

ODBORNÉ VZDĚLÁVÁNÍ ÚŘEDNÍKŮ
PRO VÝKON STÁTNÍ SPRÁVY
OCHRANY OVZDUŠÍ V ČESKÉ REPUBLICE



OPERAČNÍ PROGRAM
LIDSKÉ ZDROJE
A ZAMĚSTNANOST

Spalování paliv – Spalovací motory

Ing. Jan Andreovský Ph.D.



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



OPERAČNÍ PROGRAM
LIDSKÉ ZDROJE
A ZAMĚSTNANOST

PODPORUJEME
VAŠI BUDOUCNOST
www.esfcr.cz

Spalovací motory – Základní informace

- **Základní dělení**

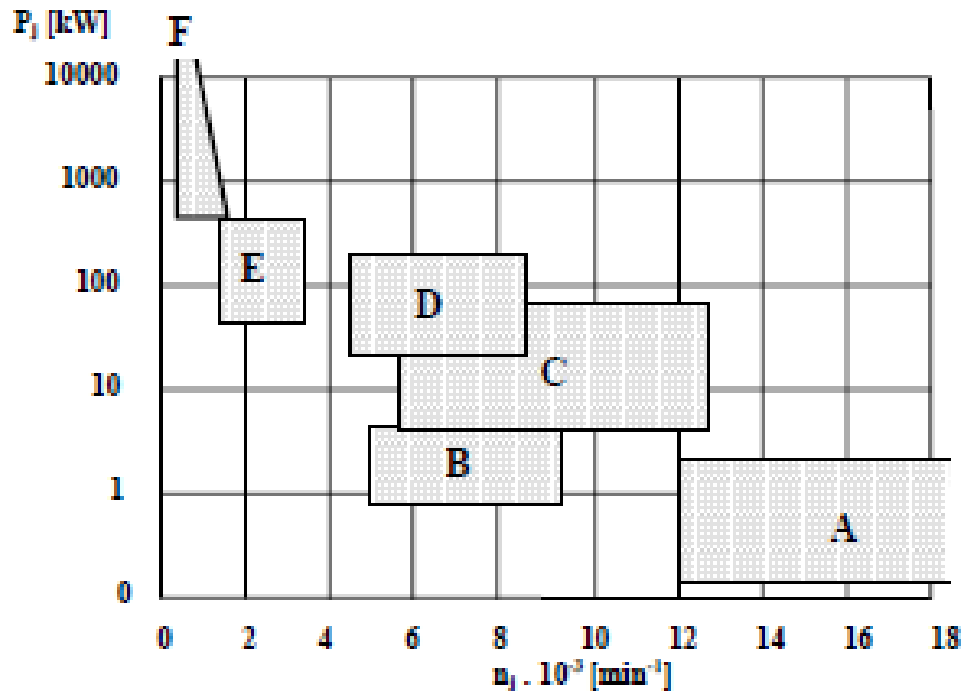
- **Motor pístový** – s vratným nebo rotačním pohybem pístu. Využití potenciální energie spalin.
 - S vratným pohybem
 - S rotačním pístem – především Wankel
- **Motor lopatkový** – spalovací turbína. Využití kinetické energie spalin. Více informací v dále.

- **Další dělení pístových motorů**

- Dle paliva – plyn, kapalina, více palivové
- Podle tvorby směsi se vzduchem - mimo vnitřní prostor válce (plyny, snadno odpařitelné kapaliny tzn. karburátor, vstřiky do sání. Nebo ve spalovacím prostoru válce (obtížně odpařitelné tj. nafta, mazut před koncem komprese, lehce odpařitelné v průběhu sacího zdvihu.
- Způsob výměny válce – tj. karburátor, vstřikování (válec, sací potrubí, směšovač)
- Podle dopravy náplně do válce – přirozené sání, vyplachování (dmychadlo), přeplňované (dmychadlo, turbodmychadlo atd.)
- Způsob zapálení směsi – tj. zážehový (zážeh je z vnějšího zdroje – jiskra) a vznětový (vznícení vznikne vysokou kompresí a vstřikem do válce)
- Podle konstrukce – tj. přenos momentu, řazení a počtu válců, kompresní poměry, objemu válců, výkonu, rychloběžnosti, činných ploch, podle rozvodů, zdvihu atd.
- Podle počtu taktů – pracovních operací (2T/4T)
- Podle polohy – mobilní/ stacionární

Spalovací motory – Základní informace

- Obvyklé parametry a využití



A – malé modelářské motory

B – motory malých motocyklů, malé zemědělské stroje a stavební mechanizace

C – motory cestovních a sportovních motocyklů

D – motory osobních automobilů

E – motory nákladních automobilů, autobusů, traktorů, stacionární průmyslové, drážní a malé lodní

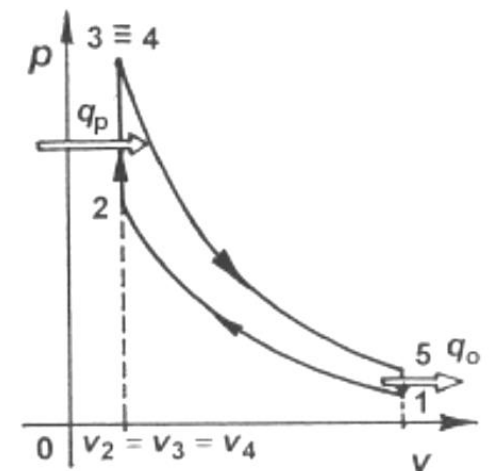
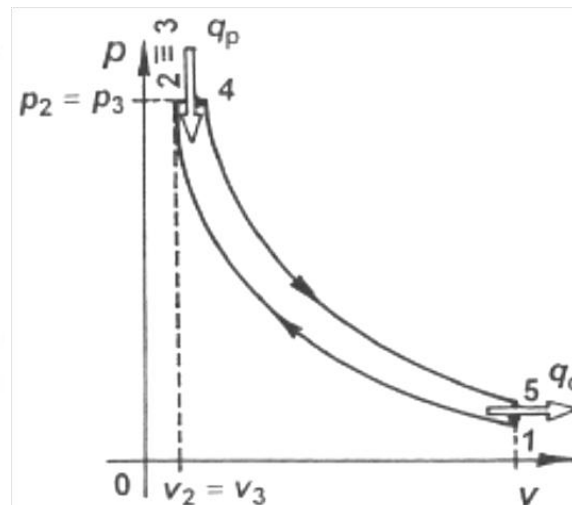
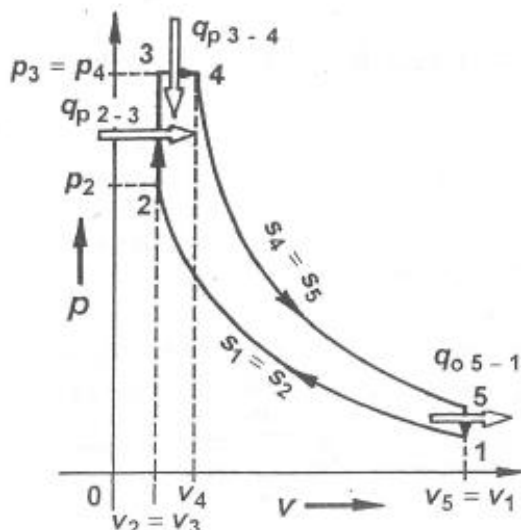
F – velké lodní a drážní motory

Spalovací motory – Spalovací motor z hlediska tepelného cyklu

- Základní termodynamické pochody a definice oběhu
- Seiligerův okruh – výchozí teoretický

Vznětový

Zážehový



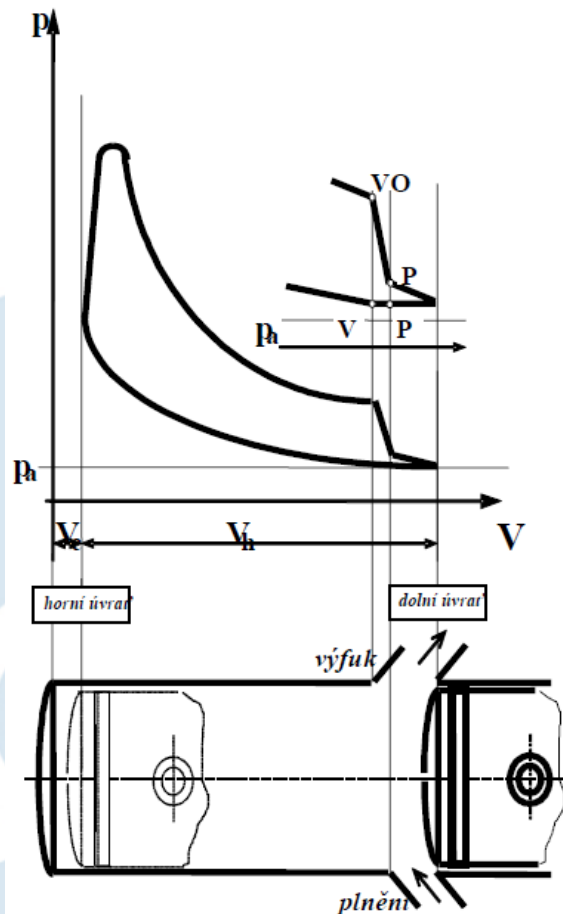
- 1 – 2 adiab komprese
- 2 – 3 izochorický přívod tepla
- 3 – 4 izobarický přívod tepla
- 4 – 5 – adiabatická expanze
- 5 – 1 – izochorický odvod tepla

- 1 – 2 adiab komprese
- 2/3 – 4 izobarický přívod tepla (vstřík paliva)
- 4 – 5 – adiabatická expanze
- 5 – 1 – izochorický odvod tepla

- 1 – 2 adiab komprese
- 2 – 3/4 izobarický přívod tepla (jiskra - zážeh)
- 4 – 5 – adiabatická expanze
- 5 – 1 – izochorický odvod tepla

Spalovací motory – Spalovací motor z hlediska tepelného cyklu

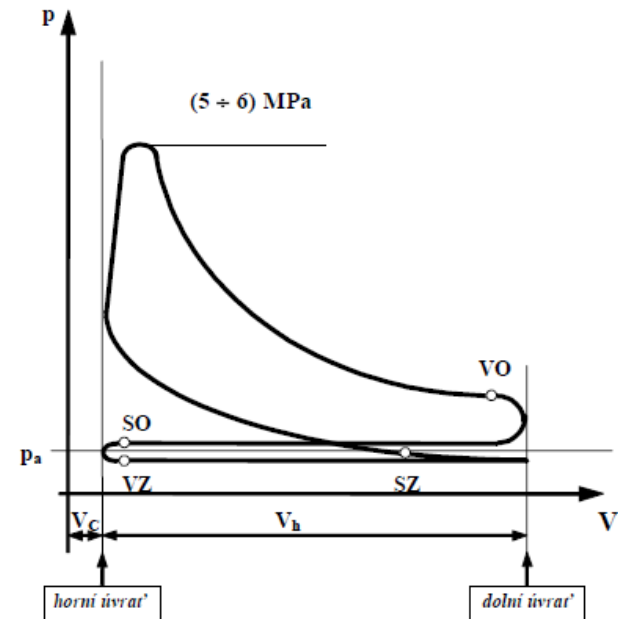
- Základní termodynamické pochody a definice oběhu
- Indikátorový diagram – zážehový (2T a 4T)



4T – pracovní cyklus na dvě otáčky – tj.

1. otevřen sací ventil saje
2. zavřen sací ventil komprese,
3. expanze,
4. otevření výfukového ventilu výfuk

2T – na jednu otáčku celý pracovní cyklus – tj. píst jde nahoru saje a stlačuje a jde dolů expanze a výfuk



Spalovací motory – Spalovací motor z hlediska tepelného cyklu

- **Hodnocení účinnosti**

- Účinnost motoru závisí zejména na:

- Kompresním poměru $\varepsilon = v_1/v_2$
- Tlakovém poměru $\sigma = p_3/p_2$
- Poměru plnění $\varphi = v_4/v_3$
- Termická účinnost je dána

$$\eta_t = \frac{q_p - q_o}{q_p}$$

a úpravou pro vznětový motor

$$\eta_t = 1 - \frac{\varphi^\chi \sigma - 1}{\varepsilon^{\chi-1} [(\sigma - 1) + \chi \sigma (\varphi - 1)]}$$

a úpravou pro zážehový motor

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\chi-1}}$$

- Pro určení využití tepelné energie přivedené do válce motoru slouží indikátorový diagram a určuje se tzv. indikovaná účinnost tedy poměr indikované energie (práce) k tepelné energii přivedené v palivu.
- Celková účinnost se určuje z indikátorového diagramu nebo přesněji měřením na dynamometru

Spalovací motory – Spalovací motor z hlediska tepelného cyklu

- **Hodnocení účinnosti**

- Rámcová bilance účinnosti motoru (bilance tepla) – zážehový motor

Teplo přeměněné na výkon	32%
Teplo odvedené chlazením	28%
Teplo odvedené výfukovými plyny a zářením	40 %

- Rámcová bilance účinnosti motoru (bilance tepla) – vznětový motor

Teplo přeměněné na výkon	45%
Teplo odvedené chlazením	23%
Teplo vyvolané třením pístů	2%
Teplo odvedené výfukovými plyny a zářením	30 %

- Statika spalovací reakce se řídí stejnými rovnicemi jako v případě spalování v oddíle kotle. Nárok kyslíku je obecně určen

$$M_o = \frac{8}{3}C + 8H - O_p \text{ [kg/kg } O_2 \text{]}$$

Spalovací motory – Palivová základna

- **Nejčastější druhy paliv a jejich získávání**

- Kapalná uhlovodíková paliva (automobilový benzín, motorová nafta, petrolej). Získávají se frakční destilací ropy a platí žes rostoucí velikostí molekul jednotlivých uhlovodíků roste i bod jejich varu. Odpařením a následnou destilací se získají jednotlivé druhy. Při nižších teplotách je získán propan-butan, při vyšších oleje, mazut a asfalty. Pro zvýšení podílu zisku ropy a benzínu se používají složitější postupy. Kapalná paliva lze také získat z olejnatých břidlic nebo z uhlí metodou zkapalňování.
- Plynná uhlovodíková paliva (propan butan - LPG, zemní plyn). Propan – Butan se získá viz výše, zemní plyn se získává přímou těžbou.

- **Rozvojové aktivity z hlediska paliv**

- Rozvojové aktivity z hlediska paliv jsou směřovány především do náhrad nebo částečných náhrad produktů z biomasy. Jedná se např. o rostlinné oleje (řepka, sója, slunečnice, podzemnice, len), které je nutné dále upravovat esterifikací, dále alkoholy (metylalkohol, ethylalkohol), bioplyn. Využití paliv rostlinného, živočišného původu je v současnosti cíleno do tvorby směsí a nahrazení části uhlovodíkatých paliv palivem z biomasy tzv. směsné bionafty.
- Další rozvojové aktivity jsou směřovány do využití vodíku. Vodík může sloužit i jako akumulátor energie, ale širšímu rozvoji brání technicko – ekonomické aspekty (skladování, drahá výroba). Emise spalování vodíku jsou zatíženy pouze NOx.

Spalovací motory – Palivová základna

- **Požadavky na kvalitu paliv**

- **Benzín** – dobrá odpařivost,

- neobsahovat těžké frakční složky – smývá olej. film,
 - malý obsah síry – koroze palivového systému, pokles oktanového čísla, zvýšený obsah škodlivin ve výfukových plynech
 - neobsahovat pryskyřice – zanášení
 - stabilita při skladování
 - dále se určuje tzv. 10% bod, který je důležitý pro startování a je závislý na provozním období
 - pracovní část benzínu je definována tzv. 50% bodem (destilace), který určuje akceleraci (ochotu jít do otáček) a životnost motoru (smývá olej. film).
 - antidetonační vlastnosti benzínu (tedy odolnost proti detonačnímu hoření před zážehem) jsou určeny tzv. oktanovým číslem. Dříve přidávány olovnaté složky, dnes organické sloučeniny.

- **Motorová nafta** – její složení je definováno klimatickým pásmem a ročním obdobím

- určuje se stupeň vznětlivosti – což je doba od vstříku ke vznícení tzv. průtah vznícení a je vyjádřena cetanovým číslem.
 - obsah sirnatých složek

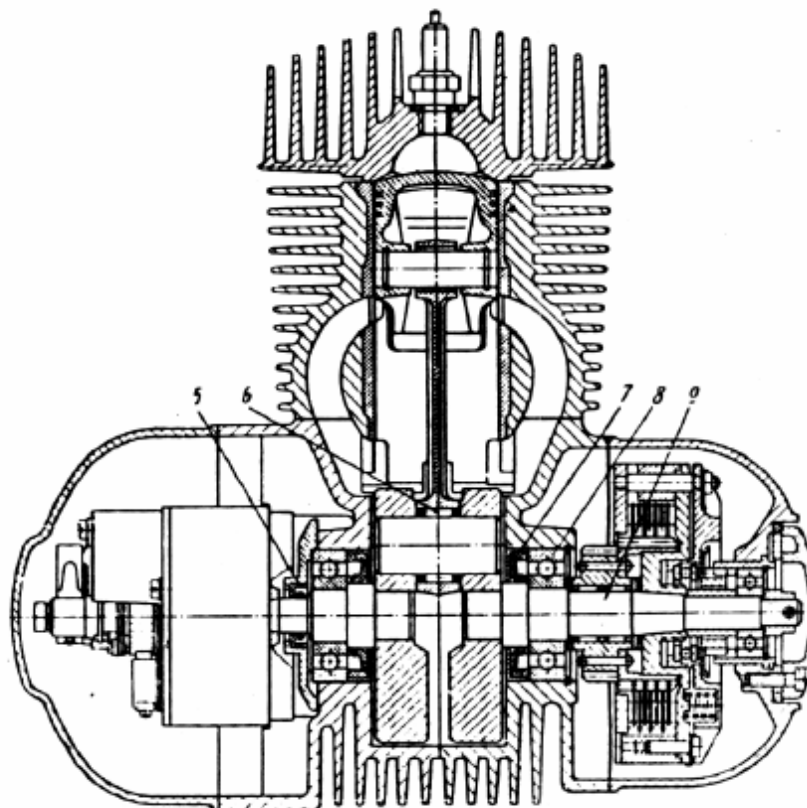
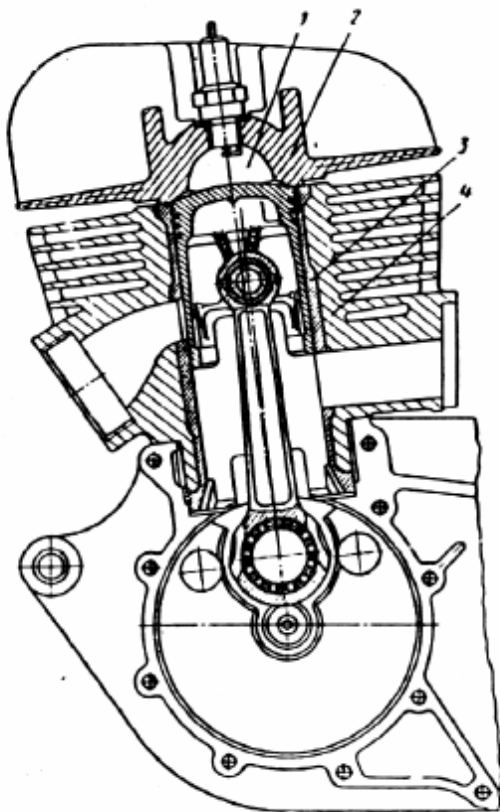
- **Směsná paliva** – jsou určeny normou ČSN 656508 a stanovují se především viskozity, filtrovatelnosti, destilační zkoušky, kyselosti, vzplanutí a obsahy mastných kyselin

Spalovací motory – Pístové motory

- **Základní technické řešení a provedení** - pístové motory vykazují jednotné znaky ve své konstrukci a jsou sestaveny z:
 - Pístu, těsnících kroužků, stíracích kroužků a pístního čepu
 - Ojnice, ložisek, klikového hřídele a těsnění klikového hřídele
 - Klikové skříně, bloku válců motoru válců a hlavy válců
 - Konstrukce rozvodů pístového motoru
 - Konstrukce sacího a výfukového systému
 - Systému chlazení motoru
 - Systému mazání motoru
- Rozsah a složitost jednotlivých konstrukčních uzlů je určen různorodými podmínkami využití motoru, požadavků životnosti a spolehlivosti, pořizovací cenou, výkonem, dosažitelnou úrovní produkovaných emisí, efektivitou přeměny energií, palivem a aktuálním vývojem.
- **Zážehový motor** – základní způsob provedení je 2T nebo 4T, dále je konstrukce určena typem atd. viz výše. Jako standard je možné uvažovat některý z provedení automobilových nebo motocyklových zážehových motorů.
- **Vznětový motor** – základní způsob provedení je 4T (případně 2T), dále je konstrukce určena typem atd. viz výše. Jako standard je možné uvažovat některý z provedení automobilových nebo nákladních vznětových motorů.

Spalovací motory – Pístové motory

- Zážehový motor - 2T



Spalovací motory – Pístové motory

- Vznětový motor - 4T



Spalovací motory – Pístové motory

- Rámcové dosahované parametry vznětových a zážehových motorů

Tabulka 1 – Rozdílné parametry zážehových a vznětových motorů		
Parametr/typ motoru	Zážehový motor	Vznětový motor
Kompresní poměr	<ul style="list-style-type: none"> při vstřikování do sacího potrubí 7 až 11 : 1 při přímém vstřikování 11,5 až 12,5 : 1 motor Saab SVC – proměnlivý kompresní poměr od 8 : 1 až do 14 : 1 	<ul style="list-style-type: none"> přímé vstřikování 15 až 19,5 : 1 nepřímé vstřikování 21 až 23 : 1
Největší kompresní tlak při spouštěcích otáčkách a provozní teplotě [MPa]	0,8 až 1,6	2,5 až 3,5
Nejvyšší teplota při kompresi [°C]	400	500 až 900
Nejvyšší teplota spalování [°C]	2000	2000
Nejvyšší tlak při spalování [MPa]	<ul style="list-style-type: none"> 5,5 až 6,0 u vstřikovacích, příp. přeplňovaných motorů 	<ul style="list-style-type: none"> 7 až 9 u atmosférických motorů 12 až 16 u přeplňovaných motorů
Zbytkový tlak ve válci (krátce před otevřením výfukového ventilu) [MPa]	0,3 až 0,5	0,7 až 1,0
Střední pracovní tlak [MPa]	<ul style="list-style-type: none"> 0,8 až 1,1 (u nepřepřlňovaných motorů) 1,1 až 1,5 (u přeplňovaných motorů) 	<ul style="list-style-type: none"> 0,9 až 1,2 (u nepřepřlňovaných motorů) 1,3 až 2,1 (u přeplňovaných motorů)
Teplota výfukových plynů při plném zatížení [°C]	800 až 1000	400 až 700
Účinnost [%]	25 až 35	35 až 50
Měrná spotřeba paliva [g/kWh]	230 až 250	<ul style="list-style-type: none"> 200 až 230 (přímé vstřikování) 240 až 250 (nepřímé vstřikování)
Obsah CO ve výfukových plynech (obj. %)	<ul style="list-style-type: none"> 0,5 až 1,5 % (při volnoběhu) 0,2 až 1,0 % (při neúplném zatížení) 2,0 až 4,0 % (při plném zatížení) 	<ul style="list-style-type: none"> 0,03 až 0,05 % (při volnoběhu) 0,05 až 0,25 % (při plném zatížení)
Teplota vzplanutí paliva [°C]	21 až 23	55 až 100
Teplota vznícení paliva [°C]	500 až 600	300 až 350
Točivý moment při nízkých otáčkách	malý	velký

Spalovací motory – Pístové motory

• Provozní specifika pístových motorů - výhodná

- Poměrně vysoká účinnost u 4T transformace energie v palivu na mechanickou práci (zážehové 25 až 35%, vznětové 35 až 50%).
- 2T zážehové účinnost cca 15%
- Měrná spotřeba paliva – zážehový (230 až 250 g/kWh), vznětový (200 až 250 g/kWh), malé 2T (400 - 700 g/kWh), velké lodní cca 160 g/kWh.
- Kompaktní provedení
- Nízké měrné hmotnosti
- Rychlé najíždění a odstavení
- Provedení jako více palivové

typ motoru	otáčky motoru [min ⁻¹]	výkonová hmotnost [kg.kW ⁻¹]
voľnoběžné lodní motory	100 ÷ 125	40 ÷ 60
průmyslové	n < 600	20 ÷ 40
průmyslové	n > 600	12 ÷ 18
lokomotivní	n < 100	8 ÷ 14
lokomotivní	n = 1500	3 ÷ 7
automobilové - zážehové	5000 ÷ 6000	2 ÷ 4
automobilové - vznětové	2000 ÷ 5000	3 ÷ 6
letadlové	2000 ÷ 300	0.7 ÷ 1.4

• Provozní specifika pístových motorů - nevýhodná

- Nutnost cizího spouštění a téměř bez zatížení
- Při konstantním přívodu paliva pokles otáček při zatížení – nutnost převodování
- Nízké přetížitelnosti
- Hluk, vibrace, emise
- **Vývoj** – tendence vývoje je možné sledovat především v oblasti automobilového průmyslu – zmenšování rozměrů motorů, rozměrů válce, přechody k nižšímu počtu válců, přeplňování, vypínání, akumulace. Významný tlak na pokles spotřeby paliva, zvýšení účinnosti, snížení emisí a hluku, spíše snížené životnosti dílů – posun k rychloběžnosti.

Spalovací motory – Pístové motory

- **Základní emisní zátěž**

- CO – vzniká především při bohaté směsi a nedostatečném přívodu kyslíku pro oxidaci uhlíku. Při vyváženém poměru směsi se obsah CO pohybuje v rozmezí 0,05% až 0,3% a je způsoben nehomogenním rozdělováním směsi ve válci.
- Uhlovodíky – obdobně jako u CO, důsledek bohaté směsi. Minimum HC je u stechiometrie 1.1 až 1.2. Při zvyšující se přebytku dochází ke vzrůstu HC vlivem nedokonalého spalování.
- NO_x – jsou způsobeny vysokou teplotou a tlakem spalování. Minimum je v oblasti přebytku vzduchu 1.05 až 1.1 s rostoucím obsahem vzduchu roste obsah NOx (oblast chudé směsi).
- SO₂ – je závislé na obsahu síry v palivu
- Pb – dříve přidáváno ve velké míře jako antidetonátor
- CO₂ – je hlavní produkt spalování – určuje dokonalost spalování ale i stav součástí motoru (přísávání kyslíku po trase).
- Pevné částice – saze, karbon, otěr, nespálené zbytky oleje atd. Rozměrově cca 10 až 300nm a navazují PAH.

Spalovací motory – Pístové motory

- **Základní emisní zátěž**

Emisní normy pro osobní automobily

Emisní normy pro nákladní automobily

Euro norm emissions for category N2, EDC, (2000 and up)

Standard	Date	CO (g/kWh)	NO _x (g/kWh)	HC (g/kWh)	PM (g/kWh)
Euro 0	1988–1992	12.3	15.8	2.6	none
Euro I	1992–1995	4.9	9.0	1.23	0.40
Euro II	1995–1999	4.0	7.0	1.1	0.15
Euro III	1999–2005	2.1	5.0	0.66	0.1
Euro IV	2005–2008	1.5	3.5	0.46	0.02
Euro V	2008–2012	1.5	2.0	0.46	0.02

Rok/norma		CO (g/km)		NO _x (g/km)		HC + NO _x (g/km)		HC (g/km)	PČ (g/km)
1992	I	3,16	3,16	-	-	1,13	1,13	-	0,18
1996	II	2,20	1,00	-	-	0,50	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

Specifické emisní limity pro spalovací motory - stacionární

Tabulka 2.1 - Specifické emisní limity platné od 1. ledna 2018

Druh paliva	Specifické emisní limity [mg.m ⁻³]								
	> 0,3-1 MW			> 1-5 MW			> 5-50 MW		
	NO _x	TZL	CO	NO _x	TZL	CO	NO _x	TZL	CO
Kapalné palivo	400	-	450	400	50	450	400	20	450
Plynné palivo a zkvapalněný plyn	500	-	650	500	-	650	500	-	650

BENZÍNOVÉ MOTORY, NAFTOVÉ MOTORY

* 0,90 pro motory s přímým vstřikováním paliva

** 0,10 pro motory s přímým vstřikováním paliva

Tabulka 2.2 - Specifické emisní limity platné do 31. prosince 2017

Druh pístového spalovacího motoru	Druh paliva	Specifické emisní limity [mg.m ⁻³]								
		> 0,3 – 1 MW			> 1 – 5 MW			> 5 MW		
		NO _x	TZL	CO	NO _x	TZL	CO	NO _x	TZL	CO
Plynový motor	Kapalné palivo	500	-	650	500	130	650	500	130	650
	Zemní plyn a degazační plyn	500	-	650	500	-	650	500	-	650
	Plynné palivo obecně	1000	-	1300	500	130	1300	500	130	650
Dieselový motor	Kapalné palivo	4000	-	650	500 600 ²⁾ 4000 ³⁾	130	650	500 600 ²⁾ 2000 ³⁾	130	650
	Zemní plyn a degazační plyn ¹⁾	4000	-	650	500 4000 ³⁾	-	650	500 2000 ³⁾	-	650
	Plynné palivo obecně	4000	-	1300	500 4000 ³⁾	130	1300	500 2000 ³⁾	130	650

Vysvětlivky: 1) Se vstřikovacím zapalováním.

2) Platí pro těžký topný olej.

3) Platí pouze pro pístové spalovací motory, jejichž stavba či přestavba byla zahájena před 17. květnem 2006.



PODPORUJEME
VAŠI BUDOUCNOST
www.esfcr.cz

Spalovací motory – Pístové motory

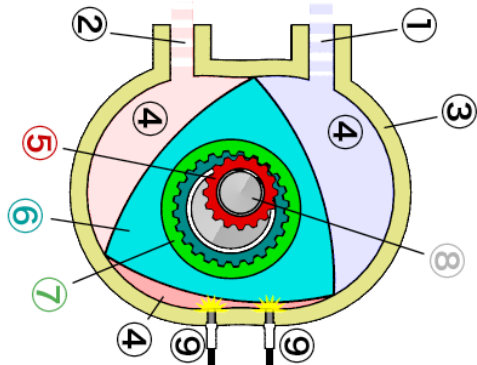
Omezení emisní zátěže

- Nox a HC a CO
 - Přímou při spalovacím cyklu – obdoba primárních opatření tj., např. EGR filtr – časování vstřikování, recirkulace spalin, opožděná injektáž, injektáž vlhkého vzduchu, injektáž vody,
 - Metodou SCR – tedy katalyzátorem
 - Využití nízkosírných paliv pro SO₂
 - Pevné částice se snižují použitím filtru
-
- **Omezení emisní zátěže dle BAT – kapalně palivo**
 - Tuhé částice a těžké kovy – primární opatření na palivu a spalovacím procesu, filtrace.
 - Odsíření – primárně palivem, případně u stacionárních zdrojů sekundárně.
 - Denitrifikace – Primární a sekundární metody (SCR)
 - CO – především primární metody, správné seřízení motoru. Sekundární – katal. pro CO.
-
- **Omezení emisní zátěže dle BAT – plynně palivo**
 - Odsíření – primárně palivem, případně u stacionárních zdrojů sekundárně.
 - Denitrifikace – Primární (seřízení) a sekundární metody (SCR)
 - CO – především primární metody, správné seřízení motoru. Sekundární – katal. pro CO

Spalovací motory – Pístové motory

- **Rotační pístové motory**

- V podstatě se jedná pouze o Wankelův motor. Motor je 4T a pracuje jako zážehový. Rozdílnost je v tvaru pístu (trojúhelníkový tvar) který excentricky rotuje ve vymezeném piškotovém prostoru a za jednu otáčku vykoná tři pracovní cykly.



Výhody: menší zástavby, hmotnosti, počet součástí, rovnoměrnost chodu a nižší NOx.

Nevýhody: životnost těsnění, kluzné rychlosti, nižší poměry stlačení (účinnost), výrobní tvar, vyšší spotřeba paliva a motorového oleje.

- **Hlavní zásady regulace – charakteristiky**

- Regulace změnou jakosti směsi (regulace kvalitativní) tzn. směs je bohatší nebo chudší. Výhodné je stejné stlačování a nevýhodné je chudost směsi (vynechávání motoru)
- Regulace změnou množství směsi (regulace kvantitativní) tzn. změna množství nasávané směsi při stejném poměru palivo/vzduch. Výhodou je stálé složení směsi, nevýhodou je proměnlivost komprese.
- Regulace kombinovaná (spojení předešlých regulací) v současné době již přesné dávkování pro provozní režimy.
- Provozní režimy jsou dány charakteristikami příslušného motoru – otáčková charakteristika, zatěžovací charakteristika, seřizovací charakteristika.