

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra vozidel a pozemní dopravy



Bakalářská práce

Způsoby snižování emisí zážehových motorů

**Vypracoval: Hynek Sladký
Vedoucí: Ing. Petr Jindra, Ph.D.**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Hynek Sladký

Technika a technologie v dopravě a spojích
Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Způsoby snižování emisí zážehových motorů

Název anglicky

Ways to reduce emissions from petrol engines

Cíle práce

Cílem bakalářské práce je popsat současné trendy v úprav emisí výfukových plynů u zážehových motorů.

Metodika

1. Úvod
2. Cíl práce
3. Metodika práce
4. Rešeršní část
5. Výsledky a diskuze – zhodnocení jednotlivých konstrukčních řešení
6. Závěr
7. Seznam použitých zdrojů
8. Přílohy

Doporučený rozsah práce

35 – 45 stran textu

Klíčová slova

oxid uhelnatý, pevné částice, oxidy dusíku, řízení motoru, směšovací poměr

Doporučené zdroje informací

FIRST, Jiří. Zkoušení automobilů a motocyklů: příručka pro konstruktéry. Praha: S&T CZ, 2008. ISBN 9788025418055.

HROMÁDKO, J. *Spalovací motory : komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-80-247-3475-0.

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.

PEXA, M. – ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. STAVEBNÍ FAKULTA. *Dynamické metody měření a modelování při diagnostice strojů*. Disertační práce. Praha: 2011.

PEXA, M. – PEJŠA, L. – ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. STAVEBNÍ FAKULTA. *Možnosti uplatnění dynamických měření při diagnostice motorových vozidel : disertační práce*. 2005.

Předběžný termín obhajoby

2020/2021 LS – TF

Vedoucí práce

Ing. Petr Jindra, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vozidel a pozemní dopravy

Elektronicky schváleno dne 29. 1. 2020

Ing. Martin Kotek, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 19. 2. 2020

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 09. 05. 2021

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Způsoby snižování emisí zážehových motorů" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 14. 5. 2021

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Petru Jindrovi, Ph.D. za jeho ochotu a odbornou pomoc, při tvorbě této práce.

Způsoby snižování emisí zážehových motorů

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou snižování emisí škodlivých plynů a pevných částic, které jsou produkovány pístovými spalovacími motory. Konkrétněji způsoby snižování produkce emisí zážehových spalovacích motorů.

V této práci jsou v první části popsány druhy emisí a vysvětleny mechanismy jejich vzniku. Jsou zde také popsány vlivy jednotlivých druhů emisí jak na člověka, tak na životní prostředí. Jedná se například o emise CO, NO_x, HC atd.

Další část bakalářské práce je zaměřena na definici pojmů emisní kontrola a homologační test. Jsou zde popsány jak současné, tak i dříve používané testy v České republice, Evropské unii a Spojených státech amerických.

Ve třetí a zároveň poslední části práce jsou vyjmenovány a popsány způsoby snižování emisí zážehových spalovacích motorů. Dále je zde popsána činnost technologických zařízení, která jsou k tomuto účelu užívána, také jejich efektivita a přínos.

Klíčová slova: oxid uhelnatý, pevné částice, oxidy dusíku, řízení motoru, směšovací poměr, WLTP, katalyzátor, předstih zážehu, kompresní poměr, lambda sonda

Ways to reduce emissions from petrol engines

Abstract

This bachelor thesis deals with the issue of reducing emissions of harmful gases and particulate matter, which are produced by reciprocating internal combustion engines. More specifically, ways to reduce emissions from spark ignition internal combustion engines.

In this work, the first part describes the types of emissions and explains the mechanisms of their occurrence. There are also the effects of individual types of emissions on both humans and the environment. These are, for example, emissions of CO, NO_x, HC, etc.

The next part of the bachelor thesis is focused on the definition of the terms: emission control and homologation test. Both current and previously used tests in the Czech Republic, the European Union and the United States of America are described here.

In the third and at the same time the last part of the work, the ways of reducing emissions of spark ignition internal combustion engines are listed and described. It also describes the operation of technological devices that are used for this purpose, have their effectiveness and benefits.

Keywords: carbon monoxide, particulate matter, nitrogen oxides, engine control, mixing ratio, WLTP, catalyst, ignition advance, compression ratio, lambda probe

Obsah

1. Úvod	1
2. Cíl a metodika práce	3
3. Přehled řešené problematiky.....	4
3.1. Emise – popis, vznik	4
3.2. Měření produkce emisí.....	8
3.2.1. Emisní testy pro homologaci vozidel do 3,5 t v ČR a EU.....	8
3.2.2. Emisní testy pro homologaci lehkých vozidel (do 8500 liber) v USA ..	11
3.2.3. Emisní kontroly vozidel v ČR.....	12
3.2.4. Emisní kontroly vozidel v EU	12
3.2.5. Emisní kontroly vozidel v USA	13
3.3. Způsoby snižování emisí.....	13
3.3.1. Opatření snižující produkci emisí před motorem	13
3.3.2. Opatření pro snižování emisí u motoru	20
3.3.3. Opatření pro snižování emisí za motorem.....	30
3.3.4. Vliv použitého typu paliva na produkci emisí.....	41
4. Závěr	47
5. Seznam použitých zdrojů.....	49

1. Úvod

Spalovací motory jsou tepelný zdroj, díky kterému je možné z paliva získat tepelnou energii. Tuto energii je možné využitím vhodného plynného média převést na mechanickou práci. Energie plynného média se u různých typů spalovacích motorů využívá odlišně. U pístových spalovacích motorů se využívá tlaku spalin (potenciální energie) naproti tomu u spalovacích turbín se využívá rychlost proudu spalin (energie kinetická).

Počátky vývoje spalovacích motorů sahají až do druhé poloviny 17. století. V roce 1786 bylo ve Francii požádáno o první patent na zážehový motor (poháněný svítiplynem). O 90 let později se objevil první zážehový čtyřtákní motor na tekuté palivo. Roku 1876 je sestrojil a o rok později si jej i nechal patentovat německý konstruktér Nicolaus Otto. První dvoutákní motor sestrojil Karl Benz v roce 1879.

Vznětové motory se objevily nedlouho po zážehových. Rudolf Diesel sestrojil první prototyp vznětového motoru v roce 1893. Tento prototyp byl poháněn uhelným prachem. Druhý experimentální motor byl postaven roku 1896. Motor měl vodní chlazení a vstřikování benzínu. Po krátké době byl však benzin nahrazen čištěným petrolejem, což se ukázalo jako lepší řešení. Motor pracoval lépe. Ještě téhož roku vznikl třetí prototyp, který už lze považovat za klasický čtyřdobý vznětový motor.

Za celou poměrně dlouhou historii vývoje spalovacích motorů byl kladen důraz především na co nejvyšší výkon a co nejnižší spotřebu paliva. Spotřebu bylo třeba řešit jak z ekonomických důvodů (aby provoz stroje nebyl pro jeho majitele tolik nákladný), tak z důvodů co nejvyššího dojezdu automobilu případně doletu letadla atp. Dalším důvodem k co nejmenšímu plýtvání palivem bylo to že lidé věděli, že zásoby ropy jakožto hlavní suroviny pro výrobu paliv, nejsou nekonečné. Což vede i ke snaze hledání paliv alternativních, které by bylo možné vyrábět z alternativních zdrojů.

Produkce emisí spalovacích motorů je v poslední době velmi diskutovaným tématem. Ale nebylo tomu tak vždy. Prvním předpisem platným na území Evropy, který se zabýval produkcí emisí byla směrnice EHK 15. Tato směrnice byla zavedena až v roce 1971. Měřil se obsah oxidu uhelnatého (CO), nespálených uhlovodíků (HC) a později i oxidů dusíku (NO_x). Poté v roce 1989 následovala směrnice EHK 83, která EHK 15 nahradila. Na území České republiky vstoupila v platnost až v roce 1991. Od její zavedení prošla několika změnami, který zpříšňovaly limity. EHK 83 se stal základem i pro dnes platné předpisy Euro.

2. Cíl a metodika práce

Cílem bakalářské práce je popsat současné trendy v úprav emisí výfukových plynů u zážehových motorů.

Hlavním cílem této bakalářské práce je tedy seznámení s různými způsoby snižování emisí spalovacích motorů u osobních automobilů a základní popis jejich funkce.

První část obsahu této práce se bude věnovat popisu toho, co to vlastně emise jsou. Jaké emise produkují pístové spalovací zážehové motory. Při jakých podmínkách dané druhy emisí vznikají a dále také jejich vliv na lidské zdraví, případně životní prostředí.

Následuje část, která se bude zabývat problematikou měření emisí u vozidel. Budou zde definovány rozdíly mezi emisní kontrolou a homologačním testem. Dále budou popsány druhy homologačních testů, které byly používány dříve, a které se využívají dnes. S uvedením důvodu, proč k těmto změnám došlo. Budou také uvedeny rozdíly mezi dříve užívaným homologačním cyklem NEDC a současným WLTP.

V navazující části této bakalářské práce budou vyjmenovány způsoby a technologická zařízení omezující produkci emisí. Dále bude základně popsána jejich funkce a jejich efekt na výslednou produkci emisí. Tato opatření budou rozdělena dle jejich umístění na opatření před motorem, u motoru a za motorem. Konec této části bude věnován alternativním typům paliv. Bude zde popsán způsob výroby, jejich vlastnosti a také budou z hlediska produkce emisí srovnány s automobilovým benzínem.

3. Přehled řešené problematiky

Tato kapitola je věnována vzniku emisí a jejich popisu. Způsobům a zařízením, která byla nebo i v současnosti jsou používána pro odstranění nebo minimalizaci množství emisí, které jsou produkovány pístovými spalovacími motory.

3.1. Emise – popis, vznik

Tato část je věnována popisu jednotlivých druhů emisí. Jsou zde popsány mechanismy jejich vzniku, vlastnosti, vlivy na životní prostředí a účinky na lidský organismus.

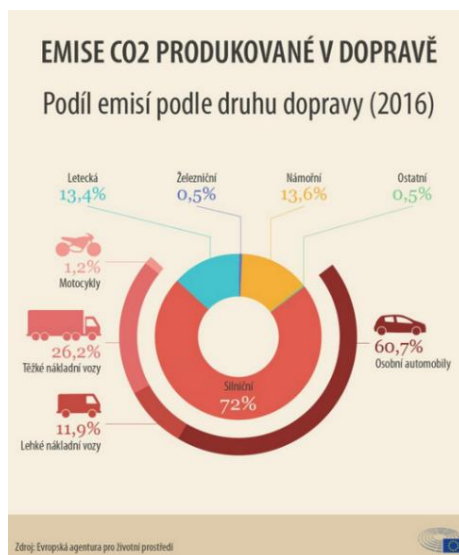
Oxid uhličitý (CO₂)

Pokud dochází, ke spalování uhlovodíkových paliv se vzduchem, tak vzniká dokonalou oxidací oxid uhličitý (CO₂) a voda (H₂O). Za reálných podmínek však probíhá oxidace nedokonalá, při které je navíc ve spalinách přítomen vodík (H) a oxid uhelnatý (CO). (1) Za určitých podmínek mohou výfukové plyny obsahovat i kyslík (O). U zážehových motorů k tomu může dojít, pokud je v čerstvé směsi jeho přebytek, nebo nedošlo k jeho spotřebování z jiných důvodů. Naopak u vznětových motorů je tento jev naprosto v pořádku a dochází k němu vždy, protože vznětové motory pracují s přebytkem kyslíku. (3)

Oxid uhličitý (CO₂) je to bezbarvý plyn, velmi stabilní, málo reaktivní a bez zápachu. Patří mezi tzv. skleníkové plyny. To znamená že způsobuje vznik radiační clony, která omezuje únik tepla ze Země do jejího okolí. Tento jev vede ke zvyšování teploty, které má spoustu dalších nepříznivých důsledků. (3)

Pro člověka je nebezpečný, až když jeho koncentrace začne vytěšňovat kyslík. (3)

Dle zprávy European Environment Agency (2010) dochází, na rozdíl od většiny odvětví lidské činnosti, v dopravním sektoru k vysokému nárůstu.(2) V Evropské unii vzniká v dopravě téměř 30 % všech emisí CO₂. Kvůli tomu se EU rozhodla snížit produkci CO₂ v dopravě do roku 2050 o 60 % (vůči emisím v roce 1990). Nejvíce emisí oxidu uhličitého produkují osobní automobily (obr. 1). Proto by do roku 2030 měly emisní limity pro osobní automobily klesnout o 37,5 %.(4).



Obrázek 1 Podíl emisí dle druhu dopravy (4)

Oxid uhelnatý (CO)

Plyn, který vzniká při nedokonalém spalování, které je způsobeno nedostatkem kyslíku.(5) Podílí se na vzniku fotochemického (letního) smogu. Pro lidský organismus je jedovatý. Váže se na hemoglobin (krevní barvivo) mnohem lépe než kyslík. Tím způsobuje omezení přenos kyslíku z plic do krve a to vede k poškození orgánů nedostatkem kyslíku.(2)

Oxidy dusíku (NO_x)

Dusík (N) je jednou z nejvýznamnějších složek výfukových plynů. (3) Oxidy dusíku jsou plyny, které vznikají při spalování uhlovodíkových paliv za vysokých tlaků a teplot. Zejména pokud je směs chudá (přebytek kyslíku).(5) Jsou to oxid dusnatý (NO), oxid dusičitý (NO₂) a oxid dusný (N₂O).(3) Oxidy dusíku se výrazně podílí na tvorbě letního smogu. Dalším nepříznivým jevem, kterému oxidy dusíku napomáhají jsou kyselé deště.(2)

Jednou z nejvýznamnějších složek výfukových plynů je oxid dusnatý není pro lidský organismus přímo škodlivý, ale oxiduje na oxid dusičitý, který škodlivý je. Při vdechování

reaguje se sliznicemi a tvoří se kyselina dusičná (HNO_3). Na kyselinu dusičnou reaguje dýchací soustava tak, že je přivřen přívod vzduchu do plic, což vede k pocitům dušení. K tomuto jevu dochází již při malých koncentracích.(3)

Oxidy síry

Některá uhlovodíková paliva obsahují síru. Při spalování těchto paliv v motoru dochází ke vzniku oxidů síry, které jsou poté obsaženy ve výfukových plynech.(3)

Jsou produkovány zejména při spalování ve vznětových motorech. Díky tomu, že obsah síry v motorové naftě neustále klesá, klesají i emise produkované spalovacími motory. V poměru s celkovou produkcí je podíl emisí oxidů síry, které vznikají činností spalovacích motorů zanedbatelný. Nejčastějším zástupcem této skupiny je oxid siřičitý (SO_2). (2)

Nespálené uhlovodíky (HC)

Vznikají při spalování za nízkých teplot a krátkých časech spalování nebo také odpařováním lehkých frakcí paliv z nádrže, případně karburátoru. (5) Nespálené uhlovodíky mohou být buď směsí různých uhlovodíků, které do oxidačního procesu vstupují jako palivo, nebo mohou vznikat v průběhu spalování přímo ve válci motoru. K tomu dochází předčasným zastavením oxidačních reakcí. To může být způsobeno buď poruchou spalování, nebo vlivem ochlazení o stěnu válce. (3)

Různé uhlovodíky se od sebe liší škodlivostí pro lidský organismus. Nejméně škodlivé jsou ty, které jsou původními skupinami uhlovodíkového paliva. Výrazně vyšší škodlivost mají uhlovodíky, jejichž proces oxidace nebyl dokončen (např. kvůli ochlazení o stěnu válce). Takto vzniklé uhlovodíky jsou toxické a karcinogenní. Škodlivost nespálených uhlovodíků může být zvýšena, pokud se zachytí na povrchu pevných částic. Díky tomu se poté mohou lépe šířit. (2)

Pevné částice (PM)

Při úplném nepřístupu vzduchu (uvnitř kapičky neodpařeného paliva) dochází za vysokých teplot k dekompozici molekul uhlovodíků a tvoří se primární uhlík. Díky tomuto jevu, ke kterému dochází zejména ve vznětových motorech, se ve spalinách vyskytuje pevný uhlík (saze). Tyto pevné částice nejsou jediné, které se ve výfukových plynech vyskytují. Z motoru mohou unikat i částičky rzi, prach, popel atd. Těchto částic je však pouze

minimální množství. Emise pevných částic závisí zejména na kvalitě rozprášení paliva při vstřiku do válce. Také jsou ovlivňovány množstvím nasátého vzduchu, čím je vzduchu více, tím více se zvýší i přísun kyslíku k částicím. (3)

Jádro pevné částice je složeno z uhlíku a popela, další prvky se sorbují na povrchu. V pevných částicích je obsažen primární uhlík (až 75 %), organický uhlík a malé množství vody, dusíku, sulfátu a dalších látek. Složení závisí na typu motoru a dalších zařízeních jako je například filtr pevných částic. (2)

Škodlivost pro člověka se liší délkou expozice. Pokud je krátkodobá, tak může způsobit podráždění očí, jícnu, průdušek nebo nucení ke zvracení. Dlouhodobá (chronická) expozice může způsobit změny v plicích nebo zánět. Odhaduje se že dlouhodobé vystavení koncentraci $5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^3$ nezpůsobuje vznik rakoviny. Pevné částice mohou mít různé velikosti. Velikost ovlivňuje, jak daleko do těla se částice dostanou. Větší částice 5 až $10 \mu\text{m}$ jsou zachyceny v horních cestách dýchacích. Problémem jsou hlavně částice menší než $0,1 \mu\text{m}$. Takto malé částice se dostanou až k povrchu plic, odkud se mohou dále dostat do lymfatického systému a možná až do krve. (3)

3.2. Měření produkce emisí

Měření produkovaných emisí můžeme rozdělit na dvě skupiny:

- homologační testy – slouží ke schvalování vozidel nových, případně vozidel, která jsou poprvé uváděna do provozu,
- emisní kontroly – pravidelné kontroly emisí a někdy i technické kontroly všech vozidel, která jsou již v provozu.

Měření emisí se pro tyto dvě skupiny liší. Odlišné nejsou jen příslušné legislativní předpisy, ale i úrovně emisních limitů, používané metodiky měření, požadované přesnosti měření, technická úroveň měřicí techniky, statutární zajištění a cenové relace. (3)

3.2.1. Emisní testy pro homologaci vozidel do 3,5 t v ČR a EU

Prvním předpisem, který vstoupil v platnost na území Evropy byla směrnice EHK 15. Tato směrnice byla zavedena roku 1971. Původní verze tohoto předpisu obsahovala 4 městské cykly a počítala s měřením obsahu emisí oxidu uhelnatého (CO) a nespálených uhlovodíků (HC). Později bylo přidáno ještě měření emisí oxidů dusíku (NO_x). Během let prošel test značným vývojem, během kterého se měnil a doplňoval. Potom co byla EHK 15 mnohokrát přepracována, byla koncem osmdesátých let minulého století nahrazena vyhláškou EHK 83. Tato vyhláška se stala základem i pro další užívané předpisy. (3)

Původní znění EHK 83 nabylo platnosti roku 1989 (v ČR až od 1991). Tento předpis specifikuje tři typy hodnocení (A, B, C):

- Typ A je určen pro hodnocení vozidel se zážehovým motorem bez dodatečné úpravy spalín,
- Typ B se užívá používá pro hodnocení vozidel se zážehovým motorem s katalyzátorem (musí spalovat bezolovnatý benzín),
- Typ C je určen pro hodnocení vozidel se vznětovými motory. (3)

Předpis EHK 83 prošel od doby svého vzniku několika úpravami, které se týkaly především zpřísnění limitních hodnot. Na počátku devadesátých let minulého století vychází nové emisní předpisy v rámci jednotné legislativy ve státech Evropské unie. Základem těchto předpisů je EHK 83, ale nyní již nesou název dle zvyklostí EU. Tyto emisní předpisy jsou známé spíše pod názvem EURO + číslo revize. V rámci sjednocení legislativy, přijímají tyto předpisy i země, které nepatří do Evropské unie. (3)

Homologační test NEDC (New European Driving Cycle)

Tento test je spojením testů UDC a EUDC. Limity emisí CO, HC, NO_x a pevných částic jsou pro každou kategorii vozidel specifické a velmi přísné. Test NEDC byl používán od roku 1998 do roku 2017, kdy byl nahrazen modernějším a přísnějším testem WLTP. (3)

NEDC je souhrnným názvem pro homologační test. Je při něm používána simulace jízdního cyklu na řízení válcovém dynamometru. Tato simulace zahrnuje 4krát režim základního městského cyklu ECE 15 a označuje se jako městský cyklus UDC a 1krát režim mimo-městského cyklu EUDC. Tato měření se provádí bezprostředně za sebou. Při začátku testu je motor studený, přičemž před zkouškou samotnou se vozidlo temperuje minimálně 6 hodin na teplotu od 20 do 30 °C. Pomocí metody CVS (constant volume sampling) se stanovují hodnoty jednotlivých emisí kumulativně za celý test a následně se přepočtou na g·km⁻¹. Princip CVS je takový, že emise jsou odsávány a ředěny pomocí výkonného ventilátoru. Vzorek ředěných emisí je sbírán do sběrných vaků, kde se poté stanovuje koncentrace ředěných emisí. (3)

Test trvá 1 180 s, za tuto dobu vozidlo ujede dráhu přibližně 11 000 m. Po dobu 293 s běží motor na volnoběh. Průměrná rychlost, které je při tomto testu dosahováno je 33,6 km·h⁻¹. Hodnota maximální rychlosti je 120 km·h⁻¹. (6)

Homologační test WLTP (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure)

Homologační cyklus WLTP byl do provozu uveden ve druhé polovině roku 2017. Skládá se z WLTC (World harmonized Light Vehicle Duty Test Cycle) a RDE (Real Driving Emission). (6)

Jízdní cyklus WLTP se dělí na čtyři části, které se od sebe liší průměrnou rychlostí. Část s nízkou, střední, vysokou a extrémně vysokou rychlostí. Každá z těchto čtyř částí obsahuje různé fáze jízdy. Těmito fázemi jsou zrychlení, zastavení a brzdění. U určitého typu automobilu je každá konfigurace hnacího ústrojí testována pro nejlehčí (nejekonomičtější) a nejtěžší (nejméně ekonomickou) verzi daného automobilu. (6)

WLTP byl vyvinut s cílem, aby byl používán jako globální testovací cyklus v různých částech světa. Díky tomu by bylo možné celosvětově srovnávat jak emise znečišťujících látek a oxidu uhličitého (CO₂), tak i hodnoty spotřeby paliva. I přestože má WLTP globální jádro, Evropská unie a další regiony uplatňují test různými způsoby v závislosti na svých zákonech a potřebách silničního provozu. (6)

Test trvá 1800 s, za tuto dobu vozidlo urazí dráhu přibližně 23 250 m. Po dobu 234 s běží motor na volnoběh. Průměrná rychlost, které je při tomto testu dosahováno je 46,5 km·h⁻¹. Hodnota maximální rychlosti je 131 km·h⁻¹. (6)

Shrnutí rozdílů mezi NEDC a WLTP

Prvním rozdílem mezi těmito dvěma testy je již samotná doba jejich trvání. Test WLTP je o zhruba 10 minut delší než NEDC. Z tohoto faktu logicky vyplývá, že i ujetá vzdálenost je u WLTP vyšší. Ta je totiž u WLTP více než dvojnásobná. Tento velký rozdíl je způsoben vyšší průměrnou rychlostí testu WLTP (o 12,5 km·h⁻¹ než NEDC). Vyšší není jen rychlost průměrná ale i rychlost maximální (o 11 km·h⁻¹). Test NEDC se provádí při rozpětí okolní teploty 20 až 30 °C, oproti tomu test WLTP se provádí pouze při okolní teplotě 23 °C.

Díky těmto aspektům je testovací cyklus WLTP považován za více odpovídající skutečným jízdám v reálném prostředí. Proto Tento test nahradil zastaralý a méně vypovídající cyklus NEDC.

3.2.2. Emisní testy pro homologaci lehkých vozidel (do 8500 liber) v USA

V USA je vývoj emisních testů historicky nejrozsáhlejší. Lehká vozidla LDV jsou podle CAAA (Clean Air Act Amendments) do dvou kategorií:

- Tier 1 standard – stále platný standard určený k homologaci osobních automobilů, lehkých nákladních mobilů, SUV, minivanů a pickupů, jejichž celková hmotnost nepřesahuje 8500 liber,
- Tier 2 standard – byl zaváděn postupně od roku 2004 do roku 2009. Zpřísnuje emisní limity pro těžší vozidla. Doplnuje standard Tier 1 o kategorii vozidel, do které jsou zahrnuty těžší SUV automobily a osobní dodávky o celkové hmotnosti 8500 až 10000 liber. Tyto automobily jsou homologovány jako osobní. Pokud jsou však vozidla převyšující hmotnost 8500 liber používána v komerční sféře, tak jsou homologována jako nákladní automobily. (3)

FTP 75 (Federal Test Procedure)

Jedná se o zkušební jízdní cyklus, který je prováděn na válcovém dynamometru. Tento cyklus je určen k certifikaci osobních a lehkých užitkových vozidel. Je nástupcem uznávaného FTP 72. (3)

Vzdálenost, kterou ujede vozidlo za dobu trvání cyklu 1 874 s je rovna 11,04 míle (17,77 km). Průměrná rychlost vozidla během testování je 21,2 mph (34,1 km·h⁻¹). (3)

Cyklus FTP 75 vznikl rozšířením FTP 72 o jednu část, tzv. hot start phase, jinak je s původním identický. Skládá se z následujících částí:

1. fáze studený start (cold start phase),
2. fáze neustálený režim (transient phase),
3. fáze teplý start (hot start phase). (3)

Exhalace výfuku se ukládají odděleně pro každou fázi. Jsou ukládány do teflonových vaků a následně se provádí analýza a vyhodnocení v g·mile⁻¹. Jednotlivé fáze mají pro výpočet různou váhu. První fáze má váhu 0,43, druhá 1 a třetí fáze má váhu 0,57. (3)

Testovací cyklus FTP 75 musí být dodatečně doplněn dvěma dalšími doplňkovými federálními testy SFTP (Supplemental Federal Test Procedure). První je cyklus simulující

agresivní způsob jízdy s vysokým zrychlením při rozjezdu vozidla a vysokém kolísání hodnoty otáček motoru **US06** (aggressive, high speed driving). Druhým testem je cyklus simulující jízdu při zapnuté klimatizaci **SC03** (the use of air conditioning). (3)

3.2.3. Emisní kontroly vozidel v ČR

Povinnost pravidelného měření emisí u vozidel v provozu v ČR vyplývá ze zákona č. 56/2001 Sb. Praktické provedení a rozsah emisních kontrol je dán vyhláškou Ministerstva dopravy (MD) č. 302/2001 Sb. o měření emisí vozidel a technických prohlídkách. Cílem legislativy je udržení škodlivých emisí vozidel v provozu, v průběhu celé jejich životnosti, na přijatelné úrovni. (3)

Z hlediska emisí jsou za přiměřené ukazatele technického stavu vozidla se zážehovým motorem považovány emise CO. Ty jsou měřeny při volnoběhových otáčkách. V případě zážehového motoru bez katalyzátoru, nebo v případě katalyzátorů neřízených je předepsáno také měření HC, při stejných otáčkách. (3)

3.2.4. Emisní kontroly vozidel v EU

Pro pravidelnou kontrolu vozidel v provozu se v různých státech Evropské unie užívají různé testovací metody. Většina těchto testů je převzata z USA kde, jak již bylo zmíněno dříve, má sledování a kontrola emisí nejdelsí historii. Společným cílem těchto testů, je co nejobektivnější hodnocení produkce emisí. Je snaha dosáhnout toho, aby testy co nejvíce odpovídaly reálným podmínkám skutečného provozu. Výsledkem nejobektivnějších testů jsou měrné emise, které jsou vztaženy k ujeté dráze ($\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$) nebo výkonu ($\text{g}\cdot\text{kWh}^{-1}$). (3)

Mezi testy užívané ke kontrole emisí v Evropské unii patří například: dálkové snímání emisí, testy výparných emisí, palubní diagnostika, neustálený režim zatížení, akcelerační režimy atd. (3)

3.2.5. Emisní kontroly vozidel v USA

V některých regionech USA jsou pravidelné emisní kontroly vozidel v provozu považovány za testy na nejvyšší světové úrovni. Kontroly se zaměřují nejen na škodliviny obsažené ve výfukových plynech, ale i na emise hlukové nebo emise vzniklé vypařováním paliva. (3)

3.3. Způsoby snižování emisí

Tato část práce se věnuje rozdělení a popisu různých zařízení, které jsou používány ke snižování emisí u zážehových pístových spalovacích motorů. Případně zařízení jejichž provoz přímo ovlivňuje množství produkovaných emisí.

3.3.1. Opatření snižující produkci emisí před motorem

3.3.1.1. Tvorba směsi

Tvorba směsi vyžaduje odměřování paliva se vzduchem, aby bylo možné vytvořit podmínky pro optimální průběh spalování. (7)

Kvalitou směsi paliva a vzduchu je do značné míry ovlivněn výkon motoru. Aby motor dosahoval co nejlepšího výkonu je nutná dobrá konstrukce systémů, které se o tvorbu směsi starají. (8)

Volbou vhodného směšovacího poměru můžeme dosáhnout snížení produkce CO a HC. Snížení koncentrace oxidu uhelnatého je snadné, stačí pouze upravit směšovací poměr tak, aby $\lambda > 1$ (chudá směs). Toto ochuzení směsi však nesmí být příliš velké, aby nedocházelo ke zvýšení koncentrace emisí HC, způsobeného vynecháním zápalů. Problémem je, že při snížení produkce CO a HC dojde k nárůstu koncentrace NO_x a naopak. (3)

Aby bylo možné regulovat pracovní režim motoru, je nutné zajistit odpovídající množství paliva a vzduchu, tak aby byla zachována požadovaná hodnota přebytku vzduchu (λ). Toho se u lehce odpařitelného paliva, jako je benzin dosahuje pomocí karburátorů, vstřikováním paliva do sacího potrubí nebo vstřikováním paliva přímo do válce. (3)

U zážehových motorů tvorba směsi prováděna buď pomocí karburátorů (dříve), nebo pomocí vstřikování (v současnosti).

3.3.1.2. Zařízení odpovědná za tvorbu směsi

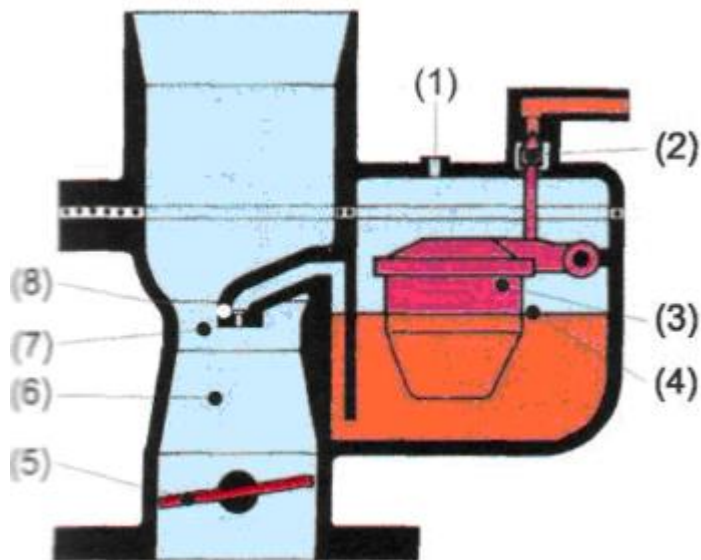
Karburátory

Jsou to zařízení, která odměřují palivo, a zároveň mají funkci směšovače. Tyto funkce jsou spojeny v jeden celek s řadou přídatných regulačních funkcí. (3) Pomocí karburátorů se tedy provádí tvorba vhodné směsi pro spalování ještě před pracovním válcem motoru. (5) Příprava směsi tedy zahrnuje jak rozprašování paliva, tak odpařování a vytváření co nejhomonější směsi. (7)

Z historického hlediska byly prvními typy karburátorů tzv. odpařovací. U těchto karburátorů při sacím zdvihu vzduch prostupoval vrstvou paliva a sytil se jeho parami. Odpar paliva byl zvětšen jeho ohřevem pomocí chladící kapaliny, nebo cirkulujících výfukových plynů. Takto vzniklá směs byla velmi bohatá a bylo třeba jí ředit přídatným vzduchem, jehož množství se regulovalo pomocí ručně ovládané klapky nebo šoupátka. Díky ručnímu ovládní byla tvorba směsi značně nedokonalá. (7)

Klasický princip rozprašování paliva do proudícího vzduchu byl zaveden roku 1893 Wilhelmem Maybachem. Palivo je přiváděno tryskou, která je umístěna v nejmenším průřezu v difuzoru a rozprašuje se do proudícího vzduchu. Tento princip se stal základem většiny karburátorů a byl postupně zdokonalován až do dnešní podoby. Regulace průtoku bývá obvykle prováděna škrticí klapkou.(7)

Zástupcem karburátorů je například jednoduchý karburátor (Obrázek 2). Funguje tak, že palivo je přiváděno z plovákové komory. K jeho odměření dochází v nejužším místě difuzoru, vysáváním paliva z trysky podtlakem. Výše tohoto podtlaku závisí na poloze škrticí klapky, která ovládá průtok vzduchu. Nejvyšších hodnot ($p_d = 20$ kPa) dosahuje při plném otevření škrticí klapky a maximálních otáčkách motoru. (3)



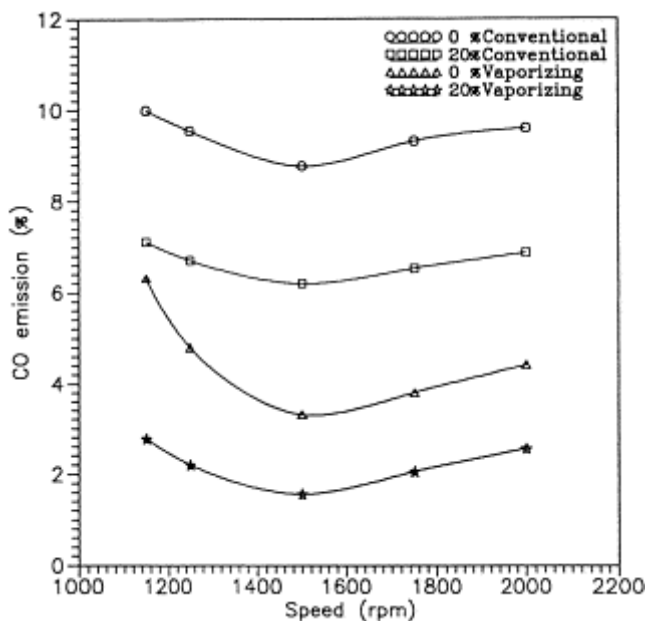
- 1) odvzdušnění plovákové komory
- 2) jehlový ventil
- 3) plovák
- 4) hladina kapaliny (paliva)
- 5) škrťící klapka
- 6) směšovací komora
- 7) difuzor
- 8) rozprašovací trubice

Obrázek 2 Jednoduchý karburátor (16)

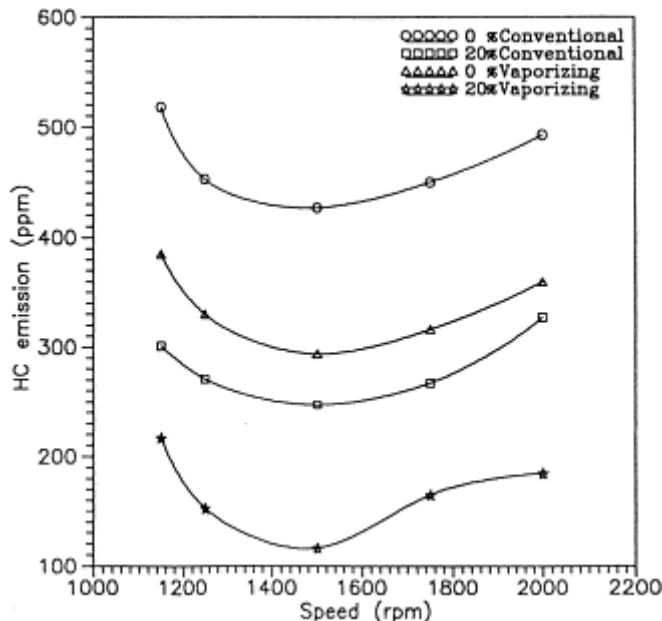
Nevýhodou tohoto karburátoru je fakt, že s nárůstem množství směsi, která je nasávána do motoru, roste její bohatost. To znamená, že již při malých zatíženích se motor dostává do oblasti nízké ekonomičnosti provozu. Z toho je zřejmé, že směs se musí s nárůstem zatížení ochuzovat. Během vývoje karburátorů byly vyvinuty dva základní typy. Typ ZENITH (s kompenzační vyrovnávací tryskou) a typ se sníženým podtlakem u trysky SOLEX (s emulzní trubicí). (3)

Srovnání konvenčního karburátoru s odpařovacím s ohledem na emise

Na obrázcích 3 a 4 jsou porovnány konvenční a odpařovací karburátor, pokud je v jejich směsi přítomno 0 % a 20 % methanolu. Při nízkých otáčkách je směs bohatá a turbulence nízká, proto jsou zde emise CO a HC vyšší. Při vysokých otáčkách je sice turbulence dobrá, ale není dostatek času na spalování. Proto dojde k nedokonalému spalování, díky čemuž se emise opět zvýší. Z tohoto měření vyplývá, že při stejném množství methanolu ve směsi, je efektivnější a více ekologický karburátor odpařovací. (8)



Obrázek 4 Emise CO v závislosti na otáčkách motoru (8)



Obrázek 3 Emise HC v závislosti na otáčkách motoru (8)

Vstřikování

U zážehových motorů není vstřikování lehkoodpařitelných paliv pouze záležitostí posledních let. Své uplatnění našlo již v počátcích vývoje spalovacích motorů v letectví. Bylo potřeba, aby bylo dávkování paliva nezávislé na zemské gravitaci, poloze motoru a tlaku vzduchu. Všem těmto požadavkům vstřikování paliva vyhovuje lépe než karburátory. (3)

První vstřikovací systémy vyráběla firma Bosch. Ty byly poprvé sériově montovány do vozů Gutbrod Superior 600 a Goliath 700 GP. Tyto vozidla byla vybavena dvoutaktními motory a vyráběla se jak ve verzi se vstřikováním, tak ve verzi s karburátorem. U těchto vozidel byla pozorována až o 50 % nižší spotřeba paliva při volnoběžných režimech. Celková spotřeba paliva se snížila o 20 % a navíc byl o 20 % zvýšen výkon. (3)

Dělení dle způsobu dávkování paliva:

- pulsní vstřik** – vstřikovací ventil odměří jednou nebo dvěma dávkami potřebné množství paliva na každý pracovní cyklus do sacího potrubí před sací ventil. Dávka je regulována dobou vstřiku, která je řízena mikroprocesorem a pro různé pracovní režimy motoru se liší. (3)

- b) **Sekvenční vstřík** – časovaný vstřík před sací ventily jednotlivých válců. Tento vstřík je v souladu s pořadím zapalování válců. Řízení vstříkovacích impulsů probíhá v závislosti na frekvenci zapalovacích impulsů. (7)
- c) **Kontinuální vstřík** – dodávka paliva do sacího systému probíhá nepřetržitě. Je regulována buď změnou tlaku, nebo průtočného průřezu dávkovacího zařízení, který závisí na průtočném množství vzduchu. (7)
- d) **Jednobodový centrální vstřík** – všechny válce motoru mají v sacím potrubí společné místo, kde probíhá dávkování paliva. (3)
- e) **Vícebodový vstřík** – vstříkovací ventily jsou samostatné pro jednotlivé válce. Dávka paliva je odměřována před sací ventil, nebo přímo do válce. (3)

Dělení dle způsobu dopravy paliva do spalovacího prostoru:

- a) **Vstřík do sacího kanálu**
- b) **Vstřík do sacího potrubí**
- c) **Přímý vstřík**

Typy nepřímého vstříkování paliva:

- **D-Jetronic** – první vstříkovací zařízení s plně elektronickým řízením zavedené do výroby. Označení D poukazuje na to, že pro měření množství nasávaného vzduchu je použito tlakové čidlo. Palivo o tlaku přibližně 200 kPa je vstříkováno elektromagnetickými ventily před sací ventil každého válce zvlášť (jedná se o vícebodové vstříkování). (3)
- **L, LH-Jetronic** – tento systém funguje velmi podobně jako D-Jetronic, který prakticky nahradil. Jde také o vícebodové vstříkování. Tlak paliva bývá udržován na hodnotách 250 až 300 kPa, díky čemuž je množství paliva závislé na době otevření vstříkovacích ventilů. Hlavním rozdílem je způsob měření množství nasávaného vzduchu. (7) Množství nasávaného vzduchu je zde měřeno pomocí výkyvné plovoucí klapky, jejíž úhel natočení je převeden potenciometrem na elektrický signál, který je poté možno dále vyhodnotit. (3)
- **K, KE-Jetronic** – mechanickou-hydraulický systém vstříkování. Písmenem K je zde označena kontinuální dodávka paliva do samostatných vstříkovacích ventilů, před sací ventil každého válce. Tento vstříkovací systém je opět vícebodový. Tlak paliva je 500 kPa. Dávka paliva je u tohoto systému řízena mechanickou regulací podle

výkyvu desky v hrdle velkého difuzoru, která vykonává funkci měřiče průtokového množství vzduchu. Ve své době byl tento systém výhodný zejména kvůli své ceně, jednoduchosti a nepotřeboval elektronické řízení. (3)

- **Mono-Jetronic** – tento vstřikovací systém se od všech dříve jmenovaných liší tím, že je jednobodový. Má centrální elektromagnetický vstřikovač s přerušovaným vstřikem, který je umístěn v sacím potrubí před škrtkovou klapkou. Toto zařízení bylo vyvinuto zejména pro čtyřválcové motory s malým obsahem válců. Jeho hlavní předností je splňování emisních limitů a malá spotřeba paliva při zachování poměrně vysokého jízdního komfortu. Množství vstříknutého paliva stejně jako u předchozích systémů závisí pouze na době otevření vstřikovacího ventilu. Množství nasávaného vzduchu je u tohoto systému odvozováno z úhlu natočení škrtkové klapky (měřené potenciometrem) a otáček motoru. Lze použít i měření plovoucí klapkou či drátkovým anemometrem. (3)
- **Motronic** – je systém, který zajišťuje komplexní řešení elektronického vstřikování a zapalování. Obě tyto funkce jsou v něm řízeny mikro počítačem. V základním provedení v závislosti na otáčkách motoru, teplotě motoru, zatížení motoru a na teplotě a tlaku nasávaného vzduchu, řídí předstih zapalování, okamžik vstřiku a dávku paliva. Bývá také označován jako elektronický motormanagement. Aplikuje se na vstřikovací systémy KE-, L-, LH- a Mono-Jetronic. (7)

Přímé vstřikování

Komponenty přímého vstřikování:

- Tlakový zásobník (Rail)
- Vysokotlaké čerpadlo
- Ventil pro řízení tlaku
- Snímač tlaku v tlakovém zásobníku
- Vysokotlaký vstřikovací ventil

Princip činnosti

V motorech, které jsou vybaveny systémem přímého vstřikování paliva, dochází k tvorbě směsi paliva se vzduchem přímo ve spalovacím prostoru. Jinými slovy sacím ventilem proudí pouze čistý vzduch. Palivo je vstřikováno vstřikovacími ventily do spalovacího prostoru. (3)

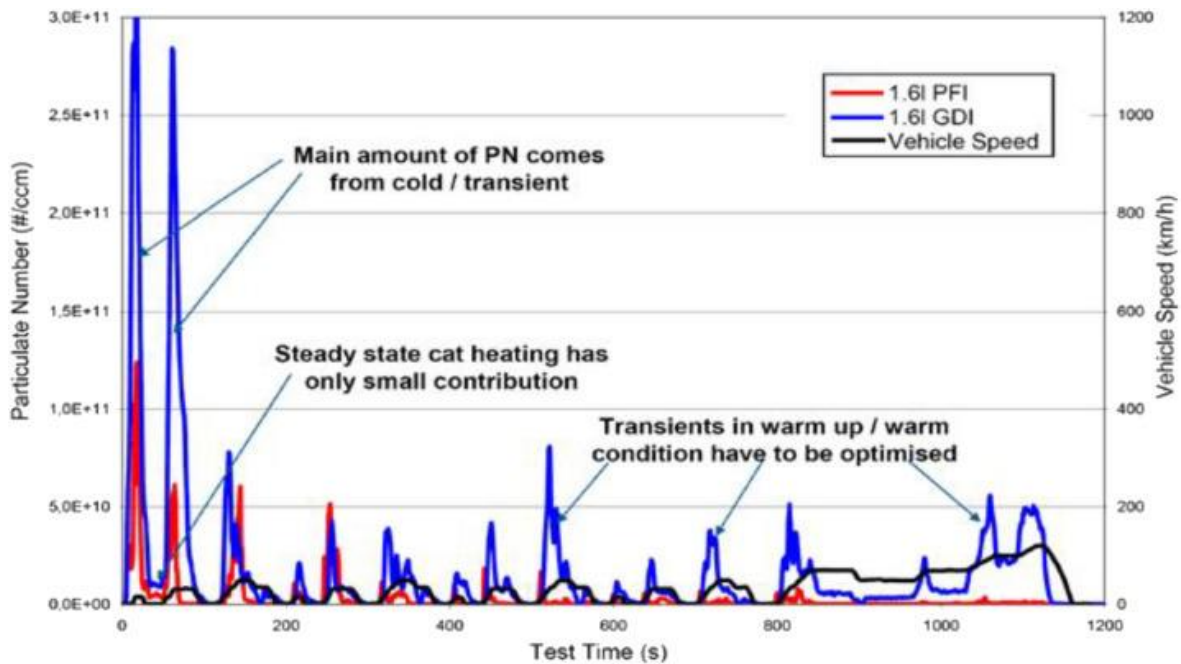
Systémy pro přímé vstřikování benzínu využívají vysokotlaké vstřikování přímo do spalovacího prostoru. Toho je docíleno pomocí vysokotlakého čerpadla. K němu je palivo dopraveno pomocí elektrického palivového čerpadla s podávacím tlakem 0,3 – 0,5 MPa. (3)

Vysokotlaké čerpadlo vytváří systémový tlak. Velikost tohoto tlaku závisí na pracovním režimu motoru. Palivo pod vysokým tlakem poté proudí do tlakového zásobníku. Tlak paliva je udržován v rozmezí od 5 do 12 MPa a je měřen pomocí snímače vysokého tlaku. K regulaci se používá ventil pro regulaci tlaku. (3)

Na tlakovém zásobníku jsou umístěny vysokotlaké vstřikovací ventily, které po aktivaci řídicí jednotkou vstřikují palivo do spalovacího prostoru válce. Palivo je vstřikováno v závislosti na provozním režimu motoru. Různé možnosti provozu motoru jsou označovány jako druhy provozu. Druhy provozu je vybírán podle otáček a požadovaného točivého momentu nebo podle funkčních požadavků, jako je například regenerace katalyzátoru. (3)

Porovnání produkce emisí systémů přímého a nepřímého vstřikování

Benzinové motory vybavené systémem pro přímé vstřikování paliva mají výrazně nižší spotřebu paliva, přibližně o 5 až 15 %, a produkují menší množství emisí CO₂ než motory vybavené vstřikováním nepřímým. Mají vyšší tepelnou účinnost a výkon. Avšak produkují výrazně více pevných částic. Tento jev je patrný na grafu (Obrázek 5), ve kterém je jasně viditelný rozdíl v produkci pevných částic dvou motorů stejného obsahu. Motory se liší pouze systémem vstřikování paliva (PFI – nepřímě vstřikování, GFI – přímé vstřikování). Aby tedy vyhovovali novým emisním normám je třeba přidat filtr pevných částic pro zážehové motory (GPF). (9)



Obrázek 5 Produkce pevných částic v závislosti na rychlosti vozidla (9)

3.3.2. Opatření pro snižování emisí u motoru

Tato opatření přicházejí na řadu až poté co je vytvořena spalovací směs, a různými způsoby zajišťují snížení emisí úpravou spalovacího procesu.

Ovlivněním průběhu spalovacího procesu lze snižovat zejména množství emisí HC a NO_x. Pokud jde o snížení množství nespálených uhlovodíků (HC), tak to je zajištěno potlačením tzv. „zhášecích zón“ a také dohoříváním uhlovodíků v průběhu expanze a výfuku. Množství produkovaných emisí oxidů dusíku (NO_x) lze omezit snížením teploty spalování. Těmito opatřeními je možné snižovat i emise oxidu uhelnatého (CO), kdy je třeba zajistit při spalování přebytek kyslíku a přiměřené teploty spalování. (7) Pro snížení těchto škodlivin lze užít opatření vyjmenovaná níže.

3.3.2.1. Kompresní poměr

Jako kompresní poměr je označován poměr mezi jmenovitým pracovním prostorem válce (kompresní objem + zdvihový objem) a kompresním prostorem (tj. prostor ve válci, který se nachází nad pístem, když je dosaženo horní úvrati). Kompresní poměr značně ovlivňuje tepelnou účinnost motoru a také jeho výkon. Obecně lze říci, že s rostoucím kompresním poměrem roste tepelná účinnost i výkon motoru. (5)

V reálných podmínkách však není možné používat příliš vysoké kompresní poměry, protože u zážehových motorů by docházelo k nesprávnému spalování směsi. Což by se projevilo jako detonační hoření a samozápaly (klepání) a v neposlední řadě i zvýšení emisí škodlivých plynů. (5) Kvůli zvýšenému sklonu ke klepání je pak třeba užití paliva s vyšším oktanovým číslem. (10)

U zážehových motorů se pohybují hodnoty kompresního poměru v rozmezí 7,5 až 14. Toto rozmezí se u různých konstrukčních provedení motorů liší, jiné bude u zážehového motoru dvoudobého a jiné u zážehového s přímým vstřikováním. U dieselových je to o něco více, a to 17 až 24. Rozmezí se opět liší s ohledem na provedení motoru. (10)

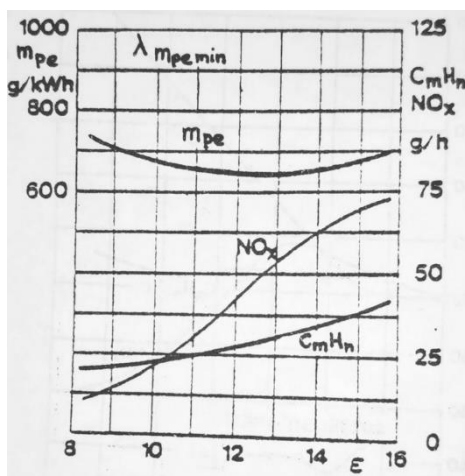
Volba kompresního poměru s ohledem na emise

Jak bylo uvedeno, tak vysoký kompresní poměr má sice příznivý vliv na efektivitu motoru, ne však na emise, které motor produkuje.

Pokud kompresní poměr motoru snížíme, bude to mít příznivý vliv na množství emisí NO_x . K jejich snížení dojde díky tomu, že dojde ke snížení maximální spalovací teploty. Pokud spalujeme stechiometrickou směs ($\lambda = 1$), projeví se to příznivě i na snížení produkce HC. Nepříznivým vlivem snížení kompresního poměru je ale zhoršení tepelné účinnosti, ztráta výkonu a zvýšení měrné spotřeby paliva a měrných emisí (v extrémních případech se mohou zvýšit i emise NO_x). (3)

Tvorbu HC lze do značné míry ovlivnit vhodným tvarem spalovacího prostoru. (3)

Na obrázku 6 jsou viditelné všechny dříve popsané jevy. Je vidět, že křivka NO_x od hodnoty kompresního poměru 8 směrem ke kompresnímu poměru 16 roste, a to podstatně rychleji než křivka znázorňující koncentraci HC. Dále je zřejmé, že pokud jde o měrnou spotřebu paliva (m_{pe}), tak ideální je u tohoto příkladu někde mezi kompresními poměry 12 a 13.



Obrázek 6 Vliv volby kompresního poměru na m_{pe} , HC, NO_x (3)

3.3.2.2. Předstih zážehu

Okamžik zapálení je závislý především na hodnotě otáček a zatížení motoru. Závislost na otáčkách, je důsledkem toho, že při konstantním plnění a konstantním poměru vzduchu a paliva je doba prohoření také konstantní. Kvůli tomu je potřeba dřívějšího zapálení při zvýšení otáček. Závislost na zatížení ovlivňuje ochuzení směsi zbývajícím množstvím zbytkových plynů při nízkém zatížení a menším naplnění válce. Tento vliv zapříčiní zvýšení prodlevy hoření a nižší rychlost prohořívání směsi, což opět vyvolá potřebu dřívějšího zapálení směsi, kterého se docílí tzv. předstihem zážehu. (10)

Předstih zážehu, je takový okamžik, ve kterém dojde k zažehnutí směsi vzduchu a paliva ještě před tím, než píst zážehového spalovacího motoru dosáhne své horní úvrati. Hodnota tohoto parametru se udává buď jako vzdálenost pístu od horní úvrati v milimetrech nebo jako úhel o který se musí klikový hřídel ještě pootočit, aby bylo dosaženo horní úvrati ve stupních. Pokud jsou hodnoty tohoto parametru kladné, tak to znamená, že k zažehnutí směsi dojde před dosažením horní úvrati, tzn. když se píst pohybuje nahoru a dochází ke stlačování směsi. Díky tomu, že má předstih zapalování výrazný vliv na průběh spalování, tak ovlivňuje i měrnou spotřebu paliva a výkon. (3)

Vlivy předstihu zážehu

Tím, že se zmenší úhel předstihu zapalování pod optimální hodnoty se snižuje teplotní účinnost a vzrůstá měrná spotřeba paliva. Současně se však dosahuje poklesu maximální teploty spalování a vzrůstu teploty výfukových plynů, což má za následek snížení emisí NO_x a HC. (3)

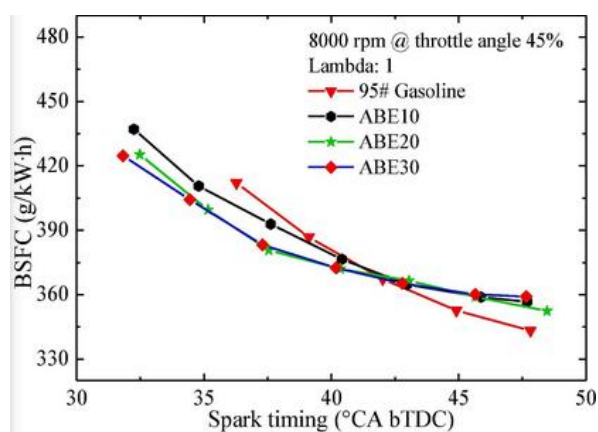
Zvýšením předstihu se dosahuje zvýšení točivého momentu na úkor zvýšeného klepání motoru. (3)

Z těchto důvodů je třeba volit rozumný kompromis. Bod zážehu by měl být zvolen tak, aby byly dodrženy požadavky na maximální moment motoru, nízkou spotřebu paliva, nízké emise a odstraněno klepání motoru. (3)

Na následujících grafech jsou viditelné vlivy různého načasování zážehu směsi u zážehového motoru při 8000 otáčkách za minutu a spalování stechiometrické směsi na měrnou spotřebu paliva a emise.

Měrná spotřeba

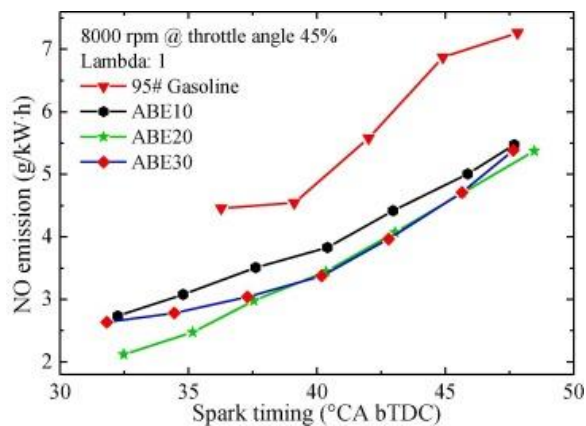
Z tohoto grafu (Obrázek 7), je patrné, že při zvyšování hodnoty předstihu dochází ke snižování měrné spotřeby paliva.



Obrázek 7 Závislost měrné spotřeby paliva na předstihu zážehu (12)

Emise NO

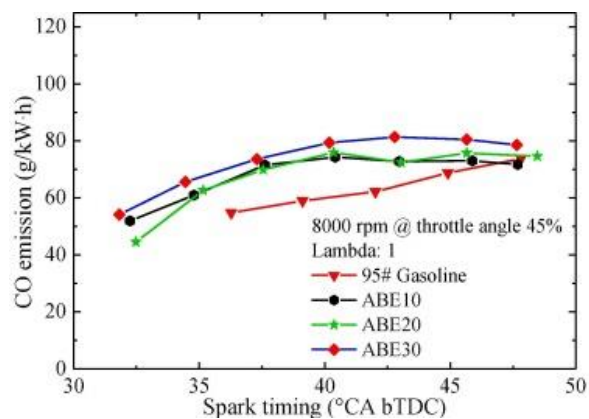
Na tomto grafu (Obrázek 8), je viditelné, že pokud se zvyšuje hodnota předstihu, tak dochází ke zvyšování produkce emisí NO.



Obrázek 8 Závislost produkce NO na předstihu zážehu (12)

Emise CO

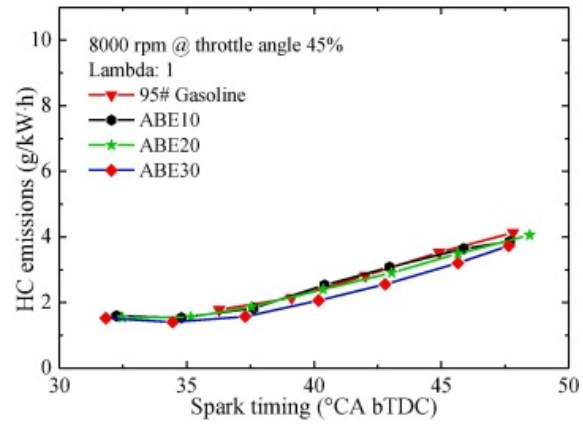
Graf (Obrázek 9) ukazuje závislost množství produkovaných emisí CO na předstihu zážehu. Je zde patrné, že čím větší je předstih, tím více se zvýší produkce CO, zejména u standartního benzínu (červená křivka). U ostatních typů lze pozorovat od určitého bodu dokonce mírný pokles.



Obrázek 9 Závislost produkce CO na předstihu zážehu (12)

Emise HC

Míra produkce emisí HC se mírně zvyšuje se zvyšující se hodnotou předstihu zážehu, což lze pozorovat z grafu popisujícího závislost těchto dvou hodnot (Obrázek 10).



Obrázek 10 Závislost produkce HC na předstihu zážehu (12)

3.3.2.3. Recirkulace výfukových plynů

Je dalším z opatření snižujících emise u motoru, které slouží ke snížení emisí zážehových spalovacích motorů.

Tím, že se provádí recirkulace určitého množství výfukových plynů, lze výrazně snížit emise NO_x . Výfukové plyny, díky jejich malému obsahu kyslíku (O_2), lze považovat za inertní plyny. Tento plyn se mísí s čerstvou směsí paliva a vzduchu. Díky tomu, že jsou výfukové plyny inertní, se přímo neúčastní spalování, takže přejímají teplo a tím snižují maximální teplotu spalování. Což má příznivý vliv na množství produkovaných emisí NO_x , které vznikají zejména při spalování za vysokých teplot. (7)

Způsoby recirkulace výfukových plynů lze rozdělit do dvou základních skupin. Je to recirkulace vnitřní a recirkulace vnější. (3)

Vnitřní recirkulace

Při vhodném otevírání a zavírání sacích a výfukových ventilů dochází k tzv. vyplachování válců tzn. výměně spálené směsi, která je ve válci za čerstvou. Průběh vyplachování válců je dán tvarem vačkové hřídele, která určuje časování ventilů. Má tedy vliv na okamžiky otevření a zavření sacích a výfukových ventilů a také křivky jejich zdvihů. Množství čerstvého vzduchu je určeno výkonem a točivým momentem motoru. Množství nespálené směsi, které zůstane ve válci a není během otevření výfukového ventilu vytlačeno, ovlivňuje zapálení a průběh spalování směsi paliva a vzduchu. (10)

Vnitřní recirkulace funguje na principu překrytí doby otevření sacího a výfukového ventilu v okamžiku, kdy dochází k výplachu válce. Sací ventil se otevírá před zavření ventilu výfukového. Dle velikosti tohoto překrytí se výfukové plyny tlačí do sacího kanálu výtlačným pohybem pístu a částečně jsou nasávány do válce z výfukového kanálu. Následkem toho je zvýšené množství zbytkových plynů ve válci. Motory s velkým překrytím ventilů mají poměrně nízké emise NO_x . Nelze však toto překrytí libovolně navyšovat, protože poté dochází ke zhoršení stability chodu motoru, což vede k vynechání zápalů a růstu emisí CH. (7) Zároveň je velmi nevýhodná při volnoběhu, proto je třeba časování překrytí ventilů pro volnoběžný režim upravit. (3) Velikost podílu výfukových plynů tohoto

typu recirkulace je díky překrytí ventilů závislá na provozním stavu motoru a je dána konstrukcí motoru. (10)

Pro dosažení zákony požadovaných emisních limitů však zpravidla vnitřní recirkulace není dostačující, a proto se přistupuje na recirkulaci vnější. (7)

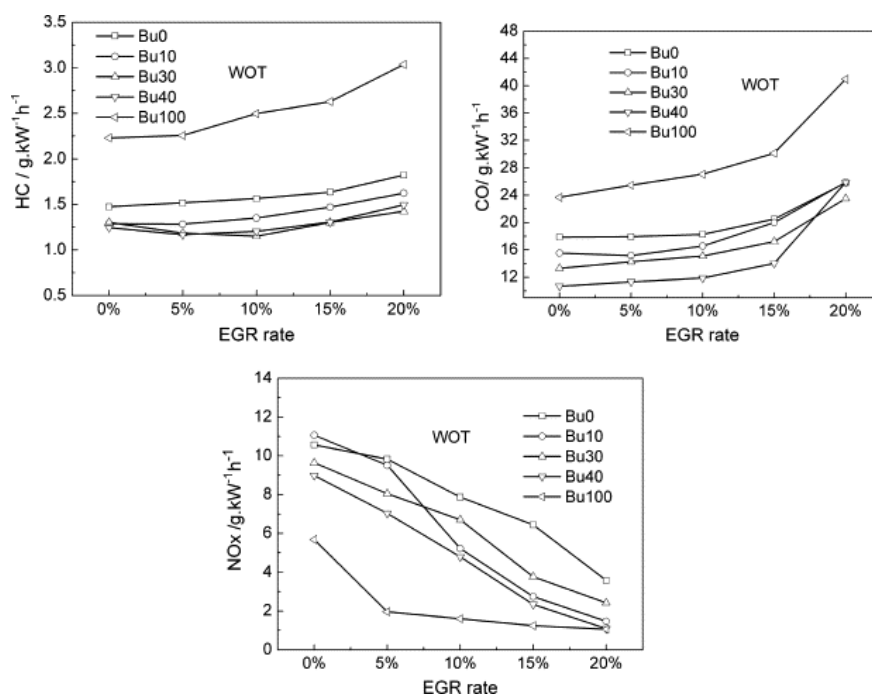
Vnější recirkulace

Využívá se, pokud je potřeba dosáhnout většího ovlivnění podílu inertních plynů ve válci. Funguje tak, že již vytlačené výfukové plyny se potrubím přivádí zpět k sacímu potrubí. Tento proces je zajišťován elektronickým ventilem recirkulace spalin (EGR ventil), který je řízen řídicí jednotkou. Průtočný průřez EGR ventilu je tedy řízen řídicí jednotkou. Tímto průřezem je odebírána část výfukových plynů, která se poté přivádí do nasávaného čerstvého vzduchu. Tímto je možné regulovat podíl spalin v náplni válce. (10)

Vliv recirkulace výfukových plynů na produkci emisí

Hlavní funkcí recirkulace spalin je snížení emisí NO_x . Důležitým parametrem je recirkulující množství, které se označuje EGR %. V závislosti na něm lze snížit emise NO_x o 50 až 60 %, ovšem za cenu již dříve zmíněného navýšení emisí HC a CO. Pokud není recirkulující množství příliš velké tzn. jeho hodnota se nachází kolem 10 až 15 % (3)

Následující grafy produkce emisí (Obrázek 11) jsou vytvořeny na základě měření s více druhy benzínu, což pro účely této práce není příliš podstatné, ale je na nich poměrně dobře zachycena změna množství emisí v závislosti na recirkulujícím množství.



Obrázek 11 Vliv recirkulačního množství na emise při plně otevřené škrtkové klapce (15)

Poloha zapalovací svíčky

Poloha zapalovací svíčky ve spalovacím prostoru je aspektem, který má také poměrně významný vliv, jak na spotřebu paliva, tak tvorbu škodlivých emisí. Při použití centrální polohy s krátkou dráhou plamene je dosaženo rychlé a relativně úplné přeměny, což vede k nízkým hodnotám emisí HC. Pokud jsou použity dvě svíčky pro jeden spalovací prostor, může dojít k ještě většímu zkrácení dráhy plamene. To má příznivý vliv na spotřebu paliva a emise škodlivých plynů. Navíc u kompaktního spalovacího prostoru s centrální zapalovací svíčkou nebo dvěma svíčkami se snižují nároky na oktanové číslo paliva. To je možné využít ke zvýšení kompresního poměru a s ním účinnosti motoru. (10)

Tvar spalovacího prostoru

Tento parametr má velmi významný vliv na hodnotu nespálených HC. Je to způsobeno tím, že tyto škodliviny vznikají zejména ze sloupců a vrstev poblíž stěny válců. Jsou způsobeny složitými spalovacími prostory s vysokým poměrem povrchu. Z těchto důvodů je výhodné užití kompaktních spalovacích prostorů s malým povrchem. Takové spalovací prostory redukuje díky turbulenci při vyplňování spalovacího prostoru a rychlosti spalování nárok na oktanové číslo. Toho je možné využít ke zvýšení kompresního poměru a lehčí realizaci koncepce motorů s chudou směsí. Tím je možné dosáhnout nízkého obsahu škodlivých složek ve výfukových plynech při dobré účinnosti. (10)

3.3.3. Opatření pro snižování emisí za motorem

Tato opatření a zařízení slouží k odstranění emisí až za motorem, tedy přicházejí na řadu až po přípravě směsi a jejím spálení. Jejich hlavním úkolem je odstranění škodlivin, které vznikly nedokonalou přípravou směsi a nedokonalostmi při jejím spalování. Tyto škodliviny jsou obsaženy ve výfukových plynech a řadí se mezi ně nespálené uhlovodíky (HC), oxid uhelnatý (CO) a oxidy dusíku (NO_x).

V současnosti se pro snižování emisí výfukových plynů zážehových spalovacích motorů používají zejména katalyzátory. Kvůli nedokonalé přípravě směsi a nedokonalostem při procesu jejího spalování, vznikají škodlivé emise HC, CO a NO_x. Tyto emise jsou poté obsaženy ve výfukových plynech a úkolem katalyzátoru je způsobit nebo urychlit jejich přeměnu na látky neškodné. (3)

Dále jsou vyjmenovány a zjednodušeně popsány principy činností jednotlivých způsobů, které se používají pro snížení emisí za motorem.

3.3.3.1. Dodatečné reakce v klasickém výfukovém systému

Pokud je třeba dosáhnout dodatečné reakce (oxidace) ve výfukovém systému, je nutné splnit základní podmínky. Musí být dostatečně vysoká teplota a také dostatečně vysoké množství kyslíku ve výfukových plynech. Jsou-li obě podmínky splněny, pak dochází k dodatečné oxidaci CO a HC v průběhu výtoku z válce a ve výfuku až do chvíle, než je teplota příliš nízká a reakce se zastaví, tzv. zamrznou. (7)

Jestliže je spalována bohatá směs, musí se do výfukového potrubí (v blízkosti výfukového ventilu) přivádět přídavný vzduch s obsahem kyslíku. Pro zajištění dostatečného množství vzduchu je možné použít i vzduchové mechanické pumpy. Tento proces může být zajišťován například systémem Manifold Air Oxidation, který pro svou správnou činnost potřebuje teploty přes 800 °C. Takových teplot je možno dosáhnout spalováním bohaté směsi, nebo zpožděním zážehu atd. (7)

Tento systém snižování emisí má řadu nevýhod. Pokud je motor zatěžován pouze částečně, tak není dosaženo dostatečně vysokých teplot. Při studených startech tento systém nefunguje, až do doby, než je dosaženo provozní teploty. Teplo, které je ve velké míře odváděno výfukem má za následek snížení teplotní účinnosti motoru. Protože, je u tohoto systému jako dodatečná reakce využita pouze oxidace, nedochází zde k redukci NO_x.

V současnosti jsou účinky tohoto opatření považovány za nedostatečné kvůli krátké reakční době ve výfuku a rychlému ochlazení systému. (7)

3.3.3.2. Termické reaktory

Pracují na stejném principu jako předchozí řešení s úpravami pro zlepšení podmínek dodatečné oxidace CO a HC. Zajišťují dostatečně dlouhou reakční dobu při vysokých teplotách a při dostatečném obsahu kyslíku. (7)

Delší doby setrvání výfukových plynů v reaktoru je docíleno jeho velkým objemem. V reaktoru je dvou až trojnásobné obrácení proudu výfukových plynů. Vysokých teplot se dosahuje izolací odvodu tepla, keramickým vystláním výfukového potrubí od motoru k reaktoru nebo bezprostředním připojením reaktoru k hlavě válců. (7)

Termické reaktory je možné rozdělit do dvou skupin. Rozlišujeme tzv. reaktory bohaté (spalování bohatých směsí) a chudé (spalování chudých směsí). Jejich hlavní odlišností je to, že bohatý reaktor potřebuje pro svou správnou činnost přívod sekundárního vzduchu. To souvisí se zvýšením počtu dílů (vzduchové dmychadlo, regulační ventily atd.). (7)

Pokud je užíván bohatý reaktor, je bohatost směsi seřízena na hodnotu $\lambda = 0,8$ až $0,9$. Přídavný vzduch je vefukován do výfukového potrubí co nejbližší výfukovému ventilu a měl by zajisti výslednou hodnotu $\lambda = 1,1$. Probíhajícími oxidacemi v reaktoru je dosahováno výrazného snížení emisí CO a HC. Emise NO_x jsou dostatečně nízké, protože spalování probíhá s bohatou směsí. Za hlavní nevýhodu toho typu reaktoru lze považovat zvýšení měrné spotřeby paliva při jeho použití. Ke zvýšení tepelné izolace se používá keramická výstelka výfukového kanálu. (7)

Hodnoty bohatosti směsi pro chudý reaktor jsou $\lambda = 1,05$ až $1,4$. Tím je dosaženo malé počáteční koncentrace CO. Velkou nevýhodou jsou vysoké emise NO_x při spodní hranici rozsahu přebytku vzduchu. Z tohoto důvodu je snaha posunout směšovací poměr co nejdále do oblasti chudých směsí a využití recirkulace výfukových plynů. Pro tento typ reaktoru má velký význam jeho objem a doba setrvání plynů v něm. (7)

V první fázi činnosti dochází k oxidaci HC a tvorbě CO a tím pádem nárůstu jeho obsahu. Teprve po výrazném snížení obsahu HC dochází k oxidaci CO na CO₂. Pro úplnou oxidaci CO, který je obsažen ve výfukových plynech, je potřebná doba setrvání v reaktoru při teplotě 700 °C rovna přibližně 150 ms. Hrozí nebezpečí, že při nesprávné funkci tohoto typu reaktoru dojde ke zvýšení emisí CO. (7)

Nebezpečí hrozící u obou typů termických reaktorů je, že při vynechání zápalu ve válci motoru může dojít k jejich propálení. Počátek zavádění termických reaktorů se datuje do 70. let minulého století, kdy se začaly používat v Kalifornii. Z těchto dvou typů se výrazněji uplatnily chudé reaktory. Rychlým vývojem oxidačních katalyzátorů a bezolovnatých benzínů byl jejich význam potlačen. (7)

3.3.3.3. Katalytické reaktory

Již řadu let jsou katalytické reaktory používány v různých technologických zařízeních v chemickém průmyslu. (7) Chemicky je katalyzátor taková látka, která reakci ovlivňuje ale přímo se jí neúčastní. Katalyzátor tedy není filtr, který by zachycoval nečistoty, ale působí svou přítomností. (3)

Od doby, kdy byly v automobilech katalyzátory poprvé použity (počátek 80. let minulého století), se jejich technika měnila. Katalyzátorem jsou vrstvy drahých kovů, jejichž úkolem je vyvolání reakce produktů, vzniklých nedokonalým hořením, se zbytkovým kyslíkem obsaženým ve výfukových plynech, a to při nižších teplotách než reaktory termické. Pro urychlení oxidační reakce mohou být použity např. platina nebo paladium a pro urychlení reakce redukční rhodium, případně ruthenium. (7)

Schopnost katalyzátoru urychlit určitou reakci tak, aby došlo k neutralizaci toxických látek na netoxické se nazývá selektivnost. Čím vyšší tato schopnost je tím lépe. (7)

Katalyzátory lze považovat za poměrně efektivní metodu sloužící ke snížení množství škodlivých látek ve výfukových plynech. Na začátku jejich použití se v automobilech vyskytovaly ojediněle, dnes je však výroba automobilu bez katalyzátoru téměř nemyslitelná z důvodu potřeby dodržení emisních limitů, které jsou dány zákony. K jejich hojnému nasazování vedly také další důvody. Jedním z nich je snížení reakční teploty, které souvisí s nižším tepelným zatížením a také to, že účinek probíhajících reakcí již není tolik závislý na teplotě. Také při srovnatelné teplotě došlo ke zrychlení reakcí. Zároveň katalytický reaktor může pracovat ve větším rozmezí pracovních režimů motoru. (7)

Katalyzátory lze rozdělit do třech základních skupin, kterými jsou oxidační katalyzátory, redukční katalyzátory a katalyzátory kombinované.

Oxidační katalyzátor

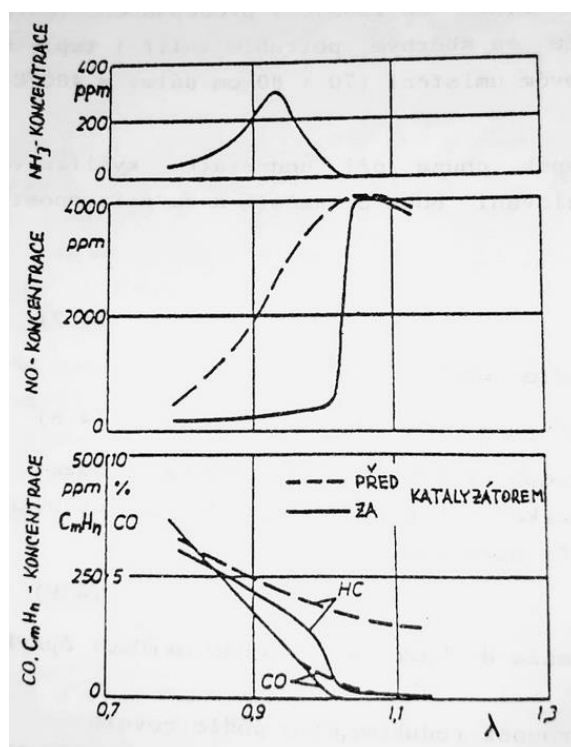
Hlavním znakem oxidačního katalytického reaktoru je to, že pracuje s přebytkem vzduchu. Pomocí oxidace (tj. spalování) přeměňuje jedovatý oxid uhelnatý (CO) a uhlovodíky na vodní páru a oxid uhličitý. V tomto typu katalyzátoru však téměř nedochází ke snížení obsahu oxidů dusíku (NO_x) ve spalínách. Kyslík potřebný k oxidaci se u motorů s přímým vstřikováním získává většinou spalováním chudé směsi s přebytkem vzduchu ($\lambda > 1$), případně je třeba před katalyzátor vefukovat vzduch. (10)

Vliv na rychlost reakcí mají koncentrace reagujících složek, rychlost proudění výfukových plynů a teplota. Poměrně výrazný vliv má také vzdálenost od ventilů. Čím blíže se katalyzátor nachází, tím rychleji při studeném startu začne fungovat. Je zde ale i riziko přehřátí. Při běžném umístění se teploty v katalyzátoru pohybují kolem 400 °C. (7)

Redukční katalyzátor

Od oxidačního katalyzátoru se redukční liší tím, že redukční reakce probíhají naopak pouze pokud je kyslíku nedostatek. To znamená při spalování bohaté směsi ($\lambda < 1$) a za přítomnosti redukčních komponent, kterými jsou oxid uhelnatý (CO) a vodík (H_2). V případě nedostatečné aktivity katalyzátoru při redukcí může docházet k tvorbě nežádoucího a jedovatého čpavku (NH_3). Čpavek však může někdy napomoci odstranění NO_x z výfukových plynů. Je pro to však zapotřebí dodržet určité podmínky. Tomuto procesu se říká selektivní katalytické redukce (SCR) a v současné době je využíván u vznětových motorů. (7)

Koncentrace škodlivin je přímo závislá na součiniteli přebytku vzduchu (λ). Změny koncentrací škodlivin ve výfukových plynech před a za redukčním katalyzátorem jsou viditelné v grafu vyjadřujícím množství škodlivin v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu (λ) (Obrázek 12). Je zřejmé, že u chudých směsí ($\lambda > 1$), není možná redukce oxidu dusnatého (NO), protože ve výfukových plynech se vyskytuje volný kyslík. Dochází proto k oxidaci vzdušným kyslíkem na oxidy dusíku.



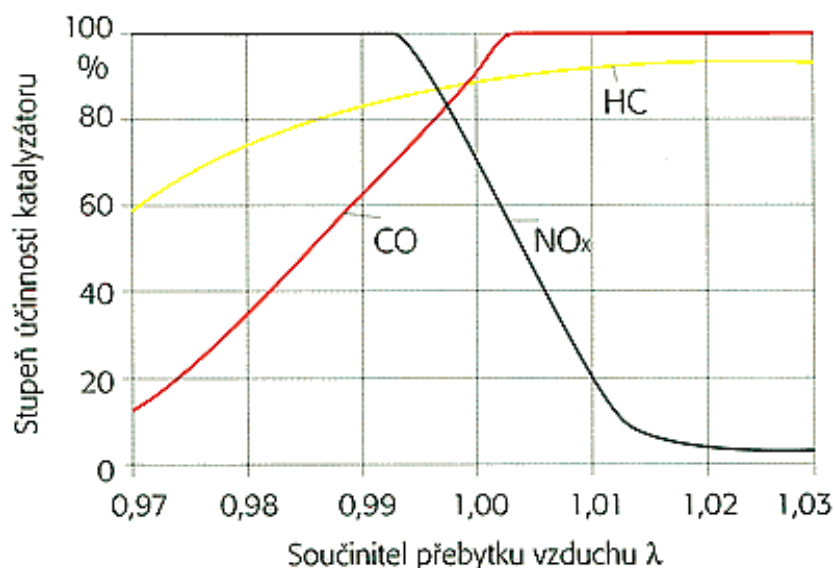
Obrázek 12 Snižení koncentrace škodlivin při použití redukčního katalyzátoru (7)

Třícestný katalyzátor

Třícestný se tento typ katalyzátoru nazývá, protože je schopný účinné dodatečné likvidace tří hlavních skupin škodlivin. Je možné používat zkratku TWC (Three Way Catalyst), nebo označení oxidačně-redukční katalyzátor, ze kterého je jasně patrné, které dvě reakce uvnitř tohoto katalyzátoru probíhají současně. Je to oxidace a redukce. (3)

Podmínkou potlačení všech třech hlavních škodlivin v katalyzátoru (tzn. správného proběhnutí redukce i oxidace), je složení směsi paliva a vzduchu co nejbližší ke stechiometrické hodnotě. To znamená že součinitel přebytku vzduchu musí být v rozmezí $\lambda = 0,99$ až 1. Právě při takovémto složení čerstvé směsi je ve výfukových plynech obsažen dostatek kyslíku, který je potřebný pro oxidaci CO a nespálených HC, a zároveň dostatek CO i nespálených HC potřebných pro redukci NO_x . Závislost hodnot produkovaných emisí na λ je viditelná v grafu (Obrázek 13). (3)

Z důvodu vysokého požadavku na přesnost hodnoty součinitele přebytku vzduchu (musí se pohybovat v rozmezí $< 1\%$) je nevhodnější tyto katalyzátory používat pro motory se vstřikováním. U motorů, kde se ke tvorbě směsi používá karburátor, zpravidla nelze tak přesné regulace součinitele přebytku vzduchu dosáhnout. (7)



Obrázek 13 Závislost množství emisí CO, NO_x a HC na součiniteli přebytku vzduchu λ (3)

K co nejpřesnějšímu zachování tohoto poměru napomáhá lambda sonda (popsána v další části), která je umístěna ve výfukovém potrubí před katalyzátorem a jejím úkolem je měřit

množství kyslíku ve výfukových plynech. Následně podle tohoto údaje nastaví řídicí jednotka množství dodávaného paliva. Systém pracující tímto způsobem se nazývá řízený třícestný katalyzátor, navzdory tomu, že nemá žádný řídicí prvek, ani tři cesty. (3)

Aby katalyzátor pracoval tak, jak má, musí dosáhnout určité teploty. Optimální pracovní teploty jsou v rozmezí od 250 do 800 °C. To znamená, že dokud katalyzátor nedosáhne teploty 250 °C, je neúčinný. Doba do dosažení této teploty je cca 30 až 90 sekund po startu studeného motoru. Poté už katalyzátor začne fungovat. Avšak při nižších teplotách (do 600 °C), se značně projevuje zanášení aktivní plochy katalyzátoru (otrávení), ale termické stárnutí je pomalé. V rozmezí teplot od 600 do 800 °C, se zanášení katalyzátoru snižuje, avšak termické stárnutí se zvyšuje. Z důvodu potřeby určité (poměrně vysoké) teploty, je zřejmé, že pro účinnost katalyzátoru není vhodný městský režim provozu, ve kterém dochází ke snížení teploty výfukových plynů. (3)

Z hlediska životnosti katalyzátoru má poměrné zásadní vliv volba jeho umístění. Pokud je katalyzátor umístěn blíže k motoru, zkrátí se doba náběhu jeho činnosti, ale později hrozí přehřívání katalyzátoru, což sníží jeho životnost. Pokud se katalyzátor umístí dále od motoru, tak se sice doba náběhu činnosti prodlouží, ale má to příznivý vliv na jeho životnost. V současné době se upřednostňuje umístění katalyzátorů dále od motoru, a dokud nedosáhnou pracovní teploty, jsou vyhřívány cizím zdrojem (např. elektricky). (3)

Tyto katalyzátory jsou schopné snížit hodnoty emisí HC, CO a NO_x až o 90 % jejich původní hodnoty. (10)

I přes velké množství výhod je provoz katalyzátoru doprovázen i určitými problémy. Dochází k jeho zanášení, což snižuje jeho účinnost. Při teplotách kolem 1000 °C dochází k výraznému tepelnému stárnutí a v extrémních případech může dojít k propálení katalyzátoru. Jeho použitím se zvýší protitlak ve výfuku, který zvýší spotřebu paliva. (7)

Sběrný (zásobníkový) katalyzátor NO_x

Tento typ katalyzátoru je využíván u motorů s přímým vstřikováním paliva (FSI). Při spalování vrstvené směsi kdy $\lambda > 1$ dochází ke vzniku velkého množství emisí NO_x, které není schopen běžný katalyzátor odstranit. Sběrný katalyzátor je napojen na třícestný katalyzátor, který je ve výfukovém potrubí umístěn před ním. Celý poté pracuje v režimu $\lambda = 1$, jako hlavní třícestný katalyzátor.

Konverze NO_x neprobíhá kontinuálně, jako konverze CO a nespálených HC, ale probíhá ve třech stupních. Nejprve proběhne již zmíněné ukládání NO_x , následuje jejich uvolnění, po kterém nastane konverze NO_x . (10)

Při provozu s přebytkem vzduchu jsou oxidy dusíku ukládány na povrch oxidů baria ve formě bariumnitrátů. (3)

Vzhledem k tomu, že kapacita sběrného katalyzátoru není neomezená, musí každých 30 až 60 sekund probíhat jeho regenerace, která je prováděna přepnutím do režimu provozu s bohatou směsí na dobu 1-2 sekundy. (3) S rostoucím množstvím uložených oxidů dusíku klesá schopnost katalyzátoru vázat další oxidy dusíku. Ukládací schopnost zásobníkového katalyzátoru je výrazně ovlivňována teplotou. Maximálních hodnot dosahuje v rozmezí od 300 do 400 °C. Tyto teploty jsou však mnohem nižší, než teploty vhodné pro optimální provoz třícestného katalyzátoru. Z tohoto důvodu, je třeba používat pro katalytické čištění výfukových plynů dva oddělené katalyzátory. Třícestný umístěný blíže k motoru a sběrný, který je umístěn dále od motoru (pod podlahou vozidla). (10)

Uvolnění NO_x probíhá reakcí oxidu uhelnatého (CO) s dusičnanem barnatým ($\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$). Výslednými produkty této reakce jsou oxid barnatý (BaO), oxid uhličitý (CO_2) a oxid dusnatý (NO). (10)

Ukončení uvolňování NO_x je měřeno lambda sondou, která je umístěna za sběrným katalyzátorem. Pomocí ní je kontrolována koncentrace kyslíku ve spalínách. Pokud je uvolňování ukončeno, dojde ke skoku napětí na lambda sondě v oblasti přechodu z chudé směsi na bohatou. Případně lze využít i pro výpočet množství oxidů dusíku dosud obsažených v zásobníkovém katalyzátoru. (10)

3.3.3.4. Lambda sonda a lambda regulace

Lambda sonda je čidlo měřící složení výfukových plynů, které je ve výfukovém potrubí vystaveno jejich proudu. Prostřednictvím elektrického signálu podává řídicí jednotce informace o okamžitém složení směsi spalín (přesněji o odchylce složení od hodnoty $\lambda = 1$), díky čemuž může řídicí jednotka upravit tvorbu čerstvé směsi. (10)

Tato sonda je jedním z nejdůležitějších prvků systémů, které zajišťují snížení emisí. Lze pomocí ní řídit směšovací poměr, což z ní ve spojení s katalyzátorem tvoří jeden z nejúčinnějších prostředků pro snížení emisí produkovaných zážehovým spalovacím

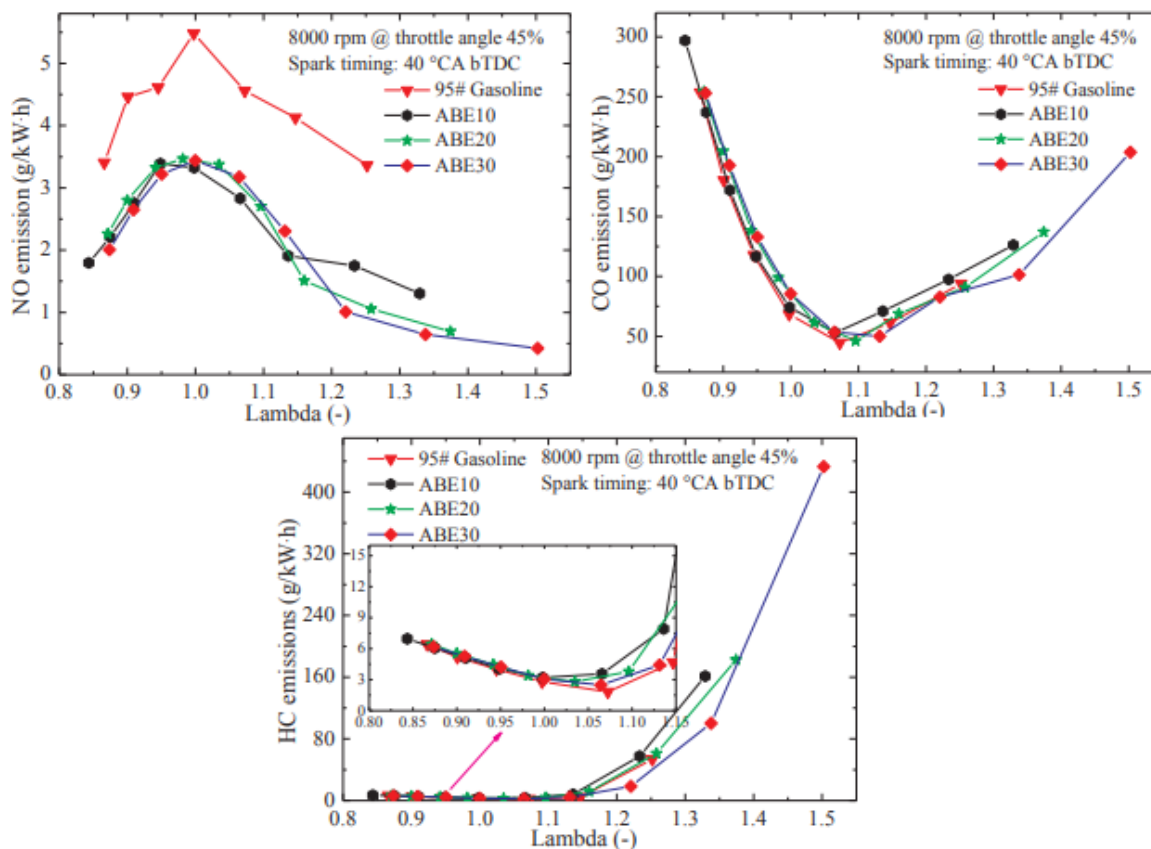
motorem. (7) V současnosti neexistuje žádný jiný alternativní systém, díky kterému by bylo dosahováno podobně výrazného snížení emisí. Dnes používané zapalovací a vstřikovací systémy jsou schopny dosáhnout velmi nízkých hodnot. Dalšího snížení je poté dosaženo pomocí katalyzátorů. (10)

Ve výfukovém potrubí jsou zpravidla umístěny dvě lambda sondy. První z nich je umístěna ve výfukovém potrubí před katalyzátorem a je pomocí ní měřen obsah kyslíku ve spalinách. Při chudé směsi ($\lambda > 1$) je její napětí zhruba 100 mV, pokud je směs bohatá ($\lambda < 1$), tak se napětí zvýší přibližně na 800-1000 mV. Při $\lambda = 1$ skočí z jedné úrovně napětí na druhou a této hodnotě přísluší rozmezí napětí cca 450-500 mV. (10)

Druhá lambda sonda, která je umístěna až za katalyzátorem, je oproti té první lépe chráněna před znečištěním výfukovými plyny. Díky této sondě je regulace sondy před katalyzátorem překryta druhou regulací a díky tomu je zajištěna dlouhodobá stabilita složení směsi. Překrytí regulace mění nesymetričnost trvalé oscilace regulace se sondou před katalyzátorem a tím je kompenzováno lambda posunutí. Použití samotné sondy za katalyzátorem není možné, protože díky dlouhé době prodění plynů by tato regulace byla příliš pomalá. (10)

Pomocí lambda sondy je tedy prováděna tzv. lambda regulace. Ta může začít fungovat až poté, co motor dosáhne určité teploty. Studené motory totiž ke svému rovnoměrnému chodu potřebují bohatší směs. Pokud je lambda regulace aktivní, je napěťový signál z lambda sondy přeměněn pomocí komparátoru (porovnávací obvod) na dvoubodový signál. Signálem je dáván podnět regulačnímu obvodu, aby změnil ovládací veličiny. Délka trvání vstřiku může být zkrácena případně prodloužena podle toho, zda je směs chudá nebo bohatá. (10)

V grafech (Obrázek 14), je zobrazena závislost produkce emisí (CO, HC a NO) na součiniteli přebytku vzduchu (λ). Jednotlivé křivky v grafech jsou měření s různými typy benzínu a je patrné, že i když se mírně liší, tak jich tvar zůstává přibližně stejný.



Obrázek 14 Vliv součinitele přebytku vzduchu (λ) na emise (12)

Nejvíce rozšířeným typem lambda sond jsou vyhřívané s keramikou z dioxidu zirkonia. Tyto lambda sondy fungují na principu galvanického kyslíkového článku s elektrolytem jako pevnou látkou. Ten se skládá z jednostranně uzavřeného keramického tělíska u dioxidu zirkonia. Tato sloučenina má funkci vodiče kyslíkových iontů a odděluje prostor spalin ve výfuku od čistého vzduchu, který slouží jako referenční plyn. Povrchové plochy jsou z obou stran opatřeny elektrodami tvořených vzduch propouštějící tenkou vrstvou platiny. Keramický materiál se stává při teplotě nad 350 °C vodivým pro ionty kyslíku. (10) Je-li teplota výfukových plynů příliš nízká, vyhřívá keramiku elektrické topení. (7) Pokud je na opačných stranách sondy různý podíl kyslíku, vzniká mezi hraničícími plochami elektrické napětí. K ochraně keramického tělíska před mechanickým poškozením a teplotními šoky se používá kovová trubička s více otvory. (10)

Dalším typem je lambda sonda planární. Je dalším vývojem prstovité lambda sondy. Planární znamená, že elektrolyt v pevné fázi je tvořen rovinnými fóliemi. Planární element má tvar dlouhé destičky obdélníkového průřezu. Jednotlivé vrstvy jsou zhotovovány síťotiskovou technologií. Díky překrytí různých potištěných fólií je možné do elementu snímače také integrovat vyhřívaný element. Planární element je v tělese sondy držen keramickým těsnícím svazkem. Snímač je chráněn dvouplášťovou ochrannou trubicí. Funkční teploty 350 °C je sonda díky vyhřívání schopna dosáhnout za 10 sekund. (10)

3.3.4. Vliv použitého typu paliva na produkci emisí

Produkce emisí zážehových motorů není ovlivněna pouze dříve jmenovanými opatřeními. Poměrně značný vliv na množství škodlivých látek ve výfukových plynech má i typ paliva, které je pro pohon motoru používáno.

Dělení paliv pro pístové spalovací motory, dle zdroje, ze kterého jsou získávány

- fosilní uhlovodíková (získávaná převážně z ropy)
 - kapalná (benzín, nafta atd.)
 - plynná (zemní plyn, propan – butan)
- paliva získávaná z biomasy
 - bioethanol
 - rostlinné oleje a jejich estery
 - bioplyn
- vodík (možné palivo budoucnosti)

3.3.4.1. Plynná uhlovodíková paliva

Plynná paliva lze z hlediska přípravy směsi považovat za vhodnější, než jsou paliva kapalná. Při jejich použití dochází k lepšímu promísení a snadnějšímu dodržení směšovacího poměru paliva se vzduchem. Díky těmto vlastnostem je poté ve výfukových plynech obsaženo menší množství emisí. Mají lepší antidetonační vlastnosti než paliva kapalná, a nezpůsobují ve spalovacím prostoru vznik karbonových úsad. (3)

Nevýhoda bránící většímu rozšíření plyných paliv, je nesnadná distribuce a skladování. Zároveň díky své malé energetické hustotě vyžadují poměrně velký zastavěný objem pro umístění zásobníku do vozidla. (3)

Propan-butan (LPG)

LPG jak už anglický název napovídá (Liquefied petroleum gas), je směs zkapalněných uhlovodíkových plynů. Vzniká v rafinériích při zpracování ropy a také se získává jako vedlejší produkt při těžbě zemního plynu. (11)

Propan a butan jsou vysoce výhřevné plyny, které se snadno zkapalňují. Při zkapalnění dochází ke zmenšení objemu 250:1, což znamená že z 250 l plynu získáme 1 l kapaliny. (11)

Pokud srovnáme klasický automobilový benzín s LPG, tak zjistíme, že LPG má lepší antidetonační vlastnosti. Oproti benzínu má však menší objemovou výhřevnost. Z toho vyplývá, že při shodném kompresním poměru dochází k nárůstu spotřeby o 20 až 30 %. (2)

Mezi hlavní výhody LPG oproti benzínu patří například: nižší produkce emisí (zejména u starších vozidel, u nových je tento rozdíl téměř zanedbatelný), snížení provozních nákladů (i přes zvýšenou spotřebu při použití LPG, díky jeho nižší ceně), přestavbou vozidlo neztrácí možnost pohonu benzínem, vyšší dojezd díky dvěma nádržím (benzín a LPG) atd. (2)

Zemní plyn (CNG, LNG), srovnání s benzínem

Zemní plyn je tvořen metanem (více jak 90 %), etanem (1 až 6 %) a nehořlavými složkami (dusík, oxid uhličitý atd.). Kvalita zemního plynu se stoupajícím množstvím nehořlavých složek klesá. (3)

Použití zemního plynu má nevýhodu. Jeho použití vyžaduje velký zástavbový objem a palivové zásobníky mají velkou hmotnost. (3)

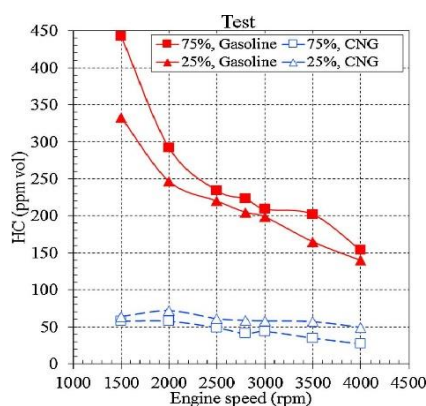
Převážně se zemní plyn používá stlačený (CNG) v tlakových lahvích. Stlačením zemního plynu (plnicí tlak 20 MPa), se jeho objem zmenší 200krát. V této formě je v jednotce objemu 4 – 5krát menší množství energie, než v kapalných uhlovodíkových palivech. (3)

Další možné použití zemního plynu, je ve zkapalněné formě (LNG). Zkapalněním zemního plynu, se jeho objem zmenší přibližně 600krát. Nevýhodou této varianty jsou poměrně značné ztráty odparem. (3)

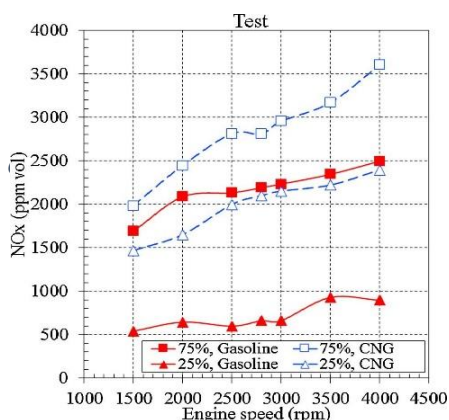
Oproti benzínu zajišťuje zemní plyn podstatné snížení škodlivin ve výfukových plynech. Díky tomuto aspektu v současnosti dochází k rozšíření jeho použití u vozidel městské dopravy. (11) Vznětové motory autobusů jsou předělávány na zážehové. (3)

Výhodou použití zemního plynu je tedy snížení emisí škodlivých plynů, pevných částic atd. Zároveň je oproti benzínu nižší produkce oxidu uhličitého (CO_2). Což je skleníkový plyn. Díky periodickým kontrolám a revizím plynového zařízení lze říci, že i bezpečnost je na poměrně vysoké úrovni. To je podpořeno i tím, že zápalná teplota zemního plynu je dvojnásobná oproti benzínu. Poměrně velkou výhodou, je stejně jako u LPG zvýšení dojezdu vozidla, díky tomu, že vozidlo může stále fungovat s benzínem. I zemní plyn je také levnější než motorová nafta či benzín. (2)

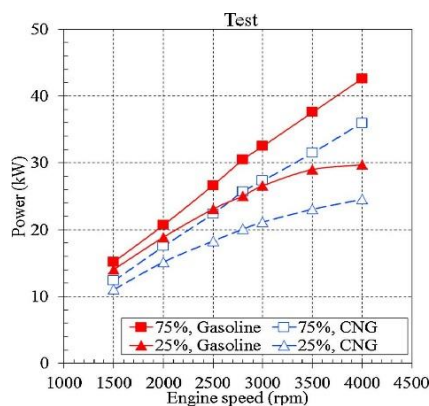
V následujících grafech jsou znázorněny rozdíly při použití benzínu a zemního plynu. Je patrné že užití zemního plynu snižuje množství škodlivých emisí (Obrázky 15 a 16). Procenta v následujících grafech vyjadřují míru otevření škrtkové klapky.



Obrázek 15 Vliv užití zemního plynu (CNG) na emise HC (14)



Obrázek 16 Vliv užití zemního plynu (CNG) na emise NO_x (14)



Obrázek 17 Vliv užití zemního plynu (CNG) na výkon motoru (14)

Na posledním grafu (Obrázek 17) je však zřejmé, že použití zemního plynu (v tomto případě ve formě CNG), může za určitých podmínek mít vliv na výkon motoru. I přesto, že tento pokles výkonu není nijak zásadní, je třeba s ním počítat.

3.3.4.2. Paliva získávaná z biomasy

Jde o takzvaná biopaliva. Tyto paliva se na rozdíl od fosilních uhlovodíkových paliv liší tím, že se získávají z obnovitelných zdrojů. Výhodou biopaliv je, že při růstu plodin, ze kterých se vyrábí se alespoň částečně spotřebovává oxid uhličitý (CO_2), který vzniká jejich spalováním. Kvůli energetické náročnosti výroby některých z těchto paliv, je u některých druhů biopaliv toto snížení produkce oxidu uhličitého zanedbatelné. (3)

Tyto paliva můžeme rozdělit na biopaliva I. a II. generace. Hlavní odlišností je, že biopaliva II. generace se vyrábí zejména z nepotravinářských surovin. Tím pádem nemají nepříznivý efekt na ceny potravin jako biopaliva I. generace. (3)

Bioethanol

Výroba ethanolu ze zemědělských produktů a jeho následné použití pro pohon automobilů není novinkou. Energetický zájem se však objevil až v 80. letech minulého století, kdy docházelo ke zvýšení cen ropy. (3)

Pro výrobu bioethanolu lze použít suroviny, které obsahují jednoduché cukry, případně látky které, které je na jednoduché cukry možné přeměnit (celulóza, škrob). (2)

Pro účely výroby bioethanolu můžeme biomasu rozdělit na 3 základní druhy. Výrobní proces bioethanolu je pro každý z těchto druhů odlišný. Biomasu dělíme na:

- biomasa obsahující jednoduché cukry (cukrová řepa a cukrová třtina),
- biomasa obsahující škrob (brambory, kukuřice atd.),
- lignocelulózová biomasa (sláma, štěpky, papír atd.). (2)

Na výrobu bioethanolu jsou v České republice používány jako vstupní suroviny zejména cukrová řepa a obilí. (2)

V současnosti se po denuraci využívá jako příměs do automobilového benzínu. Může být přidáván v různých koncentracích. Dle ČSN EN 228 je možné jej do benzínu přidávat do 10 obj. %. Tuto směs je poté možno spalovat v běžných zážehových motorech. Případně je možno ve speciálně upravených motorech využít vysokoprocentní směsi, která obsahují 85 % ethanolu a 15 % benzínu. (3)

3.3.4.3. Využití vodíku

Z dlouhodobého hlediska se vodík jeví jako jediná možná náhrada uhlovodíkových paliv pro pístové spalovací motory. (3)

Výrobu vodíku je možno dělit dle způsobu na:

- výroba vodíku z fosilních paliv (zplyňování uhlí, parciální oxidace
- výroba vodíku elektrolýzou,
- výroba vodíku z biomasy (parní reformování biomasy, biotechnologické procesy),
- výroba vodíku z alternativních zdrojů (elektrolýza použitím elektřiny z obnovitelných zdrojů). (2)

Využití vodíku pro pohon automobilů je možné rozdělit na dvě možnosti. Tou první je přímé spalování vodíku v klasickém pístovém motoru. Druhá možnost využití vodíku je spalování ve spalovacích článkách. (2)

Ze dvou možností, která byly jmenovány je perspektivnější využití vodíkových článků. Oproti spalovacím motorům je účinnost vodíkových článků dvojnásobná. (3) Dochází v nich k přímé přeměně chemické energie v palivu na energii elektrickou. (13) Účinnost přeměn dosahuje hodnot 60 % (závisí na typu článku). Hlavní nevýhodou vozidel s palivovými články je cena těchto článků, a kromě ní také potřeba akumulátoru elektrické energie, který také zvyšuje cenu pohonné jednotky. (3)

Spalování vodíku ve spalovacích motorech má výhodu v tom, že je možné spalovat velmi chudé směsi, což se při částečném zatížení motoru projeví na výrazném snížení spotřeby paliva. Výfukové plyny vodíkových motorů obsahují ze škodlivých látek pouze NO_x , kterého se dá velmi dobře zbavit recirkulací spalin. (3)

Vodík má však i své nevýhody. Těmi jsou například skladování vodíku ve vozidle, případně problémy spojené s jeho výrobou. Díky tomu, že se vodík v přírodě nevyskytuje, tak je třeba ho vyrábět. Většina světové produkce vodíku pochází z fosilních paliv, což znamená, že neplní základní požadavek na využívání obnovitelných zdrojů. (2)

4. Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala problematikou vzniku emisí v zážehových motorech. Dále také metodami pro měření emisí jak při zavádění vozidel do provozu, tak metodami, určenými pro kontrolu vozidel, která se již v provozu vyskytují. Ale hlavním zaměřením cílem této práce bylo popsání různých způsobů a technologických zařízení určených pro snižování emisí zážehových spalovacích motorů.

Na začátku byly vyjmenovány a charakterizovány druhy emisí. Byly popsány mechanismy vzniku těchto emisí jejich vliv jak na lidské zdraví, tak na životní prostředí. Pochopení toho, proč a za jakých podmínek emise vznikají je dle mého názoru zásadní i pro pochopení funkce zařízení, která jsou určena pro snižování jejich koncentrace ve výfukových plynech.

V další části jsem popsal metody určené k homologaci nových vozidel a emisní kontrole vozidel, která jsou již v provozu. Byly popsány rozdíly mezi homologací a emisní kontrolou. Také jsem uvedl hlavní rozdíly mezi cykly NEDC a WLTP a popsal důvody, proč došlo k vytvoření cyklu WLTP. Dále jsem pro porovnání uvedl stručnou charakteristiku homologačních cyklů užívaných ve Spojených státech amerických. Tato opatření a systém kontroly plní velmi důležitou roli. Díky nim jsou výrobci nuceni k tomu, aby přicházeli s novými způsoby řešení tohoto problému, což je samozřejmě velmi dobré.

Následuje část, která je věnována už samotným zařízením a způsobům. Jsou zde vyjmenovány ty, které jsou dle mého názoru nejzásadnější. Určitě zde nebyla vyjmenována všechna možná řešení. Na současném trhu je nepřehledné množství nejrůznějších řešení, která cílí právě na problém snižování emisí. Pro uživatele vozidla jsou atraktivní hlavně ta, která snižují zároveň s produkovanými emisemi i provozní náklady (spotřebu). Zároveň ne všechna řešení jsou z dlouhodobého hlediska udržitelná a mají i své stinné stránky.

Například elektromobilita, která v práci nebyla zmíněna je velmi diskutovaným tématem, má bezesporu řadu výhod. Ať už je to snížení hluku nebo nulové lokální emise při provozu tohoto automobilu. Má však zatím velké limity v dojezdu, zároveň i cena elektromobilů není pro běžného spotřebitele nijak lákavá, protože zpravidla bývá podstatně vyšší než cena vozidla stejné kategorie se spalovacím motorem. A dalším problémem je také nutnost vybudování sítě dobíjecích stanic a také poměrně dlouhá doba nabíjení baterie.

V neposlední řadě je to i cena a ekologická náročnost výroby baterií, které tento způsob dělají problematickým. Nevylučuji však, že řada těchto problémů může být v blízká budoucnosti vyřešena.

Možným řešením do budoucna, ke kterému se přiklání řada expertů, je vodíkový pohon. Pokud se vyřeší problém s jeho energeticky náročnou výrobou, tak by opravdu mohl být palivem budoucnosti.

Zatím je však provoz vozidel na vodíkový pohon nevýhodný a elektromobily mají taky své chyby. Proto jsou stále tak hojně využívány spalovací motory. U moderních spalovacích motorů ať už zážehových, kterými se tato práce zabývala, tak u vznětových motorů zpravidla není využíváno jen jedno řešení, ale jejich kombinace. Kombinují se jak zařízení, která ovlivňují množství emisí před motorem, tak ta, která jsou u motoru i za ním. Navíc tato kombinace může být doplněna i o některé alternativní palivo (LPG, CNG, LNG, atd) což dále napomáhá snížení produkce škodlivin.

Velmi pozitivní vliv na snížení emisí má i styl jízdy řidiče. Pokud řidič jezdí agresivně, tzn. zbytečně zrychluje a brzdí projeví se to i na emisích a spotřebě paliva. Správně by měl řidič jezdit plynule a ideálně se snažit nepřekračovat rychlost $100 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, při jejímž překročení jsou kladeny velké nároky na výkon motoru.

Způsobů, jak snížit emise vozidel je velké množství. Některé z nich fungují velmi dobře a mají slibnou budoucnost. Jiné budou možná jen slepá vývojová větev, ale to ukáže až čas.

5. Seznam použitých zdrojů

1. FERENC, Bohumil. *Spalovací motory*. 3. vyd. Brno: Computer Press, a. s., 2009. ISBN 978-80-251-2545-8.
2. HROMÁDKO, Jan. *Speciální spalovací motory a alternativní pohony*. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, a. s., 2012. ISBN 978-80-247-4455-1.
3. HROMÁDKO, Jan, Jiří HROMÁDKO, Vladimír HÖNIG a Petr MILER. *Spalovací motory*. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, a. s., 2011. ISBN 978-80-247-3475-0.
4. Zpravodajství Evropský parlament. *Emise CO₂ z aut: fakta a čísla (infografika)* [online]. 2019. [cit. 26.1.2021]. Dostupné z: <https://www.europarl.europa.eu/news/cs/headlines/society/20190313STO31218/emise-co2-z-aut-fakta-a-cisla-infografika>
5. KLŮNA, Jindřich, Jiří KOŠEK a A KOLEKTIV. *Příručka opraváře automobilů*. 3. dopl. v. Brno: Littera, 1995. ISBN 80-85763-06-0.
6. *wltpfacts.eu* [online]. [cit. 3.3.2021]. Dostupné z: <https://www.wltpfacts.eu/what-is-wltp-how-will-it-work/>
7. BAUMRUK, Pavel. *Příslušenství spalovacích motorů* [online]. 1996. ISBN 80-01-01103-8. Dostupné z: Vydavatelství ČVUT
8. ABU-QUDAIS, Moh'D, K. R. ASFAR a Ramzi AL-AZZAM. Engine performance using vaporizing carburetor. *Energy Conversion and Management* [online]. 2001, **42**(6), 755–761. ISSN 01968904. Dostupné z: doi:10.1016/S0196-8904(00)00098-4
9. AWAD, Omar I., Xiao MA, Mohammed KAMIL, Obed Majeed ALI, Zhou ZHANG a Shijin SHUAI. Particulate emissions from gasoline direct injection engines: A review of how current emission regulations are being met by automobile manufacturers. *Science of the Total Environment* [online]. 2020, **718**, 137302. ISSN 18791026. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2020.137302

10. VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc., nakladatelství a vydavatelství, 2003. ISBN 80-238-8756-4.
11. HROMÁDKO, Jan, Jiří HROMÁDKO, Petr MILER a Vladimír HÖNIG. *Speciální spalovací motory*. 1. vyd. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2011. ISBN 978-80-213-2168-7.
12. TANG, Qijun, Xiongbo DUAN, Yiqun LIU, Shuai LI, Zhichao ZHAO, Kai REN, Yangyang LI a Hongbo CHANG. Experimental study the effects of acetone–butanol–ethanol (ABE), spark timing and lambda on the performance and emissions characteristics of a high-speed SI engine. *Fuel* [online]. 2020, **279**(June), 118499. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2020.118499
13. ŠMERDA, Tomáš, Jiří ČUPERA a Martin FAJMAN. *Vznětové motory vozidel*. 1. vyd. Brno: Cpress, 2013. ISBN 978-80-264-0160-5.
14. YONTAR, Ahmet Alper a Yahya DOĞU. Investigation of the effects of gasoline and CNG fuels on a dual sequential ignition engine at low and high load conditions. *Fuel* [online]. 2018, **232**(May), 114–123. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2018.05.156
15. GU, Xiaolei, Zuohua HUANG, Jian CAI, Jing GONG, Xuesong WU a Chia Fon LEE. Emission characteristics of a spark-ignition engine fuelled with gasoline-n-butanol blends in combination with EGR. *Fuel* [online]. 2012, **93**(x), 611–617. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2011.11.040
16. *Quizlet*. *Schéma jednoduchého karburátoru, rozdělení karburátorů* [online]. [cit. 31.1.2021]. Dostupné z: <https://quizlet.com/333340615/schema-jednoducheho-karburatoru-rozdeleni-karburatoru-diagram/>