



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

EMISNÍ SYSTÉMY OSOBNÍCH AUTOMOBILŮ SE ZÁŽEHOVÝM MOTOREM

AN AFTERTREATMENT SYSTEM FOR THE PASSENGER VEHICLES WITH A GASOLINE ENGINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michal Hána

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michael Böhm

BRNO 2020

Zadaní bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Michal Hána
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Michael Böhm
Akademický rok:	2020/21

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 bakalářské práce:

Emisní systémy osobních automobilů se zážehovým motorem

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce rešeršní povahy zaměřená na současná řešení emisních systémů zážehových motorů v osobních automobilech.

Cíle bakalářské práce:

Popsat možné konfigurace emisního systému u moderního osobního automobilu se zážehovým motorem. Pojednat o funkci a konstrukčním řešení jednotlivých komponent, jejich parametrech a řízení. Zhodnotit dopad jednotlivých komponent na emise výfukových plynů a na spotřebu paliva. V závěru vše zhodnotit a nastínit další možný vývoj v této oblasti.

Seznam doporučené literatury:

STONE, Richard. Introduction to internal combustion engines. 3rd edition. Warrendale, Pa.: Society of Automotive Engineers, 1999. 641 s. ISBN 0768004950.

HEISLER, Heinz. Advanced engine technology. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1995. 794 s. ISBN 1-56091-734-2.

KÖHLER, Eduard. Verbrennungsmotoren: Motormechnik, Berechnung und Auslegung des Hubkolbenmotors. 3. verb. Aufl. Braunschweig [u.a.]: Vieweg, 2002. 548 s. ISBN 3-528-23108-4.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá problematikou snižování emisí u osobních automobilů se zážehovým motorem. V úvodu jsou popsány jednotlivé emisní složky, jejich vznik a dopad na životní prostředí a lidský organismus. Hlavní část práce se věnuje možnostem snižování emisí. Je popsána funkce a konstrukční řešení jednotlivých komponent emisního systému. Dále jsou uvedeny konkrétní řešení pro několik vybraných zástupců z různých kategorií vozidel. Tato řešení jsou zhodnocena a je navržena vlastní konfigurace s ohledem na zvolené parametry. V závěru jsou shrnuty výsledky práce.

KLÍČOVÁ SLOVA

spalovací motor, benzín, emise, recirkulace výfukových plynů, katalyzátor, filtr pevných částic

ABSTRACT

This thesis concentrates on the issue of reducing emissions from passenger vehicles with a gasoline engine. The introduction describes the individual emission components, their origin and impact on the environment and human organism. The main part of the thesis concentrates on possibilities of reducing emissions. The function and design solution of each component of the emission system is described. Furthermore, the specific solutions for several selected representatives from diverse vehicles categories are stated. These solutions are evaluated and custom configuration is designed given the selected parameters. In the conclusion are summarised the results of the thesis.

KEYWORDS

combustion engine, gasoline, emission, exhaust gas recirculation, catalyst, particulate filter

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HÁNA, Michal. *Emisní systémy osobních automobilů se zážehovým motorem* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132353>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Michael Böhm.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 13. května 2021

.....

Michal Hána

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat Ing. Michaelu Böhmovi za cenné rady a připomínky, které mi poskytnul při zpracování této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině a přátelům za jejich podporu při studiu.

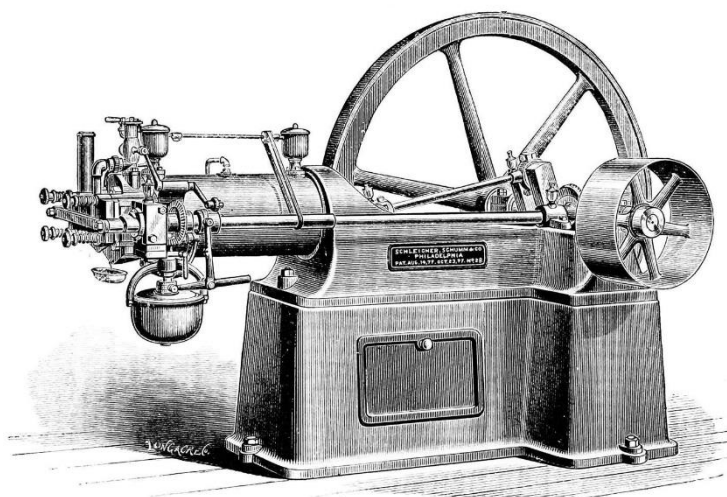
OBSAH

Úvod	9
1 Emise zážehových motorů	10
1.1 Spalování benzínu	10
1.2 Složení výfukových plynů	11
2 Emisní limity	14
3 Snižování emisí	15
3.1 Opatření před motorem	15
3.2 Opatření u motoru	16
3.2.1 Volba kompresního poměru	16
3.2.2 Předstih zážehu	17
3.2.3 Recirkulace výfukových plynů	18
3.3 Opatření za motorem	20
3.3.1 Třícestný katalyzátor	20
3.3.2 Sběrný katalyzátor	22
3.3.3 Filtr pevných částic	23
4 Současná konstrukční řešení emisních systémů	26
5 Zhodnocení poznatků	29
6 Vlastní konfigurace	30
Závěr	31
Seznam použitých zkratk a symbolů	35

ÚVOD

Spalovací motor je tepelný stroj, který spalováním paliva mění chemickou energii na tepelnou energii. Použitím vhodného plynného média poté převádí získanou tepelnou energii na mechanickou práci. U pístových motorů se pro převod z tepelné energie na mechanickou práci využívá potenciální energie plynného média (tlak spalin) [1].

Za historicky prvního výrobce spalovacího motoru je považován Francouz belgického původu Etienne Lenoir. Jeho spalovací motor byl poháněn svítiplynem a jednalo se o první motor, který bylo možné prakticky využívat. V roce 1863 se svým vozidlem vykonal první jízdu. Základ pro stavbu pozdějších spalovacích motorů položil až o pár let později německý vynálezce Nicolaus Otto. Jeho první motor byl představen v roce 1867. Jednalo se o jednoválcový motor, který je dodnes označován jako „Ottův motor“ a je znázorněn na obrázku 1. V roce 1876 vyrobil Otto první čtyřtákní motor se zvýšeným kompresním poměrem, který se stal základem pro stavbu pozdějších spalovacích motorů. Dalším krokem byla jeho inovace v roce 1884, kdy přešel ze zapalování směsí plamenem na elektrické zapalování. Tato inovace umožnila přechod ze spalování plynných paliv na spalování paliv kapalných [1].



Obrázek 1 "Ottův motor" [2]

V současné době je většina osobních automobilů poháněna právě spalovacími motory. Spaliny, které automobil za provozu produkuje, obsahují pouze malé množství škodlivých látek. U automobilu se zážehovým motorem je podíl škodlivin ve spalinách přibližně 2 % z celkového složení [3]. Ovšem s ohledem na rozšířenost osobních automobilů je potřeba si uvědomit, že i tak malý podíl škodlivin ve spalinách dlouhodobě znečišťuje ovzduší a je potřeba jej snižovat.

1 EMISE ZÁŽEHOVÝCH MOTORŮ

Uvnitř spalovacího motoru dochází při spalování paliva k chemickým reakcím, které produkují výfukové plyny. Některé chemické látky obsažené v těchto plynech mají negativní vliv na zdraví člověka a nazývají se emise. Množství a druh produkovaných emisí se liší v závislosti na typu spalovaného paliva [1].

1.1 SPALOVÁNÍ BENZÍNU

Nejvíce používané palivo pro pístové zážehové motory je benzín. Jedná se o kapalné uhlovodíkové palivo, které se získává frakční destilací z ropy. Na benzín jsou kladeny vysoké nároky [1]:

- dobré antidetonační vlastnosti,
- schopnost tvořit zápalnou směs se vzduchem i za nízkých teplot pro zajištění startu motoru i za nízkých teplot,
- nesmí obsahovat těžší frakční podíly (nad 210 °C), aby nedocházelo ke smívání olejového filmu na stěně válce a ředění oleje v motorové skříni,
- malý obsah síry,
- dlouhodobá stabilita zabezpečující nízké ztráty při skladování.

Spalování benzínu je slučování jeho spalitelných prvků s kyslíkem. U klasických pístových zážehových motorů je zdrojem kyslíku vzduch. Objemový podíl kyslíku ve vzduchu je pouhých 21 %. Zbylý objem je tvořen převážně dusíkem (78 %) a malým množstvím jiných plynných látek. Pro zvýšení účinnosti motoru bychom do spalovací komory mohli přivádět čistý kyslík, nebo plyn s vyšším objemovým podílem kyslíku (např. rajský plyn). Výhoda vzduchu spočívá v jeho dostupnosti. Není potřeba do automobilu zabudovat zásobník na jeho uchování a doplňování.

Pro spalovací proces je důležité správné množství vzduchu přivedeného do směsi. Teoretické množství vzduchu na dokonalé spálení 1 kg benzínu je 14,7 kg [4]. Skutečné množství přivedeného vzduchu vyjadřuje součinitel přebytku vzduchu λ , který je definován:

$$\lambda = \frac{\text{Množství přivedeného vzduchu}}{\text{Teoretické množství vzduchu}} \quad (1)$$

Součinitel přebytku vzduchu definuje tři typy směsi:

- $\lambda = 1$ – stechiometrická směs,
- $\lambda < 1$ – bohatá směs (nedostatek vzduchu ve směsi),
- $\lambda > 1$ – chudá směs (přebytek vzduchu ve směsi).

Tvorba směsi vzduchu s palivem se liší v závislosti na typu vstřikování. Nepřímé vstřikování tvoří směs v sacím potrubí před válcem. Přímé vstřikování vstřikuje palivo přímo do spalovací komory. Při spalování se směs paliva se vzduchem nejdříve zahřívá. Zahříváním dochází k odpařování kapiček rozprašeného paliva a vzniklé páry se mísí s kyslíkem. K zapálení směsi dochází zážehem jiskrou od elektrické svíčky [5]. V případě stechiometrické směsi a ideálních podmínek ve spalovacím prostoru se jedná o takzvané dokonalé spalování. V takovém případě dochází pouze k reakcím:



U reálného motoru se však podmínky vlivem transientního provozu mění a k dokonalému spalování téměř nedochází. Faktory, které negativně ovlivňují průběh spalování jsou například rozdílnost teplot ve spalovací komoře (teplota u stěn válce je nižší), nehomogenita směsi v celém objemu válce, nebo nedokonalý přísun kyslíku k palivu. Ve skutečnosti se tedy jedná o spalování nedokonalé, při kterém vznikají další produkty chemických reakcí [1].

ALTERNATIVNÍ PALIVA

Použitím různých paliv můžeme ovlivnit produkci škodlivých emisí. U zážehových spalovacích motorů se kromě benzínu mohou spalovat také alkoholy (etanol, metanol), vodík a plynná paliva (zemní plyn, bioplyn, propan-butan).

Alkoholy jako paliva mají velkou výhodu v jejich obnovitelnosti. Získávají se z rostlinných produktů a odpadů, nebo synteticky [5]. Při jejich spalování dochází ke změně produkce emisí oproti spalování benzínu. Snížení produkce nastává u emisí NO_x , CO a HC, naopak produkce CO_2 je vyšší [6].

Vodík je obnovitelný zdroj energie, který nenarušuje životní prostředí. Ve výfukových plynech se ze škodlivin vyskytuje pouze NO_x . Výhodou vodíku je možnost spalování velmi chudých směsí, což se projeví na snížení spotřeby paliva. Značná nevýhoda vodíku je vysoká cena výroby, nedostatečná infrastruktura a problémy s uskladněním [7].

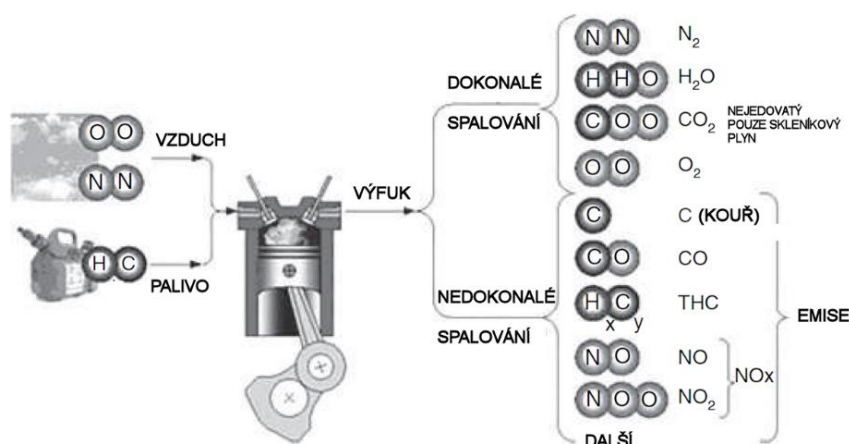
Použitím plyných paliv se dosahuje lepšího promísení směsi paliva se vzduchem a snadnější dodržení směšovacího poměru, což má pozitivní vliv na obsah škodlivin ve výfukových plynech. Značná nevýhoda plyných paliv je v jejich nesnadném skladování. Pro jejich použití je potřeba vysokotlaký zásobník, který vyžaduje velký zástavbový objem ve vozidle [5].

1.2 SLOŽENÍ VÝFUKOVÝCH PLYNŮ

U klasického spalovacího motoru jsou výfukové plyny tvořeny již zmíněnými produkty dokonalého spalování, oxidem uhličitým (CO_2) a vodní párou (H_2O). Ve výfukových plynech se také nachází dusík (N_2), který při dokonalém spalování neoxiduje. Tyto plyny neohrožují přímo lidské zdraví a jejich výskyt ve výfukových plynech je ukazatel kvalitního průběhu spalování [3].

Vlivem nedokonalého spalování probíhá chemických reakcí více. Dochází k reakci kyslíku s uhlíkem za vzniku oxidu uhelnatého (CO). Vlivem vysokých teplot reaguje kyslík s dusíkem.

Při této reakci vznikají oxid dusnatý (NO) a oxid dusičitý (NO₂). Ve výfukových plynech se dále mohou nacházet nespálené uhlovodíky a u zážehových motorů s přímým vstřikováním paliva i pevné částice. Další složkou výfukových plynů, v závislosti na kvalitě paliva, mohou být oxidy síry. Síra se ovšem v palivech pro zážehové motory vyskytuje v malém množství a podíl emisí oxidů síry je na celkovou produkci zanedbatelný [3]. Obrázek 2 znázorňuje složení výfukových plynů. Zleva do válce vstupuje směs paliva se vzduchem a na pravé straně z válce vystupují výfukové plyny rozděleny na produkty dokonalého a nedokonalého spalování.



Obrázek 2 Složení výfukových plynů [3]

OXID UHLIČITÝ

Oxid uhličitý (CO₂) je bezbarvý plyn bez chuti a zápachu, velmi stabilní a málo reaktivní. Jedná se o plyn, který není přímo zdraví škodlivý. Nebezpečí pro člověka tvoří tehdy, když je jeho koncentrace ve vdechovaném vzduchu natolik velká, že vytěsni všechen kyslík [1]. Oxid uhličitý je produkt dokonalého spalování a jeho vznik je popsán rovnicí 2.

Nicméně oxid uhličitý patří mezi tzv. skleníkové plyny, které mají vliv na globální oteplování planety. Zatímco u ostatních odvětví (energetika, průmysl, zemědělství) se od roku 1990 produkce CO₂ snižuje, v dopravě produkce roste. Největší podíl na produkci CO₂ v dopravě (60 %) mají osobní automobily. Proto Evropská unie zavedla limity u osobních automobilů na produkci CO₂. Limity jsou stanoveny na flotilu tak, že průměrné nové vozidlo v roce 2021 nesmí vyprodukovat více než 95 g CO₂ na kilometr. Cíle do roku 2030 jsou snížit tyto limity o dalších 30 % [8].

Snižování produkce CO₂ lze dosáhnout snížením spotřeby paliva, jelikož je produkci CO₂ přímo úměrná. Snižování spotřeby se provádí elektrifikací dopravy v podobně elektromobilů nebo hybridních automobilů [3].

OXID UHELNATÝ

Vznik oxidu uhelnatého (CO) při spalování je výrazně ovlivněn složením směsi. Při spalování chudé směsi je kyslíku dostatek a oxid uhelnatý nevzniká. Naopak při spalování bohaté směsi je kyslíku nedostatek a dochází k reakci [9]:



Oxid uhelnatý se do lidského organismu dostává vdechováním. Nebezpečí spočívá v tom, že se na krevní barvivo hemoglobin váže snadněji než kyslík a poté nedochází k dostatečnému okysličení organismu [1].

OXIDY DUSÍKU

Oxidy dusíku označované jako NO_x jsou dominantně oxid dusnatý (NO) a oxid dusičitý (NO_2). Ve výfukových plynech zážehových motorů má větší zastoupení oxid dusnatý. Oxid dusičitý se vyskytuje v zanedbatelném množství. Vznik NO popisuje Zeldvičova řetězová reakce:



Reakce dusíku s kyslíkem je podmíněna vysokou teplotou a dostatkem času. NO tedy vzniká před plamenem a také za plamenem ve spalinách. Jak se spaliny ochlazují, dochází k zamrznání reakcí [9].

Škodlivost oxidu dusnatého na lidský organismus je vcelku nízká. Při delším pobytu v atmosféře oxiduje na oxid dusičitý, jehož škodlivost je závažnější. Již při malých koncentracích na něj organismus reaguje jako na začínající hoření a přivírá přístup vzduchu do plic. Důsledkem je dušení a nucené kašláni. Oxidy dusíku se také podílejí na vzniku kyselých dešťů [1].

NESPÁLENÉ UHLOVODÍKY

Nespálené uhlovodíky HC jsou uhlovodíky z paliva, které při spalování oxidovaly jen částečně nebo vůbec. Při kompresi je část paliva vtlačena do prostoru mezi pístem, pístním kroužkem a stěnou válce. Do tohoto prostoru se při hoření směsi nedostane plamen a nespálené uhlovodíky se při výfukové fázi dostávají do výfukových plynů. Předčasně zastavená oxidace uhlovodíků je zapříčiněna nízkou teplotou, nejčastěji u stěn válce [9].

Nebezpečné pro člověka jsou převážně uhlovodíky, u kterých proběhla jen částečná oxidace. Za nejvíce nebezpečnou skupinu se považují polycyklické aromatické uhlovodíky (PAH). Do lidského organismu se dostávají vdechováním, navázané na povrch pevných částic. V těle poškozují dýchací cesty a mají karcinogenní účinky [1].

PEVNÉ ČÁSTICE

Pevné částice vznikají u zážehových motorů díky technologii přímého vstřikování paliva. Primární uhlík se tvoří spalováním kapek paliva v prostředí s vysokou teplotou a při extrémně nízkých lokálních hodnotách přebytku vzduchu. Emise pevných částic tedy souvisí zejména s kvalitou rozprášení paliva při vstřikování a množstvím přivedeného vzduchu [1].

Škodlivost pevných částic pro člověka záleží na jejich velikosti. Velké částice (5-10 μm) se zachytávají v horních cestách dýchacích. Menší částice (pod 0,1 μm) pronikají do plic a mohou se dostat do krevního řečiště. Krátkodobá expozice může vyvolat podráždění oka, jícnu, průdušek. Dlouhodobá expozice může vyvolat zánět a histopatologické změny v plicích. Největší nebezpečí spočívá v dopravě škodlivých látek, které se na nich zachytí, do organismu. Jednou z takových látek mohou být již zmíněné karcinogenní PAH [3].

2 EMISNÍ LIMITY

Pro uvedení nového automobilu do provozu je potřeba, aby splnil tzv. homologační testy. Jedná se o testy, které měří množství produkovaných škodlivin ve spalínách automobilu. Měří se množství oxidu uhelnatého (CO), oxidů dusíku (NO_x), nespálených uhlovodíků (HC) a pevných částic (PM). Maximální limity produkovaných emisí se liší v závislosti na druhu a hmotnosti automobilu. V Evropské unii jsou limity stanoveny Euro normou [1]. V tabulce 1 je znázorněn přehled norem a maximální produkce škodlivin udávaná v g/km.

Tabulka 1 Emisní normy pro automobily do 3,5 tuny se zážehovým motorem [3]

Norma	Platnost	CO	HC	HC + NO _x	NO _x	PM
Euro 1	1992	2,72	-	0,97	-	-
Euro 2	1996	2,2	-	0,5	-	-
Euro 3	2000	1,2	0,2	-	0,15	-
Euro 4	2005	1	0,1	-	0,08	-
Euro 5	2009	1	0,1	-	0,06	0,005
Euro 6	2014	1	0,1	-	0,06	0,005

Od roku 2014 platí pro homologaci vozidel v Evropské unii emisní norma Euro 6. Tato norma je rozdělena na více skupin (6b, 6c, 6d-Temp, 6d), z nichž nejnovější je Euro 6d, platná od roku 2020. Oproti starším normám se liší způsobem testování. Místo testování cyklem NEDC (New European Driving Cycle) se zavádí nový způsob WLTP (Worldwide harmonised Light-duty vehicle Test Procedure).

Testování podle WLTP se dělí na dvě části, WLTC (Worldwide harmonised Light-duty vehicle Test Cycles) a RDE (Real Driving Emissions). WLTC testování se provádí ve válcových zkušebnách stejně jako NEDC. Rozdíl spočívá v dynamičtějším profilu jízdy, který více odpovídá současným stylům [10].

RDE je test zaměřený na ověření produkce emisí v reálném provozu. Během testu jede automobil po silnici v různých podmínkách. Ty zahrnují například různé nadmořské výšky, teploty, jízdu do kopce a z kopce. Zkušební automobil je vybaven přenosným měřicím systémem PEMS, který měří produkci emisí v reálném čase [10].

WLTP se zavedlo za účelem přiblížení testování každodennímu používání automobilu. Naměřené hodnoty spotřeby paliva, produkce emisí a produkce CO₂ se poté více blíží reálným hodnotám [10].

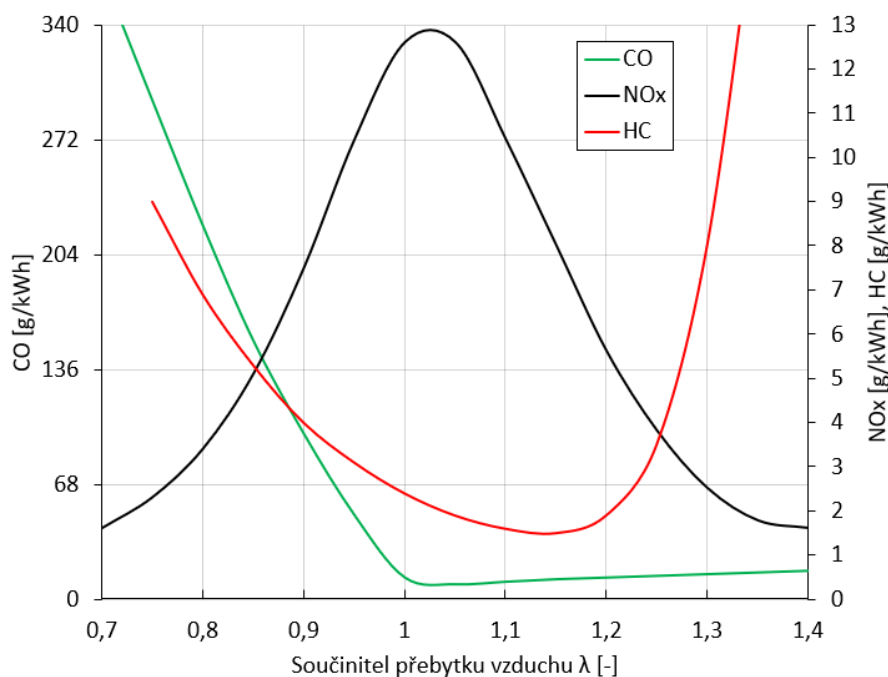
3 SNIŽOVÁNÍ EMISÍ

Opatření pro snižování emisí u spalovacích motorů lze rozdělit do tří základních skupin [3]:

- opatření před motorem,
- opatření u motoru,
- opatření za motorem.

3.1 OPATŘENÍ PŘED MOTOREM

Volbou směšovacího poměru můžeme ovlivnit produkci škodlivin. Nemůžeme ovšem snížit produkci všech škodlivin současně. Spalováním chudé směsi zamezíme vzniku CO. Při příliš velkém ochuzení dochází k vynechávání zápalů a vzniku HC. Produkce HC se zvyšuje také v oblasti bohaté směsi, kde není dostatek kyslíku na oxidaci uhlovodíků obsažených v palivu. Maximální produkce emisí NO_x nastává v oblasti $\lambda = 1,05-1,1$. V tomto rozmezí jsou splněny podmínky vysoké teploty a dostatku kyslíku, nutné k průběhu reakcí 5-7, popsanych v kapitole 1.2 [1]. Produkce emisí v závislosti na λ je znázorněna v obrázku 3.



Obrázek 3 Závislost produkce emisí na λ [3]

3.2 OPATŘENÍ U MOTORU

Ovlivněním průběhu spalování neboli opatřeními u motoru ovlivňujeme převážně produkci emisí HC a NO_x. Mezi opatření u motoru patří volba kompresního poměru, volba předstihu zážehu a recirkulace výfukových plynů [1].

3.2.1 VOLBA KOMPRESNÍHO POMĚRU

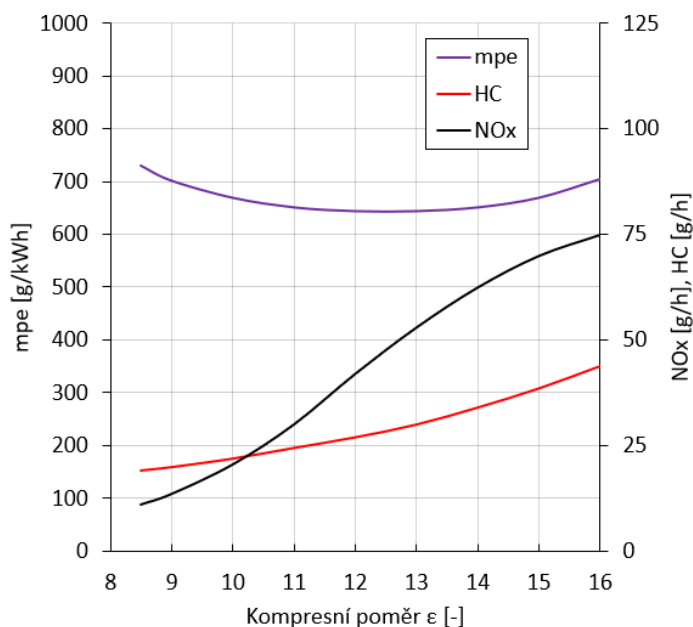
Kompresní poměr ε je jedním ze základních parametrů spalovacího motoru z pohledu geometrie. Jedná se o poměr maximálního (píst v dolní úvrati) a minimálního (píst v horní úvrati) objemu válce [9]:

$$\varepsilon = \frac{\text{Maximální objem válce}}{\text{Minimální objem válce}} = \frac{V_d + V_c}{V_c}, \quad (8)$$

kde V_d je zdvihový objem válce a V_c je škodný objem válce.

Zvětšováním kompresního poměru dochází ke zvyšování maximální teploty a tlaku ve válci, a tudíž ke zvyšování termické účinnosti motoru. Limitující faktor omezující maximální velikost kompresního poměru u zážehových motorů je detonační hoření. Jedná se o nežádoucí jev samovznícení směsi paliva se vzduchem dříve, než dojde k zažehnutí od svíčky. Odolnost paliva vůči detonačnímu hoření je charakterizována oktanovým číslem (vyšší oktanové číslo znamená větší odolnost vůči detonačnímu hoření). Běžné zážehové motory pracují s kompresním poměrem 8-12 [11].

Zvětšováním kompresního poměru také dochází ke zvětšování ploch stěn válce, na kterých vznikají emise HC, a tudíž se zvyšuje jejich produkce. Zmenšováním kompresního se snižuje maximální teplota ve válci, což vede k menší produkci škodlivin NO_x. Nevýhodou menšího kompresního poměru je zvýšení měrné spotřeby paliva a navýšení měrných emisí [1]. Závislost měrné spotřeby (m_{pe}), produkce emisí NO_x a HC je znázorněna v obrázku 4.

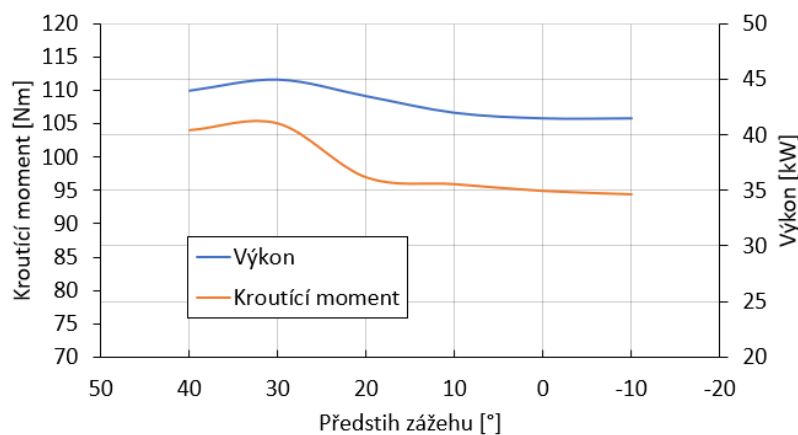


Obrázek 4 Závislost m_{pe} , NO_x a HC na velikosti kompresního poměru [3]

3.2.2 PŘEDSTIH ZÁŽEHU

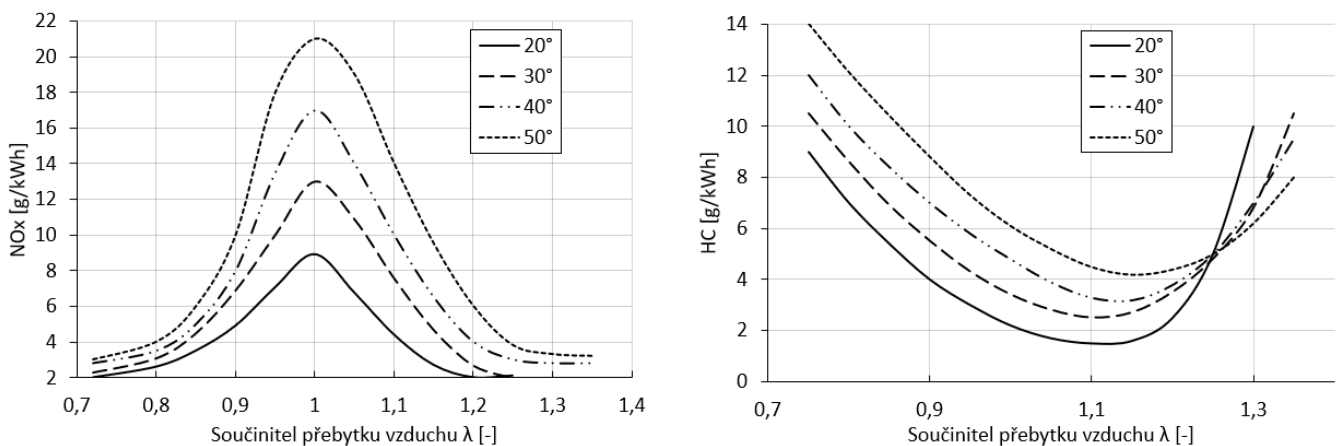
Po zažehnutí směsi ve válci elektrickou jiskrou od svíčky dochází k jejímu hoření. Plamen se ve směsi šíří určitou rychlostí, a tudíž největší podíl spalování nenastává v okamžiku zážehu, ale se zpožděním. Proto je potřeba zážeh správně načasovat. Předstih zážehu se udává ve stupních a jedná se o natočení klikové hřídele vůči horní úvrati. Pokud je hodnota úhlu předstihu zážehu kladná, k zažehnutí dochází před dosažením horní úvrati.

S ohledem na výkon motoru je potřeba zvolit optimální předstih zážehu tak, aby největší podíl spalování proběhl právě v horní úvrati. Pokud je předstih příliš velký, vznik největšího tlaku nastane již ve fázi komprese, před horní úvrati, a bude působit proti pohybu pístu. Naopak příliš malý předstih zážehu má za následek nižší nárůst tlaku, protože se píst pohybuje již směrem dolů, a nevyužije se maximální potenciál spalování. Závislost výkonu motoru a kroutícího momentu na předstihu zážehu je znázorněna v obrázku 5 [12].



Obrázek 5 Závislost výkonu motoru a kroutícího momentu na předstihu zážehu [12]

S větším předstihem zážehu se zvyšují maximální hodnoty teploty a tlaku při spalování. To sice zvyšuje termickou účinnost motoru a snižuje měrnou spotřebu paliva, ale také zvyšuje produkci škodlivých emisí HC a NO_x . Vysoký tlak ve spalovací komoře natlačí více směsi do prostoru mezi pístem, pístním kroužkem a stěnou válce, což má za následek větší produkci emisí HC. Vysoká teplota spalování, jak již bylo zmíněno v této práci, vytváří vhodné podmínky pro vznik emisí NO_x [12]. Produkce emisí HC a NO_x v závislosti na předstihu zážehu je znázorněna v obrázku 6.

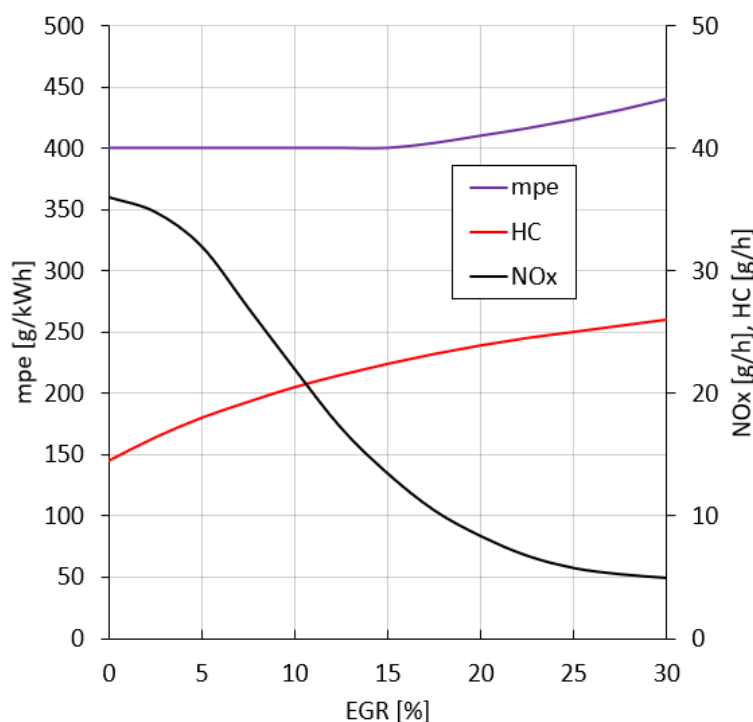


Obrázek 6 Vliv předstihu zážehu na emise. Vlevo NO_x , vpravo HC [13]

Při volbě předstihu zážehu je tedy nutné zohlednit více faktorů. Je potřeba volit kompromis mezi výkonem motoru, jeho spotřebou a produkcí škodlivých emisí. Velikost předstihu zážehu ovšem není konstantní a mění se v závislosti na chodu motoru. S rostoucími otáčkami a zatížením motoru je potřeba předstih zvětšovat. Větší zatížení motoru totiž vyžaduje větší množství spalované směsi, které potřebuje více času na prohoření.

3.2.3 RECIRKULACE VÝFUKOVÝCH PLYNŮ

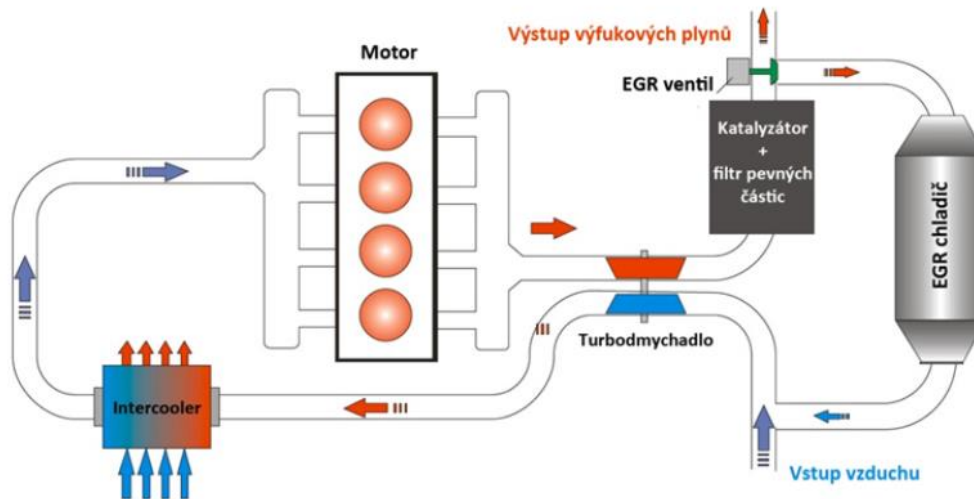
Recirkulace výfukových plynů se označuje EGR (Exhaust Gas Recirculation). Hlavní princip spočívá ve vracení části výfukových plynů zpět do spalovací komory. Výfukové plyny se ve směsi chovají jako inertní plyn, takže se neúčastní spalování, ale přebírají část vzniklého tepla a snižují maximální teplotu spalování. Následek nižší teploty spalování je snížení produkce emisí NO_x . V závislosti na množství recirkulovaných plynů lze snížit jejich produkci až o 60 %. Množství recirkulovaných plynů se udává v EGR %. Nejvýraznější pokles produkce NO_x nastává do 15 EGR % [4]. Se zvětšující se množstvím recirkulovaných plynů ovšem roste produkce emisí HC a roste i měrná spotřeba paliva. Se zvýšením spotřeby se nemusí počítat do 10-15 EGR % [1]. Závislost měrné spotřeby paliva a produkce emisí na EGR % je znázorněna v obrázku 7.



Obrázek 7 Závislost m_{pe} , HC a NO_x na podílu recirkulace [3]

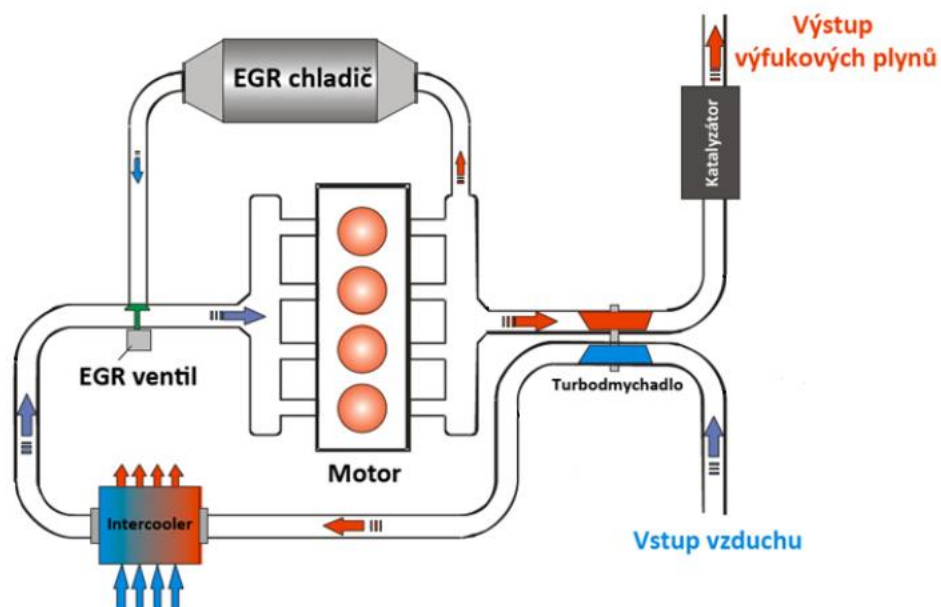
Recirkulaci dělíme na vnitřní a vnější. Vnitřní recirkulace je realizována překrytím sacího a výfukového ventilu. Ve fázi výfuku, při pohybu pístu do horní úvratí, je sací ventil již otevřený a část spalín se tak dostane do sacího potrubí. Ve fázi sání, při pohybu pístu do dolní úvratí, zůstane výfukový ventil částečně otevřený a část spalín se z výfukového potrubí dostane zpět do spalovací komory. Jedná se o spolehlivý systém, který se používá spíše u zážehových motorů [1].

Vnější recirkulaci je možno použít pro zvětšení podílu recirkulace. Dělí se na nízkotlakou a vysokotlakou recirkulaci. V obou případech jsou výfukové plyny vedeny přes elektricky ovládaný EGR ventil, který reguluje množství recirkulace. U nízkotlaké recirkulace jsou spaliny brány za katalyzátorem a přes EGR ventil jsou vedeny před kompresor turbodmyhadla. Zde se mísí se vzduchem a následně se směs v kompresoru turbodmyhadla stlačí [14]. Schéma nízkotlaké recirkulace je znázorněno v obrázku 8.



Obrázek 8 Schéma nízkotlakého systému EGR [15]

Vysokotlaká recirkulace odebírá výfukové plyny před turbínou turbodmyhadla a přes EGR ventil je vede přímo do sacího potrubí, kde se mísí s již stlačeným vzduchem [14]. Schéma vysokotlaké recirkulace je znázorněno v obrázku 9.



Obrázek 9 Schéma vysokotlakého systému EGR [15]

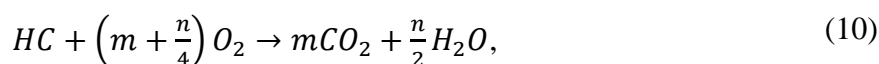
Pro zvýšení účinnosti recirkulace se spaliny vedou přes EGR chladič. Ochlazením spalin se zmenší jejich objem [14]. Vnější recirkulace výfukových plynů se používá převážně u vznětových motorů.

3.3 OPATŘENÍ ZA MOTOREM

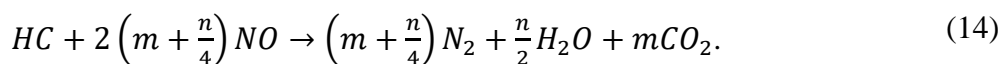
Opatřeními za motorem jsou prvky výfukového systému, které dodatečně odstraňují zdraví škodlivé emise z výfukových plynů. V současné době se používají výhradně katalyzátory. U moderních automobilů se zážehovým motorem se vyskytuje také filtr pevných částic.

3.3.1 TŘÍCESTNÝ KATALYZÁTOR

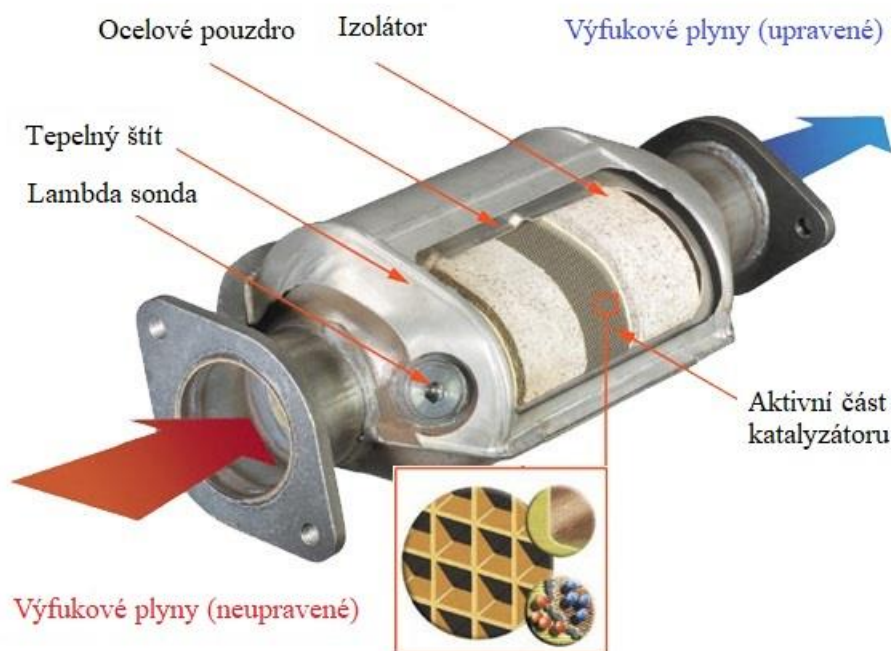
Z chemického hlediska je katalyzátor látka, která způsobuje nebo urychluje chemickou reakci, aniž by se při tom sama měnila. U automobilů se slovem katalyzátor označuje katalytický konvertor, který se používá ve výfukovém systému, aby způsoboval nebo urychloval přeměnu škodlivých emisí ve výfukových plynech na neškodné látky. K této přeměně dochází chemickými reakcemi oxidačními a redukčními [1]. Oxidace probíhá podle rovnic:



Redukce probíhá podle rovnic:



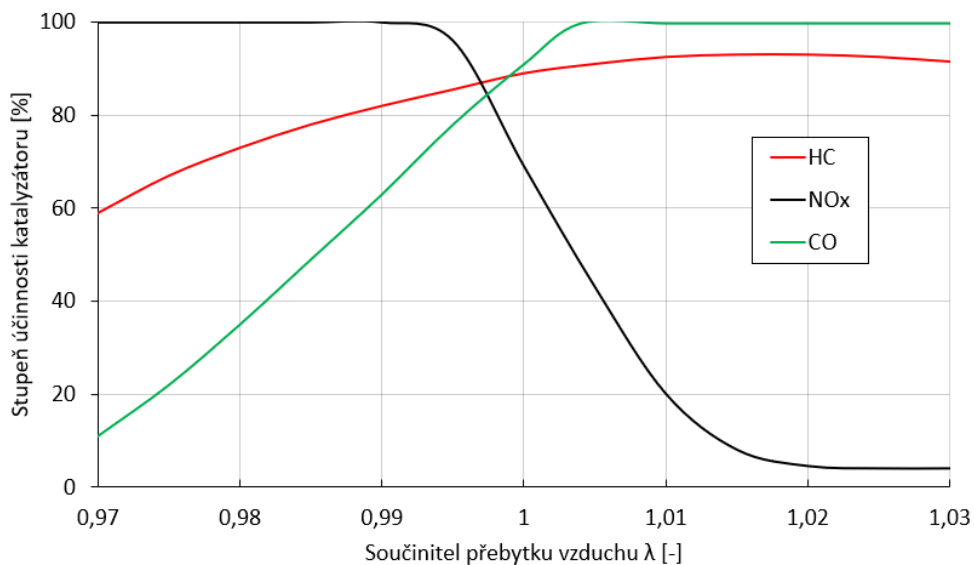
U automobilů se zážehovým motorem se používá třícestný katalyzátor (TWC – Three Way Catalyst), označován také jako oxidačně redukční katalyzátor. Jedná se o katalyzátor, který snižuje všechny tři hlavní škodlivé složky výfukových plynů (NO_x , CO a HC). Dále existují katalyzátory oxidační (používaný u vznětových motorů) a redukční. Třícestný katalyzátor se skládá z plechového krytu a keramického nebo kovového těla. Keramické tělo katalyzátoru má podobu monolitu a obsahuje velké množství drobných kanálek ve směru proudění výfukových plynů. Jelikož je keramické tělo křehké, je uloženo v ocelovém pleťivu, které ho chrání před napětím způsobeným jeho tepelnou roztažností a před vnějšími nárazy, které by ho mohly poškodit. Kovové tělo katalyzátoru je tvořeno střídavě rovnými a vlnitými vrstvami tenké fólie, které jsou k sobě pájeny. Díky střídavému vrstvení fólií vznikají drobné kanálky ve směru proudění výfukových plynů, stejně jako u těla keramického. Fólie jsou uspořádány do spirály nebo do S tvaru. Výhodou takového uspořádání je menší vnitřní pnutí při vysokých teplotách. Katalyzátor s kovovým tělem má oproti keramickému tělu vyšší tepelnou i mechanickou odolnost a klade menší odpor proudění spalin. Na povrchu kanálek u keramického i kovového těla je pórovitá vrstva oxidu hlinitého (Al_2O_3), která výrazně zvětšuje aktivní povrch katalyzátoru. Na vrstvě oxidu hlinitého je nanášena vrstva látek urychlujících chemické reakce v katalyzátoru, platiny a rhodia. Platina urychluje oxidační reakce a rhodium urychluje redukční reakce [4]. Obrázek 10 zobrazuje schéma třícestného katalyzátoru s keramickým tělem.



Obrázek 10 Schéma třicestného katalyzátoru [16]

Pro správnou funkci třicestného katalyzátoru je důležitá teplota výfukových plynů a bohatost spalované směsi paliva se vzduchem. Vhodná provozní teplota se nachází v rozmezí 400 °C až 800 °C. Příliš vysoká teplota (800 °C až 1000 °C) způsobuje spékání vzácných kovů, a tudíž zvyšuje termické stárnutí. Při příliš nízkých provozních teplotách (pod 300 °C) účinnost katalyzátoru výrazně klesá [4]. Účinnost katalyzátoru je tedy výrazně zhoršena při studeném startu motoru, dokud nedojde k jeho dostatečnému zahřátí. Zrychlení zahřátí spalin na dostatečnou teplotu při studeném startu můžeme docílit dvěma způsoby: zvýšením účinnosti spalování a zvýšením účinnosti katalyzátoru. Pro zvýšení účinnosti spalování je možné zahřát olej nebo chladicí kapalinu cizím zdrojem před nastartováním motoru, a tudíž zvýšit teplotu ve válci. Další možností je ohřívání nasávaného vzduchu či vstříkovaného paliva. Pro zvýšení účinnosti katalyzátoru je možné upravit pracovní podmínky motoru (opoždění zážehu, obohacení směsi, změna časování ventilů sání a výfuku), nebo optimalizovat rozložení komponent emisního systému. Katalyzátor je možné umístit blíže k motoru a zkrátit tak dobu zahřívání, ovšem teplota při provozu může často přesahovat bezpečnou provozní teplotu a zkracovat tak životnost katalyzátoru. Před hlavní katalyzátorem je možné umístit blíže k motoru menší předsazený katalyzátor, který se rychleji zahřeje na provozní teplotu. Katalyzátor je možné umístit také dále od motoru a než dosáhne provozní teploty, je zahříván cizím zdrojem [17].

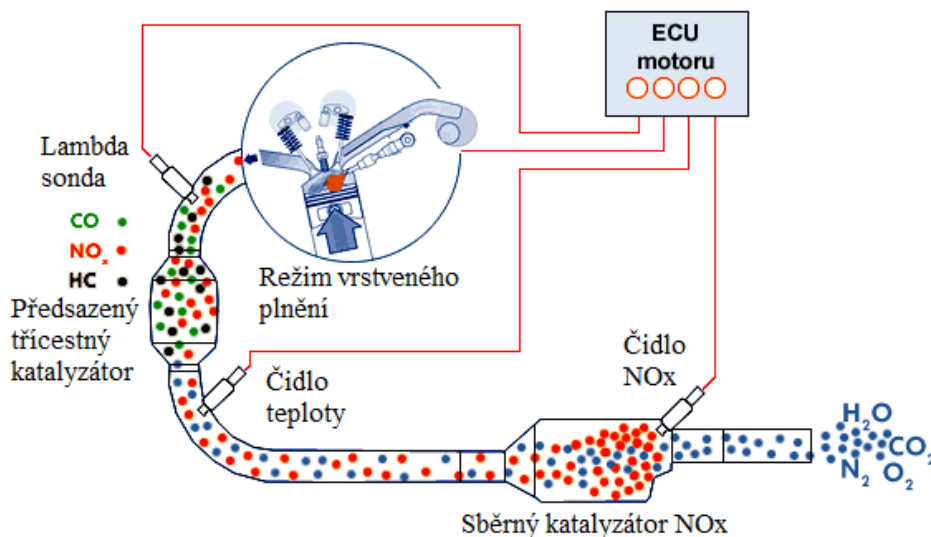
Aby mohly proběhnout všechny reakce z rovnic 9-14, musí výfukové plyny obsahovat dostatek kyslíku. Je tedy potřeba spalovat stechiometrickou směs ($\lambda = 1$). Složení směsi kontroluje lambda sonda, která vyhodnocuje, jestli je ve výfukových plynech kyslíku nadbytek nebo nedostatek. Řídící jednotka poté na základě informace od lambda sondy vyhodnotí, zda je potřeba vstříkovat více paliva (nadbytek vzduchu), či méně paliva (nedostatek vzduchu). Jedna lambda sonda je umístěna před katalyzátorem, druhá lambda sonda může být umístěna za katalyzátorem, kde kontroluje jeho účinnosti. Účinnost katalyzátoru dosahuje až 98 % [4]. Účinnost katalyzátoru v závislosti na součiniteli lambda je zobrazena v obrázku 11.



Obrázek 11 Účinnost třicestného katalyzátoru na součiniteli lambda [3]

3.3.2 SBĚRNÝ KATALYZÁTOR

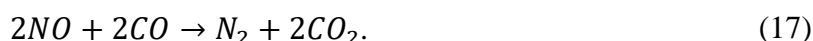
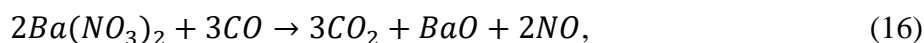
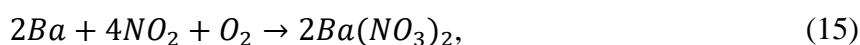
Sběrný (zásobníkový) katalyzátor je potřeba použít u zážehových motorů s přímým vstřikováním paliva. U přímého vstřikování paliva dochází ke spalování vrstvené směsi a celkový směšovací poměr je tedy větší než jedna ($\lambda > 1$). Spalováním chudé směsi klesá účinnost třicestného katalyzátoru (obr. 11) a ve výfukových plynech se vyskytuje větší množství škodlivých emisí NO_x. Z tohoto důvodu je za předsazený třicestný katalyzátor umístěn sběrný katalyzátor, který jejich množství snižuje [1]. Umístění sběrného katalyzátoru je zobrazeno na obrázku 12.



Obrázek 12 Katalytický systém motoru s přímým vstřikováním paliva upravený pro periodickou likvidaci NO_x [3]

Sběrný katalyzátor při provozu zachytává oxidy dusíku pomocí oxidů baria. Oxidy dusíku poté zůstávají zachyceny ve sběrném katalyzátoru ve formě bariumnitrátů, dokud nedojde k jeho regeneraci. Jelikož má katalyzátor omezenou kapacitu, je potřeba jej každých 30-60 sekund

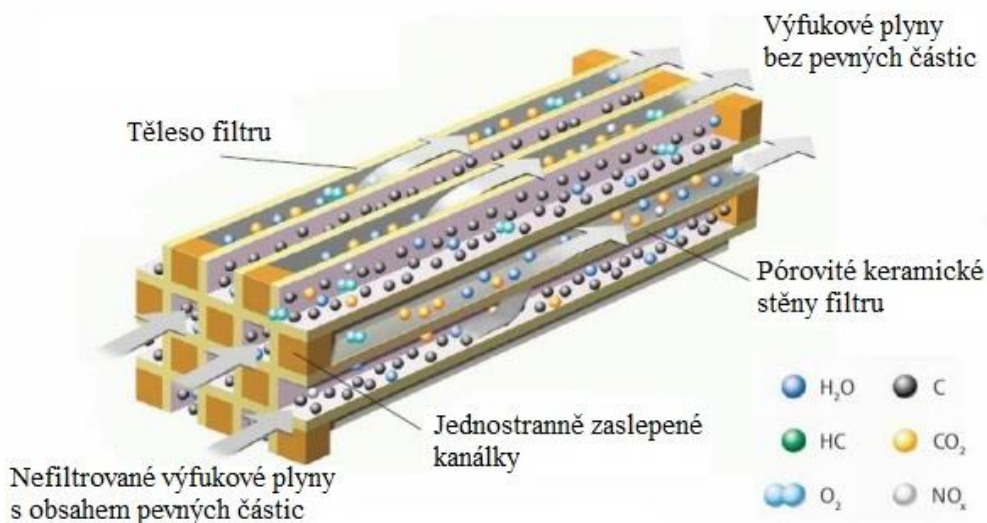
regenerovat. Proces regenerace, trvá 1-2 sekundy, kdy řídicí jednotka přepne z režimu s vrstvenou směsí ($\lambda > 1$) do režimu s bohatou směsí ($\lambda = 0,8$). V tomto režimu naroste množství oxidu uhelnatého ve výfukových plynech a dochází k rozpadu bariumnitrátů podle rovnic [1]:



3.3.3 FILTR PEVNÝCH ČÁSTIC

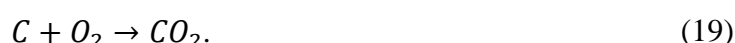
U zážehových motorů s přímým vstřikováním paliva je také potřeba použít filtr pevných částic (GPF – Gasoline Particulate Filter). Filtry pevných částic jsou sice novinkou u zážehových motorů, ale jejich použití je běžné u vznětových motorů (DPF – Diesel Particulate Filter). Princip funkce je u obou typů filtru stejný, liší se pouze jejich konstrukce z důvodu odlišných provozních podmínek zážehových a vznětových motorů. Zážehové motory oproti vznětovým pracují s vyšší teplotou spalin. Zážehové motory také produkují menší množství ($1-10 \cdot 10^{12}$ na km oproti $1-10 \cdot 10^{13}$ na km) a menší hmotnost ($1-3$ mg/km oproti 10 mg/km) pevných částic oproti vznětovým motorům, díky čemu lze docílit menších zástavbových rozměrů filtru [18].

Filtr se skládá z kanálek, které jsou střídavě na jedné straně uzavřeny. Spaliny vcházejí skrz kanálky, které jsou otevřeny na vstupu, a jsou nuceny proudit přes porézní keramické stěny do vedlejších kanálek, které jsou otevřeny na výstupu. Při přechodu spalin přes keramickou stěnu se na ní pevné částice mechanicky zachytávají. Proudění spalin skrz filtr pevných částic je znázorněno na obrázku 13. Účinnost filtrace není maximální u nového filtru, ale s ujetými kilometry se zvětšuje. Nahromaděné saze a popel na stěnách filtru poskytují další filtrační vrstvu, která zlepšuje účinnost filtrace. S touto zvětšující se vrstvou se ovšem zvětšuje i tlakový spád ve filtru, který působí odpor proti proudění výfukových plynů. Pokud je tlakový spád příliš velký, je potřeba filtr zregenerovat a zbavit se tak usazených sazí a popela. Tlakový spád je hlídán pomocí dvou senzorů tlaku před a za filtrem. Po regeneraci se účinnost filtru opět zmenší, nicméně pro většinu životnosti je účinnost filtrace nad 90 % [18].



Obrázek 13 Proudění spalin skrz filtr pevných částic [19]

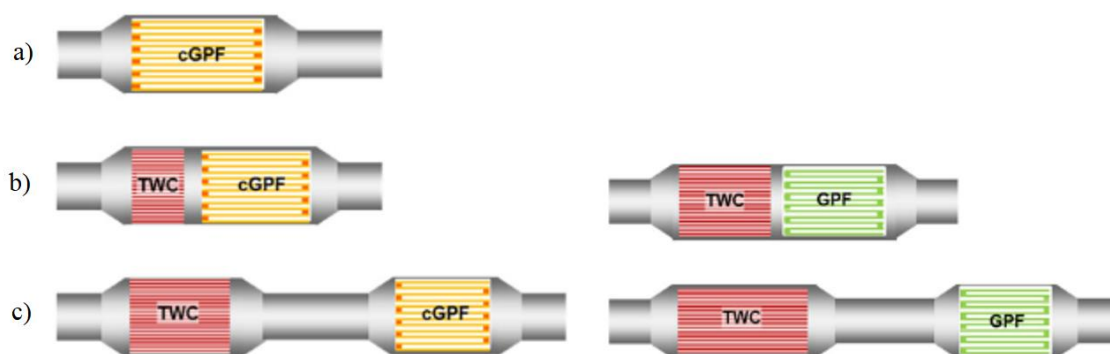
Regeneraci filtru lze rozdělit na dva typy, pasivní a nucenou. Princip regenerace spočívá v oxidaci sazí usazených na stěnách filtru. Při pasivní regeneraci je potřeba dostatek kyslíku a zároveň dostatečně vysoká teplota výfukových plynů (alespoň 400 °C). Zážehové motory pracují s dostatečně vysokou teplotou výfukových plynů pro oxidaci sazí. Filtry u vznětových motorů využívají pro regeneraci kyslík přítomný v NO₂. U zážehových motorů, díky předsazenému třicestnému katalyzátoru, není ovšem NO₂ pro regeneraci dostatek. Zážehové motory sice pracují se stechiometrickou směsí ($\lambda = 1$), ale při určitých provozních stavech dochází ke spalování chudé směsi. Ke spalování chudé směsi dochází například při jízdě bez plynu, a tudíž je ve spalinách přebytek kyslíku, který je potřebný k regeneraci. Oxidace sazí poté probíhá převážně podle dvou rovnic:



Pokud je ve výfukovém systému použit třicestný katalyzátor, primárně chemická reakce probíhá podle rovnice 19 [18]. Pokud ovšem při jízdě autem dlouho nenastanou vhodné podmínky pro pasivní regeneraci (např. krátké trasy se studeným motorem) a filtr je příliš zanesený, nastane regenerace nucená. V takovém případě řídicí jednotka zvýší teplotu spalin opožděním zážehu od svíčky a motor začne spalovat chudou směs s přebytkem vzduchu. Limitní hodnota hmotnosti pevných částic pro nucenou regeneraci je 8 g/l, přičemž běžné zanesení je přibližně 1 g/l [20].

U zážehových motorů dochází k prudkým teplotním změnám, a proto je pro filtr pevných částic potřeba zvolit vhodný materiál. Nejvíce používaný materiál je kordierit, který má nízký koeficientem tepelné roztažnosti a dobrou odolnost vůči tepelným šokům. Další materiály, používané především u vznětových motorů, jsou karbid křemíku (SiC) a hliník titan (AT) [18]. Některé filtry pevných částic také obsahují katalytickou vrstvu a zastávají tak i funkci třicestného katalyzátoru. Takový filtr se označuje cGPF (catalyzed Gasoline Particulate Filter), nebo také čtyřcestný katalyzátor [21].

Umístění filtru pevných částic do výfukového systému lze provést dvěma způsoby. Jeden způsob s označením CC (close-coupled) a druhý s označením UF (underfloor). U CC uspořádání je filtr pevných částic umístěn hned za třicestný katalyzátor, zatímco u UF uspořádání jsou filtr a katalyzátor odděleny. Oba způsoby jsou znázorněny na obrázku 14. Z pohledu účinnosti filtrace je výhodnější UF uspořádání, při kterém ve filtru proudí spaliny nižší rychlostí a o nižší teplotě než u CC uspořádání, a tudíž dochází k většímu usazování sazí na stěnách filtru. Nevýhodou nižší teploty u UF uspořádání je negativní vliv na regeneraci filtru. Další výhodou nižší teploty u UF uspořádání je nižší tlakový spád ve filtru. CC uspořádání filtru s TWC je možné nahradit pouze filtrem cGPF s katalytickou vrstvou [18].



Obrázek 14 Možnosti uspořádání filtru pevných částic a třicestného katalyzátoru
a) cGPF b) CC c) UF [18]

4 SOUČASNÁ KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ EMISNÍCH SYSTÉMŮ

V této kapitole je uvedeno několik příkladů konkrétních konstrukčních řešení emisních systémů. Zástupci v této kapitole byly zvoleni tak, aby bylo pokryto více typů vozidel. První automobil je Audi Q3. Jedná se o rodinné SUV, které je na silnicích běžně k vidění. Jako další příklad je uvedeno Porsche 911 GT3, které zde zastupuje sportovní typy vozidel. Posledním zástupcem je pick-up větších rozměrů Ford F-150 Raptor.

AUDI Q3

Většina zážehových motorů u osobních automobilů značky Audi používá technologii TFSI. Jedná se o technologii přímého vstřikování benzínu u přeplňovaného motoru. Právě kvůli této technologii jsou všechny automobily se zážehovým motorem od roku 2018 vybaveny filtrem pevných částic a splňují tak normu Euro 6d TEMP [22]. Příkladem takového automobilu je model Audi Q3 s motorem 1.5 TFSI. Spotřeba automobilu s tímto motorem je 6,0 l/100 km a produkce emisí CO₂ je 139 g/km [23]. Na obrázku 15 můžeme vidět, že tento typ motoru používá k dodatečné redukci škodlivin filtr pevných částic s katalytickou vrstvou (cGPF) umístěný těsně za turbodmychadlo a opatřený dvěma lambda sondami. Dále od motoru je ještě umístěn třicestný katalyzátor [24].

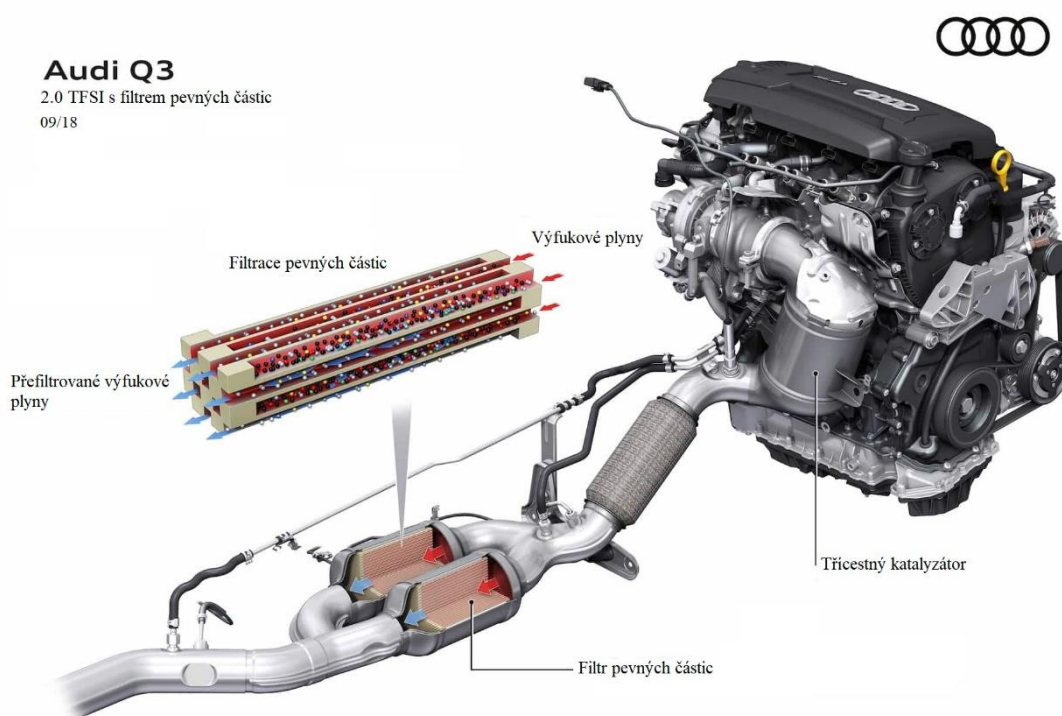
Audi Q3

1.5 TFSI s filtrem pevných částic
09/18



Obrázek 15 Motor 1.5 TFSI automobilu Audi Q3 [24]

Stejný model Audi Q3 lze zakoupit i s motorem 2.0 TFSI. S touto pohonnou jednotkou dosahuje automobil spotřeby paliva 7,2 l/100 km a produkce emisí CO₂ 164 g/km [23]. Uspořádání výfukového systému je s tímto motorem řešeno odlišně, než s motorem 1.5 TFSI. Na obrázku 16 můžeme vidět třicestný katalyzátor umístěný těsně za turbodmychadlo, vybavený pouze jednou lambda sondou. Filtry pevných částic jsou dva a umístěny vedle sebe dále od motoru [24].



Obrázek 16 Motor 2.0 TFSI automobilu Audi Q3 [24]

PORSCHE 911 GT3

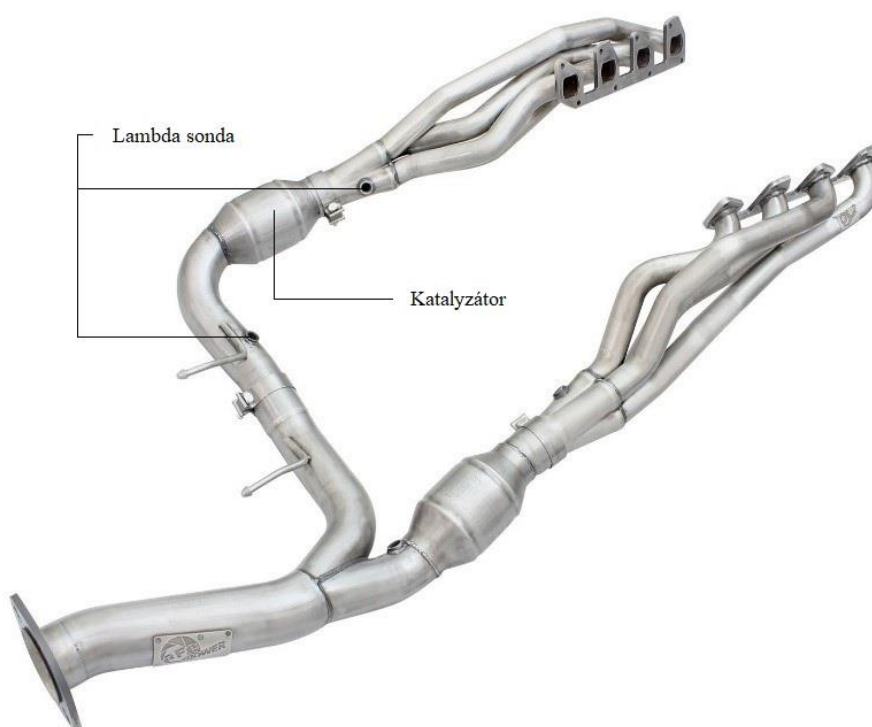
Porsche 911 GT3 je sportovní automobil, který je vybaven atmosféricky plněným plochým zážehovým šestiválcem o objemu 4,0 litru. Motor s technologií přímého vstřikování paliva dosahuje výkonu 375 kW a krouticího momentu 470 Nm. Výkonového maxima motor dosahuje při 8400 min⁻¹. Kombinovaná spotřeba automobilu je 12,4-13,3 l/100 km a produkce emisí CO₂ je 283-304 g/km [25]. Obrázek 17 zobrazuje výfukový systém pro tento automobil. Spaliny jsou rozděleny do dvou větví. Každá větev ošetřuje spaliny ze tří válců a je vybavena jedním katalyzátorem se dvěma lambda sondami.



Obrázek 17 Výfukový systém automobilu Porsche 911 GT3 [26]

FORD F-150 RAPTOR

Ford F-150 Raptor je americký pick-up vybavený zážehovým motorem 5.0L Ti-VCT V8. Motor disponuje technologiemi PFDI a VDE. PFDI je technologie vstřikování, kdy každý válec je vybaven dvěma vstřikovači. Jeden vstřikující palivo přímo do válce a druhý vstřikující palivo do sání před sací ventil. Technologie VDE umožňuje vypínání poloviny válců v jízdních režimech, které nevyžadují maximální výkon. Motor pracuje s kompresním poměrem 12:1 a dosahuje výkonu až 298 kW [27]. Spotřeba paliva a produkce emisí CO₂ jsou 13,8 l/100 km a 321 g/km [28]. Emisní systém automobilu je rozdělen na dvě části, kdy každá část ošetřuje spaliny z poloviny válců. Na obrázku 18 je patrné, že na čtyři válce připadá v obou případech jeden katalyzátor vybavený dvěma lambda sondami.



Obrázek 18 Výfukový systém automobilu Ford F-150 Raptor [29]

5 ZHODNOCENÍ POZNATKŮ

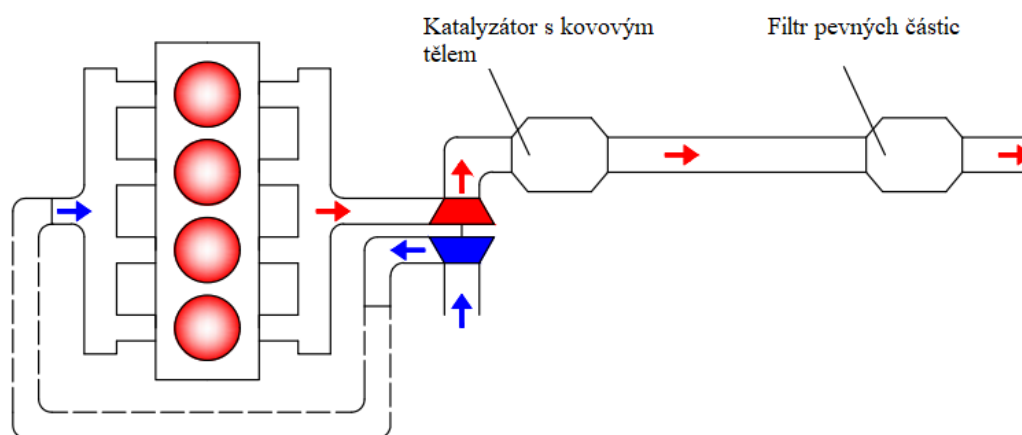
Použití technologie recirkulace spalin má značný vliv na produkci emisí NO_x . Ovšem aplikace této technologie u automobilů je spojena pouze s plněním emisních norem, nikoli se zlepšením výkonnostních parametrů. Z hlediska účinnosti motoru je nejvýhodnější do motoru přivádět co největší objem kyslíku, přičemž část objemu je již zaplněna právě recirkulovanými spalinami.

Třícestný katalyzátor je jediná komponenta emisního systému, díky které jsou snižovány všechny tři hlavní složky emisí zároveň. Tento fakt z něj činí nepostradatelnou součást emisního systému každého zážehového motoru. Účinnost katalyzátoru sice s dnes již rozšířenou technologií přímého vstřikování klesá v oblasti redukce škodlivin NO_x , nicméně tento problém lze snadno vyřešit přidáním dalšího katalyzátoru do systému. Stále nevyřešenou problematikou jsou studené starty motoru. Ty jsou spojené s nefunkčností katalyzátoru, dokud nedojde k jeho zahřátí na provozní teplotu. Proto je při umístění katalyzátoru do systému potřeba volit kompromis mezi zkracováním doby nefunkčnosti katalyzátoru (umístění blíže k motoru) a prodlužováním jeho životnosti (umístění dále od motoru).

Filtr pevných částic je sice u zážehových motorů novou technologií, nicméně u vznětových motorů je běžně používán. Právě u vznětových motorů je filtr často spojován s jeho poruchovostí. U zážehových motorů tomu tak není, právě díky odlišným provozním podmínkám, které jsou shrnuty v kapitole 3.3.3. Hlavní výhodou zážehových motorů je vyšší teplota spalin. Ta má pozitivní vliv na regeneraci filtru, ke které u zážehových motorů dochází především pasivní regenerací. K pasivní regeneraci dochází při normálním chodu motoru, takže není potřeba při regeneraci měnit jeho provozní podmínky. Výjimkou je častý provoz motoru na krátké vzdálenosti. Při takovém provozu se motor dostatečně nezahřeje a dochází tak k zanášení filtru. V takovém případě je potřeba regenerovat nucenou regenerací. Nevýhodou použití filtru pevných částic je přidání další komponenty do výfukového systému automobilu. S větším počtem komponent v systému roste odpor omezující proudění spalin. Tento odpor má negativní vliv na výkon motoru a spotřebu paliva. Z tohoto hlediska se mi jeví výhodné použití cGPF, který zastoupí funkci filtru i katalyzátoru současně. Ve výfukovém systému je poté místo dvou komponent použita pouze jedna.

6 VLASTNÍ KONFIGURACE

Při pohledu na obrázek 16 z kapitoly 4 můžeme vidět, že výfukový systém automobilu Audi Q3 s motorem 2.0 TFSI obsahuje celkem tři komponenty snižující produkci emisí. Jednou komponentou je třicestný katalyzátor, který je umístěn těsně za turbodmychadlo. Takové umístění katalyzátoru může být rizikové pro jeho životnost. Spaliny v takové blízkosti za turbodmychadlem mohou dosahovat vysokých teplot a katalyzátor je poté ohrožen termickým stárnutím. Z tohoto hlediska je možné použití katalyzátoru s kovovým tělem. Ten má oproti katalyzátoru s keramickým tělem vyšší tepelnou odolnost, a tudíž pro něj teplota spalin nemusí být kritická. Další výhodou katalyzátoru s kovovým tělem je jeho menší odpor proti proudění spalin. Zmenšením odporu působícího proti proudění spalin lze docílit navýšení výkonu motoru a snížení spotřeby paliva. Ve výfukovém systému Audi Q3 jsou dále umístěny dva filtry pevných částic. Výhodnější by bylo nahradit tyto dva filtry pouze jedním filtrem. Tím se docílí snížení počtu komponent v systému a zjednodušení tvaru výfukového potrubí. Tato úprava by měla vliv především na proudění spalin a tím na zvýšení výkonu motoru a snížení spotřeby paliva. Na obrázku 19 je schéma nově navrženého výfukového systému. Výfukový systém obsahuje katalyzátor s kovovým tělem, který nahradil katalyzátor s keramickým tělem. Dále je použit pouze jeden filtr pevných částic, čímž se zredukoval počet komponent v systému a došlo k narovnání výfukového potrubí.



Obrázek 19 Schéma navrženého výfukového systému

Výše uvedené úpravy výfukového systému byly navrženy s ohledem na životnost komponent, navýšení výkonu motoru a snížení spotřeby paliva. Nicméně automobil Audi Q3 je rodinné SUV a navržené úpravy pro něj nejsou zcela nezbytné. Zatížení motoru u takového automobilu se neočekává natolik velké, aby spaliny za turbodmychadlem dosahovaly příliš vysokých teplot, které by zásadním způsobem zkracovaly životnost katalyzátoru s keramickým tělem. Také výkon motoru, který bychom získali zmíněnými úpravami, by nebyl natolik radikální, aby byl pro Audi Q3 nezbytný. Z tohoto hlediska jsou úpravy vhodné spíše pro závodní automobil, u kterého může být každé navýšení výkonu klíčové. U rodinného SUV je klíčová například cena automobilu. Cenu automobilu může navýšit právě použití katalyzátoru s kovovým tělem, který je oproti katalyzátoru s keramickým tělem dražší.

ZÁVĚR

V úvodu práce jsou shrnuty škodlivé emise produkované moderním zážehovým motorem. Je popsán jejich vznik a vliv na životní prostředí a lidský organismus. Dále jsou popsány možnosti snižování produkce těchto škodlivých emisí, které jsou rozděleny do tří skupin. První skupina je opatření před motorem. Toto opatření se týká ovlivnění složení spalované směsi neboli volby směšovacího poměru. V závislosti na složení směsi ovšem není možné snižovat produkci všech škodlivin současně. Další skupinou jsou opatření u motoru. Do této skupiny patří volba kompresního poměru, volba předstihu zážehu a recirkulace výfukových plynů. Těmito opatřeními je ovlivněna maximální teplota a tlak při spalování, což má vliv na produkci NO_x a HC. Poslední skupinou jsou opatření za motorem, která dodatečně snižují množství škodlivin ve výfukových plynech. Do této skupiny patří katalyzátory a filtr pevných částic. Třícestný katalyzátor pro redukci všech tří hlavních složek emisí, sběrný katalyzátor pro redukci NO_x a filtr pevných částic pro redukci pevných částic.

Ze skupiny opatření za motorem je nepostradatelnou součástí emisního systému každého zážehového motoru třícestný katalyzátor, právě díky jeho schopnosti redukovat všechny tři hlavní složky emisí současně. U zážehových motorů s přímým vstřikováním se v emisním systému může vyskytovat komponent více. Jedná se o sběrný katalyzátor a filtr pevných částic. Tyto komponenty sice mají pozitivní vliv na produkci emisí, nicméně vyšší počet komponent ve výfukovém systému negativně působí na výkon motoru a na spotřebu paliva.

Ve čtvrté kapitole jsou uvedeny příklady konkrétních konstrukčních řešení emisních systémů u tří osobních automobilů. Z těchto příkladů je patrné, že komponenty emisního systému mohou být ve výfukovém potrubí rozmístěny různými způsoby a není tedy jediné nejlepší řešení. V závislosti na množství produkovaných emisí je možné použití menšího či většího počtu komponent. Například emisní systém objemnějších motorů lze rozdělit do dvou větví. Redukce emisí se poté řeší v každé větvi zvlášť, jako je tomu u Porsche 911 GT3. Dalším uvedeným příkladem je Audi Q3 s motorem 2.0 TFSI. Audi Q3 s touto motorizací má ve výfukovém systému jeden katalyzátor a dva filtry pevných částic. Toto konstrukční řešení je následně v kapitole 6 zhodnoceno s ohledem na životnost komponent, výkon motoru a spotřebu paliva a jsou navrženy úpravy tohoto emisního systému.

I přes veškerá výše zmíněná opatření jsou emise v rámci životního prostředí stále velké nebezpečí. Proto v roce 2025 dojde k zavedení nové, přísnější emisní normy Euro 7, která vystřídá aktuálně platnou normu Euro 6. Pro splnění limitů nové normy jsou automobilky nuceny vyvíjet složitější technologie, které povedou ke snížení spotřeby paliva. Jelikož plnění nových limitů bude s použitím běžných paliv obtížné, můžeme očekávat vývoj také v oblasti alternativních paliv. Největší potenciál mají v této oblasti palivové články, které jsou momentálně ve vývoji. Z hlediska snižování spotřeby se vývoj ubírá směrem elektrifikace dopravy. K té dochází v podobě hybridních pohonů a elektromobilů. Elektromobily při provozu sice neprodukují škodlivé emise, ovšem je potřeba si uvědomit, jak se elektrická energie na dobíjení elektromobilů získává. Získávání elektrické energie z fosilních paliv a jiných neobnovitelných zdrojů problém se znečišťováním ovzduší zcela neřeší. Daleko více ekologickou variantou je získávání elektrické energie z obnovitelných zdrojů.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] HROMÁDKO, Jan. *Spalovací motory: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-80-247-3475-0.
- [2] Nicoulaus August Otto: A co kdyby ten motor běžel na čtyři takty? *Zive.cz* [online]. 2017 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://vtm.zive.cz/clanky/nicolaus-august-otto-a-co-kdyby-ten-motor-bezel-na-ctyri-takty/sc-870-a-188520/default.aspx>
- [3] ŠTĚTINA, Josef. Studijní opory do předmětu Teorie spalovacích motorů [online]. [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://docs.google.com/presentation/d/1Z93OOZy0UEGGGroJfIfgdS2oxu9XMzRsVm hXInWm46E/edit#slide=id.p1>
- [4] HEISLER, Heinz. *Advanced engine technology*. Warrendale: SAE International, 1995, ix, 794 s. : il. ISBN 1-56091-734-2.
- [5] RAUSCHER, J. *Vozidlové motory. Studijní opory*. VUT FSI Brno, 2004
- [6] BALKI, M.K., C. SAYIN a M. CANAKCI. The effect of different alcohol fuels on the performance, emission and combustion characteristics of a gasoline engine. *Fuel* [online]. 2012, 115(C) [cit. 2021-02-09]. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2012.09.020
- [7] ŠTĚTINA, Josef. Studijní opory do předmětu Teorie spalovacích motorů [online]. [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://docs.google.com/presentation/d/1U O-Hs6bp2aJ03AieR XR-Bjo3v pwnyUoXZinFU YrQk/edit#slide=id.p18>
- [8] Nová auta budou ekologičtější. Poslanci schválili přísnější limity emisí CO₂. *Zpravodajství Evropský parlament* [online]. 2019 [cit. 2021-03-27]. Dostupné z: <https://www.europarl.europa.eu/news/cs/headlines/society/20180920STO14027/nova-auta-budou-ekologictejsi-poslanci-schvalili-prisnejsi-limity-emisi-co2>
- [9] HEYWOOD, John B. *Internal combustion engine fundamentals*. New York: McGraw - Hill, 1988, xxix, 930 s. : il. ISBN 0-07-100499-8.
- [10] WLTP a RDE: nové testy pro certifikaci spotřeby paliva, emisí CO₂ a znečišťujících látek. *Fiat.cz* [online]. [cit. 2021-03-27]. Dostupné z: https://www.fiat.cz/test-wltp?adobe_mc_ref=
- [11] LEONE, Tg, Je ANDERSON, Rs DAVIS, A IQBAL, Ra REESE, Mh SHELBY a Wm STUDZINSKI. The Effect of Compression Ratio, Fuel Octane Rating, and Ethanol Content on Spark-Ignition Engine Efficiency. *Environmental Science & Technology* [online]. AMER CHEMICAL SOC, 2015, 49(18), 10778-10789 [cit. 2021-02-09]. ISSN 0013-936X. Dostupné z: doi:10.1021/acs.est.5b01420
- [12] ZAREEI, J. a A. KAKAEE. Study and the effects of ignition timing on gasoline engine performance and emissions. *European Transport Research Review* [online]. Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, 5(2), 109-116 [cit. 2021-02-09]. ISSN 1867-0717. Dostupné z: doi:10.1007/s12544-013-0099-8

- [13] MACEK, Jan a Bohuslav SUK. *Spalovací motory I*. 2. vyd. Praha: ČVUT, 2003, 244 s. ISBN 80-01-02085-1.
- [14] WEI, Haiqiao, Tianyu ZHU, Gequn SHU, Linlin TAN a Yuesen WANG. Gasoline engine exhaust gas recirculation – A review. *Applied energy* [online]. Elsevier, 2012, **99**, 534-544 [cit. 2021-5-14]. ISSN 0306-2619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2012.05.011
- [15] NIKOLIC, Djordje. *Investigation of spiral tube geometries used in exhaust gas heat exchangers*. Jülich, 2006. 92 s. Diplomová práce. University of Applied Sciences Aachen
- [16] Funkce katalyzátoru. *Dpf-ftg.cz* [online]. [cit. 2021-03-27]. Dostupné z: <https://www.dpf-ftg.cz/funkce-katalyzatoru>
- [17] GAO, Jianbing, Guohong TIAN, Aldo SORNIOTTI, Ahu Ece KARCI a Raffaele DI PALO. Review of thermal management of catalytic converters to decrease engine emissions during cold start and warm up. *Applied thermal engineering* [online]. Elsevier, 2019, **147**, 177-187 [cit. 2021-04-14]. ISSN 1359-4311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.10.037
- [18] JOHNSON, Timothy. Gasoline Particulate Filters—a Review. *Emission Control Science & Technology* [online]. Heidelberg: Springer Nature B.V, 2018, **4(4)**, 219-239 [cit. 2021-03-23]. ISSN 21993629. Dostupné z: doi:10.1007/s40825-018-0101-y
- [19] DPF (Diesel Particulate Filter). *Autolexicon.net* [online]. [cit. 2021-4-24]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/dpf-diesel-particulate-filter/>
- [20] Všechno, co potřebujete vědět o částicových filtrech pro zážehové motory. Čím se liší od filtrů pro diesely? *Auto.cz* [online]. 2018 [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/vsechno-co-potrebuje-vedet-o-casticovych-filtrech-pro-zazehove-motory-cim-se-lisi-od-filtru-pro-diesely-124295>
- [21] Catalyzed Gasoline Particulate Filter (cGPF). *Umicore.com* [online]. [cit. 2021-03-27]. Dostupné z: <https://ac.umicore.com/en/technologies/gasoline-particulate-filter/>
- [22] Efficient and clean: exhaust aftertreatment for gasoline and diesel engines. *Audi.com* [online]. 2020 [cit. 2021-4-24]. Dostupné z: https://www.audi-mediacycenter.com/en/press-releases/efficient-and-clean-exhaust-aftertreatment-for-gasoline-and-diesel-engines-13346?utm_source=86518-TZ%20Audi%20-%20dtb3&utm_medium=email&utm_term=5744871973&utm_content=Tech%20Focus.&utm_campaign=Tiskov%C3%A9%20zpr%C3%A1vy--20210118
- [23] Audi Q3. *Audi.cz* [online]. [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://www.audi.cz/q3/q3/technicka-data>
- [24] Filtr pevných částic mají už skoro všechna benzinová auta. Bát se ho ale nemusíte. *Autobible.cz* [online]. 2019 [cit. 2021-4-24]. Dostupné z: <https://autobible.euro.cz/filtr-pevných-castic-maji-uz-skoro-vsechna-benzinova-auta-bat-se-nemusite/>
- [25] Porsche 911 GT3. *Porsche.com* [online]. [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://www.porsche.com/international/models/911/911-gt3-models/911-gt3/>

- [26] Porsche 911 GT3 (991.2) Race Line Headers with Race Line Slip On Exhaust System and Titanium Tips. *Imperformance.com* [online]. [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.imperformance.com/1051647/s-po-ti-8-tp-e-l-akrapovic-porsche-911-gt3-9912-race-line-headers-with-race-line-slip-on-exhaust-system-and-titanium-tips.html>
- [27] 2021 F-150 Platinum. *Ford.com* [online]. [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.ford.com/trucks/f150/models/f150-platinum/image/5-0l-ti-vct-v8-engine/>
- [28] Ford F-150 5.0L V8 Specs. *Ultimatespecs.com* [online]. [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://www.ultimatespecs.com/car-specs/Ford/111160/Ford-F-150-50L-V8-4x4-55-ft-SuperCrew.html>
- [29] Twisted Steel Long Tube Header & Y-Pipe 304 Stainless Steel. *Afepower.com* [online]. [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://afepower.com/afe-power-48-33002-yc-twisted-steel-long-tube-header-y-pipe-304-stainless-steel>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý
AT	Hliník titan
Ba	Baryum
Ba(NO ₃) ₂	Dusičnan barnatý
BaO	Oxid barnatý
C	Uhlík
CC	Close-coupled (Poloha úzce spojená)
cGPF	catalyzed Gasoline Particulate Filter (Filtr pevných částic pro zážehové motory povlakovaný katalytickou vrstvou)
CO	Oxid uhelnatý
CO ₂	Oxid uhličitý
DPF	Diesel Particulate Filter (Filtr pevných částic pro vznětové motory)
EGR	Exhaust Gas Recirculation (Recirkulace výfukových plynů)
GPF	Gasoline Particulate Filter (Filtr pevných částic pro zážehové motory)
H ₂	Vodík
H ₂ O	Voda
HC	Uhlovodíky
m _{pe}	Měrná spotřeba
N ₂	Dusík
NEDC	New European Driving Cycle (Nový evropský jízdní cyklus)
NO	Oxid dusnatý
NO ₂	Oxid dusičitý
NO _x	Oxidy dusíku
O ₂	Kyslík
PAH	Polycyklické aromatické uhlovodíky
PEMS	Portable Emission Measuring System (Přenosný měřicí systém emisí)
PFDI	Port-Fuel/Direct-Injection (Kombinace přímého a nepřímého vstřikování paliva)
PM	Pevné částice
RDE	Real Driving Emissions (Měření emisí v běžném provozu)
SiC	Karbid křemíku
TFSI	Turbo Fuel Stratified Injection (Přepřňovaný zážehový motor s přímým vstřikováním paliva)
TWC	Three Way Catalyst (Třicestný katalyzátor)

UF	Underfloor (Poloha pod sebou)
V_c	Škodný objem válce
V_d	Zdvihový objem válce
VDE	Variable Displacement Engine (Proměnné vypínání válců)
WLTC	Worldwide harmonised Light-duty vehicle Test Cycles (Celosvětový testovací cyklus pro určení spotřeby paliva)
WLTP	Worldwide harmonised Light-duty vehicle Test Procedure (Celosvětový testovací standart pro určení spotřeby paliva)
ε	Kompresní poměr
λ	Součinitel přebytku vzduchu