



Národní konference s mezinárodní účastí  
**INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2002**

13. – 16. 5. 2002, Svratka, Česká republika

**ELEKTROMECHANICKÁ NÁHRADA SETRVAČNÍKU  
SPALOVACÍHO MOTORU**

Zdeněk Langr<sup>1</sup>

***Abstrakt:***

*Článek se zabývá problematikou elektromechanické náhrady setrvačnicku spalovacího motoru v systému startérgenerátor-spalovací motor nebo v hybridním pohonu automobilu, kdy je el. stroj přímo spojen s klikovou hřídelí. Jsou zde rozebrány případy tzv. pasivního a aktivního tlumení momentových nerovnoměrností a jsou nastíněny příslušné regulační struktury.*

**Klíčová slova:**

Spalovací motor, elektrický stroj, tlumení, setrvačnick

**1. ÚVOD**

Při běhu spalovacího motoru dochází ke značným momentovým nerovnoměrnostem na klikové hřídeli motoru. Ty jsou způsobeny sekvencí kompresí a expanzí ve válcích spalovacího motoru, které vznikají u čtyřtaktu čtyřválcového dvakrát za jednu otáčku (obr.1). Frekvence těchto rázů je přímo úměrná otáčkám motoru (tab. 1). Z tohoto důvodu je na klikové hřídeli umístěn robustní setrvačnick, aby vyrovnával vzniklé momentové nerovnoměrnosti. Při vzniku momentového rázu setrvačnick do sebe akumuluje energii a při odeznívání rázu energii vrací zpět do mechanického systému. Tímto způsobem dochází ke tlumení rázů.

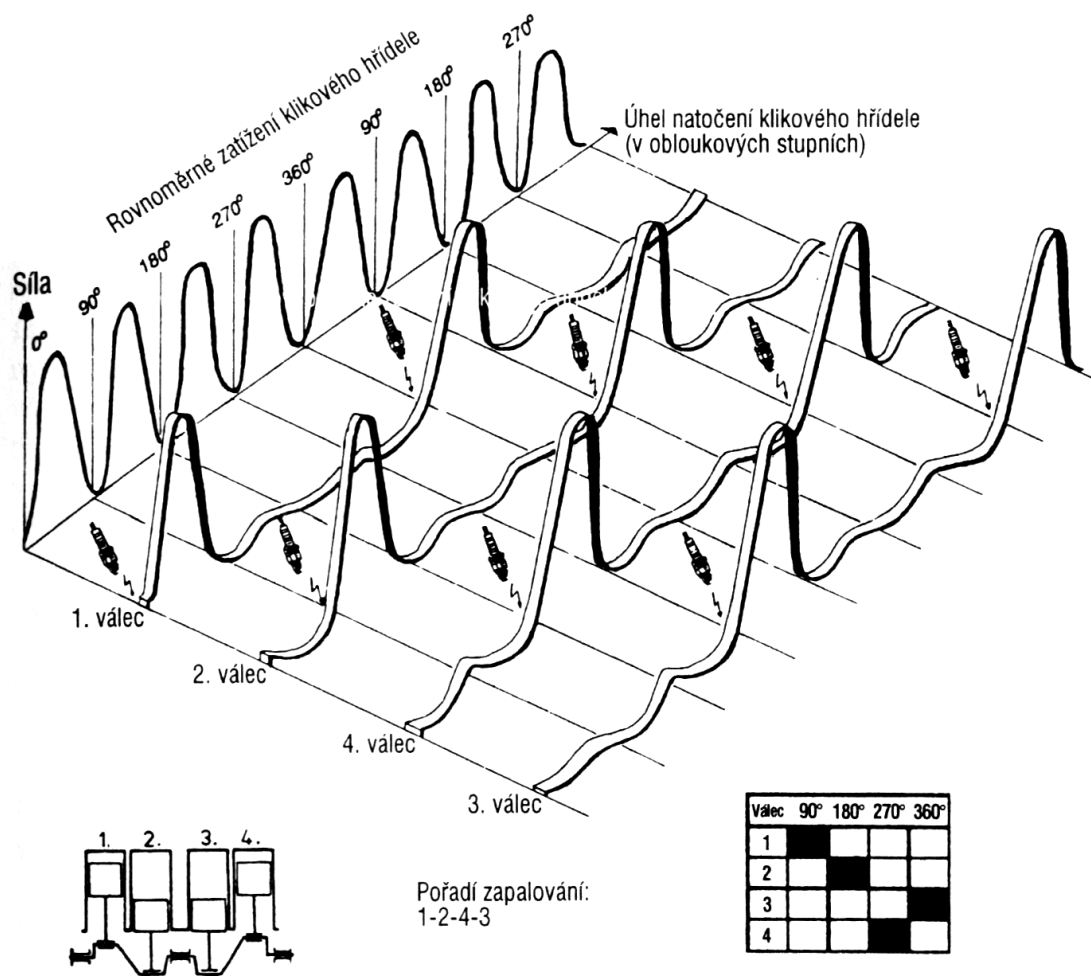
Realizací pohonu *elektrický stroj – spalovací motor* v automobilu nastává problém s rozměry a hmotností celého pohonu. Tento problém lze částečně řešit odstraněním setrvačnicku a nahradit tak mechanické tlumení tlumením elektromechanickým. Toto lze rozdělit na dva základní principy *pasivní a aktivní elektromechanické tlumení*.

---

<sup>1</sup> Zdeněk Langr, Ing. UVEE FEKT VUT Brno Technická 8, 616 00 langr@feec.vutbr.cz

Otáčky motoru [min <sup>-1</sup> ]	Frekvence momentových rázů [Hz]
6000	200
3000	100

Tab. 1. Frekvence momentových rázů u čtyřválcového čtyřtaktního spalovacího motoru



Obr. 1. Časový průběh silového působení na klikový hřídel (zatížení klikového hřídele)

## 2. PASIVNÍ ELEKTRICKÉ TLUMENÍ

Pasivní tlumení využívá principu přelévání energie z hřídele motoru do nějakého akumulátoru energie a zpět. Při snaze o odstranění setrvačnicku ze systému se musí najít vhodný akumulátor energie, do kterého se bude energie periodicky akumulovat obdobně jako u mechanického setrvačnicku. Zde se nabízí použít jako akumulátoru energie elektrický kondenzátor. Schopnost akumulovat energii  $W$  momentových rázů u mechanického systému je dána momentem setrvačnosti  $J$  (rovnice 1). V našem případě bude tato schopnost dána kapacitou elektrického kondenzátoru  $C$  (rovnice 2).

$$dW(t) = J\omega(t)d\omega(t) \quad (1)$$

$$dW(t) = Cu(t)du(t) \quad (2)$$

kde:  $\omega(t)$  otáčky

$u(t)$  napětí

Porovnáním těchto rovnic dostáváme vztah (4). Veličinu  $J_{el}$  nazveme elektrický ekvivalent momentu setrvačnosti.

$$J\omega du = C u du \quad (3)$$

$$J_{el} = C \frac{u}{\omega} \frac{du}{d\omega} \quad (4)$$

Celkový moment setrvačnosti systému je dán součtem jednotlivých momentů setrvačnosti (vztah 5).

$$J_{celk} = J_{el} + J \quad (5)$$

U většiny el.strojů je závislost indukovaného napětí na otáčkách lineární.

$$\frac{u_i}{\omega} = konst \quad (6)$$

Například pro stejnosměrný stroj platí:

$$\frac{u_i}{\omega} = c\Phi \quad (7)$$

Potom při zanedbání úbytku napětí na odporu a indukčnosti vinutí platí pro svorkové napětí:

$$\frac{u}{\omega} = \frac{du}{d\omega} = c\Phi = konst \quad (8)$$

Výsledný vztah mezi el. momentem setrvačnosti a kapacitou pro ss motor:

$$J_{el} = C(c\Phi)^2 \quad (9)$$

Vzhledem k tomu, že vektorově řízený synchronní a asynchronní stroj má obdobné vlastnosti jako ss stroj, bude uvedená myšlenka platit i pro tyto stroje.

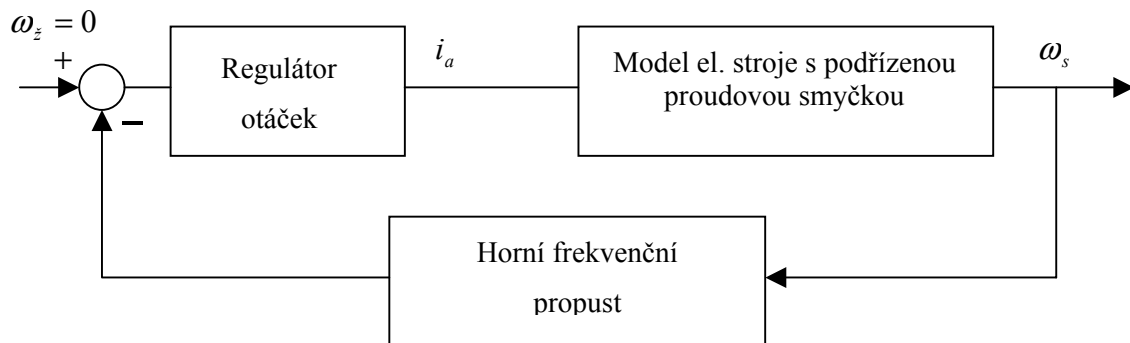
Z uvedených vztahů vyplývá, že vliv momentu setrvačnosti lze nahradit kapacitou připojenou do stejnosměrného meziobvodu. Ovšem při uvažování reálného vinutí elektrického stroje je celý problém daleko složitější. Vlivem indukčnosti a odporu vinutí

se výsledná soustava chová jako systém 2. řádu. Taková soustava má určitou rezonanční frekvenci, proto se nebude chovat stejně v celém otáčkovém rozsahu. Možné řešení je v použití vhodné regulace k vykompenzování nežádoucích časových konstant.

### 3. AKTIVNÍ ELEKTRICKÉ TLUMENÍ

U tohoto principu jde o dynamickou regulaci otáček elektrického stroje, protože vliv momentových změn se projeví nerovnoměrností otáček.

Kybernetická regulační smyčka je složena z regulátoru otáček a modelu elektrického stroje s podřízenou proudovou smyčkou. Signál okamžité hodnoty otáček  $\omega_s$  je vyfiltrován tak, aby neobsahoval stejnosměrnou složku. Takto upraveným signálem je vytvořena záporná zpětná vazba. Protože smyslem celé regulace je zamezit dynamickým změnám otáček je vstupní žádaná hodnota otáček  $\omega_z$  nulová. Tímto způsobem je dosaženo toho, že regulátor otáček se snaží vyrovnávat pouze dynamické změny. Regulační smyčka je znázorněna na obr 2.

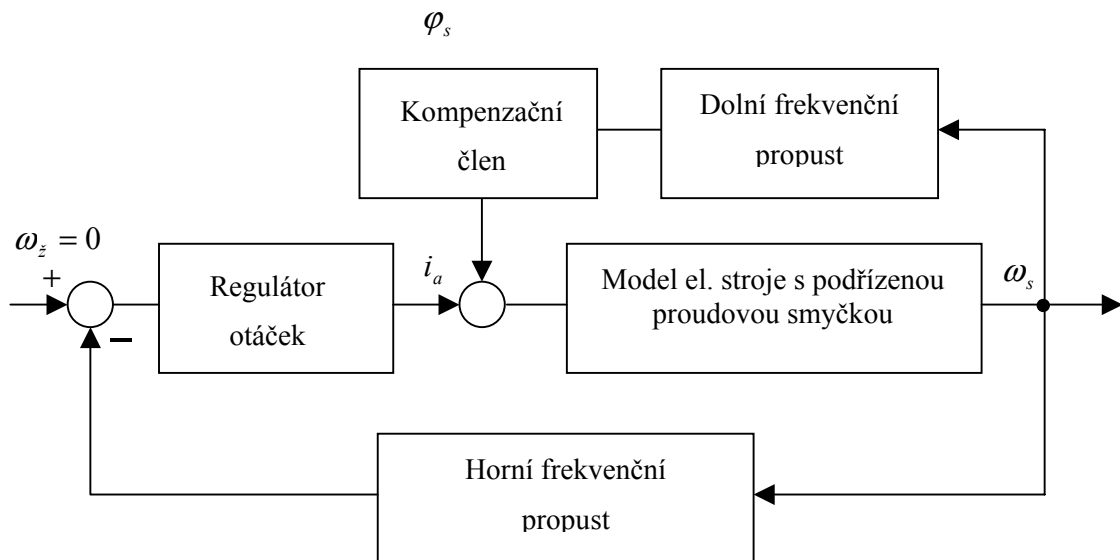


Obr. 2. Blokové schéma regulační smyčky

Samotná regulační smyčka realizovaná jakýmkoliv způsobem má vždy nějakou minimální dobu regulace. Uvedený způsob regulace se snaží akčním zásahem kompenzovat změnu otáček. Vliv takovéto regulace je identický s účinky klasického setrvačnicku.

Možným vylepšením této struktury je použití kompenzačního členu kompenzujícího statický moment na hřídeli (obr. 3). Zde je využito znalosti chodu spalovacího motoru. Momentové nerovnoměrnosti vznikají při určitém úhlu natočení hřídele, který závisí na okamžiku expanze a komprese ve válci motoru. Se změnou otáček se mohou tyto hodnoty měnit, proto výstupní hodnota kompenzačního členu závisí na okamžité poloze klikové hřídele  $\varphi_s$  spalovacího motoru a střední hodnotě otáček. Tato střední hodnota se získá vyfiltrováním signálu z čidla otáček pomocí dolní frekvenční propusti.

Přesnost regulace bude záviset na rychlosti regulační smyčky, která bude realizována číslicově v rámci celého řídicího algoritmu elektrického stroje a přesnosti čidla otáček. Přesný model kompenzačního členu závisí především na typu spalovacího motoru. Tento model bude možno stanovit i experimentálně.



Obr. 3. Blokové schéma regulační smyčky s kompenzačním členem

## 4. ZÁVĚR

Vzhledem k celosvětovému trendu snižování počtu válců u malých vozidel rostou požadavky na moment setrvačnosti setrvačnicku. Zde se nabízí nejrealnější možnost aplikace elektrického tlumení, protože právě u těchto vozidel se počítá s implementací startérgenerátoru nebo hybridního pohonu.

Výhody použití elektromechanického tlumení u tohoto typu vozidel:

- odstranění setrvačnicku (nižší moment setrvačnosti)
  - snížení hmotnosti spalovacího motoru
  - zmenšení rozměrů spalovacího motoru
- možnost použití méněválcových spalovacích motorů
  - vyšší účinnost spal. motoru
  - menší spotřeba paliva
  - menší hmotnost a rozměry spalovacího motoru

## 5. POUŽITÁ LITERATURA

[1] Šubrt J.: Úvod do teorie elektrických střídavých pohonů. Skriptum VUT - FEI UPVE

[2] Příkryl H.: Porovnání základních vlastností stejnosměrných a střídavých servopohonů, Seminář Elektrické servopohony a jejich aplikace VIII. ISBN 80 - 902175 - 5 - 9, 1998

[3] [FREISE W.: Motorová vozidla s hybridními pohony. Universitat Kaiserslautern ELEKTRO 7/1996

[4] Startéralternátor. Interní studie UVEE FEI Brno 1999