

Prednáška č.:

Porovnávacie cykly tepelných motorov

1) Definícia cyklu - Termodynamická účinnosť

Tepelný motor - stroj v ktorom sa cieľavedome premieňa teplo na mechanickú prácu.

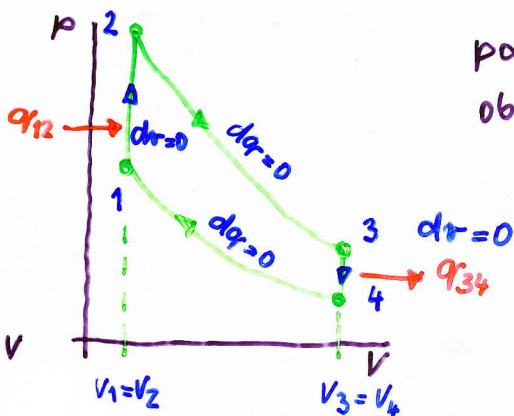
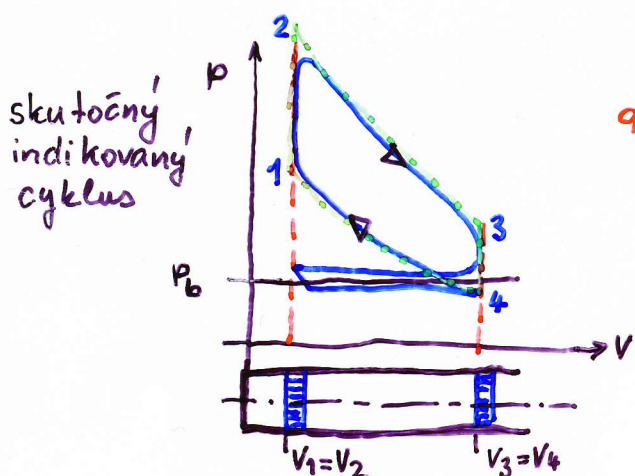
Pracovná látka prejde radom termodynamických zmien a vráti sa do pôvodného - východiskového termodynamického stavu => "obeh" alebo "Cyklus" tepelného stroja (napr. piestové stroje - spaľovacie motory).

Diagram cyklu - grafické znázornenie TD zmien (p-v diagram; T-s diagram, atď....)

Diagramy sa získavajú priamo meraním (indikovaním) stavových veličín pracovnej látky indikátormi (senzormi).

Indikátory sú mechanické, elektrické,

Napr.: benzínový (zážihový) spaľovací motor :



porovnávaci (abstraktný) obeh: 2 izochory
2 adiabaty

Abstrakciou skutočných TD zmien dostaneme cyklus (obeh) pozostávajúci zo základných TD zmien (izochorická, izobarická, adiabatická, izotermická, polytropická, ..)

Obeh : - uzavretý - po vykonaní jedného cyklu začína nový obeh tá istá látka, ktorá sa doplní teo o úniky do okolia (napr.: tepelné elektrárne)

- otvorený - na konci obehu sa pracovná látka vypúšťa do okolia a nový cyklus sa začína s novou látkou (zmesou) (tak pracujú spaľovacie motory)

Kritériom kvality tepelného stroja je efektívnosť premeny tepla na mechanickú prácu - je to dané termodynamickou účinnosťou obehu :

$$\eta_c = \frac{A_c}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

A_c - získaná práca obehu

Q_1 - teplo do obehu dodané (Q_p - privedenie)

Q_2 - teplo odobrané z cyklu chladením (Q_o - odvedenie)

- Predpoklady :
- pracovná látka je ideálny plyn
 - termodynamické zmeny sú vratné
 - ohrievanie a chladenie sa deje bez teplotných rozdielov

Hlavné obehy spalovacích motorov :

- 1) OTTOV Obch - zážihový (benzinový) motor
- 2) DIESELOV Obch - vznietový (naftový) motor

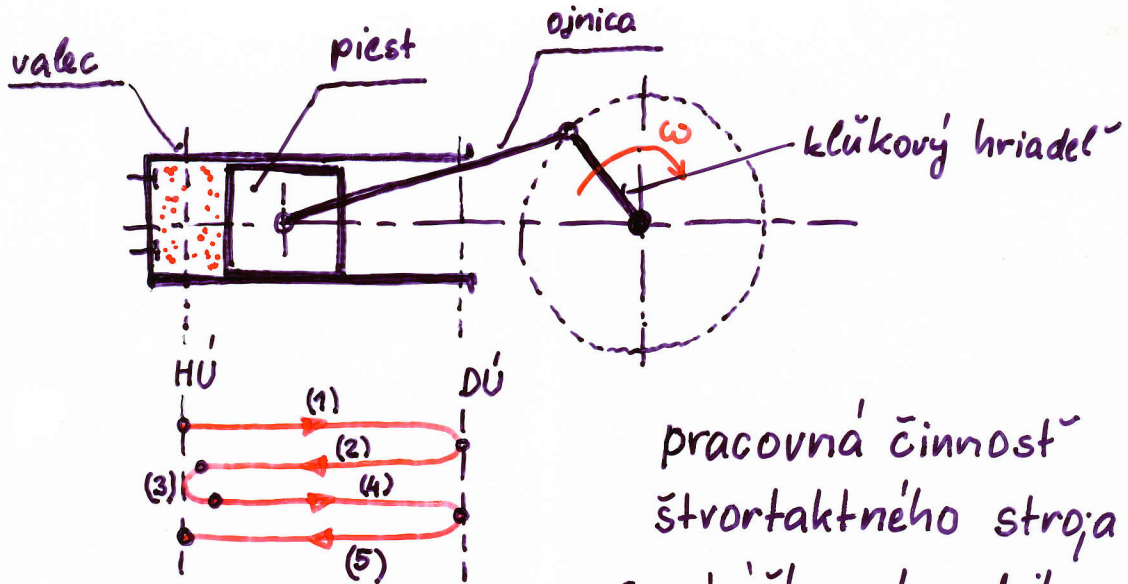
Motory :

- dvojtaktne' (celý cyklus prebehne počas jednej otáčky klukového hriadeľa) - dva zdvihy
- štvortaktne' (celý cyklus prebehne počas dvoch otáčok klukového hriadeľa) - 4 zdvihy

V súčasnosti sa vyrábajú v automobilovom priemysle štvortaktne' motory.

Pracovný obch spalovacích motorov majú 5 charakteristických častí, ktoré nasledujú v poradí:

- plnenie valca čerstvou náplňou (1)
- kompresia (stláčanie) pracovnej zmesi (2) (dodat' prácu)
- spalovanie pracovnej zmesi (3) (dodávka tepla)
- expanzia (rozpinanie) spalín (4) (práca sa získava)
- výfuk (vyprázdňovanie valca a spalovacieho priestoru od spalín (5) (- odvod tepla)



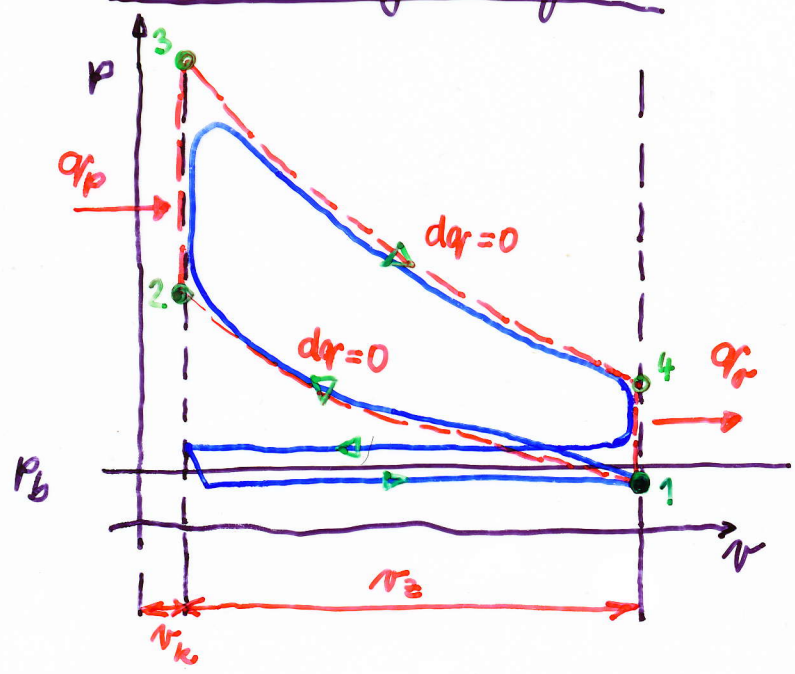
pracovná činnosť štvortaktného stroja
 2-otáčky, 4-zdvihy medzi DÚ a HU

HU - horná úvrat
 DÚ - dolná úvrat

2) OTTOV OBEH - zážihový (benzinový)

- pracovná zmes : vzduch + benzin ⇒ pripravená v karburátore alebo s priamym strekovaním paliva do sacieho potrubia alebo do valca
- zmes sa stlačí a zapáli elektrickou iskrou

Indikovaný diagram :



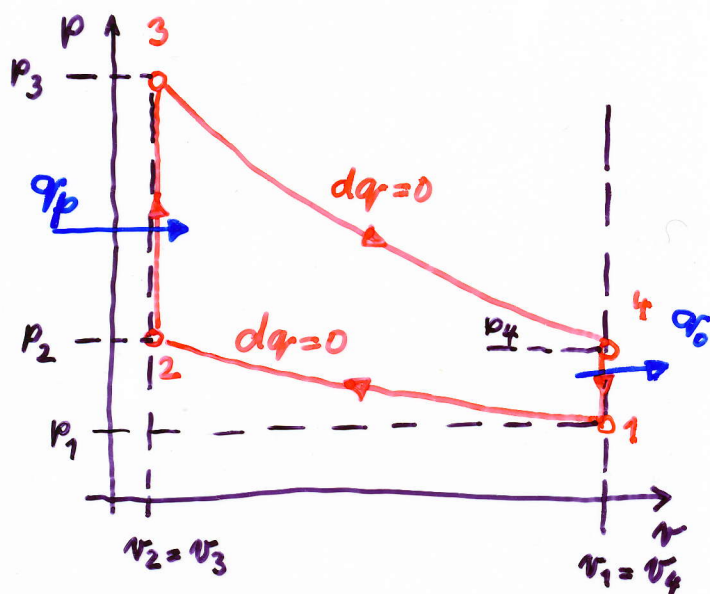
- 1-2 - adiabatická kompresia
- 2-3 - izochorická kompresia (spaľovanie) - q_p
- 3-4 - adiabatická expanzia
- 4-1 - izochorický odvod tepla - chladenie q_0

q_p - privedené teplo horím
 q_0 - odvod tepla (výfuk)

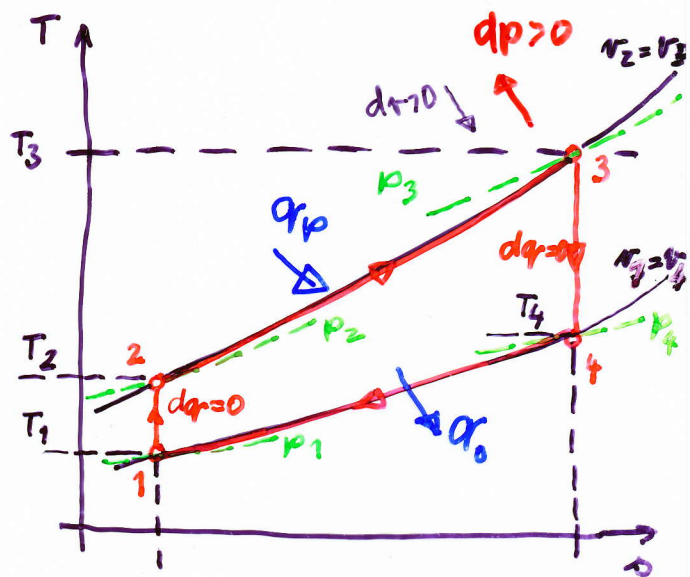
v_k - kompresný objem ; v_z - zdvihový objem

Porovnávacie obehy

p-v diagram



T-s diagram



- 1-2 → adiabatická kompresia : $q_{12} = 0$ (treba dodať prácu) (zmes sa zohrieva z vnútra práce)
- 2-3 → izochorická kompresia (spalovanie) - privedenie tepla

$$dq = du + da \quad da = 0! \quad dv = 0!$$

$$= dq = du$$

$$q = q_{23} = q_p = \int_2^3 du = c_v(T_3 - T_2) \quad \oplus$$

- 3-4 → adiabatická expanzia (koná sa práca) : $q_{34} = 0$

- 4-1 → izochorická expanzia (chladenie, výfuk) : $da = 0! \quad dv = 0!$

$$dq = du + da \Rightarrow dq = du$$

$$q = q_{41} = q_o = \int_4^1 dq = c_v(T_1 - T_4) \quad \ominus$$

Získaná práca cyklu:

$$\oplus a_c = q_p - |q_o| = q_{23} - q_{41} = c_v(T_3 - T_2) - c_v(T_4 - T_1)$$

Teplotná účinnosť cyklu:

$$\eta_t = \frac{q_c}{q_p} = \frac{q_c}{q_{23}} = \frac{q_{23} - q_{41}}{q_{23}} = \frac{C_V(T_3 - T_2) - C_V(T_4 - T_1)}{C_V(T_3 - T_2)}$$

$$= 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \cdot \frac{\frac{T_4}{T_1} - 1}{\frac{T_3}{T_2} - 1}$$

Pre adiabatickú expanziu 3-4 platí:

$$p_3 v_3^{\gamma} = p_4 v_4^{\gamma}$$

$$p_3 v_3 = RT_3$$

$$p_4 v_4 = RT_4$$

$$\frac{p_3}{p_4} = \left(\frac{v_4}{v_3}\right)^{\gamma}$$

$$\frac{p_3}{p_4} = \frac{v_4 T_3}{v_3 T_4}$$

$$\Rightarrow \frac{T_3}{T_4} = \frac{p_3}{p_4} \frac{v_3}{v_4} = \left(\frac{v_4}{v_3}\right)^{\gamma} \cdot \frac{v_3}{v_4}$$

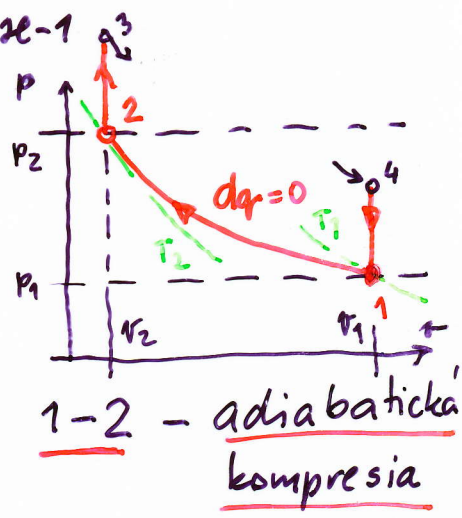
$$\Rightarrow \frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{v_4}{v_3}\right)^{\gamma-1}$$

Podobne pre adiabatickú kompresiu 1-2 platí:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{\gamma-1}$$

$$\Rightarrow \frac{T_1}{T_2} = \frac{T_4}{T_3} \Rightarrow \frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}$$

$$\Rightarrow \eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$



⇒ účinnosť premeny je vyššia čím je T_1 menšia a T_2 vyššia.
 T_1 - teplota na savi
 T_2 - teplota po stlačení pred spaľovaním
 Pre $T_1 = T_2$ (izotermická kompresia) ⇒ $\eta_t = 0$

Ak dosadíme $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\kappa-1}$, potom

$\eta_t = 1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\kappa-1}$ Ak $\kappa = 1,4 \Rightarrow \kappa - 1 = 0,4$

Pomer objemov

$\frac{v_1}{v_2} = \epsilon$ - kompresný pomer

$v_1 = v_k + v_z$ $v_2 = v_k$

$\Rightarrow \epsilon = \frac{v_k + v_z}{v_k}$

Potom účinnosť

$\eta_t = 1 - \frac{1}{\epsilon^{\kappa-1}}$

(zážitkový)

Záver: Hospodárnosť spalovacích motorov sa zvyšuje zvyšovaním kompresného pomeru ϵ .

Obmedzenie pre kompresný pomer \Rightarrow

- teplota samovznetenia
- klepanie motora (namiesto postupného spalovania dochádza ku spontánnej detonácii a prudkému stúpaniu tlaku vo valci - nepriaznivé mechanické namáhania klúčového mechanizmu) - odstraňuje sa prísadami do paliva - zvyšuje sa oktanové číslo benzínu

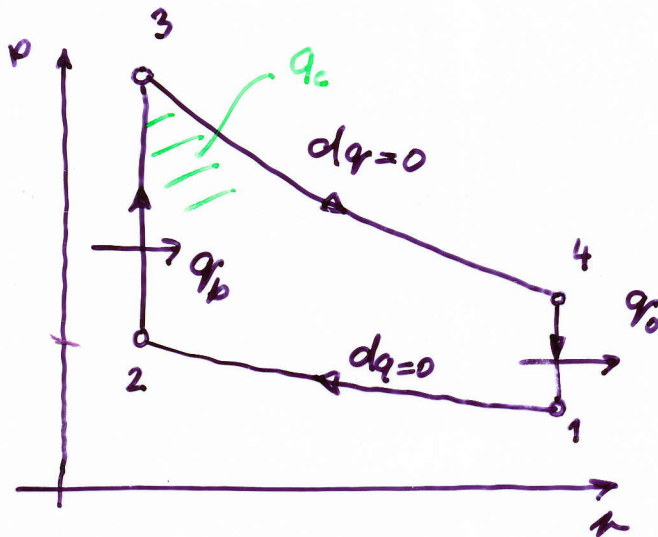
Samovzneteniu sa dá zabrániť tým, že palivo sa vstrekuje už do stlačeného vzduchu do valca (priame vstrekovanie - bez karburátora)

Pre zážihové motory býva:

$\varepsilon \in (7; 10,5)$; $p_2 = 1,1 \sim 1,8 \text{ MPa}$ - tlak na konci kompresie piestom

$T_2 = 550 \sim 750 \text{ K}$ ($277 \sim 477$) °C

Prehľad stavových veličín OTTOVHO motora:



Bod 1 : - nepreplňovaný motor nasáva vzduch pri atmosférickom tlaku a vonkajšej teplote (môže sa saný vzduch ohrievať vytekajúcimi spalinami v rekuperátore vzduchu - zvyšuje sa T_1) \Rightarrow (po stlačení sa chladí v medzichladiči)
- tlak p_1 sa môže zvýšiť preplňaním valcov dýchadlom

Bod 2 : $p_2 = 1,1 \sim 1,8 \text{ MPa}$ $T_2 = 550 \sim 750 \text{ K}$

Bod 3 : koniec spaľovania : $p_3 = 2,5 \sim 5,5 \text{ MPa}$ $T_3 = 2500 \sim 2800 \text{ K}$

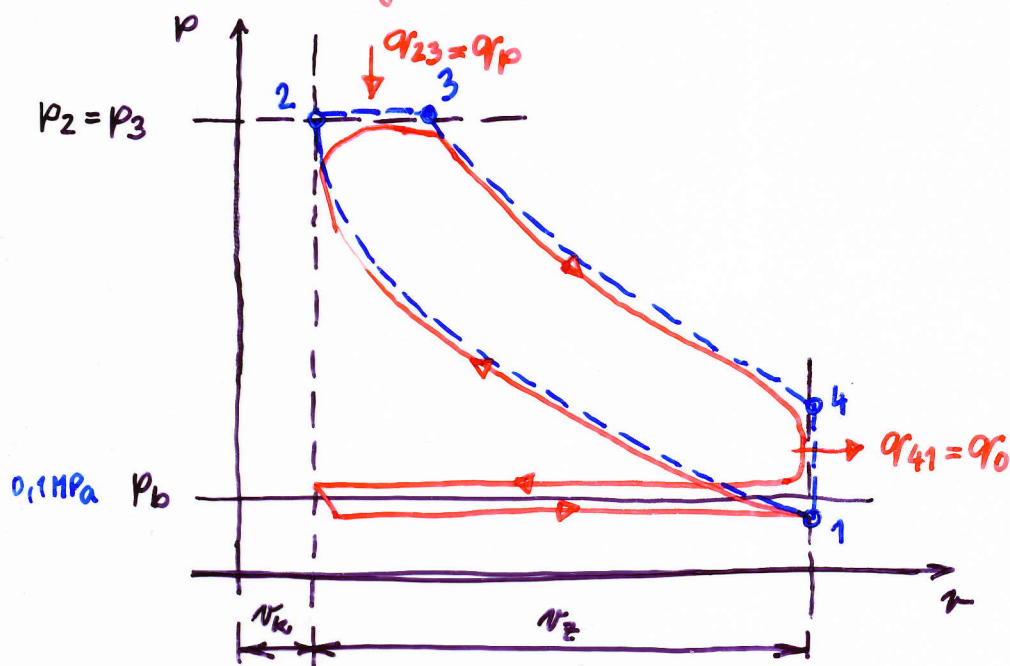
$\left. \begin{array}{l} \varepsilon = (0,5 \div 0,6) \end{array} \right\}$

Bod 4 : koniec expanzie : $p_4 = 0,35 \sim 0,5 \text{ MPa}$ $T_4 = 1200 \sim 1500 \text{ K}$

3) DIESELOV POROVNÁVACÍ CYKLUS NAFTOVÉHO SPAĽOVACIEHO MOTORA

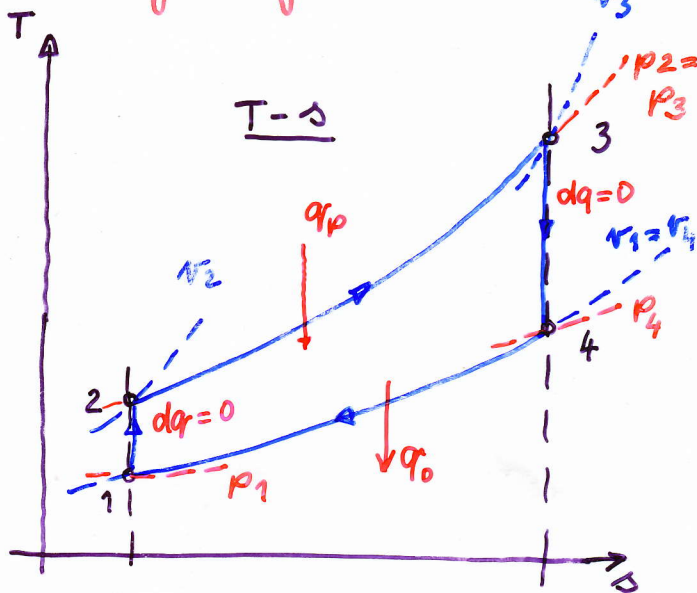
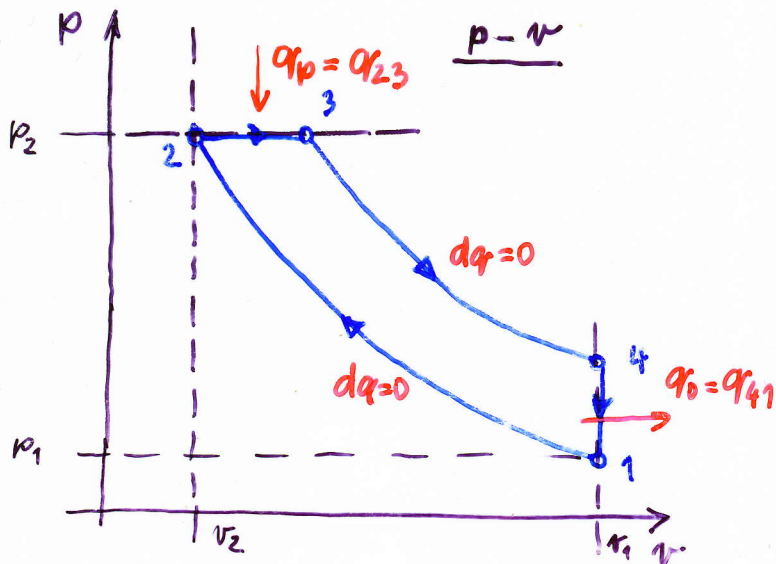
Aby sa zvýšil kompresný pomer, vo valci sa stlačia iba vzduch a palivo (nafta) sa vstrekuje do valca vstrekovacím čerpadlom.

Indikovaný diagram



- porovnávací
- indikovaný

Porovnávacie diagramy



Dnešné vznetrové motory, lebo samotné spaľovanie - izobarická zmena 2-3 nie je rovnotlaké, ale zmiešané, a adiabaty sú polytrópy s $n < \kappa$, pretože motor spolupracuje cez jeho skriňu s okolím.

Pre jednotlivé TD zmeny platí:

Zmena 1-2: - adiabatická kompresia : $dq = 0$; $q_{12} = 0$ (prácu treba dodať)

Zmena 2-3: - izobarické spaľovanie : $dp = 0 \Rightarrow p_2 = p_3$

$$dq = du + \underbrace{da}_{\substack{\text{---} \\ \text{cpdT}}} \quad q_{23} = c_p(T_3 - T_2) = q_p \quad (+)$$

Zmena 3-4: - adiabatická expanzia : $dq = 0$; $q_{34} = 0$ (koná sa práca)

Zmena 4-1: - izochorická expanzia (výfuk = chladenie)
 $dv = 0$: $q_{41} = -c_v(T_4 - T_1) = q_v \quad (-) \quad T_4 > T_1$

Termodynamická účinnosť dieselovho obehu:

$$\eta_t = \frac{q_p - q_v}{q_p} = \frac{q_{23} - |q_{41}|}{q_{23}} = \frac{c_p(T_3 - T_2) - c_v(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{\kappa(T_3 - T_2)}$$

Ak zavedieme kompresný pomer: $\epsilon = \frac{v_1}{v_2}$

a stupeň izobarického zväčšenia objemu pri spaľovaní:

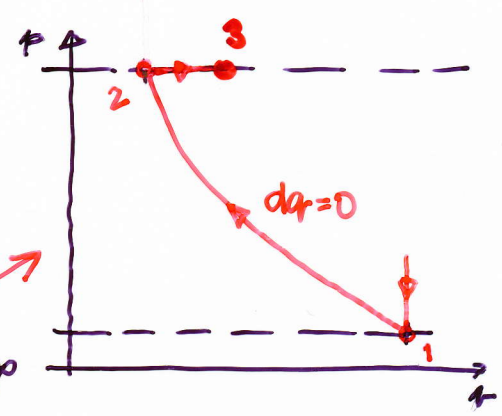
$$\varphi = \frac{v_3}{v_2}$$

Pre izobaru 2-3 plat':

$$p_2 v_2 = RT_2$$

$$p_3 v_3 = RT_3$$

kedze $p_2 = p_3 \Rightarrow \frac{v_3}{v_2} = \frac{T_3}{T_2} = \varphi$



Ine' vyjadrenie pre

$$\eta_t = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{\alpha(T_3 - T_2)}$$

Pre adiabatou 1-2 plat': (kompresia)

$$p_1 v_1^\alpha = p_2 v_2^\alpha$$

$$p_1 v_1 = RT_1$$

$$p_2 v_2 = RT_2$$

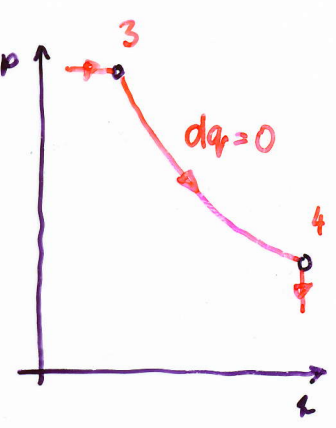
$$\Rightarrow \frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^\alpha$$

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1} \frac{T_1}{T_2}$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^\alpha$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2}{p_1} \frac{v_2}{v_1}$$

$$\Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\alpha-1} = \epsilon^{\alpha-1}$$



Pre adiabatou 3-4 plat': (expanzia)

$$p_3 v_3^\alpha = p_4 v_4^\alpha$$

$$p_3 v_3 = RT_3$$

$$p_4 v_4 = RT_4$$

$$\hookrightarrow \frac{p_4}{p_3} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^\alpha$$

$$\frac{T_4}{T_3} = \frac{p_4}{p_3} \frac{v_4}{v_3}$$

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{\alpha-1} = \left(\frac{\varphi \cdot v_2}{v_4}\right)^{\alpha-1} = \left(\frac{\varphi \cdot v_2}{v_1}\right)^{\alpha-1} = \left(\frac{\varphi}{\epsilon}\right)^{\alpha-1}$$

$v_4 = v_1$

Jednotlivé teploty vyjadrené pomocou konštrukčných parametrov $\epsilon = \frac{v_1}{v_2}$ a $\varphi = \frac{v_3}{v_2}$:

$$T_2 = T_1 \cdot \epsilon^{\kappa-1}$$

$$T_3 = T_2 \cdot \varphi = T_1 \cdot \underbrace{\epsilon^{\kappa-1}}_{T_2} \cdot \varphi$$

$$T_4 = T_3 \left(\frac{\varphi}{\epsilon}\right)^{\kappa-1} = T_2 \varphi \left(\frac{\varphi}{\epsilon}\right)^{\kappa-1} = T_1 \cdot \epsilon^{\kappa-1} \cdot \varphi \left(\frac{\varphi}{\epsilon}\right)^{\kappa-1} = T_1 \cdot \varphi^{\kappa}$$

Potom účinnosť motora :

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1 \varphi^{\kappa} - T_1}{\kappa (T_1 \varphi \epsilon^{\kappa-1} - T_1 \epsilon^{\kappa-1})} = 1 - \frac{\varphi^{\kappa} - 1}{\kappa \cdot \epsilon^{\kappa-1} (\varphi - 1)}$$

$$\underline{\underline{\eta_t = 1 - \frac{\varphi^{\kappa} - 1}{\kappa(\varphi - 1)} \cdot \frac{1}{\epsilon^{\kappa-1}}}}$$

Záver : Účinnosť vznetrového motora rastie so zväčšovaním kompresného pomeru a klesá so zmenšovaním stupňa plnenia.

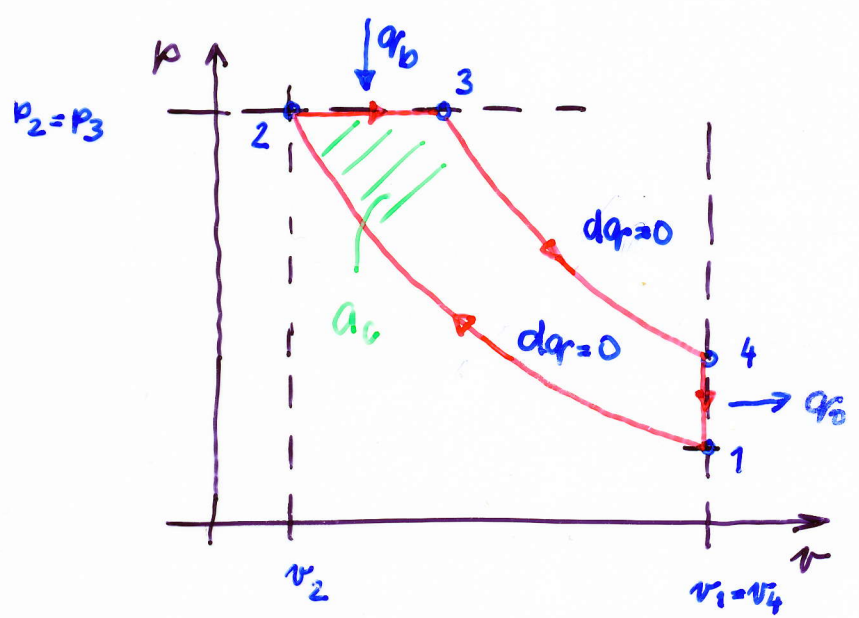
$\eta_t \uparrow$ ak $\epsilon = \frac{v_1}{v_2} \uparrow$ a $\varphi = \frac{v_3}{v_2} \downarrow$ (klesá)
 klesá ak

Pre vznetový motor býva:

- kompresný pomer ϵ : - nepreplňaný motor
 $\epsilon \in < 15, 24 >$
- preplňaný motor
 $\epsilon \in < 10, 15 >$

Stavové veličiny pre bod 2 (na konci kompresie):

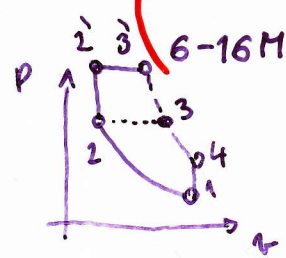
- nepreplňaný : $p_2 = 3,5 - 5 \text{ MPa}$ $T_2 = 850 - 1050 \text{ K}$
- preplňaný : $p_2 = 4,5 - 8 \text{ MPa}$ $T_2 = 950 - 1200 \text{ K}$



Bod 3: koniec spalovania

pre kombinované spalovanie

- nepreplňaný : p_3 T_3
 (6-9 MPa) 1900 - 2200 K
- preplňaný : p_3 T_3
 (6-16 MPa) 2000 - 2500 K



Bod 4 : koniec adiabat. expanzie

$$p_4 = 0,2 - 0,4 \text{ MPa}$$

$$T_4 = 1000 \sim 1200 \text{ K}$$

Bod 1 : začiatok sania : blízko atmosferického tlaku a teploty okolia

4) Porovnanie parametrov zážihového a vznetrového motora

Typ	ϵ	p_2	T_2	p_3	T_3	p_4	T_4
zážihový	7-10,5	1,1~1,8	550-570	2,5-5,5	2500-2800	0,35-0,5	1200-1500
vznetrový	15-24	3,5-5	850-1050	6-9	1900-2200	0,12-0,4	1000-1200
vznetrový s preplňovaním	10-15	4,5-8	950-1200	6-16	2000-2500	-	-

koniec kompresie koniec spalov. koniec expanzie

p [MPa]

T [K]

kombinované spaľovanie

tepelná účinnosť:

- zážihový :

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\epsilon^{\kappa-1}}$$

$\kappa = 1,4$ - ideálne

$$\epsilon \in (7 \sim 10,5)$$

$$\eta_t \in (0,54 \sim 0,609)$$

- vznetrový :

$$\eta_t = 1 - \frac{\varphi^{\kappa} - 1}{\kappa(\varphi - 1)} \cdot \frac{1}{\epsilon^{\kappa-1}}$$

$$(0,6 \sim 0,7)$$