

Česká zemědělská univerzita v Praze
Technická fakulta

**Porovnání katalyzátoru Euro 5 a Euro 6
u zvoleného vozidla**

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Martin Pexa, Ph.D.

Autor práce: Jan Tesárek

Praha 2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Jan Tesárek

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Porovnání katalyzátoru Euro 5 a Euro 6 u zvoleného vozidla

Název anglicky

Comparison of Euro 5 and Euro 6 catalytic converters for a selected vehicle

Cíle práce

Cílem této diplomové práce je porovnání dvou emisních norem na motoru 1.6 MPI, emisní třídy Euro 5 a Euro 6. Práce se zaměří především na rozložení teplotních polí v katalyzátoru, zejména z pohledu maximálních teploty a teplotních gradientů v jízdních režimech, které budou naměřeny v reálném provozu a následně reprodukovány na motorovém brzdovém stanovišti.

Metodika

První část práce bude realizována formou literárního rozboru. Na tuto část bude navazovat praktická část práce, která se zaměří na simulaci jízdního cyklu na motorovém stanovišti, kde budou sledovány teplotní pole katalyzátoru Euro 5 a Euro 6 na zvoleném typu motoru

Osnova:

- 1) Úvod
- 2) Rozbor současného stavu (popis funkce katalyzátoru, měření teplotních polí atd.)
- 3) Cíl práce
- 4) Metodika práce
- 5) Výsledky (stanovení jízdního profilu, testování a porovnání katalyzátoru EU5/ EU6 na motorovém stanovišti)
- 6) Závěr

Doporučený rozsah práce

50-60

Klíčová slova

motor, emise, katalyzátor, brzdové sanoviště

Doporučené zdroje informací

HALDERMAN, J D. – LINDER, J. *Automotive fuel and emissions control systems* James D. Halderman, Jim Linder. Upper Saddle River, N.J.: Pearson/Prentice Hall, 2006. ISBN 013110442.

HROMÁDKO, J. *Speciální spalovací motory a alternativní pohony : komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-4455-1.

Periodika, předpisy a firmení literatura

ŠMERDA, T. – ČUPERA, J. – FAJMAN, M. *Vznětové motory vozidel : biopaliva, emise, traktory*. Brno: CPress, 2013. ISBN 978-80-264-0160-5.

Předběžný termín obhajoby

2022/2023 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Martin Pexa, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra jakosti a spolehlivosti strojů

Elektronicky schváleno dne 19. 4. 2022

doc. Ing. Martin Pexa, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 12. 5. 2022

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 26. 03. 2023

Prohlášení

Prohlašuji, že diplomovou práci „Porovnání katalyzátoru Euro 5 a Euro 6 u zvoleného vozidla“ jsem vypracoval samostatně pod vedením prof. Ing. Martina Pexy, Ph.D. s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 27.03.2023

Jan Tesárek

Poděkování

Rád bych touto cestou vyjádřil poděkování prof. Ing. Martinu Pexovi, Ph.D. za jeho cenné rady a trpělivost při vedení diplomové práce.

Mé poděkování patří též mé rodině a blízkým přátelům za pomoc a podporu během studia.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá termografickými měřeními katalyzátorů spalovacích motorů a následným porovnáním emisních norem Euro 5 a Euro 6 na zvoleném motoru. Teoretická část práce se skládá z literárního rozboru, uvádějícím základní procesy spalování zážehového motoru a metody redukce emisí. Navazující praktická část je zaměřena na provádění měření na zkušebním stavu s využitím náměrů jízdních profilů z reálného vozidla. Následným porovnáním výsledků měření bylo zjištěno, že větším důrazem na vývoj aplikace řídicí jednotky pro emisní normu Euro 6 bylo z hlediska termografie katalyzátoru dosaženo značného zlepšení oproti variantě Euro 5.

Klíčová slova: motor, emise, katalyzátor, brzdové stanoviště

Abstract

The thesis deals with thermographic measurements of catalytic converters of internal combustion engines and subsequent comparison of Euro 5 and Euro 6 emission standards on the selected engine. The theoretical part of the thesis consists of a literature analysis, presenting the basic combustion processes of a spark-ignition engine and methods of emission reduction. The subsequent practical part focuses on performing measurements on a test bed using driving profile measurements from a real vehicle. Subsequent comparison of the measurement results showed that by placing more emphasis on the development of the calibration of the control unit for the Euro 6 emission standard, a significant improvement over the Euro 5 variant was achieved in terms of catalyst thermography.

Keywords: engine, emissions, catalytic converter, engine test bench

Obsah

1	Úvod	1
2	Rozbor současného stavu	2
2.1	Emisní normy v Evropě	2
2.1.1	Emisní norma Euro 1	3
2.1.2	Emisní norma Euro 2	3
2.1.3	Emisní norma Euro 3	4
2.1.4	Emisní norma Euro 4	4
2.1.5	Emisní norma Euro 5	5
2.1.6	Emisní norma Euro 6	5
2.2	Vznik emisí ve spalovacích motorech	7
2.2.1	Plamen v motoru, rychlost hoření	7
2.2.2	Paliva spalovacích motorů	8
2.2.3	Automobilový benzin	9
2.3	Emise spalovacích motorů	12
2.3.1	Oxid uhelnatý	12
2.3.2	Uhlovodíky	13
2.3.3	Oxidy dusíku	15
2.3.4	Pevné částice	16
2.4	Třícestné katalyzátory	18
2.4.1	Vliv vzácných kovů v třícestných katalyzátorech	19
2.4.2	Konstrukce katalyzátorů	21
2.5	Infračervená termografie	22
2.5.1	Infračervené záření	23
3	Cíl práce	27
4	Metodika práce	28
5	Výsledky	29
5.1	Termografie katalyzátoru	29
5.1.1	Záznam jízdního profilu	29

5.1.2	Tvorba programu zkoušky pro motorový zkušební stav	32
5.1.3	Výfukové potrubí pro termografická měření	33
5.1.4	Měření na zkušebním stavu	35
5.2	Výsledky měření jednotlivých variant	39
5.2.1	Úvodní měření a kalibrace	39
5.2.2	Vysvětlení grafů a doplňující zkoušky	41
5.2.3	Měření varianty 1.6 MPI Euro 5	43
5.2.4	Hodnocení měřené varianty Euro 5	45
5.2.5	Měření varianty 1.6 MPI Euro 6	45
5.2.6	Hodnocení měřené varianty Euro 6	48
5.3	Výsledné porovnání variant Euro 5 a Euro 6	48
5.4	Doporučení pro další termografická měření	49
5.4.1	System pro snímání polohy vozidla	49
5.4.2	Rozšíření skupiny standardních měřících cyklů	50
6	Závěr	51
7	Seznam použitých zdrojů	52

Seznam obrázků

2.1	Jízdní cyklus ECE-15 dle normy 70/220/EHS [1]	2
2.2	Struktura laminárního (a) a turbulentního (b) plamene [11]	8
2.3	Schéma destilace a výsledných frakcí [13]	9
2.4	Technologické rafinační procesy [13]	10
2.5	Mechanismy tvorby HC emisí v zážehovém motoru [11]	15
2.6	Průběh formování oxidů dusíku v závislosti na poměru vzduch/palivo [11] .	16
2.7	Kompozice a struktura pevné částice zážehového spalovacího motoru [15] .	17
2.8	Účinnost konverze spalin v katalyzátoru v závislosti na hodnotě λ [11] . . .	19
2.9	Vliv katalyzátoru na průběh reakce [11]	20
2.10	Účinnost katalyzátoru v čase po studeném startu [11]	20
2.11	(a) řez katalyzátorem; (b) schéma disperze prvků v katalyzátoru [11]	21
2.12	Schematické znázornění úhlové závislosti záření [15]	25
2.13	Závislost emisivity na vlnové délce [15]	25
2.14	Závislost emisivity na teplotě [15]	26
2.15	Příklad zajímavé aplikace termografického měření monopostu F1 [15]	26
5.1	Datalogger Vector VN1630log [15]	31
5.2	Přístroj ETAS ES89x s rozhraním ETK [15]	32
5.3	Detail na komínek se závitem	34
5.4	Přední část katalyzátoru s instalovanými termočlánky	35
5.5	Celkový pohled na ustavený motor na zkušebním stanovišti	36
5.6	Termokamera DIAS PyroView 320N [17]	37
5.7	Zařízení Combustion Fast FID [18]	38
5.8	Modelové výsledky - osa X teplota, osa Y tep. gradient, šipky zobrazují návaznost bodů	41
5.9	Časový záznam teplotního gradientu v testu <i>Schaltrunde</i> - varianta EU5 . .	42
5.10	Výsledky testu <i>Schaltrunde</i> pro variantu Euro 5	43
5.11	Výsledky testu <i>Innenkurs</i> pro variantu Euro 5	44
5.12	Výsledky testu <i>Schaltrunde</i> pro variantu Euro 6	46
5.13	Výsledky testu <i>Innenkurs</i> pro variantu Euro 6	47
5.14	Zařízení Racelogic VBOX Sigma [19]	49

Seznam tabulek

2.1	Emisní limity Euro 1 [2]	3
2.2	Emisní limity Euro 2 [4]	3
2.3	Emisní limity Euro 3 [5]	4
2.4	Emisní limity Euro 4 [5]	4
2.5	Emisní limity Euro 5b [8]	5
2.6	Emisní limity Euro 6d [9]	6
2.7	Parametry ovlivňující výslednou kvalitu obrazu a interpretaci výsledků [16]	22
5.1	Základní parametry kamery DIAS [17]	37
5.2	Základní parametry motoru EA211 1.6 MPI	39

1 Úvod

V současné době je stále více stupňován tlak na čistotu emisí motorových vozidel a emisní limity, které jsou výrobci automobilů nuceni dodržovat, tak kladou čím dál větší nároky na konstruktéry a vývojáře spalovacích motorů a zejména emisních systémů. Z druhé strany je tlak na vývojáře vytvářen trhem a cenovou politikou - zařízení, využívaná pro redukci výfukových exhalací, je nutné vyrábět co nejlevněji a co nejjednodušším způsobem.

Systémy pro redukci emisí je proto nutné navrhovat a optimalizovat tak, aby dokázaly bezproblémově plnit požadovanou funkci po co nejdelší dobu a současně jejich vstupní investice byla na co nejnižší možné úrovni. Vývoj katalyzátorů motorových vozidel se tak dostal do fáze, kdy je nutné výrazně častěji kontrolovat a případně rychle upravovat jednotlivé kroky vývojového projektu, ať již z hlediska schopnosti systému redukovat emise či odolnosti samotné konstrukce.

Pro výraznější podporu vývoje tak byla vytvořena i další projektová fáze, nazývaná se „termografie katalyzátoru“, kterou se zabývá tato diplomová práce. Prováděná termografická měření konstruktérům a vývojářům aplikací řídicích jednotek relativně rychle podávají zpětnou vazbu a řadu doporučení pro další vývoj nebo nutné úpravy systémů redukce emisí.

Diplomová práce se v první části zabývá popisem emisních norem, platných v Evropské Unii, dále funkcí spalovacího motoru z hlediska hoření směsi ve válci a následného vzniku exhalací - na tuto část navazuje krátké uvedení konstrukce třícestných katalyzátorů, které jsou používány u zážehových motorů. Kapitola, zabývající se infračervenou termografií, uzavírá teoretickou část práce.

Praktická část práce je zaměřena na provádění termografických zkoušek na motorovém zkušebním stavu. Po úvodním náměru dat v reálném vozidle a přípravě zkoušky na zkušebním stavu následuje porovnání a rozbor výsledků na měřeném motoru řady EA211 1.6 MPI pro emisní normy Euro 5 a Euro 6. Závěrem jsou uvedena i doporučení pro rozšíření skupiny standardních měřících cyklů a zlepšení interpretace finálních výsledků.

2 Rozbor současného stavu

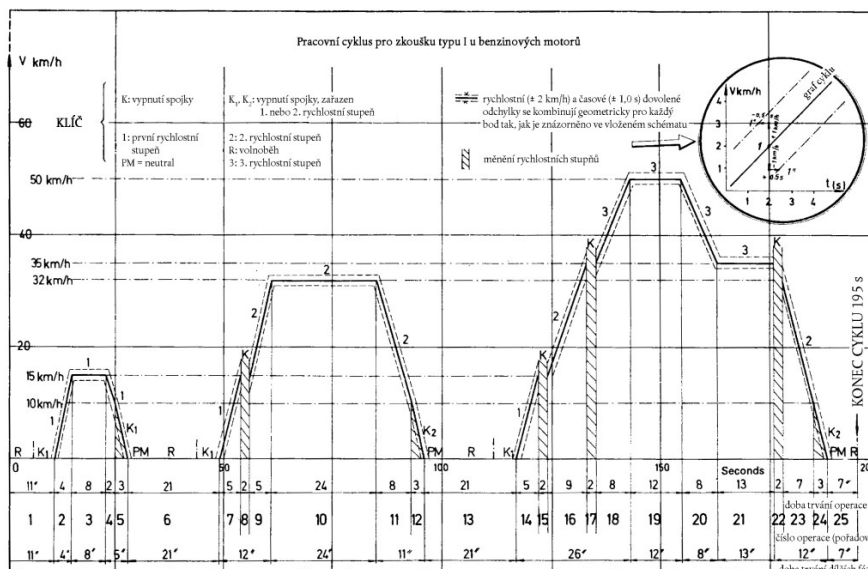
2.1 Emisní normy v Evropě

První emisní normou, zavedenou v Evropě, byla norma s označením 70/220/EHS. Tento předpis v podstatě sjednotil normy jednotlivých členských států Evropské hospodářské společnosti a to z důvodu, aby výrobci automobilů nebyli nuceni vyvíjet a vyrábět odlišné verze svých vozidel pro jednotlivé trhy. Norma 70/220/EHS předepisovala limitní hodnoty emisí oxidu uhelnatého a nespálených uhlovodíků v závislosti na takzvané *referenční hmotnosti vozidla*.

Pro měření emisí byly předepsány tři zkoušky:

- zkouška typu I - ověření průměrných emisí plyných znečišťujících látek v husté městské zástavbě po studeném startu,
- zkouška typu II - emise oxidu uhelnatého při volnoběžných otáčkách,
- zkouška typu III - ověření emisí plynů z klikové skříně.

Pro zkoušku typu I byl uveden jízdní cyklus, označený jako ECE-15 (obr. 2.1), trvající 195 sekund a jako součást jízdního cyklu NEDC byl využíván až do roku 2018. [1]



Obrázek 2.1: Jízdní cyklus ECE-15 dle normy 70/220/EHS [1]

Evropské emisní normy, označované jako *Euro*, vešly v platnost v roce 1992 po vydání směrnice 91/441/EHS a stále představují závazné normy, stanovující limitní hodnoty

škodlivin výfukových exhalací zážehových a vznětových motorů. Jsou platné pro vozidla pohybujících se na území Evropské unie, států Evropského hospodářského prostoru a Spojeného království. Momentálně poslední platnou normou je emisní norma *Euro 6d*, která je určena nařízením Komise (EU) 2017/1151 rozšiřujícím nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 715/2007. [2, 3]

2.1.1 Emisní norma Euro 1

Jak již bylo zmíněno, první norma *Euro 1* byla uvedena v platnost v letech 1992/93 směrnicí 91/441/EHS a určila limity emisí oxidu uhelnatého a uhlovodíků společně s oxidy dusíku. Tyto limity jsou shodné pro zážehové i vznětové motory, avšak navíc pro diesely byla současně určena i limitní úroveň částic (P – *particles*) na ujetý kilometr.

typ motoru	CO g/km	THC g/km	VOC g/km	NO _x g/km	HC+NO _x g/km	P g/km	PN #/km
zážehový	2,72	-	-	-	0,97	-	-
vznětový	2,72	-	-	-	0,97	0,14	-

Tabulka 2.1: Emisní limity Euro 1 [2]

2.1.2 Emisní norma Euro 2

V letech 1996/1997 vzešla v platnost norma *Euro 2*, která byla určena směrnicí 94/12/ES. Zásadním rozdílem oproti normě *Euro 1* je, že limity emisí již nejsou společné pro zážehové a vznětové motory. Navíc, zejména u dieselových motorů, dochází ke znatelnému zpřísnění limitů emisí oxidu uhelnatého a množství částic (v obou případech v podstatě na poloviční hodnoty). [4]

typ motoru	CO g/km	THC g/km	VOC g/km	NO _x g/km	HC+NO _x g/km	P g/km	PN #/km
zážehový	2,2	-	-	-	0,5	-	-
vznětový	1,0	-	-	-	0,7	0,08	-

Tabulka 2.2: Emisní limity Euro 2 [4]

2.1.3 Emisní norma Euro 3

Roky 2000/2001 přináší kromě začátku nového tisíciletí také další úroveň emisních standardů, v tomto případě *Euro 3*, které jsou určeny směrnicí 98/69/ES. Kromě nových emisních limitů se také objevuje další zásadní změna - nově vyráběné automobily se zážehovými motory musí být vybaveny systémem palubní diagnostiky OBD (*On-Board Diagnostics*). Druhá změna, týkající se emisí zážehových motorů, je rozdělení mezních hodnot pro emise uhlovodíků a oxidů dusíku. Pro vznětové motory je předepsána samostatná limitní hodnota emisí NO_x . [5]

typ motoru	CO g/km	THC g/km	VOC g/km	NO_x g/km	HC+ NO_x g/km	P g/km	PN #/km
zážehový	2,3	0,2	-	0,15	-	-	-
vznětový	0,66	-	-	0,5	0,56	0,05	-

Tabulka 2.3: Emisní limity Euro 3 [5]

2.1.4 Emisní norma Euro 4

Předpis *Euro 4*, stejně jako *Euro 3*, je určen směrnicí 98/69/ES, některé dodatky byly předepsány v textu směrnice 2002/80/ES a celkově norma vstoupila v platnost v letech 2005/2006. Limity byly uvedeny společně pro dvě normy z toho důvodu, aby výrobci měli dostatek času pro vývoj spalovacích motorů a emisních systémů. Norma *Euro 4* již předepisuje nutnost palubní diagnostiky OBD i pro vozidla se vznětovými motory a samozřejmě také dochází k aktualizaci limitů výfukových exhalací pro nově vyráběné automobily. [5, 6]

typ motoru	CO g/km	THC g/km	VOC g/km	NO_x g/km	HC+ NO_x g/km	P g/km	PN #/km
zážehový	1,0	0,1	-	0,08	-	-	-
vznětový	0,50	-	-	0,25	0,30	0,025	-

Tabulka 2.4: Emisní limity Euro 4 [5]

2.1.5 Emisní norma Euro 5

Nařízení Evropského parlamentu a rady č. 715/2007, resp. dodatečné nařízení č. 692/2008 stanovila předpisy společně pro normy *Euro 5* a *Euro 6* - to z důvodu, že výrobci by měli mít jasné informace o budoucích mezních hodnotách emisí, protože *dosažení cílů EU v oblasti kvality vzduchu vyžaduje trvalé úsilí o snížení emisí z motorových vozidel*. Nařízení *Euro 5* je také prvním emisním standardem, kde byly předepsány limity množství pevných částic pro zážehové motory (přímovstříkové) a současně také první normou, která určovala hranice počtu částic (PN – *particle number*; v této normě zatím jen pro vznětové motory). V době uvedení emisních norem *EU5* a *EU6* se již také začalo uvažovat o změně emisního cyklu, jelikož dosud užívaný cyklus NEDC (*New European Driving Cycle*), uvedený již v roce 1997, v podstatě nerefletoval reálný provoz vozidla na pozemních komunikacích. [7, 8]

typ motoru	CO g/km	THC g/km	VOC g/km	NO _x g/km	HC+NO _x g/km	P g/km	PN #/km
zážehový	1,0	0,1	0,068	0,06	-	0,0045	-
vznětový	0,5	-	-	0,18	0,23	0,0045	6×10 ¹¹

Tabulka 2.5: Emisní limity Euro 5b [8]

2.1.6 Emisní norma Euro 6

Jak již bylo zmíněno výše, v současnosti poslední platným standardem pro limity škodlivin motorových vozidel je norma *Euro 6*, uvedená nařízením 459/2012/EU a také 2017/1151/EU, které rozšiřují původní nařízení z roku 2007. Od začátku platnosti v letech 2014/2015 prošel předpis několika úpravami, které se týkají jak změny jízdního cyklu (*Euro 6b* → *Euro 6c*), tak i zavedení měření emisí v reálném provozu (RDE – *Real Driving Emissions*) – změna z *Euro 6c* na *Euro 6d*.

Nejdůležitější změnou je tedy nahrazení měřicího cyklu NEDC cyklem WLTC (*Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle*), který by měl mnohem více odpovídat provozu vozidla na veřejných komunikacích a jak již bylo zmíněno, homologační měření jsou taktéž prováděna v reálném provozu za pomoci PEMS systémů (*Portable Emission Measurement System*).

Samotné limity emisí byly taktéž zpřísněny, zejména v množství oxidů dusíku u vznětových motorů a byl zaveden limit pro celkový počet částic i u zážehových motorů. [3, 7, 9, 10]

typ motoru	CO	THC	VOC	NO_x	HC+NO_x	P	PN
	g/km	g/km	g/km	g/km	g/km	g/km	#/km
zážehový	1,0	0,1	0,068	0,06	-	0,0045	6×10^{11}
vznětový	0,5	-	-	0,08	0,17	0,0045	6×10^{11}

Tabulka 2.6: *Emisní limity Euro 6d [9]*

2.2 Vznik emisí ve spalovacích motorech

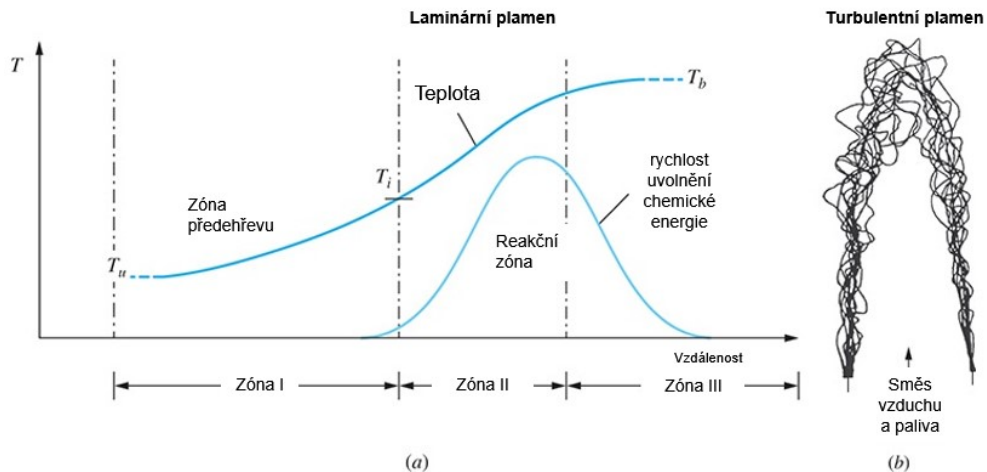
Aby bylo možné vysvětlit funkci emisních systémů používaných v motorových vozidlech, je vhodné přiblížit alespoň základní procesy spalování, složení používaných paliv a vznik emisí spalovacích motorů.

2.2.1 Plamen v motoru, rychlost hoření

Samotný proces spalování je klasifikován jako rychlá exotermická reakce v plynné fázi, při které je kyslík rozhodujícím reaktantem. Velice důležitou vlastností samotného plamene je, že se pohybuje směrem k nespálenému plynu. Plamen se šíří prostorem podzvukově a samotné reakce jsou omezeny na zónu, která je relativně malá vzhledem k celkovému objemu spalovacího prostoru. Výše popsaná charakteristika plamene je výsledkem propojení chemických reakcí, transportních procesů hmoty, vedení tepla a proudění tekutiny, v uvažovaném případě přesněji plynu.

Plamen ve spalovacím motoru je definován jako „předem promíchaný nestacionární turbulentní plamen“. Avšak uvnitř tenké vrstvy plamene (zlomky mm) převládají laminární procesy (obrázek 2.2a). Pro přesnější pochopení zobrazeného grafu je nutné poznamenat, že nespálená směs vstupuje do plamene *zleva*. Samotné spalovací reakce probíhají v dolní části plamene (v *zóně II*). Energie je odváděna jak proti proudu do *zóny I* - tzv. předeřívací zóny, a také do *zóny III*, kde jsou přítomny již spálené plyny o vysoké teplotě. Teplota směsi se musí zvýšit nad zápalnou teplotu (případně teplotu vznícení), zde označenou jako T_i , aby mohlo dojít k významné reakci a následnému uvolnění energie. Obrázek 2.2b zobrazuje již zmiňovaný turbulentní plamen, jehož každý bod obsahuje laminární strukturu, zobrazenou na obrázku 2.2a.

Vznik tepla a aktivních látek samotnou chemickou reakci urychluje - naopak, přísun čerstvé směsi, respektive reaktantů, reakci omezuje (zpomaluje). Ustálený plamen logicky vzniká, pokud jsou tyto procesy v rovnováze. Samotná rychlost hoření by měla být zjednodušeně „přiměřená“ typu motoru. Z hlediska vývinu tepla je žádoucí, aby reakce probíhala co nejrychleji, avšak u pomaloběžných motorů se vysoká rychlost hoření projevuje tvrdým chodem, naopak malé rychlosti mohou u zážehových motorů způsobit pomalé dohořívání směsi, které sebou nese řadu nepříznivých důsledků. Pro doplnění, nejvyšší rychlost hoření klidné směsi benzínu a vzduchu je při poměru $\lambda = 0,85$. [11, 12]



Obrázek 2.2: Struktura laminárního (a) a turbulentního (b) plamene [11]

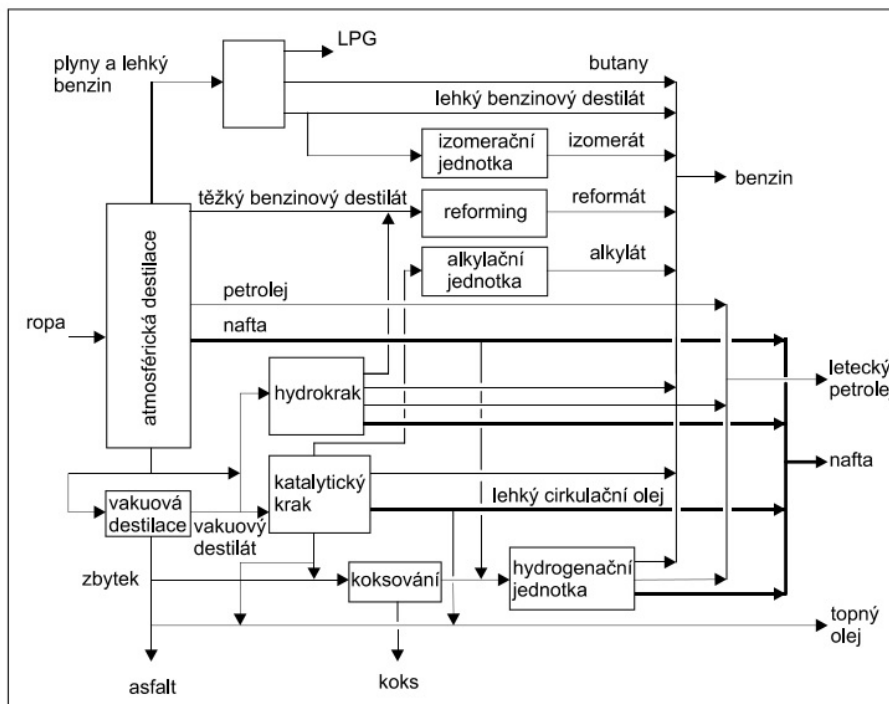
2.2.2 Paliva spalovacích motorů

V současnosti mezi kapalnými palivy převažují uhlovodíková paliva, která jsou vyráběná ze surové ropy, jelikož tento způsob výroby paliv je bezkonkurenčně nejlevnější. Paliva lze vyrábět i z dalších surovin, jako je uhlí nebo zemní plyn, případně lze vyrábět plně synteticky, avšak tyto způsoby jsou dražší a taktéž více energeticky náročné. Rovněž i biopaliva jsou výrobně dražší než uhlovodíková paliva ropného základu.

Ropa je kapalina, která může být definována jako směs, složená převážně z uhlovodíků - tím pádem i pro veškerá paliva, která z ropy vznikají, je charakteristická uhlovodíková skladba. Složení samotné ropy taktéž značně závisí na místě původu a hloubce těžby. Hlavní výhodou uhlovodíků je jejich velký energetický obsah (výhřevnost paliv se pohybuje kolem 40 MJ/kg).

Kvalita současných motorových benzinů je již podstatně méně závislá na složení výchozí suroviny (ropy), jelikož mnohem více záleží na následných rafinerských procesech, které určují finální složení produktu. Současná uhlovodíková paliva lze tedy považovat za syntetické produkty pocházející z ropy.

V rafineriích se ropa zpracovává průmyslovou destilací, ze které jsou získávány užší frakce (skupiny) uhlovodíků s požadovaným rozmezím bodu varu. Na obrázku 2.3 je zobrazeno zjednodušené schéma destilace a frakcí. Všechny složky avšak nemusí nutně pocházet z destilace ropného základu, ale mohou vznikat také při jiných petrochemických procesech, jako je například krakování či pyrolýza. [11, 13]



Obrázek 2.3: Schéma destilace a výsledných frakcí [13]

2.2.3 Automobilový benzin

Benzin obsahuje uhlovodíky se čtyřmi až deseti atomy uhlíku a jeho destilační rozmezí je cca 30-210°C. Představuje asi dvacet až třicet procent destilované ropy. Po dokončení samotné destilace a nutném odsíření probíhá spousta dalších technologických procesů, jejichž hlavním účelem je vyrobit složky s velkým oktanovým číslem. Není výjimkou, že současný automobilový benzin je složen z více než deseti různých složek.

Mezi základní způsoby zvyšování oktanového čísla benzínu může být zařazeno reformování, katalytické krakování, izomerace či alkylace, dále také hydrogenace nebo polymerace.

Reformování

Reformování může být charakterizováno jako přeměna prvků s nízkým oktanovým číslem (cyklany, n-alkany) na vysokooktanové aromáty. Produkty tohoto procesu často dosahují oktanových čísel vyšších než 100.

Alkylace

Alkylace, neboli syntéza izo-alkanů, je používána pro zvýšení oktanového čísla v oblasti

destilace kolem 100°C. Často se vychází z uhlovodíku se čtyřmi uhlíky - v následném reakčním produktu převládají rozvětvené uhlovodíky s osmi uhlíky, jejichž oktanové číslo je kolem 100. Alkylace je však nejdražší technologií pro zvyšování oktanového čísla ze všech zde zmíněných.

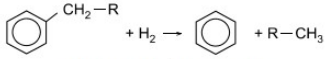
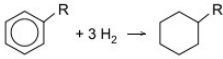
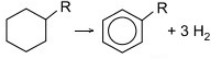
Katalytické krakování

Krakování, jak již bylo zmíněno výše, je tepelné štěpení molekul určitých složek, které následně svým bodem varu patří do destilační složky benzínu. Oktanové číslo benzínu, který pochází z katalytického krakování, je stabilní po celé délce destilační křivky (na rozdíl od benzínu pocházejícího z primárního destilátu).

Izomerace

Izomerace je katalytický proces, při kterém vznikají rozvětvené izomery s vysokým oktanovým číslem z nízkooktanových n-alkanů.

Na obrázku 2.4 jsou zobrazeny vybrané technologické procesy.

typ reakce a procesu	uhlovodíky vstupující do procesu	produkty
izomerace	n-alkany izoalkany	
	$\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C} \rightleftharpoons \begin{array}{c} \text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C} \\ \\ \text{C} \end{array}$	
alkylace	alkany + olefiny izoalkany	
	$\begin{array}{c} \text{C}-\text{C}-\text{C} \\ \\ \text{C} \end{array} + \text{C}=\text{C} \rightarrow \begin{array}{c} \text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C} \\ \quad \\ \text{C} \quad \text{C} \end{array}$	
polymerace	olefiny olefiny	
	$\begin{array}{c} \text{C}=\text{C} \\ \\ \text{R} \end{array} + \begin{array}{c} \text{C}=\text{C} \\ \\ \text{R} \end{array} \rightarrow \begin{array}{c} \text{C}-\text{C}-\text{C}=\text{C} \\ \quad \\ \text{R} \quad \text{R} \end{array}$	
krakování	parafíny, aromáty, nafteny olefiny a další uhlovodíky	
	$\text{R}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{R} \rightarrow \text{R}-\text{CH}=\text{CH}_2 + \text{R}-\text{CH}_3$	
hydrokrakování	alkany, aromáty alkany, zbytkové aromáty	
	$\text{R}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{R}' + \text{H}_2 \rightarrow \text{R}-\text{CH}_3 + \text{R}'-\text{CH}_3$ 	
hydrogenace	olefiny, aromáty alkany, nafteny	
	$\text{R}-\text{CH}=\text{CH}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{R}-\text{CH}_2-\text{CH}_3$ 	
dehydrogenace, reforming	nafteny, parafíny aromáty, vodík	
	 $\text{R}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_3 \rightarrow \text{C}_6\text{H}_5\text{R} + 4 \text{H}_2$	

Obrázek 2.4: Technologické rafinační procesy [13]

Mezi neuhlovodíkové vysokooktanové složky benzínu mohou být zařazeny některé alkoholy a étery. Kyslíkaté sloučeniny totiž zvyšují odolnost proti klepání a zlepšují procesy spalování v samotném motoru. Dříve se alkoholy (metanol, etanol) používaly také z důvodu značného zvýšení samotného oktanového čísla, avšak v dnešní době tato skutečnost již tolik neplatí (pokud je OČ samotného benzínu kolem 100, jeho zvýšení pomocí alkoholových přísad není tak významné). V současné době je zákonem dána minimální hranice obsahu etanolu, a to objemových 5 %, v blízké době se má i v České republice stále častěji objevovat benzin s označením E10.

Vhodnými přísadami automobilového benzínu jsou i étery, mezi které patří například ETBE - ethyl-terc-butyl-éter. Vzniká reakcí izobutenu a etanolu. ETBE je u takzvaných „prémiových“ paliv používáno namísto etanolu, protože neabsorbuje vlhkost a nezpůsobuje odpařování benzínu. [13]

2.3 Emise spalovacích motorů

V předchozích kapitolách byl zjednodušeně popsán proces hoření v zážehovém motoru a následně krátce i složení a výroba automobilového benzínu jakožto paliva. Avšak proces hoření sebou (bohužel) nese i vznik různých emisí.

Emise spalovacích motorů je možné rozdělit do čtyř základních skupin [13]:

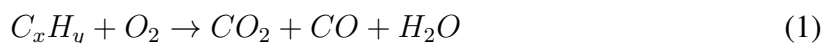
- přímo limitované složky - oxid uhelnatý, uhlovodíky, oxidy dusíku a pevné částice,
- nepřímo limitované složky - oxid uhličitý, oxidy síry (limitované složením paliv),
- těkavé organické složky - benzen, formaldehyd, akrolein a další,
- netěkavé organické složky - polyaromatické uhlovodíky, vyšší aldehydy.

Samotné množství emisí, produkované spalovacím motorem, je závislé na spoustě faktorů - například na konstrukci motoru, složení spalované směsi, chemickém složení paliva a samozřejmě také na aktuálních provozních podmínkách motoru. Pro účely této práce je dostatečný popis přímo limitovaných složek. [12, 13]

2.3.1 Oxid uhelnatý

Emise oxidu uhelnatého jsou ovlivněny *převážně* množstvím směsi paliva a vzduchu ve válci (respektive hodnotou λ). V takzvané bohaté směsi (hodnota $\lambda < 1$) není veškeré palivo zcela spáleno a emise oxidu uhelnatého se zvyšují. Naopak, při chudé směsi, kdy hodnota $\lambda > 1$, se zvyšuje pravděpodobnost úplného spálení směsi a emise CO jsou nižší.

Procesy, které ovlivňují hodnoty oxidu uhelnatého ve výfukových plynech, jsou kineticky řízené. Samotná tvorba CO je jedním z hlavních reakčních kroků při spalování uhlovodíků. Může být zjednodušeně popsána rovnicí:



Oxid uhelnatý, který je utvořen podle rovnice (1), může být dále přeměněn na oxid uhličitý (CO_2) jednou z následujících reakcí:





Rovnice (2) vyjadřuje další oxidaci CO na oxid uhličitý, jakožto produkt dokonalého spalování. Rovnice (3) probíhá zejména při chladnutí plynů ve válci během expanze. Poslední rovnice (4) popisuje oxidaci CO hydroxylovými radikály - je dominantní reakcí v mechanismech spalování uhlovodíků.

Protože emise oxidu uhelnatého rychle narůstají již při mírném obohacení směsi, je důležité, aby se na snižování celkových emisí podílely i činnosti předcházející samotnému spalování (například snaha o co nejnižší hodnoty obohacování směsi při akceleraci či studeném startu motoru). [11, 12, 14]

2.3.2 Uhlovodíky

Uhlovodíky (HC - *hydrocarbons*, respektive THC - *total hydrocarbons*), jsou další složkou limitovaných složek výfukových plynů. Je však důležité zmínit, že celková koncentrace THC ve výfukových plynech nemusí být správným ukazatelem emisí znečišťujících látek - některé uhlovodíky jsou v podstatě inertní, další nemají přímý vliv na lidské zdraví. Na druhou stranu, některé složky jsou silně reaktivní, případně mohou být i karcinogenní.

Takzvané „oxygenáty“ neboli *okysličené chemické sloučeniny*, jako je například formaldehyd ($HCHO$) nebo acetaldehyd (CH_3CHO) jsou látky, které významně ohrožují lidské zdraví.

Emise uhlovodíků mohou být spojené i s kvalitou paliva - vysoké procento olefinů nebo aromatických sloučenin v palivu zvyšuje jejich celkové množství v emisích. Naopak, jiné specifické části THC ve výfukových plynech se v palivu či oleji přímo nenachází, tudíž je zřejmé, že tyto prvky jsou výsledky procesů samotného spalování.

Velká část emisí uhlovodíků vzniká při nedokonalém či neukončeném spalování směsi (plamen zhasne vlivem ochlazení například u stěny válce, případně zhasíná na okrajích štěrbin spalovacího prostoru). Procentuálně se jedná o pět až deset procent paliva, které během spalovacího mechanismu neshoří, což se také podepisuje na snížené účinnosti motoru.

Mezi mechanismy vzniku nespálených uhlovodíků, při kterých sloučeniny benzínu „unikají hoření“, mohou být zařazeny:

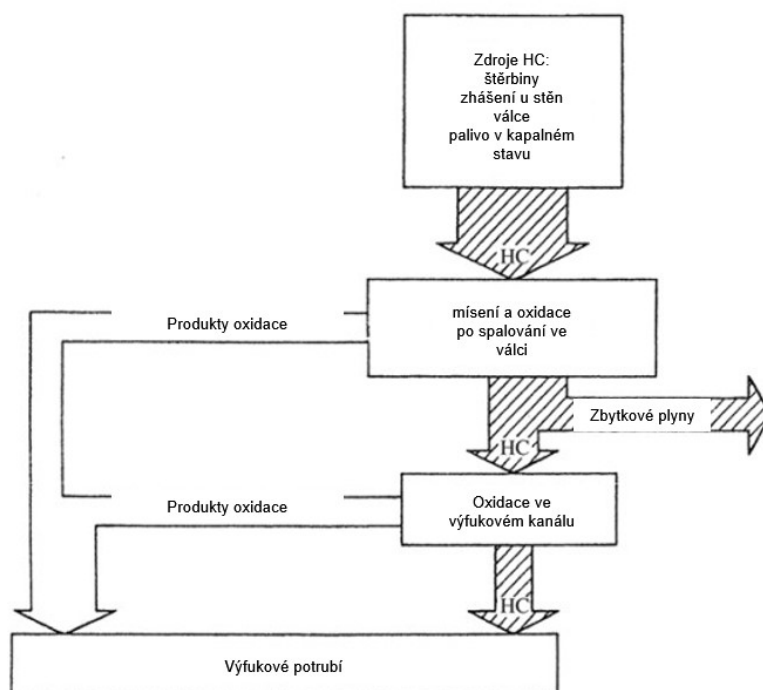
- stlačení směsi benzinových par a vzduchu do štěrbin (drážky pístních kroužků, závit svíčky, štěrbina mezi blokem a hlavou motoru),
- absorpce benzinových sloučenin vrstvami oleje na stěnách válce, případně usazeninami na povrchu pístu,
- zhášení plamene u stěn spalovacího prostoru,
- neodpaření kapalného paliva během procesu spalování (a nedostatečné smíšení se vzduchem),
- únik nespálené směsi do výfukového kanálu během výměny náplně válce.

Výše popsané mechanismy mají za následek utváření nespálených uhlovodíků zejména v blízkosti stěn spalovacího prostoru, nikoli v „hlavním“ objemu plynů procházejících procesem hoření.

Následující výčet zmiňuje procesy, při kterých mohou nespálené uhlovodíky kompletně oxidovat či opouštět spalovací prostor jakožto výfukové emise THC (většinou následují na konci cyklu spalování či probíhají během dalších):

- odtok nespálených HC ze štěrbin a následná oxidace,
- difuze HC z vrstev oleje do spalovaných plynů a následná oxidace,
- smíšení nespálených uhlovodíků s celkovým objemem spalované směsi,
- přenos části HC výfukovými plyny do výfuku a následná oxidace v katalyzátoru.

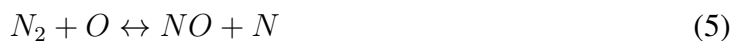
Z pohledu bohatosti směsi je tvorba uhlovodíků podobná jako u oxidu uhelnatého - v bohatších směsích je dosahováno znatelně vyšších hodnot THC, jelikož v nich působí nízká teplota plamene i časová „rozvleklost“ reakcí. V mírně chudých směsích ($\lambda \sim 1,05 - 1,1$) emise uhlovodíků znatelně klesají. [11, 14]



Obrázek 2.5: Mechanismy tvorby HC emisí v zážehovém motoru [11]

2.3.3 Oxidy dusíku

Emise oxidů dusíku, respektive oxidu dusnatého (NO) a dusičitého (NO_2) jsou společně označovány jako emise NO_x . Hlavním zdrojem těchto prvků v emisích je atmosférický dusík, který vstupuje do průběhu spalování z okolního vzduchu. Mezi všeobecně platné reakční rovnice pro téměř stechiometrické směsi paliva a vzduchu (taktéž označovány jako *rozšířený Zeldovičův mechanismus*), při kterých vzniká NO , patří:



Formování oxidu dusičitého, který se oproti NO v zážehových motorech objevuje ve velice nízkém množství, probíhá za reakce:

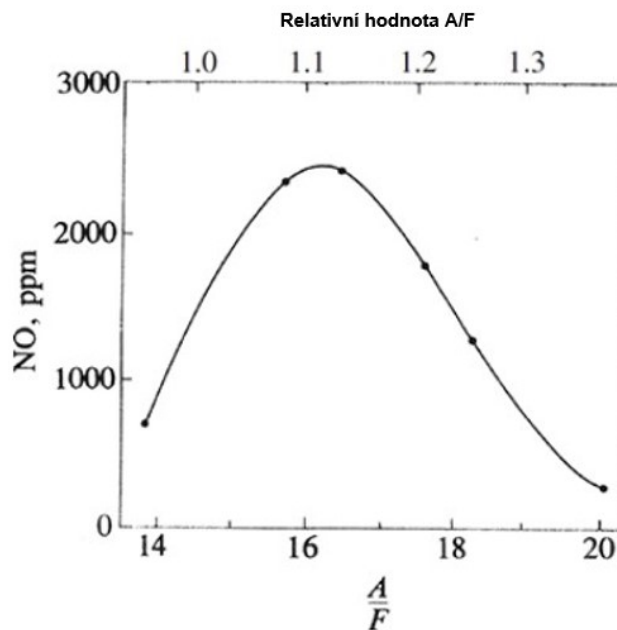


Takto vznikající oxid dusičitý se ale konvertuje následující reakcí zpět na oxid dusnatý:



pokud však reakce nezamrzne vlivem snížení teploty (například smícháním s chladnější směsí).

Emise oxidů dusíku jsou nejvyšší v chudých směsích ($\lambda \sim 1,1$). Maximálních teplot spalin je sice dosahováno v mírně bohaté směsi, avšak při ochuzování směsi koncentrace kyslíku vyrovnává klesající teploty plynů a proto se nejvyšší emise NO_x objevují právě v chudších směsích. Průběh koncentrace NO v závislosti na poměru vzduch/palivo je znázorněn na obrázku 2.6. [11, 14]



Obrázek 2.6: Průběh formování oxidů dusíku v závislosti na poměru vzduch/palivo [11]

2.3.4 Pevné částice

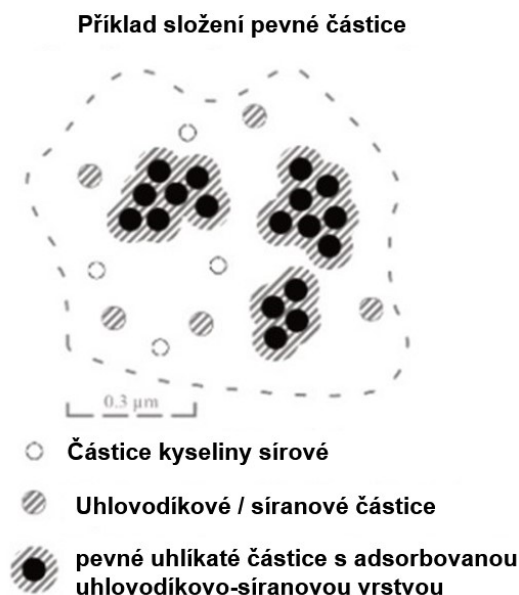
Výfukové částice tvoří velice složitý aerosolový systém a i přes značný výzkum stále chybí celkové pochopení tvorby výfukových částic a jejich vlivu na životní prostředí a lidské zdraví.

Částice se mohou skládat z mnoha různých prvků - může se jednat přímo o produkty spojené se spalováním uhlovodíkových paliv (saze či siřičitany), prvky pocházející z maziv

(těžké frakce uhlovodíků a aditiva) a v neposlední řadě taktéž kovové částice, které vznikají přímo otěrem součástí samotných motorů. Velikost měřených částic dle legislativy je v rozsahu 23 nm - 10 μ m.

Vědci a konstruktéři spalovacích motorů se v této době významně zajímají o proces tvorby částic a také zejména o jejich fyzikální a chemické složení. Pevné částice jsou totiž extrémně efektivním nosičem prvků, jako jsou karcinogeny a mutageny. Jako největší bod zájmu mohou být označeny nejmenší nanočástice (pevné částice s průměrem do 100 nm), jelikož mají výrazně neblahý vliv na lidské zdraví a to z toho důvodu, že jsou schopné difundovat skrz lidskou kůži do krevního oběhu, odkud se mohou dále šířit do lidských orgánů.

Pevné částice (příklad složení viz obr. 2.7) jsou také významně sledovány z toho důvodu, že téměř všechny nové zážehové motory jsou konstruovány jako přímovstříkové. Tato konstrukce sice zlepšuje spotřebu paliva a účinnost spalovacího motoru, bohužel tyto přínosy jsou mimo jiné vykoupeny právě větší tvorbou pevných částic. Proto se i u nových benzinových motorů objevují filtry pevných částic (GPF), které byly dříve používány pouze u motorů dieselových. [11, 14, 15]



Obrázek 2.7: Kompozice a struktura pevné částice zážehového spalovacího motoru [15]

2.4 Třícestné katalyzátory

V předchozích kapitolách byl popsán způsob hoření směsi a následná tvorba spalin zážehového spalovacího motoru. Výfukové exhalace je z důvodu ochrany životního prostředí nutné redukovat na co nejmenší možnou míru a k tomu nám u benzinových motorů pomáhají zejména třícestné katalyzátory.

Třícestný katalyzátor, označovaný také jako *TWC*; *three-way-catalyst*, získal svůj název díky tomu, že dokáže redukovat tři složky emisí - oxid uhelnatý, uhlovodíky a oxidy dusíku. Níže jsou uvedeny základní oxidačně-redukční rovnice, které probíhají v třícestných katalyzátorech.

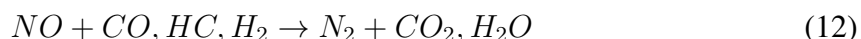
Oxidace oxidu uhelnatého na oxid uhličitý:



Oxidace nespálených uhlovodíků (základní reakce):

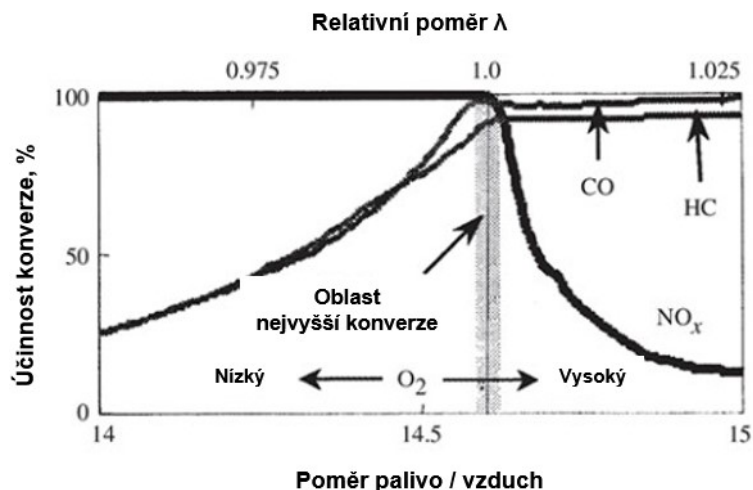


Redukce NO:



Obvykle se nejprve zahájí katalyzované reakce CO, po nichž následují reakce HC a NO. U horkých výfukových plynů v zahřátém zážehovém motoru jsou rychlosti chemických reakcí vysoké a celková rychlost přeměny je řízena difuzí pórů a/nebo přenosem hmoty.

Funkce katalyzátoru je výrazně závislá na hodnotě stechiometrického poměru (λ). Oxidace CO a HC je limitována v bohatších směsích ($\lambda < 1$) a zároveň redukce NO je limitována ve směsích chudých ($\lambda > 1$). Z toho vyplývá, že optimální funkce katalyzátoru probíhá pouze v malé oblasti (označované také jako *high performance region*), viz obr. 2.8.



Obrázek 2.8: Účinnost konverze spalin v katalyzátoru v závislosti na hodnotě λ [11]

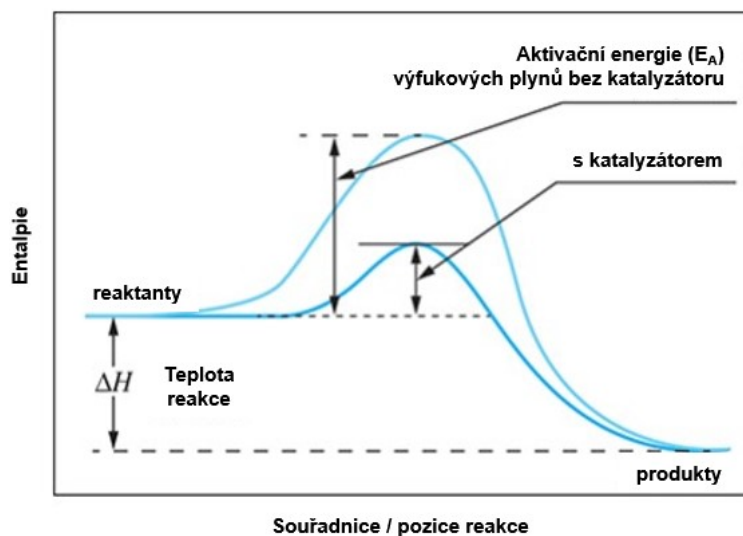
Jelikož je hodnota stechiometrického poměru regulována zpětnovazebně tzv. lambda sondami, nelze předpokládat naprosto přesné dodržení požadovaného poměru při běhu motoru. Z toho důvodu se vhodně využívá takzvaných kyslíkových pastí (*oxygen traps*) - chemicky se jedná o oxid ceričitý (CeO_2). V bohaté směsi dokáže uvolnit kyslík za vzniku oxidu ceritého (Ce_2O_3), který naopak dále ukládá kyslík v chudších směsích za zpětného vzniku CeO_2 - viz rovnice 13.



Používání kyslíkových pastí taktéž umožňuje jistou oscilaci hodnoty λ , která je v tomto případě i vhodná, resp. vyžadovaná pro správnou funkci zachytávání a uvolňování kyslíku.

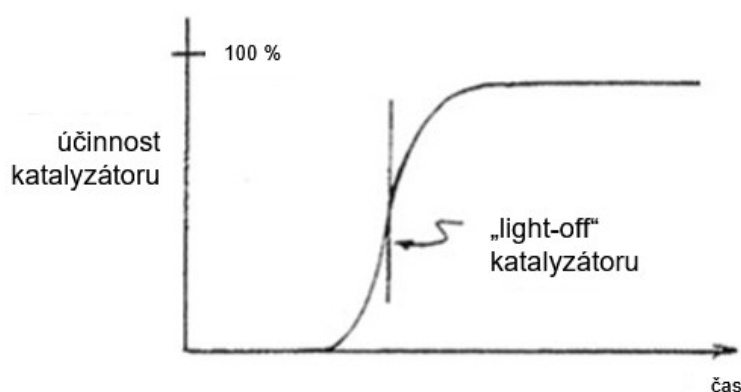
2.4.1 Vliv vzácných kovů v třícestných katalyzátorech

Další chemické prvky, které se nachází v katalyzátorech a výrazně napomáhají ke snížení množství exhalací, jsou vzácné kovy - platina, rhodium a případně palladium. Jelikož teplota výfukových plynů při obvyklém způsobu jízdy dosahuje pouze 400 - 600°C, nemohou výše zmíněné reakce (10, 11, 12) proběhnout. Proto se vhodně užívá již zmíněných vzácných kovů, které se přímo neúčastní oxidačně-redukčních reakcí, avšak jako katalyzátory výrazně napomáhají k jejich průběhu snížením potřebné aktivační energie (E_A) nutné pro rozklad molekulárních spojení. Reakce tak mohou na povrchu katalyzátoru probíhat při podstatně nižších teplotách, jelikož je snížena takzvaná energetická bariéra. Na obr. 2.9 je zobrazen přínos přítomného katalyzátoru snížením potřebné entalpie pro průběh reakce.



Obrázek 2.9: Vliv katalyzátoru na průběh reakce [11]

I přesto, že vzácné kovy významně pomáhají uskutečnit oxidačně-redukční reakce při nižších teplotách, je stále nutné dosáhnout určité teploty povrchu nosiče v katalyzátoru (cca 300°C), aby reakce mohly probíhat dostatečně účinně. Z toho vyplývá, že účinnost třícestného katalyzátoru je nejnižší při studeném startu a to do té doby, než je dosaženo tzv. *light-off* teploty - jedná se o teplotu, při které katalyzátor dosáhne dané hraniční účinnosti. Zjednodušený graf je znázorněn na obrázku 2.10.



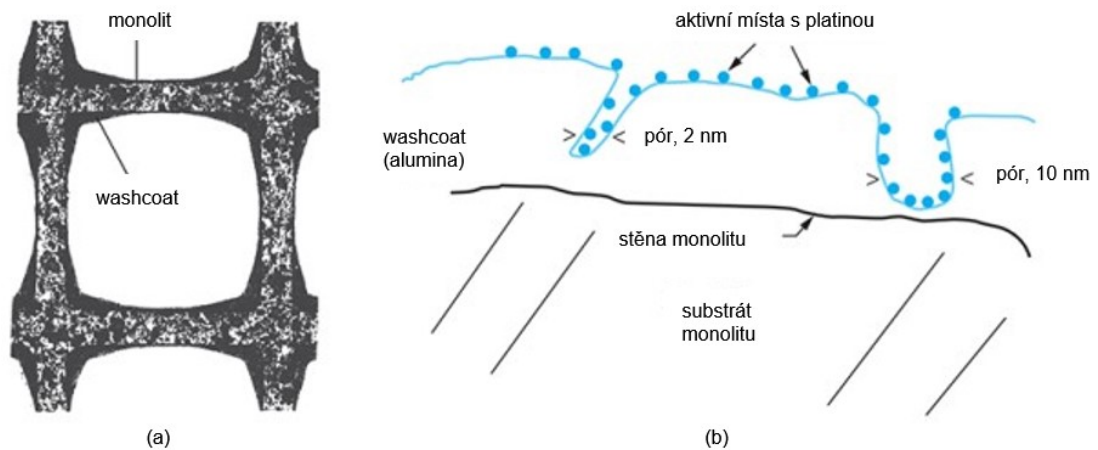
Obrázek 2.10: Účinnost katalyzátoru v čase po studeném startu [11]

Rhodium je hlavní složkou používanou pro redukci oxidů dusíku. Je minimálně inhibováno oxidem uhelnatým a sloučeninami síry, zároveň produkuje také méně amoniaku než platina. Platina je využívána zejména k oxidaci CO a HC, kdy vykazuje nejvyšší aktivitu v mírně bohatých směsích. Pokud je v katalyzátoru přítomné dostatečné množství rhodia, je účast platiny na redukci NO minimální. [11, 12, 14]

2.4.2 Konstrukce katalyzátorů

Třicestné katalyzátory jsou součástí výfukového potrubí automobilů a ve velké většině případů jsou umístěny co nejbližší motoru - využívá se nejvyšší možné teploty spalin na výstupu z motoru a taktéž samotného tepla, vyzařovaného spalovacím motorem pro co nejrychlejší dosažení již zmíněné *light-off* teploty.

Samotné katalyzátory jsou nejčastěji tvořeny keramickým nosičem (monolitem), na kterém je nanesen *washcoat* s rozptýlenými vzácnými kovy (viz obr. 2.11). Základem pro *washcoat* je oxid hlinitý - je výrazně pórovitý, což značně zvětšuje celkovou plochu, na které mohou být rozptýleny již zmíněné prvky jako je platina a rhodium. Oxid hlinitý také napomáhá průběhu oxidačně-redukčních reakcí a stabilizuje přítomné vzácné kovy. [11]



Obrázek 2.11: (a) řez katalyzátorem; (b) schéma disperze prvků v katalyzátoru [11]

2.5 Infračervená termografie

Termografie neboli zobrazování teplotních polí je vynikající vizualizační technologií, která je úspěšně využívána v mnoha vědních oborech a průmyslových aplikacích. S použitím správného přístroje pro určitou aplikaci je možné provádět jak statická, tak i dynamická měření, která mohou být dále využívána pro studii teplotních gradientů. Avšak, aby byla tato technologie využívána správně a plynule vypovídající výsledky z jejího použití, je nutné, aby její uživatelé byli dostatečně vzděláváni a školeni. Termografické měření je složitý proces, který je ovlivněn mnoha faktory - některé z nich jsou uvedeny v tabulce 2.7. [16]

Parametry přímo ovlivňující obraz kamery, které je možné upravit nastavením přístroje či při pozdějším zpracování	<ul style="list-style-type: none">• Emisivita objektu• Velikost a vzdálenost objektu• Relativní vlhkost• Okolní teplota
Parametry ovlivňující vzhled obrazu (mohou způsobit špatné zobrazení detailů)	<ul style="list-style-type: none">• Teplotní spád / gradient• Nastavený teplotní rozsah• Zvolená barevná paleta
Parametry, které mohou významně ovlivnit výslednou analýzu a interpretaci obrazu	<ul style="list-style-type: none">• Rozsah vlnových délek přístroje• Úhel pohledu na měřený objekt• Použití filtrů (zúžený teplotní rozsah)• Teplotní odrazy• Rychlost větru (exteriérové měření)

Tabulka 2.7: Parametry ovlivňující výslednou kvalitu obrazu a interpretaci výsledků [16]

2.5.1 Infračervené záření

Fyzikálně lze veškeré záření - ať už se jedná o viditelné spektrum, UV či infračervené záření - vyjádřit jako vlny. Vlny postupují prostorem jako funkce času, jejich prostorová periodičita neboli vlnová délka je označována jako λ [nm] (neplést se stechiometrickým poměrem, o kterém byla řeč v předchozích kapitolách); přechodná periodičita neboli frekvence je značena ν [Hz]. Obojí je následně spojeno rovnicí rychlosti vlny c [m/s], která závisí na konkrétním typu vlnění.

$$c = \lambda \cdot \nu \quad (14)$$

Infračervené záření se řadí mezi elektromagnetické vlnění, jehož rychlost je rovna rychlosti světla (cca 300 000 km/s). Vlnové délky infračerveného spektra se nachází v rozsahu 780 nm až 1 mm. Pro infračervené záření taktéž platí stejné zákony dopadu a odrazu jako pro viditelné spektrum.

K termografickému měření je důležité dodat, že u pevných předmětů, které jsou neprůhledné pro infračervené záření, je měřena pouze povrchová teplota. [16]

Černé těleso

Při měření infračerveného záření je vždy důležité zmínit pojem černé těleso (*blackbody*), jelikož k němu jsou vztahovány důležité fyzikální zákony, které termografie využívá. Každý objekt, který má teplotu vyšší než 0 K, vyzařuje určitý druh záření. Maximální zářivý tok (*radiant power; radiant flux*), který objekt může vyzařovat, je dán pouze jeho teplotou - proto se toto záření nazývá tepelné. U reálných těles „do hry“ vstupuje taktéž *emisivita*.

Vlastnosti černého tělesa:

- černé těleso pohlcuje veškeré dopadající záření (bez ohledu na vlnovou délku či směr)
- pro danou teplotu a vlnovou délku nemůže žádný povrch vyzařovat více energie než černé těleso
- záření vyzařované černým tělesem závisí na vlnové délce, zářivost však nezávisí na směru

Jako dokonalé absorběry a zároveň dokonalé zářiče jsou černá tělesa vhodně využívána jako etalony v termografii.

Emisivita

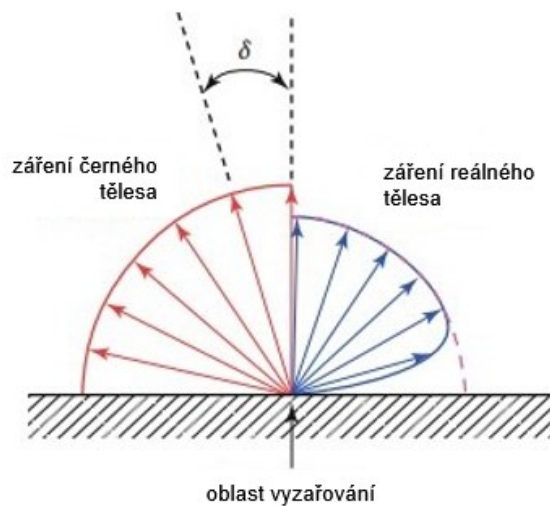
Jedním z nejdůležitějších parametrů, který je nutné mít správně nastaven při měření termokamerou, je emisivita. Vyznačuje poměr množství záření skutečně vyzařovaného z povrchu a záření vyzařovaného černým tělesem o stejné teplotě. Čím nižší je emisivita objektu, tím více materiál odráží teplotní záření a stává se tak velice špatně „termograficky-měřitelným“. Emisivita je závislá na parametrech objektu, jako je materiál, struktura jeho povrchu, úhel pohledu, ze kterého je těleso snímáno, vlnová délka a samozřejmě i jeho teplota.

Materiál Hlavním parametrem je materiál měřeného objektu - zjednodušeně mohou materiály být rozděleny na kovové a nekovové. Velká většina nekovových materiálů je označována jako šedé zářiče (*gray emitters*), které mají vysokou emisivitu (nad 0,8). Oproti tomu kovové materiály - a zejména leštěné kovy - představují značný problém při termografickém měření, jelikož jejich emisivita je velice nízká ($\varepsilon \approx 0,2$).

Struktura povrchu U každého materiálu se může emisivita značně lišit v důsledku struktury povrchu - tento jev následně vede k velice nepříznivé situaci, kdy je pro stejný materiál uváděno mnoho různých hodnot emivity. Například, u leštěných kovů může emisivita dosahovat hodnot $\varepsilon < 0,2$; pokud je však povrch totožného materiálu zdrsněný, emisivita se může změnit až na hodnotu $\varepsilon \approx 0,8$.

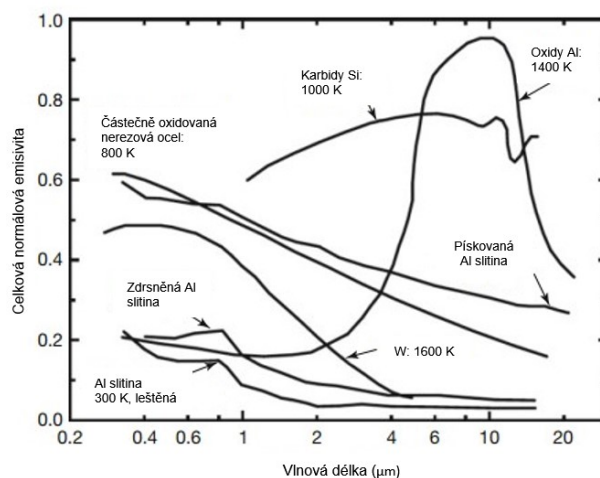
U kovů taktéž může být nárůst emivity způsoben například korozí či oxidací - u silně oxidované mědi byla zaznamenána i hodnota emivity cca 0,78.

Úhel pohledu Černá tělesa se chovají jako ideální izotropní zářiče - což znamená, že zářivost (radiance) jakéhokoli záření nezávisí na směru, ve kterém je vyzařováno. Bohužel reálné povrchy vykazují odlišné chování - jejich zářivost se mění v závislosti na směru vyzařování - viz obrázek 2.12. Proto je při měření termokamerami nutné snímat objekt přímo (v směru normály k povrchu), aby nedošlo ke zkreslení hodnot.



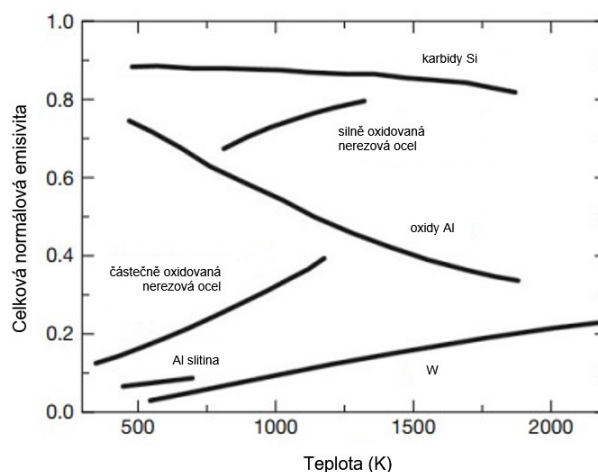
Obrázek 2.12: Schematické znázornění úhlové závislosti záření [15]

Vlnová délka Vlastnosti materiálu obvykle závisí na vlnové délce - odrazivost silně souvisí s emisivitou materiálů, tudíž jakákoli závislost odrazivosti na vlnové délce se projeví i na emisivitě. Na obrázku 2.13 je patrné, že emisivita kovů s vlnovou délkou obvykle klesá - oproti tomu, u oxidů či u nekovů je tomu naopak. Obrázek také dobře znázorňuje vliv drsnosti/struktury povrchu (leštěné hliníkové slitiny mají nižší emisivitu než zdrsňené či pískované povrchy). Závislost emisivity a vlnové délky je taktéž důležitá při měřeních - pokud je emisivita snímaných materiálů značně závislá na vlnové délce (viz oxidy hliníku na obrázku 2.13), je vhodné využít úzkopásmových filtrů, které omezí spektrum vlnových délek.



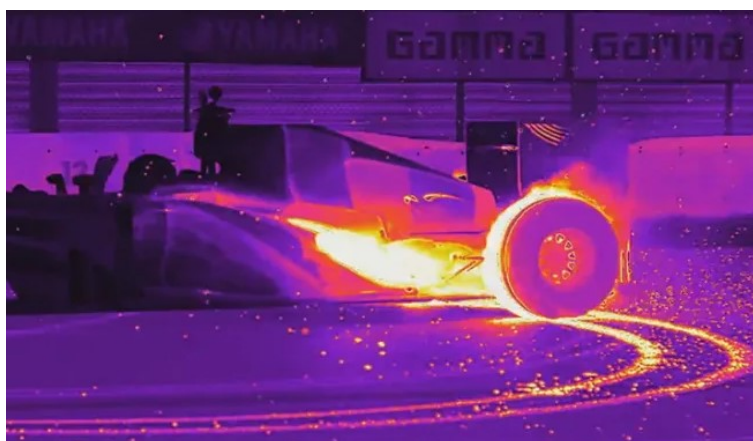
Obrázek 2.13: Závislost emisivity na vlnové délce [15]

Teplota Samotná teplota objektu samozřejmě také hraje významnou roli při termografických měřeních. Emisivita se u některých materiálů značně snižuje s teplotou (obrázek 2.14). Zmíněnou závislost je třeba mít na paměti hlavně při snímání chladnoucích nebo naopak zahřívaných objektů.



Obrázek 2.14: *Závislost emisivity na teplotě [15]*

Při měřeních s termografickými přístroji je vhodné mít na paměti všechny výše uvedené vlastnosti a jejich vliv na emisivitu (a tím pádem i na nastavení používaného přístroje), jelikož mohou významně ovlivnit výsledky a jejich následnou interpretaci. Nesprávným nastavením přístroje a pozicí snímaného objektu jsou do měření vnášeny chyby i v řádech několika desítek stupňů. [16]



Obrázek 2.15: *Příklad zajímavé aplikace termografického měření monopostu F1 [15]*

3 Cíl práce

Cílem této diplomové práce je porovnání dvou emisních norem na motoru řady EA211, typu 1.6 MPI, emisních tříd Euro 5 a Euro 6. Práce je zaměřena především na rozložení teplotních polí v katalyzátoru, zejména z pohledu maximálních teplot a gradientů v jízdách režimech, které jsou naměřeny v daném automobilu a následně reprodukovány na motorovém brzdovém stanovišti.

4 Metodika práce

První část práce je realizována formou literárního rozboru. Na literární rozbor navazuje praktická část práce, která je zaměřena na simulaci jízdního cyklu na motorovém stanovišti, kde jsou sledována teplotní pole a také zejména gradienty teplot v přechodových režimech u katalyzátoru emisních norem Euro 5 a Euro 6 na zvoleném typu motoru 1.6 MPI.

5 Výsledky

5.1 Termografie katalyzátoru

V předchozích kapitolách byly představeny emisní normy, dále samotný vznik exhalací v zážehovém spalovacím motoru, následně třicestné katalyzátory jako nástroj pro jejich redukci a předchozí kapitola se věnovala termografii. V následující části této práce bude popsáno, jak tyto dva, na první pohled značně odlišné vědní obory, mohou být propojeny a společně významně pomoci při výzkumu a vývoji katalyzátorů spalovacích motorů.

Termografie katalyzátoru patří mezi důležité milníky vývojových projektů automobilových společností. Slovo *projekt* zde má význam časově ohraničeného plánu určitých činností například v souvislosti s přechodem určitého typu motoru na jinou (případně přísnější) emisní normu, nabídkou daného typu spalovacího motoru na nových trzích či s otestováním dílů dalších (nových) dodavatelů součástí.

Kompletní termografické měření katalyzátoru zahrnuje určité množství aktivit a během každé z nich je **nutné dodržovat dané postupy a metody**, aby bylo nejen možné správně interpretovat výsledky jednotlivých měření, ale taktéž je porovnávat mezi sebou a upozorňovat na možná rizika.

Mezi jednotlivé fáze každého projektu termografie patří:

- záznam jízdních dat na polygonu v daném vozidle pro tvorbu programu motorového zkušebního stavu,
- výroba upraveného výfukového potrubí s průzorem pro termokameru,
- kalibrace a samotné měření na motorovém stavu,
- zpracování a kontrola výsledků,
- komentáře a doporučení pro další oddělení, podílející se na vývoji; případné opakování měření například s upraveným software řídicí jednotky.

5.1.1 Záznam jízdního profilu

První činností, kterou začíná každý projekt termografie, je záznam vozidlových dat. Většina měření je prováděna na polygonu Ehra v Německu, případně je možné pro dodatečná měření využít válcových zkušeben (například pro záznam WLTP nebo ADP křivky na daném voze).

Měření na polygonu zahrnuje záznam dvou jízdních profilů, které jsou předepsány interní dokumentací. Jedná se o měření s názvy *Schaltrunde* a *Innenkurs*, kdy první z nich probíhá na rychlodráze a předpis se mírně odlišuje pro automobily s manuální nebo automatickou převodovkou. Zjednodušeně řečeno, vozidlo z vypočtené rychlosti zpomaluje například na 90 km/h a poté opět následuje akcelerace na určenou rychlost. U vozidel vybavených manuální převodovkou je postupně podřazováno o dva rychlostní stupně a při dosažení určitých otáček (například 3000 ot./min) následuje zrychlení na vypočtenou rychlost.

Druhé měření - *Innenkurs* - probíhá na drahách (označovaných jako *Strasse - ulice*), připomínajících okresní silnice (kde maximální možná rychlost je 150 km/h). Tyto *ulice* obsahují jak dlouhé rovné úseky, tak zatáčky o jistých poloměrech (cca od 30 do 400 m) a taktéž zpomalení na určité rychlosti například kvůli použitým povrchům (pro představu, nachází se zde i uměle vytvořené výtluky) nebo kvůli uměle vytvořeným překážkám (železniční přejezd či zpomalovací práh). Při tomto měření je vyžadována takzvaně „ostrá“ jízda, což znamená například plnou akceleraci ihned po konci omezených úseků a prudké brždění před zatáčkami nebo místy s omezenou rychlostí. Tento styl jízdy je nutný pro výrazné tepelné zatížení třicestného katalyzátoru vozidla a hlavně pro vyvolání vysokých teplotních gradientů (kladných nebo záporných). Zkouška *Innenkurs* má pevně daný program - jednotlivé úseky se musí projet v přesně určeném pořadí. To umožňuje následné porovnávání výsledků i mezi jednotlivými projekty.

Pro všechna měření ve vozidlech je využíván datalogger od firmy Vector (uveden níže) a taktéž měřicí souprava od firmy ETAS, spojená s řídicí jednotkou vozidla.

Vector VN1630log

Nejdůležitějším přístrojem pro záznam jízdních dat (na polygonu nebo ve válcové zkušebně) je datalogger od firmy Vector, v uvedeném případě se jedná přímo o model VN1630log (obr. 5.1). Společnost Vector se specializuje na vozidlovou elektroniku a především na komunikační rozhraní CAN, případně novější verzi CAN-FD. Datalogger VN1630log nahrává a ukládá veškerou komunikaci, probíhající po vozidlové síti CAN. Nejdůležitější proměnné pro následné zpracování dat pro řídicí systém motorového brzdového stanoviště jsou rychlost vozu, otáčky motoru, poloha plynového pedálu a zařazený převodový stupeň.

Proměnné, které se týkají samotného řízení motoru, jako jsou předstih či hodnota stechiometrického poměru, jsou zaznamenávány přímo z řídicí jednotky pomocí rozhraní ETAS-ETK.



Obrázek 5.1: Datalogger Vector VN1630log [15]

Při pořizování vozidlových záznamů je zařízení připojeno na sběrnici CAN-C (*CAN-Antrieb*) - neboli vysokorychlostní CAN komunikace pohonné jednotky. K této sběrnici jsou připojeny například řídicí jednotky pro řízení motoru, převodovky, ESP, ASR, ABS a v neposlední řadě také jednotka přístrojového štítu. Sběrnice musí být schopna pracovat v reálném čase, tzn. přenos dat může být sběrnici zpožděn pouze na extrémně krátkou dobu.

Přístroj je nastaven pro sběr dat frekvencí 1 Hz, jelikož takové nastavení je vhodné pro následný převod dat do řídicího systému motorového stanoviště. Data jsou ukládána ve formátu *.blf (Bus Frame Logging File), který umožňuje jednoduché dekódování záznamu s pomocí CAN-DBC databáze. CAN-DBC je textový soubor, který obsahuje informace pro dekódování nezpracovaných dat sběrnice CAN na fyzické hodnoty.

Rozhraní ETAS

Dalším zařízením, které je používáno pro tvorbu záznamu dat z vozidla, je rozhraní od firmy ETAS, která se téměř třicet let věnuje vývoji měřicí techniky a zařízení umožňujících programování softwaru motormanagementu (tento proces se taktéž označuje jako aplikace řídicích jednotek). Speciálně upravené řídicí jednotky s rozhraním ETK jsou připojeny k modulu ETAS ES89x (obrázek. 5.2), který zprostředkovává komunikaci mezi počítačem a ECU. Pomocí aplikace INCA mohou být data v řídicí jednotce upravována v reálném čase - toto rozhraní také umožňuje nahrávání záznamu vybraných kanálů a to v různých frekvencích - důležité kanály, mezi které patří například otáčky motoru, hodnoty stechiometrického poměru, předstihu nebo teploty a tlaky provozních kapalin mohou

být nahrávány maximálními frekvencemi, které řídicí jednotka nebo snímače umožňují. Pro méně důležité kanály je možné zvolit nižší vzorkovací frekvence. Popisové soubory aplikačních dat (soubory formátu *.a2l) obsahují desítky tisíc různých proměnných, ze kterých mohou být vybrány ty, které jsou důležité pro právě prováděné měření. Záznamy z rozhraní ETAS jsou v termografických měřeních používána doplňkově k nahrávkám z přístroje Vector - díky přímému přístupu k řídicí jednotce mohou být zaznamenávány i kanály, které se v rozhraní CAN-C nevyskytují.



Obrázek 5.2: Přístroj ETAS ES89x s rozhraním ETK [15]

Moduly ETAS taktéž podporují připojení sběrnice CAN-BUS a umožňují přímý import již zmiňované databáze CAN-DBC - toto spojení zprostředkovává online přehled o informacích, které po sběrnici CAN-BUS probíhají. Toho je s výhodou využíváno, jelikož přístroj Vector VN1630log neumožňuje online náhled na zaznamenávaná data. Tím pádem v podstatě probíhá i dvojitá kontrola dat před začátkem měření.

K přístroji ETAS 89x lze také připojit i teplotní či tlakové moduly, do kterých lze zapojit externě instalovaná čidla (termočlánky, snímače PT100 nebo tlakové senzory). Dalším vhodným doplněním měřicího řetězce jsou také „lambda moduly“ ES43x, ke kterým je připojena externí širokopásmová lambda-sonda.

5.1.2 Tvorba programu zkoušky pro motorový zkušební stav

Po pořízení záznamu dat ve vozidle je nutné náměry zpracovat tak, aby je bylo možné využít pro simulaci vozidlové jízdní zkoušky na motorovém zkušebním stanovišti. Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, data z přístroje Vector jsou ukládána ve formátu *.blf frekvencí 1 Hz. Po dekodování dat pomocí CAN-DBC databáze jsou vybrány kanály, které jsou potřebné pro správný provoz motoru na zkušebním stavu.

Mezi tyto kanály (mimo jiné) patří:

- čas a rychlost vozidla,
- otáčky motoru a poloha plynového pedálu,
- signál o stlačení brzdového pedálu (a brzdový tlak),
- signál o vyšlápnutí pedálu spojky,
- zařazený rychlostní stupeň (při simulaci vozidel s automatickou převodovkou).

Tyto kanály jsou poté převzorkovány po jedné desetíně sekundy a následně exportovány do tabulky (tzv. *Stuffentabelle*), která je importována do řídicího systému VENUS. Převzorkování (*resampling*) po jedné desetíně se používá z toho důvodu, že je to ideální časová jednotka pro řídicí systém a jeho komunikaci se zkušebním stavem, řídicí jednotkou motoru a dalšími přístroji.

Do *Stuffentabelle* pro řídicí systém VENUS se také mohou doplnit i další kanály, které se využívají k řízení provozu motoru na stanovišti - teplota chladící kapaliny na vstupu nebo výstupu z motoru, požadovaná teplota nasávaného vzduchu či teplota plnicího vzduchu, pokud se jedná o přeplňovaný motor.

5.1.3 Výfukové potrubí pro termografická měření

Nejdůležitější součástí upraveného výfukového potrubí, používaného pro termografická měření, je průhledový otvor, skrz který je sledováno teplotní pole termokamerou DIAS (představena v samostatné podkapitole). Jednotlivé pozice termočlánků, které jsou do katalyzátoru taktéž instalovány, jsou dány interním předpisem koncernu Volkswagen a jsou stejné pro všechna měření. Jediný rozměr, který je pro každý katalyzátor odlišný, je podélná vzdálenost termočlánků, jelikož každý monolit má jinou celkovou délku.

Zmiňovaný průhledový otvor, označovaný také jako *komínek* (obr. 5.3), sestává ze dvou částí - závitů, přivařeného do těla výfukového potrubí v předem dané pozici a matky se safírovým sklíčkem. Pozici komínku je nutné zvolit tak, aby umožňovala dobrý pohled na instalované termočlánky v povrchové vrstvě monolitu a zároveň nebylo nutné termokameru nastavovat do složitých či nevýhodných pozic (je třeba uvažovat nad limity pozicování termokamery vzhledem k umístění spalovacího motoru a dalších přístrojů na zkušebním stanovišti).

Poznámka - pro potřeby této práce byly využity fotografie právě vyráběného výfukového potrubí pro měření na motoru 1.0 TSI - již hotová výfuková potrubí motoru 1.6 MPI, jehož termografická měření byla využita pro diplomovou práci, byla zapůjčena z jiného oddělení.



Obrázek 5.3: Detail na komínek se závitem

Do výfukového potrubí, respektive do monolitu katalyzátoru, jsou termočlánky instalovány ze spodní strany - viz obrázek 5.4. Interní dokumentace předepisuje poloměr kruhu, po jehož obvodu jsou termočlánky instalovány; další tři jsou umístěny v jeho středu.

Další dvě sady termočlánků jsou podélně rozloženy v katalyzátoru tak, aby bylo možné sledovat rozložení teplot výfukových spalin při jejich průchodu keramickým monolitem.

Přední část výfuku je doplněna i o odběrné místo pro přístroj Combustion Fast FID (*Flame Ionization Detector*), který se využívá pro měření koncentrace nespálených uhlovodíků.



Obrázek 5.4: Přední část katalyzátoru s instalovanými termočlánky

5.1.4 Měření na zkušebním stavu

Pozn.: V této kapitole jsou představeny jen všeobecné informace k měření na zkušebním stavu a dále představeny přístroje, využívané při termografických měřeních. Detailní průběh zkoušek bude vysvětlen v další části diplomové práce.

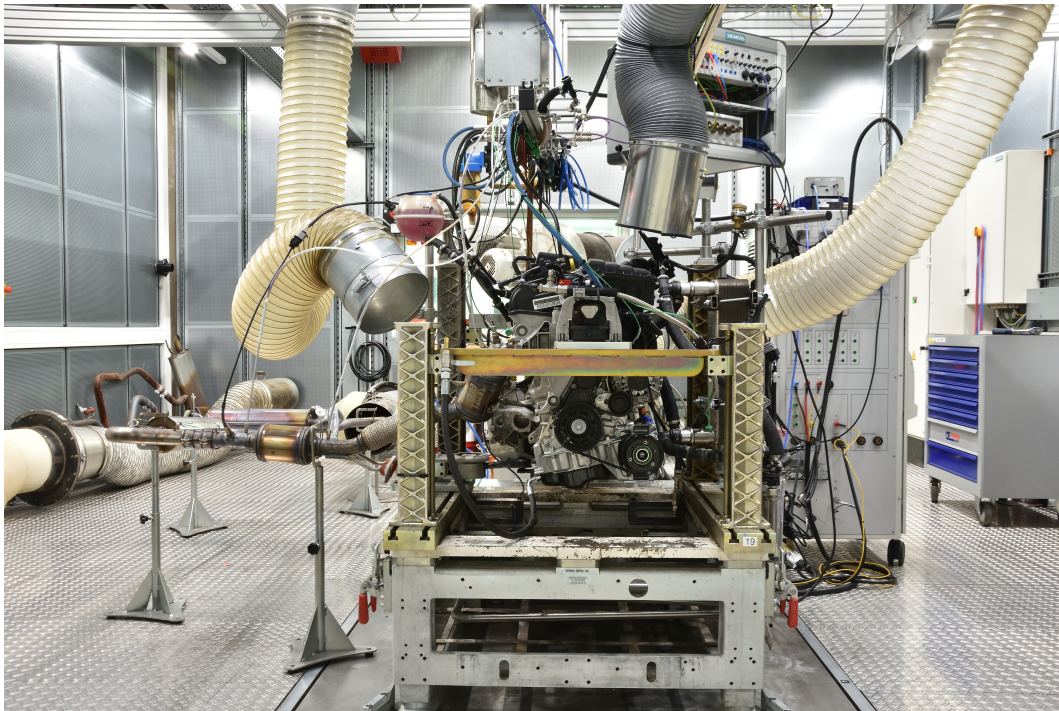
Z důvodu použití prototypových dílů na motorech, které byly určeny pro měření termografie, je zde uvedena pouze modelová fotografie stejného typu motoru a jeho ustavení na zkušebním stanovišti (obrázek 5.5).

Po instalaci a oživení motoru je nutné výfukové potrubí tzv. „zaběhnout“. Pro tento první záběh se využívá naměřeného testu *Innenkurs*, který je opakován po dobu deseti hodin. Pokud by tento záběh před samotným měřením neproběhl, mohly by být nepříznivě ovlivněny výsledky.

Motorový zkušební stav je ovládán systémem Venus, s jehož pomocí je možné ovládat veškerou techniku, která se na zkušebním stavu právě používá; z připojené měřicí techniky lze taktéž zaznamenávat vybrané měřené hodnoty, takže měření nejsou „hromadou záznamů“ z jednotlivých přístrojů, ale data jsou uložena v jednom souboru, který je možné dále zpracovávat.

Při termografických měřeních na motorovém stavu je využit i měřicí řetězec od firmy ETAS - a stejně jako ve vozidle - s jeho pomocí je možné nahrávat vybrané hodnoty přímo

z řídicí jednotky motoru. I tyto veličiny mohou být dále převáděny do ovládacího systému Venus a zahrnuty v jednom měřicím souboru.



Obrázek 5.5: Celkový pohled na ustavený motor na zkušebním stanovišti

Termokamera DIAS PyroView

Nejdůležitějším prvkem celého měření termografie je infračervená termokamera výrobce DIAS, typ PyroView 320N (viz obrázek 5.6). Jedná se kameru určenou pro měření vysokých teplot materiálů, jako jsou kovy, sklo či keramika. Pro minimalizaci chyb při měření teplot pracuje kamera pouze v úzkém vlnovém rozsahu $1,4 - 1,6 \mu m$. Dále je také nutné podotknout, že společnost DIAS společně s oddělením termografie VW kameru dodatečně nastavuje přímo pro měření teplotních polí a gradientů katalyzátorů. V tabulce 5.1 jsou uvedeny základní údaje kamery.



Obrázek 5.6: Termokamera DIAS PyroView 320N [17]

DIAS PyroView 320N	
Teplotní rozsah	350 - 1200°C
Spektrální rozlišení	1,4 - 1,6 μm
Typ senzoru	InGaAs pole (320 × 256 pixelů)
Nejistota měření	2 % měřené hodnoty v °C
Frekvence snímání	100 Hz; nastavitelné po 25 Hz
Odezva	20 ms
Provozní teplota	0 - 50°C

Tabulka 5.1: Základní parametry kamery DIAS [17]

Cambustion Fast FID

Dalším přístrojem, který je využíván při měření projektů termografie, je Cambustion Fast FID (*Flame Ionisation Detector*) - obr. 5.7. Jedná se o přístroj pro měření koncentrace uhlovodíků ve výfukových exhalacích. Vzorek plynů je přiveden k vodíkovému plameni uvnitř přístroje a veškeré uhlovodíky v něm obsaženy při hoření vytváří ionty, které jsou detekovány pomocí kovového kolektoru. Proud, který prochází kolektorem, je tak přímo úměrný koncentraci HC v plynném vzorku. Cambustion Fast FID se vyznačuje zejména velice rychlou odezvou, proto je často využíván nejen při termografických měřeních.

Analýza koncentrace uhlovodíků je velice důležitá pro tvůrce dat řídicí jednotky. Zvýšené hodnoty HC mohou upozornit na nutné úpravy map, protože - jak bylo uvedeno v kapitole 2.3.2 - velká část emisí uhlovodíků vzniká při nedokonalém nebo neukončeném spalování, na které může mít (mimo jiné) vliv mapování vstřikování paliva či předstihu zážehu.



Obrázek 5.7: Zařízení *Cambustion Fast FID* [18]

5.2 Výsledky měření jednotlivých variant

Termografická měření, která byla provedena v rámci diplomové práce, byla zaměřena na porovnání tepelného zatížení katalyzátoru motoru řady EA211 1.6 MPI o výkonu 81 kW. Zmíněný spalovací motor je konstruován pro obě emisní normy; respektive jeho konstrukce, která byla původně uvažována pro emisní normu *Euro 5*, byla dále mírně upravena a využita i pro novější normu *Euro 6*.

Motor 1.6 MPI EU6 se od verze EU5 liší pouze v několika součástech a upraveným řízením motoru. Modifikovaný je také samotný katalyzátor, který v případě emisní normy EU6 musí odolávat vyššímu teplotnímu zatížení. Spalovací motory splňující emisní limity normy *Euro 6* totiž pracují se stechiometrickým poměrem $\lambda = 1$. Případné obohacení směsi je povoleno pouze z důvodu ochrany základních součástí motoru a je přípustné pouze ve zvlášť odůvodněných případech. Níže v tabulce 5.2 jsou uvedeny základní technické informace motoru 1.6 MPI.

Zdvihový objem	1598 cm ³
Typ rozvodu	DOHC
Počet válců	4
Počet ventilů	16
Maximální výkon	81 kW
Maximální toč. moment	155 Nm

Tabulka 5.2: Základní parametry motoru EA211 1.6 MPI

5.2.1 Úvodní měření a kalibrace

Po instalaci a zprovoznění motoru na zkušebním stanovišti jsou provedeny základní zkoušky ověřující funkčnost a výkonové parametry. Pokud se jedná o nový motor, je třeba nejprve provést záběh v délce deseti hodin. Pro uvedená základní měření se nevyužívá speciálního výfukového potrubí pro termografii, avšak je využito sériového dílu, na kterém jsou instalována jen základní čidla pro měření teplot a tlaku. V úvodní části jsou také vyzkoušeny dynamické testy pro následné měření termografie - je nutné ověřit, zda konverze jízdních cyklů, naměřených ve vozidle na testovacím polygonu či na válcové zkušebně, proběhla

správně a zda simulace testů na motorovém zkušebním stanovišti odpovídá měřením, provedeným v automobilu.

Zde je i vhodné podotknout, že pro zpřesnění simulace zkoušky na motorovém stanovišti jsou teploty chladicí kapaliny či nasávaného vzduchu nastavovány tak, aby co nejvíce odpovídaly záznamu z vozu a bylo tak dosaženo co nejpodobnějších podmínek, při kterých byl motor provozován.

Pokud jsou výsledky uvedených zkoušek v pořádku a nevyskytují se žádné další problémy, je možné instalovat termografické výfukové potrubí a provést nutný záběh - jak již bylo uvedeno v kapitole 5.1.4.

Po všech výše uvedených testech je na motorové stanoviště instalována termokamera DIAS a k výfukovému potrubí je připojeno zařízení Cambustion FFID. Kamera se následně musí připevnit a nastavit tak, aby skrz matici se safírovým sklem bylo možné pozorovat minimálně čtyři z pěti instalovaných termočlánků v horní části monolitu katalyzátoru. Při instalaci kamery je také nutné brát na vědomí fakt, že motor se na zkušebním stanovišti také značně pohybuje v uložení, tudíž je vhodné s instalovanou kamerou vyzkoušet část zkušebního testu, aby bylo jisté, že nedochází k výraznému vychýlení obrazu.

Velice důležitá je také kalibrace kamery, respektive porovnání teplot snímaných instalovanými termočlánky a termokamerou DIAS ve vybraných režimech. Obvykle se uvažují tři otáčkové hladiny při maximální zátěži, kdy je hodnota $\lambda = 1$. Tyto hodnoty jsou důležité pro výsledné vyhodnocení jednotlivých měření - hodnoty teplot z termokamery jsou při vyhodnocování přepočítávány na teploty termočlánků - je to z toho důvodu, že monolit katalyzátoru je kamerou snímán pod úhlem a skrz safírové sklíčko. Teploty snímané termokamerou jsou tak ve výsledku nižší než teploty termočlánků.

Následně je možné přistoupit k vlastním měřením. Jednotlivé zkoušky jsou rozděleny na pětisetsekundové bloky, po jejichž uplynutí je vyměněna matka se safírovým sklem - tento způsob měření se využívá z toho důvodu, že po zmíněné době dochází ke znečištění skla spaliny a k jeho vysokému tepelnému zatížení. Při měření v delších časových blocích by mohlo dojít k prasknutí sklíčka a následnému úniku spalin do prostoru měřicího stanoviště, případně také k ohrožení měřicí techniky.

Pokud jsou veškerá data úvodního měření v pořádku, stejně jako nastavení veškerých přístrojů, je možné dále pokračovat s vlastním termografickým měřením. Všechny testy jsou

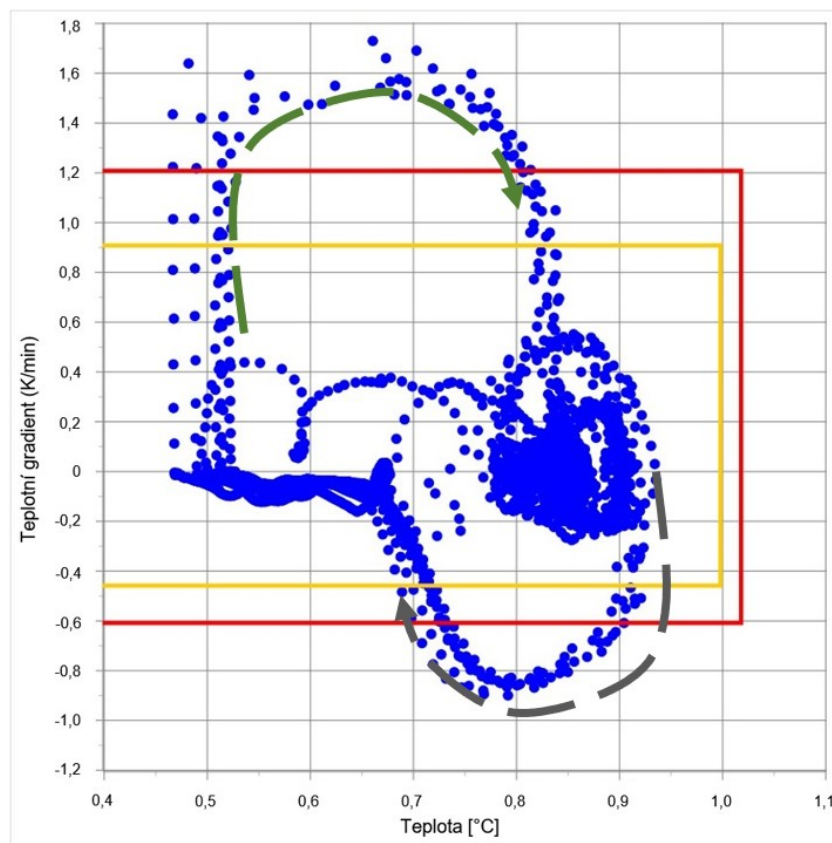
nejméně třikrát opakovány, jejich samotné pořadí není důležité (avšak je dodržována dohoda, že jako první jsou měřeny testy *Schaltrunde* a zkoušky *Innenkurs* poté následují).

Měřená data jsou primárně nahrávána přes software ETAS Inca, u termokamery je využito vlastního programu DIAS PyroView. Veškerá naměřená data jsou následně zpracovávána pomocí software jBeam od společnosti Kistler.

5.2.2 Vysvětlení grafů a doplňující zkoušky

Před představením výsledků jednotlivých měření je vhodné zmínit, jak jednotlivým grafům porozumět a získat představu o celkovém vyhodnocení.

Pozn.: Na osách grafů jsou použita poměrná čísla, jelikož výsledky nelze z pochopitelných důvodů přímo zveřejnit.

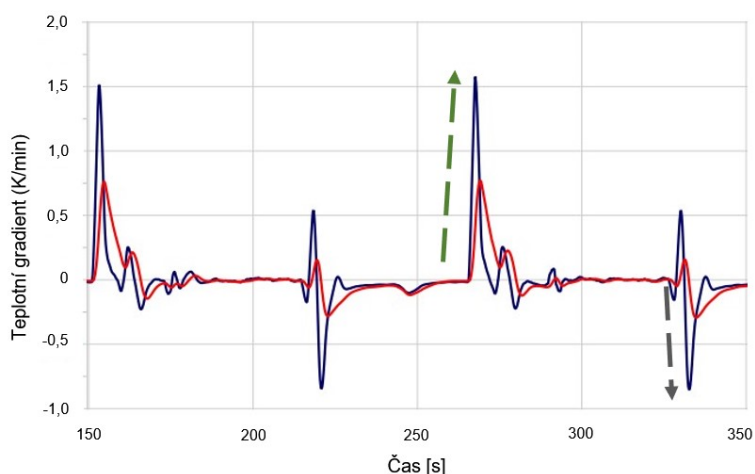


Obrázek 5.8: Modelové výsledky - osa X teplota, osa Y tep. gradient, šipky zobrazují návaznost bodů

Na ose X jsou vyneseny hodnoty teplot v měřených bodech a na ose Y je zobrazen gradient mezi **dvěma následujícími** body. Teplotní gradient, používaný v souvislosti s měřením termografie, je rozdíl dvou teplot určitého bodu za danou jednotku času. Šipky,

doplněné na obrázku 5.8, představují návaznost bodů v testu *Schaltrunde*. Například, v oblasti teplot cca 0,5 a nulových gradientů může být předpokládáno, že vozidlo (respektive motor) se nachází v oblasti volnoběhu či nízkého zatížení. Následně však dochází k výrazné akceleraci při plném zatížení - teplotní gradienty značně narůstají a probíhá přesun do oblasti vysokých teplot (0,9 - 0,95), který je zobrazen zelenou šipkou. Černá šipka naopak představuje přesun zpět do oblasti nižších teplot při nulovém zatížení - zde je patrné, že dochází k rychlému ochlazení katalyzátoru, které je doprovázeno výraznými zápornými gradienty. Níže uvedený obrázek 5.9 znázorňuje uvedené skutečnosti v časové ose.

Žlutou a červenou čarou na obrázku 5.8 jsou ohraničeny limity, které by neměly být překračovány - zde je však důležité doplnit, že překročení těchto hranic přímo neznamená, že katalyzátor či aplikace nejsou vhodné pro sériové nasazení ve vozidlech. V takových případech se přistupuje k ověření životnosti katalyzátoru dlouhodobou zkouškou na zkušebním motorovém stanovišti, kdy jsou po určitý počet hodin neustále opakovány testy *Schaltrunde* a *Innenkurs*. Pokud je tato zkouška úspěšně splněna a katalyzátor po ní výrazně nezmění vlastnosti, případně nedojde k jeho destrukci, může být jeho konstrukce (a také aplikace řídicí jednotky) z pohledu termografie schválena.



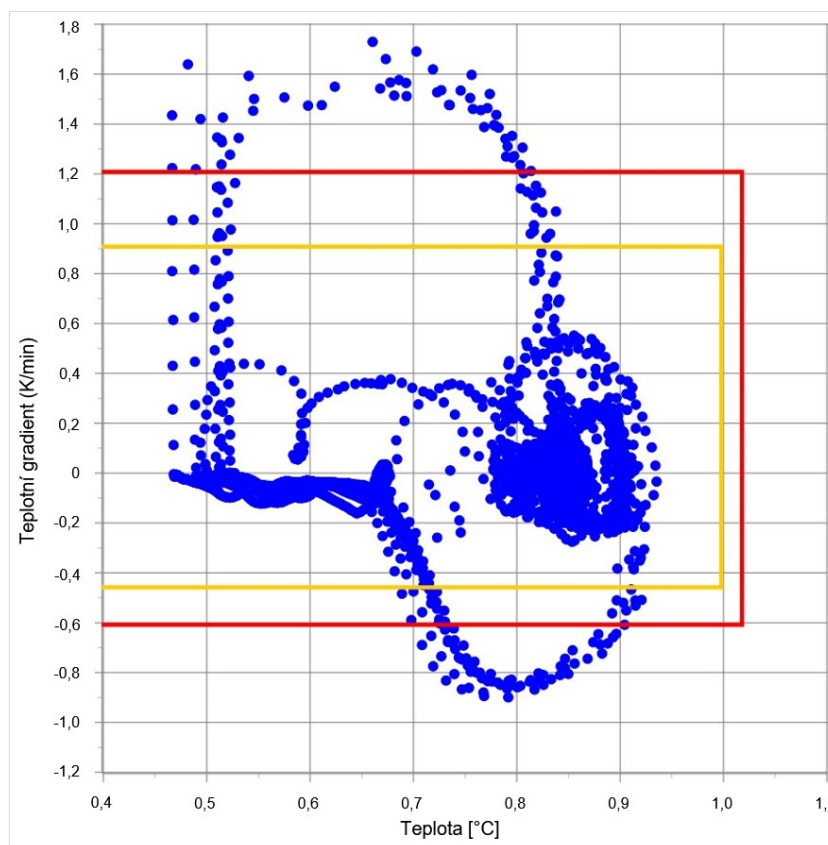
Obrázek 5.9: Časový záznam teplotního gradientu v testu *Schaltrunde* - varianta EU5

Obrázek 5.9 taktéž doplňuje i vysvětlení, proč je termokamera nezbytnou součástí měření - modrou čarou je zobrazen gradient, který je získán z termokamery DIAS. Červená čára představuje záznam z termočlánku, instalovaném v katalyzátoru - zde je vidět výrazná setrvačnost teploty měřené pomocí termočlánků a jimi naměřené gradienty nejsou zdaleka tak výrazné. Šipky zobrazují výše popsané teplotní přechody při akceleraci a deceleraci.

5.2.3 Měření varianty 1.6 MPI Euro 5

Jako první byla měřena varianta motoru 1.6 MPI pro emisní normu Euro 5. Po úvodních testech a kalibraci byly třikrát opakovány oba testy *Schaltrunde* a *Innenkurs*, které byly zaznamenány ve vozidle typu SK326 s manuální převodovkou.

Výsledky testu *Schaltrunde* ve variantě Euro 5



Obrázek 5.10: Výsledky testu *Schaltrunde* pro variantu Euro 5

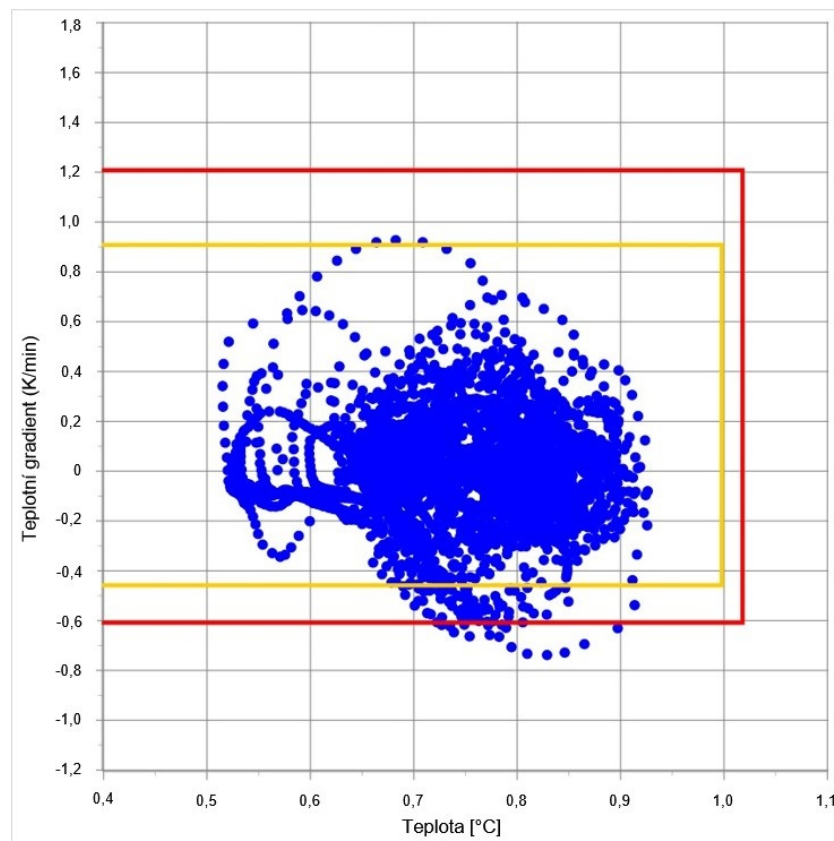
Jako první jsou zobrazeny výsledky testu s názvem *Schaltrunde* pro variantu Euro 5. Objevují se zde *kritické* přechodové jevy při přechodu z nízkého do plného zatížení - přesun z oblasti teplot **0,5** do oblasti **0,9 - 0,93** je doprovázený výraznými teplotními gradienty, které značně překračují limitní hranice.

Zpětný přechod z fáze plného zatížení do nezatíženého režimu je doprovázen zápornými gradienty, které téměř až o 50 % překračují kritické limity. Vzhledem k tomu, že dva zmíněné režimy následují bezprostředně za sebou, je teplotní zatížení katalyzátoru velice výrazné.

Záporné gradienty mohou být způsobeny špatným mapováním řídicí jednotky a zejména funkce, která se nazývá „fuel cut-off“. Zmíněná funkce i po přechodu z plného do nulového zatížení ponechává mírně otevřenou škrtící klapku a vstříkuje palivo pro udržení teploty katalyzátoru a snížení záporných teplotních gradientů. Pokud tato funkce není aktivní po dostatečně dlouhou dobu, teploty na čelní ploše katalyzátoru rychle klesají a následný přechod do plného zatížení je opět doprovázen vysokými kladnými gradienty.

Maximální dosažená teplota vstupního povrchu katalyzátoru s hodnotou **0,93** je bez připomínek.

Výsledky testu Innenkurs ve variantě Euro 5



Obrázek 5.11: Výsledky testu Innenkurs pro variantu Euro 5

Na rozdíl od testu *Schaltrunde* je výsledek druhé zkoušky *Innenkurs* téměř bez výhrad. I v tomto případě se objevují kritické záporné gradienty, avšak nachází se v teplotním rozsahu $< 0,9$ a nedochází k jejich opakování. Pozitivní gradienty nijak výrazně nepřekračují stanovený horní limit a maximální teplota čelní plochy monolitu katalyzátoru je také bez připomínek.

5.2.4 Hodnocení měřené varianty Euro 5

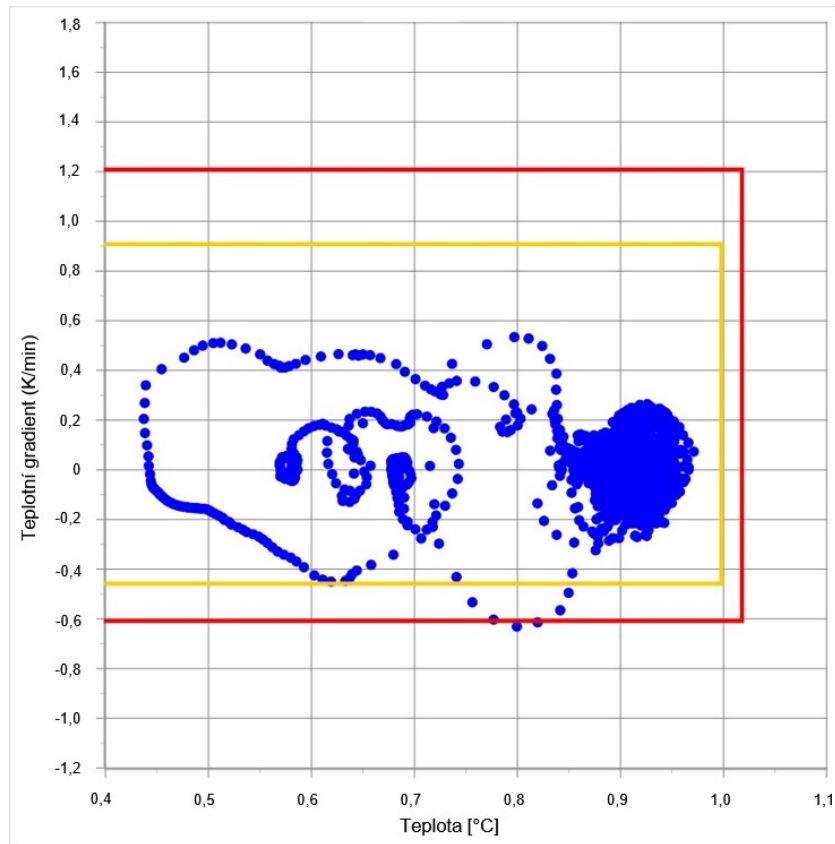
Zkouška *Innenkurs* ve variantě pro Euro 5 byla hodnocena velice pozitivně, avšak druhý test *Schaltrunde* odhalil značné problémy v aplikaci řídicí jednotky. Z tohoto důvodu bylo doporučeno provedení doplňkové dlouhodobé zkoušky v délce trvání 150 hodin pro ověření konstrukce katalyzátoru. Předpis dlouhodobé zkoušky sestaven pouze z opakování testu *Schaltrunde* z důvodu vysokého zatížení.

Po absolvování předepsané dlouhodobé zkoušky byl katalyzátor kontrolován pomocí endoskopu - vstupní strana katalyzátoru vykazovala pouze drobné poškození katalytické vrstvy v malé části čelní plochy. Po zjištění těchto skutečností bylo možné jak datový stav, tak i samotné řešení konstrukce katalyzátoru schválit z pohledu termografie.

5.2.5 Měření varianty 1.6 MPI Euro 6

Pro měření termografie motoru EA211 1.6 MPI ve variantě Euro 6 byly oba testy zaznamenány v automobilu typu SK316, taktéž ve variantě s přímo řazenou převodovkou. Využití velice podobné platformy vozu je výhodné právě kvůli porovnání. Při použití dat získaných ve vozidle o nižší pohotovostní hmotnosti nemusí být zatížení katalyzátoru tak vysoké a výsledky se následně stávají méně porovnatelnými. Použití stejného typu převodovky je také žádané, protože předpis pro test *Schaltrunde* je mírně odlišný pro vozidla vybavená automatickou nebo manuální převodovkou.

Výsledky testu Schaltrunde ve variantě Euro 6



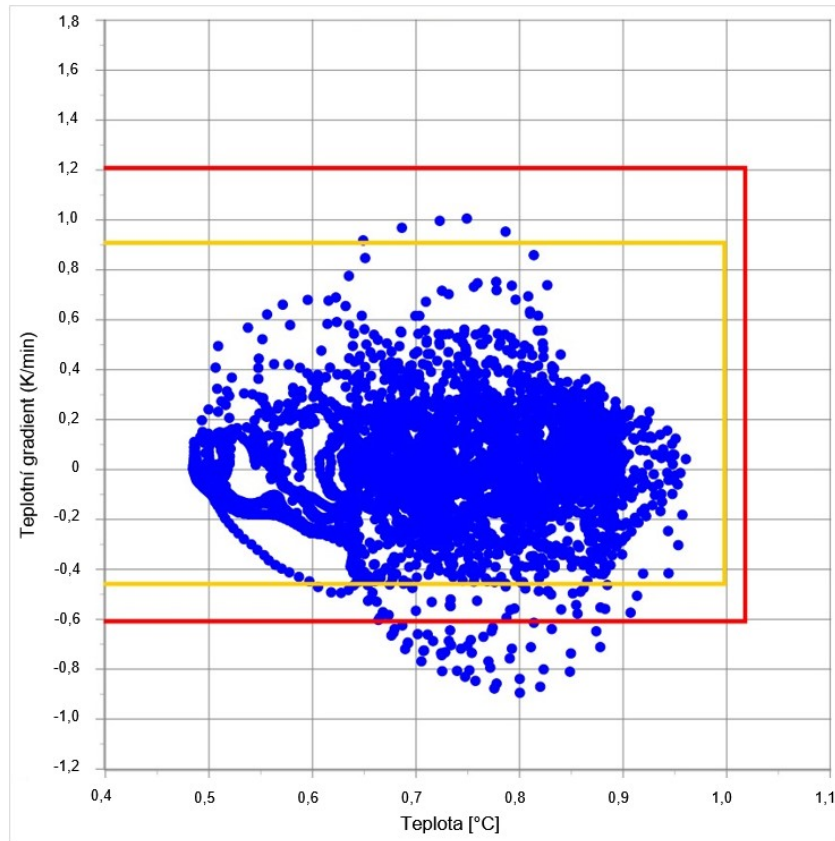
Obrázek 5.12: Výsledky testu Schaltrunde pro variantu Euro 6

Při vývoji aplikace řídicí jednotky pro emisní normu Euro 6 pro motor 1.6 MPI bylo výrazně zapracováno na *teplotním managementu* katalyzátoru - zejména kvůli zlepšení teplotních gradientů a v neposlední řadě také kvůli ochraně součástí a prodloužení jejich životnosti. Pokud je monolit katalyzátoru dlouhodobě zatěžován výraznou změnou teplot, jeho katalytické vlastnosti se rapidně zhoršují a po několika letech běžného provozu nemusí katalyzátor správně fungovat z hlediska úpravy výfukových exhalací.

Již na první pohled je patrné, že výše uvedené změny v mapování řídicí jednotky a také upravená konstrukce katalyzátoru se velice pozitivně projeví na výsledcích termografie. Výpočtový model již zmíněné funkce „*fuel cut-off*“ byl výrazně přepracován tak, aby vstřikování paliva bylo aktivní po delší dobu než tomu bylo u varianty Euro 5. V testu *Schaltrunde* je prodleva mezi jednotlivými fázemi plného a nulového zatížení relativně dlouhá (v řádu desítek sekund) a přesto ani takový časový úsek nebyl dostatečný k tomu, aby v této zkoušce došlo k deaktivaci této funkce.

Z toho důvodu teplota (kromě začátku testu) neklesla pod **0,85** a neustále se pohybovala v rozmezí **0,85 - 0,97**. To není výhodné jen z pohledu teplotních gradientů, ale tato skutečnost i výrazně napomáhá průběhu oxidačně-redukčních reakcí, které tak v katalyzátoru mohou soustavně probíhat a nedochází k jejich „zamrzání“ z důsledku nízkých teplot.

Výsledky testu Innenkurs ve variantě Euro 6



Obrázek 5.13: Výsledky testu Innenkurs pro variantu Euro 6

Výsledky zkoušky Innenkurs pro variantu Euro 6 po výborném výsledků testu Schaltrunde mohou být taktéž hodnoceny pozitivně. I přesto, že na obrázku 5.13 se objevuje více záporných gradientů než v případě varianty EU5, jejich těžiště se nachází v okolí teploty **0,8** a nepředstavují tak výrazné ohrožení pro konstrukci katalyzátoru. Pozitivní gradienty jsou absolutně nekritické, stejně jako maximální naměřená teplota povrchu monolitu, která se pohybuje v oblasti **0,97**.

5.2.6 Hodnocení měřené varianty Euro 6

Varianta Euro 6 se ukázala jako naprosto bezproblémová a aplikaci řídicí jednotky, stejně jako konstrukci katalyzátoru, je možné z termografického hlediska bezpečně schválit. Uvedené poznámky k jednotlivým měřením jsou spíše doporučeními pro zaměření dalšího vývoje.

5.3 Výsledné porovnání variant Euro 5 a Euro 6

Obě měřené varianty vyhověly termografickým měřením, i když měření varianty Euro 5 muselo být na závěr doplněno o dlouhodobou zkoušku, která finálně ověřila robustnost konstrukce katalytického monolitu.

Mnohem důležitějším výstupem z přímého porovnání termografie dvou katalyzátorů, určených pro motor řady EA211 1.6 MPI, je výrazné zlepšení aplikace řídicí jednotky pro emisní normy Euro 5 a Euro 6.

Při vývoji mapování dat pro řídicí jednotku varianty EU6 byl již zpočátku kladen důraz na tepelnou ochranu dílů samotného motoru i jeho příslušenství. Tento přístup se velice pozitivně projevil zejména v testu *Schaltrunde*, kde došlo k výraznému zlepšení v oblasti teplotních gradientů a monolit není ani zdaleka tolik zatěžován jako u varianty pro emisní normu EU5. Udržování vysokých teplot v katalyzátoru je také velice výhodné z hlediska celkových emisí. Oxidačně-redukční reakce tak mohou probíhat z velké části samovolně a vzácné kovy se nemusí tolik podílet na jejich průběhu - z čehož plyne, že katalytická vrstva je v čase méně zatížena a její celkové opotřebení je nižší.

5.4 Doporučení pro další termografická měření

5.4.1 Systém pro snímání polohy vozidla

I přesto, že celý proces termografických měření - od samotného získání jízdních cyklů na polygonu až po závěrečné testy na motorovém zkušebním stanovišti - je velice kvalitně nastaven a ověřen několikaletou praxí, je i tak možné navrhnout úpravy, které by mohly zlepšit zejména interpretaci výsledků a upřesnit body, na které by bylo vhodné se zaměřit při tvorbě aplikace řídicí jednotky či při konstrukci výfukového potrubí s katalyzátorem.

Jedním z doporučení by mohlo být doplnění vozidlové měřicí aparatury o zařízení, které dokáže přijímat a zaznamenávat polohu vozidla s využitím globálního polohového systému (GPS, Glonass či Galileo). Takovým přístrojem je například *VBOX Sigma* od anglické firmy Racelogic (obrázek 5.14), která se již přes třicet let věnuje vývoji a výrobě elektronických zařízení pro motorsport.



Obrázek 5.14: Zařízení Racelogic VBOX Sigma [19]

Informace o přesné poloze a rychlosti vozidla by mohla více zpřesnit režim, při kterém dochází k nejvyššímu teplotnímu zatížení katalyzátoru (zda jde o vysokou akceleraci na maximální povolenou rychlost, o rázné zpomalení z vysoké rychlosti až do zastavení vozu nebo o rozjezd do strmého stoupání). Výhodou zařízení VBOX je také fakt, že jej lze přímo propojit s další měřicí aparaturou, například s již uvedeným modulem firmy ETAS.

5.4.2 Rozšíření skupiny standardních měřících cyklů

Jelikož je pro termografická měření primárně využíváno dvou měřících cyklů - *Schaltrunde* a *Innenkurs* - bylo by jistě vhodné je doplnit další zkouškou pro zpřesnění finálních výsledků a doporučení pro další oddělení.

Vhodným doplněním by mohl být test *ADP*, který je využíván pro dlouhodobé testy zatížení katalyzátorů a výfukového potrubí na válcové zkušebně. Jeho profil je taktéž velice dynamický a jsou zde často střídány fáze vysokého a nízkého zatížení. Další podobnou zkouškou je *RDE-Max*, která je používána při emisních měřeních jako doplněk ke zkouškám *WLTP* a opět se jedná o dynamický test s vysokým zatížením. Pro doplnění, celkové emise pevných částic, naměřené v testu *WLTC* a *RDE-Max*, se liší až pětinašobně. Je to dáno právě výrazně vyšším zatížením v druhé jmenované zkoušce.

6 Závěr

Diplomová práce se zabývá tématem termografie třícestných katalyzátorů spalovacích motorů. Teoretická část uvádí základní informace, týkající se emisních norem a průběhu hoření směsi v zážehovém motoru, následně jsou taktéž uvedeny informace o vzniku emisí a systémy pro jejich redukci.

Praktická část, zabývající se měřením teplotních gradientů katalyzátoru s využitím infračervené termografie, uvádí výsledky měření variant motoru pro emisní normy Euro 5 a Euro 6 v dynamických testech, reprodukováných na motorovém zkušebním stanovišti. Na jednotlivé výsledky navazuje jejich přímé porovnání, ze kterého vyplynulo, že větší důraz na vývoj aplikace řídicí jednotky motoru a získané informace z ostatních vývojových projektů se kladně podepsaly i na výsledcích termografického měření třícestného katalyzátoru u varianty Euro 6.

Zejména - pro variantu Euro 6 - nově použitá funkce motormanagementu s názvem "fuel cut off", která udržuje teplotu katalyzátoru na vyšších hodnotách a brání jeho výraznému ochlazení, téměř dokázala kompletně odstranit největší problém, který se vyskytoval ve variantě, určené pro předchozí emisní normu - vysoké záporné gradienty při dynamickém přechodu z maximálního do nulového zatížení spalovacího motoru, které se projevíly zejména v prvním měřeném cyklu s názvem *Schaltrunde*.

I přesto, že v druhém měřeném testovacím cyklu *Innenkurs* byly výsledky varianty EU5 nepatrně příznivější, celkově je varianta EU6 z termografického hlediska a zejména z pohledu robustnosti a kvality aplikace řídicí jednotky na vyšší úrovni. Tento fakt je podpořen i skutečností, že pro uvolnění varianty Euro 6 pro další vývoj (a případné sériové nasazení) nebyla požadována doplňující zkouška katalyzátoru pro ověření jeho konstrukce ve vysokém dlouhodobém zatížení.

Závěrečná doporučení v diplomové práci se týkají zejména rozšíření matice měřících cyklů a zkoušek, díky kterým by mohly být zpřesněny finální výsledky a doporučení pro následný vývoj.

7 Seznam použitých zdrojů

- [1] Směrnice Rady 70/220/EHS o sblížení právních předpisů členských států týkajících se opatření proti znečištění ovzduší plyny zážehových motorů motorových vozidel. (1970). *Úřední věstník Evropské Unie*, (L 76/1), 1-23.
- [2] Směrnice Rady 91/441/EHS, kterou se mění směrnice 70/220/EHS o sblížení právních předpisů členských států týkajících se opatření proti znečištění ovzduší emisemi z motorových vozidel. (1991). *Úřední věstník Evropské Unie*, (L 242), 1-106.
- [3] Nařízení komise (EU) 2017/1151, kterým se doplňuje nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 715/2007 o schvalování typu motorových vozidel z hlediska emisí z lehkých osobních vozidel a z užitkových vozidel (Euro 5 a Euro 6) a z hlediska přístupu k informacím o opravách a údržbě vozidla, mění směrnice Evropského parlamentu a Rady 2007/46/ES, nařízení Komise (ES) č. 692/2008 a nařízení Komise (EU) č. 1230/2012 a zrušuje nařízení Komise (ES) č. 692/2008. (2017). *Úřední věstník Evropské Unie*, (L 175), 1-643.
- [4] Směrnice Evropského parlamentu a Rady 94/12/ES o opatřeních proti znečištění ovzduší emisemi z motorových vozidel a o změně směrnice 70/220/EHS. (1994). *Úřední věstník Evropské Unie*, (L 100), 42-52.
- [5] Směrnice Evropského parlamentu a Rady 98/69/ES o opatřeních proti znečištění ovzduší emisemi z motorových vozidel a o změně směrnice 70/220/EHS. (1998). *Úřední věstník Evropské Unie*, (L 350), 1-57.
- [6] Směrnice Komise 2002/80/ES, kterou se přizpůsobuje technickému pokroku směrnice Rady 70/220/EHS o opatřeních proti znečištění ovzduší emisemi z motorových vozidel. (2002). *Úřední věstník Evropské Unie*, (L 291), 20-57.
- [7] Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 715/2007 o schvalování typu motorových vozidel z hlediska emisí z lehkých osobních vozidel a z užitkových vozidel (Euro 5 a Euro 6) a z hlediska přístupu k informacím o opravách a údržbě vozidla. (2007). *Úřední věstník Evropské Unie*, (L 171), 1-16.

- [8] Nařízení komise (ES) č. 692/2008, kterým se provádí a mění nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 715/2007 o schvalování typu motorových vozidel z hlediska emisí z lehkých osobních vozidel a z užitkových vozidel (Euro 5 a Euro 6) a z hlediska přístupu k informacím o opravách a údržbě vozidla. (2008). *Úřední věstník Evropské Unie*, (L 199), 1-136.
- [9] Nařízení Komise (EU) č. 459/2012, kterým se mění nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 715/2007 a nařízení Komise (ES) č. 692/2008 z hlediska emisí z lehkých osobních a z užitkových vozidel (Euro 6). (2012). *Úřední věstník Evropské Unie*, (L 142), 16-24.
- [10] Nařízení Komise (EU) č. 1230/2012, kterým se provádí nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 661/2009, pokud jde o požadavky pro schvalování typu motorových vozidel a jejich přípojných vozidel týkající se jejich hmotností a rozměrů, a mění směrnice Evropského parlamentu a Rady 2007/46/ES. (2012). *Úřední věstník Evropské Unie*, (L 353), 31-79.
- [11] HEYWOOD, John B. *Internal combustion engine fundamentals*. Second edition. New York: McGraw-Hill Education, 2018. ISBN 978-1-26-011610-6.
- [12] MACEK, Jan. *Spalovací motory*. 2. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 2012. ISBN 978-80-01-05015-6.
- [13] MATĚJOVSKÝ, Vladimír. *Automobilová paliva*. Praha: Grada, 2005. ISBN 80-247-0350-5.
- [14] STRZELEC, Andrea a John KASAB. *Automotive Emissions Regulations and Exhaust Aftertreatment Systems*. Warrendale: SAE International, 2020. ISBN 978-0-7680-9955-3.
- [15] SZRAMOWIAT, Katarzyna, Joseph WOODBURN, Wiktor PACURA, Katarzyna BERENT, Piotr BIELACZYK a Janusz GOŁAŚ. Engine-generated solid particles – a case study. *Combustion Engines*. 2018, 174(3), 33-39. ISSN 2300-9896. DOI:10.19206/CE-2018-304.
- [16] VOLLMER, Michael a Klaus-Peter MÖLLMANN. *Infrared Thermal Imaging*. 2. vyd. Weinheim: WILEY-VCH, 2018. ISBN 978-3-527-41351-5.

- [17] Fast Flame Ionization Detector Principles. In: *Cambustion*. [online]. [cit. 2023-03-19]
Dostupné z: <https://www.cambustion.com/products/knowledgebase/fast-fid-principles>
- [18] PYROVIEW 320N. In: *DIAS-Infrared* [online]. [cit. 2023-03-20]. Dostupné z:
https://www.dias-infrared.com/pdf/pyroview320n_eng_mail.pdf
- [19] VBOX Sigma. In: *VBOX Positioning* [online]. [cit. 2023-03-22]. Dostupné z:
https://vboxpositioning.com/downloads/VBOX-Sigma_Data.pdf