



**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

**SYSTÉMY SNIŽOVÁNÍ EMISÍ U OSOBNÍCH  
AUTOMOBILŮ SE ZÁŽEHOVÝM MOTOREM**

AN EMISSION REDUCTION SYSTEMS FOR VEHICLES WITH GASOLINE ENGINES

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Josef Filip

**VEDOUcí PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Michael Böhm

BRNO 2022



## Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství  
Student: **Josef Filip**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Michael Böhm**  
Akademický rok: 2021/22

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:

### **Systémy snižování emisí u osobních automobilů se zážehovým motorem**

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

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

#### **Cíle bakalářské práce:**

Popsat způsoby a systémy snižování emisí u spalovacích zážehových motorů. 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. Navrhnout vlastní možné úpravy a řešení z hlediska ekonomie a ekologie provozu. 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.

KÖEHLER, 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 2021/22

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

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

## ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá způsoby snižování emisí osobních automobilů se zážehovým motorem. V úvodu je popis principu spalování, způsobů přípravy zápalné směsi a škodlivin, které během spalování vznikají. V hlavní části práce jsou detailně rozebrána jednotlivá konkrétní opatření pro snižování emisí používaná u moderních vozidel. Dále jsou ukázány příklady současných emisních systémů u několika vybraných automobilů. V následující kapitole jsou všechny získané poznatky shrnuty. V poslední části je detailně popsána vlastní konfigurace emisního systému, která je navržena s ohledem na maximální efektivitu v oblasti snižování emisí. Závěrem je pak spolu se zhodnocením současné situace shrnutí a nastínění možného směřování dalšího vývoje v dané oblasti.

## KLÍČOVÁ SLOVA

emise, zážehový motor, zápalná směs, systém recirkulace výfukových plynů, katalyzátor, filtr pevných částic

## ABSTRACT

This bachelor thesis deals with ways for emission reduction of passenger cars with an ignition engine. The introduction describes the principle of combustion, the methods of preparation of the ignition mixture and pollutants that arise during the combustion. In the main part of the work, the individual specific provisions for reducing emissions used in modern vehicles are analyzed in detail. Further the examples of current emission systems for several selected cars are presented. All the findings are summarized in the following chapter. In the next part, own configuration of the emission system is described in detail, which is designed with the regard to maximum efficiency in reducing emissions. The summary together with the evaluation of the current situation and the outline of the possible direction for further development in this area are in the last part of this work.

## KEYWORDS

emissions, ignition engine, ignition mixture, exhaust gas recirculation system, catalytic converter, gasoline particulate filter

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

FILIP, Josef. *Systémy snižování emisí u osobních automobilů se zážehovým motorem*. Brno, 2022. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí bakalářské práce Michael Böhm. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139751>.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 19. května 2022

.....

Josef Filip

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu své práce, panu Ing. Michaelu Böhmovi, za cenné rady a připomínky, jeho pozitivní přístup, ochotu a trpělivost při vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat svým blízkým a rodině za jejich podporu.



## OBSAH

Úvod .....	10
<b>1 Emise zážehových motorů.....</b>	<b>11</b>
1.1 Princip spalování benzínu .....	11
1.1.1 Tvorba směsi a palivová ústrojí.....	11
1.2 Působení škodlivin a jejich obsah ve výfukových plynech .....	15
<b>2 Emisní limity .....</b>	<b>17</b>
<b>3 Opatření pro snižování emisí.....</b>	<b>19</b>
3.1 Opatření před motorem .....	19
3.1.1 Směšovací poměr.....	19
3.1.2 Použití alternativních paliv .....	20
3.2 Opatření na motoru .....	20
3.2.1 Kompresní poměr .....	21
3.2.2 Předstih zážehu .....	22
3.2.3 Recirkulace výfukových plynů.....	23
3.2.4 Proměnné časování ventilů, změna pracovního cyklu.....	25
3.2.5 Vypínání válců CDA (Cylinder deactivation) .....	27
3.3 Opatření za motorem .....	27
3.3.1 Třícestný katalyzátor (TWC).....	28
3.3.2 Sběrný (zásobníkový) katalyzátor (NSC).....	30
3.3.3 Filtr pevných částic (GPF).....	30
<b>4 Současná konstrukční řešení .....</b>	<b>34</b>
<b>5 Zhodnocení poznatků .....</b>	<b>37</b>
<b>6 Návrh vlastní konfigurace.....</b>	<b>38</b>
<b>Závěr .....</b>	<b>40</b>
<b>Použité informační zdroje.....</b>	<b>42</b>
<b>Seznam použitých zkratk a symbolů.....</b>	<b>47</b>

## ÚVOD

Emise osobních automobilů jsou stále více skloňovaným tématem spojeným s automobilovým průmyslem, a to z důvodu zavádění stále přísnějších emisních norem (přičemž emisemi rozumíme škodlivé látky obsažené ve výfukových plynech [1]). Existuje mnoho způsobů, jak množství produkovaných škodlivin snížit. Tato práce se zabývá systémy osobních automobilů se zážehovým motorem, které emise snižují. Jejím cílem je popsat způsoby a systémy snižování emisí u zážehových motorů a popsat současné možné konfigurace emisních systému, jednotlivé prvky výfukového systému a jejich konstrukční řešení a funkci. Dále pak zhodnotit jejich vliv na emise automobilu a navrhnout vlastní konfiguraci emisního systému.

Snaha o omezování negativních účinků automobilů na živé organismy se v posledních letech stala základním požadavkem na vývoj nových typů automobilů [2]. Spalovací zážehové motory, používané v osobních automobilech, jsou tepelné stroje, které spalováním vhodného paliva mění tepelnou energii na mechanickou [3]. Produktem spalování jsou však výfukové plyny, které obsahují škodlivé látky [1]. Snaha o snižování emisí měla svůj vývoj. První sledovaný parametr, jež měl být odstraněn, byl nadměrný hluk spalovacích motorů (20. léta 20. stol.). Začaly se sledovat různé parametry od kouřivosti vznětových motorů až po dnešní komplexní přístup. Všechna tato omezení jsou dána emisními normami s mezinárodním přesahem [2].

V této práci je nejprve popsán princip spalování a tvorba zápalné směsi. Dále jsou vyjmenovány jednotlivé škodliviny, které během spalování vznikají a poté jsou krátce zmíněny emisní limity dané EURO normami. V další části jsou již detailně rozebrána jednotlivá opatření, která jsou zde rozdělena do tří hlavních skupin: opatření před motorem, na motoru a za motorem. V následující kapitole jsou uvedena současná konstrukční řešení emisních systémů u několika vybraných osobních automobilů. Poté jsou shrnuty všechny získané poznatky, které jsou v následující kapitole využity pro návrh vlastní konfigurace kompletního emisního systému.

# 1 EMISE ZÁŽEHOVÝCH MOTORŮ

Spalovací motor pracuje na principu přeměny chemické energie uložené v palivu na mechanickou energii spalováním daného paliva. Během toho probíhají chemické reakce a tyto děje vedou k produkci výfukových plynů. V nich jsou obsaženy látky, které mohou být škodlivé pro lidský organismus. V takovém případě se jedná o emise. Množství a druh emisí je mimo jiné silně závislý na druhu spalovaného paliva [1].

## 1.1 PRINCIP SPALOVÁNÍ BENZINU

Jako palivo pro zážehové motory je primárně používán benzín, tedy uhlovodíkové palivo, které je získáváno destilací ropy (frakční metoda). Další cestou, jak získat benzín, je zpracování olejnatých břidelic anebo další petrochemické metody.

Benzín však musí splňovat mnoho různých, velmi podstatných aspektů. Patří mezi ně [2]:

- vysoká výhřevnost
- co nejnižší obsah nespalitelných podílů a síry
- schopnost tvořit zápalnou směs i za nízkých teplot (umožnění studených startů motoru)
- necitlivost na okolní vlivy (např. na teplotu a vlhkost)
- minimální fyziologická agresivita
- dlouhodobá stabilita (např. při skladování)
- nízké výrobní náklady a cena

K hoření směsi, ke kterému během spalování dochází, je nezbytná přítomnost kyslíku. Jako jeho zdroj slouží nasávaný vzduch. Jelikož vzduch obsahuje asi 21 % kyslíku, je třeba, aby podíl vzduchu vůči palivu v zápalné směsi byl poměrně velký. Účinnost motoru lze zvýšit dodáváním plynu s vyšším obsahem kyslíku nebo čistého kyslíku do směsi. To je však velice nákladné, a to z důvodu zástavby zásobníku na kyslík a jeho doplňování, nákladům na získávání kyslíku atd. [3].

### 1.1.1 TVORBA SMĚSI A PALIVOVÁ ÚSTROJÍ

Pro dokonalé spálení 1 kg benzínu je teoreticky nutné dodat 14,7 kg vzduchu (tj. teoretické množství vzduchu). Pro stanovení skutečného množství přivedeného vzduchu byl zaveden součinitel přebytku vzduchu  $\lambda$ , přičemž platí:

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

Pomocí součinitele přebytku  $\lambda$  vzduchu pak rozlišujeme různé druhy směsi:

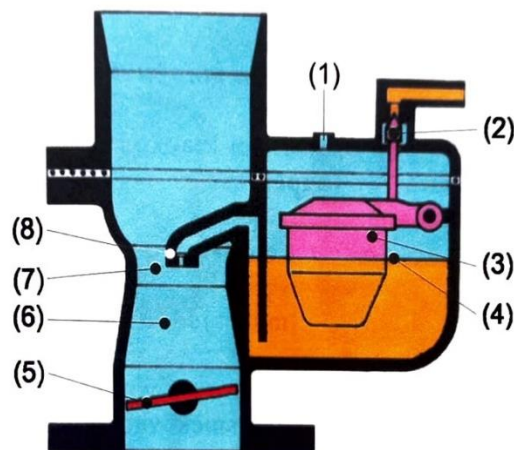
- $\lambda < 1$  ... bohatá směs (ve směsi je nedostatek vzduchu)
- $\lambda = 1$  ... stechiometrická směs
- $\lambda > 1$  ... chudá směs (ve směsi je přebytek vzduchu)

Pro spolehlivé zažehnutí a správný průběh hoření je třeba homogenní směs palivových par se vzduchem, nebo směs vrstvená tak, aby bohatost směsi v blízkosti zapalovací svíčky v okamžiku přeskočení jiskry umožnila zažehnutí. U zážehových motorů se pro tvorbu směsi a její dávkování používají karburátory, vstřikování do sacího potrubí nebo vstřikování

přímo do válce. Druh použitého systému a kvalita tvorby zápalné směsi má tedy zásadní dopad na čistotu výfukových plynů a na množství produkovaných škodlivin [1].

## KARBURÁTORY

Představují klasické řešení pro tvorbu směsi vzduchu s kapalným palivem [1]. Palivo je dopravováno z palivové nádrže potrubím skrz síto membránovým čerpadlem do plovákové komory karburátoru. Vzduch je nasáván přes čistič a karburátor. Uvnitř pak dochází k mísení paliva se vzduchem, vytvořená směs proudí sacím potrubím a kanály k jednotlivým válcům [4]. Většina konvenčních karburátorů nerozděluje optimálně směs do každého válce za různých provozních podmínek. To je způsobeno nedostatečným promícháváním a vypařováním paliva se vzduchem v sacím potrubí. Konvenční karburátor (viz Obrázek 1) za normálních provozních podmínek zásobuje motor nehomogenní směsí obsahující část paliva v kapalné formě, která, pokud se před spalováním zcela neodpaří, může způsobit cyklické kolísání výkonu, zvýšit koncentraci nespálených uhlovodíků a zhoršit kvalitu mazacího oleje ředěním oleje [5].



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

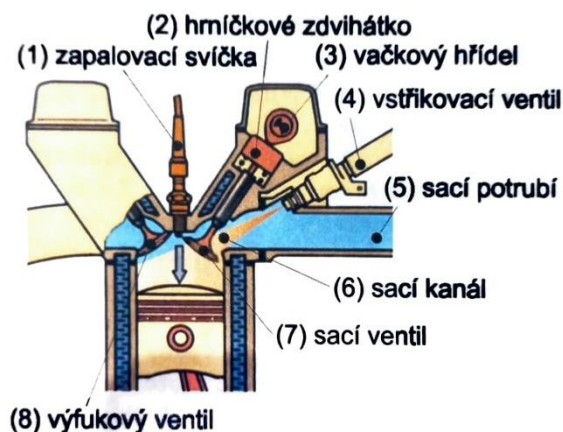
Obrázek 1: Schéma Jednoduchého (elementárního) karburátoru [2]

## NEPŘÍMÉ VSTŘIKOVÁNÍ PALIVA

V případě použití tohoto systému je palivo vstřikováno do sacího potrubí v případě jednobodového vstřikování (SPI) nebo do sacích kanálů (viz Obrázek 2), pokud se jedná o vícebodové vstřikování (MPI). Palivo může být buď vstřikováno během sacího zdvihu pístu a mísit se s nasátým vzduchem, nebo může být vstřikováno před otevřením sacího ventilu. V momentu jeho otevření je pak nasávána už předmísená směs. Uvnitř válce motoru potom dochází ke konečnému promísení a během kompresního zdvihu se vytváří zápalná směs. Vstřikování může být řízeno buď mechanicky nebo elektronicky, přičemž elektronické řízení poskytuje přesnější přizpůsobení dávky paliva v závislosti na režimu chodu motoru.

Oproti karburátorům má vstřikování tyto výhody [4]:

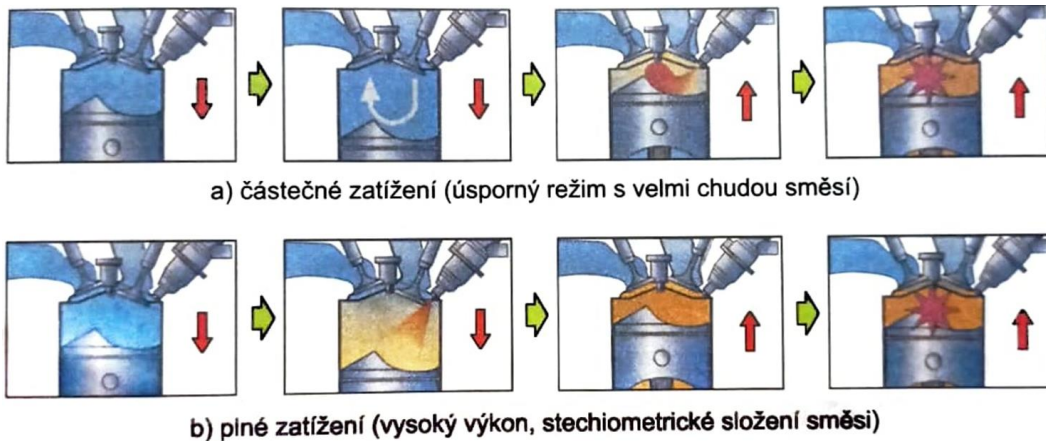
- lepší plnění válců
- rovnoměrnější rozdělení směsi mezi jednotlivé válce
- dosažení vyššího výkonu, točivého momentu a jeho lepšího průběhu
- nižší spotřeba paliva
- snazší spuštění studeného i zahřátého motoru
- rychlejší reakce motoru na změny polohy škrtkové klapky



Obrázek 2: Schéma systému s vícebodovým vstřikováním do sacího potrubí [2]

### PŘÍMÉ VSTŘIKOVÁNÍ PALIVA

Motory s přímým vstřikem paliva vytváří směs paliva se vzduchem přímo ve válci. To znamená, že otevřeným sacím ventilem proudí v době sání pouze vzduch nezbytný pro spalování. Palivo je pak pod vysokým tlakem vstřikováno přímo do spalovacího prostoru vstřikovacími ventily. Elektrické palivové čerpadlo dopravuje palivo pod tlakem 0,3 až 0,5 MPa do čerpadla vysokotlakého. To pak vytváří dle potřeby systémový tlak. Palivo z něj pod vysokým tlakem proudí do tlakového zásobníku, který je opatřen vysokotlakými vstřikovacími ventily a ty pak vstřikují palivo do spalovacího prostoru. Během vstřiku paliva dojde k jeho rozprášení a smísení se vzduchem. Dle provozního režimu motoru je tvořena buď homogenně rozdělená směs ( $\lambda = 1$ ), nebo tak, že v blízkosti zapalovací svíčky je oblak vrstvené směsi s  $\lambda \geq 1$ . Zbytek spalovacího prostoru s vrstveným plněním je vyplněn nasátým vzduchem čerstvým, recirkulovanými inertními plyny, nebo chudou směsí paliva se vzduchem. Z toho plyne, že celkově motor pracuje s chudou směsí, čímž je dosaženo nižší spotřeby paliva a tím i nižších emisí [1]. Princip tvoření zápalné směsi viz Obrázek 3.



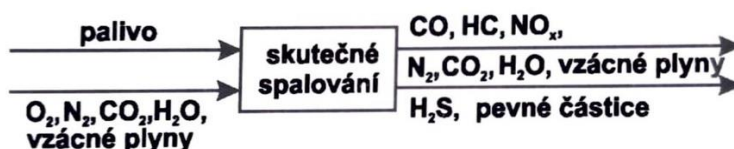
Obrázek 3: Schématické znázornění principu tvoření zápalné směsi u přímého vstřikování (při částečném zatížení (a) a plném při zatížení (b)) [2]

Tyto systémy slouží pro přípravu zápalné směsi u zážehových motorů. Takto připravenou směs pak zapaluje jiskra od zapalovací svíčky. V případě dokonalého spalování (viz Obrázek 4), které je možné za předpokladu uvážení ideálních plynů a stechiometrické směsi, dochází k těmto chemickým reakcím:



Obrázek 4: Schématické znázornění dokonalého spalování [2]

Pokud do reakce vstupují reálné plyny a celý děj je ovlivněn nepříznivými podmínkami, jako je nerovnoměrná teplota uvnitř spalovacího prostoru, nedokonalé promísení paliva se vzduchem, krátká reakční doba atd., dochází k nedokonalému spalování (viz Obrázek 5), což je případ všech reálných motorů. Při takovém spalování vznikají další nežádoucí produkty chemických reakcí [1].



Obrázek 5: Schématické znázornění nedokonalého spalování [2]

## 1.2 PŮSOBENÍ ŠKODLIVIN A JEJICH OBSAH VE VÝFUKOVÝCH PLYNECH

U všech škodlivých vlivů záleží na koncentraci látek, ale také na době, po kterou účinkují. Především u automobilových motorů existuje více náhledů na tuto problematiku. Například  $\text{CO}_2$  působí škodlivě globálně (skleníkový plyn), naproti tomu CO a pevné částice účinkují zvláště v blízkém okolí komunikací, kde jsou v nepříznivých koncentracích.  $\text{NO}_x$  a HC potom vedou k tvorbě ozónu a fotochemického smogu [6].

Složení vzniklých škodlivin se však může velmi lišit v závislosti na kvalitě promísení výfukových plynů se vzduchem během výfuku a ve výfukovém traktu [6]. Z toho důvodu je velice nejednotně pojata legislativa v různých oblastech Země i pro různé způsoby použití spalovacích motorů [5].

### OXID UHELNATÝ (CO)

Je to bezbarvý plyn bez zápachu, který je pro lidský organismus jedovatý. Vytváří s krevním barvivem pevný boxyhemoglobin, který brání přenosu kyslíku z plic do krevního oběhu, což vede k poškození jednotlivých orgánů. Dále přispívá ke vzniku fotochemického smogu [1]. To je špinavá kouřová mlha, která vzniká společným působením nahromaděných výfukových plynů či jiných druhů kouřů a slunečního záření. Tato vzniklá směs má silné nežádoucí účinky na živé organismy [7].

### OXID UHLIČITÝ ( $\text{CO}_2$ )

Jde o produkt dokonalé oxidace. Jeho přítomnost ve výfukových plynech je důsledek spalování uhlíkatých paliv. Stejně jako CO je  $\text{CO}_2$  bezbarvý plyn bez chuti a zápachu, který je však nejedovatý. Je velmi stabilní a málo reaktivní. V případě, že je jeho koncentrace ve vdechovaném vzduchu tak vysoká, že začne vytěšňovat kyslík, stává se oxid uhličitý škodlivý pro lidský organismus. Patří mezi tzv. skleníkové plyny, které zabraňují slunečnímu záření proniknout ven z atmosféry, a tak způsobují její oteplování [2].

### UHLOVODÍKY (HC)

Jedná se o uhlovodíky vstupující jako palivo do chemické reakce nebo uhlovodíky nově vzniklé v průběhu nedokonalého spalování. Nebezpečné jsou především ty, které během spalování nově vznikají. Některé z nich patří mezi rakovinotvorné látky, a ty jsou zvláště nebezpečné v kombinaci s další složkou výfukových plynů, a to s pevnými částicemi. Uhlovodíky se na pevné částice navážou a jejich vdechováním se pak dostávají do lidského organismu [1].

### OXID SIŘIČITÝ ( $\text{SO}_2$ )

Je to páchnoucí bezbarvý plyn, který silně napadá sliznice a snižuje odolnost proti infekcím. Způsobuje tvorbu kyselých dešťů, které pak poškozují především lesní porosty [5]. Do benzínu se síra dostává při jeho získávání z ropy, která síru obsahuje. Její obsah v benzínu je však ve všech zemích silně omezen. Přítomnost síry je navíc naprosto nežádoucí, protože způsobuje například korozi palivového systému a pokles oktanového čísla [1].

### OXIDY DUSÍKU ( $\text{NO}_x$ )

V první řadě se jedná o směs oxidu dusnatého (NO) a oxidu dusičitého ( $\text{NO}_2$ ), avšak mohou vznikat i další. Jejich množství roste s většími tlaky a teplotami ve spalovacím prostoru [2]. NO se váže na hemoglobin, ale relativně snadno dochází k jeho odbourávání.  $\text{NO}_2$  je páchnoucí oranžový plyn, který je jedovatý a napadá plíce. Navíc se váže na hemoglobin tak jako NO [5].

## SLOUČENINY OLOVA

Sloučeniny olova v lidském organismu působí jako velmi silný jed, který napadá krevní buňky a kostní dřeň. Vznikají spalováním paliv pro zážehové motory, do kterých bylo olovo přidáváno pro snížení citlivosti motoru na detonační spalování [2]. V roce 1922 bylo objeveno, že sloučeniny olova obsažené v benzínu jako aditivum zvyšují jeho oktanové číslo. 0,5 gramu olova na litr benzínu způsobí zvýšení oktanového čísla o 5 jednotek. Většina zemí má však nyní omezení na používání olova v automobilových palivech z důvodu negativního vlivu na zdraví lidí [8]. Pro nové modely vozidel vybavených katalyzátory byly zavedeny bezolovnaté benziny. V roce 2001 následoval úplný zákaz používání olovnatých benzinů [9]. Olovnatá paliva jsou však stále významná v leteckém průmyslu. Sice kromě možného nebezpečí znečištění olovem mohou být navíc olovem přítomným v palivu deaktivovány katalyzátory pro přeměnu jiných znečišťujících látek motoru, ale klíčovým problémem těchto motorů konstruovaných pro olovnaté palivo je jejich náchylnost k zaklepání ventilů do sedel, pokud jsou provozovány na bezolovnaté palivo. Testovací procedury se u leteckých motorů liší v porovnání s automobilovými (oktanové číslo se hodnotí pro chudé i bohaté směsi) a těkavost paliva musí být nižší, aby ve vysokých nadmořských výškách nemohly vznikat páry [8].

## PEVNÉ ČÁSTICE

Zavedení přímého vstřikování do zážehových motorů vedlo k tomu, že ve velké míře začaly produkovat pevné částice [10]. Velké částice (5 až 10  $\mu\text{m}$ ) jsou zachyceny v horních dýchacích cestách. V případě, že je jejich velikost kolem 1  $\mu\text{m}$ , mohou se dostat do plic člověka a způsobit mechanické podráždění a záněty [2]. Pro jejich zachytávání jsou moderní motory vybaveny filtrem pevných částic [1].



## 2 EMISNÍ LIMITY

Aby bylo možné uvést nový automobil do provozu, je nezbytné, aby byl podroben homologačním emisním testům. Během nich je měřeno množství škodlivin, které automobil vyprodukuje. Konkrétně se měří obsah těchto složek:

- Oxid uhelnatý (CO)
- Nespálené uhlovodíky (HC)
- Oxidy dusíků (NO<sub>x</sub>)
- Pevné částice (PM)
- Počet částic (PN)

Maximální hodnoty obsahu jednotlivých složek jsou v Evropské unii předepisovány emisními normami, které jsou známé pod názvem EURO plus číslo revize předpisu. Limitní hodnoty se však liší v závislosti na kategorii, do které dané vozidlo patří (dle druhu vozidla a jeho hmotnosti) [1]. Tabulka 1 uvádí maximální povolené hodnoty emisí zážehových motorů pro automobily kategorie M, do které patří osobní automobily a autobusy.

Tabulka 1: Emisní normy EURO pro vozidla kategorie M se zážehovým motorem [11]

Norma	Datum registrace	CO [g/km]	HC [g/km]	NO <sub>x</sub> [g/km]	HC+NO <sub>x</sub> [g/km]	PM [g/km]	PN [1/km]
EURO 1	leden 1992	2,72	-	-	0,97	-	-
EURO 2	leden 1996	2,2	-	-	0,5	-	-
EURO 3	leden 2001	2,3	0,2	0,15	-	-	-
EURO 4	leden 2006	1,0	0,1	0,08	-	-	-
EURO 5a	leden 2011	1,0	0,1	0,06	-	0,0050	-
EURO 5b	leden 2013	1,0	0,1	0,06	-	0,0045	-
EURO 6b	září 2015	1,0	0,1	0,06	-	0,0045	6·10 <sup>11</sup>
EURO 6c	září 2018	1,0	0,1	0,06	-	0,0045	6·10 <sup>11</sup>
EURO 6d-Temp	září 2019	1,0	0,1	0,06	-	0,0045	6·10 <sup>11</sup>
EURO 6d	leden 2021	1,0	0,1	0,06	-	0,0045	6·10 <sup>11</sup>

V tuto chvíli je platná norma EURO 6d, která vešla v platnost v lednu 2021 [12]. Už nyní je však ve vývoji nová emisní norma EURO 7, která by měla být uvedena v platnost v roce 2025 [13]. Blížící se zavedení nové přísnější normy úzce souvisí s novou strategií růstu Evropské unie, Zelenou dohodou pro Evropu, která podpoří přechod ke klimaticky neutrálnímu, na zdroje efektivnímu a konkurenceschopnému hospodářství a posun k nulovému znečištění v Evropě. Je v ní uvedeno, že doprava by měla být výrazně méně znečišťující, a to zejména

ve městech. Dále pak to, že automobilový průmysl EU musí vést celosvětový přechod na vozidla s nulovými emisemi [14].

Oproti předchozím normám proběhla zásadní změna ve způsobu měření emisí. Starší metoda NEDC (New European Driving Cycle) zavedená v roce 2000 byla nahrazena novou metodou WLTP (Worldwide harmonised Light-duty vehicle Test Procedure), která se má více blížit skutečným podmínkám v provozu, a tak měřit reálnější hodnoty emisí a spotřeby paliva. Tato nová metodika je v platnosti od září 2017.

Obě tyto metody jsou prováděny na válcových zkušebnách v laboratorních podmínkách, avšak WLTP více odpovídá reálnému dynamickému a různorodému stylu jízdy. Součástí nové metodiky testování je ale také měření emisí za skutečných jízdních podmínek v provozu. Jedná se o metodu RDE (Real Driving Emissions). V tomto případě je vozidlo testováno v reálném provozu za různých podmínek. Během tohoto testování je na zkušební automobil upevněn měřicí systém PEMS (Portable Emissions Measurement System) [12].

### 3 OPATŘENÍ PRO SNIŽOVÁNÍ EMISÍ

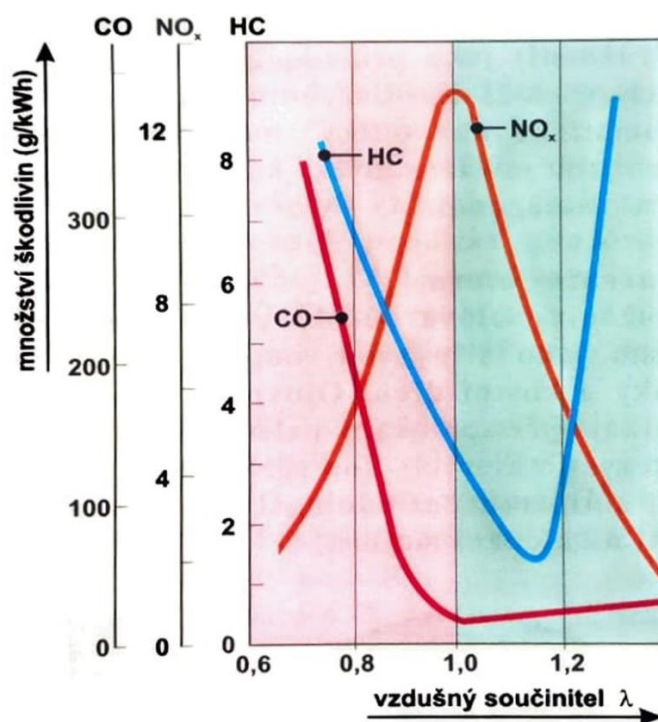
Rozlišujeme tři základní skupiny opatření pro snižování emisí spalovacích motorů, které zde budou rozebrány [1]:

- opatření před motorem
- opatření na motoru
- opatření za motorem

#### 3.1 OPATŘENÍ PŘED MOTOREM

##### 3.1.1 SMĚŠOVACÍ POMĚR

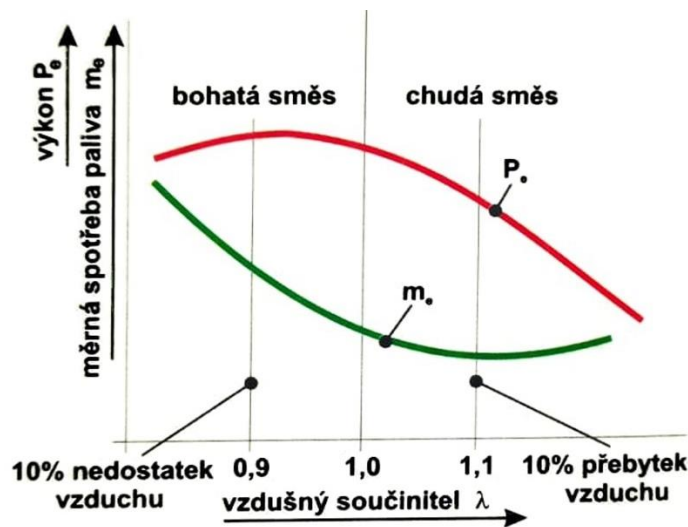
Množství škodlivých látek ve výfukových plynech a jejich podíl značně závisí na složení připravené zápalné směsi (viz Obrázek 6), které je vyjádřeno součinitelem přebytku vzduchu (vzdušným součinitelem)  $\lambda$  (lambda). Tímto součinitelem je silně ovlivněna měrná spotřeba paliva. Správným zvolením hodnoty  $\lambda$  se dá dosáhnout nižší měrné spotřeby. Vhodná volba hodnoty  $\lambda$  je důležitá i pro zajištění nižšího množství produkovaných škodlivých látek [15]. Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, stechiometrickému složení směsi (14,7:1) odpovídá hodnota  $\lambda = 1$  [2].



Obrázek 6: Závislost produkce škodlivin ve výfukových plynech na vzdušném součiniteli  $\lambda$  [2]

Jak je ze závislosti (viz Obrázek 6) patrné, volbou směšovacího poměru nelze snížit všechny škodlivé složky současně. Spalování chudé směsi ( $\lambda > 1$ ) vede k tvorbě nižšího množství CO. Zároveň však směs nesmí být příliš chudá, protože by hrozilo vynechávání zápalů a z toho plynoucí prudký nárůst obsahu HC [1]. V oblasti minimálních koncentrací CO a HC jsou ale maximální koncentrace NO<sub>x</sub>. Zároveň je při těchto hodnotách  $\lambda$  nejnižší měrná spotřeba paliva, ale i nižší výkon. Nejvyšších hodnot výkonu dosahuje motor při  $\lambda = (0,90 \div 0,95)$  [2].

Dále je znázorněno, jaký má průběh výkon motoru a jak se mění jeho měrná spotřeba ve vztahu ke vzdušnému součiniteli  $\lambda$  (viz Obrázek 7):



Obrázek 7: Průběh výkonu a měrné spotřeby paliva  $m_e$  v závislosti na vzdušném součiniteli  $\lambda$  [2]

### 3.1.2 POUŽITÍ ALTERNATIVNÍCH PALIV

Jelikož nelze upravit složení uhlovodíkových paliv tak, aby při jejich spalování vznikalo méně  $\text{CO}_2$ , který je považován za hlavní příčinu intenzifikace skleníkového efektu a z toho plynoucí oteplování planety. Jedním ze způsobů, jak zmenšit produkci tohoto oxidu, je omezení spotřeby uhlovodíkových paliv. Zážehové motory jsou schopné spalovat i jiná paliva než výhradně benzín. Taková paliva nazýváme alternativní a jejich aplikace je jeden ze způsobů, jak ovlivnit produkci škodlivých látek. Mezi tato paliva patří například LPG (Liquefied Petroleum Gas), CNG (Compressed Natural Gas), alkoholy, metanol a etanol atd. [9]. Emise z výroby a používání směsí etanolu, methylnetetrahydrofuranu (MeTHF) a pentanů s butanem (paliva řady P) jsou méně škodlivé než emise z benzínu. Každý 1 galon (4,5461 litru) paliva řady P emituje přibližně o 50 % méně oxidu uhličitého, o 35 % méně uhlovodíků, o 15 % méně oxidu uhelnatého než benzín. Má také o 40 % nižší potenciál tvorby ozónu. Etanol se v současné době přidává do benzínu, ale lze použít i čistý etanol. Mezi jeho výhody patří menší znečištění ovzduší a snížení závislosti na zahraniční ropě. Má nízkou reaktivitu a vysoký obsah kyslíku, což z něj činí účinný nástroj pro snižování znečištění ozónem. Je také bezpečnou náhradou za toxické látky zvyšující oktanové číslo v benzínu, jako je benzen, toluen a xylen. Dále také vodík je zřejmou alternativou uhlovodíkových paliv, jako je LPG, NG a benzín. Je udržitelný a neznečišťující zdroj energie. Lze jej vyrábět prakticky v neomezeném množství pomocí obnovitelných zdrojů. Dnes jsou nejběžnější metody používané k výrobě vodíku parní přeměňování zemního plynu a elektrolýza vody [16].

## 3.2 OPATŘENÍ NA MOTORU

Regulováním průběhu spalování je možné snižovat především emise  $\text{NO}_x$  a HC. Zmenšení produkce nespálených uhlovodíků se dá dosáhnout omezením vynechávání zápalů a dohoříváním uhlovodíků během expanze a výfuku. Obsah  $\text{NO}_x$  lze snížit nižší teplotou spalování. Pro snížení obsahu CO ve výfukových plynech je třeba kromě přebytku vzduchu také zajištění vhodné teploty při spalování [1].

### 3.2.1 KOMPRESNÍ POMĚR

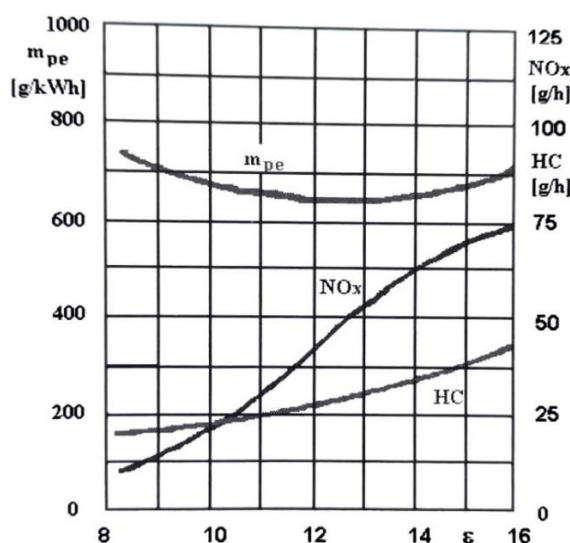
Jedním ze základních parametrů spalovacích motorů z hlediska geometrie je kompresní poměr ( $\epsilon$ ). To je poměr maximálního objemu, kdy je píst v dolní úvrati (DÚ), a minimálního objemu ve válci, kdy je píst v horní úvrati (HÚ). Vztah pro výpočet kompresního poměru vypadá takto [17]:

$$\epsilon = \frac{V_Z + V_K}{V_Z} \quad (4)$$

kde  $V_Z$  je zdvihový objem válce,  $V_K$  je kompresní objem válce.  $V_Z$  je objem pracovního prostoru ve válci mezi HÚ a DÚ a  $V_K$  je objem zbývající části pracovního prostoru v čase, kdy je píst v HÚ [3].

Obrázek 8 znázorňuje vliv hodnoty kompresního poměru na produkci emisí. S rostoucí hodnotou kompresního poměru zážehového motoru dochází ke zvyšování kompresní teploty a tlaku ve válci, zlepšuje se využití energie obsažené v palivu, a tak se zvyšuje i jeho termická účinnost. Zvětšení kompresního poměru vede k tomu, že [3]:

- ve spalovacím prostoru zůstává menší množství palin
- palivo se lépe mísí se vzduchem
- roste kompresní teplota, dochází k dokonalejšímu odpaření
- výfukové plyny se rozpínají do většího objemu, jejich teplota poklesne a snižují se tak tepelné ztráty ve výfuku



Obrázek 8: Závislost měrné spotřeby paliva  $m_{pe}$  a produkce HC a  $NO_x$  na kompresním poměru  $\epsilon$  [1]

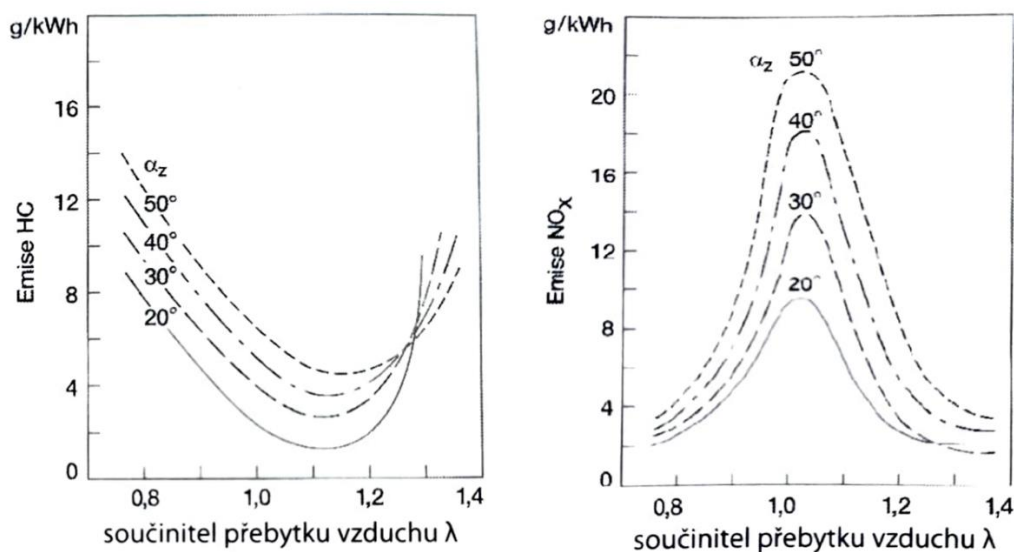
Maximální hodnota kompresního poměru u zážehových motorů je však omezena detonačním spalováním. To vzniká důsledkem samovznícení zápalné směsi před samotným zažehnutím od zapalovací svíčky. Jedná se tedy o nežádoucí jev, který vede k tzv. klepání motoru. Odolnost paliv vůči detonačnímu spalování je jedna z jejich klíčových vlastností a je charakterizována oktanovým číslem. S rostoucí hodnotou oktanového čísla se zlepšuje odolnost paliva vůči samovznícení. Zážehové motory obvykle pracují s hodnotami kompresního poměru  $\epsilon = 8:1$  až  $12:1$  [18]. Oktanové číslo (ON) je měřítkem kvality vznícení nebo hořlavosti benzínu. Dělí se na oktanové číslo (RON) a oktanové číslo motoru (MON). RON udává

normální jízdní vlastnosti při mírných podmínkách vstupní teploty (65,6 °C) a otáčkách za minutu (600 ot/min). MON udává výkon při vyšších otáčkách (900 ot/min) a náročných podmínkách vstupní teploty (148,9 °C). RON je hodnota používaná k označení odolnosti motorového paliva vůči klepání motoru. ON jsou založeny na stupnici, na které je isooktan 100 (minimální klepání) a n-heptan je 0 (maximální klepání). RON se pak měří ve vztahu ke směsi isooktanu a n-heptanu. ON (RON) se reguluje přidáním uhlovodíku zvaného oktán. Čím vyšší je RON benzínu, tím více palivo lze stlačit. To umožňuje vyšší kompresi, vyšší teplotu a tlak uvnitř motoru, čímž se dosáhne vyššího výkonu [19].

### 3.2.2 PŘEDSTIH ZÁŽEHU

Samotné hoření směsi trvá určitou dobu, proto je třeba správné načasování zažehnutí směsi jiskrou od zapalovací svíčky [20]. Časování zapalování spočívá v nastavení úhlu klikového hřídele během kompresního zdvihu vzhledem k poloze pístu. Nastavení správného předstihu zážehu ( $\alpha_z$ ), který se udává ve stupních, je zásadní pro průběh výkonu a produkci emisí výfukových plynů motoru. V případě, že předstih zážehu má kladnou hodnotu, k zažehnutí dochází před dosažením HÚ. Předstih zážehu je třeba zvolit tak, že prohoření větší části směsi proběhlo právě v HÚ. Pokud je předstih příliš velký, největší tlak vznikne již ve fázi komprese, kdy je píst před horní úvratí a tlak bude působit proti jeho pohybu. V případě moc malého předstihu dojde k nižšímu nárůstu tlaku, což je dáno tím, že píst se už pohybuje směrem dolů. To vede k neúplnému využití veškerého energetického potenciálu [21].

Předstih zážehu má tedy vliv na průběh výkonu motoru a jeho měrnou spotřebu paliva, ale také na produkci výfukových plynů a emisí (viz Obrázek 9). Změna předstihu zážehu pro nízké otáčky má jen malý vliv na výkon, ale aby bylo možné výkon zvýšit, musí se zvýšit otáčky motoru a s nimi i velikost předstihu. To vede ke zvýšení teploty ve válci, zlepšení termické účinnosti a snížení měrné spotřeby paliva, avšak zvýšený předstih zážehu zvyšuje i produkci emisí HC a  $\text{NO}_x$  [20]. Zvětšování úhlu předstihu způsobuje vyšší špičkový tlak ve válci. Tento vyšší tlak stlačuje směs paliva a vzduchu do štěrbin (nejvýrazněji do prostoru mezi korunou pístu a stěnami válce), kde plamen uhasíná a směs zůstane nespálená. Při větším předstihu je teplota směsi, která na konci cyklu vychází ze štěrbin, nižší. To znemožňuje reakce uhlovodíků (HC) a kyslíku a zvyšuje se koncentrace HC ve výfukových plynech [21].



Obrázek 9: Závislost produkce HC a  $\text{NO}_x$  na velikosti úhlu předstihu zážehu  $\alpha_z$  a součiniteli  $\lambda$  [1]

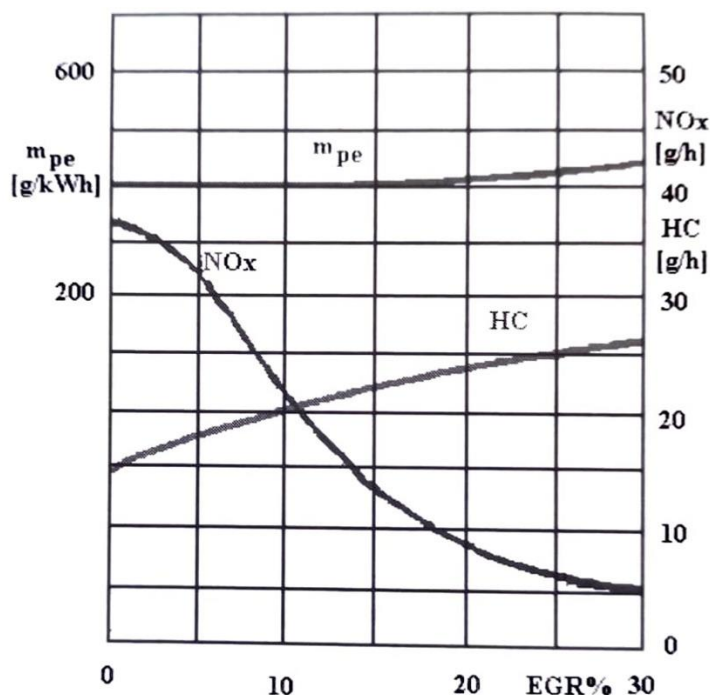


Předstih zážehu je třeba volit jako kompromis mezi ideálním průběhem výkonu motoru, jeho měrnou spotřebou a produkovaným množstvím emisí. Zároveň však není konstantní, je třeba jej neustále regulovat dle otáček a zatížení motoru. S rostoucími otáčkami a zátěží je nutné dodat více zápalné směsi, která déle hoří, a předstih proto musí být větší.

### 3.2.3 RECIRKULACE VÝFUKOVÝCH PLYNŮ

Recirkulace výfukových plynů, tedy technika EGR (Exhaust Gas Recirculation), jako jedno z účinných opatření ke snížení tvorby  $\text{NO}_x$ , byla poprvé aplikována u vznětových motorů. S rostoucími energetickými a ekologickými problémy se ale EGR rychle rozšířilo také do zážehových motorů [22].

Technologie EGR spočívá v tom, že se část výfukových plynů dostává zpět do válce. Výfukové plyny se chovají jako inertní, neúčastní se tedy spalování směsi, ale odebírají část vzniklého tepla. To vede ke snížení teploty spalování a k jeho zpomalení. Maximální teplota a doba trvání vysoké teploty tedy jsou sníženy, a to má za následek snížení produkce  $\text{NO}_x$ . Vhodnou volbou množství recirkulovaných plynů (udává se v EGR %) se dá dosáhnout snížení produkce  $\text{NO}_x$  až o 65 %. Nejlepší účinnost má systém do 15 EGR %. V případě, že je množství recirkulovaných plynů malé, dochází ke zvýšení teploty směsného plynu, čímž se snižuje chladicí účinek stěny, takže koncentrace HC klesá. Se zvyšujícím se množstvím recirkulovaných plynů se však zesílí účinek ředění, směsný plyn hoří pomaleji a šíření plamene není úplné. To vede ke zhoršení kvality spalování a zvýšení koncentrace HC [23]. Obrázek 10 znázorňuje závislost produkce emisí na recirkulaci výfukových plynů.



Obrázek 10: Závislost měrné spotřeby paliva  $m_{pe}$ ,  $\text{NO}_x$  a HC na recirkulaci výfukových plynů [1]

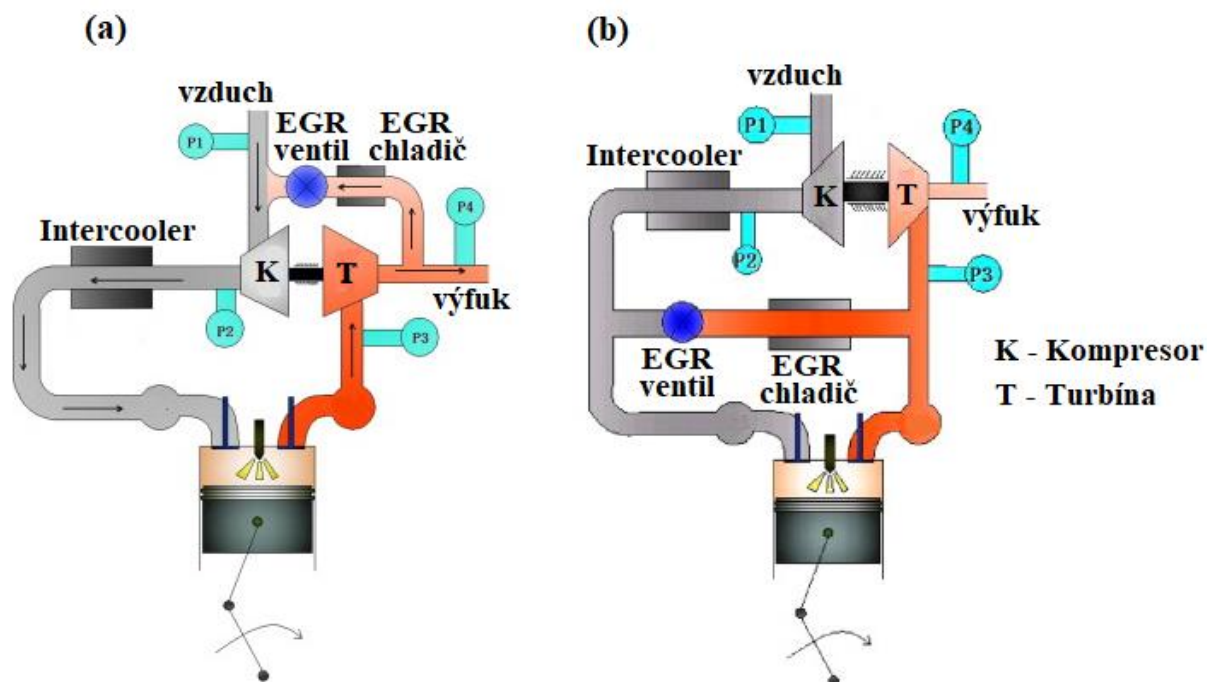
Ředění náplně válce výfukovými plyny lze rozdělit na vnitřní EGR a vnější EGR. Vnitřní EGR je realizováno překrytím otevření sacího a výfukového ventilu během výfukového zdvihu. To vyžaduje, aby byl motor opatřen variabilním časováním ventilů. Bez toho není možné nezávislé a efektivní řízení poměru EGR. V důsledku toho se stal široce používaný vnější EGR,

a to zejména v motorech přepřňovaných turbodmychadlem. U vnějšího EGR jsou odebírány výfukové plyny proudící z motoru a poté jsou přiváděny přes EGR ventil do chladiče spalin a z něj do sání motoru [22].

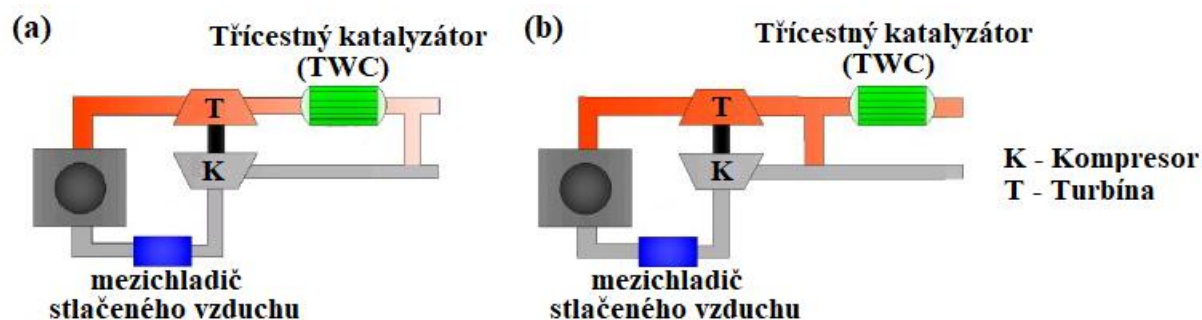
Vnější EGR se dále dělí na vysokotlakou a nízkotlakou recirkulaci (viz Obrázek 11). V obou případech je množství recirkulovaných plynů regulované elektronicky ovládaným EGR ventilem, skrz který plyny proudí. Vždy je však třeba tyto plyny následně ochladit, aby se zmenšil jejich objem a nedocházelo ke snížení objemové účinnosti motoru. Při nízkotlaké recirkulaci jdou výfukové plyny nejprve do turbíny turbodmychadla a teprve pak spolu s čerstvým vzduchem do samotného kompresoru turbodmychadla. Tlak ve výfuku je větší než tlak na vstupu kompresoru, takže je obecně k dispozici kladný rozdíl mezi výstupem z turbíny a vstupem kompresoru. V řešení s nízkotlakým systémem EGR je tlakový rozdíl v okruzích EGR velmi nízký, proto je pro zajištění dostatečného průtoku EGR nutná vysoká propustnost EGR ventilu a EGR chladiče. Kromě toho musí mít tento chladič vysokou účinnost, aby byla zajištěna dobrá účinnost kompresoru, jinak způsobí přehřátí nasávaného vzduchu a sníží objemovou účinnost. Tento fakt způsobuje omezení použití nízkotlaké recirkulace. Ta se však dále dělí na špinavý EGR a čistý EGR (viz Obrázek 12). Vliv těchto dvou struktur na kompresor je zcela odlišný. Při použití čistého EGR jde výfuk do TWC a poté prochází kompresorem spolu s čerstvým vzduchem. Keramické částice z TWC mohou korodovat kolo kompresoru, proto je pro ochranu kola vyžadován dodatečný nátěr. Při použití špinavého EGR je hlavním rozdílem přítomnost lepkavých uhlovodíků, což vyžaduje použití další ochrany všech součástí. Na druhou stranu špinavé EGR poskytuje oproti čistému vyšší rychlost a účinnost spalování díky opětovnému spalování HC, H<sub>2</sub> a CO, dále pak nižší čerpací ztráty a lepší chlazení EGR [22].

V případě recirkulace vysokotlaké jsou výfukové plyny odvedeny již před turbínou. Tato struktura je používanější než první popsaná. Zde však musí být zajištěn patřičný rozdíl mezi tlakem před turbínou a tlakem plnicím, což je nezbytné pro získání dostatečně velikého množství výfukových plynů přiváděných do nasávaného vzduchu. Tohoto tlakového rozdílu se dá dosáhnout buď zvýšením tlaku před turbínou, nebo snížením plnicího tlaku škrcením nasávaného vzduchu. První metodou je škrcení sání či výfuku, kde je pak třeba instalovat škrticí ventil za kompresorem nebo před turbínou. Další široce používanou metodou je použití VGT (variabilní geometrie lopatek turbodmychadla) k zajištění požadovaného hnacího tlaku EGR za nízkého poklesu výkonu přepřňovaného motoru. Zmenšením průřezu průtokového kanálu turbíny se zvýší tlak před turbínou a sníží tlak plnicí [22].





Obrázek 11: Schéma nízkotlaké vnější recirkulace (a) a vysokotlaké vnější recirkulace (b) výfukových plynů [22]



Obrázek 12: Schéma čistého (a) a špinavého (b) nízkotlakého systému EGR [22]

### 3.2.4 PROMĚNNÉ ČASOVÁNÍ VENTILŮ, ZMĚNA PRACOVNÍHO CYKLU

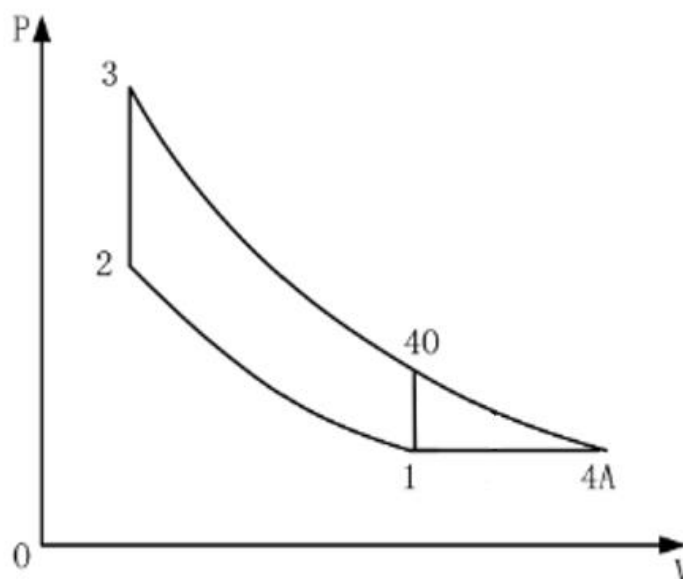
Časování a zdvih ventilů jsou významnými parametry, které ovlivňují výkon a emise zážehových motorů [24]. Motory s klasickým rozvodovým mechanismem s konstantním časováním a zdvihem ventilů představují kompromis, který plně vyhovuje pouze v úzkém rozmezí otáček a zatížení motoru [3]. Pomocí variabilní časování ventilů (VVT – Variable Valve-Timing) lze dosáhnout lepších výkonových parametrů. Řízením časování a zdvihu ventilů může být zlepšena křivka točivého momentu a výkonu daného motoru. Zároveň se dá dosáhnout nižší spotřeby paliva, a tedy i tento systém má vliv na produkci emisí. Časování ventilů je jedním z nejdůležitějších parametrů pro optimalizaci účinnosti a produkce emisí, což umožňuje spalovacím motorům přizpůsobit se budoucím emisním limitům a standardům. Ovládání sacího a výfukového ventilu zajišťuje optimální plnění válce při libovolných otáčkách motoru. To umožňuje downsizing, tedy zmenšení objemu motoru, což může dále přispět ke snížení spotřeby paliva [24].

Variabilní časování ventilů se vztahuje jak na dobu otevření, tak na dobu trvání intervalu otevření ventilu. Lze jej použít pro snížení spotřeby paliva, a tedy i emisí motoru. Toho je dosaženo řízením maximální teploty ve válci a ovládním recirkulace výfukových plynů, jak bylo zmíněno v předchozí kapitole [24]. Nejčastějším způsobem realizace proměnného časování ventilů je natáčení vačkové hřídele sacích ventilů vůči klikové hřídeli, ale modernější řešení používají také natáčení vačkové hřídele výfukových ventilů [3].

Další možností, jak dosáhnout optimalizace výkonu a spotřeby paliva a tím i snížení emisí, je přechod motoru mezi různými tepelnými cykly dle zátěže. Od doby, kdy byl vynalezen spalovací motor, byl pro čtyřdobé motory s pístovým klikovým mechanismem předně používán Ottův cyklus (OC), zejména pak pro civilní aplikace [25]. Avšak bylo zjištěno, že při nižší zátěži motoru je vhodné přejít z Ottova cyklu na Atkinsonův. U hybridních vozidel je často využito motorů, které fungují výhradně podle Atkinsonova cyklu (ACE – Atkinson Cycle Engine) [26], které však dosahují lepší účinnosti snížením svého maximálního výkonu [25]. Tento cyklus je realizován pozdním uzavíráním sacích ventilů. Je tedy nezbytná implementace proměnného časování ventilů (VVT). Prostřednictvím ovládní VVT dokážou motory ACE snížit ztrátu škrticí klapky při částečném zatížení. Z důvodu nižšího výkonu motorů s výhradně Atkinsonovým cyklem se používají motory s Otto-Atkinsonovým cyklem, kdy se Ottův cyklus realizuje při plném zatížení, aby bylo dosaženo vyššího výkonu. Naopak při částečném zatížení motor přechází do Atkinsonova cyklu, který je za takových podmínek efektivnější a je dosaženo lepší spotřeby paliva. V Atkinsonově cyklu je navíc snížena náchylnost ke klepání [26].

Jak je zřejmé z p-V diagramu (viz Obrázek 13), hlavní rozdíl mezi oběma cykly je ve způsobu odvodu výfukových plynů (odvodu tepla). U Ottova cyklu probíhá odvod tepla izochoricky (děj 4O-1) stejně jako přívod zápalné směsi (děj 2-3). Oproti němu se Atkinsonův cyklus liší odvodem tepla, který realizován izobaricky a expanzní zdvih trvá delší dobu (děj 3-4A). Proto se motorům pracujícím v Atkinsonovu cyklu říká: motory s prodlouženou expanzí.

Další možností je přechod na Millerův cyklus, který funguje na obdobném principu jako Atkinsonův, má však kratší dobu komprese. V praxi se Atkinsonův cyklus používá u motorů s přirozeným sáním, oproti tomu Millerův je používán u přeplňovaných motorů [25].

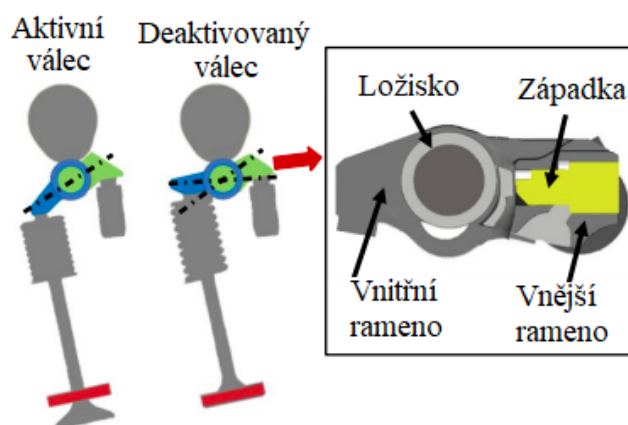


Obrázek 13: p-V diagram pro ideální Ottův cyklus (1-2-3-4O-1), Atkinsonův cyklus (1-2-3-4A-1) [25]

### 3.2.5 VYPÍNÁNÍ VÁLCŮ CDA (CYLINDER DEACTIVATION)

Další z cest ke snížení emisí je zvýšení účinnosti spalovacích motorů technologiemi, jako je deaktivace válců, což vede ke snížení spotřeby paliva. Vypínání válců je dosahováno v provozu s částečným zatížením, protože deaktivace některých z válců způsobí pokles výkonu. Jejich deaktivace při plném zatížení by pak mohla způsobit nedostatek výkonu. Deaktivaci některého z válců se zvyšuje zatížení aktivních válců a motor pracuje s vyšší účinností a nižší  $m_{pe}$  (měrnou efektivní spotřebou) [27]. Měrná efektivní spotřeba paliva je měřítkem palivové účinnosti jakéhokoli motoru, který spaluje palivo a produkuje točivý moment. Hodnota  $m_{pe}$  udává, jak efektivně motor přeměňuje dodané palivo na užitečnou práci [28].

Většina motorů deaktivuje stanovený počet válců na požadovanou dobu. Tato technologie se nazývá selektivní nebo fixní CDA. Existuje mnoho způsobů, jak implementovat CDA. Nejjednodušší způsob realizace CDA je deaktivovat vstřikování paliva. Přínos na spotřebu paliva je však spíše nízký. Nejběžnější cestou, jak aplikovat CDA, je použití přepínatelných prvků, jako je kladkový váleček (viz Obrázek 14). Skládá se ze dvou hlavních částí, a sice vnitřního a vnějšího ramene, které jsou spojeny válečkovým čepem a západkou. Tato západka může být hydraulicky odpojena, tehdy není zajištěn zdvih ventilu [27].



Obrázek 14: Schematické znázornění přepínatelného kladkového válečku [27]

Tato technologie může být implementována do motorů s hydraulickými zdvihátky ventilů. Posuvný kolík (západka) se může pohybovat tlakem oleje tak, aby se dřík ventilu odpojil od zvedáče. Ventil pak prochází skrz průchozí otvor vytvořený v kluzném čepu.

Technologie CDA pomáhá snižovat spotřebu paliva a emise. Má však také některé negativní důsledky. Nejvýraznější jsou horší kvalita jízdního komfortu NVH (Noise, Vibration, and Harshness) a vyšší třecí ztráty [27].

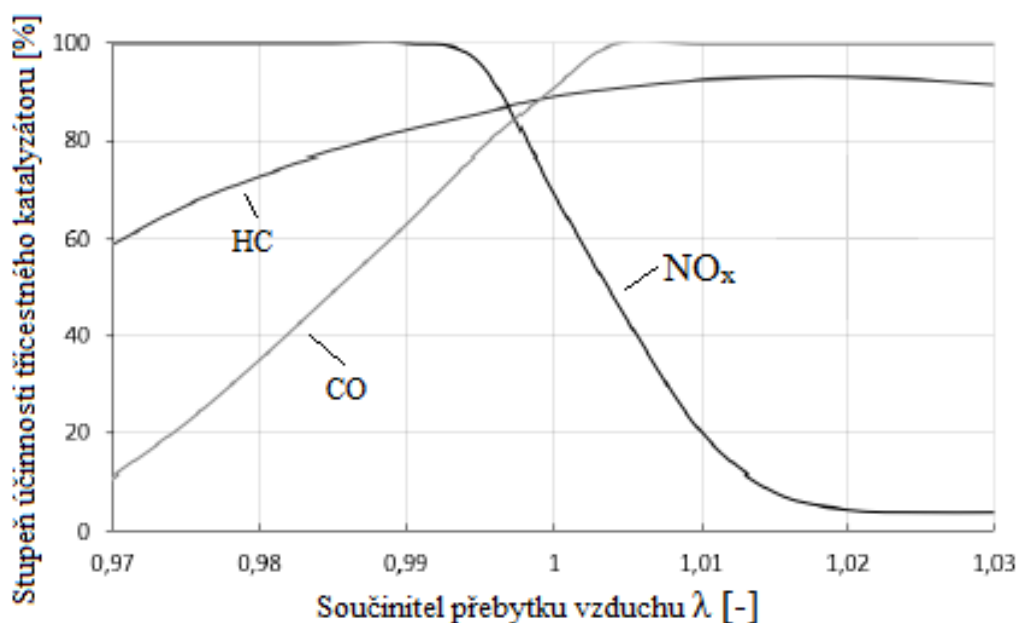
### 3.3 OPATŘENÍ ZA MOTOREM

Poslední možností, jak snížit obsah produkovaných škodlivých látek, je použití opatření za motorem, která jsou součástí výfukového systému. Jedná se primárně o katalyzátory (katalytické konvertory), u moderních motorů (především přímovstřikových) je však stále častěji implementován také filtr pevných částic [1]. Katalytický konvertor (obecně nazývaný katalyzátor) je zařízení umístěné ve výfukovém systému a na základě chemicko-tepelných reakcí zajišťuje snižování jednotlivých složek emisí ve výfukových plynech. Dále bude používán výraz „katalyzátor“ [2].

### 3.3.1 TŘÍCESTNÝ KATALYZÁTOR (TWC)

Třícestné katalyzátory (TWC), označované také jako oxidačně-redukční, byly vyvinuty pro kontrolu a úpravu plynných znečišťujících látek pro benzínové motory v 80. letech 20. století [29]. Vývoj technologie třícestného katalyzátoru byl zásadní pro dodržování předpisů o kvalitě vzduchu u benzínových motorů prostřednictvím přeměny znečišťujících látek z výfukových plynů spalovacích motorů [30].

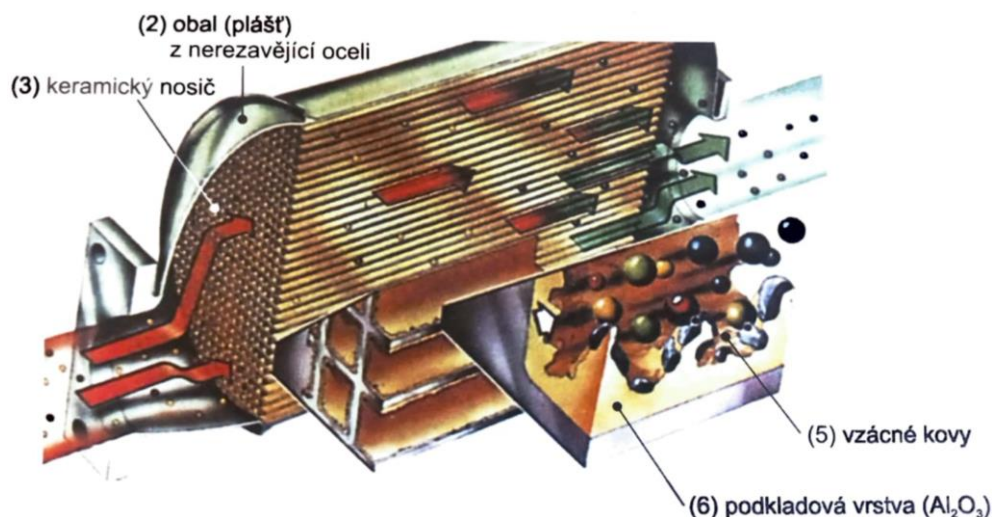
TWC odstraňuje z výfukových plynů CO, HC i NO<sub>x</sub> současně [2]. Tyto základní nečistoty přeměňuje na jejich odpovídající neškodné produkty, tedy na CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O [31]. Předpokladem je použití lambda regulace, která zajistí tvorbu zápalné směsi o stechiometrickém složení ( $\lambda = 1$ ) [2]. Závislost účinnosti třícestného katalyzátoru na hodnotě  $\lambda$  viz Obrázek 15.



Obrázek 15: Závislost účinnosti třícestného katalyzátoru na součiniteli  $\lambda$  [1]

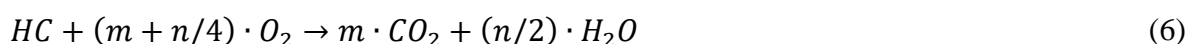
Další podmínkou pro správnou funkci TWC je vhodná provozní teplota. Ke snižování obsahu škodlivin začíná docházet až kolem teploty 250 °C, avšak pro vysokou účinnost a co nejdélší životnost katalyzátoru jsou třeba teploty 400 až 800 °C. Při teplotách vyšších než 800 °C již dochází k tepelnému stárnutí. Vzácné kovy a podkladové vrstvy se spékají, což postupně může vést k úplnému vyřazení TWC z činnosti [2].

Třícestný katalyzátor se skládá z obalu zhotoveného z nerezového plechu, nosiče a vlastní katalytické vrstvy. Používají se dva základní typy nosičů a sice keramický a kovový. Keramický nosič je válcovité těleso, ve kterém jsou vytvořeny tisíce podélných kanálků, kterými proudí výfukové plyny. Obrázek 16 schematicky znázorňuje konstrukci TWC s keramickým nosičem. Kovový nosič dosáhne provozní teploty dříve než keramický, a to je důvod, proč se i přes vyšší cenu používají kovové nosiče stále častěji. Dalšími jejich výhodami jsou vytvoření větší plochy průchozích kanálků, necitlivost vůči vibracím a náhlým změnám teploty. Mezi ocelovým obalem a nosičem je kovové pletivo, které je tvořeno ocelovými drátky. To slouží jako ochrana nosiče před mechanickým poškozením a zároveň zastává funkci tepelné izolace [2].

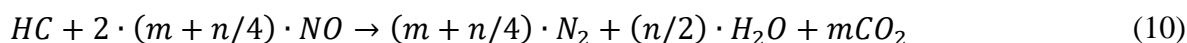


Obrázek 16: Schématický řez třicestným katalyzátorem s keramickým nosičem [2]

K přeměně škodlivin na neškodné látky dochází oxidačními a redukčními reakcemi [1]. Oxidační reakce probíhají podle těchto rovnic:



Redukční reakce potom dle rovnic:



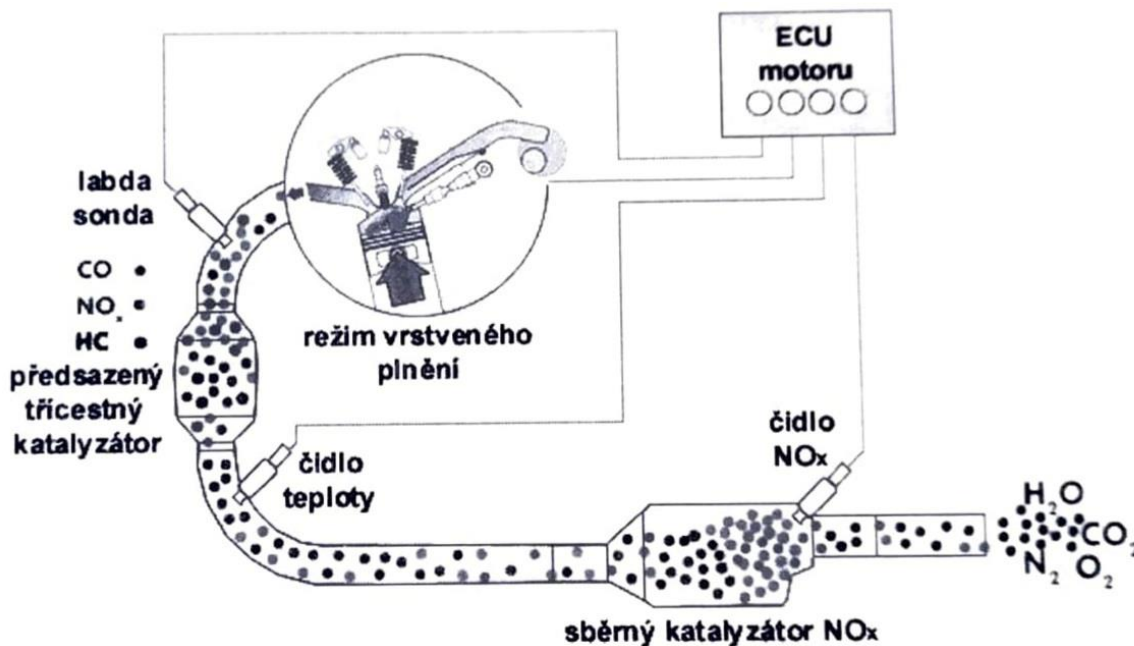
Nyní bude ukázáno několik vedlejších povrchových chemických reakcí, které probíhají v reálných podmínkách uvnitř moderního dvouvrstvého monolitního TWC s kovovým nosičem Rh/Pd [32]:





### 3.3.2 SBĚRNÝ (ZÁSObNÍKOVÝ) KATALYZÁTOR (NSC)

V současné době se předpokládá implementace sběrného katalyzátoru  $\text{NO}_x$  (NSC –  $\text{NO}_x$  Storage Catalyst) do lehkých osobních automobilů pro snížení oxidů dusíku, aby byly splněny přísné emisní legislativní cíle [33]. Katalyzátory TWC účinně snižují  $\text{NO}_x$  pouze v případě, že motor pracuje se směsí blízké stechiometrické. Avšak velké rozšíření motorů pracujících v režimu vrstvené směsi (motory s přímým vstřikováním benzínu), kdy je  $\lambda > 1$  a TWC má pouze malou schopnost redukovat emise  $\text{NO}_x$ , vedlo k zavedení sběrných katalyzátorů [34]. Umístění NSC ve výfukovém systému viz Obrázek 17.



Obrázek 17: Schéma umístění sběrného katalyzátoru ve výfukovém systému zážehového motoru s přímým vstřikováním paliva [1]

Sběrný katalyzátor zachycuje  $\text{NO}_x$  pomocí oxidu barnatého ( $\text{BaO}$ ) [34]. Během provozu s přebytkem vzduchu (chudá směs) jsou oxidy dusíku ukládány ve sběrném katalyzátoru ve formě bariumnitrátů [1]. Je však nezbytné, aby docházelo k pravidelné regeneraci katalyzátoru. To se děje v režimu s bohatou směsí [34]. Kvůli omezené kapacitě NSC musí k jeho regeneraci docházet zhruba každých 30 až 60 sekund, přičemž samotná regenerace trvá 1 až 2 sekundy. V režimu motoru s bohatou směsí ( $\lambda < 1$ ) dochází k vyšší produkci  $\text{CO}$ , které reagují s oxidy dusíku vázanými v bariumnitrátech. Chemické reakce ve sběrném katalyzátoru jsou popsány těmito rovnicemi [1]:



### 3.3.3 FILTR PEVNÝCH ČÁSTIC (GPF)

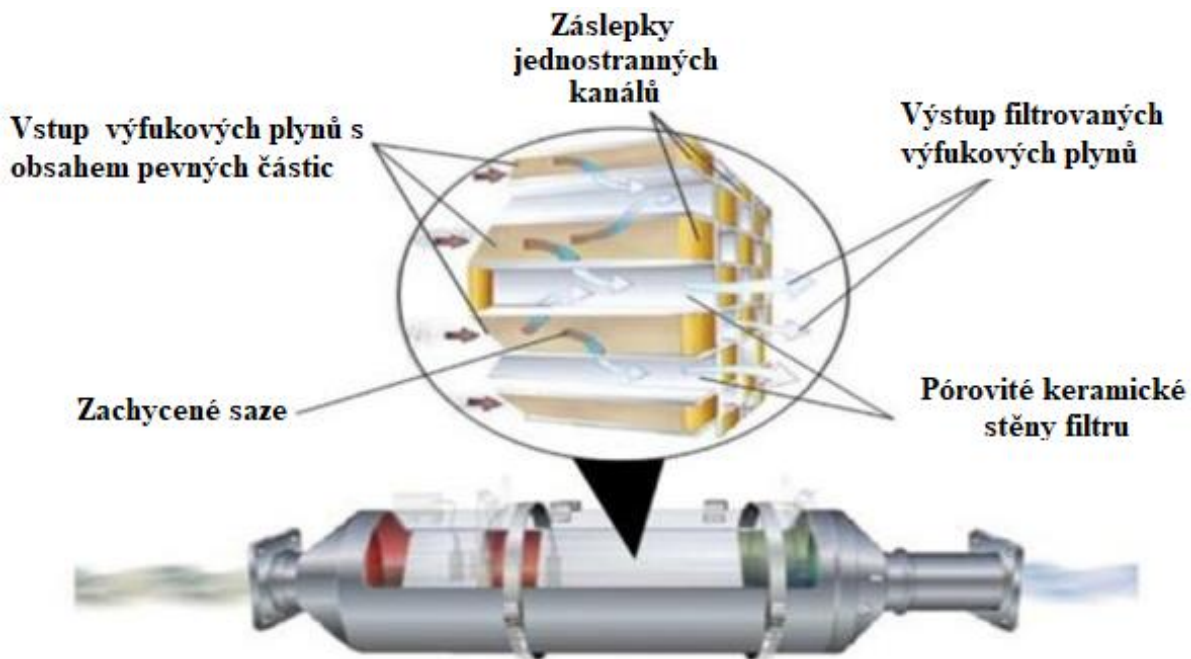
Motory s přímým vstřikováním benzínu (GDI) se v dnešní době používají v osobních vozidlech po celém světě. Přestože mají motory GDI vyšší tepelnou účinnost a výkon ve srovnání s benzínovými motory s nepřímým vstřikováním paliva (MPI), trpí vysokými emisemi pevných

částic v důsledku nedokonalého promísení směsi před spalováním a dopadu paliva na stěny spalovací komory. Emisní předpisy Euro 6 stanovují od roku 2014 přísné limity jak pro hmotnost pevných částic, tak i pro množství částic (PN) produkovaných zážehovými motory. Průměrné velikosti částic výfukových plynů motorů GDI jsou menší než u diesellových motorů. Hmotnostními emisemi částic u motorů GDI lze poměrně snadno splnit emisní normy, zatímco počtem částic (PN) nikoli. Výzkumy ukázaly, že koncentrace počtu částic (PN) u motorů GDI jsou vyšší než u benzínových motorů MPI a u vznětových motorů vybavených filtry pevných částic (DPF). Proto byly zavedeny filtry pevných částic i pro benzínové motory, tedy filtry GPF [29]. Tvorba pevných částic v motorech GDI je způsobena pouze částečně odpařeným kapalným palivem. K neúplnému spálení paliva dochází ve spalovací komoře v oblastech bohatých na palivo [35].

Technologie GPF rychle pokročila a je nabízena široká škála druhů filtrů s různou velikostí pórů a geometrií buněk, aby se minimalizovala tlaková ztráta a byla poskytnuta vysoká kapacita ukládání částic a dobrá účinnost filtrace. Ukázalo se, že GPF jsou velmi účinné, zachycují částice s účinností filtrace zhruba 95 % i při různých provozních režimech [36].

Benzínové filtry pevných částic (GPF) fungují principiálně stejně jako DPF, rozdíl je však v provozních podmínkách, které se u zážehových a vznětových motorů liší. Hlavní rozdíly u benzínových motorů oproti vznětovým jsou vyšší provozní teploty (až 900 °C oproti zhruba 400 °C), nižší hmotnost pevných částic a nižší koncentrace O<sub>2</sub>. Stejně jako DPF, většina komerčních GPF jsou keramická zařízení se střídavě otevřenými a zavřenými kanály. Přicházející výfukové plyny vstupují do otevřených kanálů a jsou nuceny proudit přes porézní keramické stěny, kde se zachycují saze. Ačkoli je u GPF i DPF princip filtrace stejný, požadavky na materiál se pro obě aplikace liší kvůli rozdílným provozním podmínkám a požadavkům. Vzhledem k tomu, že benzínové motory pracují za podmínek rychlého zahřívání a ochlazení, je klíčovým požadavkem na GPF dobrý výkon i během prudkých změn teploty. Pro tuto aplikaci se velmi dobře hodí Cordierit, který má nízký koeficient tepelné roztažnosti a vynikající účinnost při tepelném šoku. Cordierit je materiál zavedený v systémech následné úpravy výfukových plynů pro průtokové substráty i nástěnné filtry. Mezi další, méně používané materiály patří karbid křemíku (SiC) nebo titaničitan hlinitý, které se používají v aplikacích s vysokým zatížením saze [36].

Zpočátku se saze mechanicky zachytávají ve keramické stěně. Nahromaděné saze a popel však postupně tvoří vrstvu na stěnách filtru, která brání dalšímu vnikání sazí do stěny a pomáhá tak zvyšovat účinnost filtrace. Tato vrstva má však za následek rostoucí odpor proti proudícím výfukovým plynům. Když je filtr čerstvý, účinnost filtrace (tedy podíl zachycených částic) není stoprocentní, ale s počtem najetých kilometrů se zvyšuje. Nezbytná regenerace filtru sice vede k rozbití vrstvy sazí a následnému snížení účinnosti filtrace, avšak i přesto účinnost dosahuje pro většinu jízdních podmínek a po celou životnost vozidla více než 90 % [36]. Obrázek 18 schematicky znázorňuje proudění výfukových plynů se saze přes filtr GPF.



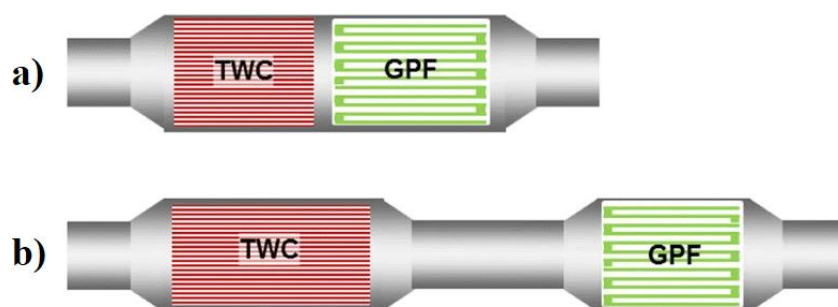
Obrázek 18: Schéma proudění výfukových plynů přes filtr GPF [37]

Regeneraci GPF, která spočívá v oxidaci sazí usazených na stěnách, je možné rozdělit na dva typy, a sice pasivní a nucenou regeneraci. Pro pasivní je třeba dostatečné množství kyslíku a teplota vyšší než zhruba 400 °C. Zážehové motory pracují s dostatečně vysokými teplotami výfukových plynů. U vznětových motorů je zdrojem kyslíku  $\text{NO}_2$ , kterého však mají zážehové motory kvůli předsazenému TWC nedostatek. Pro regeneraci filtru je však kyslíku dostatek díky chodu motoru v režimu chudé směsi, kdy je v zápalné směsi přebytek vzduchu. V případě, že dlouho nenastanou podmínky vhodné pro pasivní regeneraci, nastane regenerace nucená. Dojde k řízenému zvýšení teploty výfukových plynů a spalování chudé směsi, čímž se vytvoří podmínky nutné pro proběhnutí regenerace. Ta probíhá podle těchto rovnic [36]:



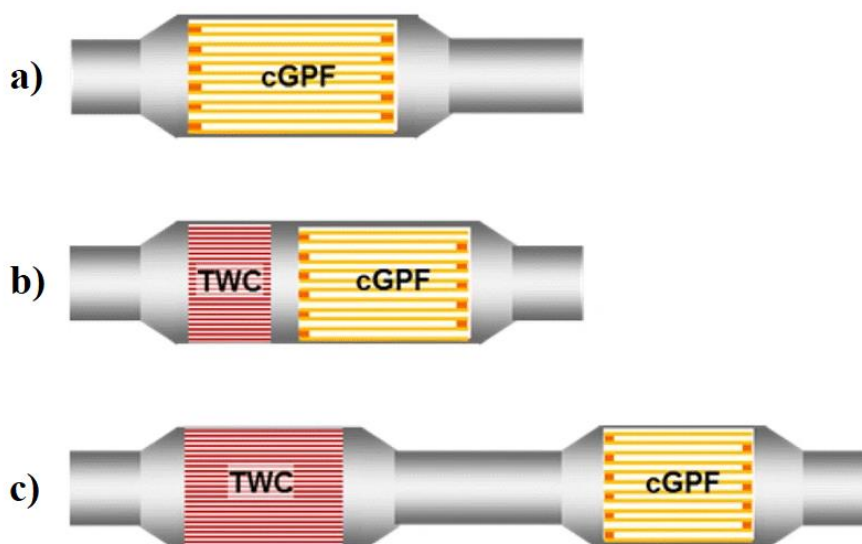
Architektura výfukového systému má významný vliv na design a výkon GPF. Jsou rozlišovány dvě varianty umístění GPF. U varianty CC (close-coupled) je filtr pevných částic umístěn hned za TWC, zatímco u druhé varianty, tedy UF (underfloor), jsou filtr i katalyzátor umístěny samostatně. Vyšší účinnost filtrace má varianta UF. Výfukové plyny mají nižší teplotu a rychlost proudění, což má za následek větší množství usazených sazí oproti provedení CC. Další výhodou je nižší tlakový spád ve filtru, tedy menší odpor proti výfukovým plynům. Nevýhodou varianty UF je však negativní vliv nižší teploty výfukových plynů na regeneraci filtru. Možné konfigurace uspořádání GPF viz Obrázek 19.





Obrázek 19: Možné varianty uspořádání filtru GPF ve výfukovém systému ((a) provedení CC, (b) provedení UF) [36]

Existují také filtry pevných částic s katalytickým povlakem (cGPF – Catalyzed Gasoline Particulate Filter). Tyto filtry zároveň zastávají také funkci třicestného katalyzátoru. Možnosti jejich uspořádání viz Obrázek 20.



Obrázek 20: Možné varianty uspořádání filtru cGPF ve výfukovém systému ((a) samotný cGPF bez TWC, (b) provedení CC, (c) provedení UF) [36]

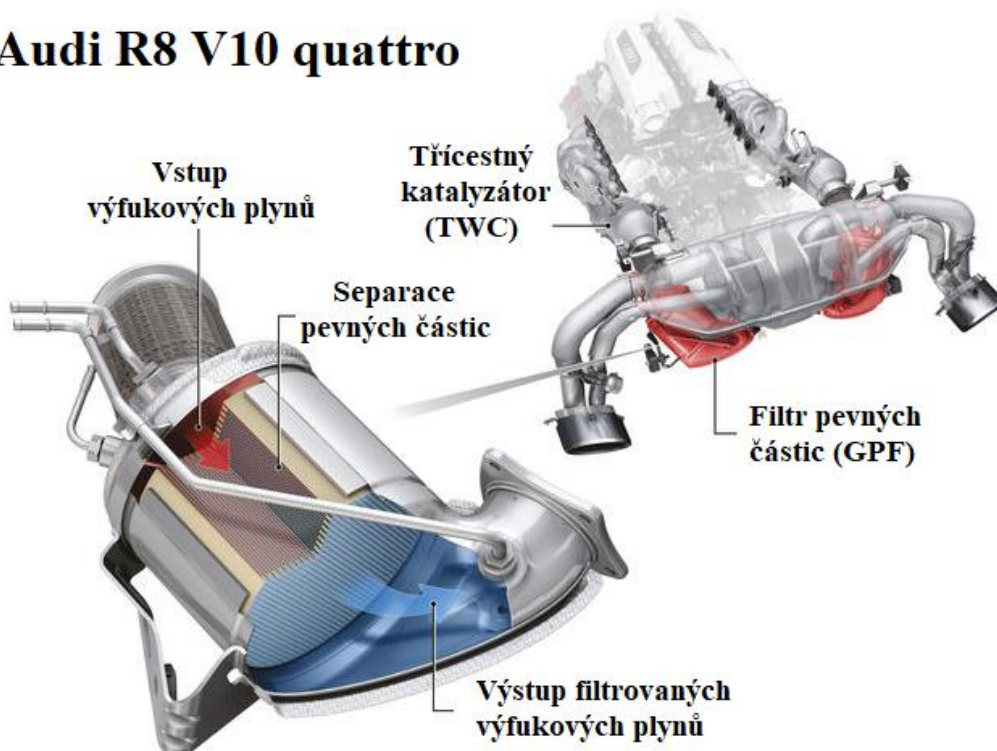
## 4 SOUČASNÁ KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

V této kapitole budou popsána vybraná konstrukční řešení emisních systémů u osobních automobilů z různých kategorií. Nejprve bude detailně rozebrán výfukový systém supersportovního automobilu Audi R8 Coupé V10 quattro performance, poté systém běžného osobního automobilu nižší střední třídy Audi A3 Sportback a následně zástupce sportovních automobilů Ford Mustang GT, který se použitou technikou od předešlých zástupců více liší. Pro porovnání jsou také uvedeny technické údaje osobního rodinného MPV Volkswagen Multivan T7, který je v nabídce také s plug-in hybridním pohonem.

### AUDI R8 COUPÉ V10 QUATTRO PERFORMANCE

Osobní automobil Audi R8 Coupé patří do kategorie supersportovních automobilů. Je opatřen přirozeně plněným motorem V10 (10 válců uspořádaných do „V“) se zdvihovým objemem 5204 cm<sup>3</sup>, který má výkon 456 kW a maximální točivý moment 580 Nm. Motor je vybaven přímým vstřikováním paliva, systémem deaktivace válců (CDA), dvěma třícestnými katalyzátory (TWC) a dvěma filtry pevných částic (GPF) [38]. Audi R8 Coupé má kombinovanou spotřebu paliva 13,0 l/100 km, produkuje (297 – 299) g/km emisí CO<sub>2</sub> a plní emisní normu EURO 6d [39]. Obrázek 21 znázorňuje emisní systém Audi R8 Coupé. Jak je ze schématu (viz Obrázek 21) zřejmé, výfukové plyny jsou odváděny dvěma větvemi, z nichž na každou větev připadá polovina válců, což je dáno koncepcí motoru do tvaru „V“. Obě tyto větve jsou pak opatřeny jedním TWC a jedním GPF. Katalyzátor a filtr pevných částic jsou přitom v obou větvích v konfiguraci UF (viz Obrázek 19), a tedy jsou ve výfukovém systému odděleně.

### Audi R8 V10 quattro

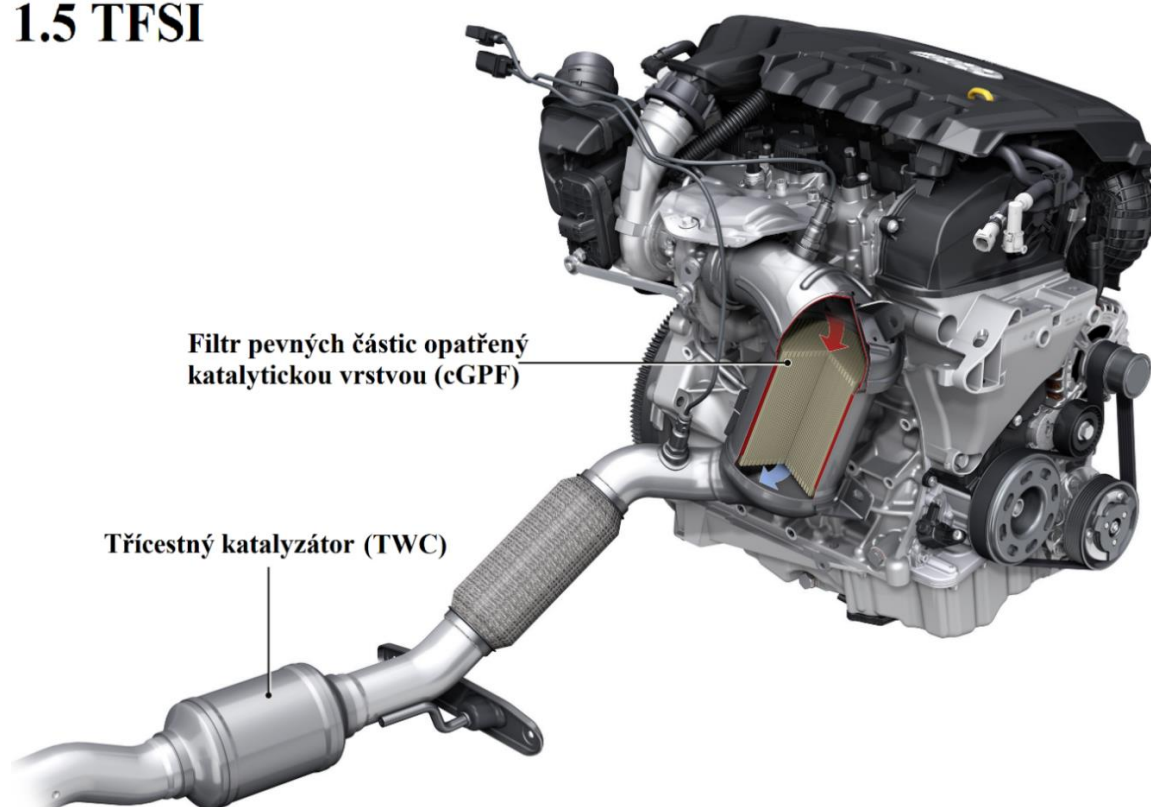


Obrázek 21: Emisní systém automobilu Audi R8 V10 quattro [40]

## AUDI A3 SPORTBACK

Osobní automobil A3 Sportback značky Audi se čtyřválcovým motorem 35 TFSI je automobil nižší střední třídy v prémiovém segmentu. Motor 35 TFSI má zdvihový objem 1498 cm<sup>3</sup>, maximální výkon 110 kW a jeho maximální točivý moment činí 250 Nm. Tento motor je opatřen přímým vstřikováním benzínu, přeplňováním turbodmychadlem, systémem CDA, třícenným katalyzátorem (TWC) a filtrem pevných částic s katalytickou vrstvou (cGPF). Audi A3 Sportback, vybavené tímto motorem, má spotřebu paliva v kombinovaném provozu (6,2 – 6,8) l/100 km, produkuje (127 – 140) g/km emisí CO<sub>2</sub> a plní emisní normu EURO 6d-Temp [41]. Obrázek 22 popisuje prvky výfukového systému Audi A3 Sportback. Z emisního systému (viz Obrázek 22) je možné vidět, že TWC a cGPF jsou implementovány v konfiguraci UF (viz Obrázek 20).

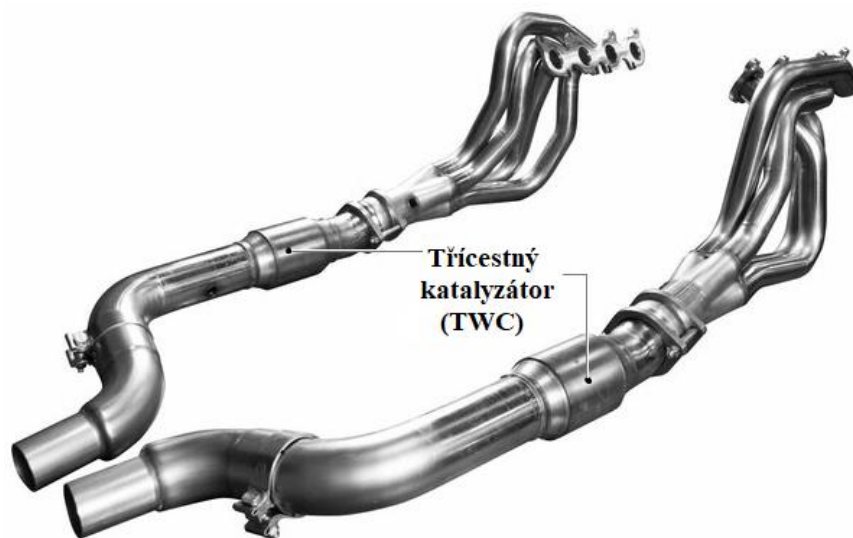
### 1.5 TFSI



Obrázek 22: Emisní systém automobilu Audi A3 Sportback s motorem 1.5 TFSI [42]

## FORD MUSTANG VI GT

Automobil Ford Mustang VI GT modelového roku 2015 – 2017 s motorem 5.0 Ti-VCT V8 patří mezi sportovní automobily. Je osazen osmiválcovým motorem do „V“ o objemu 4951 cm<sup>3</sup> s přirozeným plněním, má nepřímé vstřikování MPI a je vybaven dvěma katalyzátory TWC. Výkon tohoto automobilu činí 310 kW, maximální točivý moment je 530 Nm a produkuje 299 g/km emisí CO<sub>2</sub>. Kombinovaná spotřeba paliva je 13,5 l/100 km [43]. Obrázek 23 znázorňuje výfukový systém Fordu Mustang IV GT. Stejně jako v případě výfukového systému Audi R8 V10 quattro jsou výfukové plyny odváděny z motoru dvěma větvemi, přičemž každá větev odvádí výfukové plyny z poloviny válců. To je dáno koncepcí motoru, který je uspořádán do tvaru „V“. Jak je z emisního systému (viz Obrázek 23) vidět, každá tato větev je opatřena jedním katalyzátorem TWC. Na rozdíl od Audi R8 V10 quattro však Ford Mustang IV GT není vybaven filtry GPF, jelikož místo GDI používá MPI a plní emisní normy i bez použití GPF.



Obrázek 23: Výfukový systém automobilu Ford Mustang IV GT s motorem 5.0 Ti-VCT [44]

### VOLKSWAGEN MULTIVAN T7

Dalším zástupcem je Volkswagen Multivan T7, který je představitelem rodinných MPV. Ten je možné zakoupit s motory 1.5 TSI, 2.0 TSI a plug-in hybridním pohonem s motorem 1.4 TSI (viz Obrázek 24). Všechny tyto motory jsou čtyřválcové, jsou vybaveny přímým vstřikováním paliva, přepínáním turbodmychadlem, třícestným katalyzátorem a filtrem pevných částic. Motory 1.5 TSI a 1.4 TSI jsou navíc opatřeny systémem deaktivace válců. Ve všech verzích splňuje Volkswagen Multivan T7 emisní normu EURO 6d [45].

Volkswagen Multivan T7 se základním motorem 1.5 TSI má výkon 100 kW, maximální točivý moment 220 Nm, kombinovanou spotřebu paliva (6,6 – 6,7) l/100 km a produkuje (150 – 153) g/km emisí CO<sub>2</sub>. S motorem 2.0 TSI má potom výkon 150 kW, maximální točivý moment 320 Nm, kombinovanou spotřebu paliva (7,6 – 7,7) l/100 km a produkuje 175 g/km emisí CO<sub>2</sub>. S plug-in hybridním pohonem má tento automobil systémový výkon 160 kW, systémový točivý moment 350 Nm, kombinovanou spotřebu 1,5 l/100 km a 14,6 kWh/100 km a produkuje 34 g/km emisí CO<sub>2</sub> [45].



Obrázek 24: Pohonný řetězec Volkswagenu Multivan T7 s plug-in hybridním pohonem [46]

## 5 ZHODNOCENÍ POZNATKŮ

Z hlediska snižování emisí jsou podstatné všechny tři druhy opatření, které byly zmíněny a následně podrobně rozebrány.

Z opatření před motorem se dá významně ovlivnit množství produkovaných škodlivin použitím alternativních paliv. To je možné díky tomu, že zážehové motory jsou schopné kromě benzínu spalovat i další druhy paliv. Dále hraje významnou roli příprava paliva (volba palivového ústrojí) a směšovací poměr, tedy jaké je složení zápalné směsi.

Další skupinou jsou opatření na motoru. Zde se často jedná o technologie, které jsou implementovány do samotného zážehového motoru, jako je například proměnné časování ventilů, změna pracovního cyklu, systém vypínání válců a recirkulace výfukových plynů EGR. Všechny tyto technologie pozitivně ovlivňují produkci škodlivin. Dále mezi tato opatření patří volba kompresního poměru a předstihu zážehu. Pomocí systému EGR se dá dosáhnout významného snížení produkce  $\text{NO}_x$ . Jeho použití však nemá pozitivní vliv na výkon automobilu či jeho spotřebu paliva. Systém vypínání válců se implementuje pro snížení spotřeby paliva a tím je také dosaženo snížení produkce emisí. Správná volba kompresního poměru, předstihu zážehu i použití proměnného časování ventilů přispívají k lepšímu průběhu výkonu motoru při plném zatížení, naopak při zatížení částečném vedou ke snížení spotřeby paliva, čímž je také pozitivně ovlivněna produkce škodlivin.

Mezi opatření za motorem patří komponenty výfukového systému, které dodatečně snižují množství škodlivin ve výfukových plynech. Nedílnou součástí výfukového systému všech moderních automobilů se zážehovým motorem je třicestný katalyzátor TWC, který redukuje množství  $\text{CO}$ ,  $\text{HC}$  i  $\text{NO}_x$  zároveň. V současné době je však stále více automobilů vybavených přímým vstřikováním paliva, které zhoršuje účinnost TWC v oblasti snižování množství oxidů dusíku. To je dáno tím, že TWC potřebuje pro správnou funkci stechiometrické složení zápalné směsi ( $\lambda = 1$ ), avšak motory s přímým vstřikováním dokáží pracovat v režimu s chudou směsí ( $\lambda > 1$ ). Tento problém pomáhá řešit sběrný katalyzátor, který slouží ke snižování emisí  $\text{NO}_x$ , a proto bývá používán u automobilů s přímým vstřikováním paliva. Kromě dostatečného množství vzduchu potřebuje TWC pro správnou funkci také dostatečně vysokou teplotu. Proto je snaha umístit TWC co nejbližší motoru, aby k jeho ohřátí došlo co nejrychleji. Kvůli významnému rozšíření přímého vstřikování paliva v moderních zážehových motorech byl do jejich výfukového systému zaveden také filtr pevných částic pro zážehové motory (GPF), který snižuje množství pevných částic obsažených ve výfukových plynech. Ten může být ve výfukovém systému umístěn v kombinaci s TWC různými způsoby. Výfukové plyny proudící přes GPF jsou filtrovány a zbavovány sazí (pevných částic). Čím více těchto sazí je ve filtru usazeno, tím lepší má účinnost filtrace. Zároveň však ve výfukovém systému roste protitlak, což může mít za následek pokles výkonu motoru. Jelikož se filtr postupně plní sazí, musí průběžně docházet k jeho regeneraci, pasivní či nucené. K pasivní regeneraci dochází v případě, že je k dispozici dostatečné množství vzduchu, a zároveň je dosaženo teploty alespoň cca 400 °C. Oba tyto faktory bývají u automobilů se zážehovým motorem za běžných provozních podmínek splněny. V případě, že však dlouho nenastanou podmínky vhodné pro pasivní regeneraci (například při častých krátkých jízdách bez zahřátí motoru), filtr se rychle plní sazí a musí nastat regenerace nucená. Ta je vyvolána řízeným zvýšením teploty výfukových plynů a úmyslným chodem motoru v režimu chudé směsi. Implementace každé další komponenty do výfukového systému však zvyšuje tlakovou ztrátu, která má negativní vliv na výkon motoru. Proto je výhodné použití filtru pevných částic s katalytickou vrstvou (cGPF), který plní funkci třicestného katalyzátoru i filtru pevných částic zároveň.

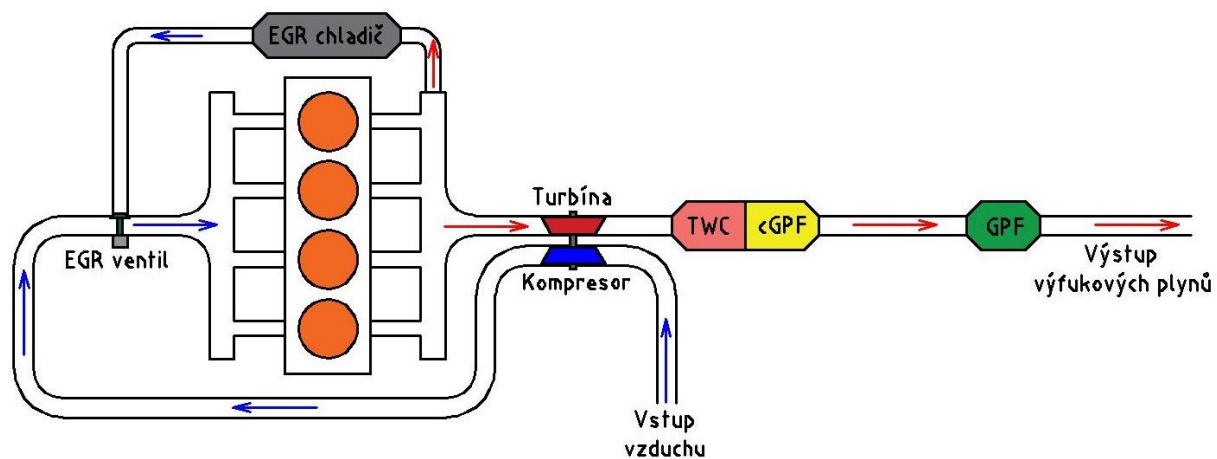


## 6 NÁVRH VLASTNÍ KONFIGURACE

V této kapitole bude navržena pohonná jednotka spolu s výfukovým systémem tak, aby bylo dosaženo co nejlepšího výsledku z hlediska snížení produkce emisí.

Nejprve bude navržena pohonná jednotka. Jedná se o řadový čtyřválcový zážehový motor vybaven přímým vstřikováním paliva a přeplňováním turbodmychadlem. Tento model dobře odpovídá současným standardům v oblasti běžných osobních automobilů. Motor je dále opatřen proměnným časováním sacích i výfukových ventilů pro optimální průběh výkonu. Díky proměnnému časování ventilů je také navržený motor schopen přecházet z klasického Ottova cyklu do cyklu Millerova, který je při nízké zátěži efektivnější a je tak dosaženo nižší spotřeby paliva. Dále je implementována technologie deaktivace válců. Díky tomu je možné při nízké zátěži motoru deaktivovat dva jeho válce, a tak dále snížit spotřebu paliva. Motor je také opatřen systémem vnějšího EGR. Je použit vysokotlaký systém EGR, u kterého jsou výfukové plyny odváděny přes EGR ventil před turbínou turbodmychadla. Tento systém je vhodnější než systém nízkotlaký, jehož EGR ventil je umístěn až za turbínou. To má za následek zvýšení teploty výfukových plynů. V takovém případě je nezbytný chladič s vysokou účinností, aby nedocházelo k přehřátí výfukových plynů a snížení objemové účinnosti motoru. U vysokotlakého systému EGR tento negativní faktor nenastává, a proto je použit ten. Zde je však třeba zajistit dostatečný rozdíl mezi tlakem před turbínou a tlakem plnicím. Toho je dosaženo použitím VGT turbodmychadla.

Jak lze ze schématu (viz Obrázek 25) vidět, součástí výfukového systému jsou tři komponenty snižující produkci škodlivin, a sice TWC katalyzátor, a filtry cGPF a GPF. Katalyzátor je s filtrem cGPF v konfiguraci CC, jsou tedy v těsné blízkosti a zároveň jsou umístěny co nejbližší za turbodmychadlo. Díky tomu dojde během provozu k jejich rychlému ohřátí. TWC dosáhne v krátkém čase vysoké teploty, která je nezbytná pro jeho dobrou funkci a maximalizuje se tak jeho účinnost. U filtru cGPF budou díky jeho rychlému ohřevu zajištěny vhodné podmínky pro pasivní regeneraci. Navíc je filtr cGPF opatřen katalytickou vrstvou, takže ke snižování emisí HC, CO a NO<sub>x</sub> přispívá kromě katalyzátoru TWC i tento filtr. Dále od motoru je ve výfukovém systému umístěn druhý filtr pevných částic, aby pomáhal snižovat množství pevných částic. To má význam zejména v okamžiku, kdy má cGPF horší účinnost vlivem proběhnutí regenerace. Další výhodou takového použití filtru je vyšší účinnost díky jeho umístění. Výfukové plyny mají nižší rychlost i teplotu, díky čemuž dochází k lepšímu usazování sazí ve filtru. Nevýhodou však je horší schopnost pasivní regenerace tohoto filtru. Jelikož je TWC umístěn velice blízko motoru a výfukové plyny zde dosahují vysokých teplot, je použit katalyzátor s kovovým nosičem, který vysokým teplotám odolává lépe než nosič keramický a zároveň dochází k rychlejšímu ohřevu katalyzátoru. Výhodou kovového nosiče je také jeho lepší odolnost proti náhlým změnám teploty a necitlivost vůči vibracím. Použitím TCW s kovovým nosičem tak bude zlepšena jeho účinnost a prodloužena životnost katalyzátoru.



Obrázek 25: Schematické znázornění vlastní konfigurace výfukového systému

## ZÁVĚR

Systémy a technologie, které pomáhají snižovat emise osobních automobilů se zážehovým motorem, jsou jejich nedílnou součástí již desítky let. Mezi nežádoucí škodliviny obsažené ve výfukových plynech patří především CO, HC, NO<sub>x</sub> a pevné částice. Proto jsou systémy a technologie určené ke snižování emisí navrženy tak, aby redukovaly množství těchto složek.

Současná opatření pro snižování emisí jsou zde rozdělena do tří oblastí. Nejprve jsou popsána opatření před motorem. Ta se týkají zejména přípravy zápalné směsi. Směšovací poměr, který je zde uveden, je zásadní parametr z hlediska výkonu motoru, jeho spotřeby i produkce emisí (nelze takto však snižovat současně CO, HC i NO<sub>x</sub>), je proto třeba ho volit s ohledem na všechny tyto parametry. Dalšího snížení emisí se dá dosáhnout použitím alternativních paliv namísto benzínu. Další skupinou jsou opatření na motoru. Výkonnostní parametry motoru i produkce emisí jsou ovlivněny proměnným časováním ventilů, volbou předstihu zážehu a volbou kompresního poměru. Zde obecně platí, že s rostoucím kompresním poměrem se zlepšuje účinnost motoru. Mezi další tato opatření patří systém recirkulace výfukových plynů, který přispívá zejména ke snižování množství NO<sub>x</sub>, dále pak systém deaktivace válců, díky kterému dosahuje automobil nižší spotřeby, avšak tento systém může mít negativní vliv na výkon motoru. Jako poslední jsou popsána opatření za motorem, která jsou součástí výfukového systému automobilu. Nepostradatelným prvkem výfukového systému všech moderních automobilů se zážehovým motorem je třicestný katalyzátor, který redukuje množství produkovaných CO, HC i NO<sub>x</sub> zároveň. U automobilů s přímým vstřikováním paliva však výrazně klesá jeho účinnost v oblasti redukce NO<sub>x</sub>, proto se někdy do těchto automobilů zavádějí také sběrné katalyzátory, které jsou určeny výhradně pro snižování NO<sub>x</sub>. Do automobilů s přímým vstřikováním paliva, které jsou schopné pracovat v režimu s chudou směsí a produkují velké množství pevných částic, se implementují také filtry pevných částic převzaté z motorů vznětových, kde se tato technologie použila poprvé. Existují také filtry pevných částic s katalytickou vrstvou, které kromě zachytávání sazí zastávají také funkci třicestného katalyzátoru. To může být výhodné zejména v situaci, kdy je ve výfukovém systému již mnoho komponent. S každým dalším aplikovaným prvkem totiž roste tlaková ztráta, která má negativní vliv na výkon motoru.

Dále jsou uvedena a popsána současná konstrukční řešení emisních systému konkrétních osobních automobilů. U každého automobilu je k řešení emisního systému přistupováno odlišně, jelikož je mnoho možných konfigurací rozmístění jednotlivých prvků a zároveň nemusejí být všechny zmíněné prvky použity. Důkazem toho je Ford Mustang VI GT, u kterého není implementován filtr pevných částic.

Poslední kapitola je věnována návrhu vlastní konfigurace, ve které byly uplatněny získané znalosti. Nejdříve je zde popsáno řešení pohonné jednotky, která je opatřena mnoha zmíněnými technologiemi, které přispívají ke snižování emisí. Dále je pak navržen výfukový systém s řadou komponent určených k redukci škodlivin přítomných ve výfukových plynech.

V současnosti jsou automobilky vystavovány velkému tlaku na snižování emisí osobních automobilů. V této oblasti byl zaznamenán veliký pokrok a současné automobily dosahují v porovnání se staršími vozidly o mnoho nižších emisí. Toho je docíleno pomocí moderních technologií, které jsou do automobilů zaváděny. Některé tyto technologie pomáhají zlepšit průběh výkonu automobilových motorů, snížit jejich spotřebu, a i tímto přispívají ke snižování emisí. Automobilky se dále snaží zlepšit účinnost zážehových motorů, aby automobily splňovali současné i budoucí emisní normy. V současné době je však kladen velký důraz



na elektrifikaci. Provádí se elektrifikace spalovacích motorů, která má přispět k nižší spotřebě a snížení emisí, ale zároveň se vyvíjí elektromobily, které v provozu dosahují nulových emisí. Snahou je postupné nahrazení automobilů se spalovacími motory těmito elektromobily. Nabízí se ale možnost dále rozvíjet oblast použití alternativních paliv, které v současné době nejsou výrazně rozšířena navzdory tomu, že jde o další způsob, jak dosáhnout nižších emisí. Velký význam má zejména vodík jako alternativní palivo, který je možno získávat z plně obnovitelných zdrojů a nijak neznečišťuje ovzduší.

## 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] JAN, Zdeněk a Bronislav ŽDÁNSKÝ. *Automobily*. 4. vydání. Brno: Avid, spol. s r.o., 2013. ISBN 978-80-87143-29-2.
- [3] JAN, Zdeněk a Bronislav ŽDÁNSKÝ. *Automobily*. 8. vydání. Brno: Avid, spol. s r.o., 2016. ISBN 978-80-87143-37-7.
- [4] HEISLER, Heinz. *Advanced engine technology*. Warrendale: SAE International, 1995. ISBN 1-56091-734-2.
- [5] 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 [cit. 2022-04-08]. ISSN 01968904. Dostupné z: doi:10.1016/S0196-8904(00)00098-4.
- [6] MACEK, Jan. *Spalovací motory*. 2. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2012. ISBN 978-80-01-05015-6.
- [7] BRANIŠ, Martin a Iva HŮNOVÁ, ed. *Atmosféra a klima: aktuální otázky ochrany ovzduší*. V Praze: Karolinum, 2009. ISBN 9788024615981.
- [8] STONE, Richard. *Introduction to internal combustion engines*. 4th ed. Basingstoke: Palgrave Macmillan, c2012. ISBN 978-0-230-57663-6.
- [9] MATĚJOVSKÝ, Vladimír. *Automobilová paliva*. Praha: Grada, 2005. ISBN 80-247-0350-5.
- [10] BERÁNEK, Vít, Jitka ŠTOLCPARTOVÁ a Michal VOJTÍŠEK-LOM. *VZÁJEMNÉ POROVNÁNÍ EMISÍ U ZÁŽEHOVÉHO MOTORU S PŘÍMOU A NEPŘÍMOU TVOROBU SMĚSI* [online]. [cit. 2022-02-19]. Dostupné z: <https://www.medetox.cz/wp-content/uploads/2012/04/Ovzdusi-Beranek-1-benziny-MPI-v-DISI.pdf>.
- [11] European emission standards. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 12.2 2022 [cit. 2022-02-24]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/European\\_emission\\_standards#cite\\_note-nytimes\\_23sep2015-20](https://en.wikipedia.org/wiki/European_emission_standards#cite_note-nytimes_23sep2015-20).
- [12] BIELACZYC, Piotr a Joseph WOODBURN. Trends in Automotive Emission Legislation: Impact on LD Engine Development, Fuels, Lubricants and Test Methods: a Global View, with a Focus on WLTP and RDE Regulations. *Emission Control Science and Technology* [online]. 2019, 2019, 86–98 [cit. 2022-02-24]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40825-019-0112-3>.

- [13] *Transport and Environment* [online]. Brusel: European Federation for Transport and Environment, 2022 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.transportenvironment.org/challenges/air-quality/the-euro-7/?msclkid=92dcdfb8bc5211ec9bf212e0aec5a9fb>.
- [14] *Zelená dohoda pro Evropu* [online]. Brusel, 11. 12. 2019, 1-25 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0010.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0010.02/DOC_1&format=PDF).
- [15] REIF, Konrad. *Gasoline Engine Management: Systems and Components*. Imprint: Springer Vieweg, 2015. Bosch Professional Automotive Information. ISBN 978-3-658-03963-9.
- [16] BALAT, MUSTAFA. Current Alternative Engine Fuels. *Energy Sources* [online]. 2005, **27**(6), 569-577 [cit. 2022-03-03]. ISSN 0090-8312. Dostupné z: doi:10.1080/00908310490450458.
- [17] HEYWOOD, John B. *Internal combustion engine fundamentals*. New York: McGraw - Hill, c1988. McGraw-Hill series in mechanical engineering. ISBN 0-07-100499-8.
- [18] LEONE, Thomas G., James E. ANDERSON, Richard S. DAVIS, Asim IQBAL, Ronald A. REESE, Michael H. SHELBY a William M. STUDZINSKI. The Effect of Compression Ratio, Fuel Octane Rating, and Ethanol Content on Spark-Ignition Engine Efficiency. *Environmental Science & Technology* [online]. 2015, **49**(18), 10778-10789 [cit. 2022-02-27]. ISSN 0013-936X. Dostupné z: doi:10.1021/acs.est.5b01420.
- [19] DEMIRBAS, A., M. A. BALUBAID, A. M. BASAHEL, W. AHMAD a M. H. SHEIKH. Octane Rating of Gasoline and Octane Booster Additives. *Petroleum Science and Technology* [online]. 2015, **33**(11), 1190-1197 [cit. 2022-03-03]. ISSN 1091-6466. Dostupné z: doi:10.1080/10916466.2015.1050506.
- [20] YONTAR, Ahmet Alper. Effects of ignition advance on a dual sequential ignition engine at lean mixture for hydrogen enriched butane usage. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2019, **44**(29), 15575-15586 [cit. 2022-03-03]. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2019.04.088.
- [21] ZAREEI, J. a A. H. KAKAEE. Study and the effects of ignition timing on gasoline engine performance and emissions. *European Transport Research Review* [online]. 2013, **5**(2), 109-116 [cit. 2022-03-03]. ISSN 1867-0717. Dostupné z: doi:10.1007/s12544-013-0099-8.
- [22] WEI, Haiqiao, Tianyu ZHU, Gequn SHU, Linlin TAN a Yuesen WANG. Gasoline engine exhaust gas recirculation – A review. *Applied Energy* [online]. 2012, **99**, 534-544 [cit. 2022-03-11]. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2012.05.011.
- [23] DONGHUI, Xu, Li Yue LIN a Ding JINGFENG. Experimental Study of Automotive Gasoline Engine Exhaust Gas Recirculation. *International Conference on Digital Manufacturing and Automation* [online]. IEEE, 2013, 2013, 575-581 [cit. 2022-03-11]. ISBN 978-0-7695-5016-9. Dostupné z: doi:10.1109/ICDMA.2013.136.

- [24] GÖLCÜ, Mustafa, Yakup SEKMEN, Perihan ERDURANLI a M. SAHIR SALMAN. Artificial neural-network based modeling of variable valve-timing in a spark-ignition engine. *Applied Energy* [online]. 2005, **81**(2), 187-197 [cit. 2022-03-11]. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2004.07.008.
- [25] LI, Yangtao, Amir KHAJEPOUR a Cécile DEVAUD. Realization of variable Otto-Atkinson cycle using variable timing hydraulic actuated valve train for performance and efficiency improvements in unthrottled gasoline engines. *Applied Energy* [online]. 2018, **222**, 199-215 [cit. 2022-03-12]. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2018.04.012.
- [26] LIU, Qi, Tao GUO, Jianqin FU, Hongliang DAI a Jingping LIU. Experimental study on the effects of injection parameters and exhaust gas recirculation on combustion, emission and performance of Atkinson cycle gasoline direct-injection engine. *Energy* [online]. 2022, **238** [cit. 2022-03-12]. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2021.121784.
- [27] FRIDRICHOVÁ, Kateřina, Lubomír DRÁPAL, Jan VOPAŘIL a Jozef DLUGOŠ. CYLINDER DEACTIVATION OF INTERNAL-COMBUSTION ENGINES: HISTORICAL DEVELOPMENT, STATE-OF-THE-ART AND OUTLOOK. In: *Sborník přednášek KOKA 2021*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, Technická fakulta, Katedra vozidel a pozemní dopravy 2021, 2021, s. 71-82. ISBN 978-80-213-3132-7.
- [28] ASHOK, B. a K. NANTHAGOPAL. Eco friendly biofuels for CI engine applications. *Advances in Eco-Fuels for a Sustainable Environment* [online]. Elsevier, 2019, 2019, 407-440 [cit. 2022-03-12]. ISBN 9780081027288. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-102728-8.00015-2.
- [29] LIU, Haoye, Ziyang LI, Mengzhu ZHANG, Hongming XU, Xiao MA a Shijin SHUAI. Exhaust non-volatile particle filtration characteristics of three-way catalyst and influencing factors in a gasoline direct injection engine compared to gasoline particulate filter. *Fuel* [online]. 2021, **290** [cit. 2022-03-18]. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2020.120065.
- [30] ROOD, Shawn, Salvador ESLAVA, Alexis MANIGRASSO a Chris BANNISTER. Recent advances in gasoline three-way catalyst formulation: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* [online]. 2020, **234**(4), 936-949 [cit. 2022-03-18]. ISSN 0954-4070. Dostupné z: doi:10.1177/0954407019859822.
- [31] WANG, Jihui, Hong CHEN, Zhicheng HU, Mingfa YAO a Yongdan LI. A Review on the Pd-Based Three-Way Catalyst. *Catalysis Reviews* [online]. 2014, **57**(1), 79-144 [cit. 2022-03-18]. ISSN 0161-4940. Dostupné z: doi:10.1080/01614940.2014.977059.
- [32] KANG, Sung Bong, In-Sik NAM, Byong K. CHO, Chang Hwan KIM a Se H. OH. Kinetic model for modern double-layered Pd/Rh TWC as a function of metal loadings and mileage. *Chemical Engineering Journal* [online]. 2015, **278**, 328-338 [cit. 2022-04-03]. ISSN 13858947. Dostupné z: doi:10.1016/j.cej.2014.12.106.

- [33] D'ANIELLO, Federica, Ivan ARSIE, Cesare PIANESE a Matteo De CESARE. Development and identification of a control oriented model of NO<sub>x</sub> Storage Catalyst for automotive application. *IFAC-PapersOnLine* [online]. 2020, **53**(2), 14016-14021 [cit. 2022-04-08]. ISSN 24058963. Dostupné z: doi:10.1016/j.ifacol.2020.12.922.
- [34] MALAMIS, Sotirios A., Mengmeng LI, William S. EPLING a Michael P. HAROLD. Steady state and lean-rich cycling study of a three-way NO<sub>x</sub> storage catalyst: Experiments. *Applied Catalysis B: Environmental* [online]. 2018, **237**, 588-602 [cit. 2022-04-08]. ISSN 09263373. Dostupné z: doi:10.1016/j.apcatb.2018.06.001.
- [35] MCCAFFERY, Cavan, Hanwei ZHU, Chengguo LI, et al. On-road gaseous and particulate emissions from GDI vehicles with and without gasoline particulate filters (GPFs) using portable emissions measurement systems (PEMS). *Science of The Total Environment* [online]. 2020, **710** [cit. 2022-04-08]. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2019.136366.
- [36] JOSHI, Ameya a Timothy V. JOHNSON. Gasoline Particulate Filters—a Review. *Emission Control Science and Technology* [online]. 2018, **4**(4), 219-239 [cit. 2022-04-10]. ISSN 2199-3629. Dostupné z: doi:10.1007/s40825-018-0101-y.
- [37] MELONI, Eugenio a Vincenzo PALMA. Most Recent Advances in Diesel Engine Catalytic Soot Abatement: Structured Catalysts and Alternative Approaches. *Catalysts* [online]. 2020, **10**(7) [cit. 2022-04-10]. ISSN 2073-4344. Dostupné z: doi:10.3390/catal10070745.
- [38] Homage to ten years of the V10 engine: the Audi R8 V10 Decennium. Audi MediaCenter [online]. Německo, 2022 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: <https://www.audi-mediacyter.com/en/press-releases/homage-to-ten-years-of-the-v10-engine-the-audi-r8-v10-decennium-11338>.
- [39] Audi R8 Coupé V10 performance quattro. *Audi MediaCenter* [online]. Německo, 2022 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: <https://www.audi-mediacyter.com/en/audi-r8-coupe-v10-performance-quattro-14430>.
- [40] Efficient and clean: exhaust aftertreatment for gasoline and diesel engines. *Audi MediaCenter* [online]. Německo, 2022 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: [https://www.audi-mediacyter.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=Tiskové%20zprávy--20210118](https://www.audi-mediacyter.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=Tiskové%20zprávy--20210118).
- [41] Audi A3 Sportback Technická data. *Audi* [online]. Česká republika, 2022 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.audi.cz/a3/a3-sportback-2/technicka-data>.
- [42] Audi Q3. Audi MediaCenter [online]. Německo, 2022 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.audi-mediacyter.com/en/photos/detail/audi-q3-68363>.
- [43] Auto-data [online]. Bulharsko, 2022 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: <https://www.auto-data.net/en/ford-mustang-vi-gt-5.0-ti-vct-v8-421hp-22129>.

- [44] Anderson Ford Motorsport [online]. USA, 2022 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: <https://www.andersonfordmotorsport.com/kooks-2015-mustang-gt-5-0l-1-3-4-x-3-stainless-steel-long-tube-header-w-catted-connection-pipe/>.
- [45] Nový multivan. Volkswagen Česká republika [online]. Česká republika, 2022 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: <https://www.vw-uzitkove.cz/novy-multivan>.
- [46] Automobil Revue - Volkswagen Multivan T7. Automobil Revue [online]. Česká republika: Business Media CZ, 2022, 9. 2. 2022 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: [https://www.automobilrevue.cz/rubriky/testy/svezli-jsme-se/volkswagen-multivan-t7-osobni-preprava\\_48995.html](https://www.automobilrevue.cz/rubriky/testy/svezli-jsme-se/volkswagen-multivan-t7-osobni-preprava_48995.html).

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

<i>ACE</i>	Atkinson Cycle Engine (Motory pracující v Atkinsonovu cyklu)
<i>Ba</i>	Baryum
<i>Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub></i>	Dusičnan barnatý
<i>BaO</i>	Oxid barnatý
<i>C</i>	Uhlík
<i>C<sub>3</sub>H<sub>6</sub></i>	Cyklopropan
<i>CC</i>	Close-Coupled (Umístění filtru pevných částic za třicestný katalyzátor)
<i>CDA</i>	Cylinder Deactivation (Systém vypínání válců)
<i>cGPF</i>	Catalyzed Gasoline Particulate Filter (Filtr pevných částic pro zážehové motory vybavený katalytickou vrstvou)
<i>CNG</i>	Compressed Natural Gas (Stlačený zemní plyn)
<i>CO</i>	Oxid uhelnatý
<i>CO<sub>2</sub></i>	Oxid uhličitý
<i>DPF</i>	Diesel Particulate Filter (Filtr pevných částic pro vznětové motory)
<i>DÚ</i>	Dolní úvrat'
<i>EGR</i>	Exhaust Gas Recirculation (Recirkulace výfukových plynů)
<i>GDI</i>	Gasoline Direct Injection (Přímé vstřikování benzínu)
<i>GPF</i>	Gasoline Particulate Filter (Filtr pevných částic pro zážehové motory)
<i>H</i>	Vodík (prvek)
<i>H<sub>2</sub></i>	Vodík (plyn)
<i>H<sub>2</sub>O</i>	Voda
<i>HC</i>	Uhlovodíky
<i>HÚ</i>	Horní úvrat'
<i>LPG</i>	Liquid Petroleum Gas (Zkapalněný ropný plyn)
<i>m<sub>e</sub>/m<sub>pe</sub></i>	Měrná spotřeba paliva
<i>MeTHF</i>	Methyltetrahydrofuran
<i>MON</i>	Motor Octane Number (Oktanové číslo motoru)
<i>MPI</i>	Multi Point Injection (Vícebodové nepřímé vstřikování paliva)
<i>MPV</i>	Multi-Purpose Vehicle (Víceúčelové vozidlo)
<i>N</i>	Dusík (prvek)
<i>N<sub>2</sub></i>	Dusík (plyn)
<i>N<sub>2</sub>O</i>	Oxid dusný

---

<i>NEDC</i>	New European Driving Cycle (Nový evropský jízdní cyklus)
<i>NG</i>	Natural Gas (Zemní plyn)
<i>NH<sub>3</sub></i>	Amoniak
<i>NO</i>	Oxid dusnatý
<i>NO<sub>2</sub></i>	Oxid dusičitý
<i>NO<sub>x</sub></i>	Oxidy dusíku
<i>NSC</i>	NO <sub>x</sub> Storage Catalyst (Sběrný katalyzátor NO <sub>x</sub> )
<i>NVH</i>	Noise, Vibration and Harshness (Kvalita jízdního komfortu)
<i>O</i>	Kyslík (prvek)
<i>O<sub>2</sub></i>	Kyslík (plyn)
<i>OC</i>	Otto Cycle (Ottův cyklus)
<i>OH</i>	Hydroxid
<i>ON</i>	Octane Number (Oktanové číslo)
<i>Pd</i>	Palladium
<i>PEMS</i>	Portable Emissions Measurement System (Přenosný systém měření emisí)
<i>PM</i>	Particulate Matter (Pevné částice)
<i>PN</i>	Particle Number (Počet pevných částic)
<i>RDE</i>	Real Driving Emissions (Skutečné provozní emise)
<i>Rh</i>	Rhodium
<i>RON</i>	Research Octane Number (Výzkumné oktanové číslo)
<i>S</i>	Síra
<i>SiC</i>	Karbid křemíku
<i>SO<sub>2</sub></i>	Oxid siřičitý
<i>SPI</i>	Single Point Injection (Jednobodové nepřímé vstřikování paliva)
<i>TWC</i>	Three Way Catalytic Converter (Třícestný katalyzátor)
<i>UF</i>	Underfloor (Umístění filtru pevných částic a třícestného katalyzátoru samostatně)
<i>VGT</i>	Variable Geometry Turbocharger (Variabilní geometrie lopatek turbodmychadla)
<i>V<sub>K</sub></i>	Kompresní objem válce
<i>VVT</i>	Variable Valve-Timing (Variabilní časování ventilů)
<i>V<sub>Z</sub></i>	Zdvihový objem válce
<i>WLTP</i>	Worldwide Harmonised Light-duty Vehicle Test Procedure (Celosvětový testovací standard pro lehká vozidla)
<i>α<sub>z</sub></i>	Úhel předstihu zážehu

---



$\varepsilon$	Kompresní poměr
$\lambda$	Součinitel přebytku vzduchu (vzdušný součinitel)