

Termodynamické cykly motora

Motory s ideálnym spaľovaním

Najčastejšie používané motory v automobiloch sú štvortaktné. Striedajú sa v nich dva na seba naväzujúce sa cykly: v prvom cykle je plyn (zmes) stláčaný, spaľovaný a rozpína sa, v druhom cykle je využitý plyn vymenený. Najrozšírenejšie sú dva základné typy spaľovacích motorov:

1. Zážihové motory: Horenie je iniciované elektrickou iskrou (Spark ignited-SI).
2. Vznetové motory (VM): Horenie je spôsobené samovznietením v dôsledku kompresného tepla (Dieselové motory).

V ďalšom p reprezentuje tlak vo valci, V objem valca, ϑ teplotu vo valci, S entropiu, q tepelnú energiu plynu, u jeho vnútornú energiu, c_v merné teplo plynu pri konštantnom objeme, c_p merné teplo plynu pri konštantnom tlaku a h jeho entalpiu (súčet vnútornej energie sústavy a súčinu tlaku a objemu sústavy).

Zážihový motor

Prvý zážihový motor predstavil v roku 1862 Nikolaus Otto. Proces horenia môže byť modelovaný ako *izochorický proces*, kde sa predpokladá, že objem plynu je konštantný. pV diagram na [obr.](#) ilustruje, že objem plynu sa nemení medzi krokom 2 a 3. Pomer maximálneho a minimálneho objemu daný

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2}$$

sa nazýva kompresný pomer motora. Celkový cyklus pV diagramu môže byť matematicky opísaný takto:

1→2: Adiabatická kompresia $w_{1,2} = -mc_v(\vartheta_2 - \vartheta_1)$. Práca $w_{1,2}$ je použitá na stlačenie plynu, preto je negatívna.

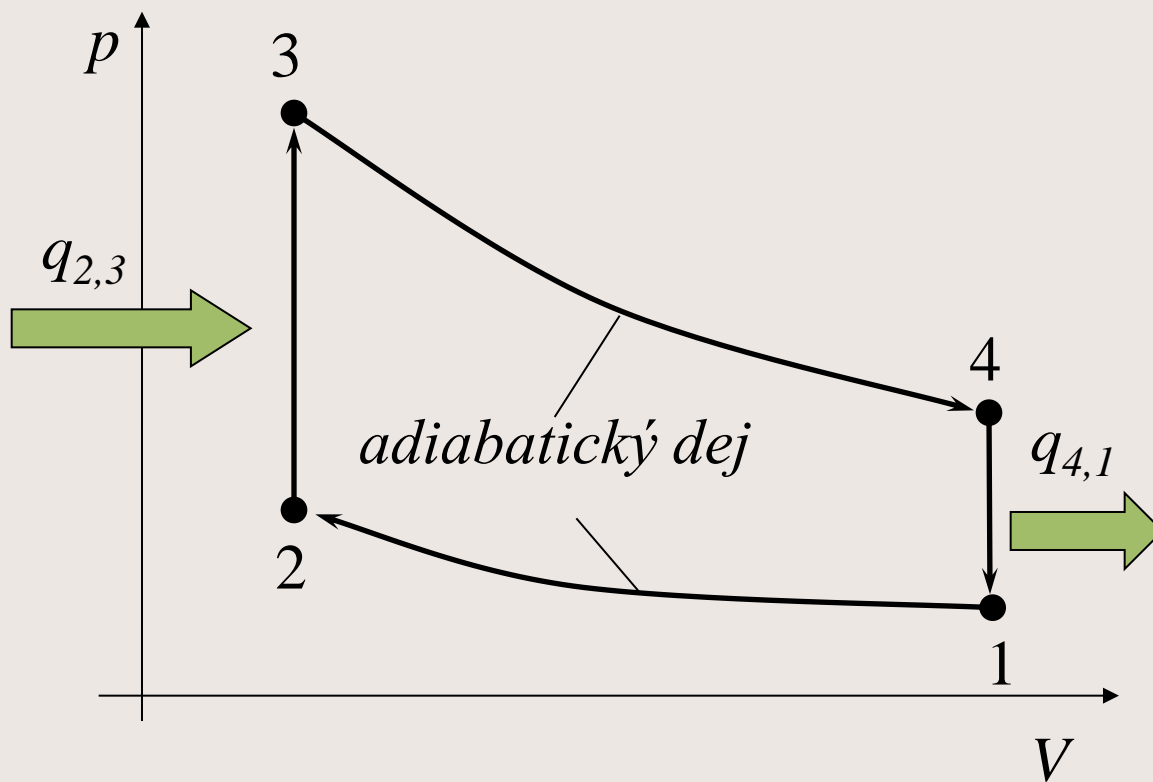
2→3: Izochorický (konštantný objem) prívod tepelnej energie $q_{2,3} = mc_v(\vartheta_3 - \vartheta_2)$. Nárast tepelnej energie je spôsobený horením plynu.

3→4: Adiabatická expazia $w_{3,4} = -mc_v(\vartheta_4 - \vartheta_3)$. Táto zmena stavu opisuje výkonný takt motora, kde $w_{3,4}$ je výstupná kinetická energia z plynu, ktorá je pozitívna ($\vartheta_3 > \vartheta_4$).

4→1: Izochorické tepelné straty $q_{4,1} = mc_v(\vartheta_1 - \vartheta_4)$. Tepelné straty $q_{4,1}$ sú spôsobené výmenou plynu. Zhorený horúci plyn je pumpovaný do výfukového potrubia a spaľovací priestor je plnený chladnou zmesou nespálených výparov paliva a vzduchu. $q_{4,1}$ je negatívne lebo $\vartheta_1 < \vartheta_4$.

Tepelná účinnosť motora je pomer všetkých kinetických energií ku vstupnej tepelnej energii celého cyklu.

$$\eta_{th} = \frac{w_{1,2} + w_{2,3} + w_{3,4} + w_{4,1}}{q_{2,3}} \cong 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}}, \quad \kappa = 1,4 \text{ Poiss. konšt. vzduch}$$



pV diagram procesu zážihového motora

Vznetový (Dieselový) motor

Rudolf Diesel tento motor vyvíjal v rokoch 1893 až 1897. Vo vznetovom motore prebieha horenie počas izobarickej zmeny stavu, keď sa piest pohybuje smerom dolu. Na začiatku toho procesu je horenie riadené vstreknutím paliva tak, aby sa udržiaval konštantný tlak pri expanzii z bodu 2 do 3. Zmena izobarického stavu je znázornená medzi bodmi 2 a 3 v [obr.](#) Ak je vstreknuté viac paliva, vzdialenosť medzi bodmi 2 a 3 je väčšia a väčší je aj pomer objemov V_3 a V_2 .

$$\rho = \frac{V_3}{V_2} = \frac{g_3}{g_2}$$

Tento pomer je nazývaný pomer vstrekovania alebo plnenie (záťaž). Pomer vstrekovania ρ má dopad na termodynamickú účinnosť.

1→2: Adiabatická kompresia $w_{1,2} = -mc_v(\vartheta_2 - \vartheta_1)$. Práca $w_{1,2}$ je použitá na stlačenie plynu, preto je negatívna (obdobne ako pri zážihovom motore).

2→3: Izobarický (konštantný tlak) zisk z tepelnej energie $q_{2,3} = mc_p(\vartheta_3 - \vartheta_2)$. V tomto procese horenie generuje tepelnú energiu $q_{2,3}$ a produkuje kinetickú energiu $w_{2,3} = mR(\vartheta_3 - \vartheta_2)$. (obr).

3→4: Adiabatická expazia $w_{3,4} = -mc_v(\vartheta_4 - \vartheta_3)$. Treba poznamenať, že $w_{3,4}$ pozitívna ($\vartheta_3 > \vartheta_4$).

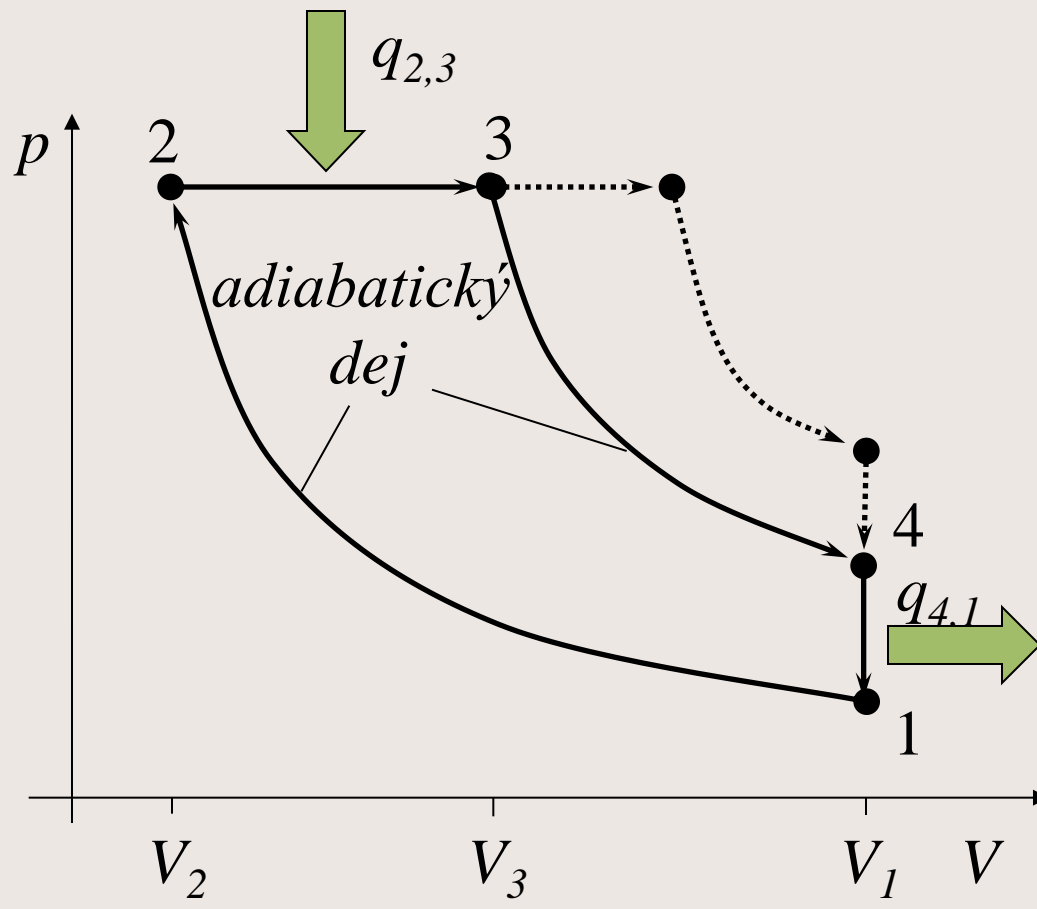
4→1: Izochorické tepelné straty $q_{4,1} = mc_v(\vartheta_1 - \vartheta_4)$. $q_{4,1}$ je negatívne lebo $\vartheta_1 < \vartheta_4$.

Ak $\kappa = c_p/c_v$ a $R=(c_p - c_v)$, môže byť termodynamická účinnosť daná

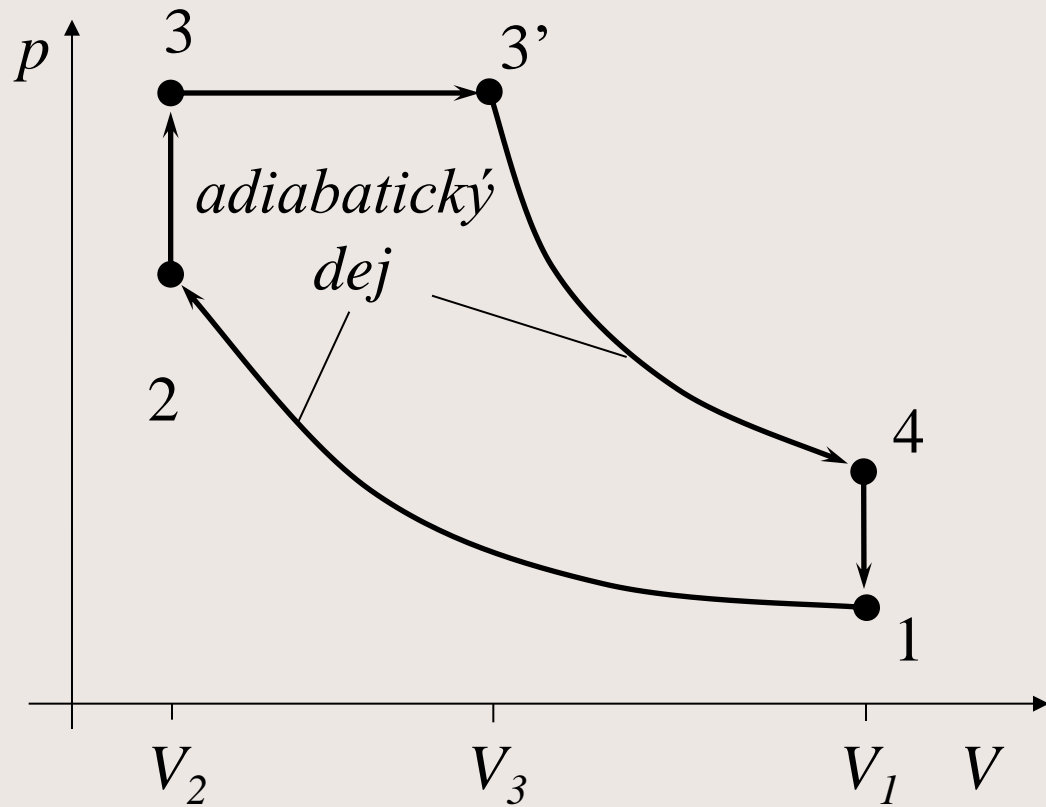
$$\eta_{\text{th}} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \frac{1}{\kappa} \frac{\rho^{\kappa} - 1}{\rho - 1}$$

Z uvedených vzťahov pre termodynamickú účinnosť je zrejmé, že ak zaťaženie ρ rastie termodynamická účinnosť klesá. Pri vysokom zaťažení má vznetrový motor nižšiu termodynamickú účinnosť ako zážihový motor, za predpokladu rovnakého kompresného pomeru ε pre obidva druhy motorov. Vznetové motory však majú podstatne vyšší kompresný pomer ako zážihové čo zlepšuje ich termodynamickú účinnosť.

Predchádzajúce modely opisovali ideálne termodynamické cykly motorov. Reálny stav lepšie vystihuje a viac možnosti na jeho tvarovanie poskytuje model, ktorý je označený ako Seilingerov proces. Pomocou tohto modelu je možné opisovať ako zážihové tak aj vznetrové motory. pV diagram tohto modelu je na [obr.](#)



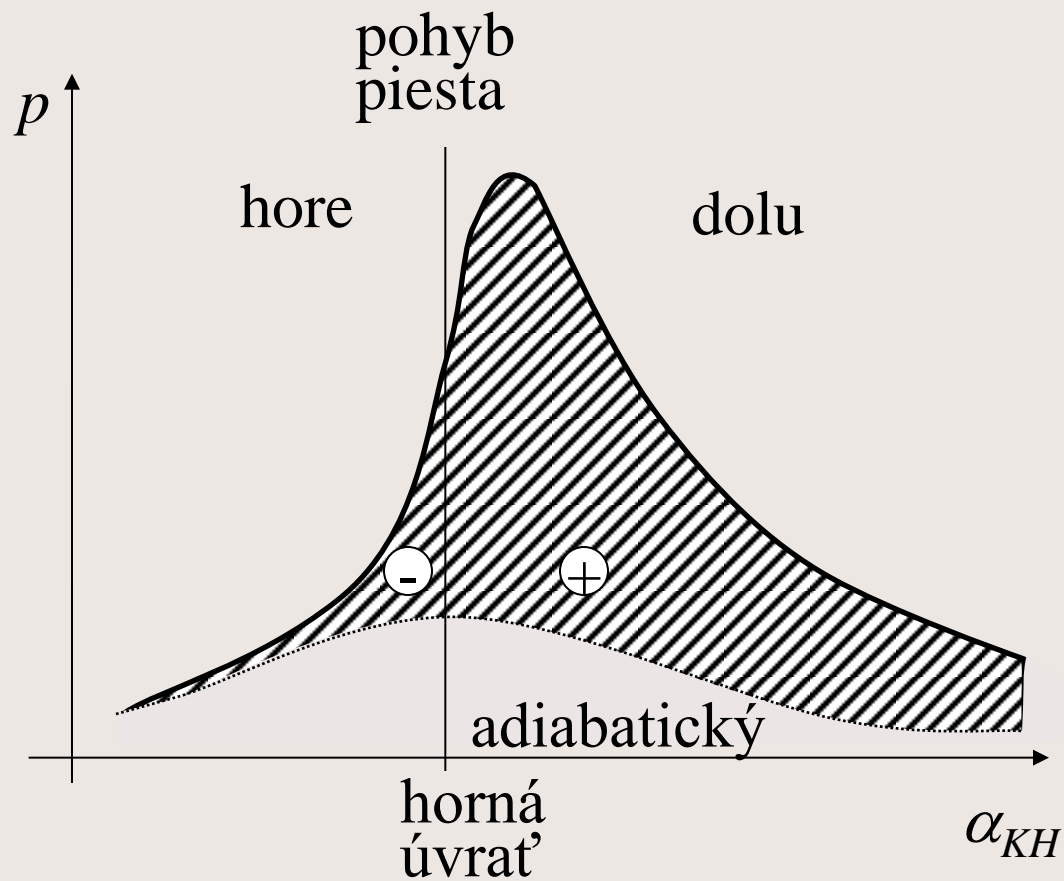
pV diagram procesu vznetového motora



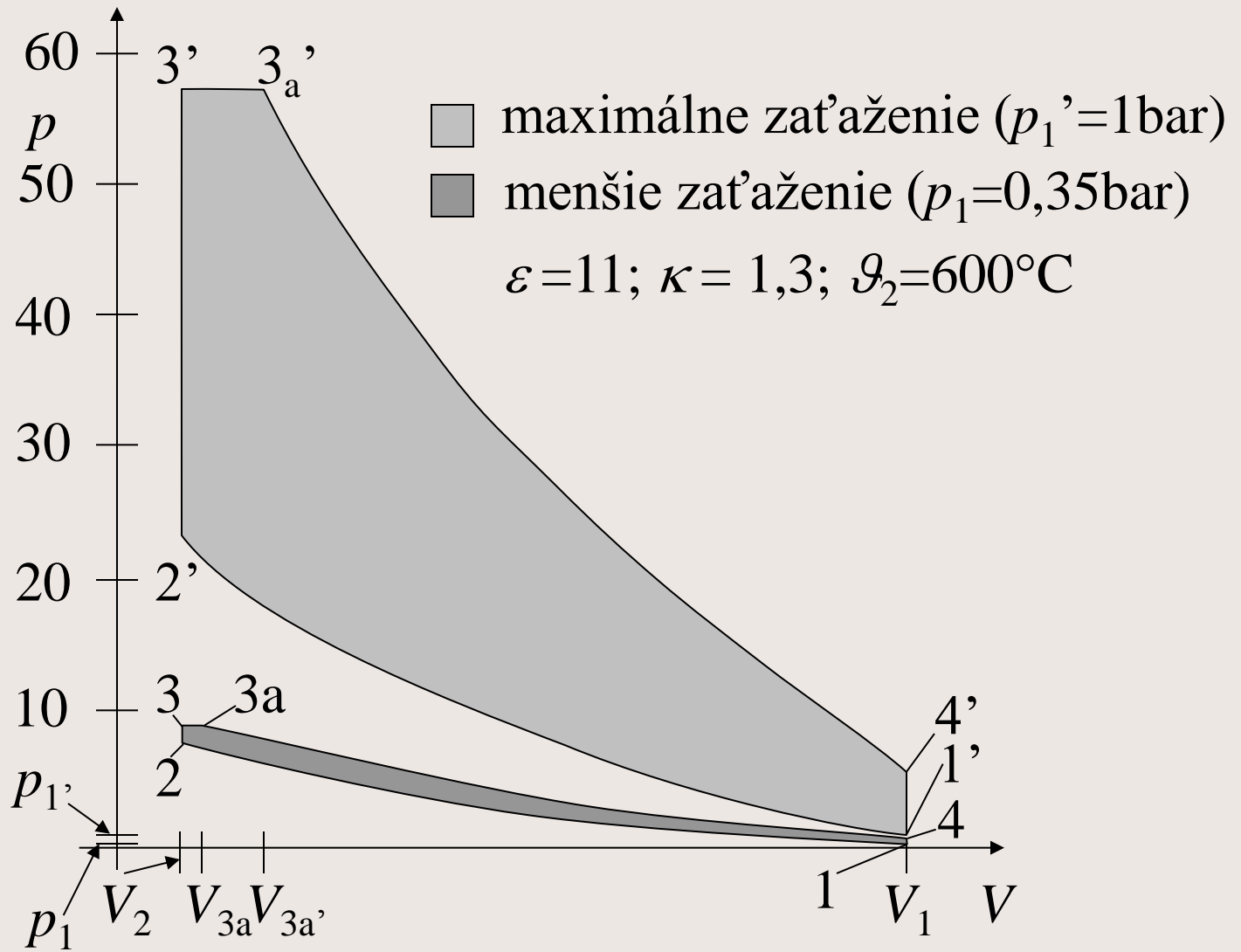
pV diagram Seilingerovho procesu

Porovnanie odlišných koncepcií motorov

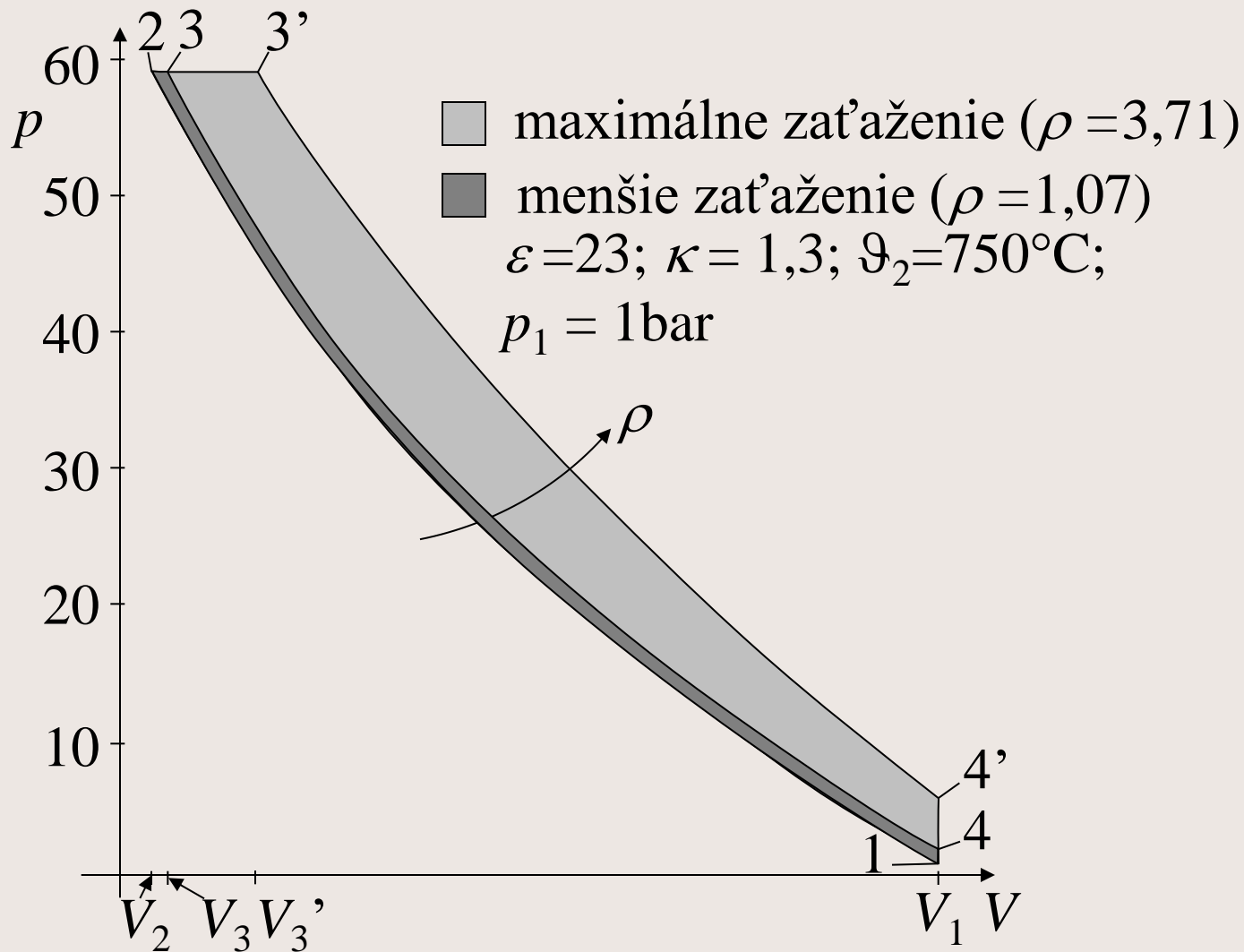
Na [obr.](#) je znázornený tlak vo vnútri valca počas horenia v závislosti od uhla otočenia kľukového hriadeľa. Kompresný pomer ε zážihových motorov je limitovaný maximálnym dosiahnutelným tlakom p_3 počas procesu horenia. V časti zaťaženia je maximálny tlak cyklu ďaleko pod týmto limitom, pretože výkon zážihového motora je riadený škrtaním v nasávacom potrubí, čiže modulovaný tlakom p_1 ([obr.](#)). Nízky kompresný pomer ε je žiadúci pre redukciu klepania ako aj materiálových nárokov. Na rozdiel od zážihových motorov sa pri vznetových motoroch maximálny tlak blíži dosiahnutelnému tlaku p_3 . Tým, že vznetové motory nemajú škrtané nasávacie potrubie (modulácia ρ), môže dosahovať vyššie kompresné pomery $\varepsilon = V_1/V_2$ než zážihové motory ([obr.](#)).



Priebeh hodnoty tlaku vo vnútri valca počas horenia



Zmeny zaťaženia zážihového motora (modulácia p_1)



Zaťažovanie vznetového motora (modulácia ρ)

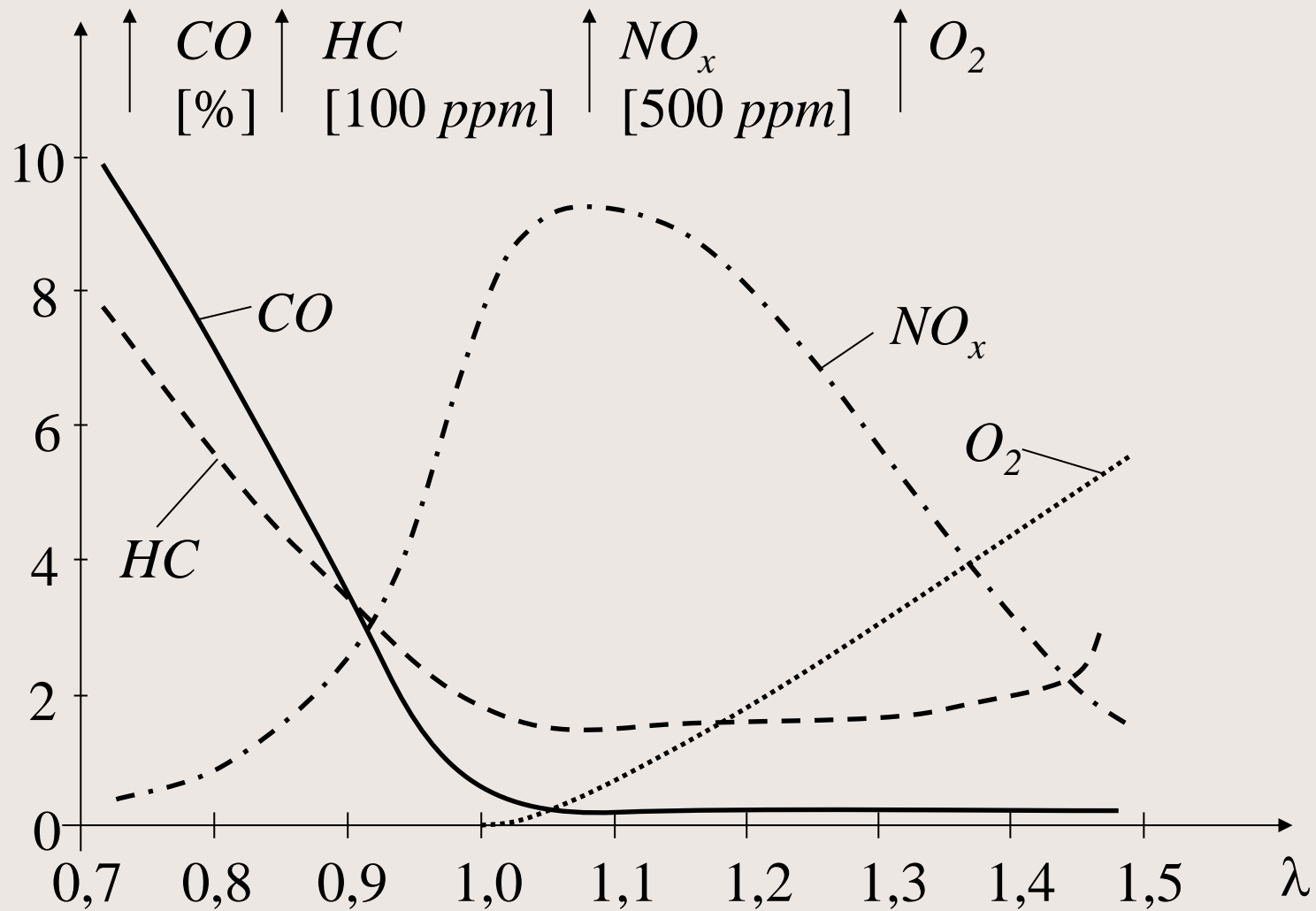
Štvortaktný motor pracuje nespojito: Horúci spaľovací cyklus je striedaný studeným cyklom výmeny plynu, pričom sa kľukový hriadel' otočí o 360° . V prvom cykle sú teploty od $2500-2800^\circ\text{C}$. VM majú vyššiu termodynamickú účinnosť než zážihové pre nižší a stredný výkon. VM s turbokompresorom majú tak tiež modulované p_1 . Aby sa nepresiahla maximálna teplota je pri týchto motoroch redukovaný kompresný pomer.

Ako je zrejmé z predchádzajúceho, SI motor a VM (bez „turba“) sú riadené odlišným spôsobom. Pri VM je palivo vstrekané priamo do spaľovacieho priestoru. Množstvo vstreknutého paliva na takt je priamoúmerné krútiacemu momentu motora. Množstvo vzduchu pri určitých otáčkach je konštantné. Pri SI motoroch je množstvo vzduchu ako aj paliva riadené. Palivo je vstreknuté do nasávacieho potrubia v režime nasávania, čím sa vytvára zmes vzduchu a paliva.

Chemický proces spaľovania benzínových motorov

Keď benzín horí v otvorenej atmosfére sú výsledné zlúčeniny CO_2 a H_2O , ktoré môžu byť považované za neškodné. Vo valcoch motora však vysoká teplota, vysoký tlak a obmedzený prísun kyslíka vedú k produkcii škodlivých plynov. Medzi najvýznamnejšie z nich patria tri regulované a kontrolované znečisťujúce zložky: nespálené uhľovodíky HC , oxid uhoľnatý CO a rôzne oxidy dusíka (NO , NO_2 , N_2O – spoločne označované NO_x). HC a CO sú v dôsledku nedokonalého spálenia paliva, kým NO_x je dôsledkom oxidácie atmosferického dusíka N (ktorá nastane ak teplota prekročí $1400^\circ C$):

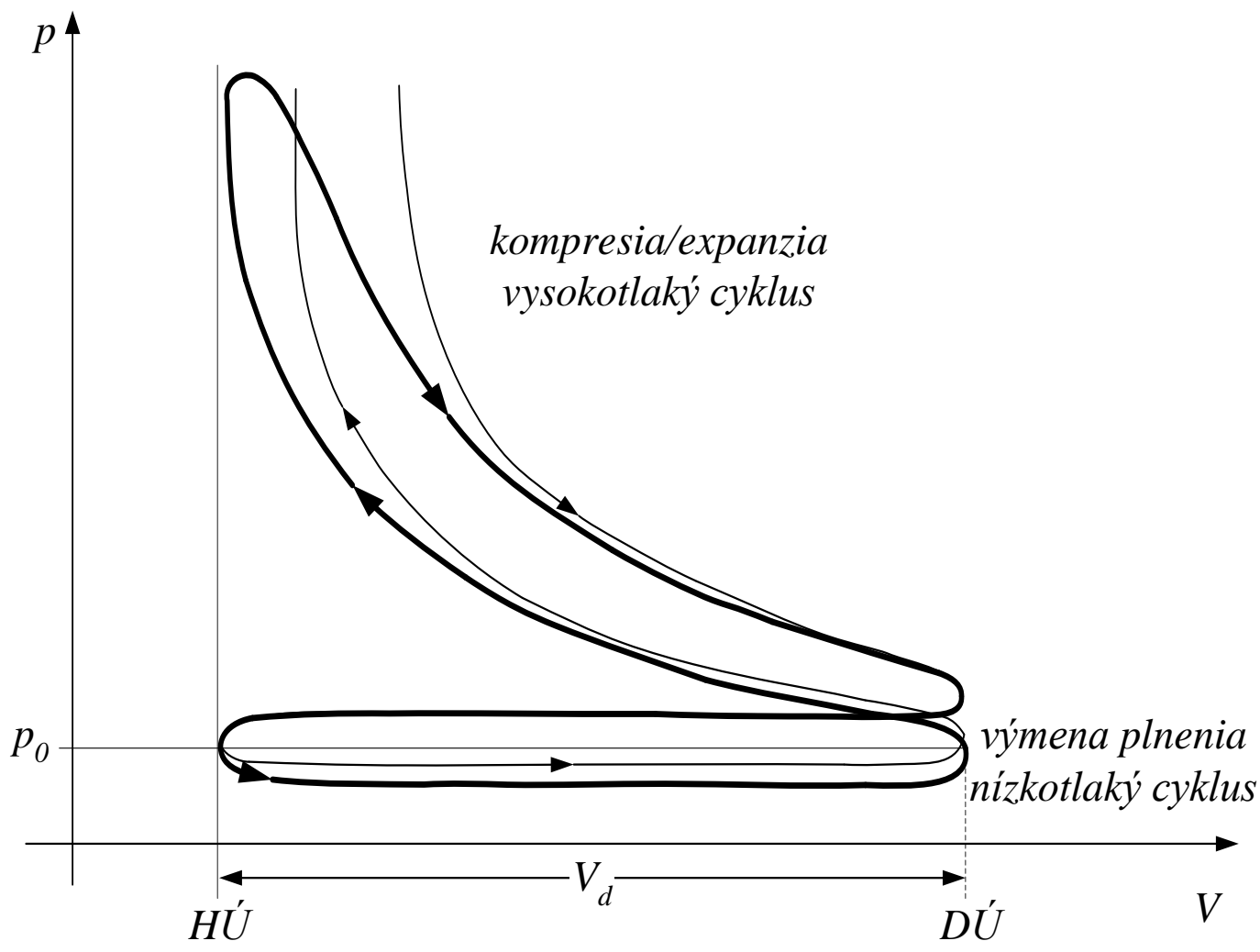




Emisie vo výfukových plynoch SI motora v závislosti od λ

Základy činnosti motora

Pre štvortaktný motor sú charakteristické dva striedajúce sa cykly. V prvých dvoch taktoch je zmes stláčaná, vybuchuje a rozpína sa. V druhom cykle (3. a 4. takt) zhorená zmes putuje do výfukového potrubia a valec sa plní čerstvou zmesou. Na obr. sú znázornené tieto dva cykly v p - V diagrame. Kľukový hriadeľ sa otočí o 360° počas jedného cyklu. SI a vznetové motory sú riadené odlišne: Vo VM je palivo vstrekané priamo do spaľovacej komory. Množstvu vstrekaného paliva na takt je úmerný krútiaci moment motora. Množstvo vzduchu je pre dané otáčky konštantné. Pri SI motoroch je riadené ako množstvo vzduchu, tak aj paliva. Keď je palivo vstrekané do nasávacieho potrubia, potom sa do valca dostáva takmer homogénna zmes. Mechanická práca, ktorá sa dodá počas cyklu spaľovania sa dá vypočítať z p - V diagramu integrovaním. Pre normovanú mechanickú prácu podľa zdvihového objemu potom platí:



$$w_i = \frac{1}{V_d} \sum_{j=1}^{VAL} \oint [p_j(V_j) - p_0] dV_j,$$

kde

w_i je (normovaná) **indikovaná špecifická práca**,

$V_d = VAL(V_1 - V_2)$ zdvihový objem všetkých valcov,

VAL je celkový počet valcov.

Hodnota w_i sa dá určiť meraním priebehu tlaku vo valci počas cyklu. w_i sa dá vyjadriť v závislosti od uhla natočenia krúkového hriadeľa (*Crankshaft*) ako

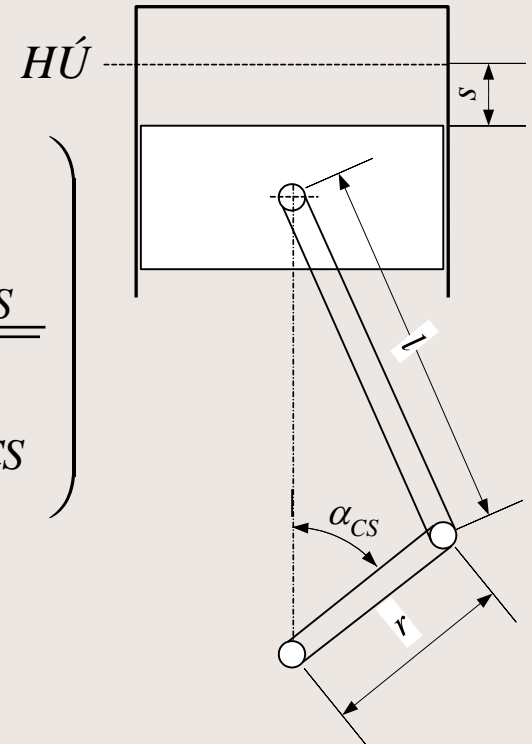
$$\begin{aligned} w_i &= \frac{1}{V_d} \oint \sum_{j=1}^{VAL} [p_j(\alpha_{CS}) - p_0] A_p \frac{ds_j(\alpha_{CS})}{d\alpha_{CS}} \frac{d\alpha_{CS}}{dt} \\ &= \frac{1}{V_d} \oint T_{comb}(\alpha_{CS}) d\alpha_{CS}. \end{aligned}$$

Krútiaci moment je tak

$$T_{comb}(\alpha_{CS}) = \sum_{j=1}^{VAL} [p_j(\alpha_{CS}) - p_0] A_p \frac{ds_j(\alpha_{CS})}{d\alpha_{CS}}$$

Kde A_p je plocha vrtania valca a s_j je zdvih piesta.

$$\frac{ds(\alpha_{CS})}{d\alpha_{CS}} = r \left(\sin \alpha_{CS} + \frac{r}{l} \frac{\sin \alpha_{CS} \cos \alpha_{CS}}{\sqrt{1 - \frac{r^2}{l^2} \sin^2 \alpha_{CS}}} \right)$$

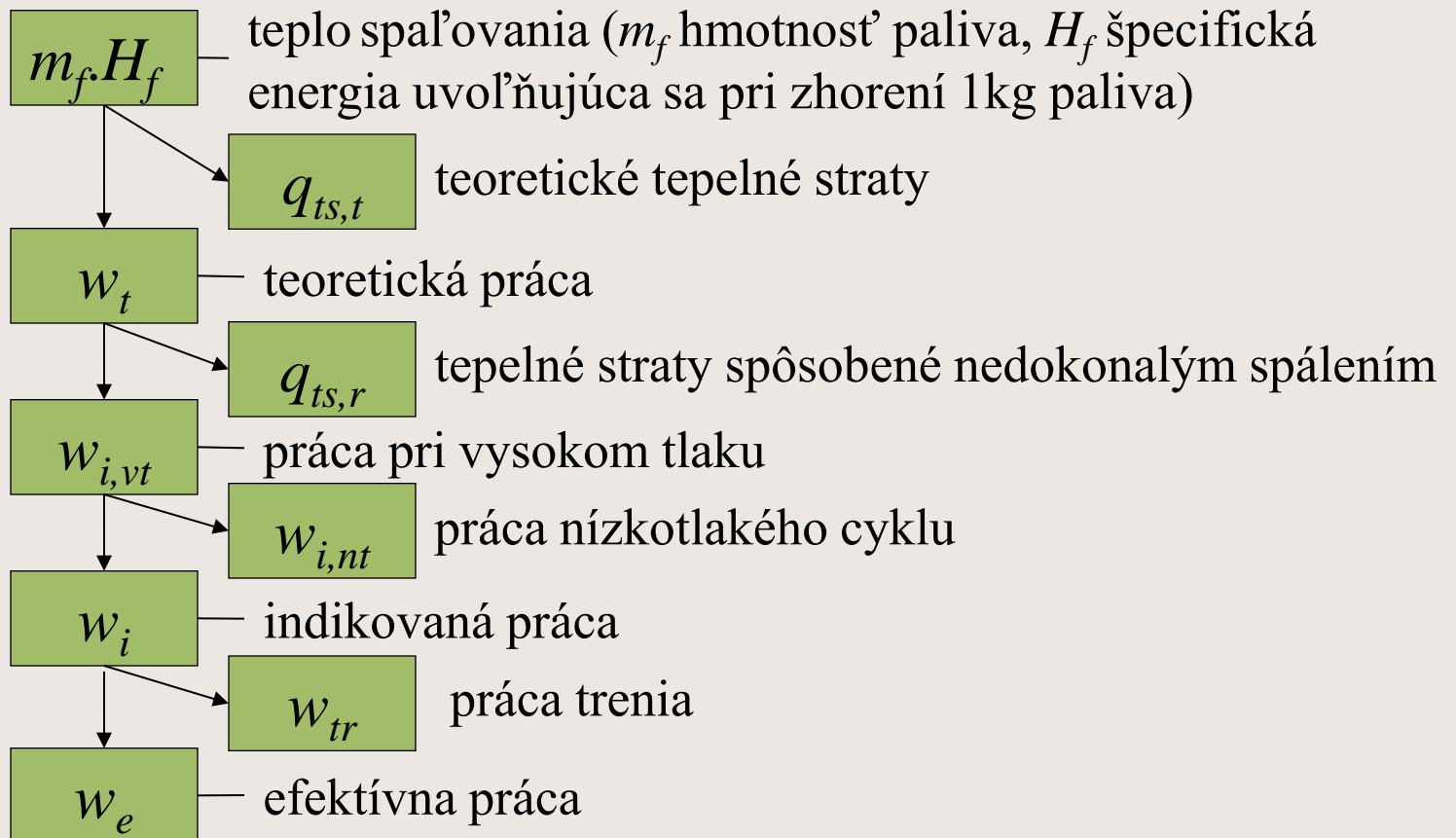


Ak P_i je indikovaný stredný výkon, ktorý je daný

$$P_i = \bar{T}_{comb} \frac{d\alpha_{CS}}{dt}, \text{ potom } w_i = \frac{2P_i}{V_d n},$$

kde n sú otáčky.

V skutočnosti je efektívna práca na objem podstatne menšia ako indikovaná práca w_i .



Efektívna termodynamická účinnosť η_e je tak daná

$$\eta_e = \frac{w_e}{m_f H_f} \frac{V_d}{VAL}$$

Indikovaná termodynamická účinnosť η_i je.

$$\eta_i = \frac{w_i}{2m_f H_f} \frac{V_d}{VAL}$$

Príklady pomerov sú v tabuľke

Typ motora	SI	Diesel	Veľký Diesel
w_i	33-35%	40-43%	45-48%
$q_{ts,t}$	23-28%	22-25%	12-14%
$q_{ts,r}$	37-44%	35-40%	26-33%

Pomer A/F (vzduch/palivo-Air/Fuel)

Pomer vzduchu a paliva (A/F) je veľmi dôležitý faktor procesu horenia motorov s vnútorným spaľovaním. Existuje niekoľko vplyvov, ktoré majú dopad na množstvo (hmotnosť) vzduchu, ktoré sa dopraví do valca. Sú to škrtenie toku vzduchu škrtiacou klapkou, aerodynamický odpor a rezonancie nasávacieho potrubia, spätné prenikanie už spálených plynov z valca do nasávacieho potrubia a iné. Množstvo vzduchu, ktoré by sa malo teoreticky dostať do zdvihového objemu V_d pri normalizovanom tlaku $p_0 = 1.013 \text{ bar}$ a hustote $\rho_0 = 1,29 \text{ kg/m}^3$ je vyjadrené teoreticky $m_{a,t} = \rho_0 V_d$. Pomer reálnej a teoretickej hodnoty je relatívne plnenie vzduchu: $\lambda_a = m_a / m_{a,t}$. Podobne pomer meranej hmotnosti paliva m_f k teoretickej $m_{f,t}$ je rovný relatívnemu plneniu palivom $\lambda_f = m_f / m_{f,t}$. Teoretická hmotnosť paliva $m_{f,t}$ sa rovná hmotnosti, ktorá je potrebná pre ideálne stechiometrické horenie s kyslíkom.

Za normálnych podmienok je stechiometrický pomer pre benzín $L_{st}=m_{a,t}/m_{f,t}=14,66$. Pomer A/F lambda je definovaný ako

$$\lambda = \lambda_a / \lambda_f,$$

čo môže byť rozšírené

$$\lambda = \frac{m_a}{m_f} \frac{m_{f,t}}{m_{a,t}} = \frac{1}{L_{st}} \frac{m_a}{m_f}$$

Pre ideálne stechiometrické horenie je $\lambda = 1$. A/F má dopad na efektívnu prácu w_e a efektívnu termodynamickú účinnosť η_e . Pomer A/F (resp. λ) môže byť ovplyvňovaný dvomi odlišnými spôsobmi, a to zmenou λ_a alebo λ_f .

1. Zmeny λ_f pri danom λ_a .

Typickou aplikáciou sú *SI* motory pracujúce v oblasti blízkej stechiometrickému pomeru. λ_a je určované vodičom – škrtiaca klapka.

Chudobná zmes ($\lambda > 1$): Je dodávané menšie množstvo paliva ako je potrebné pre stechiometrické horenie (redukované λ_f). V dôsledku toho sa znižuje $w_{i,vt}$ a efektívna práca klesá. V intervale $1 < \lambda < 1,1$ sa η_e zvyšuje v dôsledku vyšších hodnôt teploty horenia, čo vedie k zvýšenej emisii NO_x . Ak sa λ ďalej zvyšuje η_e sa znižuje v dôsledku nižšej práce $w_{i,vt}$ pri danej $w_{i,nt}$ (obr).

Bohatá zmes ($\lambda < 1$): Je dodávané väčšie množstvo paliva než ako je potrebné pre stechiometrické horenie (zvýšené λ_f). Prebytok paliva zvyšuje $w_{i,vt}$ a efektívnu prácu. Pre $\lambda < 0,9$ dochádza k neúplnému spáleniu paliva a tým k zvýšenej emisii HC aj znižovaniu w_e . Pre $\lambda < 1$ je termodynamická účinnosť vždy klesajúca (obr).

2. Zmeny λ_a pri danom λ_f .

Typickými aplikáciami sú *SI* motory v časti zaťaženia a dieselové motory. Relatívne plnenie λ_f je určované vodičom.

Chudobná zmes ($\lambda > 1$): Je dostupné väčšie množstvo vzduchu, než je potrebné pre stechiometrické horenie (väčšie λ_a). Stúpa vysokotlaká práca $w_{i,vt}$, kým nízkotlaká práca $w_{i,nt}$ ostáva konštantná, čím stúpa efektívna práca w_e aj termodynamická účinnosť η_e . Je treba poznamenať, že chudobná zmes je menej zápalná. Pri *SI* motoroch stúpa oneskorenie medzi okamihom iskry a úplným zhorením. Je treba zamedziť nezapáleniu napr. priamym prerušovaným vstrekom do valca, ktoré vytvorí bohatšiu zmes v okolí sviečky. Táto operácia je podobná ako pri dieselových motoroch. Horenie je iniciované buď iskrou alebo samovznietením vysokým kompresným pomerom. Motor môže pracovať iba do jeho maximálneho plnenia (maximálne λ_a). V dôsledku činnosti v ochudobnenom režime je možné sa pre určitý zdvihový objem priblížiť jeho maximálnemu výkonu, avšak nedosahuje sa .

Bohatá zmes ($\lambda < 1$): Bolo dodané menšie množstvo vzduchu ako je potrebné pre stechiometrické horenie (znížené λ_a). To vedie k zníženiu aj účinnosti η_e aj efektívnej práce w_e . Neúplné zhorenie vedie k vyššej emisii *HC* a redukcii $w_{i,vt}$.

V obr je vyjadrená závislosť efektívnej práce a efektívnej termodynamickkej účinnosti od λ , za predpokladu optimálneho riadenia časovania vstrekovania a zapalovania. V motoroch sa môže používať recirkulovaný výfukový plyn namiesto čerstvého vzduchu aby sa zvýšilo relatívne plnenie λ_a . Pokiaľ je dostupné dostatočné množstvo vzduchu pre horenie tak sa to podobá režimu so zvýšeným λ .

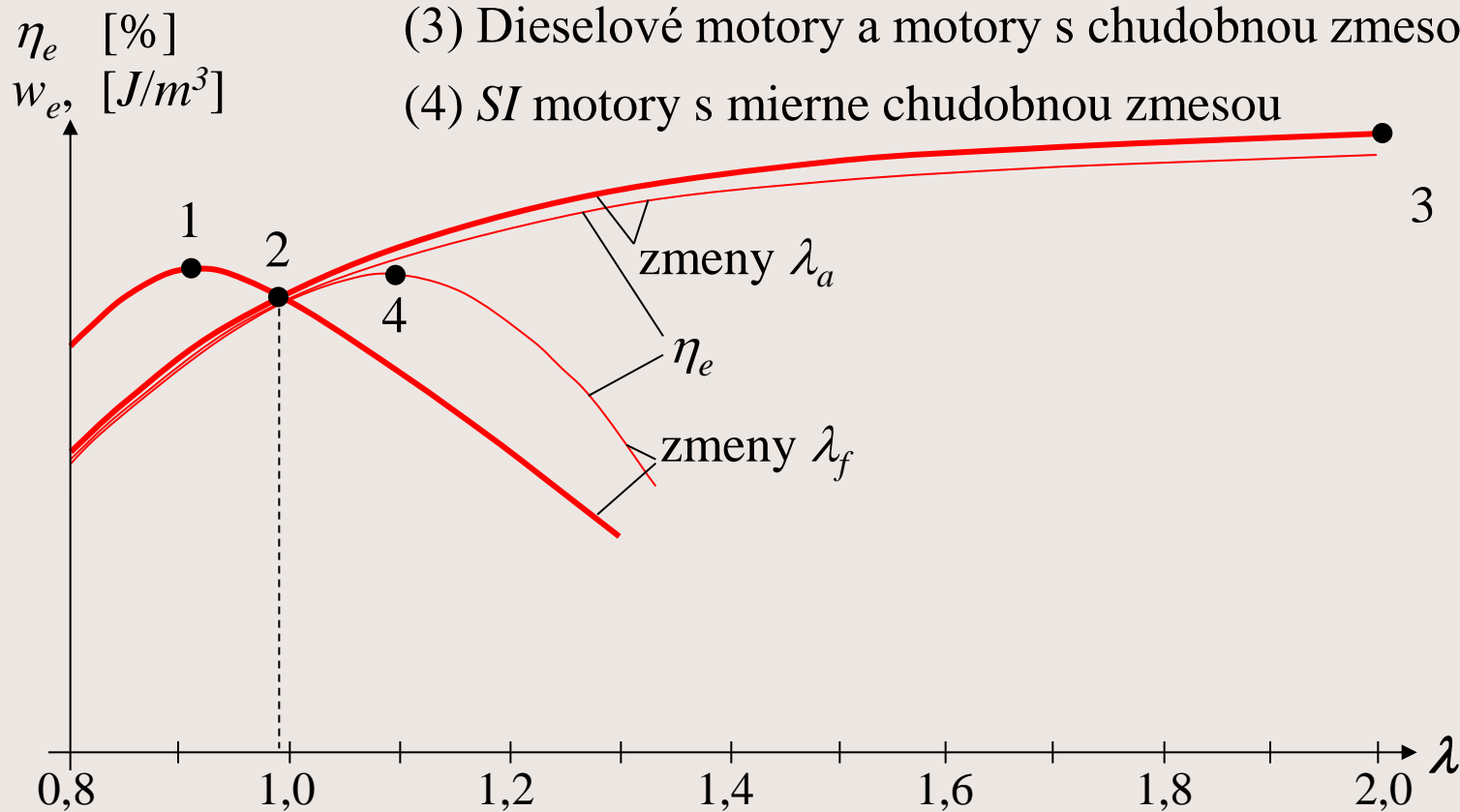
Recirkuláciou sa redukujú emisie NO_x v dôsledku zníženia teplotných špičiek.

(1) *SI* motory s výstupom maximálneho výkonu

(2) Stechiometrické *SI* motory

(3) Dieselové motory a motory s chudobnou zmesou

(4) *SI* motory s mierne chudobnou zmesou



Koncepcie motorov

SI motor je riadený plnením vzduchu λ_a . Realizuje sa to škrtením vzduchu, ktorý vstupuje do motora. Plnenie palivom λ_f je následne riadené tak, aby sa dosahoval daný pomer λ . Rozsah λ je limitovaný schopnosťou zmesi zapáliť sa iskrou. Konvenčné **SI** motory pracujú s takmer homogénnou zmesou v rozsahu ($0,9 < \lambda < 1,3$). Motory s chudobnou zmesou pracujú s veľmi ochudobnenými zmesami, ktoré sú podobné dieselovým motorom. Zapálenie je zabezpečené rozvrstveným vstrekováním tak, aby v okolí sviečky vznikla dostatočne bohatá zmes.

Vznetový motor je riadený plnením λ_f . Nasávacie potrubie nie je škrtené. Plnenie vzduchom λ_a je vždy maximálne, preto λ sa mení v širokom rozsahu. Zapálenie aj veľmi chudobnej zmesi je možné, pretože distribúcia zmesi v spaľovacej komore je nehomogénna. Takéto nehomogénne zmesi horia žltým plameňom.

Priemerný pomer λ by nemal klesnúť pod hodnotu 1,3 aby sa zamedzilo vzniku sadzí. Pretože efektívna práca je daná množstvom injektovaného paliva, plnenie musí byť obmedzené pri dosiahnutí maximálnych otáčok. Inak sa výkon motora môže ďalej zvyšovať a to môže rýchlo viesť k samodeštrukcii. Palivo môže byť vstrekované v dvoch krokoch. Najskôr sa vstrekne malé množstvo paliva, ktoré naštartuje proces horenia. Druhý – hlavný vstrek potom vedie k menším špičkám tlaku a teploty a tým aj k zníženiu NO_x emisii a iných splodín. Eventuálne môže byť vstrekovanie rozložené do viacerých krokov.

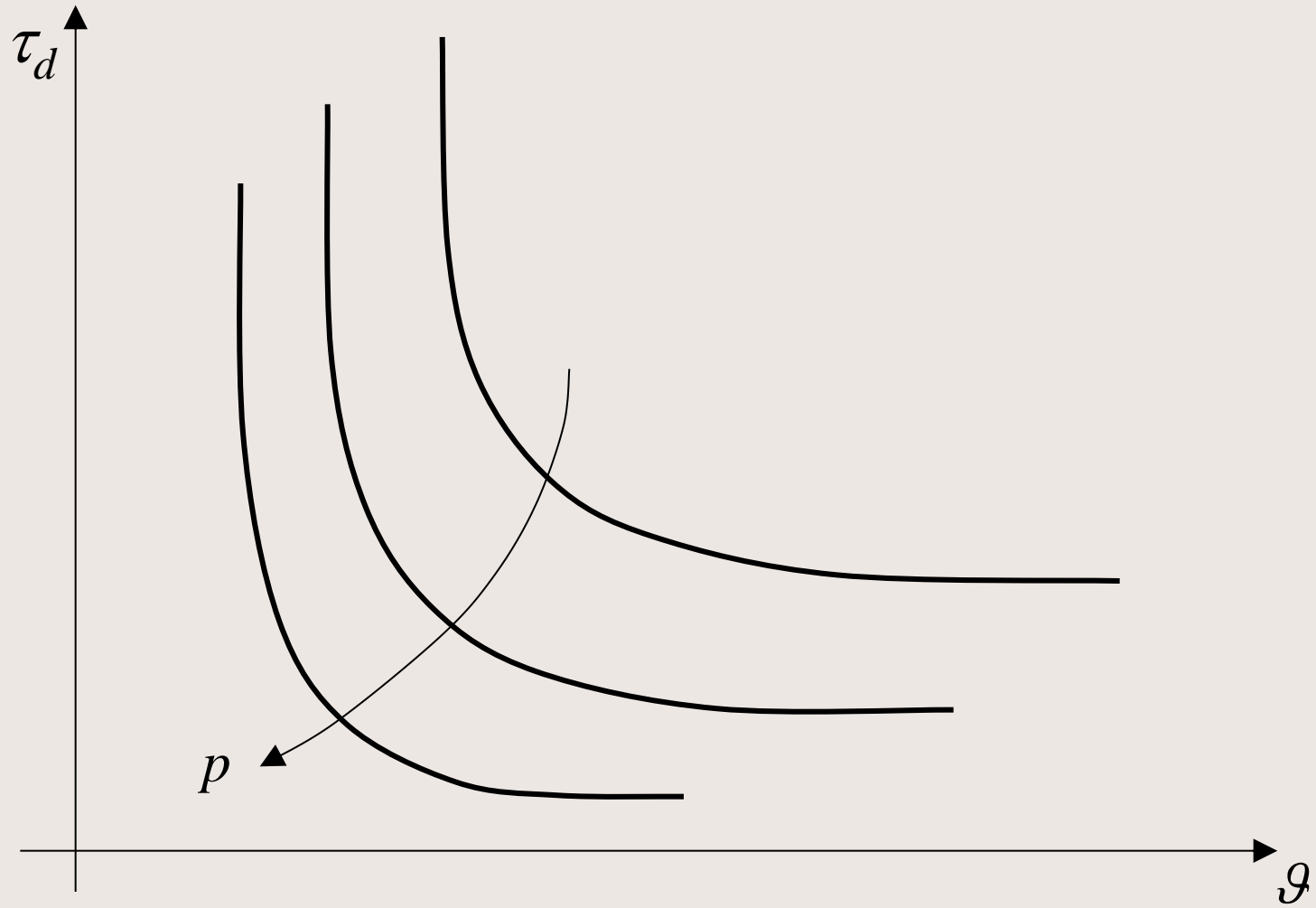
SI motory s chudobnou zmesou sú kompromisom medzi stechiometrickými SI motormi a dieselovými motormi. V režime zaťaženia pracuje s veľmi vysokým λ . Správnym návrhom injekčného tlaku, vstrekovacej trysky a turbulenciou vzduchu sa zabezpečuje vrstvené plnenie s dostatočnou bohatosťou zmesi v okolí zapalovacej sviečky.

Výsledné horenie sa podobá horeniu dieselových motorov (nehomogénna zmes, žltý plameň). Nižší obsah splodín sa dosahuje rozdelením vstrekovania do dvoch fáz. Pri vysokých zaťaženiach sa pracovný režim presúva z režimu veľmi chudobných zmesí na stechiometrické zmesi. Zdvihový objem dieselových motorov a *SI* motorov s chudobnou zmesou musí byť pre dosiahnutie rovnakého maximálneho výkonu až o 60% väčší ako pre stechiometrické *SI* motory. Preto dieselové a *SI* motory s chudobnou zmesou bývajú vybavené turbodúchadlami, čo zvyšuje hodnotu λ_a pre daný zdvihový objem.

Vznietenie zmesí

Teória kinetiky plynov považuje plyny ako oblak molekúl s danou distribúciou ich rýchlosti, ktorá závisí od teploty. Kolízia rozličných molekúl spustí chemickú reťazovú reakciu ak ich kinetická energia prekročí určitý prah aktivačnej energie. Pravdepodobnosť kolízie teda narastá s koncentráciou molekúl a teplotou. Chemická reakcia musí tak byť naštartovaná vysokou teplotou. Za príhodných podmienok je impulzívne zapálenie iskrou dostatočné pre iniciovanie procesu horenia v mieste zapalovacej sviečky. Zmes musí vykazovať λ v rozsahu (0,9-1,3) a jej tlak (respektíve teplota) musí byť nad kritickým prahom určitú dobu.

Na dobu oneskorenia samovznietenia má vplyv množstvo faktorov, ako napr. pozícia zapalovacej sviečky atď. Existuje empirický vzťah [Kiencke] medzi dobou oneskorenia vznietenia a strednou teplotou, resp. stredným tlakom. Preto majú motory s turbodúchadlom oproti atmosféricky plneným motorom oneskorený čas vstreku asi o 10° .



Šírenie plameňa

Rýchlosť šírenia plameňa závisí od dvoch zložiek:

- **Rýchlosť horenia:** Horenie sa šíri skrz zmes napr. rýchlosťou 1 m/s.
- **Transportná rýchlosť:** Samotný horiaci plyn je vírený pohybujúcim sa piestom, ktorý vytvára turbulencie v spaľovacej komore. Transportná rýchlosť je zhruba úmerná rýchlosti pohybu piesta a tá závisí od otáčok motora. Pri nízkych otáčkach môže byť transportná rýchlosť zvýšená turbulenciami, ktoré vznikajú pri nasávaní na nasávacom ventile. Turbulencie zvyšujú rýchlosť horenia úmerne s otáčkami motora.

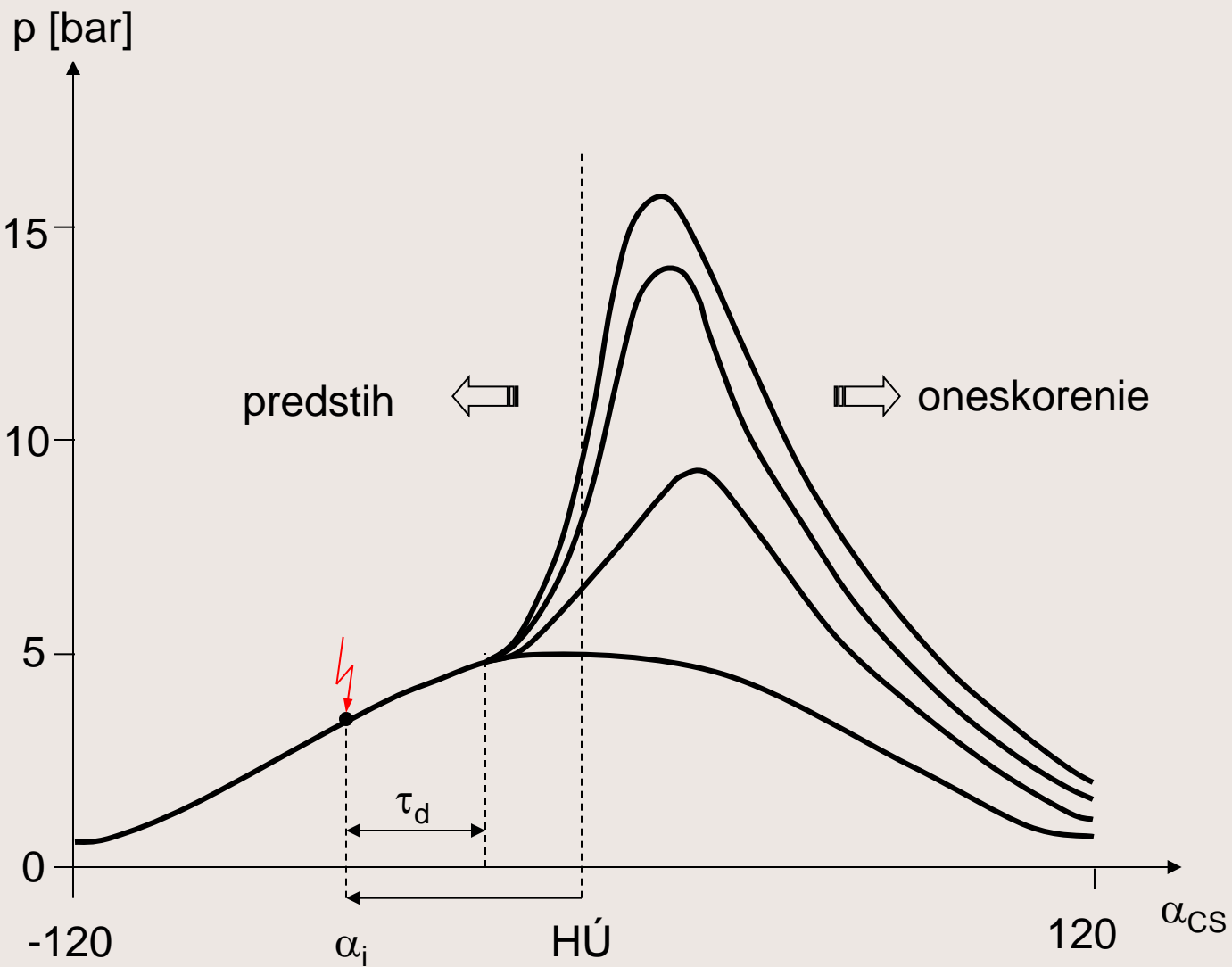
Konverzia energie

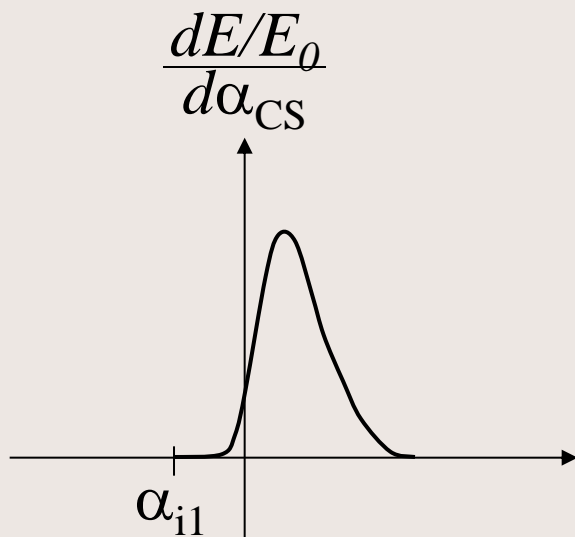
Priebeh tlaku vo vnútri valca v závislosti od uhla natočenie kľukového hriadeľa α_{CS} je na [obr.](#) Tlak začne narastať až po uplynutí doby τ_d od okamihu zapálenia v mieste α_i . Maximum tlaku sa mení od cyklu k cyklu. Oneskorenie vzplanutia τ_d bolo opísané predtým a závisí tiež od typu paliva (firmy adaptujú ich palivá podmienkam počasia = - zima, leto).

Konverzia energie spôsobená horením, pri rozličnom λ je znázornená na [obr.](#) V obrázku je zmena tepelnej energie vzhľadom k zmene uhla α_{CS} normalizovaná celkovou tepelnou energiou a preto je tvar relatívnej zmeny vždy rovnaký.

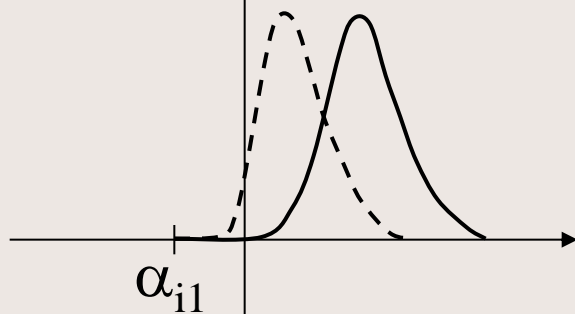
Ak λ narastá, oneskorenie τ_d tiež narastá. Pri rovnakom predstihu α_{i1} by teda bola konverzia energie oneskorená. Z toho dôvodu sa pri narastajúcom λ musí zväčšovať uhol predstihu na α_{i2} , čím sa pozícia konverzie energie optimalizuje. Je treba poznamenať, že vysoké hodnoty λ zvyšujú varianciu resp. rôznorodosť τ_d .

Uhol predstihu zapálenia musí byť stanovený hľadaním kompromisu medzi spotrebou paliva, emisiami a klepaním. Podobný postup sa používa pre stanovenie uhla, pri ktorom dochádza k vstreku pri VM.

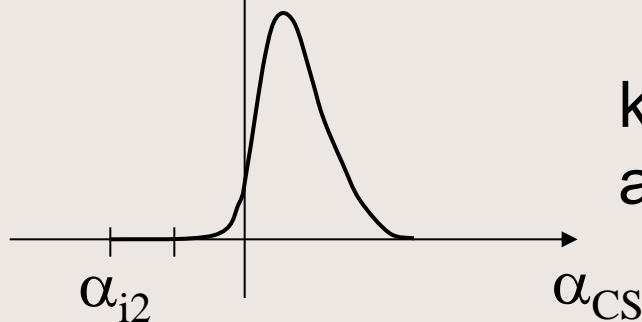




konverzia energie pri $\lambda=1$
a uhle predstihu α_{i1}



konverzia energie pri $\lambda=1,2$
a uhle predstihu α_{i1}



konverzia energie pri $\lambda=1,2$
a zväčšenom uhle predstihu α_{i2}

Riadenie množstva paliva

Pomer λ je dôležitým parametrom pri riadení množstva paliva a je závislý od stratégie riadenia:

bohatá zmes $\lambda < 1$: (dnes režim studeného motora, staré autá—aj pri vysokom plnení),

stechiometrická zmes $\lambda = 1$: nutné pre správnu činnosť trojcestného katalyzátora, akceptovateľný výkon, pri vysokých plneniach je dobrým kompromisom medzi výkonom a emisiou splodín,

mierne chudobná zmes $1 < \lambda < 1,5$: dobrá účinnosť ale zvýšená hodnota emisií NO_x , staršie autá to využívajú v určitej časti plnenia,

chudobná zmes $\lambda > 1,5$: vysoká účinnosť, emisie NO_x sú však stále vysoké, čím je potrebný katalyzátor pre NO_x , táto metóda je použitá v motoroch s CHZ v časti zaťaženia.

Množstvo injektovaného paliva závisí od týchto parametrov:

- nasaté množstvo vzduchu za čas (dm_a/dt),
- tlak v nasávacom potrubí v *SI* motoroch,
- uhol natočenia škrtiacej klapky a jeho derivácie (*SI* motor),
- otáčky motora n ,
- uhol natočenia kľukového hriadeľa (referenčný valec),
- teplota motora,
- teplota okolitého vzduchu,
- napätie batérie.

Hlavné funkcie riadenia paliva:

- riadenie vstrekovanej paliva za čas (dm_f/dt), odvádza sa od množstva nasatého vzduchu za čas a požadovaného λ ,
- obohacované vstrekovanie po studenom štarte - *SI* motory,
- zvýšené plnenie λ_a alebo λ_f pri studenom motore z dôvodu vyššieho trenia motora,

- kompenzácia dynamiky nasávacieho traktu – *SI* motor,
- kompenzácia dynamiky filmu paliva v nasávacom trakte (tento jav je teplotne závislý - zrážanie paliva na stenách),
- blokovanie paliva pri jazde zotrvačnosťou – znižuje spotrebu asi o 5%,
- meraná hmotnosť toku vzduchu je kompenzovaná podľa teploty a tlaku okolitého vzduchu,
- riadenie voľnobežných otáčok,
- obmedzenie maximálnych otáčok zablokovaním paliva,
- riadenie hodnoty λ ,
- riadenie recirkulácie výfukových plynov.

Výpočet doby vstreku

Dodávka paliva je riadená **dobou vstreku** t_{inj} , počas ktorej je vstrekovací ventil otvorený. Preto požadované množstvo paliva dodané pri jednom vstreku môže byť pri konštantnom dm_a/dt vypočítané podľa:

$$m_f = \frac{m_a}{L_{st}\lambda} = \frac{1}{L_{st}\lambda} \frac{dm_a/dt}{n} \frac{2}{VAL},$$

kde $L_{st}=14,66$. Množstvo vstrekovanej paliva m_f je úmerné dobe vstreku a odmocnine diferencii tlakov Δp medzi tlakom v prívode paliva a tlakom v nasávacom potrubí alebo medzi tlakom v prívode paliva a tlakom v spaľovacej komore (priame vstrekovanie). Predpokladá sa konštantná hustota paliva ρ_f a efektívna plocha otvoreného ventilu A_{eff} .

$$m_f \approx \rho_f \cdot A_{eff} \cdot \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho_f}} \cdot t_{inj}$$

Pri vstrekovaní do nasávacieho potrubia býva Δp okolo 5bar (aj menej), pri *SI* motoroch s priamym vstrekováním 400bar a pri *VM* až 2000bar.

V statickej prevádzke je tak doba vstreku úmerná

$$t_{inj} \approx \frac{1}{\lambda} \frac{dm_a/dt}{n} \frac{2}{VAL},$$

a pre referenčné λ_0

$$t_0 \approx \frac{1}{\lambda_0} \frac{dm_a/dt}{n} \frac{2}{VAL},$$

a pre konkrétne λ je doba vstreku

$$t_{inj} \approx \frac{\lambda_0}{\lambda} t_0.$$

Doba vstreku t_{inj} na jeden cyklus teda závisí od nasledujúcich hodnôt:

- **Rýchlosť toku hmotnosti vzduchu** dm_a/dt – musí byť merané. Systematické chyby merania môžu byť v niektorých senzoch kompenzované zohľadnením teploty a hustoty nasávaného vzduchu,
- **Hmotnosť vzduchu** m_a na takt – vypočíta sa z rýchlosti toku hmotnosti.
- **Referenčná hodnota** λ_0 – musí byť určená, napr. stechiometrická. Môže to byť realizované prostredníctvom vyhľadávacej tabuľky, ktorá umožňuje kompenzovať prípadné chyby senzorov, resp. aktuátorov -
 $\lambda_0 = \lambda_0(dm_a/dt, n)$.
- **Aktuálna hodnota** λ – závisí od viacerých faktorov ako napr. teplotne závislé obohacovanie pri zohrievaní motora a korekcie pre dynamické prechody. Pre dieselové motory je λ vždy väčšie ako 1,3.
- **Napätie palubnej siete** U_b - má vplyv na čas otvárania a zatvárania ventilu. Tento dopad môže byť kompenzovaný korekciou $t_{inj} + \Delta t(U_b)$

Namiesto priameho merania rýchlosti dm_a/dt , môže byť tento parameter odhadovaný z tlaku p_m v nasávacom potrubí alebo polohy klapky α_t (SI motory). Tok vzduchu do valca taktiež závisí od dynamiky tlakových zmien v nasávacom potrubí. Je funkciou

$$dm_a/dt = f_0(p_m, dp_m/dt, n),$$

pričom f_0 musí byť meraná pre všetky možné hodnoty dm_a/dt v statickom režime prevádzky motora a korigovaná podľa dynamiky zmien tlaku (zvyčajne tiež sa používa vyhľadávacia tabuľka).

Množstvo vzduchu cyklu výbuchu

Relatívne plnenie vzduchom λ_a môže byť pri nízkych otáčkach motora zvýšené akustickou rezonanciou nasávacích potrubí každého valca. Tieto rezonancie sú ukončované periodickým otváraním a zatváraním nasávacieho ventilu. Geometria nasávacích potrubí je navrhnutá pre rezonancie pri nižších otáčkach motora. Navrhované je to tak, aby maximum tlaku, ktoré je vytvorené rezonanciou sa vyskytlo na nasávacom ventile práve keď je otvorený. Vede to k zvýšenému toku vzduchu do spaľovacej komory, tým k zvýšeniu plnenia λ_a a k nárastu efektívnej práce w_e . Typické rezonančné frekvencie sú medzi 2000 a 3000 ot/min. Pre párne rezonančné frekvencie bývajú geometrické rozmery nasávacích potrubí príliš veľké. Frekvencia pulzovania vzduchu v nasávacom potrubí je

$$f_p = (n \cdot VAL) / 2.$$

Delenie 2 je v dôsledku nasávania iba v každom druhom cykle pri štvortaktnom motore. Napr. pre 6000 ot/min pre 4-VALcový motor je $f_p = 200\text{Hz}$.

Hmotnosť vzduchu na valec môže byť vypočítaná z rýchlosti dm_a/dt jej integrovaním cez periódu pulzovania

$$m_a = \int_{t_a}^{t_b} \frac{dm_a}{dt} dt$$

Hranice integrovania sú

$$t_b - t_a = \frac{1}{f_p} = \frac{2}{n \cdot VAL},$$

preto

$$m_a = \int_0^{\frac{1}{f_p}} \frac{dm_a}{dt} dt.$$

Plnenie vzduchom m_a môže byť teda vypočítané integrovaním signálu zo senzora rýchlosti toku vzduchu. Vzorkovacia frekvencia musí byť dostatočne vysoká aby sa zamedzilo aliasingu a preto býva 5-10 krát vyššia ako najvyššia frekvencia pulzovania. Prípadná nelinearita charakteristiky tohto senzora musí byť kompenzovaná ešte pred integrovaním. Lineárna charakteristika senzora sa môže získať násobením s jej inverzným tvarom. Tak môže byť potlačené aj jednosmerné posunutie zavedené integrovaním.

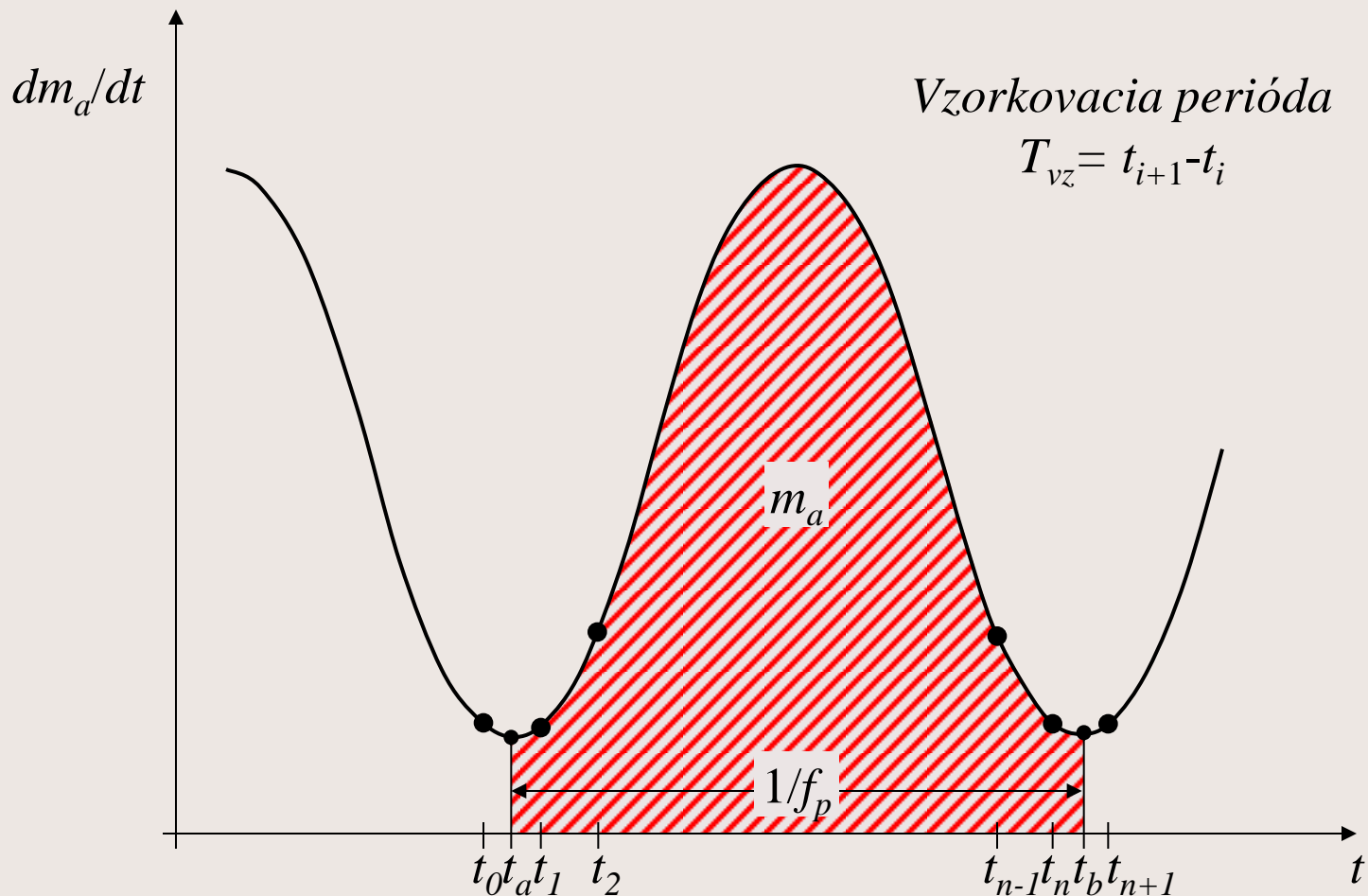
Správne časovanie integrovania (t_a, t_b) môže byť odvodené zo signálu uhla natočenia kľukového hriadeľa α_{CS} . Napr. ak senzor používa 60 zubov/ot kľukového hriadeľa, potom trvanie $t_b - t_a = 1/f_p$ je pre 6 valcový motor $\Delta\alpha_{CS} = 120^\circ$. Tomu odpovedá 20 zubov senzora natočenia kľukového hriadeľa. Samozrejme rýchlosť toku vzduchu je synchronizovaná časovo a nie s uhlom α_{CS} . Preto rýchlosť toku vzduchu dm_a/dt nie je vzorkovaná na začiatku (t_a) a na konci (t_b) a musí byť interpolovaná:

$$\frac{dm_a(t_a)}{dt} = \frac{dm_a(t_0)}{dt} \frac{t_1 - t_a}{T_{vz}} + \frac{dm_a(t_1)}{dt} \left(1 - \frac{t_1 - t_a}{T_{vz}} \right)$$

$$\frac{dm_a(t_b)}{dt} = \frac{dm_a(t_n)}{dt} \frac{t_{n+1} - t_b}{T_{vz}} + \frac{dm_a(t_{n+1})}{dt} \left(1 - \frac{t_{n+1} - t_b}{T_{vz}} \right)$$

Proces integrovania môže byť aproximovaný napr. lichobežníkovou metódou a m_a sa dá vyjadriť:

$$m_a \approx \frac{T_{vz}}{VAL} \left[\frac{dm_a(t_0)}{dt} \frac{(t_1 - t_a)^2}{T_{vz}^2} - \frac{dm_a(t_1)}{dt} \left(1 - \frac{(t_1 - t_a)^2}{T_{vz}^2} \right) + 2 \sum_{i=1}^n \frac{dm_a(t_i)}{dt} - \frac{dm_a(t_n)}{dt} \frac{(t_{n+1} - t_b)^2}{T_{vz}^2} + \frac{dm_a(t_{n+1})}{dt} \left(1 - \frac{(t_{n+1} - t_b)^2}{T_{vz}^2} \right) \right]$$



Hmotnosť vzduchu, získaná integrovaním rýchlosti toku hmotnosti vzduchu na intervale $t_b - t_a$

Riadenie zapalovania zážihových (SI) motorov

Vznetové motory nepotrebujú riadenie zapalovania, pretože horenie sa spúšťa samovznietením v dôsledku kompresného tepla. Vo vznetových motoroch nahrádza uhol predstihu uhol okamihu začiatku vstrekovania.

Riadenie uhla zapálenia

Správne časovanie okamihu zapálenia vzhľadom k celému pracovnému cyklu motora má hlavný dopad na spotrebu paliva a vznik emisií. Horenie vo valci môže byť rozdelené do dvoch fáz:

1. Oneskorenie horenia (časová úmernosť)

tlak a teplota vo valci sa v tom čase príliš nemenia.

Oneskorenie horenia τ_d závisí od teploty, tlaku a pomeru A/F. Oneskorenie môže vyjadrené ako uhol otočenia kľukového hriadeľa, ktorý narastá s narastajúcimi otáčkami motora.

2. Horenie (uhlová úmernosť)

Ekvivalentný uhol pootočenia kľukového hriadeľa je pre túto fázu temer konštantný v príslušnom pracovnom rozsahu motora. Pohybom piesta sú ovplyvňované turbulencie, ktoré narastajú s narastajúcimi otáčkami a tiež aj proces horenia.

Ak horenie začne príliš neskoro v dôsledku krátkeho predstihu, narastá emisia *HC* zložiek. Naopak, vysoké hodnoty tlaku vo fáze horenia, ak je predstih veľký spôsobujú nárast emisií *NO_x*. *NO_x* môžu byť redukované oneskorením okamihu zapálenia na úkor vyššej spotreby paliva (určenie správneho uhla predstihu je kompromisom).

Pre riadenie uhla predstihu sa používajú nasledujúce parametre:

- Tlak v nasávacom potrubí p_m
- Hmotnosť toku vzduchu m_a
- Uhol natočenia škrtiacej klapky α_t
- Pomer A/F λ
- Uhol natočenia klukového hriadeľa a informácia o hornej úvrati referenčného valca
- Teplota okolitého vzduchu \mathcal{G}_a
- Teplota motora \mathcal{G}_e
- Napätie v palubnej sieti U_b

Tieto parametre sú rovnaké aj pre riadenie množstva paliva.

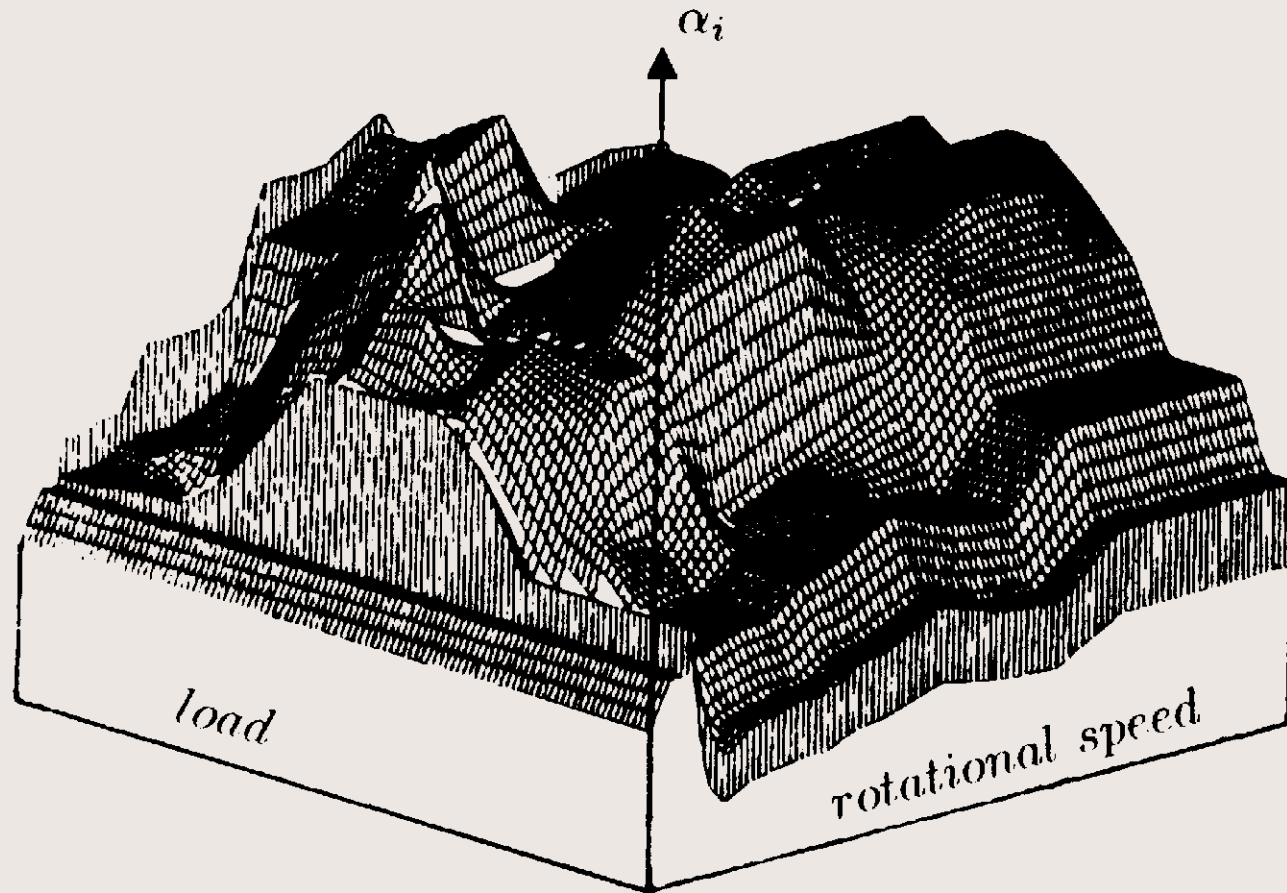
Uhol zapálenia α_i závisí od mnohých vplyvov:

- Uhol zapálenia α_i je funkciou zaťaženia motora, ktoré je aproximované dobou vstreku $t_{inj} \sim m_a / (n\lambda)$ a otáčok motora n . To môže byť vyjadrené tabuľkou (mapou) $\alpha_i = f(t_i, n)$. Prehľadávacia tabuľka taktiež odráža zmeny zapálenia v závislosti od zaťaženia a otáčok motora.
- Pomer λ určuje oneskorenie zapálenia τ_d .
- Skrátenie predstihu pri vysokej teplote okolia \mathcal{G}_a znižuje možnosť klepania. Môže byť použitá aj prevodná tabuľka medzi t_{inj} a \mathcal{G}_a .
- Zahrievanie motora pri nízkej teplote \mathcal{G}_e . Skrátenie predstihu oneskorí proces konverzie energie do fázy, kedy sa otvorí výfukový ventil. Výfukové potrubie a katalyzátor sú tak ohriate veľmi rýchlo.

- Stabilizácia otáčok voľnobehu. Zväčšenie predstihu pri nízkych otáčkach zvyšuje moment.
- Obmedzenie otáčok. Skrátenie predstihu v spojení s vypnutím vstrekovania.
- Skrátenie predstihu pri akcelerácii aby sa zamedzilo klepaniu.
- Uzavretá slučka riadenia klepania.
- Napätie palubnej siete má dopad na energiu dodávanú zapoľovaním pre zapálenie.

Na obr. Je znázornená mapa uhla predstihu v závislosti od zaťaženia motora a otáčok motora.

Množstvo vstrekovaného paliva a uhol predstihu sú dva najdôležitejšie parametre, ktoré majú vplyv na spotrebu paliva a produkované emisie.



Mapa uhla predstihu

Výkonový zosilňovač zapal'ovania

Výkonový tranzistor spína prúd, pretekajúci indukčnou cievkou zapal'ovania. Časovanie je riadené mikropočítačom riadiacej jednotky motora.

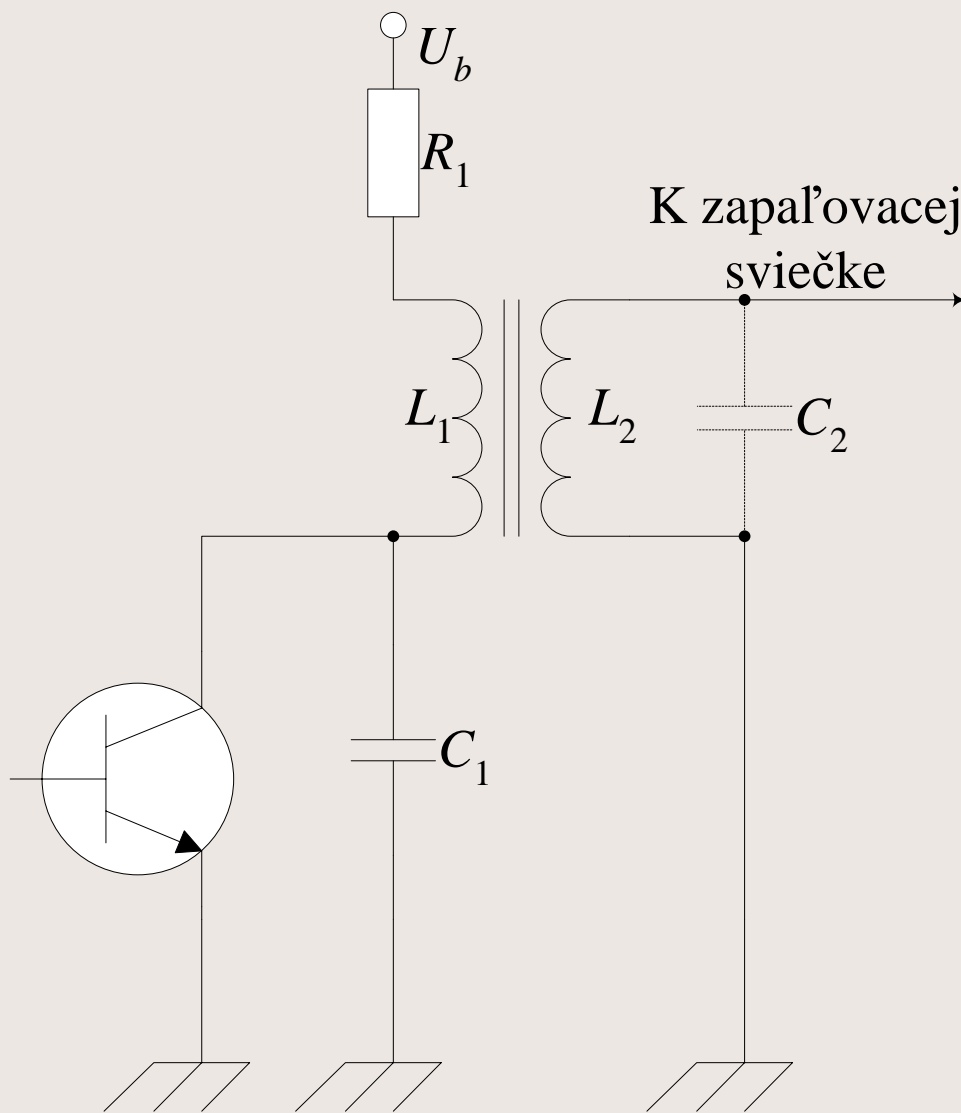
Na [obr.](#) Je znázornený výkonový zosilňovač zapal'ovania, pričom prúd indukčnou cievkou preteká ak je koncový tranzistor zopnutý a je:

$$i_1(t) = \frac{U_b - U_{CE}}{R_1} (1 - e^{-t/\tau})$$

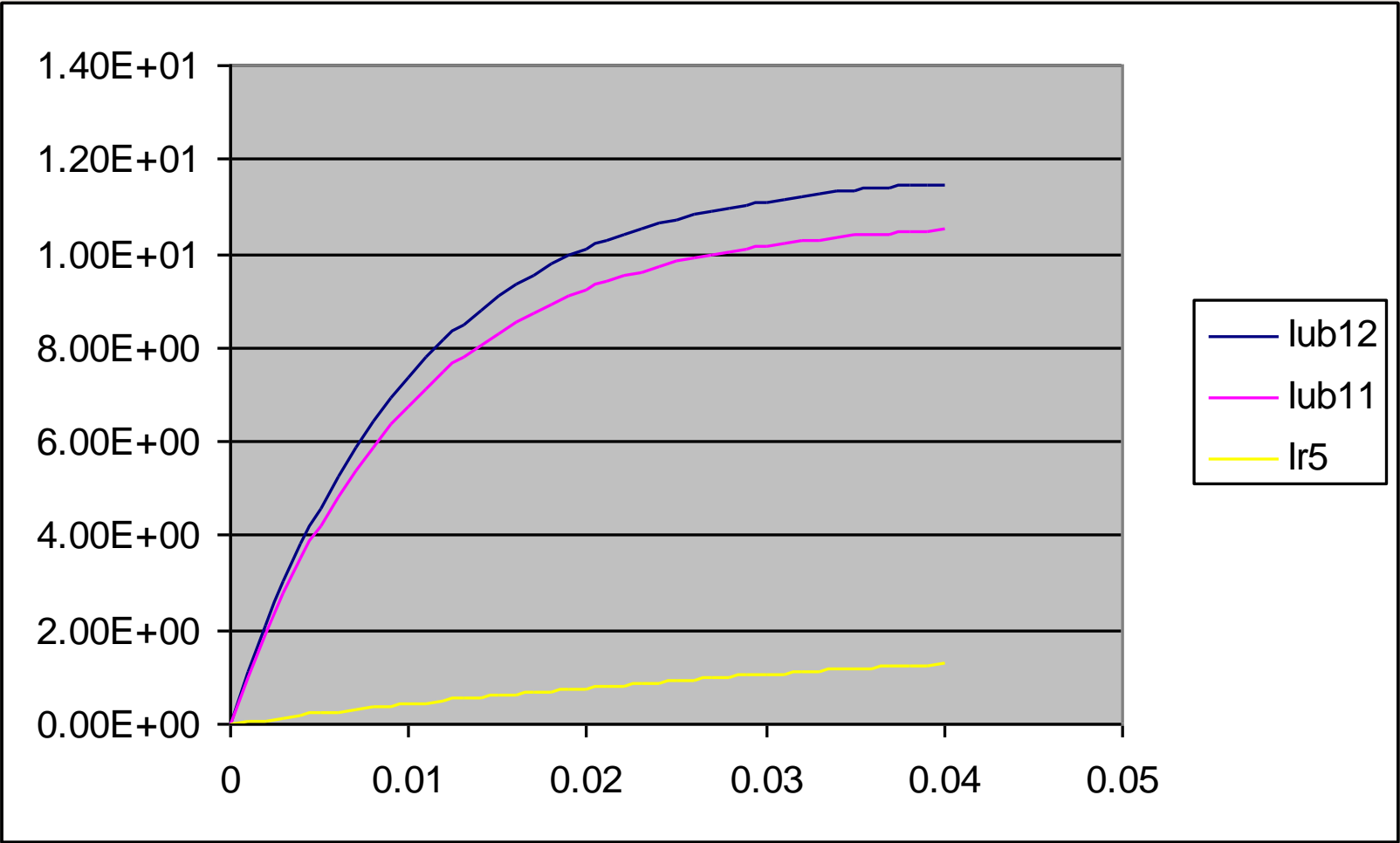
kde $\tau = L_1/R_1$ je časová konštanta. Prúd na začiatku narastá lineárne a tak energia uchovaná v cievke je:

$$E_L = \frac{1}{2} L_1 \hat{i}_1^2$$

Prúd i_1 je hodnota prúdu v okamihu keď je tranzistor vypnutý.



Koncový stupeň zosilňovača zapal'ovania



Doba zopnutia tranzistora musí byť obmedzená kvôli ochrane tranzistora pred veľkou hodnotou prúdu i_1 .

Rozopnutím tranzistora sa indukuje na jeho kolektore a na cievke transformátora (indukčná cievka) vysoké napätie v dôsledku náhlej zmeny prúdu. To napätie je transformované viazanou indukčnosťou L_2 ešte na vyššiu hodnotu a privádzané na zapalovaciu sviečku. Kapacity C_1 a C_2 predstavujú parazitné kapacity, ktoré majú dopad na maximálne indukované napätie U , ktoré je privádzané na sviečku. Oba kapacity môžu byť nahradené jedným s hodnotou

$$C' = C_1 + \left(\frac{N_2}{N_1} \right) C_2$$

N_2/N_1 je prevod transformátora.

Energia akumulovaná v náhradnom kapacitore C' je:

$$E_C = \frac{1}{2} C' U_1^2$$

Za predpokladu ideálnej výmeny energie $E_L = E_C$ je hodnota maximálneho napätia na primárnej strane daná:

$$U_1 = \hat{i}_1 \sqrt{\frac{L_1}{C'}}$$

Hodnota rezonančnej frekvencie obvodu je

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C'}},$$

ktorá býva typicky v rozsahu 1-3kHz. Hodnota činiteľa väzby býva $K \approx 0,85$, čo znamená širšiu rezonančnú krivku

Príklad:

Predpokladané napätie na sekundárnej strane bez zát'aže je

$$U_2 \geq 25\text{kV}.$$

Napätie sekundárnej strany s parazitnou zát'ažou (špinavé alebo navlhnuté VN prívody) musí byť vyššie ako spodná hranica

$$U_2^* \geq 12\text{kV}.$$

Predpokladá sa najhorší prípad parazitného paralelného rezistora na sekundárnej strane

$$R_p \approx 300 \text{ k}\Omega$$

Predpokladaný prevod $N_2/N_1=100$ a väzobný činiteľ $K = 0,85$, z čoho vyplýva maximálne napätie primárnej strany

$$U_1 = \frac{N_1 U_2}{N_2 K} = 300\text{V},$$

na ktoré musí byť dimenzovaný výkonový tranzistor.

Jeho maximálny prúd je

$$i_1 = \frac{N_1 U_2^*}{N_2 K R_P} = 5A.$$

Odpor primárnej strany môže byť odhadnutý ako

$$R_1 \leq \frac{U_b - U_{CE}}{i_1} = \frac{14V - 1,5V}{5A} = 2,5\Omega.$$

Vnútorňý odpor zosilňovača zapalovania

Kvalita zosilňovača závisí od efektívneho vnútorného odporu obvodu zapalovania R_i na jeho sekundárnej strane, ktorý má byť čo najmenší. Môže byť meraný vloženíím dvoch odlišných odporov R_{P1} a R_{P2} paralelne so zapalovacou sviečkou. Hodnota vnútorného odporu je tak

$$R_i = \frac{\Delta U_2}{\Delta i_2}.$$

Napätie $\Delta U_2 = U_{21} - U_{22}$, kde U_{21} je napätie U_2 pri R_{P1} a U_{22} je napätie U_2 pri R_{P2} . Prúd Δi_2 je počítaný za predpokladu, že $R_{P1} > R_{P2}$

$$\Delta i_2 = \frac{U_{22}}{R_{P2}} - \frac{U_{21}}{R_{P1}},$$

čo vedie k

$$R_i = \frac{(U_{21} - U_{22})R_{P1}R_{P2}}{U_{22}R_{P1} - U_{21}R_{P2}}.$$

Pri použití odporov $R_{P1} = 1\text{M}\Omega$ a $R_{P2} = 100\text{k}\Omega$, by mohli byť namerané $U_{21} = 24\text{kV}$ a $U_{22} = 10\text{kV}$. Vnútorý odpor je tak $R_i = 185\text{k}\Omega$.

Ochrana výkonového tranzistora

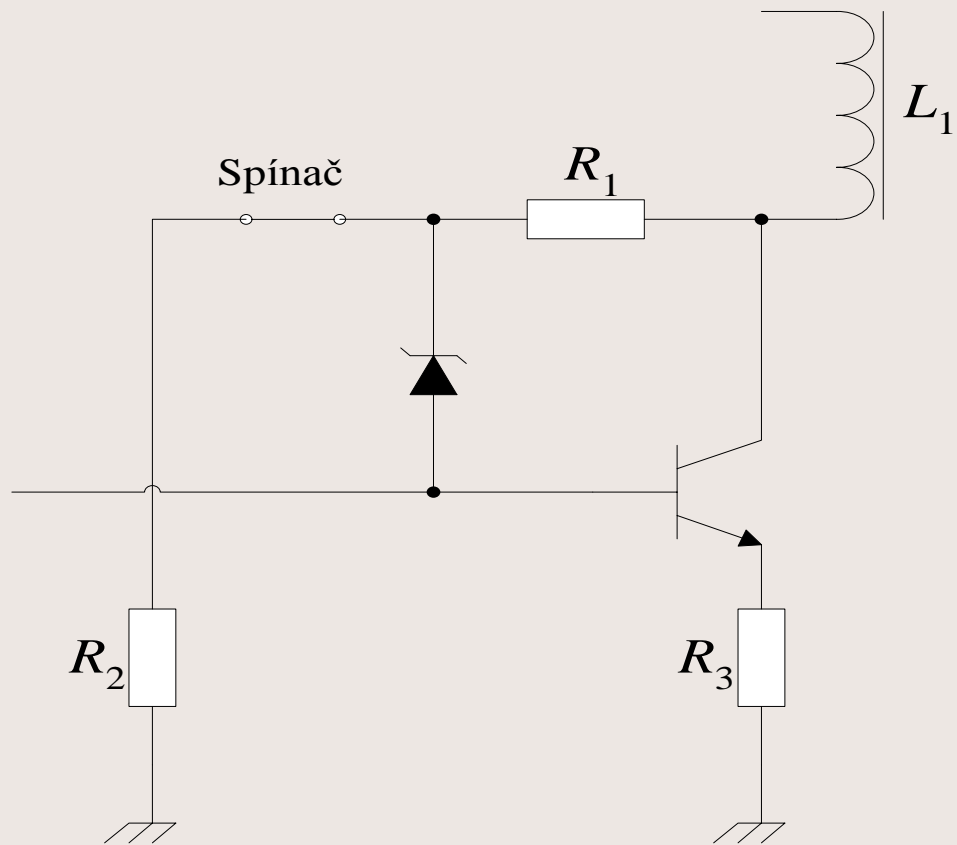
Aby sa redukovali straty na tranzistore a tým aj teplo, ktoré musí rozptýliť, tranzistor sa úplne vypína pri veľmi nízkych otáčkach napr. 30 ot/min.

Ochrana proti prepätiu

Pri rozpojení tranzistora môže napätie na kolektore prekročiť povolené hodnoty. Ak je napr. prerušené spojenie na sviečku, sekundárny obvod sa nevybije. V nasledujúcom cykle bude špičkové napätie vyššie v dôsledku energie na parazitnom kapacitore C_2 . Tomu sa dá zamedziť použitím ochranného obvodu na [obr.](#) Napätie na dióde je úmerné pomeru $R_2/(R_1+R_2)$ a napätiu na kolektore.

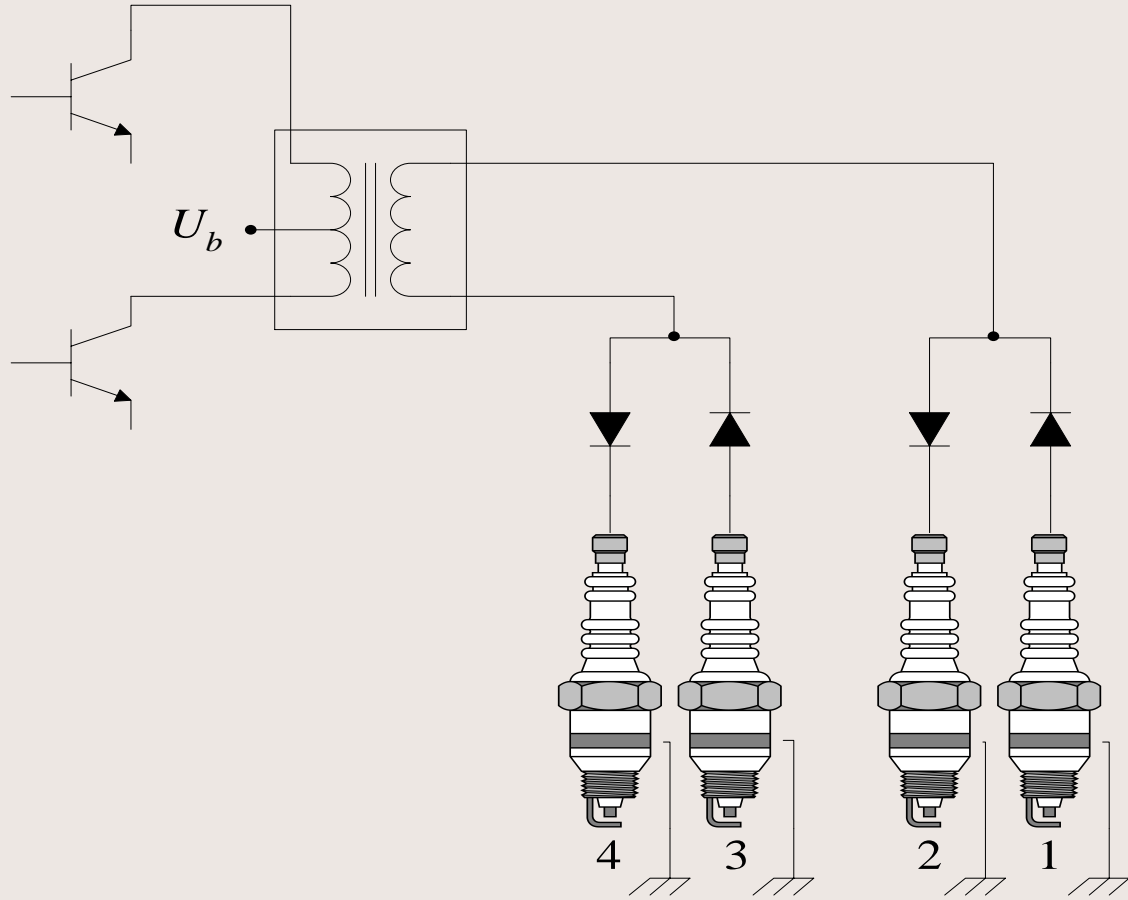
Zamedzenie samozápalu

Pri vypínaní motora sa vypína aj zapalovanie. Výsledné špičkové napätie môže nežiadúco zapáliť zvyšky zmesi. Zamedziť tomu sa dá rozpojením spínača na [obr.](#) Maximálne kolektorové napätie je tak obmedzené na hodnotu zenerového napätia diódy, ktoré nepostačuje na generovanie iskry na sekundárnej strane.



Elektronické rozdeľovanie

Vo štvorvalcových motoroch môže byť rozdeľovanie zapalovania vyriešené podľa [obr.](#), čo nevyžaduje mechanické rozdeľovače. Tranzistory na ľavej strane pracujú striedavo tak, že doby ich zopnutia sa neprekrývajú a používajú spoločnú indukčnú cievku. Každá sviečka je spojená s vysokonapäťovou diódou. Sviečka 2 je spojená do série so sviečkou 3 a podobne 1 so 4. Dve sviečky sú tak napájané z vysokonapäťového sekundárneho vinutia indukčnej cievky naraz, avšak tieto valce sú práve v opačných fázach režimu (jeden je v režime kompresie a druhý v režime výfuku). K zapáleniu teda iba vo valci v režime kompresie. Ostatné dve sviečky sú blokované, pretože diódy sú namáhané v závernom smere.



Problémami tohto riešenia sú:

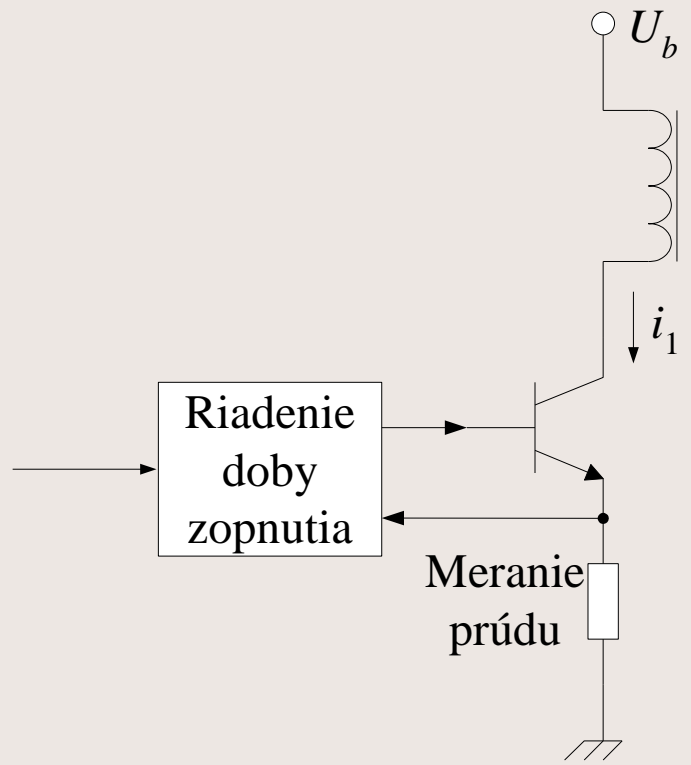
- Zapaľovacie sviečky sa viac opotrebovávajú, pretože zapaľujú dvakrát častejšie ako bežne.
- Mierne je redukované zapaľovacie napätie, pretože vzniknú malé napät'ové straty vo valci bez zapálenia.
- Existujú protichodné požiadavky pri konštrukcii diód. Na jednej strane sa vyžaduje dobrá elektrická vodivosť, čo vedie k horšej tepelnej vodivosti, na druhej strane vysoké prahové napätie vo vodivom stave vedie k väčším tepelným stratám, ktoré môžu byť lepšie rozptýlené pri menšej izolácii.

Výhodami riešenia sú:

- Uhol zapálenia sa môže riadiť bez nutnosti mechanických prvkov.
- Diódy slúžia k lepšiemu potlačeniu interferencií.

Riadenie uhla (doby) zopnutia

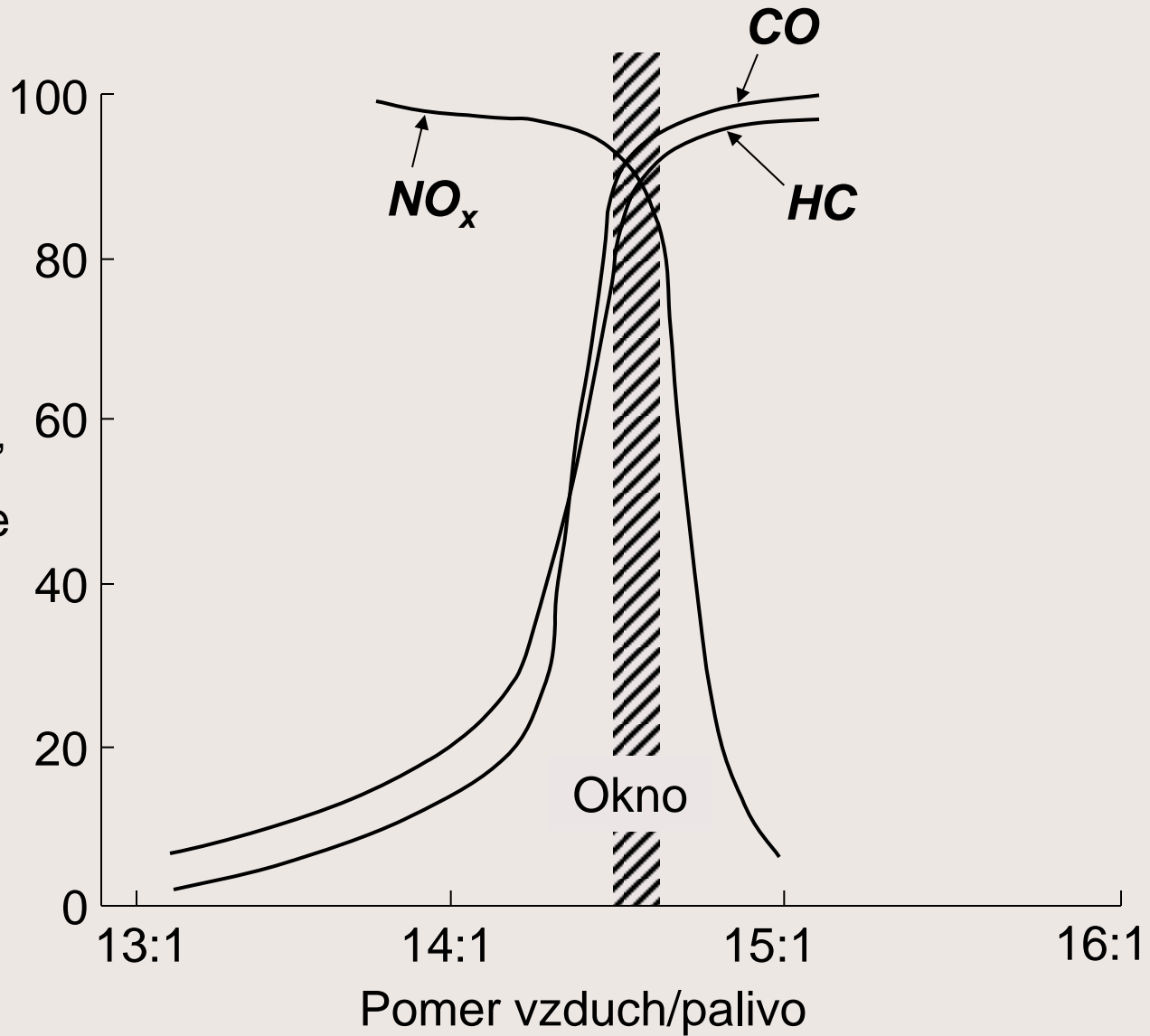
Doba zopnutia výkonového tranzistora (tým aj generované teplo) môže byť redukovaná znížením hodnoty rezistora R_1 na primárnej strane indukčnej cievky. Prúd na primárnej strane cievky môže byť obmedzený ak dosiahne povolenú hodnotu podľa obr. Ak je doba zopnutia príliš dlhá, energia (teplo) ktorú musí tranzistor rozptýliť ho môže zničiť. Doba zopnutia tranzistora t_d (dwell) je čas od okamihu zopnutia tranzistora po okamih zapálenia. Okamih zopnutia tranzistora je riadený tak aby t_d bol konštantný (ochrana tranzistora). Doba zopnutia môže byť vyjadrená ako uhol pootočenia kľukového hriadel'a, ktorý je pre rôzne otáčky rôzny ($\alpha_{CS}=360^\circ n t_d$). Napr. pre $t_d=3\text{ms}$ je pri $n_1 = 600\text{ot/min}$ $\alpha_{CS}=10,8^\circ$ a pre $n_2 = 6000\text{ot/min}$ $\alpha_{CS}=108^\circ$.

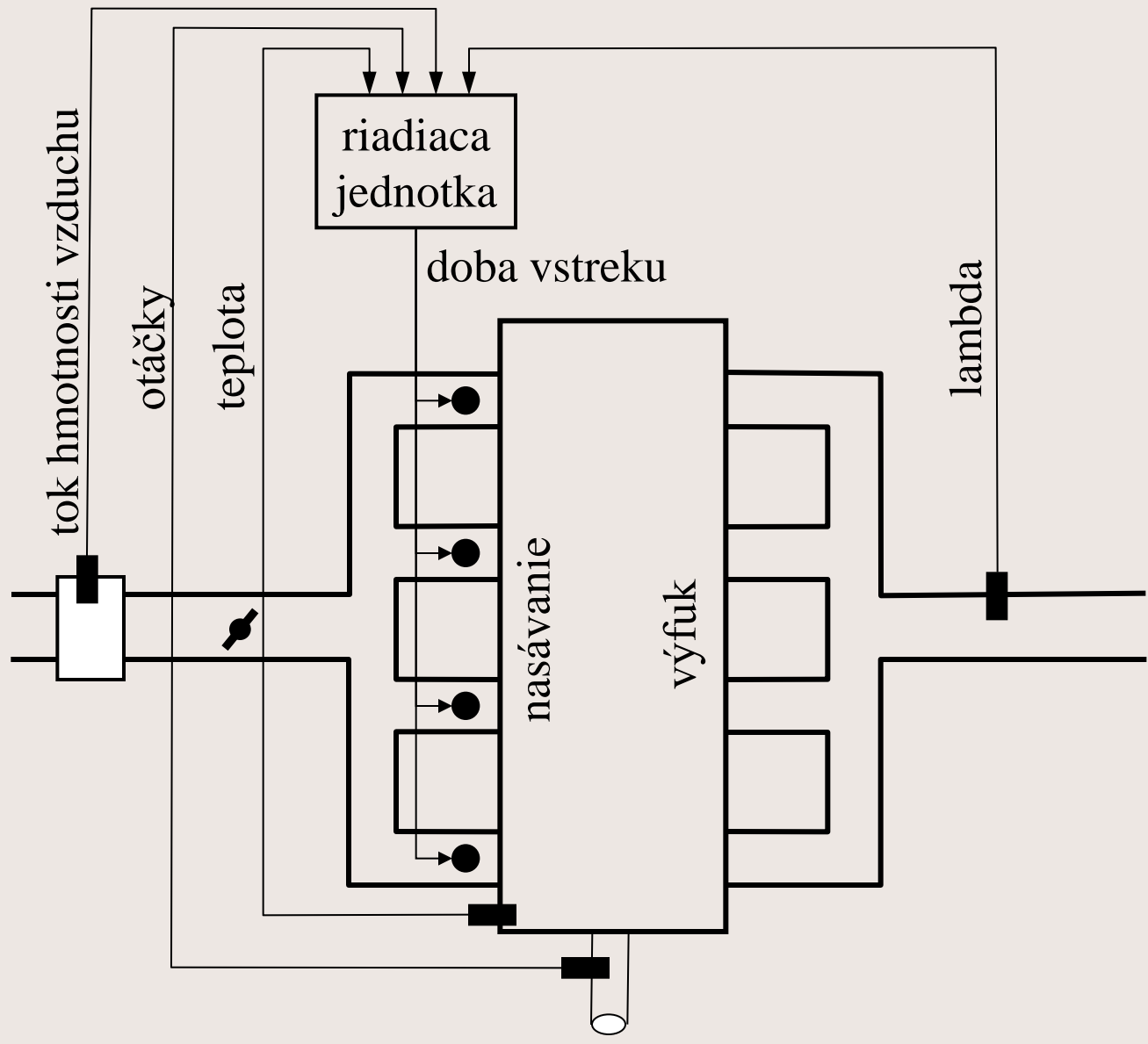


Riadenie parametra lambda

Úrovne emisií motorov v stechiometrickom režime silne závisia od pomeru A/F resp. od presnosti s akou sa udržiava $\lambda=1$. V dôsledku tolerancií merania a výpočtov je potrebné na dosahovanie požadovanej presnosti, aby hodnota λ bola udržiavaná prostredníctvom spätnoväzobnej regulačnej slučky. Hodnoty emisií pri zmenách λ vyplývajú z obr. Účinnosť konverzie katalyzátora je taktiež veľmi závislá od hodnoty λ a aj veľmi malé odchýlky od hodnoty **1** ju výrazne znižujú (obr.). Bloková schéma λ -ou riadeného motora je na obr. Množstvo vstrekovaného paliva je riadené riadiacou jednotkou motora, kde v spätnej väzbe riadiacej slučky je zapojená aj lambda sonda. Pre riadenie sa navyše využívajú aj parametre ako množstvo nasatého vzduchu, teplota motora, otáčky,

Účinnosť
konverzie
[%]





Katalytický konvertor - katalyzátor

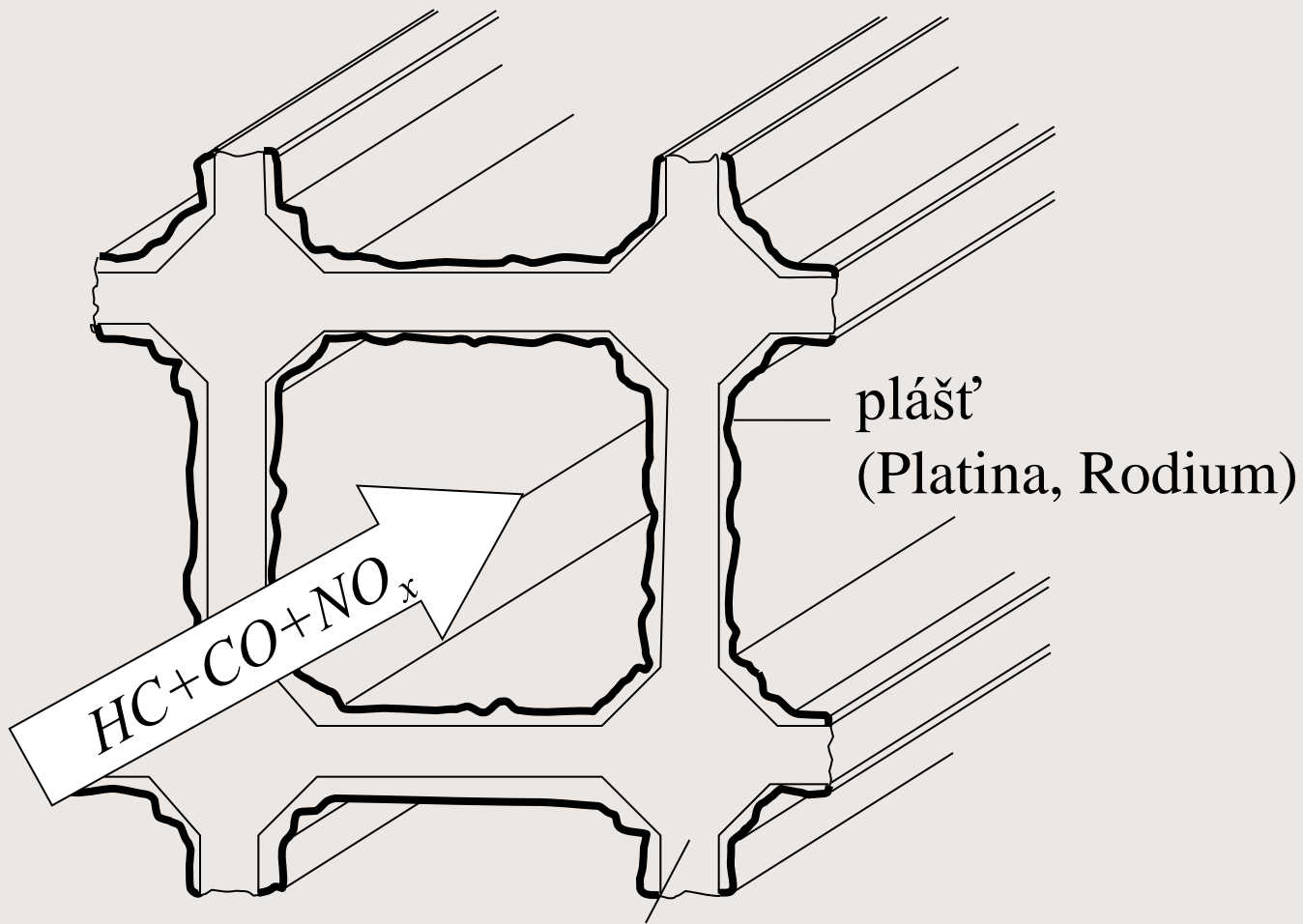
Ak sú výfukové plyny podrobené katalytickej konverzii, značne sa v nich redukovujú nežiaduce emisie (za predpokladu $\lambda=1$). Zmes nemusí byť celkom spálená v dôsledku turbulencií a šírenia horenia. Škodlivé plyny ako HC , CO a NO_x sú katalyzátorom konvertované na CO_2 , H_2O a N_2 .

Katalyzátor je súčasťou výfukového potrubia. Pozostáva z keramického alebo kovového nosného substrátu, ktorý je pokrytý plášťom s extrémne veľkým povrchom. Tento je zase pokrytý tenkou vrstvou platiny a ródia (obr.).

Pomer Pt k Rh je približne 2:1 (celkovo 1-3g). Obidva podporujú chemické reakcie. Pt viac podporuje oxidáciu CO a HC a Rh viac podporuje redukciu NO_x .

Redukčný a oxidačný proces prebiehajú v katalyzátore simultánne. Konverzný pomer je definovaný ako relatívna zmena koncentrácie pred a po katalytickom procese.

$$c_r = (c_{in} - c_{out}) / c_{in} - (\text{typické hodnoty } c_r > 90\%)$$



materiál substrátu
(kov, keramika)

Konverzný pomer je ovplyvňovaný pomerom vzduch/palivo a objemom katalyzátora. Odchýlky $\Delta\lambda < 3\%$ môžu byť kompenzované v krátkom čase. V statickom režime prevádzky motora je konverzný pomer vysoký aj v prípade, že katalyzátor je čiastočne znečistený. V prechodoch sa vyskytujú odchýlky pomeru A/F buď jedným alebo druhým smerom. Vo fáze zahrievania motora a výfukového potrubia sú teploty pre chemické reakcie príliš nízke a konverzný pomer je zlý. Aby katalyzátor pracoval efektívne, je potrebné aby jeho teplota presiahla 300°C .

Existuje niekoľko možností pre urýchlenie nahriatia motora.

- Rýchle nahriatie výfukového potrubia sa môže dosiahnuť znížením uhla predstihu o 10° až 20° . Horenie je posunuté do fázy termodynamického cyklu, kedy sú výfukové ventily už otvorené.
- Montuje sa prídavný katalyzátor pre fázu nahrievania čo najtesnejšie k miestu, kde sú výfukové plyny čo najhorúcejšie. Po fáze nahriatia je tento katalyzátor premostený.
- Do výfukových plynov sa pridáva čerstvý vzduch prídavným čerpadlom. Motor beží v režime bohatej zmesi ($\lambda < 1$) a tým sa podnieti proces horenia nespálených zvyškov paliva vo výfukovom potrubí, čím sa nahrieva katalyzátor.
- Katalyzátor sa elektricky nahrieva. Aby sa redukovalo množstvo energie na ohrev, je vyhrievacie teleso koncentrované v mieste kde najskôr začína exotermická reakcia.

Model motora pre riadenie parametra λ

Na [obr.](#) je znázornený model motora, pomocou ktorého je možné navrhovať riadenie parametra λ .

- VAL počet valcov
- k poradie valca
- $1/n$ doba jednej otáčky klukového hriadeľa
- $T_{výf}$ časové oneskorenie medzi výfukovým ventilom a lambda sondou

Zjednodušená skoková odozva je znázornená na [obr.](#)

Palivo je vstrekané do nasávacieho potrubia a je nasávané do valcov s fázovým posunutím. To vedie k stupňovitej charakteristike zjednodušenej odozvy na skokovú zmenu. Pre návrh riadenia je skoková zmena aproximovaná prvkom prvého rádu s jeho opisom v Laplaceovej oblasti:

$$\frac{K_{l,e}}{1 + T_{l,e}s}$$

Proces horenia môže byť modelovaný ako čas bez zmeny $T_{horenie}$, ktorý trvá až do okamihu otvorenia výfukového ventilu. Iným časom bez zmeny je $T_{výf}$. Tento predstavuje čas, ktorý uplynie od okamihu kedy spaliny opustia výfukový ventil až po okamih kedy dosiahnu lambda sondu.

- $T_{výf}$ mení sa v závislosti od rýchlosti toku nasávaného vzduchu medzi 20ms až 500ms

- $T_{horenie}$ čas medzi otvorením nasávacieho a výfukového ventilu

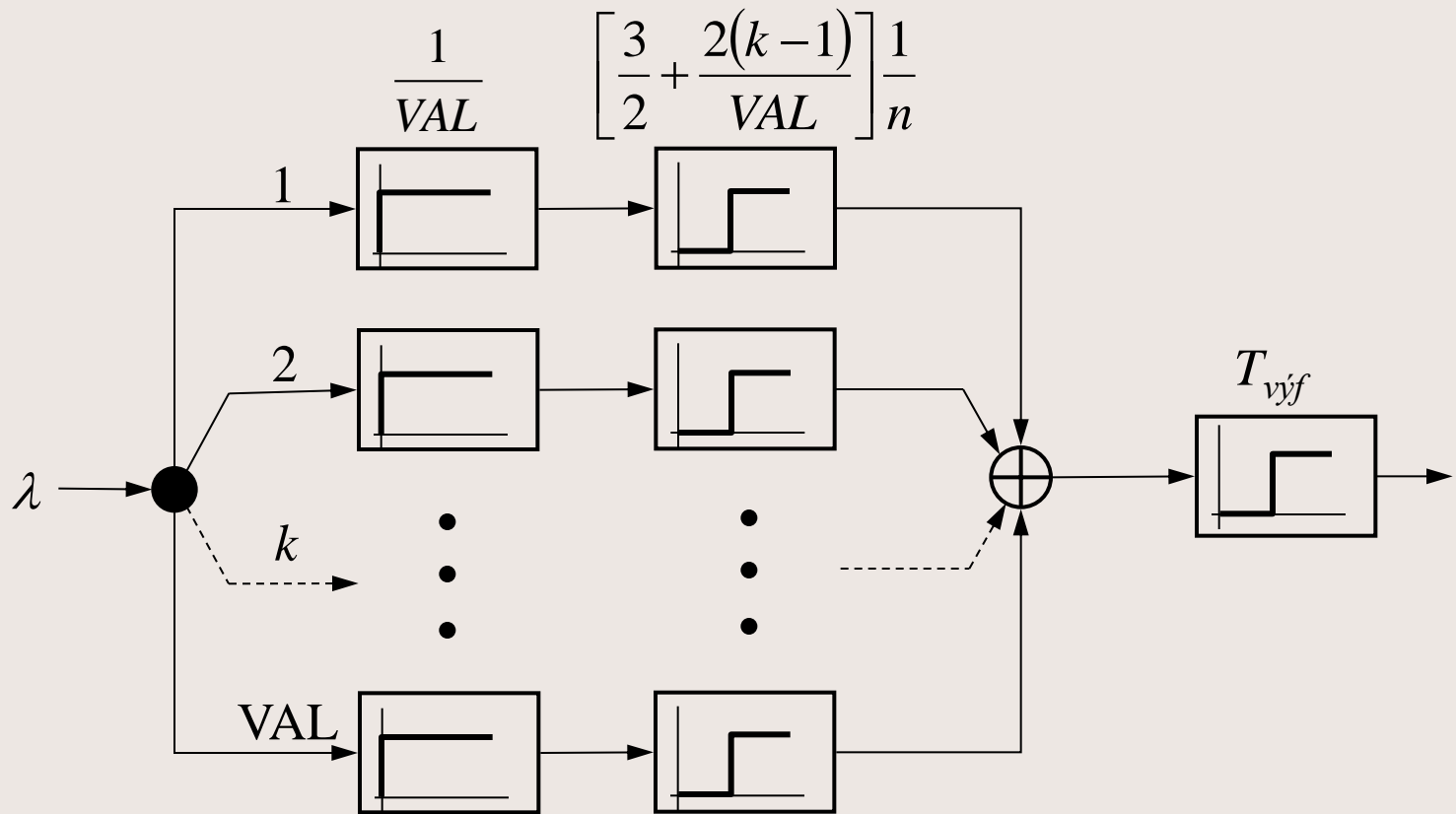
- $T_{l,e}$ aproximácia časovej konštanty $2(V_{AL}-1)/(n \cdot V_{AL})$

Celkový čas bez zmeny - mŕtvy čas sa spočíta $T_{d,e} = T_{výf} + T_{horenie}$

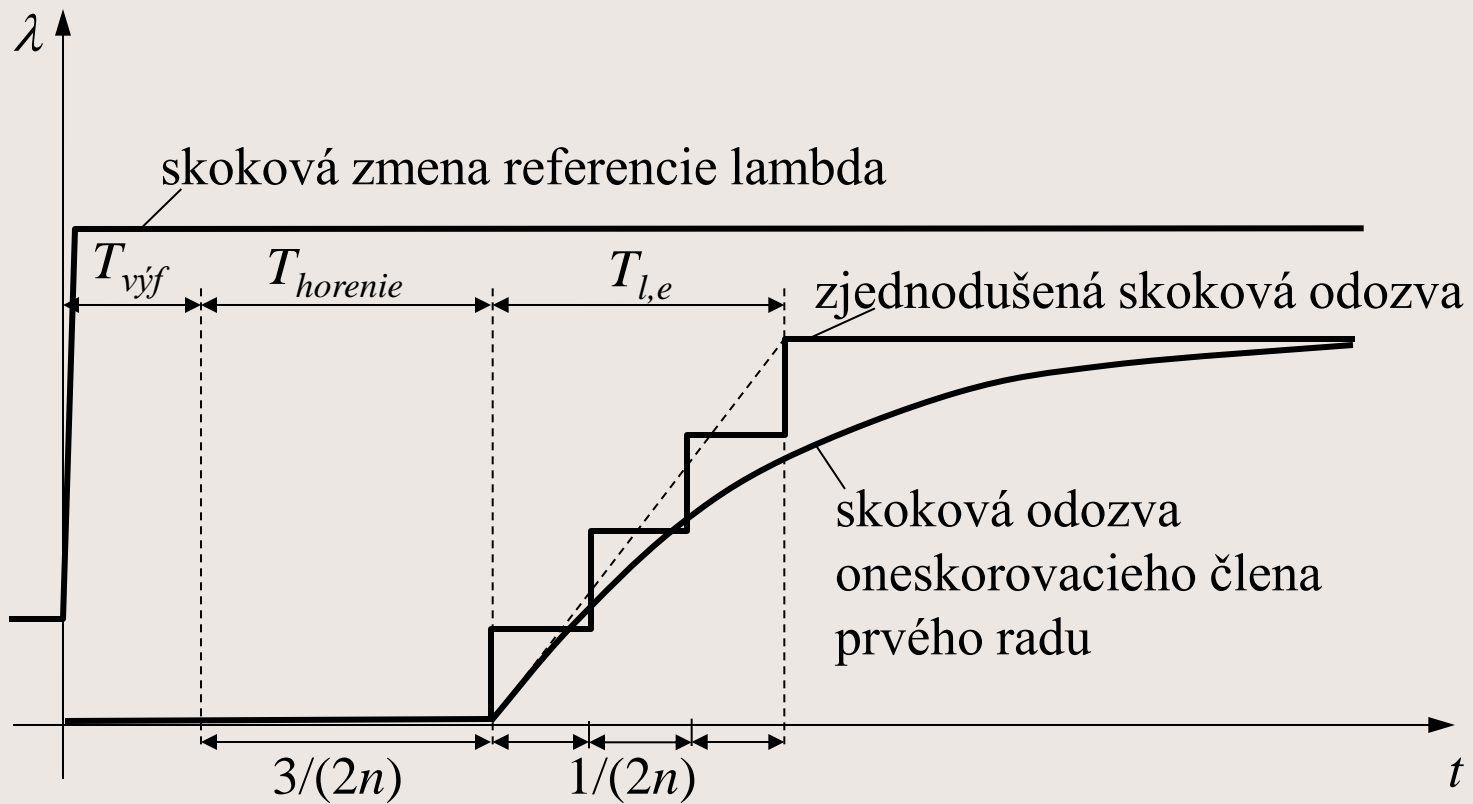
Na obr. Je tak znázornený zjednodušený model motora.

Typické hodnoty $T_{d,e}$ (100ms....1,0s), $T_{l,e}$ (50ms,....0,5s)

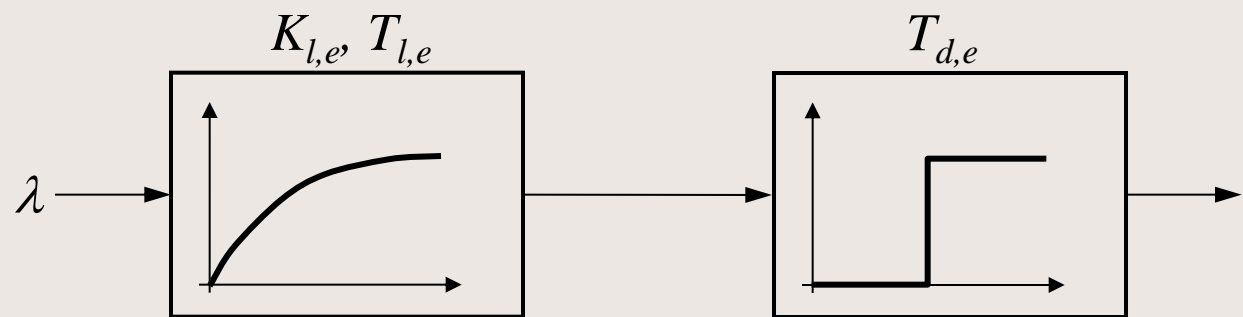
Pretože sa parametre modelu značne menia s pracovnými podmienkami motora, parametre riadenia λ sa adaptujú v závislosti od pracovného bodu motora. Každý riadiaci parameter je zapamätaný v tabuľke a vyčítava sa podľa režimu prevádzky.



Model motora pre riadenie parametra λ



Skoková odozva a jej aproximácia prvkom prvého rádu (VAL=4)

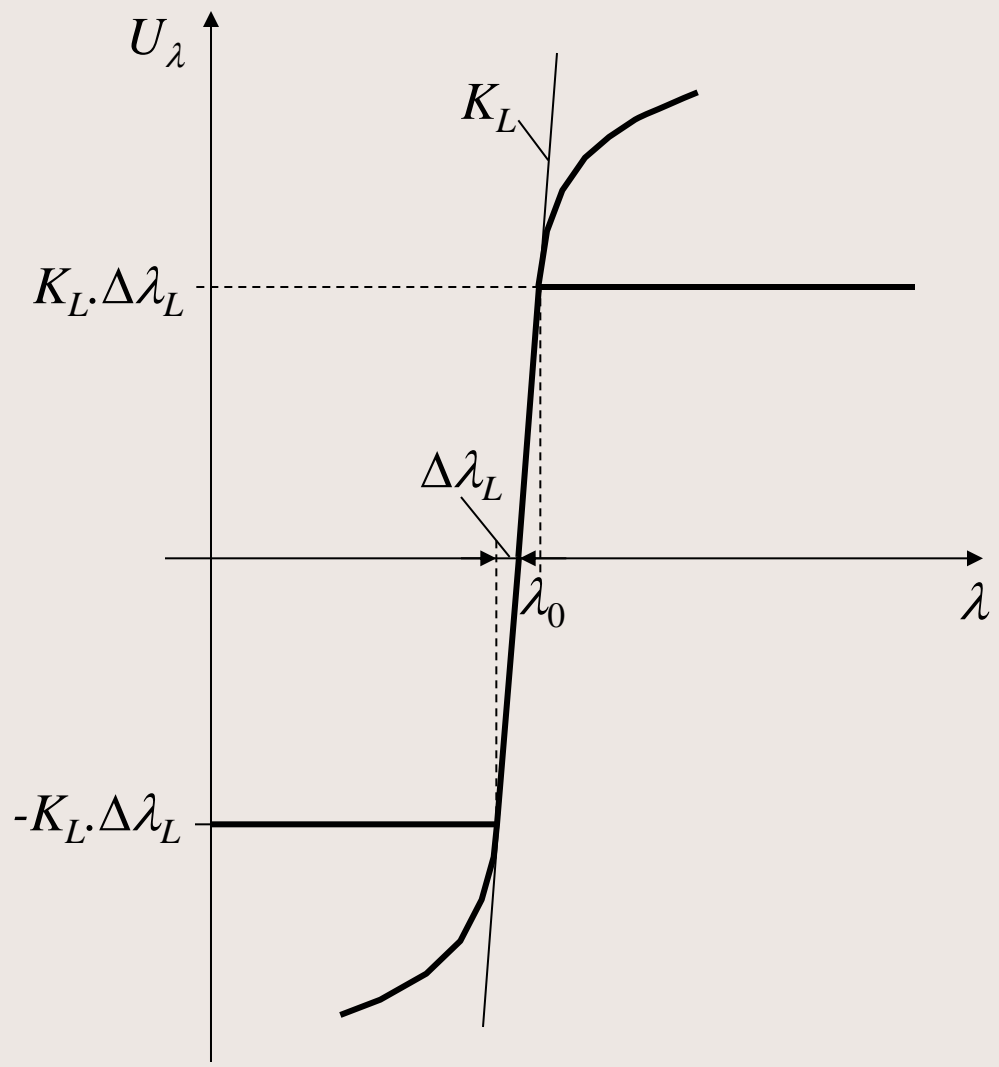


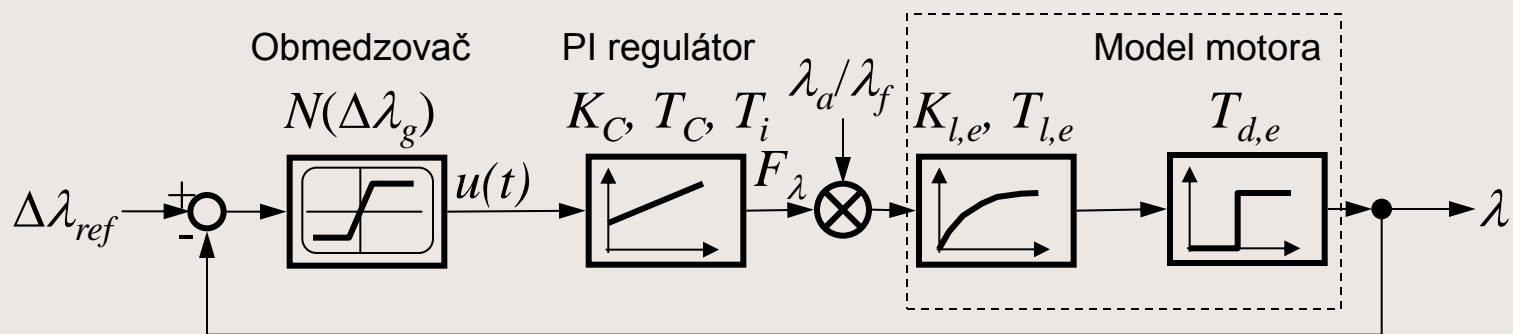
Zjednodušená dynamická časť modelu motora

Obvod riadenia λ

Charakteristika, vyjadrujúca závislosť medzi hodnotou λ a napätím U_λ na výstupe senzora je nelineárna (vid' senzory). Navyše s dobou prevádzky mierne starne (mení sa). Preto sa pre riadenie volí najstabilnejšia časť meracieho rozsahu charakteristiky. Z obr. je zrejmé, že sa volí v jej lineárnej strmej časti. V tejto časti je faktor citlivosti K_L .

Mimo merací rozsah je charakteristika orezaná. Stred meracieho rozsahu λ_0 nie je totožný s požadovanou referenčnou hodnotou λ_{ref} ale je určený výlučne stabilitou charakteristiky. Referenčná hodnota λ_{ref} však musí ležať v rozsahu $(\lambda_0 - \Delta\lambda_L, \lambda_0 + \Delta\lambda_L)$. Posunutie λ_0 oproti λ_{ref} môže byť kompenzované napr. smerovou závislosťou časovej integračnej konštanty PI regulátora. Znamienko napätia $U_\lambda(\lambda)$ charakteristiky je invertované, aby sa získala klasická štruktúra riadiacej spätnoväzobnej slučky. Na vstupe regulačného obvodu je nelineárna funkcia obmedzovania.





Spätnoväzobný regulačný obvod riadenia λ

V uvedenej schéme sa predpokladá PI regulátor (proporcionálne integračný), ktorý je v Laplaceovej oblasti opísaný prenosovou funkciou:

$$\frac{1 + T_C s}{T_i s} \cdot \frac{1}{K_C}$$

Činiteľ $1/K_C$ reprezentuje vzťah medzi premennou regulátora a parametrom λ v ustálenom stave. Časová konštanta T_C sa volí tak, aby sa kompenzovalo časové oneskorenie $T_{l,e}$ motora t.j. $T_C \approx T_{l,e}$. Pretože parameter $T_{l,e}$ je silne závislý od prevádzkového režimu motora, je potrebné aby parameter T_C bol adaptovaný. Prenosová funkcia rozpojenej slučky je

$$G(s) = N(\Delta\lambda_g) \cdot \frac{1}{sT_i} \cdot \frac{1}{K_C} \cdot e^{-T_{d,e}s}$$

Riadenie voľnobehu

Z praktických skúseností je známe, že spotreba paliva motorov s vnútorným spaľovaním narastá úmerne s otáčkami motora pri voľnobehu. Preto by mali byť voľnobežné otáčky nastavené na najnižšiu možnú hodnotu. Redukované voľnobežné otáčky majú za následok zníženie výstupného výkonu motora. V rozpore s tým sú však variácie momentu zaťaženia napr. zapnutím kompresora klimatizácie. Výstupný moment motora, ktorý je schopný pokryť skokové zmeny záťaže tak oproti základnému momentu, ktorý postačuje pre udržanie voľnobežných otáčok, narastá. To je problém, ktorý vyžaduje riadenie voľnobežných otáčok. Ovládanou premennou *SI* motorov je tok hmotnosti vzduchu do motora a pri Dieselových motoroch množstvo vstrekaného paliva.

Problémom sú pohyby plynového pedálu pri voľnobehu, ktoré vyvoláva vodič. Tento moduluje ovládanú premennú, ktorú sa snaží regulovať regulátor. Ak vodič mierne zvýši prívod vzduchu *SI* motora, regulátor má snahu obmedziť túto veličinu aby reguloval otáčky motora na referenčnú hodnotu. Ak by v nasledujúcom kroku vodič pedál uvoľnil, riadiaci zásah pre adaptovanie by určitú dobu trval. Pri nesprávnom návrhu regulátora sa motor môže v takýchto situáciách zastaviť. Riadiaci obvod, ktorý je opísaný v tejto časti meria otáčky motora a odhaduje tlak v nasávacom potrubí. Dynamické správanie sa riadiacej slučky je určované nasávacím potrubím, konverzným procesom a bilanciou momentu na kľukovom hriadeli.

Pri Dieselových motoroch odpadá modelovanie nasávacieho potrubia a tlaku v ňom.

Model konverzie energie a bilancia momentu

Proces konverzie energie je extrémne zložitý a značne nelineárny. Ak sa použije zjednodušený prístup, potom môže byť statická závislosť medzi momentom, generovaným horením T_{hor} a tlakom v nasávacom potrubí reprezentovaná nelineárnou tabuľkou $f_2(n, p_m)$. Táto by mala byť odmeraná vo všetkých pozíciách pracovného bodu motora. Z hľadiska dynamického správania sa zvlášť predpokladá oneskorenie oneskorovacieho člena prvého rádu $T_{l,e}$ a mŕtveho času $T_{d,e}$ (podobne ako je to v opise modelu pre riadenie λ).

$$T_{l,e} \approx 2(V_{AL}-1)/(n \cdot V_{AL})$$

Mŕtvy čas $T_{d,e}$ zahrnuje oneskorenie medzi strednou pozíciou otvorenia nasávacích ventilov valca a strednou pozíciou procesu konverzie energie. Malo by sa aproximovať hodnotou

$$T_{d,e} \approx 3/(4n),$$

Čo je iba polovičná hodnota v porovnaní s riadením λ . Obidve časové konštanty sa menia nepriamoúmerne s otáčkami.

Bilancia momentu na kľukovom hriadeli je

$$2 \cdot \pi \cdot J \frac{dn}{dt} = T_{hor} - T_{zat'}$$

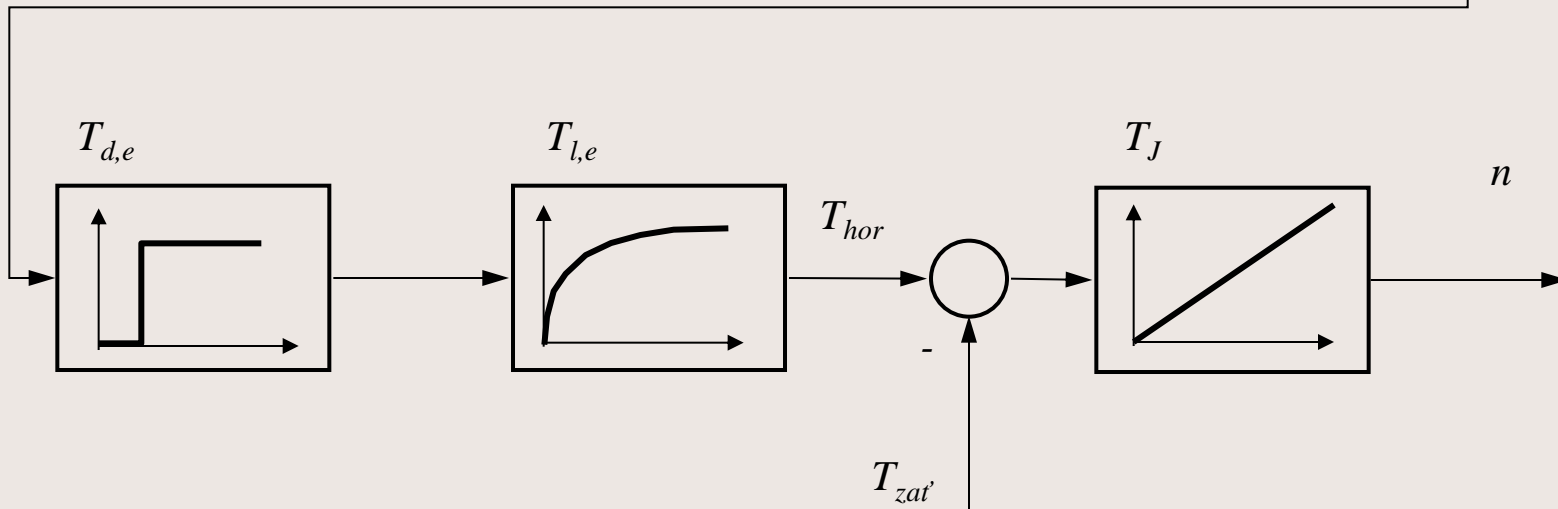
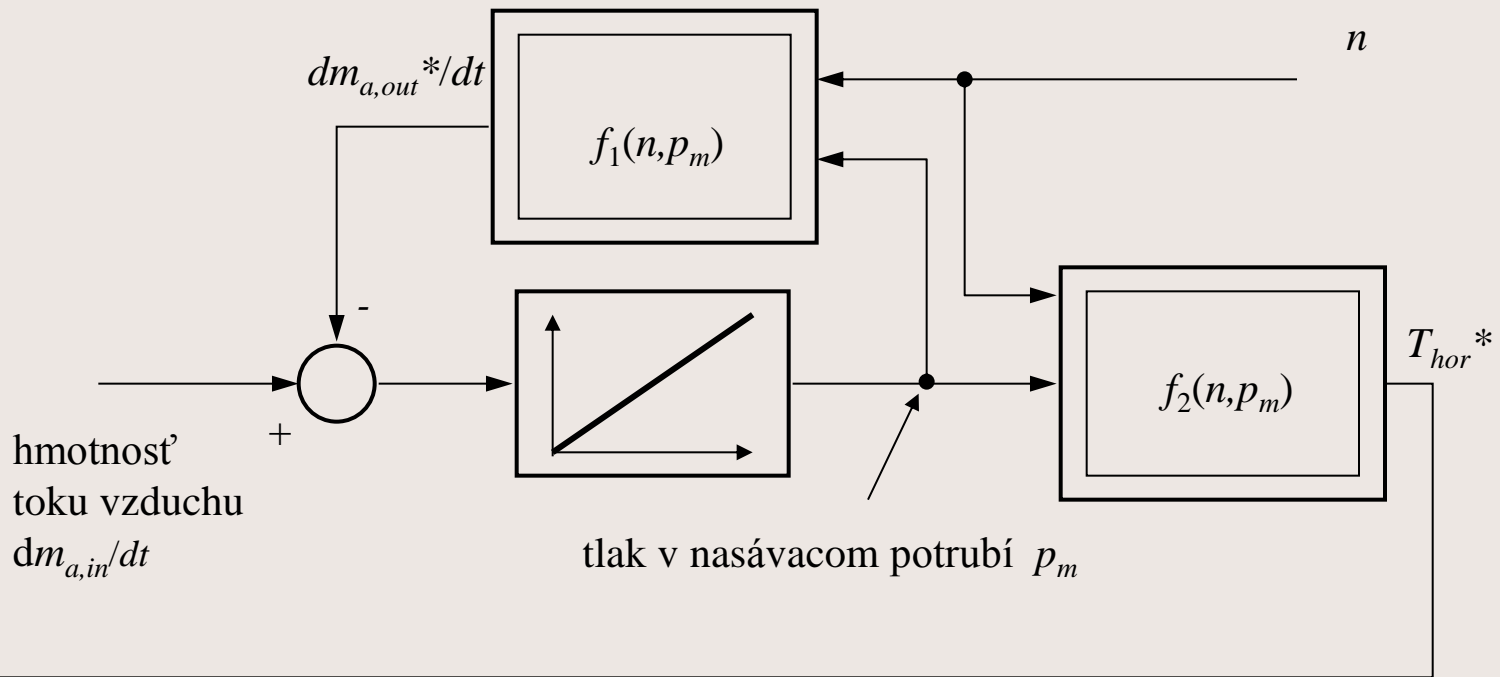
Motor s rozpojenou spojkou má moment zotrvačnosti v rozsahu $J=0,15 \dots 0,3 \text{ kg}^2$.

Normovaním

$$\underbrace{2 \cdot \pi \cdot \frac{J \cdot n_0}{T_0}}_{T_J} \cdot \frac{d(n/n_0)}{dt} = \frac{T_{hor}}{T_0} - \frac{T_{zat'}}{T_0},$$

kde $T_J = 2\pi \frac{J \cdot n_0}{T_0}$ je časová konštanta. Napr. ak

maximálny moment motora je $T_0=300 \text{ Nm}$ pri otáčkach $n_0=6000 \text{ min}^{-1}$ a jeho moment zotrvačnosti je $J=0,3 \text{ kg}^2$, potom je časová konštanta $T_J=0,63 \text{ s}$. $T_{zat'}$ zahrnuje trenie, pohon pomocných zariadení a rušenie. Celkový model motora pre riadenie voľnobehu je na [obr.](#)



Model *SI* motora pre riadenie voľnobehu

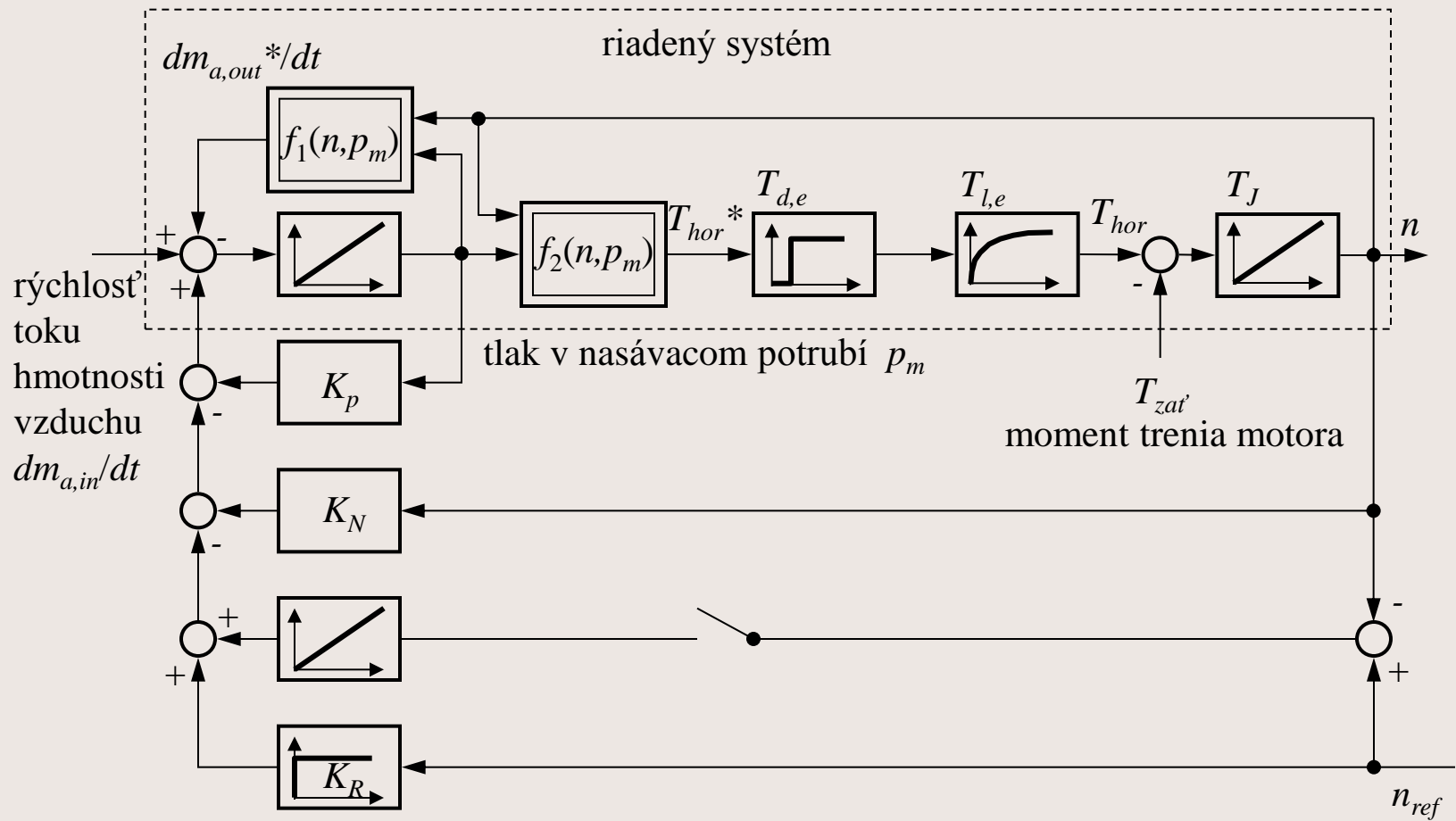
Množstvo vozidiel v súčasnosti používa pre riadenie voľnobežných otáčok PID (proporcionálne integračne diferenciálny) regulátor. Výhodnejší je regulátor využívajúci vlastnosti stavového priestoru, ktorý v spätnej väzbe využíva na riadenie tlak v nasávacom potrubí a merané otáčky.

Nežiaduce zásahy zo strany vodiča rýchlejšie vyvolávajú odozvy tlaku v nasávacom potrubí ako v otáčkach a preto je takéto riešenie výhodnejšie obr.

Implementácia regulátor by mala obsahovať proporcionálnu spätnú väzbu tlaku v nasávacom potrubí otáčok motora. Samotným akčným členom je automaticky ovládaná poloha škrtiacej klapky. Parametre K_P a K_N (obr.) sa optimalizujú z hodnôt tabuliek f_1 a f_2 (hodnoty namerané v statickom režime motora) po ich linearizácii v oblasti pracovného bodu (voľnobežné otáčky). Multiplikačný faktor pre referenčné otáčky K_R pre referenčné otáčky n_{ref} sa volí tak, aby uzavretá slučka spätnej väzby nevykazovala ofset, t.j. $\Delta n = 0$ a $\Delta p = 0$. To sa uplatňuje v stave ak sa nevyskytujú nepravidelnosti zaťažovacieho momentu.

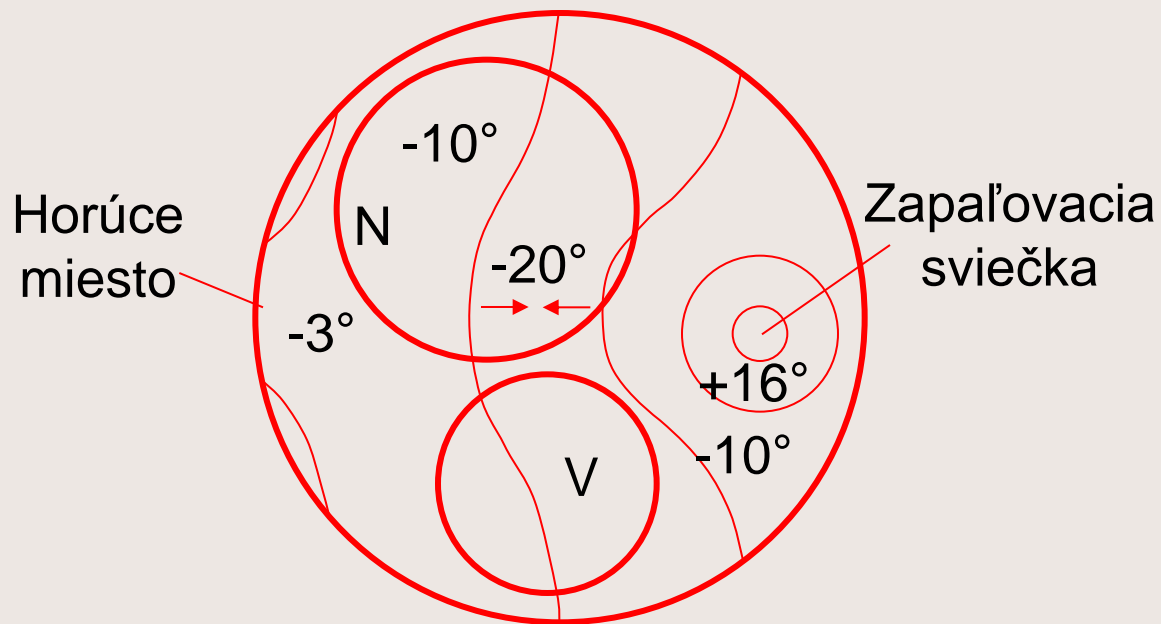
Proporcionálne riadenie však vykazuje ešte ofset stacionárneho riadenia v prípade ak sa na vstupe objavuje rušenie alebo sa menia parametre. To je dôvodom prečo je pridaný integračný regulátor (obr), ktorý tento stacionárny ofset redukuje na nulu. Problémom integračného regulátora je, že poruchové stavy, ktoré môže vnášať vodič, by mohli viesť k regulačným zásahom, ktoré by integrátor priviedli k jeho medzným stavom. Ak vodič prestane rušivo pôsobiť motor by sa mohol zastaviť. Existuje však množstvo ciest ako sa dajú potlačiť takéto tzv. likvidačné vplyvy. Ak sa detekuje takéto rušivé správanie vodiča, potom by mali byť použité odhaľovacie prístupy na prerušenie integrácie (v danom prípade je tam zaradený spínač, ktorý je v akceleračnom pedáli a zopnutým stavom indikuje režim vol'nobehu - obr).

Ak *SI* motory sú riadené časovaním ventilov namiesto škrtiacej klapky alebo v prípade Dieselových motorov, potom je návrh regulátora jednoduchší a model nasávacieho potrubia by mohol byť vypustený.

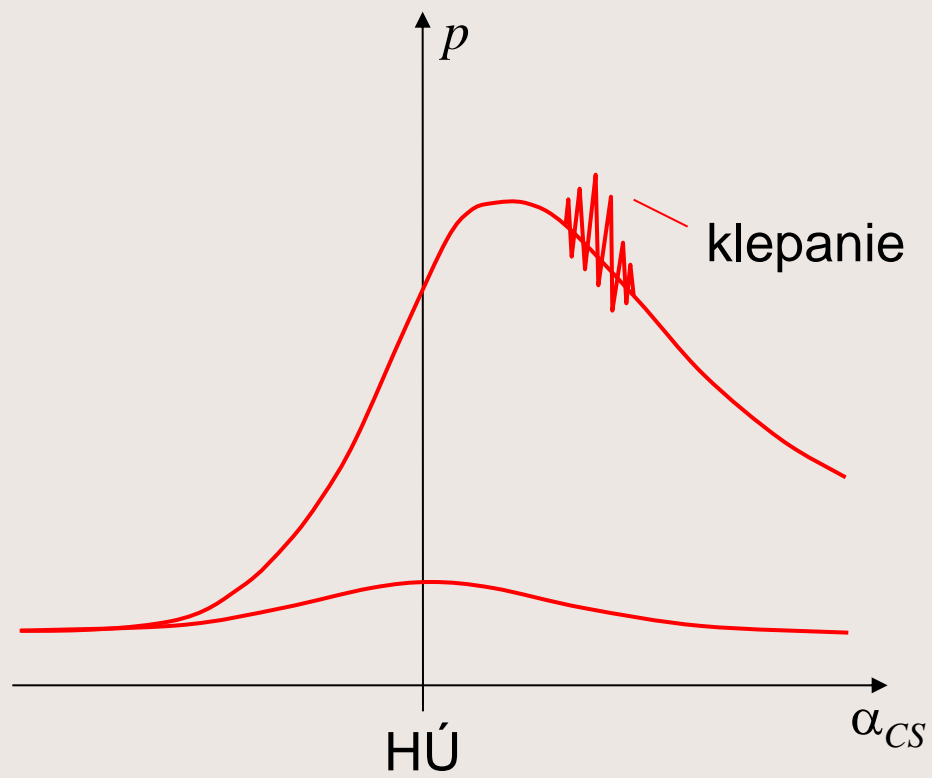


Riadenie klepania

Počas spaľovacieho cyklu môže dôjsť k samovznieteniu stlačenej, avšak ešte nezapálenej zmesi, predtým kým ju zasiahne čelo zápalnej vlny, ktorá postupuje od miesta zapalovacej sviečky. Podmienkou preto aby tento jav nastal je, že čas samovznietenia je kratší ako čas šírenia sa čela zápalnej vlny. Samovznietenie vzniká s určitým oneskorením τ_d . Miesto vzniku je najčastejšie vzdialené od zapalovacej sviečky v spaľovacej komore a vykazuje vysoké úrovne teploty. V prípade samovznietenia zmesi vo vzdialenejšom mieste vznikajú dve zápalné vlny, ktoré sa šíria oproti sebe (obr). Keď na seba narazia, vyvolajú tlakovú špičku, tá vybudí akustické vlastné oscilácie, ktoré závisia od geometrie spaľovacieho priestoru. Tieto rezonancie sú nasuperponované na normálnu tlakovú krivku (obr). V dôsledku veľmi vysokých gradientov tlaku môžu oscilácie klepania viesť k značnému poškodeniu motora. V extrémnych prípadoch môže dôjsť k zničeniu motora v zlomku minúty.



Samovznietenie s dvomi kolidujúcimi frontami plameňa



Rezonancie vyvolané samovznietením

Citlivosť *SI* motorov na samovznietenie paliva závisí od niekoľkých parametrov.

- Zvýšená teplota okolia, tá vedie k vyšším špičkovým teplotám spaľovacieho procesu.
- Zvýšený tlak plnenia, ktorý taktiež zvyšuje špičkové teploty. Ten môže byť spôsobený vyšším atmosférickým tlakom v prípade vyššieho plnenia motora alebo pri turboplnení.
- Zlá kvalita paliva, napr. nízke oktánové číslo.

Citlivosť motorov na klepanie môže byť redukovaná správnym návrhom.

- Kompaktnou geometriou spaľovacieho priestoru, aby sa zamedzilo vzniku horúcich miest.
- Centrálnym umiestnením zapalovacej sviečky, aby sa minimalizovalo šírenie plameňa.
- Zvýšením turbulencií pre zrýchlenie šírenia plameňa.
- Obmedzením alebo reguláciou preplňovacieho tlaku turbodúchadla motora.

Oneskorením okamihu zapálenia je proces konverzie energie posunutý. Pretože tlak vyvolaný horením je tak superponovaný na nižší tlak, ktorý je vyvolaný adiabatickou kompresiou, výsledný špičkový tlak je tým redukovaný.

Po krátkej časovej odozve vedú oscilácie plynu k rezonančným vlnám v spaľovacom priestore.

Rezonančné frekvencie závisia od teploty prostredia v spaľovacom priestore a jeho rozmerov. V reálnych motoroch sa pohybujú rádovo v jednotkách až desiatkach kilohertzov (veľmi často v okolí 6,8 kHz - vrtanie 89mm).

Existuje niekoľko prístupov pre meranie oscilácii klepania

- a) Sensory merania tlaku v spaľovacom priestore
- b) Sensory mechanických vibrácií na bloku motora
- c) Meranie ionizačného prúdu

a) Meranie tlaku v spaľovacom priestore

Je to priamy prístup, pri ktorom sa oscilácie nasuperponované na krivku tlaku filtrujú napr. pásmovým filtrom.

Výhody: Celkové získavanie všetkých oscilácií v spaľovacom priestore;

Nevýhody: Vysoké náklady na odolné senzory s veľkým rozsahom tlaku (vid' časť senzory tlaku), pracujúce v spaľovacom priestore; V hlave motora nemusí byť miesto pre senzory tlaku;

b) Meranie vibrácií na bloku motora

Blok motora prenáša oscilácie od jednotlivých valcov a tie sú snímané mechanickými rezonátormi (vid' časť senzory klepania). Týmito senzormi môže byť meraných aj niekoľko rezonancií. Štvorvalcový motor vyžaduje jeden alebo dva senzory, šesťvalcový viac najmenej však dva.

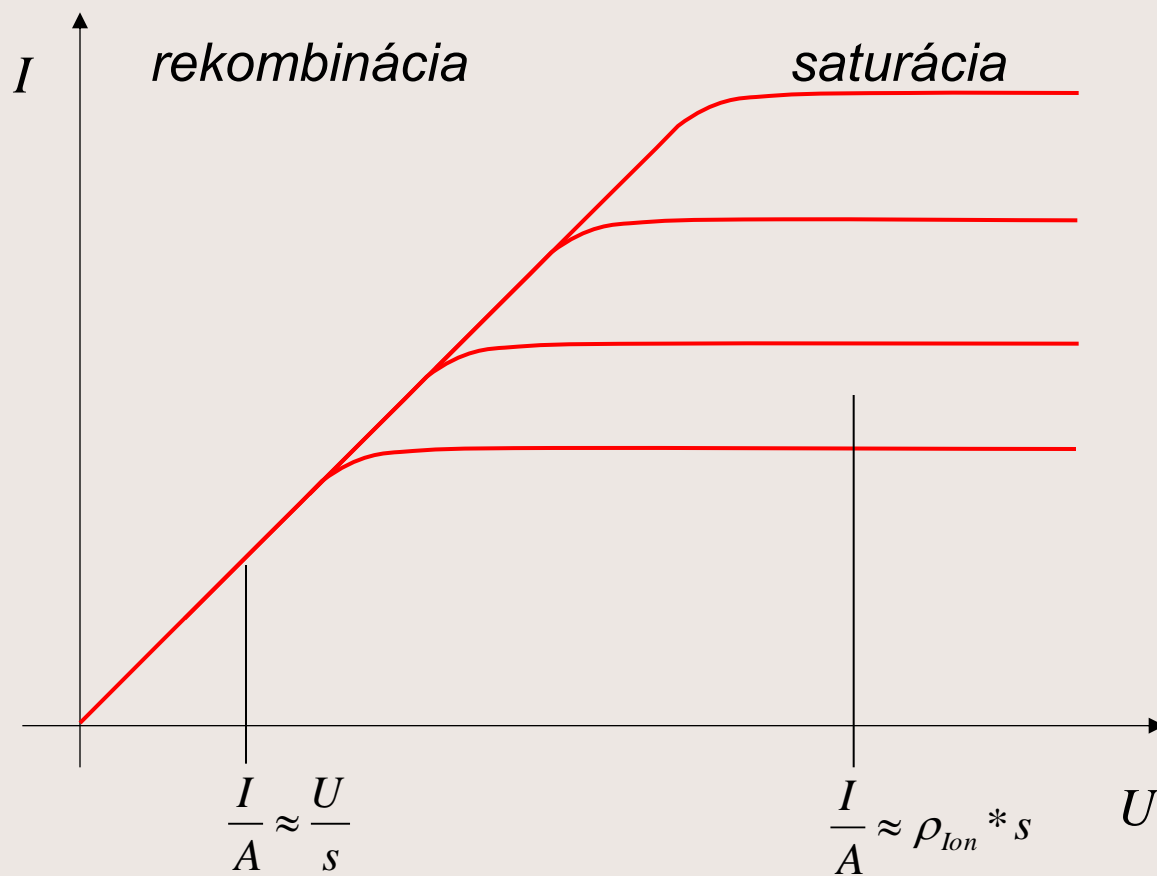
Výhody: Lacné; Priama a relatívne jednoduchá montáž;

Nevýhody: Silné rušenie od zatvárajúcich sa ventilov alebo piestov

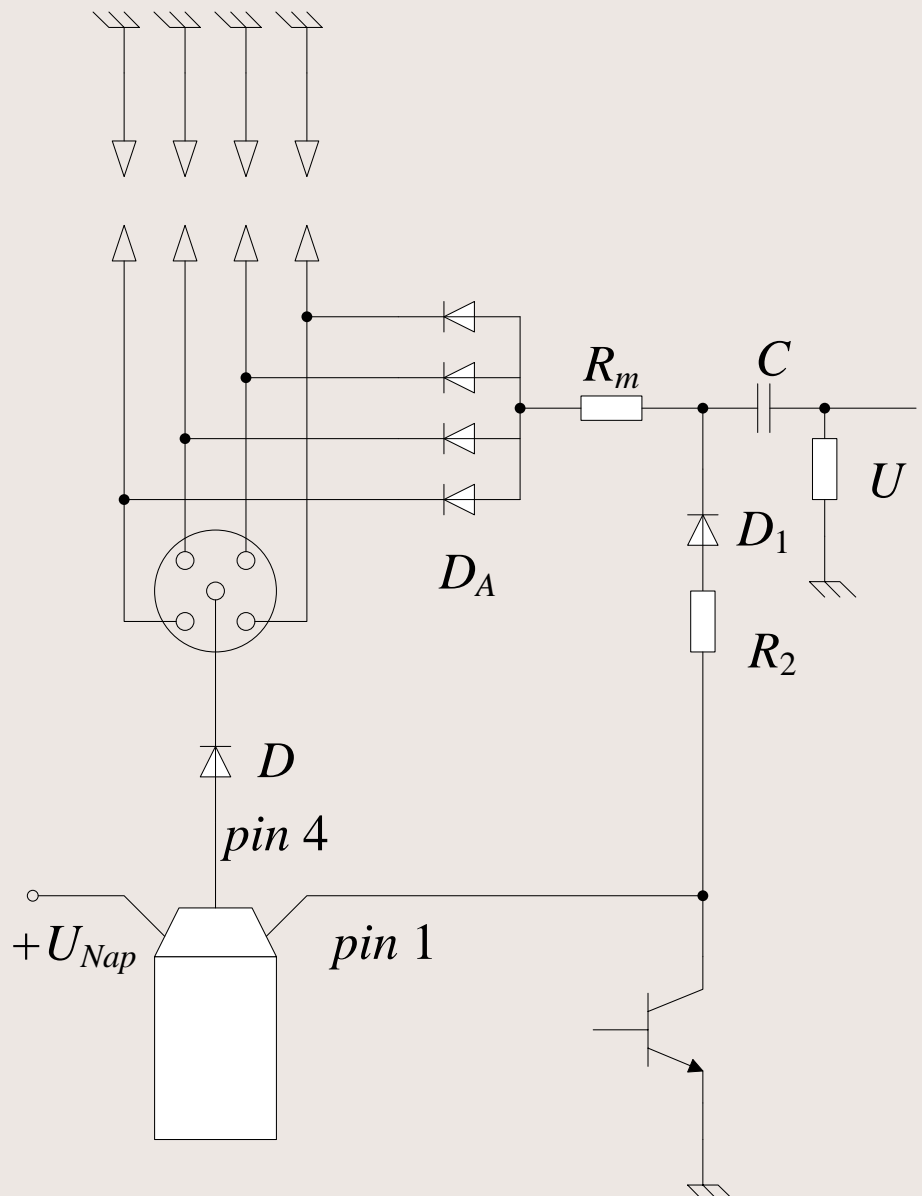
c) Meranie ionizačného prúdu

Ako senzory môžu byť použité štandardné zapalovacie sviečky. Počas spaľovania uhlíkov sú generované elektricky nabitú ióny a elektróny. Intenzita chemickej reakcie a tým aj intenzita ionizácie závisí od teploty plameňa, od pomeru λ a od kvality paliva. Nepohyblivú hmotnosť pozitívneho iónu H_3O^+ je asi 30 000 krát vyššia než elektrónu, preto je polarita napätia na iskrišti sviečky taká, že elektróda s malou plochou je kladná a s veľkou je záporná. Ľahké elektróny sú podstatne viac akcelerované než ťažké ióny. Preto rovnaký počet elektrónov môže dosiahnuť elektródu s malým povrchom ako kladných iónov, ktoré dosiahnu elektródu s veľkým povrchom.

Keď je na medzere iskrišťa (šírka s) nízka intenzita elektrického poľa U/s , potom je hustota ionizačného prúdu i/A (A plocha elektródy) úmerná tejto intenzite (platí tu Ohmov zákon). Ióny a elektróny, ktoré sú generované spaľovacím procesom a nedosiahnu jednu z elektród, rekombinujú. Ionizačné prúdy preto musia byť merané pri vysokej intenzite el. poľa, kedy všetky elektróny aj ióny sú pritiažené k elektródam. Tento režim sa nazýva saturačný. Hustota ionizačného prúdu je tak závislá iba od hustoty iónov v spaľovacom procese a šírky medzery iskrišťa (obr). Odpor meracieho obvodu nižší ako $0,5\text{M}\Omega$. Obvod merania ionizačného prúdu musí byť chránený pred vysokým napätím zapalovania. Dá sa to dosiahnuť vysokonapät'ovými diódami (obr).



Ionizačný prúd v závislosti od napätia



Meranie ionizačného prúdu pomocou vysokonapäťových diód

Kondenzátor C na primárnej strane indukčnej cievky je nabitý asi na 300 – 400V v čase nabíjania cievky. Po zapálení sa napätie na sekundárnej cievke (*pin4*) znižuje. Po dosiahnutí dolnej úvrate je napätím na kondenzátore C napájaný obvod pre meranie ionizačného prúdu, ktorý je indikovaný úbytkom napätia na odpore R_m a tým aj intenzita horenia.

Problémom merania ionizačného prúdu je, že reprezentuje iba intenzitu horenia vo veľmi malom priestore v okolí zapalovacej sviečky a nie v celom spaľovacom priestore. Detekcia klepania tak silne závisí od pozície sviečky. Jej centrálna pozícia je tak výhodná, pretože prvá rezonančná vlna vykazuje v tomto mieste minimum tlaku a maximum rýchlosti. Druhá naopak a nie je vhodná pre detekciu klepania meraním ionizačného prúdu ale skôr pre nepriame meranie tlaku pri horení.

Výhody: Meranie vo vnútri valca, vylúčenie mechanických rušení

Nevýhody: Závislosť od pozície sviečky, meranie iba v malej časti spaľovacieho priestoru

d) Intenzita svetla procesu horenia

Oscilácie klepania modulujú intenzitu procesu horenia. Tým je modulovaná aj intenzita svetla a farba plameňa. Meranie svetla je preto ďalším prístupom pre meranie klepania. Monitorovaná je kónická časť hlavy valcov.

Cez strednú elektródu sviečky je vedené optické vlákno, ktorým sa privádza svetlo na fototranzistor. Vážnym problémom tohto prístupu je, že koniec vlákna sa zanáša sadzami a tým sa citlivosť mení rádovo.

Výhody: Meranie vo vnútri valca, vylúčenie mechanických rušení

Nevýhody: Extrémne zmeny citlivosti

Spracovanie signálu

Ak sa neuvažujú špecifické obvody, ktoré upravujú signály z jednotlivých senzorov, potom pre ďalšie spracovanie signálov je možné uvažovať rovnakú metodológiu ([obr](#)).

V prvom bloku sa pomocou automatickej regulácie zisku upraví signál na vždy rovnakú úroveň. V nasledujúcom bloku sú pásmovým priepustom potlačené všetky spektrálne zložky mimo frekvenčného rozsahu $(f_r - \Delta f/2, f_r + \Delta f/2)$, ktorý odpovedá rezonančnej frekvencii klepania. Krivka adiabatického tlaku je tým potlačená. Pásmovo filtrovaný signál predstavuje v časovej oblasti konvolúciu pôvodného signálu $y(t)$ a vzoru z časovej oblasti obdĺžnikovej oknovej vo frekvenčnej oblasti $r_{\Delta f}(t)$

$$y_F(t) = y(t) * r_{\Delta f}(t).$$

Ak sa pre pásmový priepust predpokladá obdĺžnikový tvar prenosovej funkcie, potom impulzová odozva alebo vzor Fourierovej transformácie tohto filtra v časovej oblasti má tvar

$$r_{\Delta f}(t) = \Delta f \cdot \text{Si}(\pi \Delta f t) \cdot \exp(j2\pi f_r t)$$

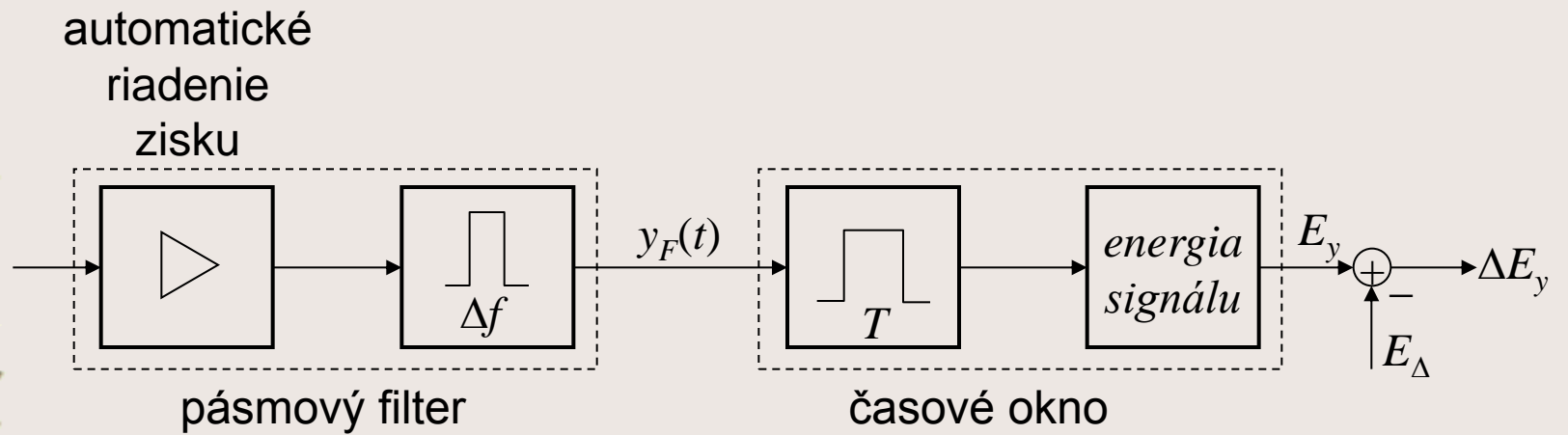
Klepanie sa vyskytuje iba v časovo vymedzenom intervale počas horenia, preto je signál $y_F(t)$ vynásobený oknovou funkciou v čase $r_T(t)$ so šírkou okna T , čo predstavuje ďalší blok. Z hľadiska spracovania signálov je možné uvažovať aj iné tvary oknovej funkcie ako iba obdĺžnikový. Integrovanie cez konečný interval, ktoré sa vykoná za účelom získania celkovej energie signálu klepania $E_y(t)$ vedie k dvojitej konvolúcii

$$E_y(t) = y_F^2(t) * r_T(t) = (y(t) * r_{\Delta f}(t))^2 * r_T(t).$$

Pre každý diskretný spaľovací cyklus n vyjadrený signál energie $E_y(n)$. Po odčítaní prahovej hodnoty E_0 , ktorá závisí od prevádzkového režimu (pracovného bodu) sa získa tzv. signál klepania

$$\Delta E_y(n) = \begin{cases} E_y(n) - E_0, & E_y \geq E_0 \\ 0, & \text{inak} \end{cases}$$

$\Delta E_y(n)$ môže byť klasifikovaný vo viacerých stupňoch, čím sa môže zjednodušiť riadenie klepania.



Spracovanie signálu klepania

Riadenie

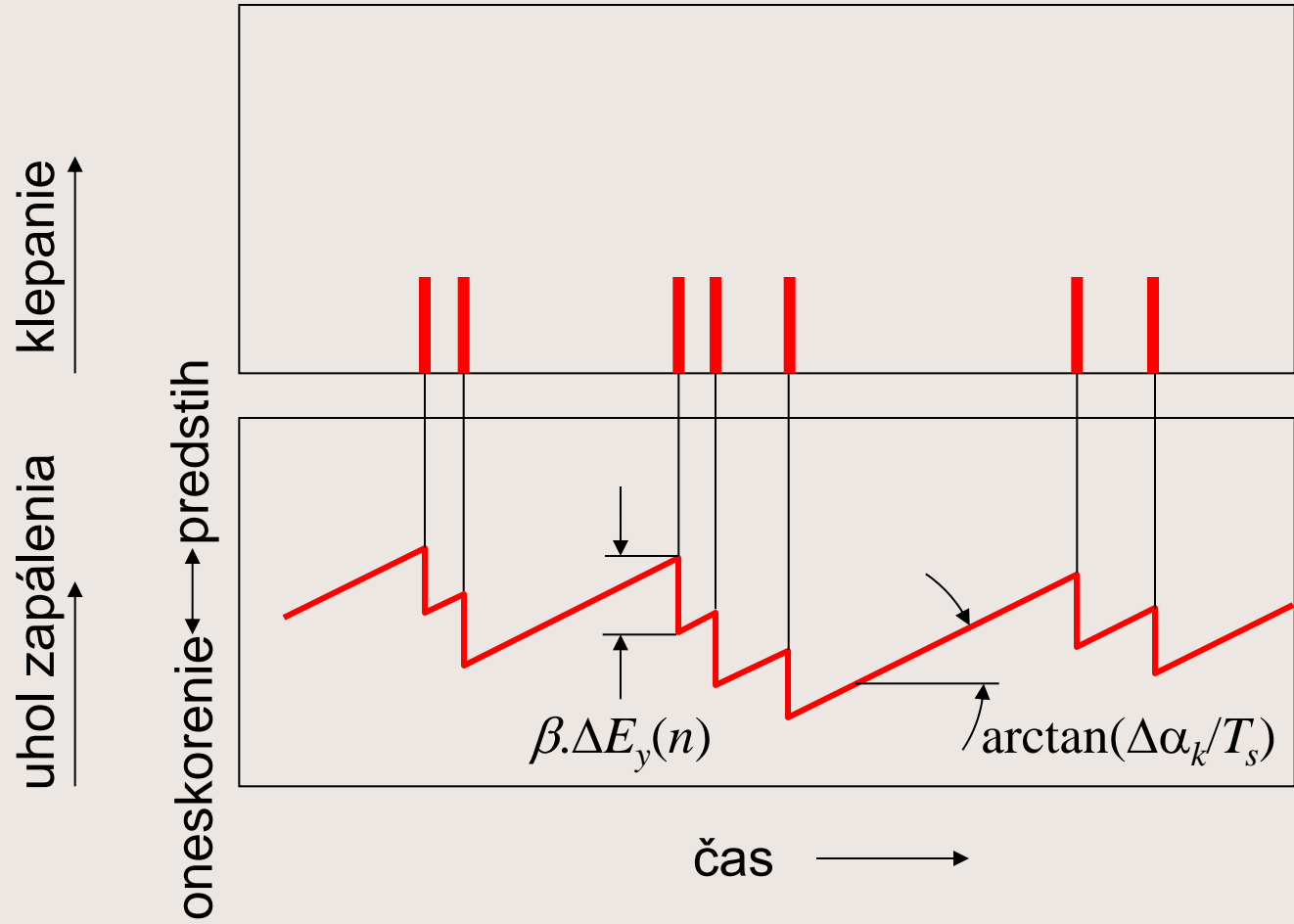
V klasických radiacích obvodoch je referenčná hodnota daná a snahou je dosahovať čo najtesnejšie priblíženie pomocou ovládanej premennej. Pri riadení klepania neexistuje takáto referenčná hodnota. Pretože existuje vysoký potenciál zničenia v priebehu niekoľkých zaklepaní vo valci, reakcia riadenia musí byť okamžitá.

Zvyčajným radiacim zásahom je oneskorenie zapálenia (skrátene uhla predstihu), čím sa posunie proces konverzie energie, redukuje špičkový tlak a teplota (vid' predch. kap.). Uhol zapálenia pri riadení klepania sa vypočíta pre každý cyklus n

$$\alpha_k(n) = \alpha_k(n-1) + \Delta\alpha_k - \beta \cdot \Delta E_y(n),$$

kde $\Delta\alpha_k$ je permanentný uhol predstihu a $\beta \cdot \Delta E_y(n)$ je uhol oneskorenia pri klepaní. Typický priebeh riadenia je na [obr.](#)

Kompresný pomer riadených motorov (klepanie) môže byť zvýšený aspoň o 1. a spotreba klesne okolo 7% pri turbodúchadlách aj o viac.



Riadenie výskytu klepania posúvaním uhla predstihu