/EC)  | 105             |
| Max. točivý moment (Nm)<br>(2000/25/EC)  | 471             |
| Převýšení točivého momentu (%) (ECE R24) | 43              |
| Jmenovité otáčky [ $\text{min}^{-1}$ ]   | 2200            |
| Počet válců / ventilů                    | 4/16            |
| Plnění                                   | turbodmychadlo  |
| Vrtání / zdvih [mm]                      | 105/120         |
| Objem [ $\text{cm}^3$ ]                  | 4156            |
| Chlazení                                 | viskoventilátor |



Obr. 35: Zetor Forterra [38]



Námi měřený motor nacházející se v laboratořích ÚADI vycházel z tohoto komerčně prodávaného modelu. Je však upraven pro dílčí potřeby a měření automobilního ústavu. Naměřený maximální výkon byl 79 kW při 2200 min<sup>-1</sup> a maximální točivý moment 457 N.m při 1480 min<sup>-1</sup>. V grafu níže je zobrazena jeho otáčková charakteristika.



Obr. 36: Jmenovitá otáčková charakteristika námi měřeného motoru



## 6 KALIBRACE VSTŘIKOVÁNÍ ADBLUE

Pro správnou funkci systému a dosažení požadovaných výsledků redukce oxidů dusíku ve výfukových plynech bylo nutné zásobovací modul nejprve nakalibrovat. Kalibrace probíhala na zkušební stolici optimalizací vstřikování různých dávek redukčního činidla, změnou doby otevření a frekvence vstřikovače.

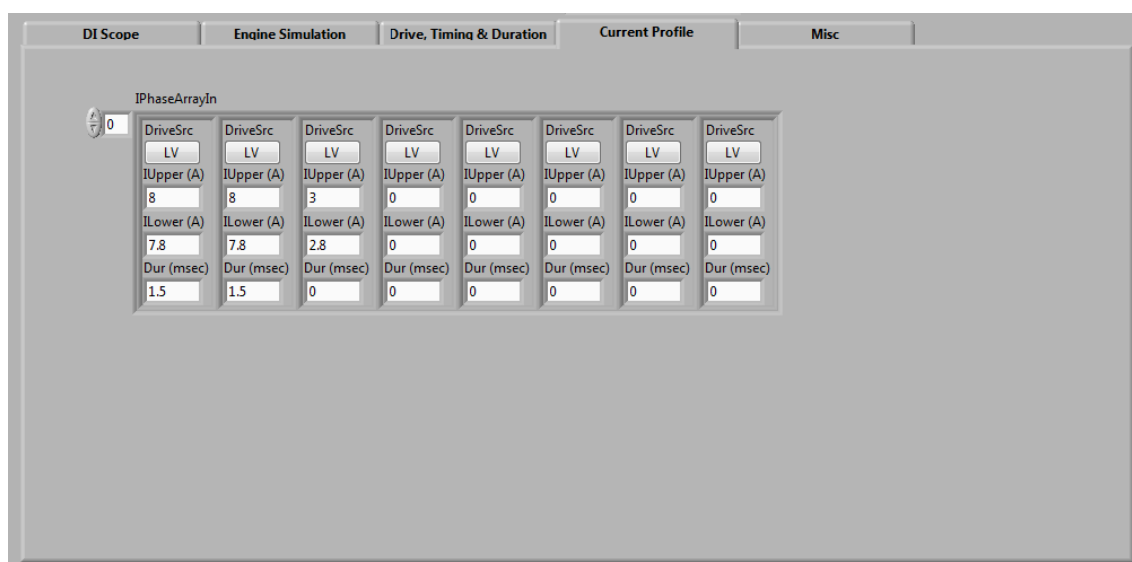
### 6.1 METODIKA KALIBRACE

Pro řízení vstřikovače byl použit řídicí modul NI – 9751 od společnosti National Instruments. Tento tříkanálový řídicí modul umožňuje řízení až tří solenoidových, nebo dvou piezoelektrických vstřikovačů. S jeho pomocí lze u každého kanálu individuálně řídit časování a dobou otevření ventilu.

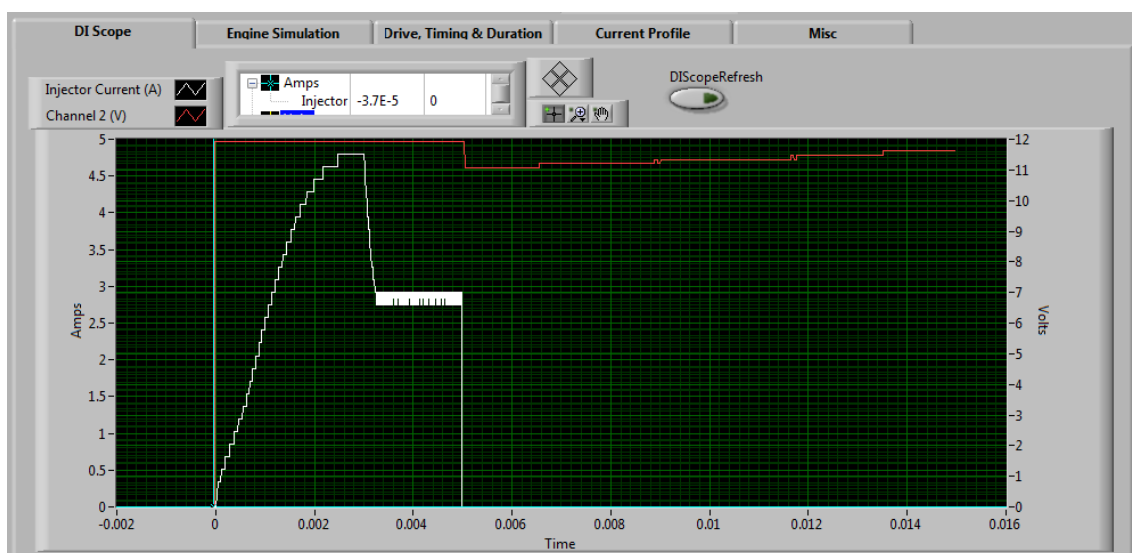


Obr. 37: Řídicí jednotka NI – 9751 [40]

Otevírací proud vstřikovače byl nastaven s ohledem na jeho parametry, jež jsou uvedeny v kapitole 5.1.3. Detail nastavení tohoto proudu je znázorněn na obr. 37. Výsledný reálný průběh otevření během jednoho vstřiku je pak na následujícím obr. 38.



Obr. 38: Konfigurace průběhu vstřiku



Obr. 39: Průběh proudu během jednoho vstřiku

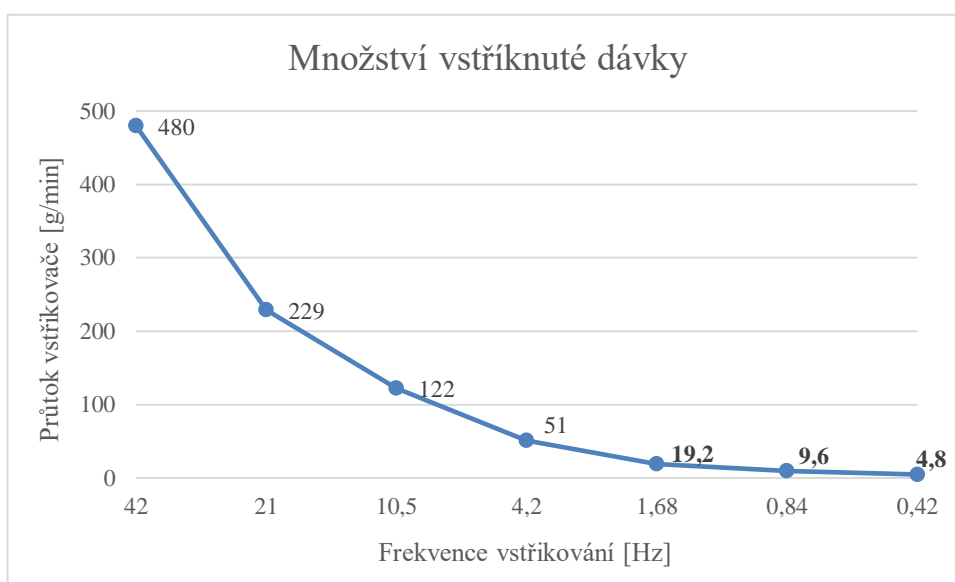
Po odzkoušení několika kombinací frekvence a průtoku vstřikovače byl pro experimentální měření zvolen cyklus s frekvencí vstřikování 42 Hz s hodnotou otevíracího proudu 5 A při celkovém času otevření vstřikovače 5 ms. Jak je však z grafu patrné, reálný otevírací proud dosahoval hodnoty lehce pod 5 A. Výsledný tlak v systému činil 3 bary – během tohoto tlaku byl vstřikovač schopen pracovat dle požadovaných potřeb. Pro kontrolu tlaku v média v oběhu byl do systému navíc vřazen tlakový regulátor.

Zvolené maximální množství dávky tryskou během jednoho vstřiku je uvedeno v tabulce 6 níže. Pro naše použití bylo použito tří posledních hodnot z této tabulky – 19,2; 9,6 a 4,8 g/min což odpovídá 1/25, 1/50 a 1/100 maximální dávky.



Tab 6 Maximální průtok vstřikovače

| Frekvence [Hz] | Průtok [g/min] | Průtok [g/hod] |
|----------------|----------------|----------------|
| 42             | 480            | 28800          |
| 21             | 229            | 13740          |
| 10,5           | 122            | 7320           |
| 4,2            | 51             | 3060           |
| <b>1,68</b>    | <b>19,2</b>    | <b>1152</b>    |
| <b>0,84</b>    | <b>9,6</b>     | <b>576</b>     |
| <b>0,42</b>    | <b>4,8</b>     | <b>288</b>     |



Obr. 40: Kalibrační křivka vstřikovače

Integrovaná tryska SCR katalyzátoru rozprašuje redukční činidlo pomocí osmi otvorů o stejném průměru 0,56 mm. Úhel rozprašení je zhruba 130 °.

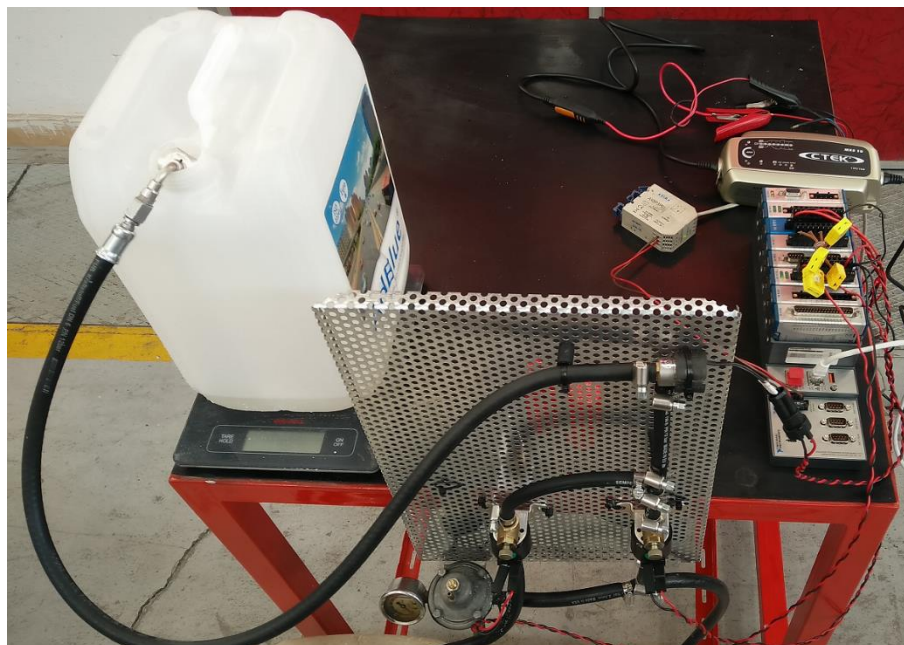


Obr. 41: Pohled na rozptyl trysky z boku a shora



## 6.2 KALIBRAČNÍ STANOVIŠTĚ

Na tomto stanovišti byla ověřena celková funkčnost zásobovacího modulu a následně pak experimentálně zjišťována požadovaná dávka redukčního činidla. Ta byla určena s pomocí hmotnostního měření digitální váhou. Celý proces vstřikování je ovládán řídicím modulem NI – 9751.



*Obr. 42: Hmotnostní měření požadované dávky vstřiku*



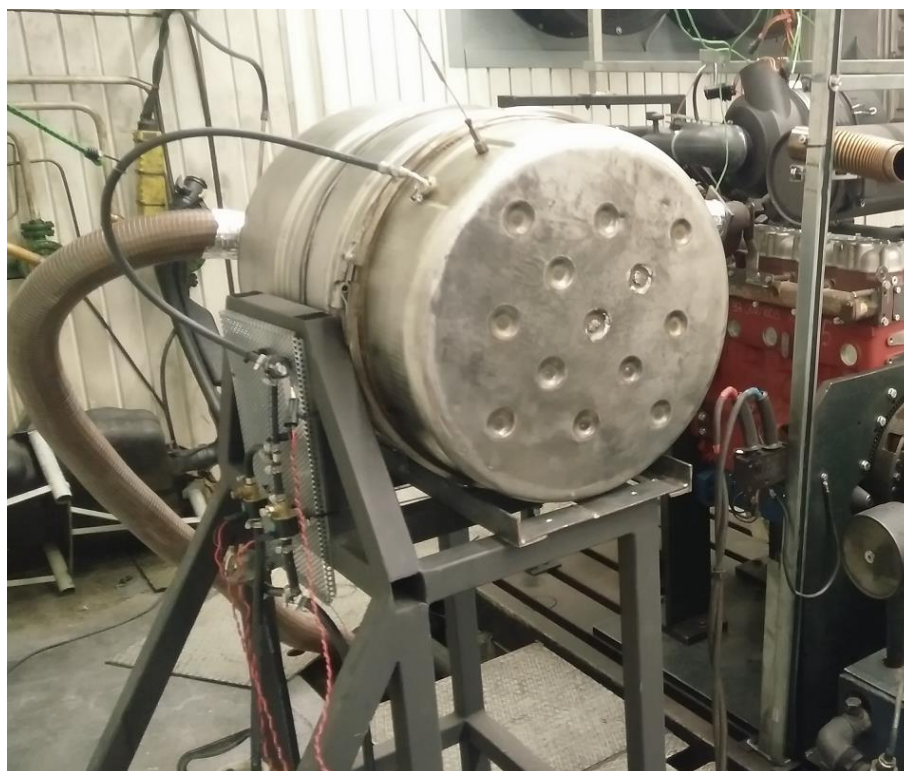
*Obr. 43: Kalibrace zásobovacího modulu*



### 6.3 CELKOVÁ ZÁSTAVBA NA MOTORU



*Obr. 44: Zkušební stanoviště se zástavbou SCR katalyzátoru*



*Obr. 45: Umístění SCR katalyzátoru se zásobovacím modulem*



*Obr. 46: Detail pohledu na zásobovací modul umístěného na stojanu pro SCR katalyzátor*



## 7 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI SYSTÉMU A ANALÝZA VÝSLEDKŮ

Zkušební stanoviště bylo vybaveno komplexním zázemím pro měření motoru od měření tepot, tlaků, spotřeby, emisí až po systémy pro plnou automatizaci a kontrolu testů. Měřený vznětový motor na zkušební stoličce byl připojen přes vývodový hřídel na elektro-vířivý dynamometr o výkonu 250 kW s maximálními otáčkami 6 000 min<sup>-1</sup>.

Spotřeba paliva byla měřena pomocí palivoměru AVL 733S pracujícího na principu gravimetrické metody – váhového rozdílu.

Emise motoru byly měřeny pomocí emisního analyzátoru diagnostického zařízení Bosch KTS 650. Tento emisní analyzátor pracuje s uživatelsky praktickým operačním systémem Windows ME. Jeho hybná síla je informační systém Bosch ESI[tronic]. Hodnoty průtoku plynů při testování se pohybují v rozmezí od 140 – 200 l/h. Měřicí rozsah emisí je 0 – 9999 ppm pro HC, 0 – 9999 ppm pro NO<sub>x</sub>, 0 – 10 % objemu CO, 0 – 18 % objemu CO<sub>2</sub> a 0 – 22 % objemu O<sub>2</sub>. Přístroj pro měření využívá dvou O<sub>2</sub> senzorů s označením typ R 17 – A a typ A7 – 11,5.

### 7.1 METODIKA MĚŘENÍ

Samotné měření emisí vycházelo z metodiky NRSC cyklu uvedeného v kapitole 1.2 Emisní zkoušky vozidel – testovací cykly. Z této metodiky měření byly vybrány tři oblasti pro ověření funkčnosti a vlivu vstřikování redukčního činidla – volnoběžné otáčky (800 min<sup>-1</sup>), otáčky motoru maximálního točivého momentu (1480 min<sup>-1</sup>) a maximálního výkonu zadaného vznětového motoru (2200 min<sup>-1</sup>). Hodnoty pro tyto oblasti jsou uvedeny na obr. 35 Jmenovitá otáčková charakteristika motoru v kapitole 5.2 Motor Zetor. Pro uvedené otáčky motoru a následně pak pro vliv na redukci NO<sub>x</sub> ve výfukových plynech bylo navíc měření prováděno za různého zatížení motoru (100 %, 75 %, 50 %).

### 7.2 VÝSLEDKY MĚŘENÍ EMISÍ

Ověření funkčnosti systému ve všech případech vstřikování kromě volnoběžných otáček motoru proběhlo úspěšně. NO<sub>x</sub> obsažené ve výfukových plynech se podařilo v závislosti na vstřikování určité dávky AdBlue snížit, v některých případech až k 0 ppm NO<sub>x</sub>.

Jedinou výjimkou bylo měření při volnoběžných otáčkách motoru. Motor nepracoval při velkém zatížení, a tak spaliny výfukových plynů nedosahovaly teplotního spektra potřebného k průběhu selektivně katalytických reakcí. Teplota spalin v SCR katalyzátoru během volnoběžných otáček nedosahovala ani 100 °C, zejména kvůli jeho velké obalové ploše. Při tomto režimu nebylo možné využít technologie SCR ke snížení emisí NO<sub>x</sub>. Pro tuto oblast otáček by tak bylo vhodnější použití menšího SCR katalyzátoru. Hodnoty teplot výfukových plynů při různém zatížení jsou uvedeny v tab 7.

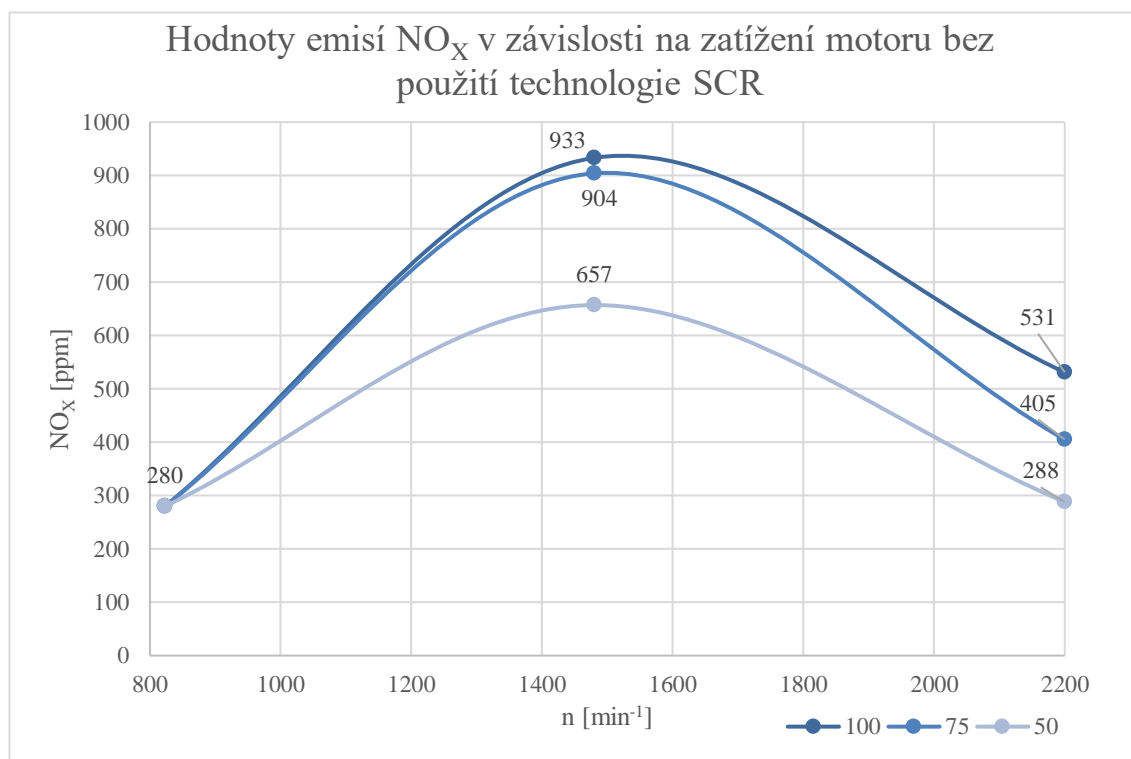


Tab. 7 Teploty výfukových plynů před tryskou uvnitř katalyzátoru

| n [min <sup>-1</sup> ] | T <sub>vřf</sub> [°C] | Zatížení motoru [%] |
|------------------------|-----------------------|---------------------|
| 823                    | 87                    | 50                  |
| 1480                   | 290                   | 100                 |
|                        | 272                   | 75                  |
|                        | 235                   | 50                  |
| 2200                   | 290                   | 100                 |
|                        | 226                   | 75                  |
|                        | 194                   | 50                  |

### 7.2.1 HODNOTY EMISÍ BEZ POUŽITÍ TECHNOLOGIE SCR

Jak je patrné z grafu závislosti množství emisí NO<sub>x</sub> na otáčkách motoru, nejvyšší hodnoty NO<sub>x</sub> byly naměřeny při maximálním zatížení motoru v oblasti maximálního točivého momentu motoru. Nejvyšší naměřenou hodnotou emisí bez použití SCR bylo 933 ppm NO<sub>x</sub> při 100 % zatížení a maximálním krotivém momentu.



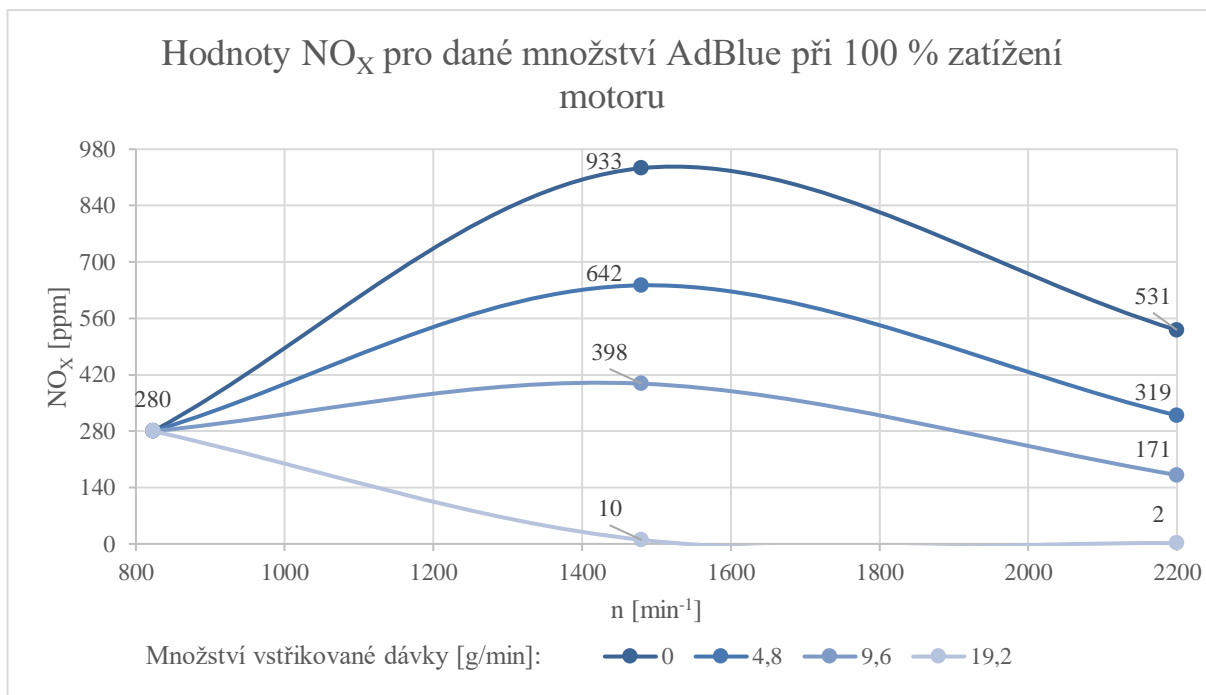
Obr. 47: Graf hodnot emisí NO<sub>x</sub> v závislosti na procentuálním zatížení motoru bez použití technologie SCR

Na druhou stranu s klesajícím zatížením motoru se hodnoty těchto emisí také snižovaly, a tak se zde potvrdily teoretické předpoklady – čím vyšší zatížení motoru, tím vyšší emise NO<sub>x</sub>.



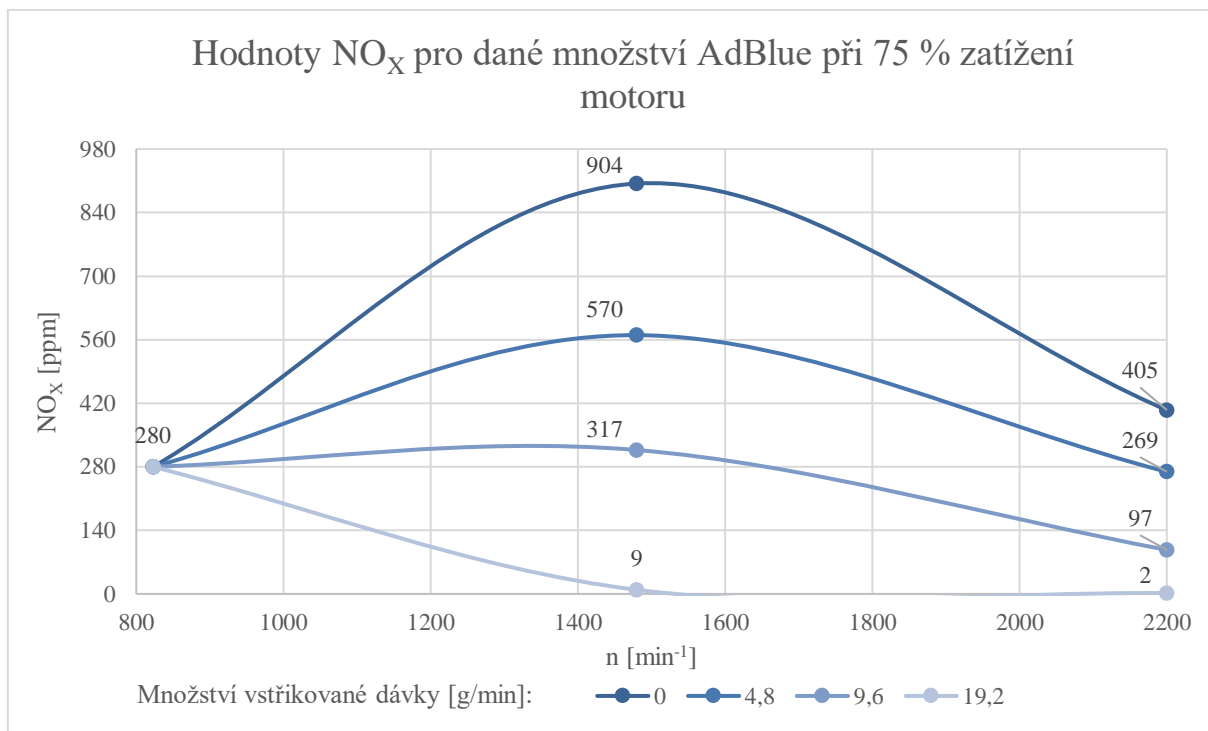
## 7.2.2 HODNOTY EMISÍ S POUŽITÍM TECHNOLOGIE SCR

V této kapitole jsou porovnány a analyzovány hodnoty emisí  $\text{NO}_x$  pro jednotlivé stupně zatížení motoru.

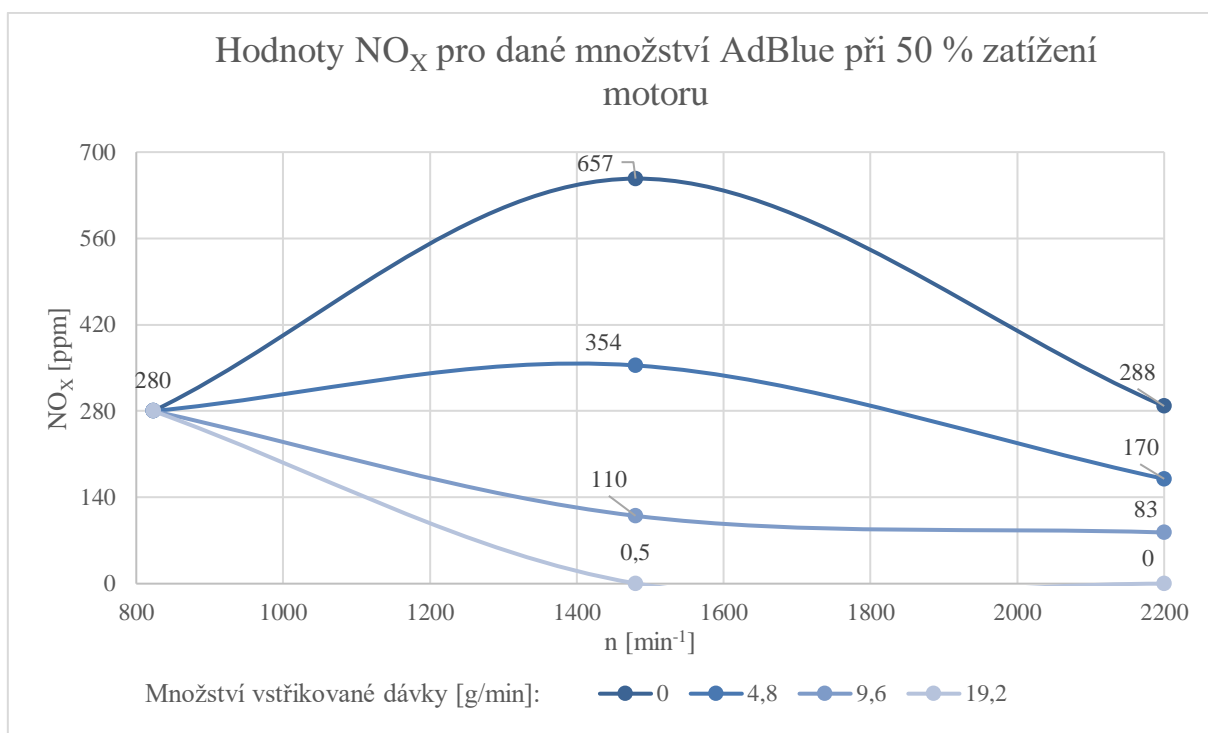


Obr. 48: Graf vlivu dávky AdBlue na redukci  $\text{NO}_x$  při 100 % zatížení motoru

Nejtmavší křivka grafu značí hodnoty emisí bez použití systému SCR. Zbylé světlejší křivky pak postupně znázorňují hodnoty vyprodukovaných  $\text{NO}_x$  ovlivněné vstříknutím 0,01 %, 0,02 % a 0,04 % maximální dávky redukčního činidla. Maximální dávka vstřikování byla při frekvenci 42 Hz 480 g/min. Tyto hodnoty teak odpovídají 4,8; 9,6 a 19,2 g/min vstříknutého redukčního činidla AdBlue do proudu spalín.



Obr. 49: Graf vlivu dávky AdBlue na redukci  $\text{NO}_x$  při 75 % zatížení motoru



Obr. 50: Graf vlivu dávky AdBlue na redukci  $\text{NO}_x$  při 50 % zatížení motoru



### 7.3 ANALÝZA VÝSLEDKŮ

S použitím technologie selektivní katalytické reakce pomocí relativně dostupných komerčních komponentů lze na zadaném vznětovém motoru provádět funkční zkoušky redukce NO<sub>x</sub> ve výfukových plynech. To vše v závislosti na množství vstříkované dávky redukčního činidla AdBlue.

Nejvyšší naměřené hodnoty emisí NO<sub>x</sub> – 933 ppm, se vyskytovaly v oblasti jeho maximálního točivého momentu při maximálním zatížení motoru, přičemž vstříknutím 4,8 g/min ~ 1/100 maximální dávky AdBlue se podařilo objem těchto emisí zredukovat zhruba o 1/3. Při vstříknutí většího množství 19,2 g/min ~ 1/25 maximální dávky, se podařilo tyto hodnoty zredukovat téměř na nulovou hodnotu, jak je znázorněno v grafu na obr. 48. Pro názornost jsou tyto hodnoty z oblasti otáček maximálního točivého momentu uvedeny v tab. 8.

Tab. 8 Množství vstříkované dávky a výsledné hodnoty NO<sub>x</sub>

| Frekvence [Hz] | Podíl maximální dávky | Množství vstříkované dávky [g/min] | NO <sub>x</sub> [ppm] |
|----------------|-----------------------|------------------------------------|-----------------------|
| 0              | 0                     | 0                                  | 933                   |
| 0,42           | 1/100                 | 4,8                                | 642                   |
| 0,84           | 1/50                  | 9,6                                | 398                   |
| 1,68           | 1/25                  | 19,2                               | 10                    |

Použitý katalyzátor i přes svou větší velikost k objemu měřeného motoru prokazoval správnou funkci a dobré výsledky. Nutno však brát v potaz, že měření probíhalo na měřicí stolici uvnitř zkušebny s laboratorními podmínkami. Funkčnost tohoto systému při použití v reálném provozu, zejména za nižších teplot v zimním období, nemusí dosahovat takové účinnosti jako při laboratorním měření. To by mohlo být předmětem dalšího zkoumání.

System byl také do jisté míry omezen pracovním tlakem v oběhu. Měření probíhalo při tlaku 3 bary. Při zvýšení tohoto pracovního tlaku by došlo k lepšímu rozprášení redukčního činidla AdBlue a tím efektivnějšímu využití aktivní plochy katalyzátoru.



## ZÁVĚR

Cílem mé diplomové práce bylo pro zadaný vznětový motor nacházející se v laboratořích Ústavu automobilního a dopravního inženýrství navrhnout a sestavit zařízení pro snižování emisí oxidů dusíku, provést dostupná měření pro ověření funkčnosti celého systému a zhodnotit dosažené výsledky. Jedná se o vznětový motor Zetor o zdvihovém objemu 4,2 l s maximálním výkonem 79 kW a maximálním točivým momentem 457 Nm.

V první řadě byla zpracována teoretická rešerše zabývající se legislativními předpisy, emisemi vznikajícími při spalovacích procesech uvnitř vznětového motoru a následně pak možnostmi snižování emisí výfukových plynů – aktivními a pasivními prostředky pro snižování těchto emisních složek, především oxidů dusíku.

Druhým úkolem byl 3D konstrukční návrh prvku sloužícího k dávkování redukčního činidla AdBlue do proudu spalin, označovaného jako zásobovací modul. Tato část byla zpracována pomocí počítačového programu PTC Creo Parametric 2.0. Tím, že se jednalo o stacionární měření na zkušební stolici, tak při modelování zásobovacího modelu nebyl kladen nárok na celkový rozměr, pouze na funkčnost této součásti. Byly vymodelovány 2 varianty s použitím komerčně dostupných součástí – vysokotlakého palivového čerpadla, vstřikovače a dvou elektromagnetických ventilů. Z těchto návrhů byla pro následující měření vybrána varianta s přívodem vzduchu pomocí jednoho elektromagnetického ventilu před vstřikovač, z důvodu profouknutí tlakem vzduchu k zamezení případné krystalizace roztoku močoviny uvnitř vstřikovače.

Následně byl zásobovací modul dle konstrukčního návrhu sestaven a byla provedena jeho kalibrace s využitím řídicího modulu od firmy National Instruments. Zpočátku byla určena hodnota otevíracího proudu vstřikovače, od kterého se odvíjela doba otevření ventilu během jednoho vstřiku. Maximální otevírací proud byl zvolen s ohledem na jeho parametry uvedené v příloze této diplomové práce. Po určení těchto hodnot probíhala optimalizace maximálního vstřikovaného množství při změně frekvence vstřikování. Maximální průtok vstřikovače při frekvenci vstřikování 42 Hz - 480 g/min byl určen vázkovou metodou. Pro následující metodiku měření k ověření funkčnosti celého systému však byly zvoleny 1/100, 1/50 a 1/25 maximální dávky vstřikovače, což odpovídá 4,8; 9,6 a 19,2 g/min.

Pro zadaný vznětový motor byl sestaven systém ke snížení NO<sub>x</sub> ve výfukových plynech s použitím komerčně dostupných komponentů a SCR katalyzátoru určeného pro nákladní vozidlo Scania. I přes větší rozměr katalyzátoru, než pro aplikaci na zadaný vznětový motor se podařilo provést funkční měření a dosáhnout dobrých výsledků redukce emisí NO<sub>x</sub>.

Při následujícím měření se vycházelo z naměřené otáčkové charakteristiky daného motoru a bodů používaných při provádění emisních zkoušek dle cyklu NRSC. Tyto body byly měřeny v oblasti jmenovitých otáček motoru při maximálním točivém momentu a maximálním výkonu při různém zatížení motoru – 100, 75, 50 %. Probíhalo tak ověření, do jaké míry lze vytvořeným systémem se vstřikováním redukčního činidla do proudu spalin redukovat emise NO<sub>x</sub> u zadaného vznětového motoru. Toto měření probíhalo nad rámec diplomové práce.

I přes použití většího SCR katalyzátoru, určeného zejména pro nákladní automobily, se podařilo v mé diplomové práci prokázat funkčnost technologie vstřikování AdBlue pro tento zadaný motor. Nedostatky této aplikace katalyzátoru se ukázaly pouze při nižším zatížení a



volnoběžném chodu motoru, kdy spaliny uvnitř katalyzátoru nedosahují takových teplot, během kterých probíhají žádoucí reakce redukcí oxidů dusíku na volný dusík a vodní páru. Dalo by se tomu však předejít přenastavením časování vstřikování paliva, především zpožděním vstřikování, které vede k nárůstu teplot spalin. Na druhou stranu použití režimu motoru s pozdějším vstřikováním či přívstřikem paliva vede k výraznému zvýšení produkce pevných částic, jak je tomu uvedeno v teoretické části práce. Je tedy nasnadě optimalizace těchto všech procesů k dosažení co nejmenších hodnot složek emisí, odpovídající platným emisním normám.

Jako další řešení aplikace pro menší motorizaci se lze vydat cestou zmenšení aktivní činné plochy v místě, kde spaliny smíchané s redukčním činidlem vstupují do filtru uprostřed katalyzátoru. Tato metoda by mohla být předmětem dalších experimentálních zkoušek.

Všechny cíle diplomové práce uvedené v zadání byly splněny.



## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] VLK, F. Vozidlové spalovací motory, 1. vydání, Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc, 2003. 578 s. ISBN 80-238-8756-4
- [2] HROMÁDKO, Jan., HROMÁDKO, Jiří., HÖNIG, V., MILER, P. Spalovací motory. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, a.s., 2011. 296 s. ISBN 978-80-247-3475-0.
- [3] RAUSCHER, J. Vozidlové motory, Studijní opory. Vysoké učení technické v Brně, FSI. 2010
- [4] HOFMANN, K. Regulované přeplňování vozidlových motorů, Učební text Ústavu dopravní techniky FSI – VUT Brno, 2000.
- [5] GSCHEIDLE, R. a kolektiv: Příručka pro automechanika. 3. vydání Nakladatelství Europa – Sobotales, Praha 2007.
- [6] Odbor termomechaniky a techniky prostředí. Analýza výfukových plynů. Energetický ústav Vysoké učení technické v Brně, FSI, [online]. [cit. 2017], dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/mereni/KA04-13.htm>
- [7] VOJKŮVKA, F. Návrh plnicího systému motoru s uvažováním recirkulace výfukových plynů, Brno: Vysoké učení technické v Brně, FSI, 2010. 95s. Vedoucí práce: Ing. Radim Dundálek, Ph.D.
- [8] VĚŘÍŠ, M. Přeplňovaný zážehový motor o objemu 1,2 l, Brno: Vysoké učení technické v Brně, FSI, 2016. 90s. Vedoucí práce: MUDr. Marek Bradávka
- [9] TOMANEC, F. Kinematický model mechanismu natáčení lopatek turbodmyhadla, Brno: Vysoké učení technické v Brně, FSI, 2010. Vedoucí práce: Ing. Petr Porteš, Dr.
- [10] MIKULÁŠEK, J. Emise vozidlových motorů, Brno: Mendelova univerzita v Brně, Agronomická fakulta, 2011. Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Sedlák CSc.
- [11] POLNICKÝ, V. Studie rozmístění dílů SCR systému na traktoru s pevnostní analýzou vybraných komponentů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, FSI, 2014. Vedoucí práce: Ing. Radim Dundálek, Ph.D.
- [12] Cummins Emmision Solutions, Worldwide Emissions regulations. [online]. © 2017 [cit. 2017-02-11]. Dostupné z: [http://www.cumminsemissionsolutions.com/Worldwide\\_Emissions\\_Regulations](http://www.cumminsemissionsolutions.com/Worldwide_Emissions_Regulations)
- [13] NGK Europe, Euro standarts. [online]. © 2017 [cit. 2017-02-11]. Dostupné z: <https://www.ngk.de/en/technology-in-detail/lambda-sensors/basic-exhaust-principles/euro-standards/>
- [14] Dieselnet, EU: Nonroad Engines. [online]. © 2017 [cit. 2017-02-11]. Dostupné z: <https://www.dieselnet.com//standards/eu/nonroad.php>
- [15] Car Engineer, Romain Nicolas, The different driving cycles. [online], © 2017 [cit. 2017-02-13]. Dostupné z: <http://www.car-engineer.com/the-different-driving-cycles/>



- [16] Dieselnet, Emmision Test Cycles. [online], © 2017 [cit. 2017-02-24]. Dostupné z: <https://www.dieselnet.com/standards/cycles/>
- [17] NGK Spark Plugs Europe, Exhaust and harmful emissions. [online]. © 2017 [cit. 2017-02-24]. Dostupné z: <https://www.ngk.de/en/technology-in-detail/lambda-sensors/basic-exhaust-principles/exhaust-and-harmful-emissions/>
- [18] Dieselnet, Nonroad Transient Cycle (NRTC) [online]. © 2017 [cit. 2017-03-08]. Dostupné z: <https://www.dieselnet.com//standards/cycles/nrtc.php#>
- [19] Autoporadna, Otázky kolem emisí II: Kde se berou? [online]. © 2006 [cit. 2017-03-08]. Dostupné z [http://www.autoporadna.unas.cz/old/info\\_59.htm](http://www.autoporadna.unas.cz/old/info_59.htm)
- [20] Fleximauto, Regulace tlaku přepřívání turbodmychadel [online]. © 2016 [cit. 2017-03-08]. Dostupné z: <http://www.flexamiauto.cz/teorie/>
- [21] Volvo Cars, Variable Nozzle Turbine VNT, [online]. © 2017 [cit. 2017-03-08]. Dostupné z: <https://www.media.volvocars.com/global/en-gb/media/photos/7086>
- [22] Turbo Servis, How does the VNT works? [online]. © 2010 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://www.turboservis.rs/?eng,vnt>
- [23] NETT Technologies Inc., What is Diesel Oxidation Catalyst? [online]. © 2017 [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <http://www.nettinc.com/information/emissions-faq/what-is-a-diesel-oxidation-catalyst>
- [24] Volkswagen Group of America Inc., The EA288 Diesel Engine Family. Technical brochure. [online]. © 2014 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: [http://pics3.tdiclub.com/data/517/820433\\_EA288.pdf](http://pics3.tdiclub.com/data/517/820433_EA288.pdf)
- [25] Autolexicon.net, DPF (Diesel Particulate Filter). [online] © 2017 [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <http://www.autolexicon.net/cs/articles/dpf-diesel-particulate-filter/>
- [26] Dieselnet, Selective Catalytic Reduction. [online] © 2017 [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: [https://www.dieselnet.com/tech/cat\\_scr.php](https://www.dieselnet.com/tech/cat_scr.php)
- [27] Bosch Diesel Exhaust Treatment, Denoxtronic 2.2 for mining, agriculture and construction. [online]. © 2017 [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: [http://products.bosch-mobility-solutions.com/specials/de/abgasnachbehandlung/en/subpage/Denoxtronic\\_2-2.html](http://products.bosch-mobility-solutions.com/specials/de/abgasnachbehandlung/en/subpage/Denoxtronic_2-2.html)
- [28] Johnson Matthey, NO<sub>x</sub> adsorber catalyst. [online]. © 2017 [cit. 2017-04-05]. Dostupné z: <http://ect.jmcatlysts.com/catalyst-technologies-johnson-matthey/nox-adsorber-catalysts>
- [29] Johnson Matthey, Hydrocarbon – SCR system. [online]. © 2017 [cit. 2017-04-05], Dostupné z: <http://ect.jmcatlysts.com/catalyst-technologies-johnson-matthey/hydrocarbon-scr-system-johnson-matthey>



- [30] Johnson Matthey, Cold Start Catalyst (CSC). [online]. © 2017 [cit. 2017-04-05]. Dostupné z: <http://ect.jmcatlysts.com/catalyst-technologies-johnson-matthey/cold-start-catalyst-csc>
- [31] Bosch Diesel Systems, Denoxtronic 2.2 – Urea Dosing System for SCR systems. [online]. © 2017 [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: [http://products.bosch-mobility-solutions.com/specials/de/abgasnachbehandlung/upload\\_files/DS\\_Sheet\\_Denoxtronic2-2\\_Urea\\_Dosing\\_System\\_20120718.pdf](http://products.bosch-mobility-solutions.com/specials/de/abgasnachbehandlung/upload_files/DS_Sheet_Denoxtronic2-2_Urea_Dosing_System_20120718.pdf)
- [32] Bosch Diesel Systems, Denoxtronic 3.1 – Urea Dosing System for SCR systems. [online]. © 2017 [cit. 2017-04-08]. Dostupné z: [http://www.bosch-mobility-solutions.cz/media/db\\_application/downloads/pdf/antrieb/en\\_3/02\\_DS\\_Sheet\\_Denoxtronic\\_3\\_1-Urea\\_Dosing\\_System\\_20110826.pdf](http://www.bosch-mobility-solutions.cz/media/db_application/downloads/pdf/antrieb/en_3/02_DS_Sheet_Denoxtronic_3_1-Urea_Dosing_System_20110826.pdf)
- [33] Bosch Diesel Systems, Denoxtronic 5 – Urea Dosing System for SCR systems. [online]. © 2017 [cit. 2017-04-08]. Dostupné z: [http://products.bosch-mobility-solutions.com/media/ubk\\_europe/db\\_application/downloads/pdf/antrieb/en\\_3/DS\\_Sheet\\_Denoxtronic5-Urea\\_Dosing\\_System\\_20120720.pdf](http://products.bosch-mobility-solutions.com/media/ubk_europe/db_application/downloads/pdf/antrieb/en_3/DS_Sheet_Denoxtronic5-Urea_Dosing_System_20120720.pdf)
- [34] Nett Technologies Inc., Nett BlueMAX™ SCR System, Operations Manual. [online] © 2017 [cit. 2017-04-08]. Dostupné z: [https://www.nettinc.com/wp-content/uploads/docs/nett\\_manual\\_bluemax.pdf](https://www.nettinc.com/wp-content/uploads/docs/nett_manual_bluemax.pdf)
- [35] Delphi Systems, Delphi Selective Catalytic Reduction Dosing System, [online] © 2017 [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: <http://delphi.com/manufacturers/auto/powertrain/diesel/em-tech/scrds/>
- [36] Cummins Emission Solutions, EcoFit™, UL2 Liquid-Only Urea Dosing System brochure. [online] © 2017 [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: <http://www.cumminsemissionsolutions.com/sites/default/files/UL2brochure.pdf>
- [37] Cleantaxx, Funkce katalyzátoru [online] © 2017 [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: <https://www.dpf-ftg.cz/funkce-katalyzatoru>
- [38] Zetor, Technické specifikace motoru Forterra [online] © 2017 [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: <http://www.zetor.cz/zetor-forterra-specifikace#obsah>
- [39] Scania, Scania Euro 4 – Principle in SCR catalyst [online] © 2017 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www4.scania.com/en/globalengineplatform/START/?ineuro=4&invehicle=bus>
- [40] National instruments, NI – 9751 (C Series Direct Injector Driver Module) [online] © 2017 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.ni.com/cs-cz/support/model.ni-9751.html>
- [41] AgriCS, Emise vznětového motoru a systém SCR - NRSC cyklus [online] © 2017 [cit. 2017-05-20] Dostupné z: <http://www.agrics.cz/obrazky-soubory/emise-vznetoveho-motoru-a-system-scr-4107d3.pdf?redir>



## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

|           |                      |                             |
|-----------|----------------------|-----------------------------|
| $\lambda$ | [-]                  | Součinitel přebytku vzduchu |
| f         | [Hz]                 | Frekvence vstřikování       |
| p         | [bar]                | Tlak                        |
| U         | [V]                  | Napětí                      |
| $\Omega$  | [Ohm]                | Odpor                       |
| I         | [A]                  | Proud                       |
| $T_{výf}$ | [°C]                 | Teplota výfukových spalin   |
| $t_o$     | [ms]                 | Doba otevření ventilu       |
| Q         | [g/min]              | Objemový průtok             |
| P         | [kW]                 | Výkon                       |
| M         | [Nm]                 | Točivý moment               |
| n         | [min <sup>-1</sup> ] | Otáčky motoru               |



## SEZNAM PŘÍLOH

[I] Magic FX Injector Datasheet. Code 4250