

STRATEGIE ŘÍZENÍ TOKU ENERGIE PRO POHON VOZIDLA S PNEUMATICKY HYBRIDNÍM MOTOREM

Energy Management Strategies for Hybrid Pneumatic Engine

A. Ivančo, J. Bíla, Y. Chamailard

Souhrn: Článek představuje nový koncept hybridního pohonu pro automobily. Dále nabízí a porovnává vícero strategií hospodaření s energií s hlavním cílem snížit spotřebu pohonných hmot. Celkem byly navrženy dvě strategie řízení použitelné v reálném čase. První heuristická, která používá parametry vozidla a motoru pro výběr vhodného způsobu pohonu. Druhá se zakládá na bilancování spotřeby paliva mezi konvenčním motorem a motorem na stlačený vzduch. Tyto dvě strategie jsou v závěru porovnány za pomoci dynamického programování. Dosažené výsledky nabízejí dostatek možností pro další rozvoj a perspektivy na poli hybridních vozidel.

Klíčová slova: hybridní vozidlo, pneumaticky hybridní motor, strategie řízení pohonu, dynamické programování.

1. Úvod

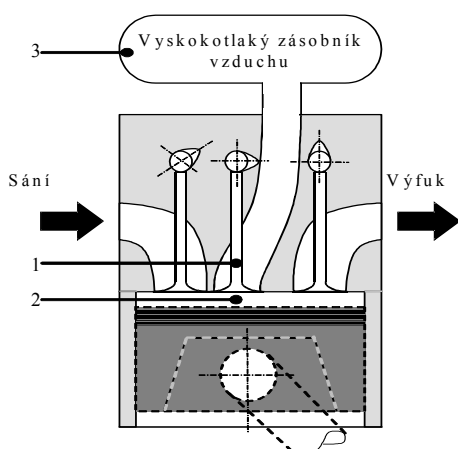
V dnešní době představují hybridní vozidla novou evoluci v automobilovém odvětví. Hybridní funkce dovoluje výrazné snížení obsahu vypouštěného CO₂ díky zvýšení celkové účinnosti pohonu vozidla, což následně vede ke snížení znečištění ovzduší a to hlavně v městských aglomeracích.

V našem případě je použito originálního přístupu v hybridizaci pohou, neboť to není vozidlo hybridní (víceromotorové ve stejném voze), ale jedná se o hybridní motor (vícerozdroj energie ve stejném motoru). Dodatečná energie použitá v motoru jako doplněk k chemické energii paliva je stlačený vzduch [1]. Během brzdění je kinetická energie vozidla opět získána přeměnou do formy stlačeného vzduchu a uskladněna v zásobníku. To se děje ve spalovacím prostoru díky dodatečnému ventilu vsazenému do hlavy válce (Obrázek 1). Ten spojuje spalovací komoru se zásobníkem stlačeného vzduchu. Postupnou aktivací plnicího ventilu a uzavřením přívodu paliva dochází k přeměně klasického spalovacího motoru na pneumomotor, který je schopen dodat mechanickou práci (expanzí stlačeného vzduchu ve spalovací komoře), nebo ji naopak odebrat jako pneumatický kompresor.

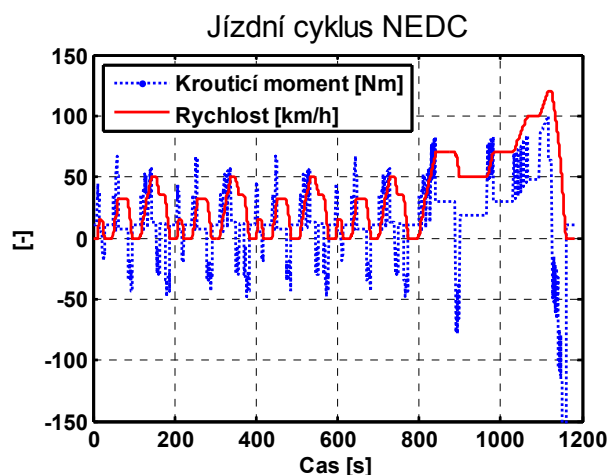
Pro upřesnění je třeba dodat, že tento systém představuje zároveň integraci systému stop & start, neboť motor je v režimu pneumomotoru schopen dodat kroutící moment i při rozběhu tj. z nulových otáček.

Pro správné využití výhod nabízeného konceptu je nutno definovat a následně optimalizovat strategie řízení pro rozhodování o aplikaci jednotlivých funkčních módů. Hlavním cílem bylo snížit spotřebu pohonných hmot a to při současném zachování vnějších charakteristik vozidla. Pro dodržení funkce konceptu bylo nutno zahrnout i některé kompromisy vzhledem k zásobníku a stavu jeho naplnění.

Hlavním úkolem tohoto článku je navrhnout, upravit a porovnat dvě strategie řízení pro pneumatiky hybridní pohon. Simulace vychází z modelu vozidla při průjezdu jízdním cyklem (např. NEDC, Obrázek 2).



Obrázek 1: Schéma uspořádání motoru



Obrázek 2: NEDC cyklus s odpovídajícím krouticím momentem

2. Model systému

Jako řídicí veličina vstupuje rychlost vozidla, která je sledována dokonalým řidičem (přesné určení odchylky okamžité od žádané rychlosti) a která pochází z definice jízdního cyklu. Signál rychlosti je nadále přepočten na signál krouticího momentu k dodání motorem, za pomoci modelu vozidla a převodového ústrojí. Tento postup je dále podrobněji rozebrán:

Řidič obdrží signál požadované rychlosti pro vozidlo v_d , který je nadále srovnán s aktuální rychlostí vozidla v_v pro výpočet nutné akcelerace γ :

$$\gamma = \frac{(v_d - v_v)}{\Delta t} \quad (1)$$

Po započtení bilance sil (aerodynamika F_a , valivý odpor F_v , setrvačnost F_i , atd.) a aplikaci prvního zákona dynamiky

$$m \cdot \gamma = \sum F \quad (2)$$

je vypočtena celková síla působící při vozovce F_{voz} . Znalost charakteru převodového ústrojí (převodový stupeň nápravy ρ_c , převodovky ρ_b a ujeté dráhy na jedno otočení kola l_w) dovoluje dále vypočítat potřebný krouticí moment C_m motoru:

$$C_m = (F_{voz} \cdot \rho_b \cdot \rho_c \cdot l_w) / 2\pi \quad (3)$$

Jestliže je požadovaný krouticí moment kladný C_m může být uplatněn konvenční nebo pneumatický mód. Jestliže je však záporný, vybraný mód je kompresor (nebo brzdění v případě běžného vozidla). Jestliže je požadovaný záporný krouticí moment větší nežli jsme schopni odebrat módem kompresor, dochází k zapojení klasických brzd. A konečně, jestliže

je žádaný krouticí moment C_m nulový, máme možnost zastavit motor a nastartovat až při následném požadavku na krouticí moment, nebo nechat běžet konvenční motor na volnoběh. Řízení dodávaného krouticího momentu je rozděleno na dva bloky. První blok se stará o přiřazení správného funkčního módu, kdežto druhý upravuje parametry motoru (převážně plnicího ventilu) tak, aby byl termodynamickým cyklem vyprodukován požadovaný krouticí moment.

1.1 Model vozidla

Bylo použito jednoduchého modelu vozidla střední třídy (hmotnost vozidla 1500 kg, 5-ti rychlostní skříň, objem válců 1.6l, palivo-benzín)

Pro možnost porovnání výsledků vzhledem k použití konvenčního pohonu (referenční spotřeba pro vozidlo bez hybridního pohonu), nebo pro každou navrženou strategii řízení zvlášť, byla zachována stejná strategie pro změnu převodových stupňů jako u konvenčního pohonu.

1.2 Jízdní cykly

Pro rozpoznání výhod konceptu bylo použito pět různých jízdních cyklů. Na každém z nich můžeme porovnat celkovou spotřebu. První je cyklus NEDC (New European Driving cycle **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**), který je normalizován pro porovnávání spotřeby vozidel na trhu. Dále bylo použito čtyř jízdních cyklů, které lépe vystihují podmínky reálné jízdy (rychlost vozidla, zrychlení, atd.).

1.3 Omezení a okrajové podmínky systému :

Pro zachování reprezentativnosti modelu musela být zohledněna některá omezení. Pro konvenční mód nesmí být otáčky ω_{conv} nižší než ty při volnoběhu.

$$\omega_{konv} \geq \omega_{konv} \quad (4)$$

Stejné omezení platí i pro krouticí moment C_m , který musí být udržen v mezích:

$$C_{max} \geq C_m \geq C_{min} \quad (5)$$

Při uplatnění módu pneumotor tlak v zásobníku p_t musí být mezi hodnotami $p_{t,min} = 6.5\text{bar}$ (tlak potřebný pro nastartování) a maximální hodnotou $p_{t,max} = 22\text{bar}$ odvozenou od kompresního poměru motoru. Může ovšem nastat i situace, že tlak v zásobníku bude pod spodní hranici $p_{t,min}$, potom při zastavení vozidla nemůže dojít k zastavení motoru a jsme nuceni přejít do volnoběhu konvenčního motoru (odkud plyne nadbytečná spotřeba).

$$p_{t,max} \geq p_t \geq p_{t,min} \quad (6)$$

Pro snížení času potřebného pro celkový výpočet byl systém považován jako kvazistatický s periodou vzorkování jízdního cyklu 0.5s (tato perioda může být ještě snížena pro dosažení lepší absolutní přesnosti, ale při relativní přesnosti výsledky zůstávají srovnatelné).

Všechny módy motoru jsou zpracovány ve formě map spotřeby. Mapy spotřeby pro mod pneumotor a kompresor byly odvozeny od znalostí fyzikálních vztahů termodynamických dějů v nich probíhajících. Mapa spotřeby konvenčního módu je odvozena od měření ve zkušebně.

2 Strategie řízení pohonu

Strategie řízení energie pohonu mohou být chápány jako rozhodovací systém, kde jako hlavní kritérium vystupuje minimalizace spotřeby nevratné energie (pohonných hmot). Navržené strategie mohou být rozděleny do dvou skupin.

- Strategie použitelné v reálném čase: K rozhodnutí o změně způsobu pohonu zde slouží pouze informace o aktuálním stavu, ve kterém se systém nachází (rychlost pohybu

vozidla, požadavek na krouticí moment, tlak v zásobníku, aj.) bez znalosti následného stavu. Za jistých okolností lze ke zlepšení vlastností rozhodovacího mechanismu použít i vhodně zpracované informace o historii vývoje stavové trajektorie.

- **Posteriorní :** Ze znalosti celkového průběhu stavové trajektorie lze odvodit optimální strategii řízení (zde za použití Dynamického programování). Jako hlavní kritérium byla stanovena minimalizace spotřeby za současného dodržení všech okrajových podmínek. Tento typ strategie nemůže být přímo použit v reálném čase, ale jen za pomoci doplňujících komponent (predikce stavové trajektorie, dolování znalostí, atd.)

Celkově byly navrženy dvě strategie řízení v reálném čase. První (Kauzální) je heuristická a je založena na sledování stavových parametrů vozidla a motoru pro výběr vhodného módu. Druhá (Penalizační) je založená na poměru spotřeby mezi konvenčním a pneumatickým motorem.

2.1 Kauzální strategie

Kauzální strategie je založena na rozhodnutích typu « Jestliže, potom ». Je to heuristická metoda tudíž je závislá na konkrétní aplikaci a způsobu jejího využití a nezaručuje tedy plné využití výhod konceptu [2]. Po vyladění však dává obstojné výsledky (Obrázek 3 a Obrázek 4). Strategie používá měřitelných parametrů systému jako rychlost otáček motoru ω_{conv} , požadavku na krouticí moment C_m nebo tlaku v zásobníku p_z pro výběr nejvhodnějšího módu.

2.2 Strategie s penalizační funkcí

Tato strategie je založena na minimalizaci okamžité spotřeby. Penalizační funkce f_{pen} je použita pro vyvážení spotřeby stlačeného vzduchu vůči spotřebě paliva. Výběr nejvhodnějšího módu se děje na základě minimalizace ekvivalentu spotřeby pro provedení žádané práce. Pro porovnání energetické náročnosti je však nutno definovat množství stlačeného vzduchu (m_{vzduch}) přepuštěného ze zásobníku a množství pohonných hmot (m_{palivo}) odebraných z palivové nádrže ve stejných jednotkách. K tomu bylo použito prvního termodynamického zákona a spotřeba na obou stranách vyjádřena v Joulech. Pro práci odebranou ze zásobníku stlačeného vzduchu platí rovnice:

$$\Delta U = W + Q + \Delta H \quad (7)$$

Když víme že

$$\Delta H = \sum_{i=1}^k C_{pi} T_i \Delta m_i \quad (8)$$

Nakonec úbytek energie v zásobníku:

$$E_{vzduch} = m_{vzduch} \cdot C_p \cdot T_{zasobnik} \quad (9)$$

Na straně palivové nádrže bylo použito zákona výhřevnosti:

$$E_{paliva} = m_{palivo} \cdot PCI \quad (10)$$

Z výpočtu vyplývá, že použití stlačeného vzduchu pro pohyb vozidla je energeticky méně náročné. V konečném důsledku je tedy nutné pro vyvážení energetické náročnosti použít penalizační funkce f_{pen} . Když vybereme penalizační funkci f_{pen} příliš slabou, riskujeme rychlé vyprázdnění zásobníku bez výrazných úspor paliva. Na druhé straně, pokud zvolíme penalizační funkci příliš silnou, upíráme možnost snadného uplatnění pneumatického módu a tak plně nevyužíváme výhod konceptu hybridně pneumatického motoru.

Pro první přiblížení byla penalizační funkce f_{pen} použita jako konstantní a po uvážení předchozích omezení zvolena:

$$f_{pen} = const = 2.15 \quad (11)$$

V druhé fázi byla penalizační funkce f_{pen} navržena jako funkce jedné proměné, a to v závislosti na tlaku v zásobníku stlačeného vzduchu.

$$f_{pen_var} = \lambda_{stredni} - x_{SOC}^3 \quad (12)$$

Kde výraz x_{SOC} vyjadřuje stav naplnění zásobníku:

$$x_{SOC} = \frac{2 \cdot p_t - (p_{t,max} + p_{t,min})}{p_{t,max} - p_{t,min}} \quad (13)$$

Tudíž využití pneumatického motoru je v přímé závislosti na stavu naplnění zásobníku.

2.3 Dynamické programování

Dynamického programování (DP) je použito jako reference pro porovnání celkové spotřeby dosažené jednotlivými strategiemi.

2.3.1 Přiblížení z pohledu matematiky

Uvažujme systém v diskretním čase (jízdní cyklus je tradičně diskretizován časem od 0,1s do 0.5s). Odkud :

$$x_{k+1} = f_k(x_k, u_k), k = 0, 1 \dots N-1 \quad (14)$$

Kde x_k je stav systému, který nabývá hodnot z množiny S_k , (rychlost vozidla, požadavek na krouticí moment, tlak v zásobníku, aj.). Řídicí veličina u_k je prvkem prostoru C_k a je nahlížena jako prvek prostoru všech módů vhodných pro naše uspořádání pohonu. u_k je tedy omezena nabývání hodnot z neprázdné množiny $U(x_k) \subset C_k$, použitelných módů pro uspokojení požadavku na krouticí moment za stavu x_k . Předpokládáme, že strategie spočívá v sekvenci funkcí

$$\pi = \{\mu_0, \dots, \mu_{N-1}\} \quad (15)$$

Kde μ_k přiřazuje ke každému stavu x_k jednu řídicí veličinu $u_k = \mu_k(x_k)$ kde $\mu_k(x_k) \in U_k(x_k)$ pro všechny $x_k \in S_k$.

S počátečním stavem x_0 a trajektorií $\pi = \{\mu_0, \dots, \mu_{N-1}\}$, jsou stavy systému jsou definovány jako :

$$x_{k+1} = f_k(x_k, \mu_k(x_k)) \quad (16)$$

Tudíž pro jízdní cyklus $g_k, k = 0, 1, \dots, N-1$, cena pro trajektorii navrženou sekvencí π jednotlivých módů a počátečním stavu x_0 je :

$$J_\pi(x_0) = E\{g_N(x_N) + \sum_{k=0}^{N-1} g_k(x_k, u_k(x_k))\} \quad (17)$$

Za optimální strategii π^* je tedy možno považovat takovou, která minimalizuje celkovou cenu :

$$J_{\pi^*}(x_0) = \min_{\pi \in \Pi} J_\pi(x_0) \quad (18)$$

kde Π je obor všech přípustných sekvencí.

Optimální cena $J^*(x_0)$ závislá na x_0 je vyjádřena [4] jako;

$$J^*(x_0) = \min_{\pi \in \Pi} J_\pi(x_0) \quad (19)$$

3. Výsledky

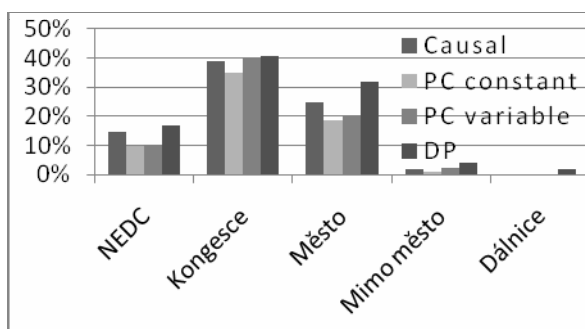
Výsledky byly rozděleny do dvou částí. Nejdříve jsou představeny pro stejný výchozí stav ($p_t = 10 \text{ barů, } 0 \text{ b}$) a pro různé strategie řízení. Později pro tlak v zásobníku, který na

konci cyklu odpovídá počátečnímu (**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**). Tento druh srovnávání však nevystihuje reálné podmínky v provozu, kdy se jen těžko stane, že tlak v zásobníku na počátku a konci cyklu bude stejný. Nakonec však jedině v tomto případě je spotřeba promítnuta jen do pohonných hmot a tím plně srovnatelná.

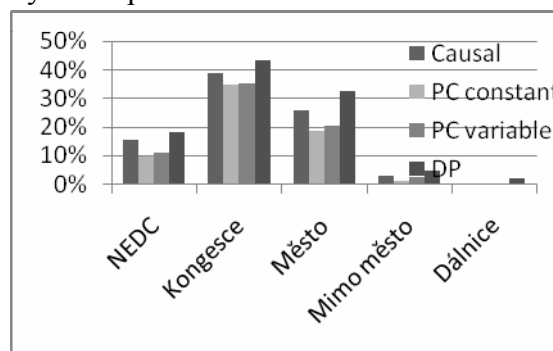
Pro stejné výchozí podmínky pozorujeme, že nejlepších výsledků je dosaženo za pomoci dynamického programování, ale také to, že celková spotřeba dosažena za použití kauzální strategie nebo penalizační funkce v závislosti na tlaku v zásobníku, jsou si relativně blízké. Když ještě uvážíme skutečnost, že ve většině případů je na konci cyklu tlak v zásobníku větší než na počátku, lze usoudit, že existuje rezerva pro dodatečné využití pneumatického módu.

4. Závěr

Tento článek představuje nový koncept hybridizace pohonu, navrhuje a porovnává vícero strategií pro řízení toku energie, to vše za účelem snížit a pokud možno minimalizovat spotřebu pohonných hmot. Výsledky (Obrázek 3 Obrázek 4) ukazují na relativně slabou citlivost strategií na počáteční podmínky. Toto je příznivé zjištění nejen pro nadcházející práce na zlepšování strategií řízení, ale i pro samotný koncept.



Obrázek 3: Stejné výchozí podmínky



Obrázek 4: Výchozí podmínky rovny konečným

Reference

1. HIGELIN, P., A. CHARLET, and Y. CHAMAILLARD, *Thermodynamic Simulation of a Hybrid Pneumatic-Combustion Engine Concept*. *Int.J. Applied Thermodynamics*, 2002. 5(1): p. 1-11.
2. SCIARRETTA, A. and L. GUZZELLA, *Rule-based and optimal control strategies for energy management in parallel hybrid vehicles*, in *6th International Conference on Engines for Automobile 2003: Capri*.
3. RIZZONI, G., P. PISU, and E. CALO, *Control strategies for parallel hybrid electric vehicles*, in *Advanced in automotive control 2003: Salerno, Italy*.
4. BERTSEKAS, D.P., *Dynamic Programming and Optimal Control*. 3 ed. Vol. 1. 2005, Nashua, USA: Athena Scientific.