

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA STROJNÍ**

**Studijní program: B 2301      Strojní inženýrství**  
**Studijní zaměření: Dopravní a manipulační technika**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Význam a vlastnosti výfukového systému spalovacího motoru**

**Autor:**                      Martin ŠTĚPÁNEK

**Vedoucí práce:**        Doc. Ing. Ladislav NĚMEC, CSc.

**Akademický rok 2015/2016**



## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské/diplomové práce.

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Tímto způsobem bych rád poděkoval panu doc. Ing. Ladislavu Němci, CSc. za cenné rady, dohled a ochotu při tvorbě mé bakalářské práce.

Poděkování samozřejmě patří panu Ing. Janu Roubalovi za jeho věcné připomínky a rady při konzultacích mé bakalářské práce.

## ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Štěpánek	Jméno Martin	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	2301R016 - Dopravní a manipulační technika		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Němec, CSc.	Jméno Ladislav	
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU - FST - KKS		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Význam a vlastnosti výfukového systému spalovacího motoru		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKS	<b>ROK ODEVZD.</b>	2016
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	53	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	53	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

vizu

<p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>Zhodnoťte význam výfukového systému jakožto subsystém spalovacího motoru. Vysvětlete typickou stavbu výfukového systému. Proveďte rozbor činnosti spalovacího motoru z hlediska využití dodané energie a dosažení požadavků na výfukový systém. Proveďte vizualizaci činnosti tlumiče hluku pro výfukový systém. Zhodnoťte vliv cyklického zatěžování na výfukový systém.</p>
<p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p> <p style="text-align: center;"><b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b></p>	<p>Typická stavba výfukové systému, energetická bilance spalovacího motoru, vizualizace činnosti tlumiče hluku, cyklické zatěžování</p>

## SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Štěpánek	Name Martin	
<b>FIELD OF STUDY</b>	2301R016 - Transport Vehicles and Handling Machinery		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Němec, CSc.	Name Ladislav	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KKS		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	The significance and properties of the exhaust system of a combustion engine		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Machine Design	<b>SUBMITTED IN</b>	2016
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	53	<b>TEXT PART</b>	53	<b>GRAPHICAL PART</b>	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	Evaluate significance of an exhaust system as of a combustion engine subsystem. Explain typical construction of exhaust system. Analysis of combustion engine performance in terms of a delivered energy use and meet the specifications of the exhaust system. Perform visualisation of an exhaust system muffler. Analyse the effect of a cyclic loading on the exhaust system.
<b>KEY WORDS</b>	Typical construction of exhaust system, energy balance of the internal combustion engine, visualization of the muffler, cyclic loading

## Obsah

<b>1. Úvod: spalovací motor a jeho činnost</b> .....	14
<b>2. Výfuková soustava čtyřdobého spalovacího motoru</b> .....	14
2.1 TYPICKÁ STAVBA VÝFUKOVÉHO SYSTÉMU SPALOVACÍHO MOTORU .....	14
2.2 SBĚRNÉ POTRUBÍ.....	15
2.3 SPOJOVACÍ POTRUBÍ .....	16
2.4 TLUMIČE HLUKU .....	17
2.4.1. <i>Reflexní tlumení hluku</i> .....	17
2.4.2. <i>Absorpční tlumení hluku</i> .....	18
2.4.3. <i>Kombinované tlumení hluku</i> .....	18
<b>3. Spolupráce výfukové soustavy a motoru z energetického hlediska</b> .....	19
3.1. ZÁŽEHOVÝ MOTOR.....	19
3.2. VZNĚTOVÝ MOTOR.....	21
3.2.1. <i>Vznětové motory s nepřímým vstřikováním</i> .....	21
3.2.2. <i>Motory s nepřímým vstřikováním</i> .....	21
3.3. ENERGETICKÁ BILANCE SPALOVACÍHO MOTORU .....	21
<i>Zvyšování účinnosti spalovacích motorů</i> .....	25
3.4. EMISE ŠKODLIVÝCH PLYNŮ.....	26
4.1. SNIŽOVÁNÍ EMISÍ .....	27
<i>Druhy sond lambda</i> .....	29
<i>Zpětné vedení výfukových plynů (recirkulace)</i> .....	33
<i>Katalytický konvertor</i> .....	34
<i>Třícestný katalytický konvertor</i> .....	36
<i>Zásobníkový</i> .....	36
<i>Filtr pevných částic</i> .....	37
<i>Vstřikování močoviny</i> .....	38
4.2. TURBODMYCHADLA .....	39
4.2.1. <i>Mechanicko-pneumatická regulace plnicího tlaku</i> .....	40
4.2.2. <i>Elektronická regulace plnicího tlaku</i> .....	41
4.2.3. <i>Regulace plnicího tlaku změnou průřezu turbíny</i> .....	42
4.3. DALŠÍ MOŽNOSTI VYUŽITÍ ENERGIE VÝFUKOVÝCH PLYNŮ.....	43
<b>5. Zhodnocení výsledků zkoušky cyklickým zatěžováním a vlastní konstrukční návrh</b> .....	44
5.1 VLASTNÍ KONSTRUKČNÍ NÁVRH .....	44
7.1 HODNOCENÍ ODOLNOSTI PROTI ÚNAVOVÉMU POŠKOZENÍ.....	45

7.2	PRŮBĚH ZKOUŠKY .....	46
<b>8.</b>	<b>Seznam použité literatury.....</b>	<b>53</b>
8.1	KNIŽNÍ PUBLIKACE.....	53
8.2	PUBLIKACE NA INTERNETU.....	53
8.3	OSTATNÍ ZDROJE .....	54



## Seznam obrázků

Obrázek 1 Schéma výfukového systému [8].....	15
Obrázek 2 Nerezové svody výfuku [9] .....	16
Obrázek 3 Litinové svody výfuku [10] .....	16
Obrázek 4 Reflexní tlumič výfuku [2] .....	17
Obrázek 5 Rezonanční tlumič výfuku [2] .....	18
Obrázek 6 Absorpční tlumič výfuku [11] .....	18
Obrázek 7 Kombinovaný tlumič výfuku [2] .....	19
Obrázek 8 Tepelná bilance a její procentuální vyjádření poměr složek [14].....	24
Obrázek 9 Sankeyův diagram.....	25
Obrázek 10 Množství povolených škodlivin ve výfukových plynech .....	26
Obrázek 11 Podíl složek výfukových plynů [2].....	28
Obrázek 12 Funkční schéma L-Jetronicu s regulací $\lambda$ [2].....	29
Obrázek 13 Sonda $\lambda$ z oxidu zirkoničitého [2].....	30
Obrázek 14 Napětí sondy z oxidu zirkoničitého v závislosti na $\lambda$ [2].....	31
Obrázek 15 Sonda z oxidu titaničitého [2].....	31
Obrázek 16 Charakteristiky sondy z oxidu titanu [2].....	32
Obrázek 17 Širokopásmová sonda lambda [2].....	32
Obrázek 18 Charakteristika širokopásmové sondy lambda [2].....	33
Obrázek 19 Zpětné vedení výfukových plynů (vnější recirkulace) [2].....	34
Obrázek 20 Konstrukce a činnost katalytického konvertoru s keramickou vložkou [2] .....	35
Obrázek 21 Katalytický konvertor s kovovou vložkou.....	35
Obrázek 22 Zpětné vedení výfukových plynů s dodatečnou regulační klapkou [2] .....	357
Obrázek 23 Filtr pevných částic [2] .....	358
Obrázek 24 Schéma systému AdBlue [12] .....	359
Obrázek 25 Schéma motoru s turbodmychadlem poháněným výfukovými plyny [2].....	40
Obrázek 26 Řídící ventil plnicího tlaku [2].....	40
Obrázek 27 Regulace plnicího tlaku obtokovou klapkou [2].....	41
Obrázek 28 Elektronická regulace plnicího tlaku [2].....	42
Obrázek 29 Regulace plnicího tlaku (VTG) [2].....	43
Obrázek 30 Turbogenerátor [13].....	44
Obrázek 31 Vlastní návrh kombinovaného tlumiče hluku.....	45
Obrázek 32 S-N křivka (Wöhlerova křivka).....	46
Obrázek 33 Křivka napětí/deformace původního materiálu výfuku.....	47
Obrázek 34 Záběr z elektronového mikroskopu.....	48
Obrázek 35 Množství složek materiálu výfuku z elektronového mikroskopu.....	48
Obrázek 36 Grafický záznam statické zkoušky pevnosti pro 1.4509.....	48
Obrázek 37 Wöhlerova křivka $\sigma_a$ /počet cyklů do lomu.....	51
Obrázek 38 Wöhlerova křivka $\sigma_h$ /počet cyklů do lomu.....	51

## Seznam použitých zkratk a symbolů

### 1. Teplo

$t$	[°C]	Celsiova teplota
$Q_p$	[J]	celkové množství tepla dodané v palivu
$Q_e$	[J]	teplo odpovídající efektivní práci motoru
$Q_{chl}$	[J]	teplo odvedené chladicí soustavou
$Q_v$	[J]	teplo odvedené výfukem
$Q_{ns}$	[J]	teplo ztracené nedokonalým spalováním paliva
$Q_o$	[J]	teplo odvedené mazacím olejem
$Q_{ost}$	[J]	je ostatní ztracené teplo např. teplo ztracené sáláním, teplo ekvivalentní mechanickým ztrátám, kinematické energii výfukových plynů
$H_u$	[kJ·s <sup>-1</sup> ]	dolní výhřevnost paliva
$c_w$	[kJ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	měrná tepelná kapacita chladicí kapaliny (vody)
$T_{w2}$	[K]	teplo vstupní chladicí kapaliny (vody)
$T_{w1}$	[K]	teplo výstupní chladicí kapaliny (vody)
$c_p$	[kJ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	měrná tepelná kapacita výfukových plynů za stálého tlaku
$T_v$	[K]	teplota výfukových plynů
$T_o$	[K]	teplota nasávaného vzduchu
$Q_s$	[kJ·s <sup>-1</sup> ]	tepelný tok vysálaný do prostoru motorem
$Q_o$	[kJ·s <sup>-1</sup> ]	tepelný tok odvedený olejem
$Q_{zb}$	[kJ·s <sup>-1</sup> ]	tepelný tok zbývající (další neměřitelné ztráty)

## 2. Prostor a čas

$\alpha, \beta, \gamma$	[ $^{\circ}$ ]	úhel, rovinný úhel
$\vartheta, \varphi$		
$V_H$	[ $m^3$ ]	zdvihový objem všech válců
$V_c$	[ $m^3$ ]	objem spalovacího prostoru v horní úvrati pístu
$V_h$	[ $m^3$ ]	zdvihový objem válce
$V_p$	[ $m^3$ ]	množství měřeného paliva
$T_p$	[s]	čas na spotřebu množství měřeného paliva
$\omega$	[ $rad \cdot s^{-1}$ ]	úhlová rychlost
$v_w$	[ $m^3$ ]	množství měřené chladicí kapaliny
$T_w$	[s]	čas na spotřebu množství měřené chladicí kapaliny
$V_{vz}$	[ $m^3$ ]	množství měřeného vzduchu
$T_{vz}$	[s]	čas na spotřebu množství měřeného vzduchu
$l$	[m]	délka
$v$	[ $m \cdot s^{-1}$ ]	rychlost
$S_0$	[ $mm^2$ ]	plocha

## 3. Mechanika

$m_n$	[kg]	nasáté množství čerstvého vzduchu nebo směsi paliva a vzduchu
$m_t$	[kg]	teoretická hmotnost čerstvé náplně odpovídající zdvihovému objemu válce
$m_{n\ celkl}$	[kg]	hmotnost náplně dopravené do všech válců
$\rho_t$	[ $Kg \cdot m^3$ ]	teoretická měrná hmotnost náplně
$\lambda_p$	[-]	stupeň plnění (účinnost plnění)
$\rho_p$	[ $kg \cdot m^3$ ]	hmotnost paliva
$M_t$	[N·m]	točivý moment
$N$	[ $s^{-1}$ ]	otáčky motoru
$M_w$	[ $kg \cdot s^{-1}$ ]	průtočné množství chladicí kapaliny

$\rho_w$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	hustota chladicí kapaliny
$M_{vz}$	[kg·s <sup>-1</sup> ]	průtočné množství vzduchu
$\rho_{vz}$	[Kg·m <sup>-3</sup> ]	hustota vzduchu
$M_{ph}$	[kg·s <sup>-1</sup> ]	průtočné množství pohonných hmot
$M_v$	[kg·s <sup>-1</sup> ]	hmotnostní tok výfukových plynů
$\eta_{ch}$	[-]	chemická účinnost spalování
$q_e$	[%]	složka tepelného toku efektivního výkonu
$q_{chl}$	[%]	složka tepelného toku odvedeného chladicí kapalinou
$q_v$	[%]	složka tepelného toku odvedeného výfukovými plyny
$q_{ns}$	[%]	složka tepelného toku ztraceného nedokonalým spálením paliva
$q_{ost}$	[%]	složka ostatního tepelného toku
$M_{vp}$	[g/km]	množství výfukových plynů vztažených na ujetou vzdálenost
$\lambda$	[-]	součinitel přebytku vzduchu
$\sigma$	[MPa]	normálové napětí
$E$	[GPa]	modul pružnosti v tahu
$R_{p0,2}$	[MPa]	smluvní mez kluzu
$R_m$	[MPa]	mez pevnosti v tahu
$A$	[%]	tažnost materiálu
$k$	[m/N]	tuhost
$m$	[kg]	hmotnost
$HVI$	[-]	tvrdost podle Vickerse
$\sigma_c$	[MPa]	základní mez unavy

#### 4. Ostatní veličiny

$\varepsilon$	[-]	kompresní poměr (stupeň komprese)
$U$	[V]	elektrické napětí
$f$	[Hz]	frekvence
$R$	[ $\Omega$ ]	elektrický odpor
$P$	[W]	elektrický výkon

## 1. Úvod: spalovací motor a jeho činnost

Spalovací motor je dnes nejrozšířenější tepelný stroj. Jeho úkolem je přeměna chemické energie, uložené v palivu, na mechanickou práci. V této době se u vozidel silniční dopravy používají téměř výhradně čtyřdobé motory. Ty mohou, oproti motorům dvoudobým, dosáhnout nižších hodnot emisí škodlivin ve výfukových plynech díky možnostem přesněji řídit spalovací proces a navíc jsou spolehlivější.

Čtyřdobé motory můžeme dále rozdělit podle typu zapálení směsi paliva na dva druhy. Prvním je historicky starší zážehový motor, který spaluje směs benzínu se vzduchem a k jejímu zapálení využívá elektrický výboj na zapalovací svíčke. Druhým je motor vznětový, kde se spaluje směs jemně rozprášené nafty vstříkované do stlačeného vzduchu ohřátého nad její zápalnou teplotu. Přes podstatný rozdíl mezi uhlovodíky používanými jako zdroj energie mají oba druhy motorů díky čtyřdobému pracovnímu cyklu velice podobnou konstrukční koncepci:

- zkrácený klikový mechanismus se setrvačником
- soustavu válců s písty, kde spalovací proces probíhá
- hlavu válců s ventily a vačkovými hřídeli
- mazací systém
- chladicí systém
- sací systém
- výfukový systém

Tyto systémy jsou sestaveny z potřebných částí a tvoří celky s vlastním řídicím systémem, zapojeným do řídicího systému motoru, potažmo celého vozidla. Tato bakalářská práce se zabývá výfukovým systémem.

## 2. Výfuková soustava čtyřdobého spalovacího motoru

Základním úkolem výfukového systému je odvod produktů spalování do okolního prostředí tak, aby nepronikaly do kabiny vozidla.

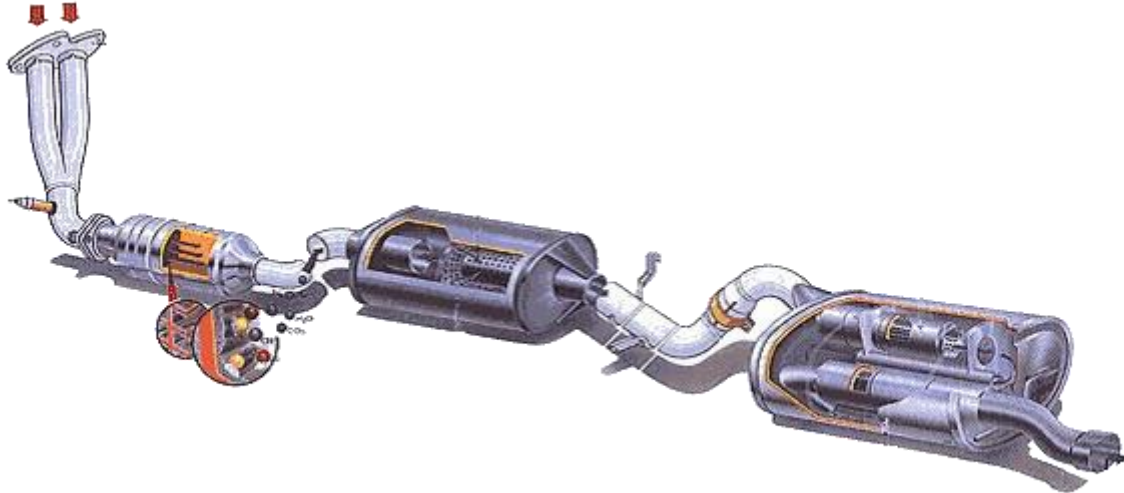
Dále musí být systém schopen svým konstrukčním provedením účinně tlumit hluk vznikající jak samotným spalováním, tak silnými rázovými impulsy, které jsou důsledkem způsobu činnosti pístového spalovacího motoru s následným nepravidelným prouděním výfukových plynů. Hlukové emise jsou limitovány závaznou normou pro daný typ vozidla. Dalším a v současné době velice sledovaným úkolem výfukového systému je snižování obsahu škodlivin ve výfukových plynech různými systémovými a konstrukčními úpravami. Tyto konstrukční úpravy však nesmí omezovat proudění výfukových plynů natolik, že by docházelo k nežádoucímu snižování výkonu motoru. Také se rozpracovávají různá řešení na dodatečné využití tepelné i pohybové energie výfukových plynů.

### 2.1 Typická stavba výfukového systému spalovacího motoru

Od prvních spalovacích motorů sestavených na konci 19. století došlo k velké progresi v jejich konstrukci. Tyto inovace se pochopitelně nevyhnuly ani výfukovému systému, který z důvodu stále se zvyšujících požadavků na spalovací motor a jeho jednotlivé části prochází neustálými vývojovými změnami. Výfukový systém, původně tvořený jednoduchým potrubím doplněným o změnu průměru pro snížení hlučnosti, se vyvinul v komplexní sofistikovaný systém spojující

znalosti termodynamiky, chemie, akustiky, mechaniky, elektroniky a materiálového inženýrství.

Vzhledem k tomu, že výfukový systém musí plnit úkoly, které mu byly uloženy při vzniku spalovacího motoru, i když v průběhu času neustále přibývají další, jeho typická stavba se v zásadě nemění. Potrubí je spojené přírubami s tlumiči. Počet tlumičů se však zvýšil a jejich vnitřek také prodělává neustálé změny.



Obrázek 1 Schéma výfukového systému [8]

## 2.2 Sběrné potrubí

Úkolem sběrného potrubí je odvod produktů spalování ze spalovacího prostoru dále do výfukového traktu. Můžeme se setkat se dvěma základními druhy: sběrné potrubí odlité ze šedé litiny, nebo vyrobené ze žáruvzdorné oceli. Spojení větví sběrného potrubí vedoucích z jednotlivých válců může být řešeno více způsoby. Nejdříve se mohou spojit dohromady dvě větve vedoucí z válců, ve kterých probíhá opačný cyklus, tzn. v případě čtyřválcového motoru se zapalováním válců v pořadí 1-3-4-2 jsou dohromady spojeny oba krajní a oba prostřední válce a až následně jsou svedeny vzniklé dvě větve do jedné. Další možností je svedení všech větví dohromady najednou. Délka sběrného potrubí bývá odladěna tak, aby bylo využito tlakových pulzů vzniklých při cyklickém otevírání a zavírání výfukového ventilu k lepšímu odvodu spalin ze spalovacího prostoru a tím k nepatrnému zvýšení výkonu motoru. Sběrné potrubí je tepelně nejvíce namáhanou částí výfukové soustavy, jeho teplota může dosahovat až 900 °C. V nedávné době se začalo objevovat technické řešení, kdy se výfukové plyny svedou do jednoho potrubí ještě v samotné hlavě motoru. Může se tak využít teplo, které bylo v „klasických“ svodech bez využití ztráceno k rychlejšímu ohřevu chladicí kapaliny v motoru na provozní teplotu.



Obrázek 2 Nerezové svody výfuku [9]

Výhody sběrného potrubí vyrobeného z šedé litiny jsou odolnost proti oxidaci, schopnost tlumit hluk a vibrace, dostatečná pevnost a především cena. Jeho hlavní nevýhodou je vysoká hmotnost a výrazný odvod tepla, který má za následek nežádoucí prodloužení ohřevu katalytického konvertoru na provozní teplotu, což znamená zvýšení obsahu emisí. Proto se s tímto sběrným potrubím setkáváme u starších vozidel a automobilů nižších tříd.



Obrázek 3 Litinové svody výfuku [10]

Sběrné potrubí vyrobené ze žáruvzdorných ocelí bylo zpočátku umístováno z důvodu své nízké hmotnosti pouze do motorů závodních vozů. Díky jeho nízkému odvodu tepla bylo v době, kdy je kladen čím dál větší důraz na emise škodlivých plynů, rozšířeno i do běžných automobilů.

### 2.3 Spojovací potrubí

Spojovací potrubí je základní část výfukového systému, jejíž hlavní funkcí je vedení výfukových plynů mezi dalšími funkčními celky výfukového systému, jako jsou katalytické konvertory, tlumiče hluku a další. Pro správnou funkci spojovacího potrubí je nutné zajistit odolnost vůči výrazným teplotním výkyvům a chemické odolnosti, při zachování mechanických vlastností. Základními rozměry spojovacího potrubí je vnitřní průměr, tloušťka stěny a délka potrubí. Vnitřní průměr je navržen tak, aby bylo zajištěno volné proudění výfukových spalin. Tloušťka stěny se mění v závislosti na provozních podmínkách a použitém materiálu. U běžných automobilů je spojovací potrubí obvykle vyrobeno z plechu a ošetřeno antikoročním nátěrem. U závodních a vysokovýkonných automobilů bývají nejčastěji použity nerezové plechy (tzv. Inconely). Ty mají srovnatelné mechanické vlastnosti při vysokých teplotách, jako trubky z běžné oceli s výrazně silnější stěnou. Ušetříme tedy na hmotnosti vozu. Dalším používaným materiálem jsou slitiny titanu, které jsou však, pro svou špatnou tvářitelnost méně rozšířené. Délka potrubí je dána koncepcí vozu (motor vpředu-vzadu) samotným vedením pod podlahou vozu a uspořádáním jednotlivých částí, které potrubí spojuje.



## 2.4 Tlumiče hluku

Účelem tlumiče hluku je, jak již název napovídá, tlumit hluk vznikající provozem spalovacího motoru. Jeho schopnost tlumit závisí na druhu konstrukce, uspořádání tlumičů, délce i průřezech. Všechny tyto části jsou výrobcem pečlivě sladěny, aby nebyly přesahovány hlukové limity, nevznikal při jeho činnosti protitlak, který by měl za následek snižování výkonu a zvuk odpovídal danému typu vozidla (sound design).

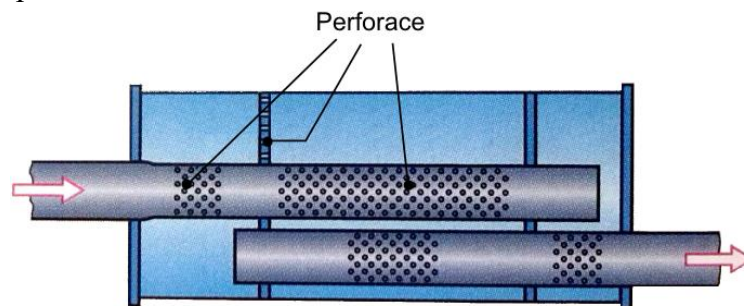
Tlumení hluku vznikajícího pulzujícím průtokem spalin se dosahuje v zásadě dvěma způsoby, tedy reflexí nebo absorpcí hlukové energie spalin.

### 2.4.1. Reflexní tlumení hluku

Tlumení pomocí reflexe je dosaženo překážkami kladenými do cesty zvukovým vlnám. Dochází tak k odrazu a otočení zvukových vln, jejichž vliv je tak částečně rušen. Tento jev se nazývá interference proudění. Dalšími způsoby jak dosáhnout vytvoření reflexe jsou změna průřezu potrubí a komor.

#### Reflexní tlumič

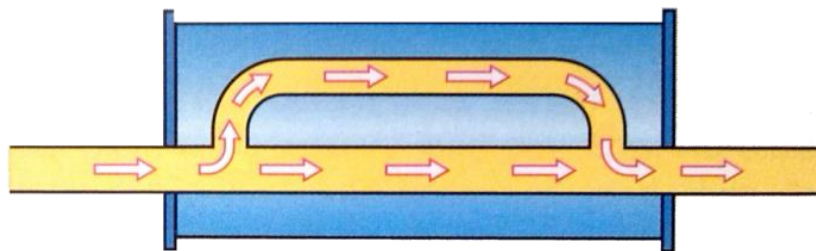
Dvě vůči sobě nesouosé na obou koncích otevřené perforované trubky spojují různě velké komory. Tím je dosaženo obrácení proudění výfukových plynů ve vnitřních komorách tlumiče hluku. Změnou průřezu průtokových otvorů (tj. trubek, komor apod.) dochází k odrážení, tedy reflexi a tím k využití energie spalin k tlumení hluku. Reflexní typ tlumiče ve výfukovém systému je účinný pro tlumení hluku středního a nízké kmitočtu.



Obrázek 4 Reflexní tlumič výfuku [2]

#### Rezonanční tlumič

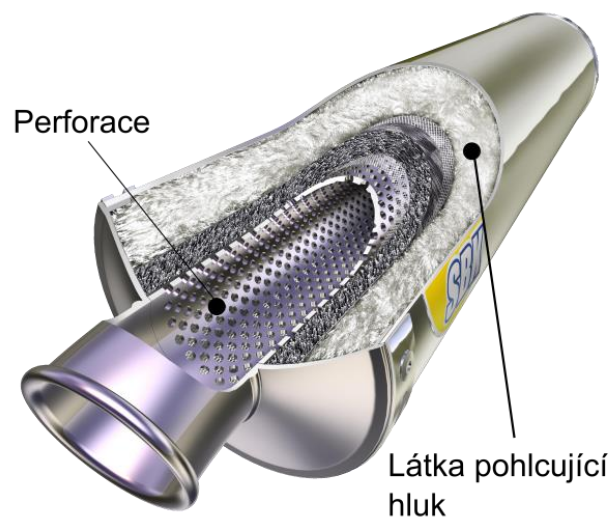
Rezonančního efektu se dosahuje změnou průřezů, u kterých dochází k opakovanému proudění zvukových vln tam a zpět a za určitých okolností se vytváří rezonance. Rezonátory dále dělíme na dva druhy a to na řadový a odbočkový. Rozdělení je odvozeno od místa vzniku rezonančního vlnění. V případě řadového rezonátoru vznikají rezonanční vlny v hlavní větvi tlumiče a u odbočkového v odbočce. Rezonátory jsou vysoce účinné pro tlumení hluku určitých frekvencí. Rozdělíme-li proud výfukových plynů a přinutíme je urazit rozdílně dlouhé trajektorie, dojde při jejich opětovném spojení k jejich vzájemné interferenci, tzv. interferenční efekt a vzájemně se vyruší.



Obrázek 5 Rezonanční tlumič výfuku [2]

#### 2.4.2. Absorpční tlumení hluku

Druhým ze základních způsobů tlumení hluku je tlumení pomocí absorpce. Energie zvukových vln dopadajících na měkký porézní materiál je vlivem velkého tření v tomto materiálu, transformována na tepelnou energii a tím je výsledná hluková energie výrazně redukována.

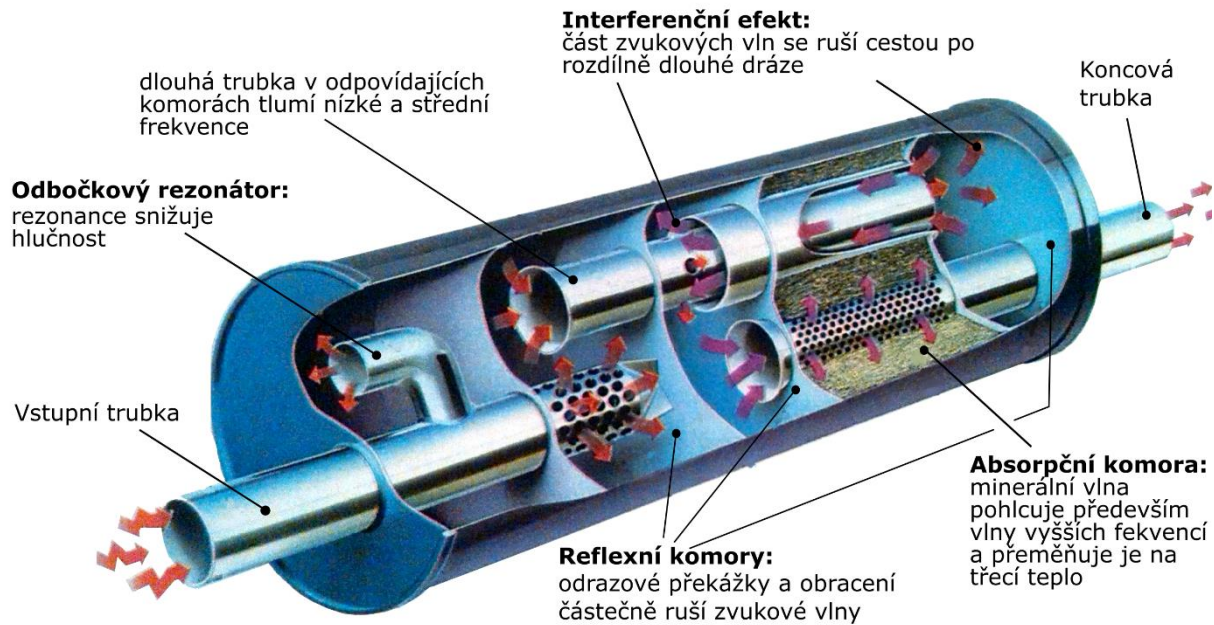


Obrázek 6 Absorpční tlumič výfuku [11]

Absorpční tlumič hluku je naplněn minerální vatou, nebo skelnými vlákny, které dobře absorbují hluk. Tlumič je tvořen jednou nebo více komorami. Plyny jsou vedeny perforovanou trubicí. Výfukové plyny jsou bržděny jen minimálně, ale hlukové vlny prochází perforací a jejich energie je pohlcována. Je účinný pro tlumení hluku vyšších frekvencí. Vzhledem k malému odporu průtoku spalin bývá často jediným tlumičem hluku soutěžních vozů, což má za následek jejich typický hluboký zvuk motoru.

#### 2.4.3. Kombinované tlumení hluku

Jak již bylo zmíněno, každý z těchto druhů tlumičů hluku účinně tlumí pouze hluk určité frekvence, a proto se můžeme často setkat s jejich kombinací v jedné sestavě. Takový to tlumič se nazývá kombinovaný reflexně-absorpční tlumič hluku.



Obrázek 7 Kombinovaný tlumič výfuku [2]

Pro úplnost by bylo vhodné také zmínit konstrukční řešení, kdy je v oxidačním katalyzátoru integrován absorpční tlumič hluku.

### 3. Spolupráce výfukové soustavy a motoru z energetického hlediska

#### 3.1. Zážehový motor

Účinnost spalovacího motoru závisí v první řadě na dokonalém průběhu oxidačního procesu, při kterém se uvolní tepelná energie. Níže popsáný vznětový motor pracuje s přebytkem vzduchu a je řízen množstvím vstříkovaného paliva. Zážehový motor však musí mít směs pro dokonalé spálení v přesném složení a proto pro zvyšování výkonu se snažíme do válce dopravit větší množství směsi ve správném směšovací poměru.

Zlepšení plnění se dosahuje:

Vhodným tvarováním sacího potrubí můžeme využít pulzních vln. Proud vzduchu se po ukončení sacího cyklu hromadí u ventilu následkem setrvačné síly a správným tvarováním sacího potrubí, přichází rázová vlna k sacímu otvoru přesně v okamžik, kdy dojde k jeho otevření a tím dochází k určitému přeplňovacímu efektu. Kvalita povrchu sacího potrubí, resp. drsnost ovlivňuje odpor vzduchu při jeho pohybu. Sací otvor je otevřen na velmi krátkou dobu a proto je nutno klást důraz také na jeho průměr tak, aby mohla být nová náplň nasáta co nejnázne. U výkonnějších motorů většinou nedochází k neúměrnému zvětšování ventilu, ale přidávají se další sací ventily. Toto řešení je výhodné z hlediska chlazení ventilů. Důležitou skupinou jsou přeplňovací systémy, do kterých spadá turbodmychadlo, o němž bude dále podrobnější zmínka a různé druhy mechanicky poháněných dmychadel, tzv. kompresorů. Všechny zmíněné systémy mají za úkol zvyšovat plnicí tlak vzduchu a tím v sacím cyklu dopravit do spalovacího prostoru větší množství vzduchu. Zlepšení plnění válce pro zvýšení

výkonu se provádí prodloužením doby otevření sacího ventilu. Jedná se o tzv. proměnné časování ventilů, které může být dvojího druhu, a to proměnné skokem (např. VTEC) nebo plynule měnitelné (např. VANOS). Doba otevření sacího ventilu může být výjimečně i více než 240° úhlu klikové hřídele. Při výfukovém cyklu odcházejí plyny ze spalovacího prostoru vysokou rychlostí, blížíci se rychlosti zvuku, v důsledku toho vzniká ve spalovacím prostoru podtlak. Sací ventil se tedy může otevřít ještě před horní úvrati a vzduch je podtlakem nasáván do spalovacího prostoru proti pohybu pístu. Tuto situaci, kdy jsou otevřeny jak sací, tak výfukové ventily, nazýváme překrytí ventilů, neboli střih. Sací ventil zůstává otevřený až do doby stlačování. Proud vzduchu pohybující se rychlostí až 100 m·s<sup>-1</sup> může v důsledku své setrvačné síly plnit dále spalovací prostor až do okamžiku, kdy tlak zvedajícího se pístu překoná setrvačnou sílu vzduchu. Nejdéle v tento okamžik se musí sací ventil opět zavřít.

**Stupeň plnění (účinnost plnění)** je poměr hmotností skutečně nasáté směsi paliva a vzduchu v kg k teoreticky možnému plnění válce směsí paliva a vzduchu v kg. I s prodlouženou dobou otevření sacího ventilu dosáhneme u nepřepřlňovaných motorů maximálně účinnosti plnění 80%.

$$\lambda_p = \frac{m_n}{m_t} = \frac{m_n}{V_h \cdot \rho_t} = \frac{m_{n\text{ celk}}}{V_H \cdot \rho_t}$$

$\lambda_p$	stupeň plnění (účinnost plnění)
$m_n$	nasáté množství čerstvého vzduchu nebo směsi paliva a vzduchu v kg
$m_t$	teoretická hmotnost čerstvé náplně odpovídající zdvihovému objemu válce
$m_{n\text{ celk}}$	hmotnost náplně dopravené do všech válců
$\rho_t$	teoretická měrná hmotnost náplně
$V_h$	zdvihový objem jednoho válce
$V_Z$	zdvihový objem všech válců

Stupeň plnění nepřepřlňovaných motorů činí 0,6 až 0,9 neboli 60 až 90 %. U přepřlňovaných motorů se dosahuje stupně přepřlňování 1,2 až 1,6 neboli 120 až 160 %.

### Kompresní poměr (stupeň komprese)

Kompresní poměr zásadně ovlivňuje využití chemické energie z paliva. Čím vyšší je, tím je vyšší účinnost motoru. Zvýšený kompresní poměr však také s sebou nese zvýšené riziko samovznícení směsi (klepání) a vyšší emise škodlivých plynů. Pro úplnost by bylo vhodné definovat pojmy, které jsou zde použity. Prostor ohraničený válcem, hlavou válců a dnem pístu se nazývá **spalovací prostor**. Jeho objem je největší v dolní úvrati pístu, je součtem zdvihového objemu a kompresního prostoru a spojitě se mění až do horní úvrati kdy je nejmenší.

**Objem kompresního prostoru  $V_c$**  – je objem spalovacího prostoru v horní úvrati pístu

**Zdvihový objem (válce)  $V_h$**  – je prostor mezi úvratemi pístu

$$\varepsilon = \frac{V_h + V_c}{V_c}$$

Důvody pro zvýšení tepelné účinnosti tedy i zvýšení výkonu motoru je také snazší výplach spálených plynů z menšího kompresního prostoru. Větším stlačením se zvyšuje teplota a tím i rychlejší zplynování paliva. Po otevření výfukových ventilů se mohou vysoce stlačené výfukové plyny rozpínat do větších prostor, tím klesá jejich teplota a výfukem se ztrácí nižší množství tepelné energie.

Jak již bylo řečeno, spalovací motor mění teplo přivedené v palivu do motoru na mechanickou práci, ve skutečnosti však větší část této energie nedokážeme využít.

### 3.2. Vznětový motor

Jeho spotřeba je, oproti srovnatelným zážehovým motorům až o 30% nižší. Účinnost může dosahovat až 46 %.

Palivo se hned po okamžiku vstříknutí do spalovacího prostoru nevznítí, ale probíhají jeho fyzikální změny (viz tabulka níže) a tuto dobu, mezi okamžikem vstříku a počátku hoření nazýváme předstih vstříku (předvstřík).

Doba předstihu vstříku ↓	Palivo ještě jako kapalné je vstřikováno do horkého vzduchu a maximálně rozprášeno.
	Rozprášené palivo (kapky) je zahříváno na teplotu vypařování.
	Palivo se při teplotě varu odpařuje
	Palivové páry se mísí s horkým vzduchem.
	Palivové páry se zahřívají na teplotu vznícení.
	Palivové páry se vznítí.
	Hoření (spalování).

Tabulka 1 Průběh hoření ve vznětovém motoru [2]

#### 3.2.1. Vznětové motory s nepřímým vstřikováním

Tyto motory využívají malý prostor, oddělený od spalovacího prostoru nad pístem, tzv. předkomůrku, do které je vstřikováno palivo a kde je umístěna žhavicí svíčka. Spalovací prostor je pak rozdělen a jeho nevýhodou je větší povrchová plocha, která umožňuje větší odvod tepla. Z tohoto důvodu je nutné zvětšit kompresní poměr, aby byla zajištěna dostatečná teplota pro vznícení nafty. Kompresní poměr u těchto motorů bývá  $\epsilon = 19-30$ .

#### 3.2.2. Motory s přímým vstřikováním

Povrch spalovacího prostoru u těchto motorů má oproti motorům s nepřímým vstřikováním menší povrch, a tím i menší plochu pro odvod tepla. Teplota vzduchu 900°C po stlačení je tedy dostačující a kompresní poměry mohou být menší.

pro osobní automobily  $\epsilon = 14-20$

pro nákladní automobily  $\epsilon = 14-19$

### 3.3. Energetická bilance spalovacího motoru

Úkolem spalovacího motoru je transformace chemické energie uložené v palivu  $Q_p$  na tepelný tok, který odpovídá efektivní (mechanické) práci motoru  $Q_e$ . Tato přeměna nemůže být dokonalá. Snaha maximalizovat účinnost této transformace je podmíněna znalostí toků energií a jednotlivých typů ztrát. Proces spalování je přeměna  $Q_p$  na tepelný tok. Ne všechno palivo je po vstříknutí do spalovacího prostoru spáleno. Tento tepelný tok odpovídající energii  $Q_{ns}$  odchází společně se spalinami výfukovým systémem. Tepelný tok, který vstupuje do tepelného procesu je nyní  $Q_p - Q_{ns}$ . Toto teplo, resp. tepelný tok, provádí efektivní práci na pístu  $Q_e$ .

Nevyužitá část tohoto tepla je odvedena výfukovými plyny jako  $Q_v$ , a zbytek se pak ztrácí přestupem skrz stěny pístu, válce, hlavy válců a chladicí kapalinou jako tepelný tok  $Q_{chl}$ . Dalšími tepelnými toky se ztrácí pouze zanedbatelná část vstupní energie. Těmito toky jsou radiace, konvekce, kondukce z bloku motoru a další části v  $Q_s$  společně s chladičem oleje  $Q_o$ . Třením pístu o stěnu válce  $Q_{tr}$ , třením v ložiskách klikového a rozvodového mechanismu se ztrácí další část efektivního tepla  $Q_e$  a opět se mění na tepelný tok, který je pak odveden jako  $Q_{chl}$ ,  $Q_s$  a  $Q_o$ . Efektivní práce vykonaná motorem neslouží pouze pro pohon automobilu, ale je spotřebovávána také k pohonu mechanických pomocných systémů jako jsou čerpadla, kompresory, alternátory. Tato energie je označena  $Q_{mech}$ . Toto je zjednodušený popis toku energií. Ve skutečnosti dochází k transformaci a přelévání z jednoho tepelného toku do druhého.

### Rovnice energetické rovnováhy:

$$Q_p = Q_e + Q_{chl} + Q_v + Q_{ns} + Q_o + Q_{ost}$$

- $Q_p$  označuje celkové množství tepla přivedené v palivu,
- $Q_e$  je teplo odpovídající efektivní práci motoru,
- $Q_{chl}$  teplo odvedené chladicí soustavou,
- $Q_v$  teplo odvedené výfukem,
- $Q_{ns}$  je teplo ztracené nedokonalým spalováním paliva,
- $Q_o$  je teplo odvedené mazacím olejem,
- $Q_{ost}$  je ostatní ztracené teplo (např. teplo ztracené sáláním, teplo ekvivalentní mechanickým ztrátám, kinematické energii výfukových plynů)

### Celkový tepelný tok přivedný v palivu - $Q_p$

Průtočné množství paliva

$$M_{ph} = \frac{v_p \cdot \rho_p}{T_p} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$$

$v_p$  – množství měřeného paliva [ $\text{m}^3$ ]

$\rho_p$  – hustota paliva [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

$T_p$  – čas na spotřebu množství měřeného paliva [s]

$$Q_p = M_{ph} \cdot H_u \quad [\text{kJ} \cdot \text{s}^{-1}]$$

$H_u$  – dolní výhřevnost paliva [ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]

### Tepelný tok ekvivalentní efektivnímu výkonu motoru - $Q_e \approx P_e$

$$Q_e = M_k \cdot \omega = M_k \cdot 2 \cdot \pi \cdot 10^{-3} \quad [\text{kJ} \cdot \text{s}^{-1}]$$

$M_t$  – točivý moment [ $\text{N} \cdot \text{m}$ ]

$N$  – otáčky motoru [ $\text{s}^{-1}$ ]

$\omega$  – úhlová rychlost [ $\text{s}^{-1}$ ]

### Tepelný tok odvedený chladícím médiem - $Q_{chl}$

- průtočné množství chladící kapaliny

$$M_w = \frac{v_w \cdot \rho_w}{T_w}$$

$v_w$  – množství měřené chladící kapaliny [ $m^3$ ]

$T_w$  – čas na spotřebu množství měřené chladící kapaliny [s]

$\rho_w$  – hustota chladící kapaliny [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

$$Q_{chl} = M_w \cdot c_w \cdot (T_{w2} - T_{w1}) \quad [kJ \cdot s^{-1}]$$

$c_w$  – měrná tepelná kapacita chladící kapaliny (vody) [ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

$T_{w2}$  – teplota vstupní chladící kapaliny (vody) [K]

$T_{w1}$  – teplota výstupní chladící kapaliny (vody) [K]

### Tepelný tok odvedený z motoru výfukovými plyny - $Q_v$

- průtočné množství vzduchu

$$M_{vz} = \frac{v_{vz} \cdot \rho_{vz}}{T_{vz}} \quad [kg \cdot s^{-1}]$$

$v_{vz}$  – množství měřeného vzduchu [ $m^3$ ]

$T_{vz}$  – čas na spotřebu množství měřeného vzduchu [s]

$\rho_{vz}$  – hustota vzduchu [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

- hmotnostní tok výfukových plynů

$$M_v = M_{ph} + M_{vz} \quad [kg \cdot s^{-1}]$$

$$Q_v = M_v \cdot c_p \cdot (T_v - T_o) \quad [kJ \cdot s^{-1}]$$

$c_p$  – měrná tepelná kapacita výfukových plynů za stálého tlaku  
[ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

$T_v$  – teplota výfukových plynů [K]

$T_o$  – teplota nasávaného vzduchu [K]

### Tepelný tok ztracený nedokonalým spálením paliva – $Q_{ns}$

$$Q_{ns} = (1 - \eta_{ch}) \cdot H_u \cdot M_{ph} \quad [kJ \cdot s^{-1}]$$

$\eta_{ch}$  – chemická účinnost spalování [-]

$H_u$  – dolní výhřevnost paliva [ $kJ \cdot kg^{-1}$ ]

$M_{ph}$  – průtočné množství paliva [ $kg \cdot s^{-1}$ ]

Tepelný tok ostatní –  $Q_{ost}$

Do tohoto souboru patří všechny ostatní tepelné toky, které by však bylo možno, při podrobnějším rozboru, dále rozdělit.



$$Q_{ost} = Q_s + Q_o + Q_{zb} \quad [\text{kJ} \cdot \text{s}^{-1}]$$

$Q_s$  – tepelný tok vysálaný do prostoru motorem

$Q_o$  – tepelný tok odvedený olejem

$Q_{zb}$  – tepelný tok zbývající (další neměřitelné ztráty)

Procentuální vyjádření poměru složek jednotlivých tepelných toků k celkovému tepelnému toku obsaženému ve spotřebovaném palivu:

- složka tepelného toku efektivního (užitého) výkonu

$$q_e = \frac{Q_e}{Q_p} \cdot 100 \quad [\%]$$

- složka tepelného toku odvedeného chladicí kapalinou

$$q_{chl} = \frac{Q_{chl}}{Q_p} \cdot 100 \quad [\%]$$

- složka tepelného toku odvedeného výfukovými plyny

$$q_v = \frac{Q_v}{Q_p} \cdot 100 \quad [\%]$$

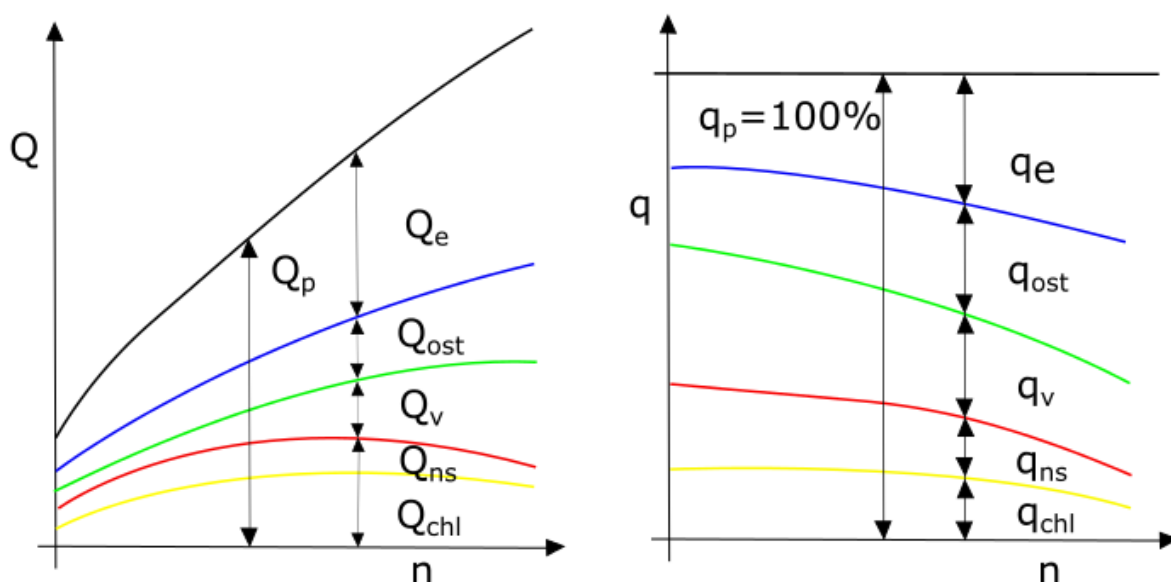
- složka tepelného toku ztraceného nedokonalým spálením paliva

$$q_{ns} = \frac{Q_{ns}}{Q_p} \cdot 100 \quad [\%]$$

- složka ostatního tepelného toku

$$q_{ost} = \frac{Q_{ost}}{Q_p} \cdot 100 \quad [\%]$$

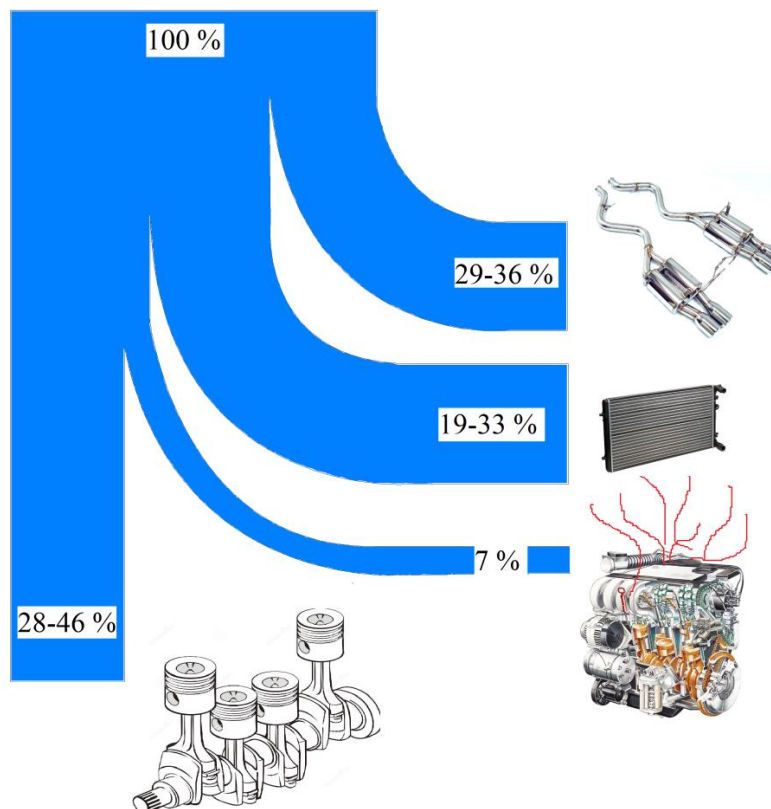
$$100 = q_e + q_{chl} + q_v + q_{ns} + q_{ost}$$



Obrázek 8 Tepelná bilance a její procentuální vyjádření poměr složek [14]

Názornější a zároveň obvyklejší způsob vyjádření tepelné bilance motoru je prostřednictvím Sankeyova diagramu.





Obrázek 9 Sankeyův diagram

Typ motoru		Motor zážehový	Motor vznětový
Teplu přeměněné na výkon [%]		32	46
Teplu odvezené chlazením	Teplu odvedené při hoření [%]	6	8
	Teplu odvedené při expanzi [%]	7	6
	Teplu odvedené při výfuku [%]	15	9
Teplu vyvolané třením pístu [%]		2	2
Teplu odvedené výfukovými plyny a zářením [%]		38	30

Tabulka 2 Teplotní bilance vozidlových spalovacích motorů [1]

### Zvyšování účinnosti spalovacích motorů

Účinnost (efektivita) přeměny chemické energie přivedené v palivu na mechanickou práci je ve spalovacím motoru omezena termickou účinností ideálního Carnotova oběhu, která je dána maximální a minimální teplotou oběhu. Při ideálním provozním režimu je mezní hodnota účinnosti spalovacího motoru 50%, přičemž však musíme hledat optimum mezi účinností a tvorbou oxidů dusíku.

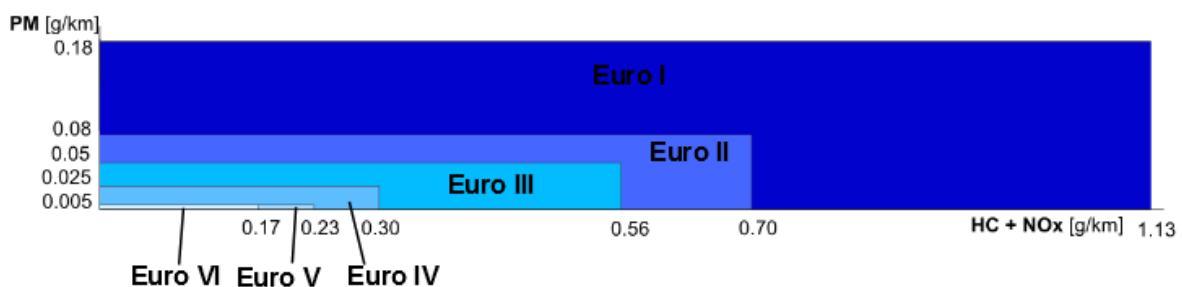
Předpokládaný vývoj konstrukce pístových spalovacích motorů se bude pravděpodobně ubírat těmito cestami:

- řízený pohyb vzduchu ve válci, řízení průběhu spalování (snímače tlaku ve válci), proměnný kompresní poměr
- vznětový motor spalující homogenní směs (HCCI)

- elektronické řízení rozvodu, ovládání zdvihu ventilů elektromagnety, optimalizace výměny náplně válců s omezením ztrát škrcením při částečných zatíženích
- zvyšování mechanické účinnosti snížením tření – menší počet válců a písňích kroužků
- vyřazování válců z činnosti
- využití nových zapalovacích systémů
- snížení tepelných ztrát vysokým řízeným přeplňováním a regulace přeplňování řízením nastavení lopatek turbodmychadla
- větší využití odpadního tepla výfukových plynů prostřednictvím turbodmychadla, plynové turbíny
- omezení ztrát při volnoběhu vypínáním motoru „stop-and-go“
- využití elektromotoru vedle spalovacího motoru v hybridních systémech pohonů, rekuperace energie a akumulace elektrické energie v akumulátorech nebo v superkondenzátorech
- použití dokonalejších katalytických konvertorů a zachycovačů částic

### 3.4. Emise škodlivých plynů

Provoz motorového vozidla je doprovázen emisí celé řady škodlivin. S rostoucím počtem vozidel bylo tedy nutné, vedle vývoje s cílem zvýšit výkon spalovacích motorů, většího komfortu ve voze apod. začít řešit problematiku omezování těchto nežádoucích produktů provozu. V roce 1968 vznikla v Kalifornii první norma zabývající se množstvím produkce výfukových plynů. V Evropě přišla v platnost první norma EHK 15 v roce 1971. V dnešní době jsou v zemích Evropské unie používány normy Euro, které vznikly v roce 1992 a každé 4-5 let se vydává nová přísnější norma. Aktuálně je od září 2014 v platnosti norma Euro 6.



Obrázek 10 Množství povolených škodlivin ve výfukových plynech

Rok/norma		CO (g/km)		NO <sub>x</sub> (g/km)		HC + NO <sub>x</sub> (g/km)		HC (g/km)	PM (g/km)
1992	I	2.72	2.72	-	-	1.13	1.13	-	0.18
1996	II	2.20	1.00	-	-	0.05	0.70*	-	0.08**
2000	III	2.30	0.64	0.15	0.50	-	0.56	0.20	0.05
2005	IV	1.00	0.50	0.08	0.25	-	0.30	0.10	0.025
2009	V	1.00	0.50	0.06	0.18	-	0.23	0.10	0.005***
2014	VI	1.00	0.50	0.06	0.08	-	0.17	0.10	0.005***

\* 0.90 pro motory s přímým vstřikováním paliva

\*\* 0.10 pro motory s přímým vstřikováním paliva

\*\*\* Zážehové motory s přímým vstřikováním paliva

**Zážehové motory**

**Vznětové motory**

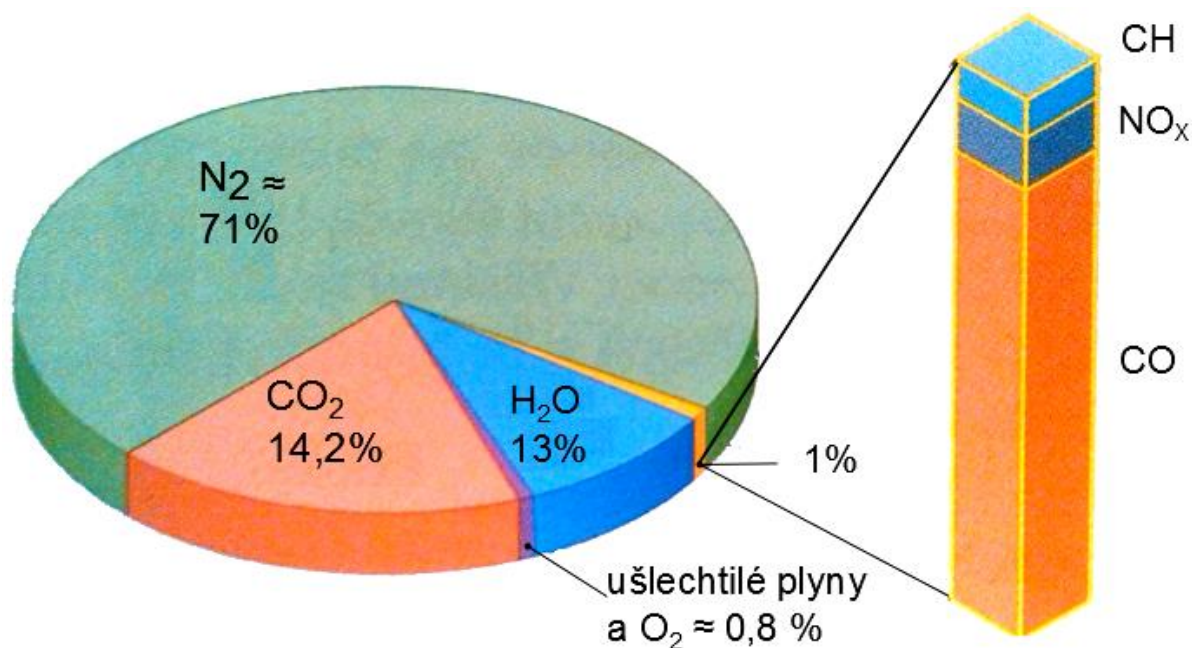
Tabulka 3 Množství povolených škodlivin ve výfukových plynech [7]

Provoz motorového vozidla je, kromě již zmíněného produkce výfukových plynů, doprovázen hlukem. Ten vzniká průchodem obrovského množství nasávaného vzduchu sacím systémem motoru, hlukem vznikajícím při prudké hoření paliva ve válci dále pak hlukem, který vytváří proudění produktů spalování výfukovým systémem, valením pneumatik po vozovce a aerodynamický hluk vznikající obtékáním vzduchu okolo karoserie. Celkový hluk, který může vznikat provozem vozidla, je omezen na zákonem stanovené hladiny. Výrobci jsou na tyto podněty nuceni reagovat konstrukčními úpravami. Aerodynamický hluk se snižuje aerodynamičtější provedením karoserie, hluk vznikající provozem motoru odhlučněním motorového prostoru a hluk vznikající ve výfukovém systému se snižuje výfukovými tlumiči. V této práci se dále zaměřím pouze na poslední zmiňovaný konstrukční prvek.

## 4. Zpracování vybraných témat o výfukovém systému

### 4.1. Snižování emisí

Tato kapitola se zaměřuje pouze na snižování podílu škodlivin ve výfukových plynech pomocí konstrukčních řešení ve výfukovém systému.



Obrázek 11 Podíl složek výfukových plynů [2]

#### 4.1.1. Zážehový motor

Podíl složek výfukových plynů je závislý především na směšovací poměru, který je indikován součinitelem přebytku vzduchu  $\lambda$  ve výfukových plynech.

Stechiometrický poměr ( $\lambda=1$ ) nastane, když při spálení 1 kg paliva spálíme 14,8 Kg vzduchu. Při provozu za nedostatku vzduchu tj.  $\lambda < 1$  (tzv. bohatá směs) sice dosahují motory nejvyššího výkonu, ale zároveň roste měrná spotřeba paliva a ve výfukových plynech dochází k nárůstu podílu nespálených uhlovodíků a oxidu uhelnatého.

Opačnou situaci je provoz při přebytku vzduchu tj.  $\lambda > 1$  (tzv. chudá směs), kdy mají motory nejnižší spotřebu, ale ta má za následek také snížení výkonu a zvýšení maximální teploty, neboť pro zplynování menšího množství paliva se spotřebuje menší množství tepla. Zároveň se razantně zvýší podíl oxidů dusíku (NO<sub>x</sub>) ve výfukových plynech.

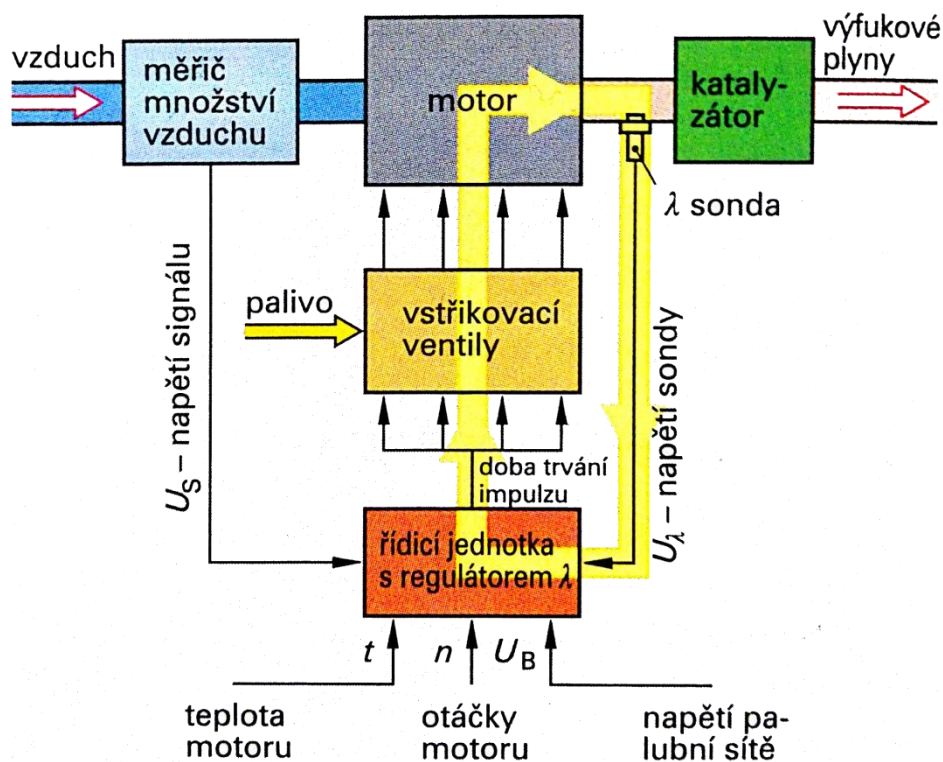
#### Regulační obvod lambda

Sonda  $\lambda$  je snímač přebytečného kyslíku ve výfukových plynech. Na základě množství zbytkového kyslíku posílá řídicímu členu nebo přímo motoru napěťový signál. Je umístěna před katalytickým konvertorem.

Podmínky pro regulaci  $\lambda$  jsou:

Teplota sondy musí být vyšší než 300 °C, musí být vhodný jízdní režim, v tomto případě je to chod naprázdno nebo s částečným zatížením a poslední podmínkou je teplota motoru vyšší než 40 °C.

Za katalytickým konvertorem bývá umístěna monitorovací nebo také kontrolní lambda sonda, která slouží ke kontrole funkce katalytického konvertoru.



Obrázek 12 Funkční schéma L-Jetronic s regulací  $\lambda$  [2]

## Adaptivní regulace lambda

Dojde-li v určité oblasti provozu k trvale nižší hodnotě zbytkového kyslíku ve výfukových plynech, tzn. stále bohatá směs, sníží se pro tuto oblast množství vstřikovaného paliva. Tato hodnota je uložena do paměti řídicí jednotky, je přijata jako základní a další korekce jsou poté prováděny na základě porovnání skutečné a této nové základní hodnoty. Tímto způsobem můžeme předcházet nežádoucím vlivům jako je opotřebení motoru, přísávání vzduchu, nesprávný systémový tlak paliva, nevhodné hodnoty teplot apod.

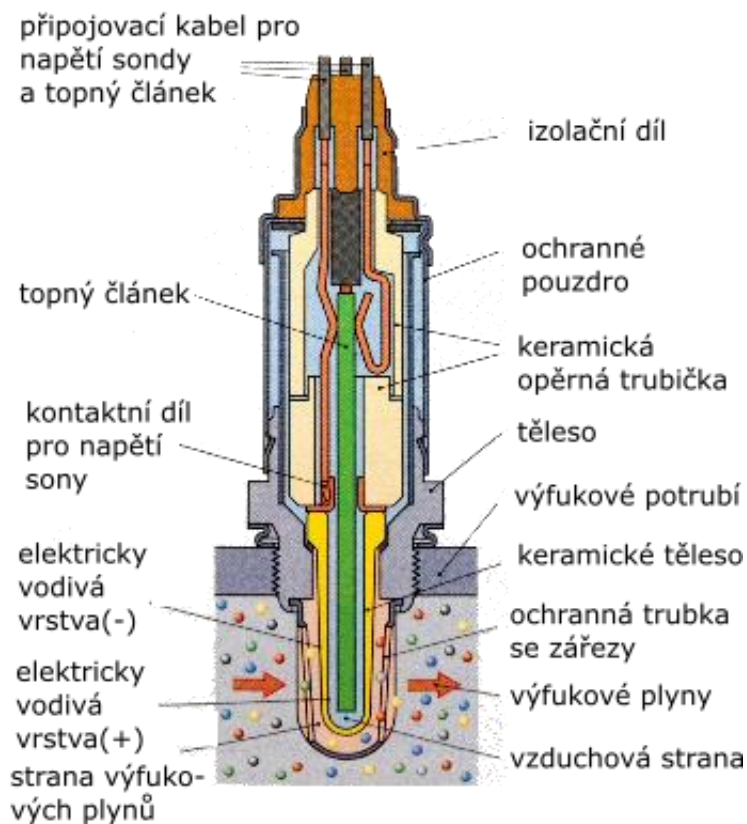
## Druhy sond lambda

### Sonda se skokovou charakteristikou

Tato sonda lambda je zhotovena z keramického, plyn nepropustného tělesa, např. z oxidu zirkoničitého. Těleso je ze své vnitřní i vnější strany povlakováno tenkou mikroporézní vrstvou platiny.

Pro zkrácení doby, po kterou se sonda zahřívá na provozní teplotu, bývá sonda vyhřívána. Výfukové plyny proudí kolem vnějšího obalu sondy. Platinová vrstva spojuje povrch s pouzdrem sondy a společně tvoří záporný pól (-). Do vnitřního prostoru sondy je přiveden atmosférický vzduch. Další platinová vrstva jej spojuje s kladným pólem (+). Takto zhotovená lambda sonda se chová jako kondenzátor.

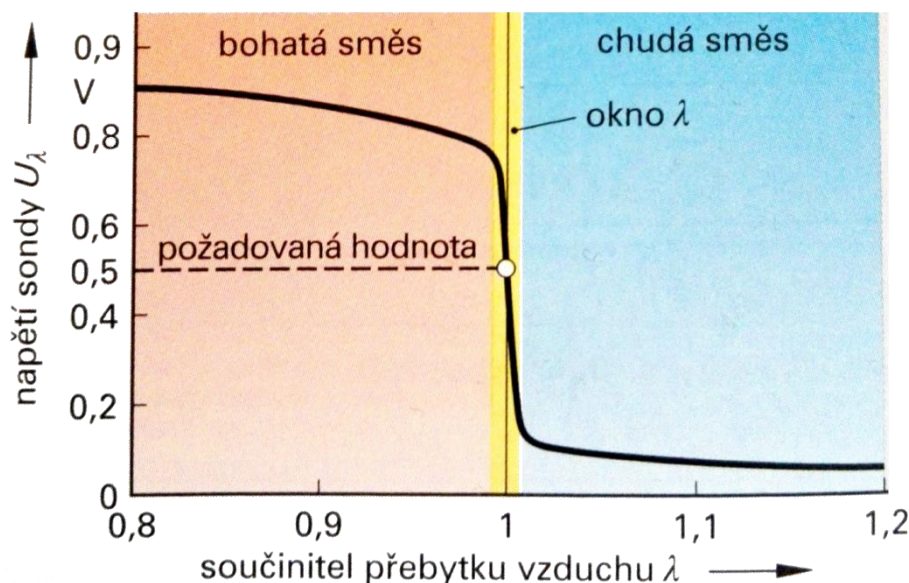
Oxid zirkoničitý nebo i ostatní druhy keramiky uvnitř sondy  $\lambda$  se při 300 °C stávají vodivými pro ionty kyslíku. Vzhledem k různému množství kyslíku na straně, kde je sonda ve styku s atmosférickým vzduchem a na straně, kde kolem proudí výfukové plyny, dochází ke vzniku elektrického napětí, které je v rozsahu od 100 mV pro chudou směs (malý rozdíl v množství



Obrázek 13 Sonda  $\lambda$  z oxidu zirkoničitého [2]

kyslíku v atmosféře a ve výfukových plyne => malé napětí) až do 800 mV pro bohatou směs. Při stechiometrickém poměru ( $\lambda=1$ ) dochází ke skokové změně napětí. Při  $\lambda=1$  se napětí pohybuje  $\approx 450-500$  mV. Sonda pouze zkoumá množství zbytkového kyslíku ve výfukových plynech a zkoumá tak, jestli byla směs chudá, nebo bohatá. Proto jej řadíme mezi čidla. Provozní teplota sondy nesmí překročit 850 až 900 °C.



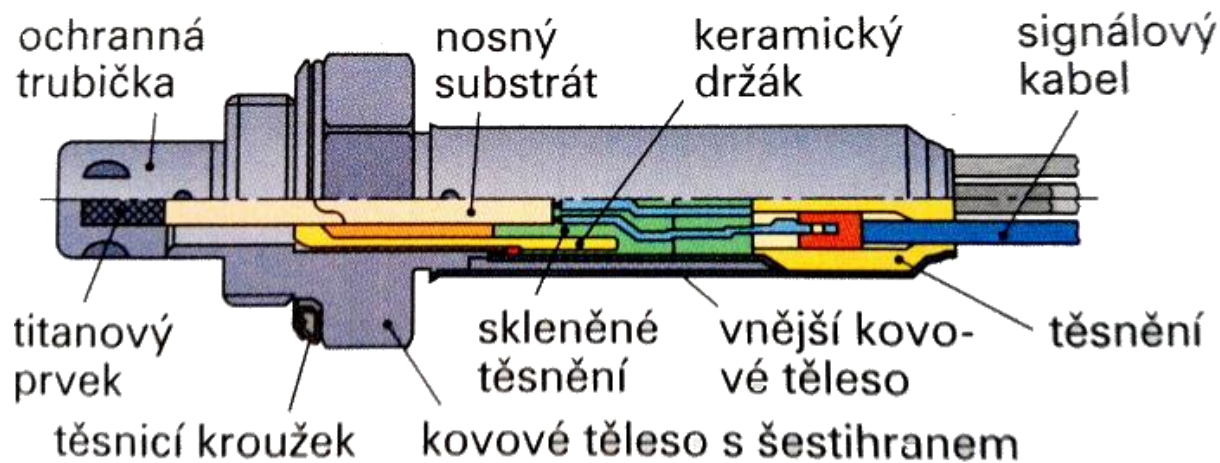


Obrázek 14 Napětí sondy z oxidu zirkoničitého v závislosti na  $\lambda$  [2]

Při zvýšených otáčkách bez zatížení je frekvence snímání sondy přibližně 1 Hz, tzn., hodnota se mění minimálně jednou za sekundu v rozsahu od 0,1 V do 0,9 V.

### Odporová sonda lambda

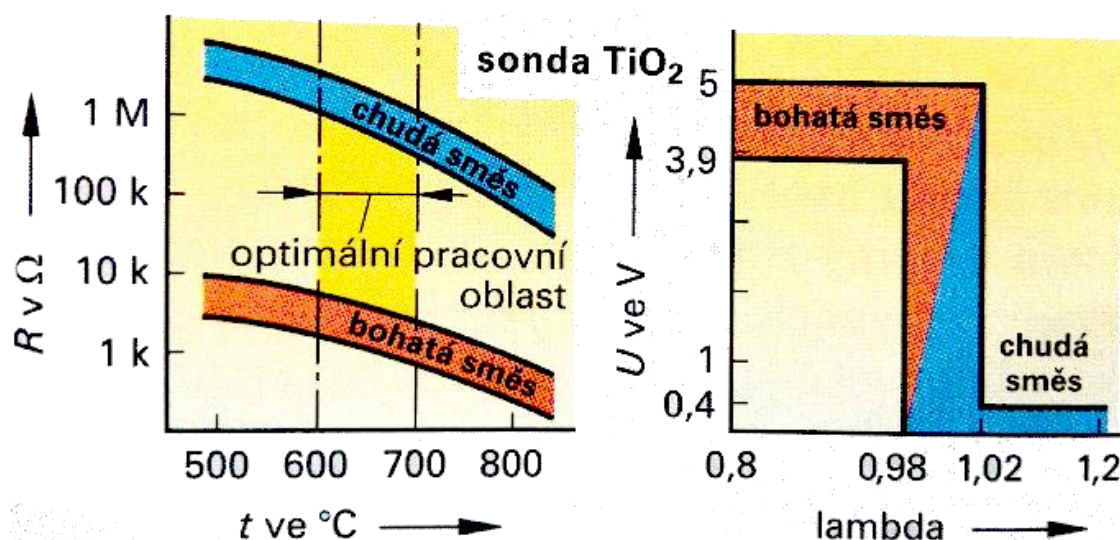
Těleso je opět z keramiky tentokrát však z oxidu titaničitého. Elektrody jsou povlakovány porézní vrstvou platiny.



Obrázek 15 Sonda z oxidu titaničitého [2]

Vodivost tělesa z oxidu titaničitého je závislá na množství zbytkového kyslíku ve výfukových plynech a jeho teplotě. Vodivost je přímo úměrná zvyšující se bohatosti směsi. U toho typu sondy dochází opět při  $\lambda=1$  ke skokové změně, tentokrát odporu od 1 k $\Omega$ , při bohaté směsi po 1 M $\Omega$  při směsi chudé. Měřicí odpor v řídicí jednotce je zapojen sériově s článkem sondy. Koncentrace zbytkového kyslíku ve výfukových plynech má vliv na odpor titanového keramického tělesa uvnitř sondy, na základě jeho vodivosti je vyvozeno napětí na měřicím odporu v řídicí jednotce motoru, které se pohybuje od 0,4 V pro chudou směs po 3,9 – 5 V pro bohatou směs. Konstruktivním rozdílem sondy lambda z oxidu titaničitého a zirkoničitého je v absenci srovnávacího prostoru s atmosférickým vzduchem. Frekvence regulace je vyšší než

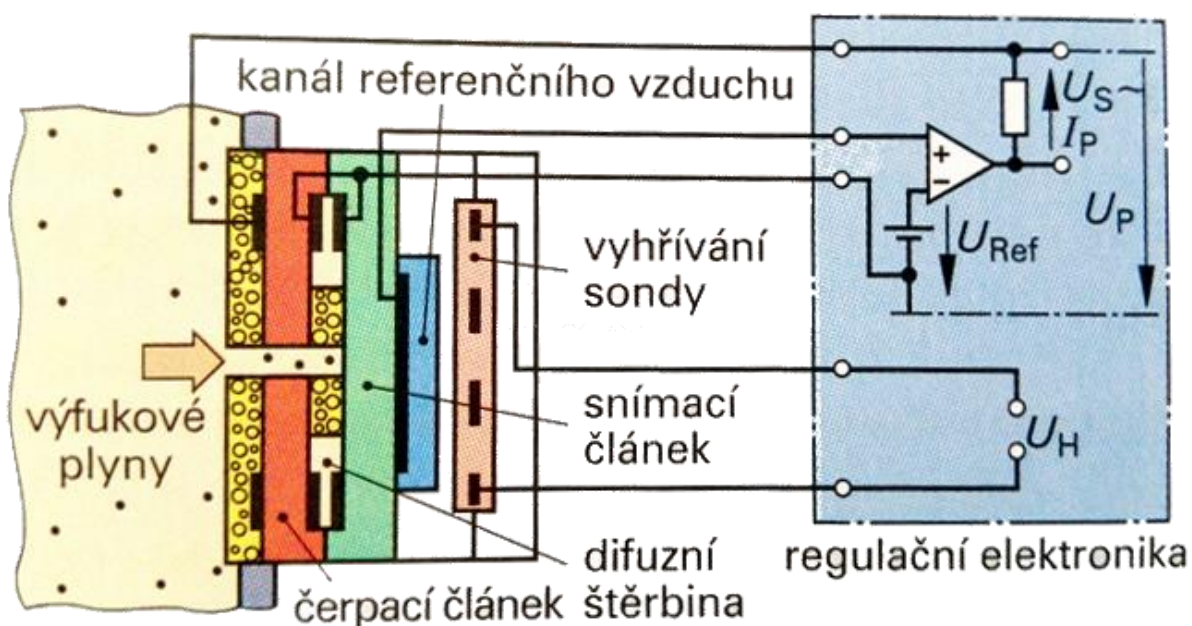
1 Hz. Optimální provozní teplota je oproti sondě z oxidu zirkoničitého vyšší, a to 600 – 700 °C. Je zde kladen důraz na regulaci vyhřívání sondy. Při teplotě 200 °C je sonda připravena k provozu, její kmitočet je však nízký pro přesné řízení směsi. Teploty vyšší než 850 °C sondu lambda zničí.



Obrázek 16 Charakteristiky sondy z oxidu titanu [2]

### Širokopásmová sonda lambda

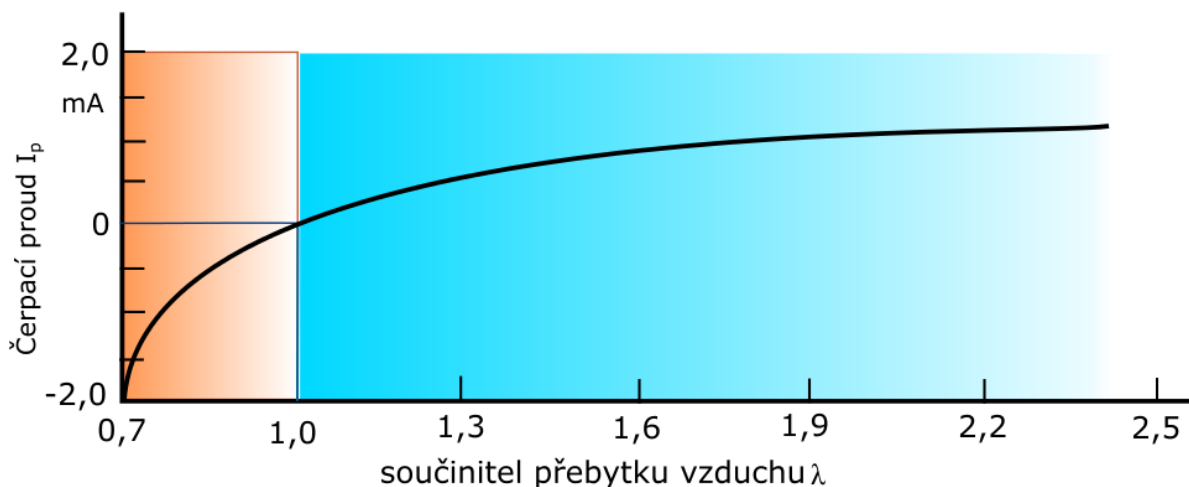
Díky schopnosti plynule vyhodnocovat hodnoty  $\lambda$ , a to i větší než 0,7 je tato sonda lambda vhodná pro kontinuální regulaci  $\lambda$  zážehových motorů s koncepcí chudé směsi, vznětových a plynových motorů. Z uvedených druhů sond má širokopásmová nevyšší provozní teplotu 700 až 800 °C. Je sestavena ze dvou sond z oxidu zirkoničitého, které mají skokovou změnu. Jedna zastává roli měřicí sondy a druhá sondy čerpací. Obě sondy jsou ustaveny tak, že mezi nimi vzniká difúzní mezera o velikosti 10 až 50  $\mu\text{m}$ . Výfukové plyny proudí skrz nasávací prostor do difúzní štěrbin, kde jsou posléze vyhodnocovány. K měřicí sondě, je přiveden referenční atmosférický vzduch.



Obrázek 17 Širokopásmová sonda lambda [2]



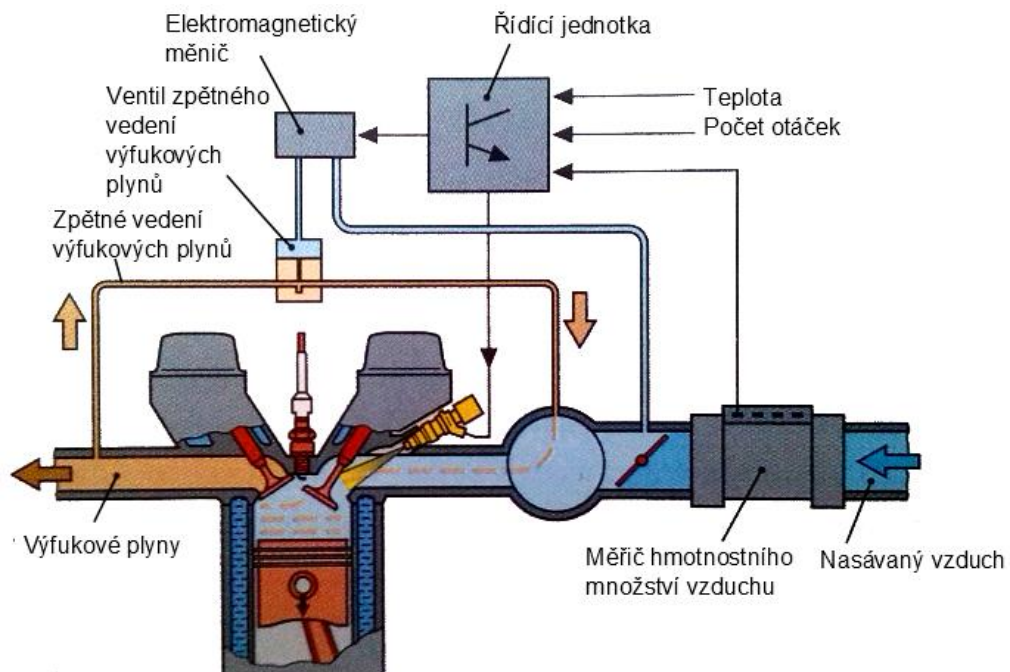
Pohybu iontů kyslíku (čerpací proud) je dosaženo přivedením elektrického napětí na pevný elektrolyt sondy, který má skokovou charakteristiku. Od určité teploty dojde k pohybu iontů, jehož směr je závislý na polaritě přivedeného napětí. Měřicí sonda se skokovou změnou, slouží k určení zbytkového kyslíku ve výfukových plynech. Pro případ, kdy je směs chudá ( $\lambda > 1 > U\lambda < 300 \text{ mV}$ ) k čerpacímu článku je připojeno regulační elektronkou napětí tak, že na straně výfukových plynů je kladný pól a na straně měřicí sondy pól záporný. To způsobí, že dojde k proudění iontů kyslíku difúzní štěrbinou skrz porézní pevný elektrolyt na stranu výfukových plynů. Tento děj probíhá tak dlouho, dokud není docíleno  $\lambda=1$  na měřícím článku. Celkový čerpací proud, který byl spotřebován pro toto čerpání, je úměrný zbytkovému množství kyslíku ve výfukových plynech. Čerpací proud je tedy veličinou určující okamžitou hodnotu lambda. Na základě takto získaných informací a uložené charakteristice, může řídicí jednotka motoru upravovat v reálném čase směšovací poměr.



Obrázek 18 Charakteristika širokopásmové sondy lambda [2]

## Zpětné vedení výfukových plynů (recirkulace)

Do spalovacího prostoru je z výfukového potrubí vedena část plynů, které se již nepodílí na spalování a snižuje se tím teplota. Díky tomu se snižuje obsah NO<sub>x</sub> až o 60 %, podíl nespálených uhlovodíků HC a spotřeba paliva. Do opětovného spalovacího procesu se může vrátit 15 až 20 % výfukových plynů. Množství vráceného plynu je omezeno rovnoměrností chodu motoru. Systém recirkulace je v činnosti pouze u motoru zahřátého na provozní teplotu a při jeho částečném zatížení  $\lambda = 1$ . V době zatížení tj. při spalování bohaté směsi nevzniká velké množství sloučenin NO<sub>x</sub>, a proto není nutná činnost recirkulace plynu. Zpětné vedení výfukových plynů je řízeno pomocí EGR ventilu (Exhaust Gas Recirculation) na základě teploty, zatížení a otáček motoru.



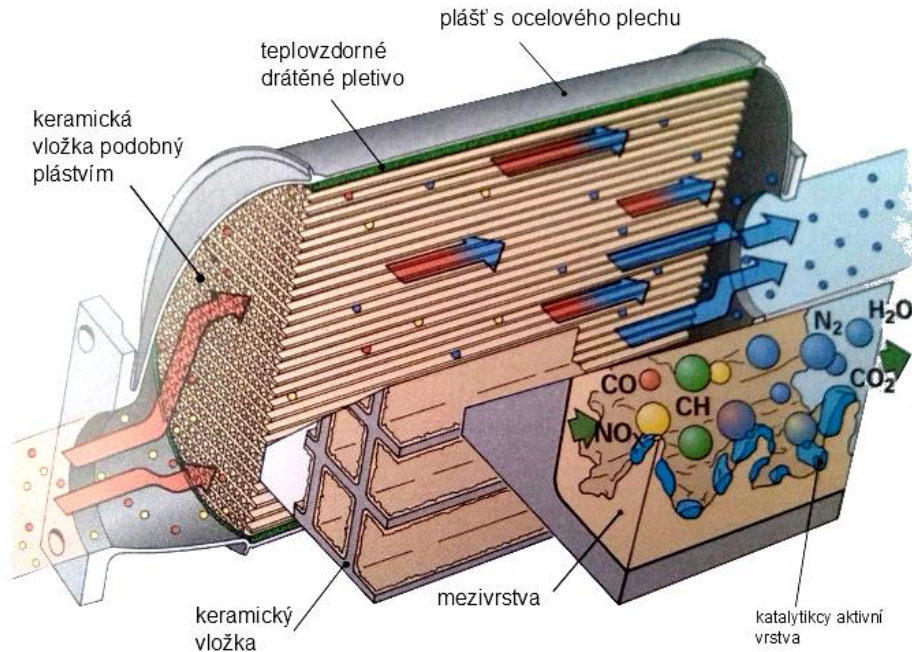
Obrázek 19 Zpětné vedení výfukových plynů (vnější recirkulace) [2]

## Katalytický konvertor

Úkolem katalytických konvertorů je přeměna škodlivých látek ve výfukových plynech na neškodlivé resp. méně škodlivé. Konvertor na svém vnitřním povrchu nese vzácné chemické látky tzv. katalyzátory, které podněcují katalýzu, ale přímo se přeměny nezúčastní, což znamená, že z katalytického konvertoru neubývají. Konvertor se skládá z nerezového plechového pláště, keramické nebo kovové vložky a katalyticky aktivní vrstvy.

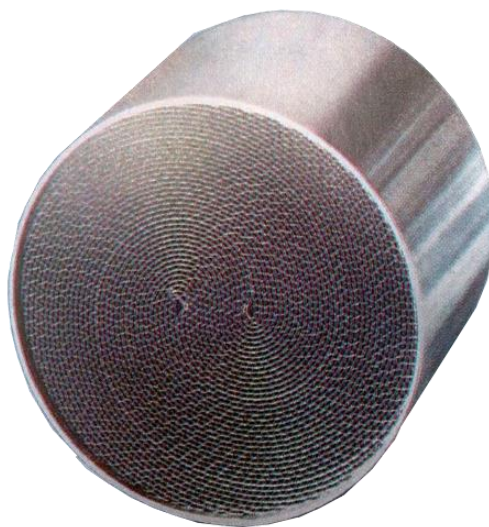
Vložka je tvořena tisíci malými kanály, kterými proudí výfukové plyny. Povrch keramické resp. kovové vložky je velmi porézní, čímž se účinná plocha zvětší 7 000×. Přímo na něj nebo na nosič se nanáší katalyticky aktivní vrstva, nejčastěji platiny, rhodia a paladia.

Keramická vložka je velmi odolná tepelnému namáhání, je však velmi křehká a musí být tedy uložena v pružné kovové vložce. Ta je tedy mezi keramickým nosičem a pláštěm konvertoru. Vložka musí být velmi elastická a zároveň teplotně odolná, proto se vyrábí z vysoce legovaných ocelových drátů průměru cca 0,25 mm. Výhodou keramické vložky oproti kovové je výrobní cena, stálejší provozní teplota a snáze se při recyklaci získává zpět vrstva vzácných kovů.



Obrázek 20 Konstrukce a činnost katalytického konvertoru s keramickou vložkou [2]

Kovové vložky se používají převážně v předřadném katalyzátoru, což má za následek vyšší účinnost katalýzy krátce po startu.



Obrázek 21 Katalytický konvertor s kovovou vložkou [2]

### Třícestný katalytický konvertor

V tomto konvertoru dochází k oxidačně-redukčním procesům, při kterých dochází k výraznému omezení  $\text{NO}_x$ , CO a HC. Pro správnou funkci musí být atmosféra uvnitř konvertoru oxidační i redukční zároveň, což nastává při stechiometrickém poměru směsi.  $\text{NO}_x$  se redukuje na dusík za vzniku  $\text{O}_2$ . Takto vzniklý kyslík se spotřebuje při oxidaci CO na  $\text{CO}_2$  a sloučenin HC na  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$ . Jak již bylo zmíněno, k maximální redukci škodlivin dochází při spalování stechiometrické směsi. Toho je dosaženo permanentním řízením spalování řídicí jednotkou motoru, která dostává signály o zbytkovém kyslíku z lambda sondy. Další důležitou podmínkou správné funkce je ohřátí na provozní teplotu, která je 300 – 800 °C. Je tedy velice důležité umístění konvertoru tak, aby dosáhl co nejrychleji provozní teploty, ale zároveň nedocházelo k jeho přehřívání. Řízené třícestné katalytické konvertory dosahují účinnosti 94–98% oproti starším typům neřízených, které dosahovaly účinnosti okolo 60 %.

Lambda sonda je snímač zbytkového kyslíku ve výfukových plynech. Je umístěna před katalyzátorem. Při zjištění malého přebytku vzduchu (bohatá směs) zkrátí řídicí jednotka dobu vstřiku a naopak při zjištění velkého přebytku vzduchu (chudá směs) dojde k prodloužení vstřiku. Další lambda sonda bývá umístěna za katalyzátorem a slouží ke kontrole jeho činnosti. Zásobníkový nebo také redukční katalytický konvertor je používán u zážehových motorů s přímým vstřikem, které při určitém jízdním režimu spalují tzv. vrstvenou směs. Z důvodu vysokého přebytku vzduchu nedochází v třícestném katalytickém konvertoru k redukci  $\text{NO}_x$ , a proto se za tento konvertor resp. za oxidační konvertor, umísťuje redukční, který je schopný v sobě uložit určité množství oxidů dusíku. V okamžiku kdy snímač  $\text{NO}_x$  umístěný za konvertorem zjistí oxidy dusíku ve výfukových plynech, řídicí jednotka periodicky obohatí na pár sekund směs a dojde tak k redukci uložených  $\text{NO}_x$  v zásobníkovém konvertoru.

#### 4.1.2. Vznětový motor

Vznětové motory pracují vždy s přebytkem vzduchu. Při plném zatížení se může součinitel  $\lambda$  pohybovat okolo 1,3 při volnoběhu, nebo mírné zátěži je  $\lambda \sim 18$ . Běžným provozem nelze dosáhnout dokonalého spalování a vznikají proto tyto škodliviny: oxid uhelnatý (CO), nespálené uhlovodíky (HC), pevné částice (PM) a  $\text{NO}_x$ .

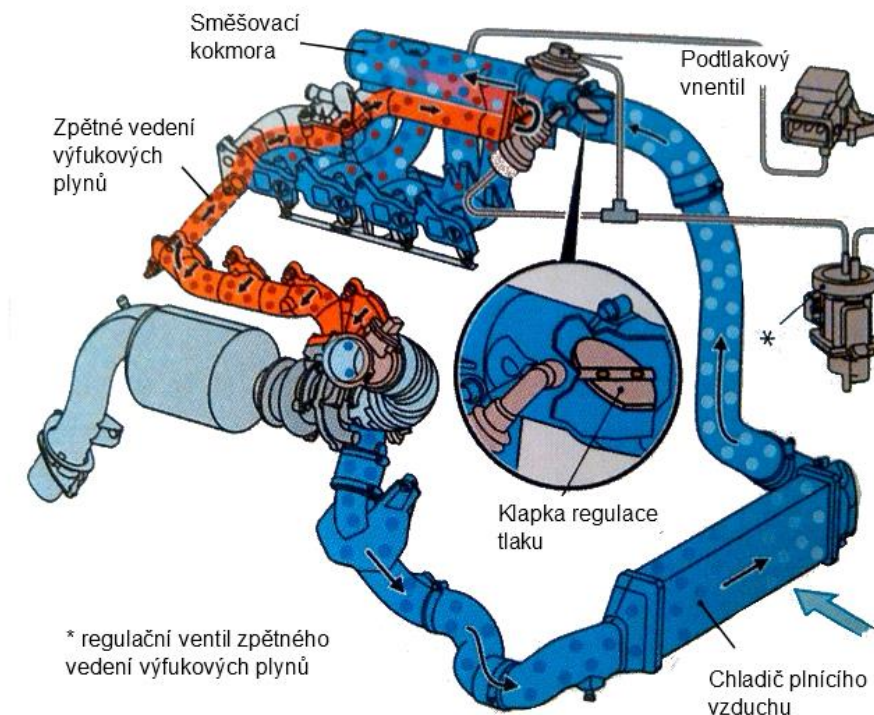
### Oxidační katalytický konvertor

Konstrukce je obdobná jako u třícestného katalytického konvertoru. Platina jako katalyzátor podněcuje katalytické procesy, ale sama se při nich nespotřebovává. Dochází k oxidaci oxidu uhelnatého (CO) na oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ) a nespálené uhlovodíky se mění na  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$ . K přeměně HC dochází v důsledku přebytku vzduchu jen velmi málo. Pro svou činnost musí oxidační konvertor dosáhnout provozní teploty, která je však oproti třícestnému konvertoru výrazně nižší, konkrétně 170 °C, optimální provozní teplota je potom 250-350 °C. Nižší provozní teplota je dána velkým množstvím přebytečného vzduchu ve výfukových plynech.

### Zpětné vedení (recirkulace) výfukových plynů

Recirkulace výfukových plynů u vznětových motorů je obdobná jako u zážehových. Snižuje se tedy obsah  $\text{NO}_x$ , zpět do procesu spalování se může vracet až 40% výfukových plynů. Tato hranice se nesmí přesáhnout, jinak dochází k nedokonalému spalování nafty a výrazně se zvyšuje podíl nespálených uhlovodíků (HC) a pevných částic (PM) ve výfukových plynech.



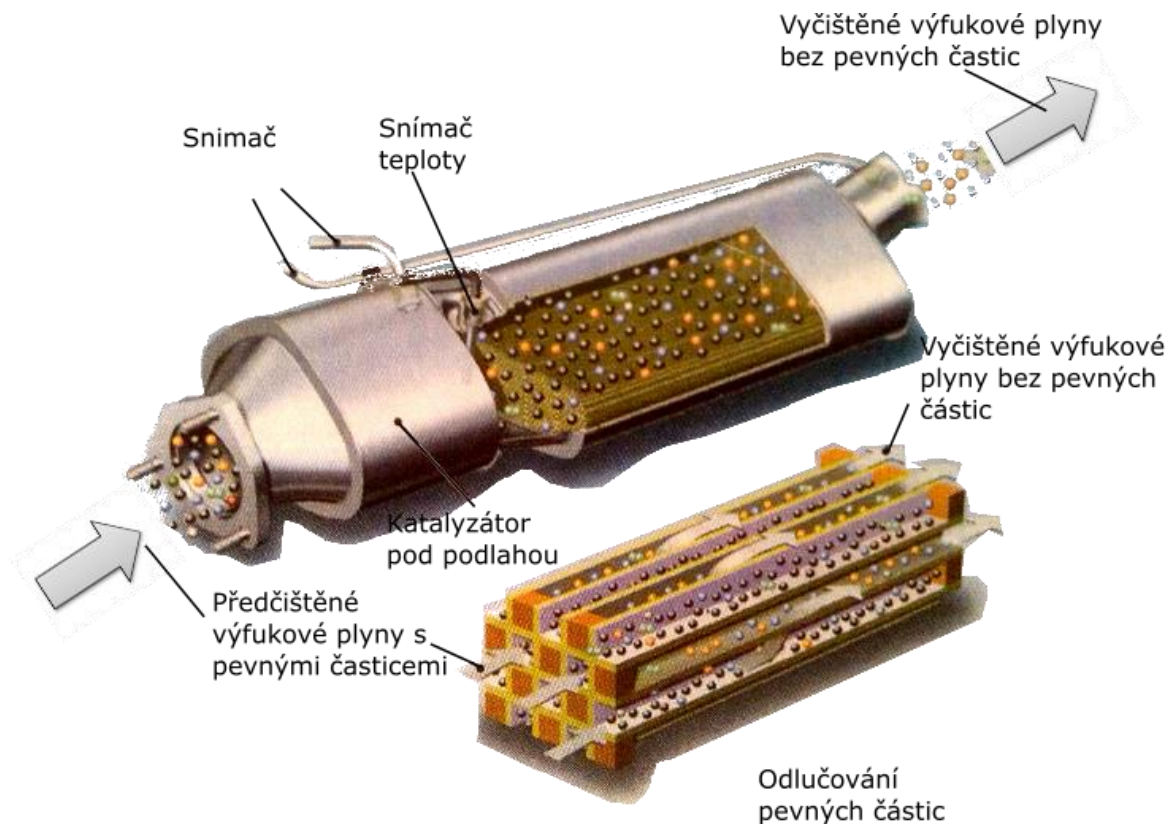


Obrázek 22 Zpětné vedení výfukových plynů s dodatečnou regulační klapkou [2]

### Filtr pevných částic

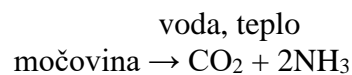
Filtr pevných částic, nebo také DPF tvoří vložka z porézního materiálu, která tvoří střídavě zaslepené kanály. Nejčastěji je vyráběna z keramiky nebo slinutých kovů. V kanálech se zachytávají částice a zvyšuje se tak protitlak výfukovým plynům. Tím dochází ke zvyšování spotřeby a snižování výkonu. V okamžiku, kdy rozdíl tlaků před a za filtrem překročí určitou hodnotu, dojde k regeneraci DPF. Ta může být prováděna dvojím způsobem. Jedním z nich je přidání aditiv do paliva, které snižují teplotu spalování pevných částí až o 100 °C nebo zvýšením teploty výfukových plynů dodatečným vstřikováním paliva a zvýšením požadovaného točivého momentu např. kompresorem klimatizace a alternátorem. Často bývá filtr pevných částí v jednom tělese s oxidačním katalytickým konvertorem.

## Vstřikování močoviny



Obrázek 23 Filtr pevných částic [2]

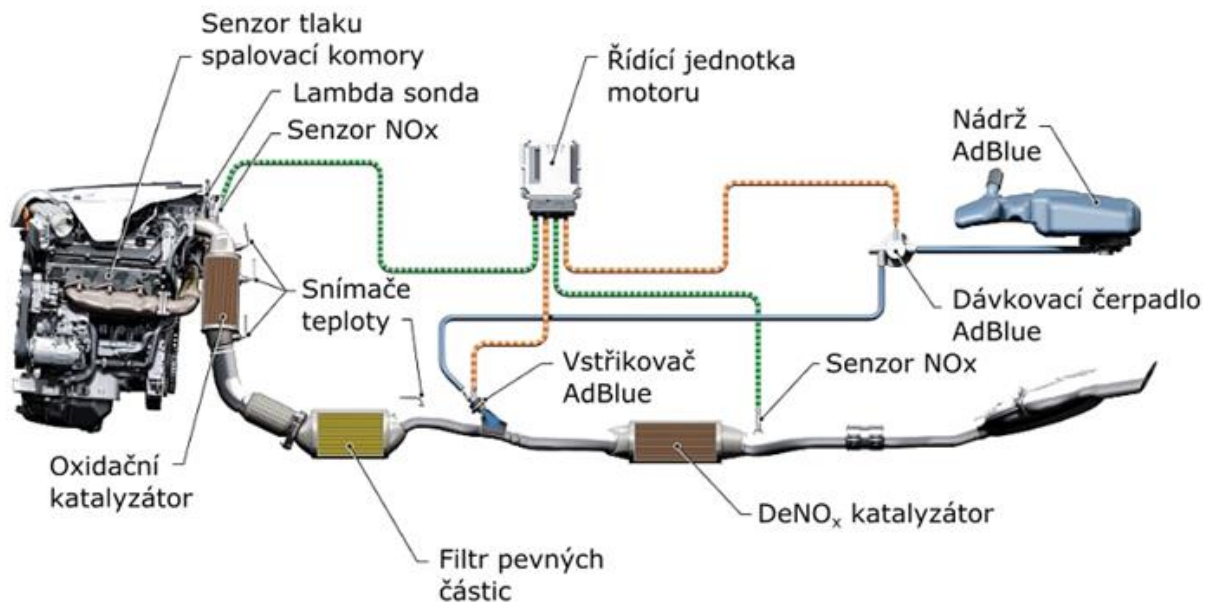
Pro dosažení požadavků na emise výfukových plynů  $\text{NO}_x$  jsou moderní automobily vybavovány systémem vstřikování močoviny tzv. AdBlue. Jedná se o roztok 32,5 % syntetické močoviny a 67,5 % vody. Tato směs je vstřikována před katalyzátor a po vstříknutí se rozkládá na  $\text{CO}_2$  a amoniak.



Ten dále reaguje s  $\text{NO}_x$  obsaženými ve výfukových plynech, za vzniku vodní páry a dusíku.

Celý proces se nazývá selektivní katalytická redukce (SCR)





Obrázek 24 Schéma systému AdBlue [12]

## 4.2. Turbodmychadla

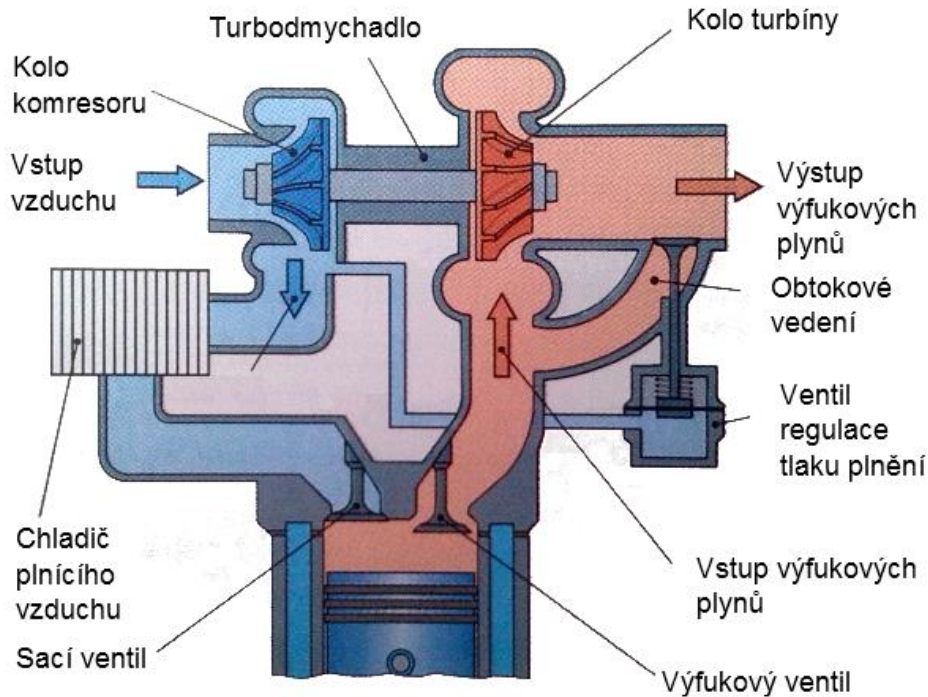
Turbodmychadla zvyšují tlak nasávaného vzduchu (směsi) do jednotlivých válců. K jejich pohonu slouží kinetická energie výfukových plynů, která by byla jinak bez užitku odvedena mimo systém vozidla.

Turbodmychadlo se skládá z turbínového kola, které je roztáčeno výfukovými plyny a dmychadlového kola, stlačující nasávaný vzduch. Obě kola jsou na jedné hřídeli a ta je uložena na jehlových, nebo častěji kluzných ložiscích. Otáčky turbodmychadla se pohybují v rozsahu 50 000 až 400 000 min<sup>-1</sup>. Z tohoto důvodu jsou vysoké požadavky na přesnost a kvalitu povrchu pohyblivých částí dmychadla, jakožto i na kvalitní mazání ložisek.

Od turbodmychadla vyžadujeme, aby začalo pracovat při co nejnižších otáčkách (nejmenším průtoku spalin). To s sebou přináší nutnost regulovat otáčky motoru. Při vysokých otáčkách motoru a velkém průtoku spalin může dojít jak k přetížení dmychadla, tak i motoru a to vysokým plnicím tlakem nebo příliš vysokými otáčkami dmychadla.

Rozeznáváme tři základní typy regulace plnicího tlaku:

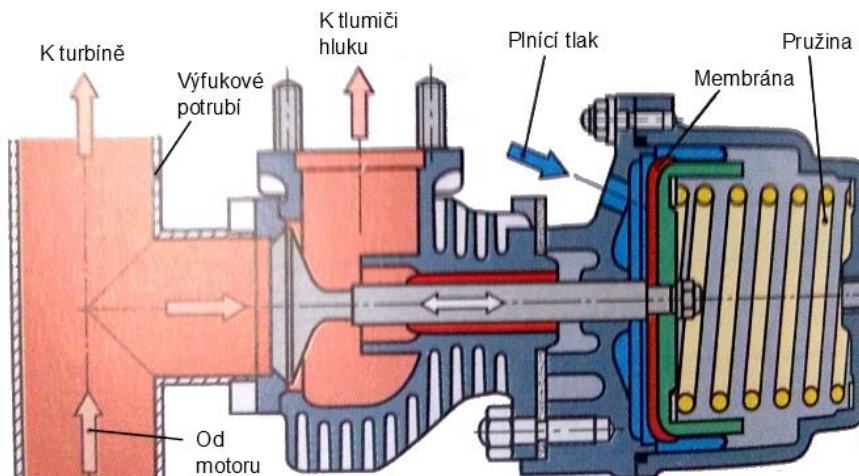
- Mechanicko-pneumatickou regulaci plnicího tlaku
- Elektronickou regulaci plnicího tlaku
- Regulací plnicího tlaku změnou průtočného průřezu, např. proměnlivou geometrií rozváděcího kola turbíny



Obrázek 25 Schéma motoru s turbodmychadlem poháněným výfukovými plyny [2]

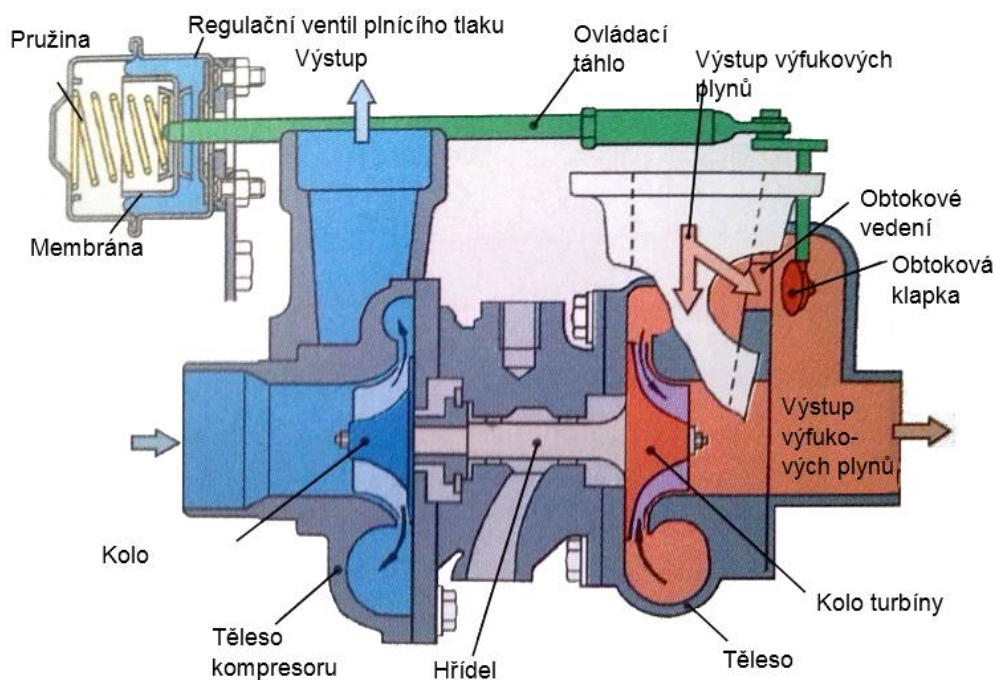
#### 4.2.1. Mechanicko-pneumatická regulace plnicího tlaku

Regulace je realizována pomocí obtokového kanálu (bypass), který v případě potřeby, pouští část výfukových plynů do výfukového potrubí mimo turbínové kolo. Obtok je řízen regulačním ventilem, na jehož membránu působí plnicí tlak a vyvíjí tak sílu proti pružině. Při dosažení tlaku, který vyvodí sílu vyšší, než kterou klade pružina, dojde k otevření obtokového kanálu. Dalším řešením může být otevírání obtokové klapky, která pracuje na podobném principu a je řízena snímačem plnicího tlaku.



Obrázek 26 Řídící ventil plnicího tlaku [2]



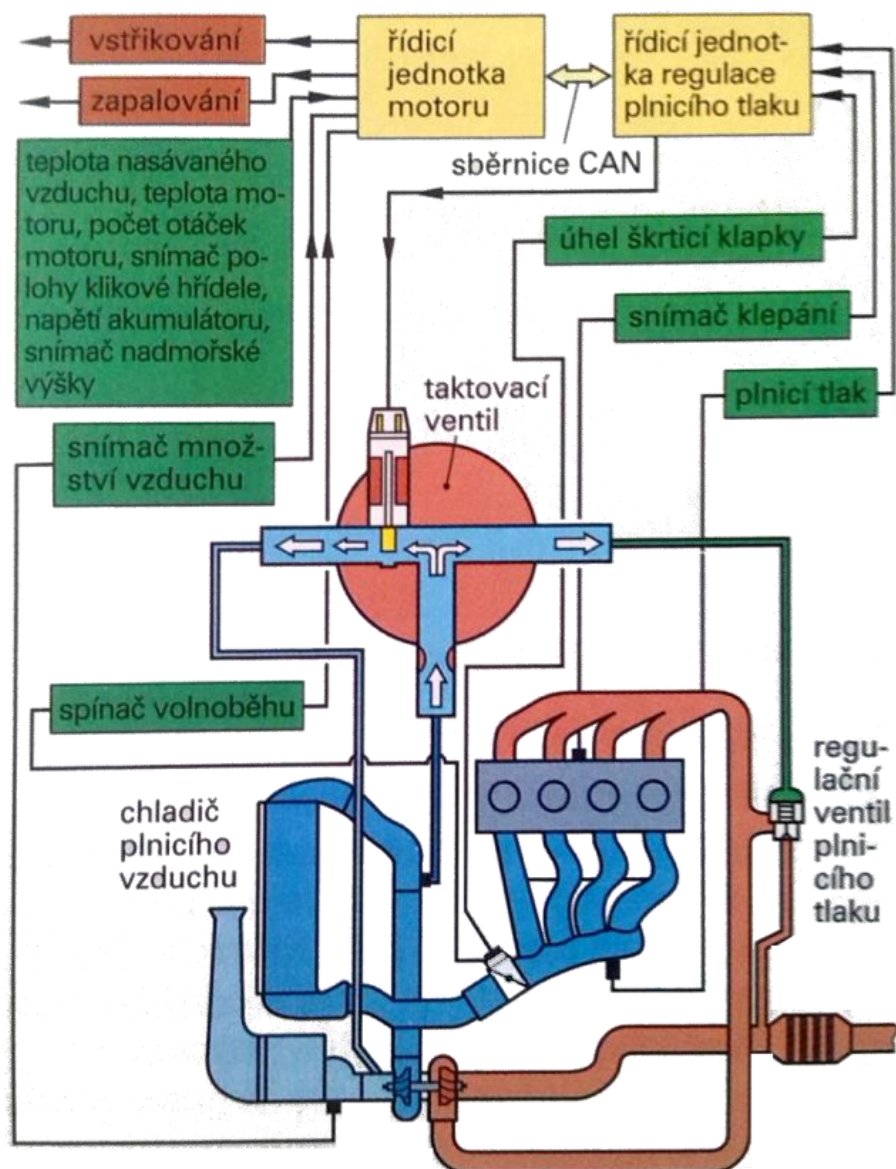


Obrázek 27 Regulace plnicího tlaku obtokovou klapkou [2]

#### 4.2.2. Elektronická regulace plnicího tlaku

Řízení plnicího tlaku má na starosti řídicí jednotka, která vyhodnocuje signály ze snímače klepání a snímače polohy škrticí klapky. Řídicí jednotka do výpočtu plnicího tlaku dále zohledňuje teplotu nasávaného vzduchu, teplotu motoru, otáčky motoru a kolísání tlaku vzduchu, který je měřen snímačem nadmořské výšky v řídicí jednotce motoru.

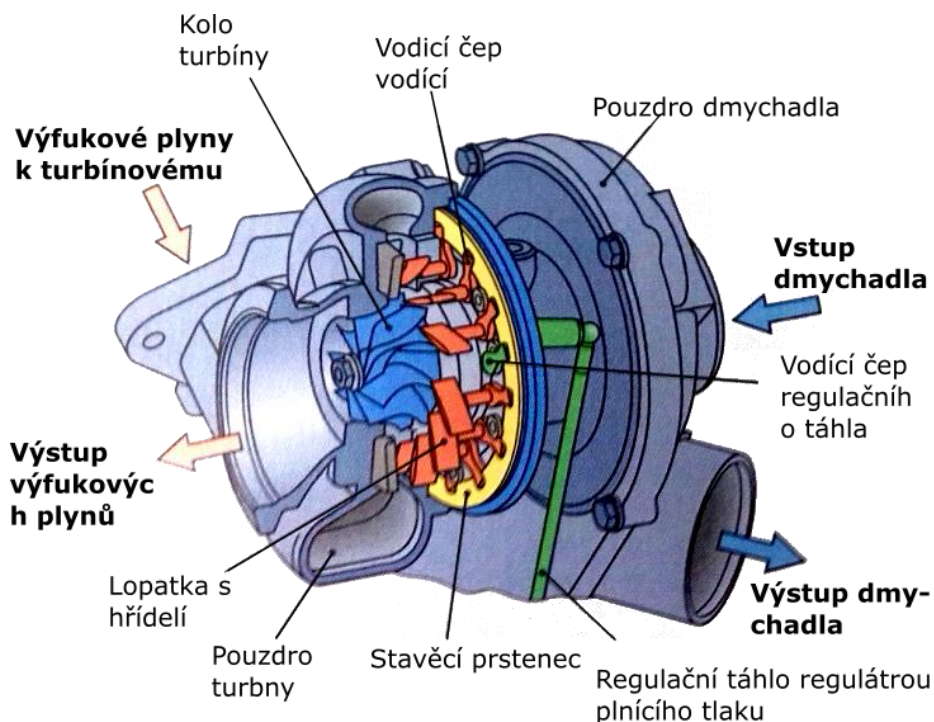
Řídicí jednotka na základě signálu snímače plnicího tlaku a vypočtené hodnoty plnicího tlaku nastaví taktovací ventil. Ten podle situace otevírá a uzavírá spojení mezi výtlakem a sáním dmyhadla. Na regulační ventil poté působí tlak a řídicí ventil pak pouští potřebné množství výfukových plynů k turbínovému kolu. Elektronická regulace má, ve srovnání s mechanicko-pneumatickou regulací, rychlejší a plynulejší reakce na změny otáček a zatížení, plnicí tlak je řízen řídicí jednotkou, což má za následek konstantní výkon a plnicí tlak se může měnit podle potřeby až k mezi klepání.



Obrázek 28 Elektronická regulace plnicího tlaku [2]

### 4.2.3. Regulace plnicího tlaku změnou průřezu turbíny

Regulace turbodmychadel typu VTG bývá obvykle realizována pomocí proměnné geometrie rozváděcí lopatky. K turbínovému kolu je přiváděné veškeré množství výfukových plynů a regulace není závislá na jejich rychlosti. Pro zvýšení plnicího tlaku při nízkých otáčkách motoru se lopatky rozváděcího kola natočí tak, aby se zmenšil průtočný průřez mezi nimi. Aby bylo zachováno průtokové množství, výfukové plyny se urychlí. Tím se kinetický tlak vznikající na lopatkách turbínového kola zvýší.



Obrázek 29 Regulace plnicího tlaku (VTG) [2]

#### 4.3. Další možnosti využití energie výfukových plynů

Od počátku nového tisíciletí se různé instituce pokoušejí o umístění turbogenerátoru do výfukového systému, který by pomáhal, nebo zcela nahradil standardní alternátor. Výfukové plyny mají přibližně 800 °C, rychlost 60 m/s a hmotnostní průtok 0,05 kg/s. Tyto parametry jsou dostačující a turbogenerátor dokáže vyrobit 6 kW elektrické energie za minutu, což pokryje celkovou spotřebu. Umístění turbogenerátoru je zásadní. Příliš daleko na výfukovém potrubí vede k výrazné ztrátě kinetické energie plynů a naopak čím jsme blíže výfukovým svodům, tím bude generátor více tepelně namáhán. Při jízdě po dálnici vyrobí dostatek energie, ukládající se do akumulátorů, ze kterých je posléze čerpána při volnoběžných nebo nízkých otáčkách. Technologie je již zvládnuta, neboť je zde využito spojení klasické konstrukce alternátoru a turbodmychadla. Nicméně nutnost kvalitnějších baterií, chlazení turbogenerátoru vodou, vedlo zatím k tomu, že turbogenerátory nejsou běžnou součástí automobilů.



Obrázek 30 Turbogenerátor [13]

## 5. Zhodnocení výsledků zkoušky cyklickým zatěžováním a vlastní konstrukční návrh

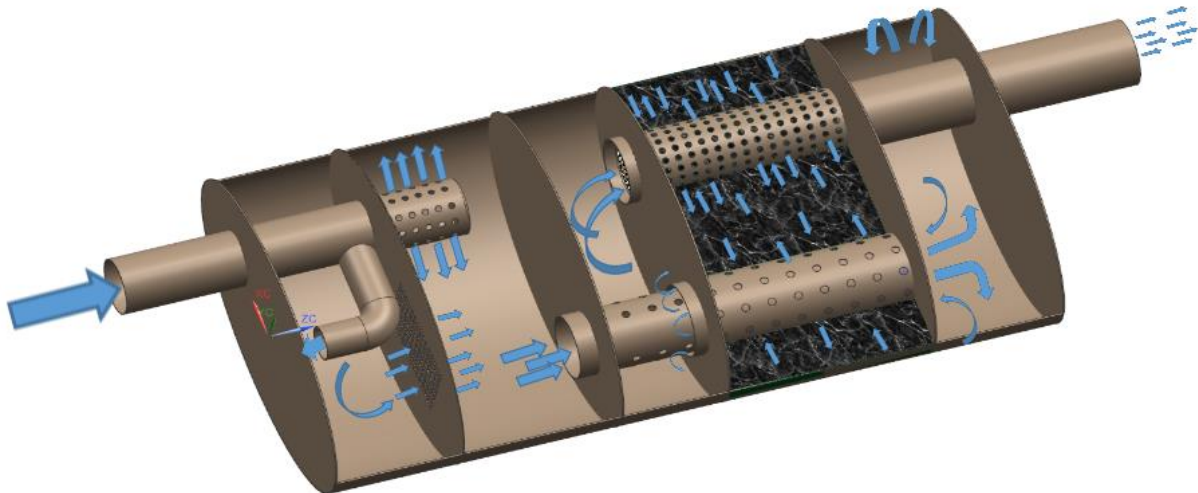
### 5.1 Vlastní konstrukční návrh

Výfukový systém je během provozu vozidla namáhán dynamickým zatížením. Rázy vznikají jízdou po nerovnostech na vozovce stejně tak, jako při každém zařazení rychlostního stupně při vyšších otáčkách motoru, kdy dojde k výraznému výkyvu motoru a tedy i pohybu výfukového systému. Toto namáhání může vést k prasknutí výfukového potrubí.

Únavou materiálu obecně rozumíme degradaci materiálu v důsledku nevratných změn jeho vlastností, které jsou vyvolány mechanickým, tepelným nebo tepelně-mechanickým zatěžováním. Vlivem únavy materiálu dochází ke vzniku makroskopické trhliny s následným lomem. K porušení materiálu dochází při proměnném namáhání a napětí nižším než mez pevnosti.

Jako většina mechanických vlastností, se také únava materiálu určuje laboratorními zkouškami. Obvykle se jedná o cyklické harmonické zatěžování a během zkoušky se zaznamenává počet opakování (cyklů). Každý cyklus má určitou velikost amplitudy, což pro materiál znamená vyvození vnitřního napětí a deformace. S rostoucím napětím, či deformací během jednoho opakování se čas do lomu zkracuje a naopak. Největší napětí, které nevede k lomu materiálu, při teoreticky nekonečném počtu cyklů, je v praxi hranice  $10^6$  opakování a nazývá se mez únavy.



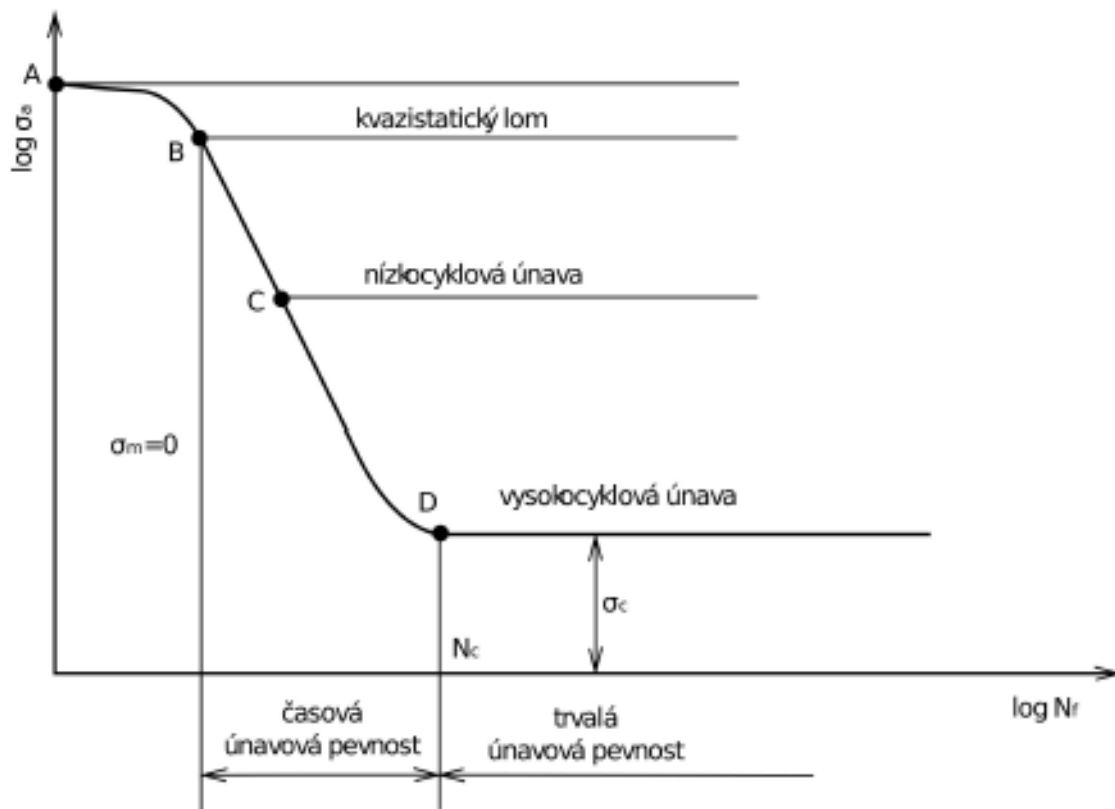


Obrázek 31 Vlastní návrh kombinovaného tlumiče hluku

Na obrázku výše je znázorněna konstrukce kombinovaného tlumiče hluku. Ta je rozdělena do pěti komor, kde se uplatňují jednotlivé principy tlumení hluku. Tlakové vlny se po vstupu do tlumiče rozdělí do dvou částí. V první z nich dojde k otočení směru jejich pohybu a částečnému odrazu o perforovanou přepážku. Dochází k uplatnění interference vln. Oba proudy spalin se setkávají v druhé komoře, kde po průchodu perforací dochází k jejich odrazu, tzv. reflexi. Tlakové vlny jsou z druhé komory odváděny skrz vnitřní částečně perforované potrubí. To končí v nejvzdálenější komoře z pozice spalin. Proud spalin je nucen obrátit svůj směr proudění, čímž dojde k částečné ztrátě jeho energie. Zpět do třetí komory jsou spalinové plyny vedeny vnějším perforovaným potrubím a po vstupu do třetí komory dochází ke stejnému efektu jako v předchozím případě. Na závěr je umístěna absorpční komora, kam mohou plyny volně proudit otvory v potrubí. Tímto způsobem dojde k degeneraci úrovně hluku v širokém pásmu frekvencí.

## 7.1 Hodnocení odolnosti proti únavovému poškození

První pokusy v oblasti únavového poškození materiálu jsou datovány již do 19. století, kdy se problémem začal zabývat německý inženýr August Wöhler. V té době často docházelo k praskání náprav železničních vozů. Při zkouškách zatěžoval ohybem zkušební tělesa za rotace a stanovil počet cyklů do lomu v závislosti na působícím napětí. Dnešní době je toto nejrozšířenější metoda hodnocení únavových vlastností. Vzniklá křivka se nazývá S-N křivka, únavová křivka nebo také Wöhlerova křivka.



Obrázek 32 S-N křivka (Wöhlerova křivka)

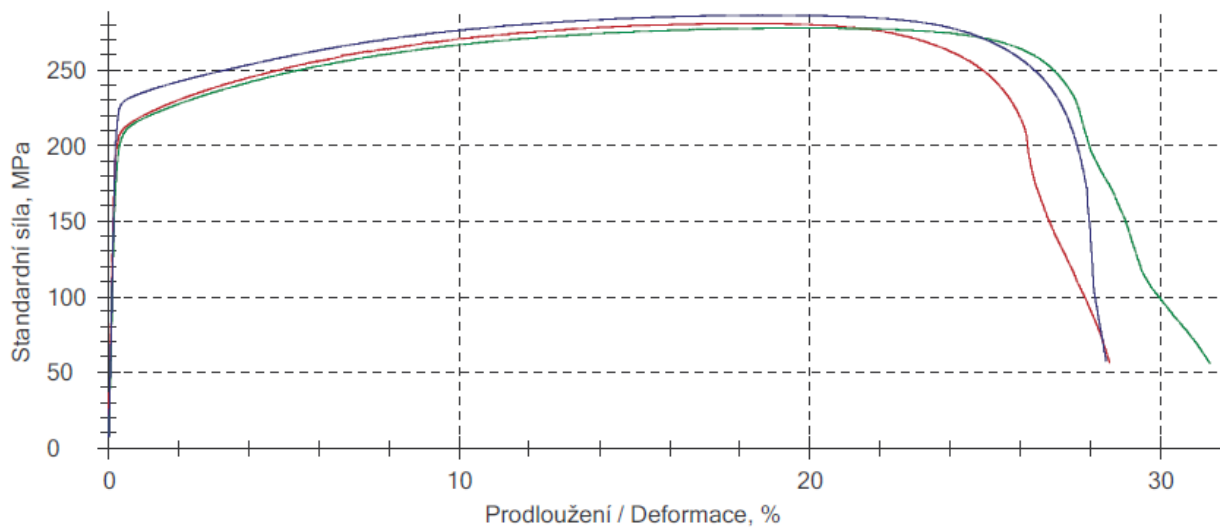
## 7.2 Průběh zkoušky

Jelikož se jednalo o materiál neznámých vlastností, bylo nutné nejprve provést standartní zkoušku pevnosti na univerzálním trhacím stroji. Zkouška byla provedena na elektromechanickém stroji ZWICK/ROELL Z250.

č.	$m_E$ GPa	$R_{p0.2}$ MPa	$R_m$ MPa	$A_g$ %	$A_{5,65}$ %	$A_t$ %	$a_0$ mm	$b_0$ mm	$S_0$ mm <sup>2</sup>	Popis porušení
1	81,2	211	281	17,8	42,8	28,5	1,46	9,85	14,38	LOM V MERENE OBLASTI
2	63,0	210	278	19,7	46,3	31,4	1,53	9,85	15,07	LOM V MERENE OBLASTI
3	103	229	286	18,4	41,8	28,4	1,45	9,87	14,31	LOM V MERENE OBLASTI

Série n = 3	$m_E$ GPa	$R_{p0.2}$ MPa	$R_m$ MPa	$A_g$ %	$A_{5,65}$ %	$A_t$ %	$a_0$ mm	$b_0$ mm	$S_0$ mm <sup>2</sup>
$\bar{x}$	82,3	216	282	18,6	43,7	29,5	1,48	9,857	14,59
s	19,9	10,8	4,24	1,0	2,4	1,7	0,04359	0,01155	0,42
v [%]	24,20	5,00	1,51	5,30	5,39	5,72	2,95	0,12	2,88

Tabulka 4 Výsledky statické zkoušky výfukového potrubí



Obrázek 33 Křivka napětí/deformace původního materiálu výfuku

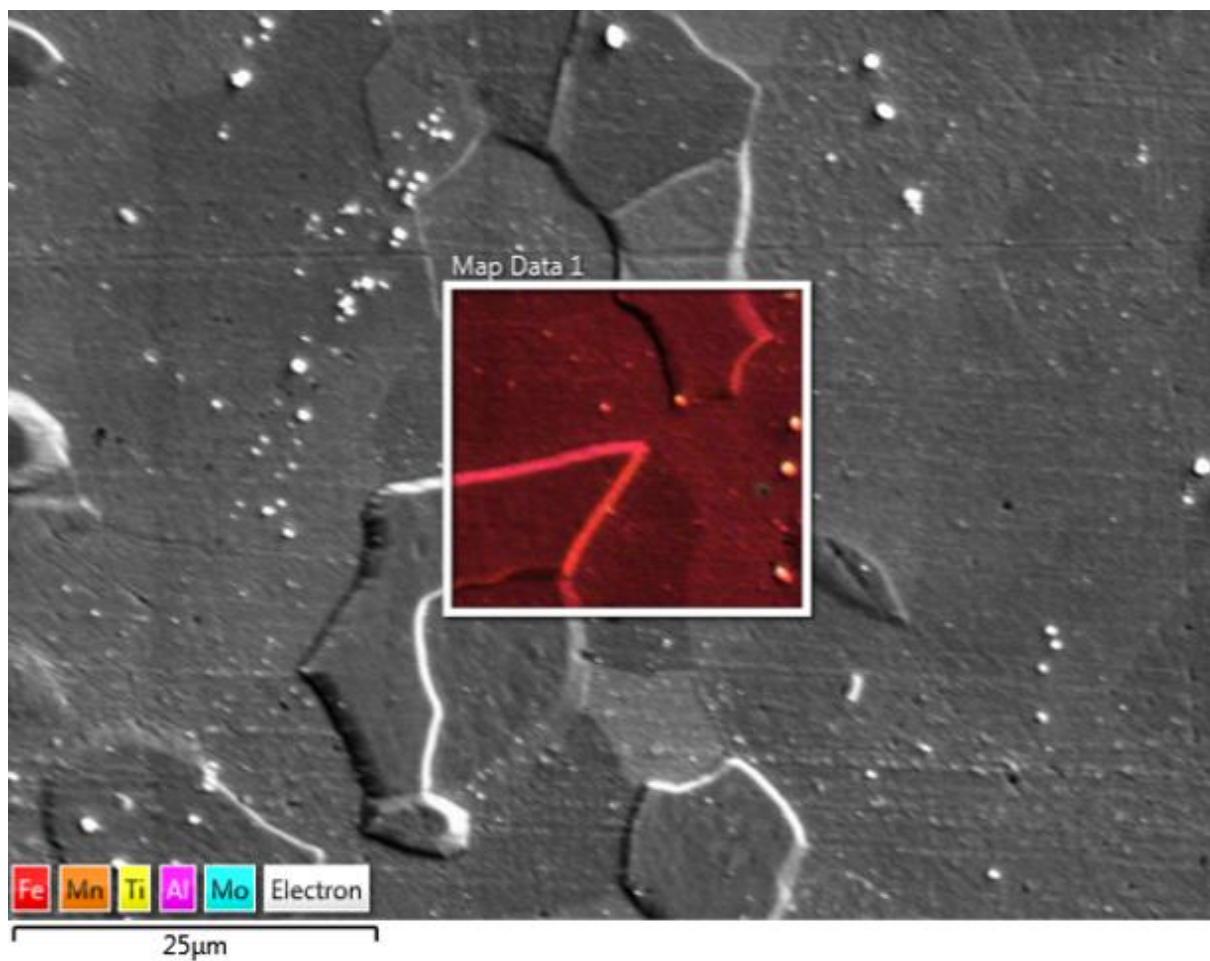
Zkušební vzorky byly odebrány z originálního výfukového vedení vozu Škoda Felicia 1.9D. Pro provedení zkoušky únavy byl použit rezonanční pulsátor ZWICK/ROELL HFP50. Z názvu stroje je patrné, že pracuje na principu rezonance. Stroj se sám naladí na rezonanční frekvenci systému stroje a zkušebního tělesa, která odpovídá  $\sqrt{\frac{k}{m}}$ , kde:

$k$ ..... tuhost systému

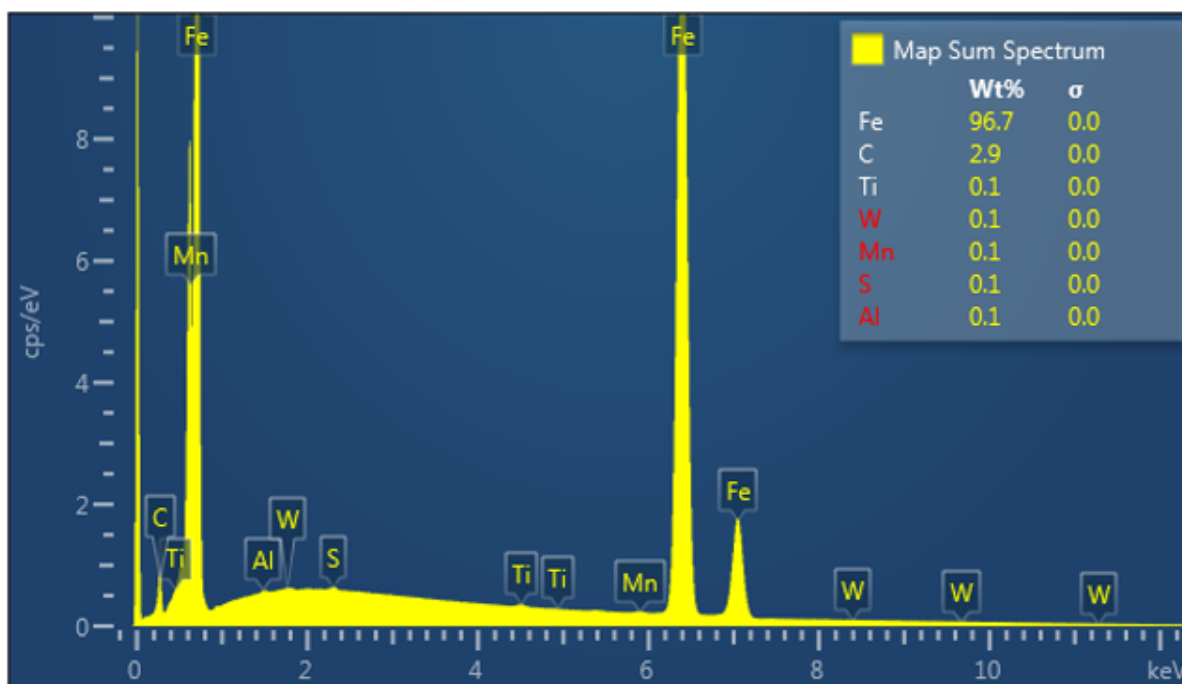
$m$ .... hmotnost systému

Po upnutí prvního vzorku a nastavení zkušebního stroje byla zkouška spuštěna. Zpočátku bylo patrné, že se jako obvykle stroj snaží naladit na rezonanční frekvenci zkušebního systému. Po pár vteřinách však došlo k automatickému ukončení zkoušky, protože se stroji nepodařilo naladit se na rezonanční frekvenci. Proběhlo tedy ještě několik opakování po změnách vstupních parametrů zkoušky, jako je velikost amplitudy, či střední hodnoty napětím, bohužel bez úspěchu. Následovalo tedy pozvání školitele z firmy, která tento zkušební stroj vyrábí. Pokusil se na základě svých zkušeností změnit vstupní data pro zkoušku ale docházelo stále k ukončování zkoušky ze stejného důvodu. Tento konkrétní zkušební stroj nabízí možnost připojení 4 stupňů závaží, které skokově mění rezonanční frekvenci. Byly postupně vyzkoušeny všechny možnosti nastavení stroje, zkoušku však nebylo možné provést. Podle názoru výrobce stroje je důvodem nízká tuhost soustavy způsobená kombinací materiálu výfuku a tvaru zkušebního tělesa. Jejich doporučení bylo, vyrobit válcová zkušební tělesa. To samozřejmě nebylo možné ze samotného výfukového potrubí a bylo tedy nutné zjistit a jaký konkrétní materiál se jedná, aby bylo možné válcové vzorky následně vyrobit.

Vzorek výfuku byl tedy vyleštěn a podroben chemické analýze EBSD na Zeiss MA 25



Obrázek 34 Záběr z elektronového mikroskopu



Obrázek 35 Množství složek materiálu výfuku z elektronového mikroskopu



Tento typ zkoušky neumožňuje přesně určit množství obsahu uhlíku v materiálu, proto byla provedena zkouška tvrdosti materiálu, ze které by bylo možné obsah uhlíku odhadnout. Tvrdost byla určena metodou Vicker HV1 na zkušebním stroji Vicker Wolpert Wilson typ 432 SVD. Bylo provedeno 6 vpichů, přičemž první z nich je považován za zkušební.

Vpich	Jednotka	Tvrdost
1.	HV1	109
2.	HV1	108
3.	HV1	100
4.	HV1	109
5.	HV1	96
6.	HV1	97

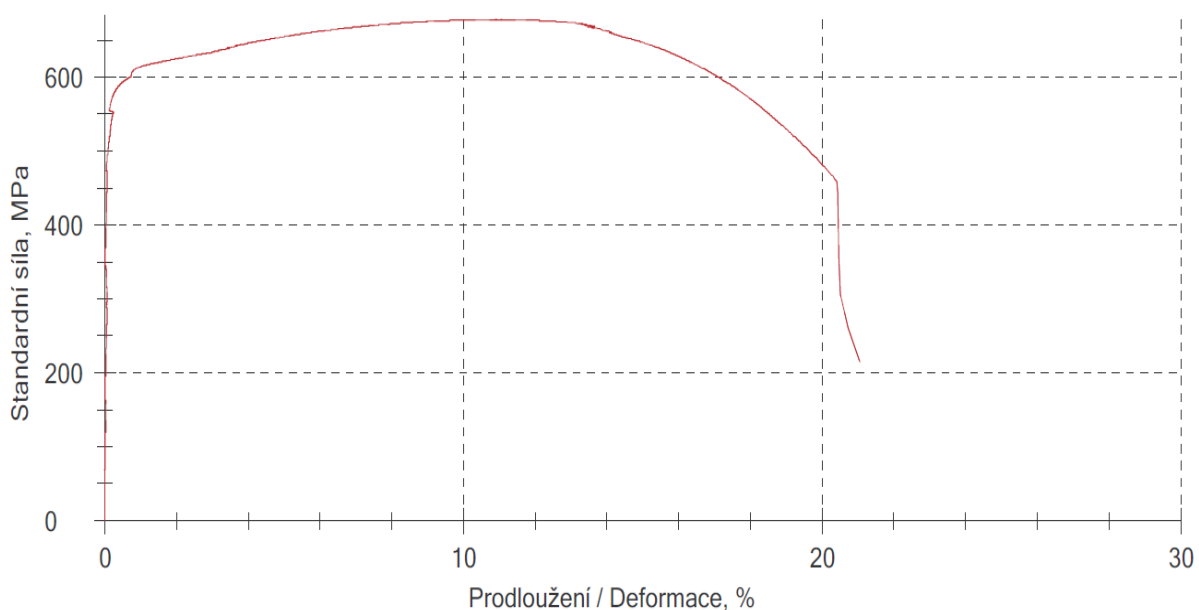
Tabulka 5 Výsledky zkoušky tvrdosti podle Vickerse

Ve stejné době, kdy byla prováděna zkouška chemického složení, byl odeslán dotaz na označení materiálu výfuku výrobcí Škoda auto a.s. Po několika týdnech čekání se mi dostalo odpovědi, že se jedná o materiál 1.4509. Podle materiálového listu tohoto materiálu se jedná o korozivzdornou ocel používanou v potravinářském a mlékárenském průmyslu. Pokud porovnáme chemické složení tohoto materiálu a výsledky chemického rozboru originálního výfuku vozu Felicia 1.9D, můžeme vidět, že jsou naprosto odlišné, takže nebylo nutné ze zkoušky tvrdosti odhadovat obsah uhlíku v materiálu výfuku. Cílem této práce není vynášet závěry nad touto neshodou. Každý čtenář si tedy může udělat vlastní názor.

Pro provedení zkoušky únavy válcových vzorků z materiálu 1.4509, bylo nutné znovu provést statickou zkoušku pevnosti.

č.	$m_E$ GPa	$R_{p0.2}$ MPa	$R_m$ MPa	$A_g$ %	$A_{5,65}$ %	$A_t$ %	$d_0$ mm	$S_0$ mm <sup>2</sup>	Popis porušení
1	237	590	677	10,8	21,0	21,1	9,98	78,23	LOM V MERENE OBLASTI

Tabulka 6 Výsledky statické zkoušky pevnosti pro 1.4509



Obrázek 36 Grafický záznam statické zkoušky pevnosti pro 1.4509

Nyní bylo již možné provést samotnou zkoušku únavy. Během její realizace bylo provedeno celkem 12

platných měření. Nejprve byla hledána trvalá únavová pevnost, a proto byla nastavována nižší napětí, při kterých nedošlo k přetržení zkušebního tělesa. V následujících pokusech ležela napětí v oblasti časové únavové pevnosti. Mez trvalé pevnosti byla stanovena a potvrzena třemi měřeními při napětí  $\sigma_c = 193 \pm 158$ . Zbývající měření popisovala oblast časové únavové pevnosti.

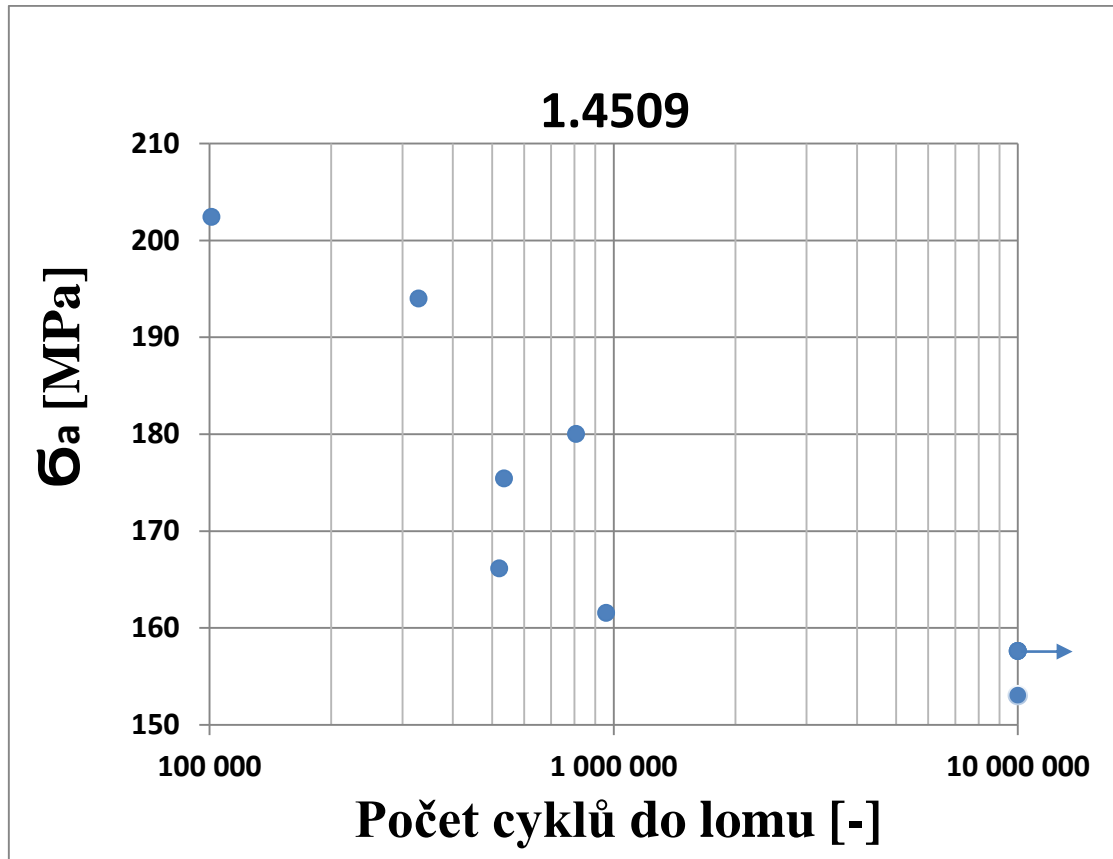
Č.	Normalizovaný zápis zatížení
1	$\sigma = 151 \pm 124$
2	$\sigma = 175 \pm 143$
3	$\sigma = 203 \pm 166$
4	$\sigma = 197 \pm 162$
5	$\sigma = 187 \pm 153$
6	$\sigma_c = 193 \pm 158$
7	$\sigma_c = 193 \pm 158$
8	$\sigma_c = 193 \pm 158$
9	$\sigma = 215 \pm 175$
10	$\sigma = 220 \pm 180$
11	$\sigma = 248 \pm 202$

Tabulka 7 Normalizovaný zápis zatížení při únavové zkoušce

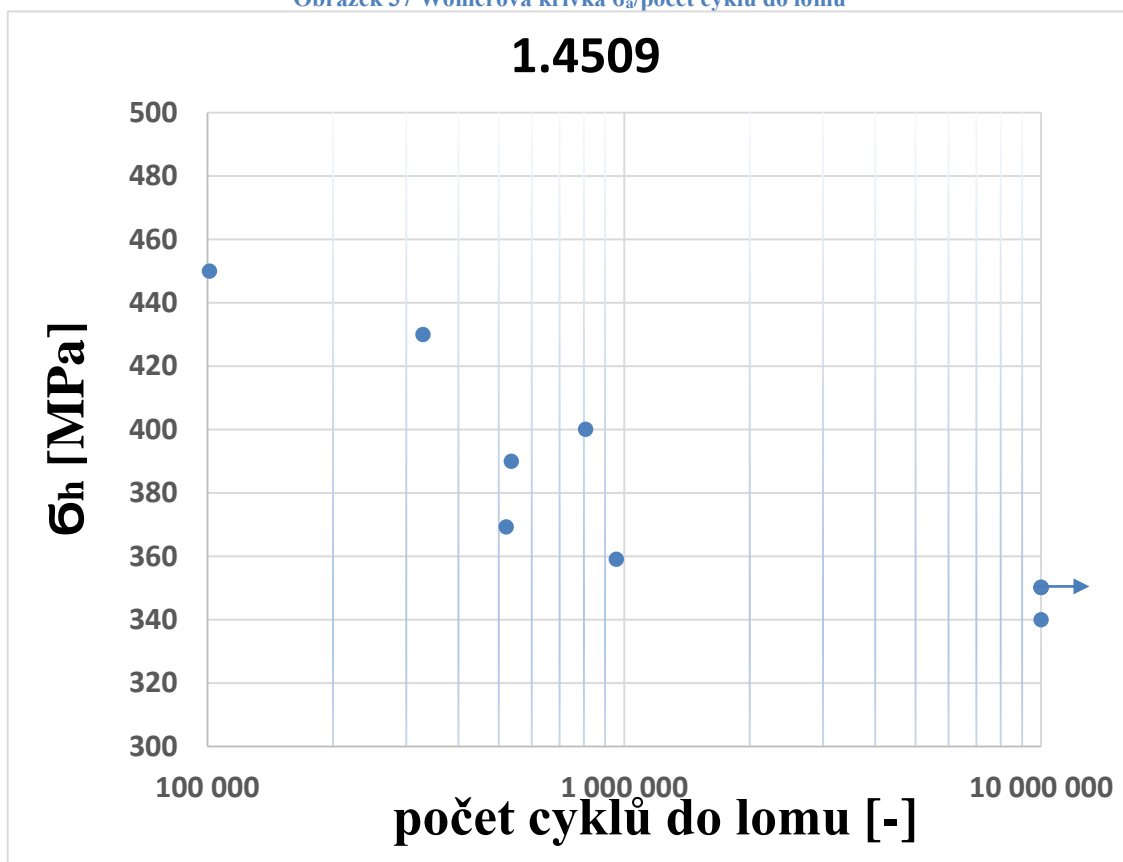
Č.	Napětí [Mpa]	Síla [N]	S [mm <sup>2</sup> ]	d [mm]	Počet cyklů do lomu [-]	Síla stat. [N]	Napětí stat. [MPa]	Síla dyn [N]	Napětí dyn. [Mpa]
1	275	21 600	78,54	10,00	10 <sup>7</sup>	11 880	151	9 720	124
2	318	25 000	78,54	10,00	10 <sup>7</sup>	13 750	175	11 250	143
3	369	29 000	78,54	10,00	520 808	15 950	203	13 050	166
4	359	28 200	78,54	10,00	956 750	15 510	197	12 690	162
5	340	26 700	78,54	10,00	10 <sup>7</sup>	14 690	187	12 020	153
6	350	27 500	78,54	10,00	10 <sup>7</sup>	15 130	193	12 380	158
7	350	27 500	78,54	10,00	10 <sup>7</sup>	15 130	193	12 380	158
8	350	27 500	78,54	10,00	10 <sup>7</sup>	15 130	193	12 380	158
9	390	30 630	78,54	10,00	535 490	16 850	215	13 780	175
10	400	31 420	78,54	10,00	807 197	17 280	220	14 140	180
11	430	33 772	78,54	10,00	328 653	18 575	237	15 197	194
12	450	35 340	78,54	10,00	101 091	19 440	248	15 900	202

Tabulka 8 Vstupní a výstupní hodnoty únavové zkoušky

Měření bylo prováděno při teplotě 20 °C. Zkouška probíhala při asymetrii cyklu R=0,1. Zkušební režim byl tedy pulzující v tahu.



Obrázek 37 Wöhlerova křivka  $\sigma_a$ /počet cyklů do lomu



Obrázek 38 Wöhlerova křivka  $\sigma_h$ /počet cyklů do lomu

V prvním grafu jsou vyneseny amplitudy napětí. Druhý graf popisuje průběh pevnosti prostřednictvím maximálních hodnot napětí. Výfukový systém není zatěžovaný jedním druhem cyklického namáhání. Přesto je při jeho konstrukci nutno brát v potaz únavovou charakteristiku pevnosti materiálu.

## 8. Seznam použité literatury

### 8.1 Knižní publikace

- [1] VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. 1. vyd. Brno: František Vlk, 2003. ISBN 80-238-8756-4.
- [2] GSCHEIDLE, Rolf. *Příručka pro automechanika*. 3., přeprac. vyd. Překlad Iva Michňová, Zdeněk Michňa, Jiří Handlíř. Praha: Europa-Sobotáles, 2007. ISBN 978-80-86706-17-7.
- [3] HROMÁDKO, Jan. *Spalovací motory: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. 1. vyd. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-80-247-3475-0.
- [4] JAN, Zdeněk a Bronislav ŽDÁNSKÝ. *Automobily*. 6. vyd. Brno: AVID, 2010. ISBN 978-80-87143-15-5.
- [5] STANĚK, Jiří a Jiří NĚMEJC. *Metodika zpracování a úprava diplomových (bakalářských) prací*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. ISBN 80-7043-363-9.
- [6] MICHALÍK, Petr, Zdeněk ROUB a Václav VRBÍK. *Zpracování diplomové a bakalářské práce na počítači*. 3. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2009. ISBN 978-80-7043-828-2.

### 8.2 Publikace na internetu

- [7] Směrnice EHS/ES. *Lokalizace vozidel* [online]. PRAHA3 [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://www.lokalizacevozidel.estranky.cz/clanky/smernice-ehs-es-.html>
- [8] Schéma výfukového systému automobilu. *Mjauto* [online]. Brno [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://www.mjauto.cz/vyfuky.htm>
- [9] Sportovní výfukové svody. *Autodily-Krbec* [online]. [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://www.autodily-krbec.cz>
- [10] Litinové svody. *Autodily-Krbec* [online]. [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: [http://tuning-individual.cz/eshop/images/JP-EM-HCIVD-T\\_1.jpg](http://tuning-individual.cz/eshop/images/JP-EM-HCIVD-T_1.jpg)
- [11] Jak ztišit výfuk na MZ 150. *Motorkáři* [online]. Brno [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://www.motorkari.cz/tema/?t=63110>
- [12] AdBlue. *Autolexicon* [online]. [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://www.autolexicon.net/cs/articles/adblue/>
- [13] Turbo Generator. *Design World* [online]. [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://www.designworldonline.com/thingap-automotive-introduces-the-turbo-generator/>
- [14] Tepelná bilance. *Ústav automobilního a dopravního inženýrství* [online]. Technická 2896/2 616 69 Brno [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://www.iae.fme.vutbr.cz/>

### **8.3 Ostatní zdroje**

[15] Prezentace firmy Bosh na téma DNO<sub>x</sub>.