

Zážehové a vznětové motory

2.

V automobilech se používají pístové motory. Ty pracují v určitém cyklu, který obsahuje výměnu a spalení směsi paliva se vzdušným kyslíkem. Cyklus probíhá ve čtyřech nebo ve dvou fázích, a podle toho se motory dělí na čtyřdobé a dvoudobé.

Pracovní oběhy motorů

V současné době je u automobilů nejrozšířenější čtyřdobý motor. Je charakterizován tím, že cyklus proběhne při čtyřech zdvizích pístu motoru. Píst v součinnosti s ventilovým rozvodem zajišťuje výměnu směsi. To platí pro spalovací motory s přímočarým vratným pohybem pístu, které v automobilech převažují.

U těchto motorů se píst pohybuje mezi horní a dolní úvratí. Jejich vzdálenost se nazývá zdvihem. Doba pohybu mezi úvratěmi je takt. Tlaková energie vzniklá při hoření směsi působí na horní plochu pístu. Výsledná síla, která přitom vzniká, je přenášena ojnicí na klikovou hřídel. Na hřídeli takto vzniká kroutící moment. Jelikož síla působí po určité dráze mezi úvratěmi, vzniká mechanická práce a vzhledem k času mechanický výkon.

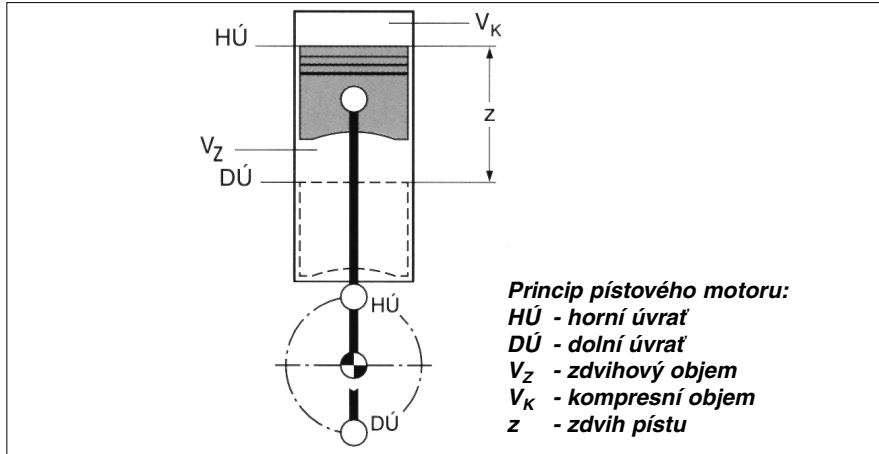
Čtyřtaktní proces, využívaný v osobních automobilech nejčastěji, se skládá ze čtyř zdvihů, tedy ze dvou otáček klikové hřídele. Jednotlivé takty se nazývají sání, komprese, expanze a výfuk. Uvedený proces, nazývaný pracovním oběhem, je kruhový děj, který se periodicky opakuje a má stále shodný průběh. Lze jej popsat indikátorovým diagramem, což je závislost tlaku p na objemu V během pracovního oběhu. Průběh se stanoví měřením tlaku ve válci v závislosti na poloze pístu nebo na čase od začátku oběhu.

Kruhový děj ovšem vyžaduje obnovení počátečních tepelných, tlakových a objemových podmínek. To se u pístových motorů děje výměnou prováděnou vytlačněním shořelých plynů a přivedením nové náplně.

Při kruhovém ději uvedeného pracovního oběhu jsou pro mechanickou práci motoru podstatné jen tlakové změny a s nimi související změny objemové. Produkce tepla a stavové změny pracovního média, směsi paliva se vzdušným kyslíkem, musí probíhat tak, aby práce

SPALOVACÍ MOTORY

vykonaná během expanze byla větší, než práce potřebná k výměně a kompresi náplně. V oběhovém diagramu je užitečná práce W_U vyjadřována rozdílem ploch mezi osou souřadnic a průběhy.



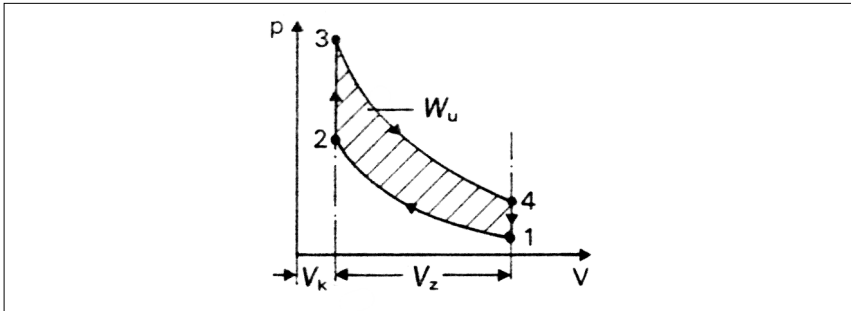
Pro srovnání pracovních oběhů z hlediska jejich hospodárnosti bývají výpočtem stanoveny porovnávací nebo ideální oběhy pro dokonalý motor, a to za následujících předpokladů:

- Všechny rozměry jsou stejné jako u skutečného motoru.
- Ve válci je jen čistá náplň, beze zbytků z předešlého pracovního cyklu, aby se nezhoršoval spalovací proces.
- Složení směsi (poměr vzduch/palivo) je stejné jako u skutečného motoru.
- Množství paliva odpovídá nasátému vzduchu, přičemž je složení směsi takové, aby byl správný přebytek vzduchu, což je podmínkou dokonalého spálení.
- Spalování směsi má proběhnout co nejrychleji a její zapálení má nastat s vhodným předstihem.
- Mezi pracovním plynem a okolními stěnami válce nedochází k výměně tepla.
- Spalování probíhá přesně podle termodynamických zákonitostí pro daný druh motoru.
- Při sání a výfuku nevznikají ztráty prouděním.

Teoretické oběhové diagramy se u různých druhů motorů poněkud liší v závislosti na druhu paliva, způsobu přípravy směsi a jejího zapálení. U **zážehových motorů**, které používají jako paliva automobilového benzínu, je směs připravena předem, ať už mimo nebo v pracovním prostoru válce. Následně je zapálena, nejčastěji elektrickým výbojem, jehož energie je přivedena z vnějšího zdroje. U **vznětových motorů**, které spalují motorovou naftu, dochází ke vznícení paliva v okamžiku jeho vstříknutí do stlačeného vzduchu, stlačením ohřátého na zápalnou teplotu. Tvorba směsi tedy probíhá současně s hořením.

Děje při pracovním oběhu

Pro **zážehový motor** se jako porovnávací volí oběh s přívodem tepla při stálém objemu, jehož průběh je uveden na obrázku.



Porovnávací oběh zážehového motoru s přívodem tepla při stálém objemu:
1–2 - izentropická komprese; 2–3 - izochorický přívod tepla; 3–4 - izentropická expanze; 4–1 - izochorický odvod tepla; W_U - užitečná práce

V kruhovém oběhu nastávají následující stavové změny:

1 -> 2

adiabatické stlačování směsi bez výměny tepla s okolím;

2 -> 3

přívod tepla Q_p při stálém objemu, tj. zážeh a hoření směsi;

3 -> 4

adiabatické rozpínání (expanze);

4 -> 1

odvod tepla Q_v při stálém objemu.

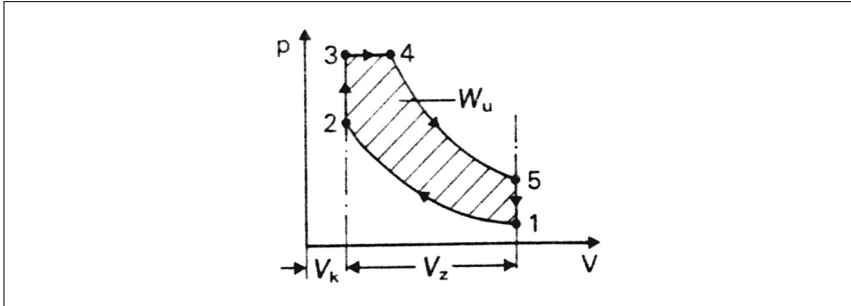
Práce potřebná ke stlačení směsi z objemu $V_Z + V_K$ na V_K je dána plochou pod křivkou 1 -> 2. Práce vykonaná při expanzi z objemu V_K na původní pracovní objem $V_Z + V_K$ pak plochou pod křivkou 3 -> 4. Užitečná práce W_U motoru je tedy dána rozdílem ploch pod těmito křivkami.

U vznětových motorů se používá smíšeného porovnávacího oběhu.

V části 1 -> 2 probíhá adiabatické stlačování čistého vzduchu na tlak a teplotu tak vysokou, aby přesáhla zápalný bod tekutého paliva. Palivo se po ukončení stlačování (bod 2) rozpráší do žhavého vzduchu a přitom se v něm vzněcuje. Část paliva shoří naráz při stálém

SPALOVACÍ MOTORY

objemu (přímka 2 → 3) a vzniklým teplem Q_{pV} se zvýší tlak z p_2 na p_3 . Zbytek spalování probíhá při stálém tlaku (přímka 3 → 4) a vzniklé teplo Q_{pp} vykoná práci na změnu objemu z V_3 na V_4 .



Smíšený porovnávací oběh vznětového motoru: 1–2 - izentropická komprese; 2–3 - izochorický přívod tepla; 3–4 - izobarický přívod tepla; 4–5 - izentropická expanze; 5–1 - izochorický odvod tepla; W_u - užitečná práce

Ostatní části pracovního oběhu, tj. 4 → 5 a 5 → 6 jsou obdobné jako u zážehového motoru. Stejně tak je práce při kompresi dána plochou pod křivkou 1 → 2, ale práce při expanzi pak plochou pod průběhy 3 → 4 a 4 → 5. Z toho je zřejmé, že termodynamická účinnost vznětového motoru je lepší (plocha W_u je větší). Proto je spotřeba vznětového motoru pro stejný výkon nižší než zážehového se stejným obsahem.

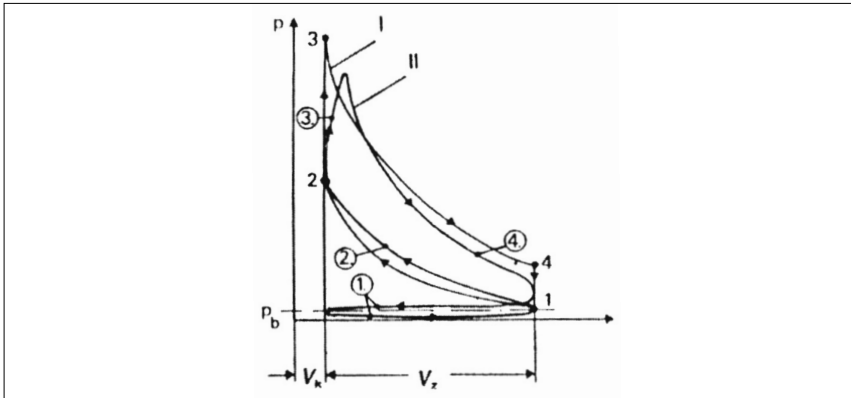
Pracovní oběh skutečného motoru se podstatně liší od oběhu motoru ideálního. Příčiny odchylek jsou především tyto:

- Ve válci není jen čistá náplň, ale i zbytky plynů z předchozího pracovního cyklu.
- Palivo shoří nedokonale buď vlivem nedostatečné přípravy směsi, nebo nižší energie zážehu, případně teploty stlačeného vzduchu nepostačující ke vznícení paliva.
- Spalování neprobíhá při konstantním objemu a při konstantním tlaku, protože směs hoří konečnou rychlostí.
- Mezi plynem a stěnami válce dochází k výměně tepla.
- Při sání a výfuku vznikají ztráty, protože výměna náplně se uskutečňuje změnami objemu, na které musí být vynaložena určitá práce.

Zakreslí-li se do jednoho grafu ideální oběh i indikátorový diagram téhož motoru, jsou zřejmé odchylky, které vedou ke snížení výkonu reálného motoru.

V indikátorovém diagramu je tzv. smyčka střídavého plnění, která představuje ztráty prouděním při sání a výfuku. Vytlačování výfukových plynů z válce totiž probíhá při malém přetlaku ve válci vůči okolnímu barometrickému tlaku (u nepřepřítvaných motorů). Naproti tomu nastává při nasávání čerstvé náplně ve válci vůči barometrickému tlaku podtlak.

Vzniklá smyčka značí negativní práci, která snižuje mechanickou účinnost motoru. Následkem přívodu, resp. odvodu tepla, je průběh křivky stlačování zpočátku strmější a potom plošší, než by odpovídalo adiabatickému ději. Také expanzní křivka je následkem odvodu tepla strmější než adiabatický průběh.



Indikátorový diagram čtyřtakového zážehového motoru v porovnání s ideálním oběhem: I - ideální oběh s přívodem tepla při stálém objemu: 1-2-3-4; II - indikátorový diagram; V_z - zdvihový objem; V_k - kompresní objem; 1 - ztráty prouděním při sání a výfuku; 2 - křivka komprese je zpočátku strmější, potom plošší než entropická následkem přívodu a odvodu tepla; 3 - spalování probíhá při proměnlivém objemu; 4 - expanzní křivka je strmější následkem odvodu tepla

Protože není možné okamžité shoření směsi, probíhá její spalování při proměnlivém objemu. To se v diagramu zážehového motoru projeví tím, že je místo svislice křivka 2 -> 3 šikmá a u bodu 3 je oblouk místo špičky. Omezením účinků výše uvedených vlivů je možno dosáhnout snížení ztrát různého druhu, a tak přiblížit tvar indikátorového diagramu tvaru ideálního oběhu pro daný motor.

Emise zážehových motorů

Některé z výše uvedených dějů mají vliv nejen na spotřebu motorů, ale i na jeho emise CO, HC a NO_x.

Oxid uhelnatý (CO) vzniká, když pro nedostatek kyslíku nedochází k úplnému shoření paliva, tj. k přeměně na CO₂ a H₂O. Velikost emisí CO je tedy zcela závislá na složení směsi, které je dáno poměrem vzduchu a paliva. I při přebytku vzduchu vzniká ve výfukových plynech koncentrace CO, pokud je složení směsi ve spalovacím prostoru nehomogenní, nebo její složení cyklus od cyklu kolísá.

Volné uhlovodíky, sloučeniny C_mH_n , tj. parafiny, olefiny a aromáty se objevují ve výfukových plynech také při nedostatku vzduchu, kdy dochází k neúplnému nebo částečnému spalování paliva. Dalšími příčinami může být vynechání zážehu, zhasnutí zapálené směsi v důsledku její nízké teploty, zejména v blízkosti chladnějších stěn válce, nebo vlivem nedostatečné energie elektrického výboje při zážehu. Případně i nerovnoměrného rozložení směsi ve válci.

Emise oxidů dusíku (NO_x) jsou silně závislé na teplotě a tlaku ve spalovacím prostoru a vznikají oxidací atmosférického dusíku obsaženého ve spalovacím vzduchu. Maximální teplota a doba jejího působení mají rozhodující vliv na koncentraci oxidu dusnatého (NO), který se rychle okysličuje na oxid dusičitý (NO_2). V malém množství vzniká i oxid dusný (N_2O). Tyto oxidy jsou souhrnně označovány NO_x .

Emise vznětových motorů

Emise zmíněných složek jsou ve výfukových plynech zážehových motorů obsaženy v mnohem větší míře než u vznětových motorů. Vznětové motory pracují s přebytkem vzduchu, takže podíl oxidu uhelnatého je u nich až o řád nižší. Tvorba oxidů dusíku je závislá na teplotě, tlaku, době hoření a koncentraci kyslíku při spalování. Diesely mají emise NO_x řádově vyšší (cca 10x – 20x) než zážehové motory (vyoké tlaky ve spalovacím prostoru). Současné reálné emise jsou přibližně následující:

motory	CO [g/km]	HC [g/km]	NO_x [g/km]
zážehové	0,5–0,8	0,03	0,02–0,05
vznětové	0,2–0,3	0,03	0,40–0,50

Ve větší míře jsou ale ve výfukových plynech zastoupeny **aldehydy**. Nepatří přímo k jedovatým látkám, ale způsobují nepříjemný zápach výfukových plynů. Vzhledem k tomu, že v motorové naftě je přípustný vyšší obsah síry než v automobilovém benzínu, je ve výfukových plynech vznětových motorů i vyšší koncentrace **oxidu siřičitého**.

Problémem výfukových plynů vznětových motorů je tvorba **pevných částic a sazí**. Když dokonale neshoří třeba jen malý podíl paliva, saze zbarví výfukové plyny do tmava. Příčinou tvoření sazí bývá krakování nafty během spalování. Krakování je štěpení velkých molekul paliva. Dochází k němu při vysoké teplotě a velkém tlaku za nedostatku kyslíku. Spalování vstříknutého paliva začíná totiž na povrchu jeho kapiček tam, kde mají teplo a kyslík k palivu přístup nejdříve. Zatímco vnější obal kapiček paliva shoří, uvnitř je kyslíku nedostatek. Pokud se silným prouděním vzduchu nepodaří dostat uhlík dostatečně do styku s kyslíkem, palivo už neshoří, ale formou sazí zbarvuje výfukové plyny do tmava.