

NÁSTROJE PRO NÁVRH PARAMETRŮ VYVÁŽENÍ MOTOCYKLOVÉHO ČTYŘTAKTNÍHO MOTORU

P. Vrátník

Katedra konstruování strojů - Fakulta strojní - Západočeská univerzita v Plzni

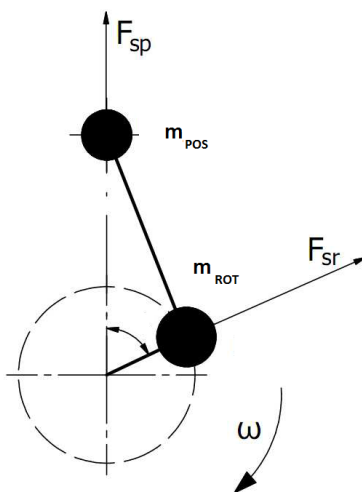
Abstrakt

Od sedmdesátých let minulého století se začali výrobci motocyklů věnovat snížení vibrací motorů a konstrukci kvalitnějšího odpružení za účelem zvýšení komfortu jezdce. Vibrace motoru jsou způsobeny jednak nepravidelností točivého momentu (čtyřtakt „pálí“ jednou za dvě otáčky hřídele), jednak nevyvážením setrvačných sil způsobených částmi motoru vykonávajícími posuvný pohyb. Cílem vyvažování klikového ústrojí je tyto síly, za použití vhodně zvolených hmot, minimalizovat a tím zajistit hladší chod motoru a jeho delší životnost. V dnešní době se nejčastěji pro vyvážení motorů používají vyvažovací hřídele. Jejich princip byl navržen již před více jak 100 lety Frederickem W. Lanchesterem.

1 Princip vyvážení jednoválcového motoru

V této kapitole jsou shrnuty poznatky o principu vyvažování motorů, zejména interakce mezi setrvačnými silovými účinky jednotlivých hmot.

Komponenty klikového mechanismu jednoválcového motoru lze rozdělit do dvou skupin podle pohybu, který vykonávají. Jedná se o skupiny komponent, které vykonávají posuvný nebo rotační pohyb.



Obr. 1- redukce hmotnosti pístní skupiny

1.1 Pohyb rotační

Vykonávají tyto části: klikový hřídel, klikový čep a větší část redukované hmotnosti ojnice. Pro výslednou sílu platí následující vztah:

$$F_{sr} = m_{ROT} \cdot R \cdot \omega^2$$

kde: m_{ROT} [kg] hmotnost rotujících částí

R [m] polovina zdvihu klikového hřídele

ω [rad/s] úhlová rychlost rotace

1.2 Pohyb posuvný

Vykonává píst, pístní kroužky, pístní čep, pojistky pístního čepu a redukováná posuvná hmotnost ojnice.

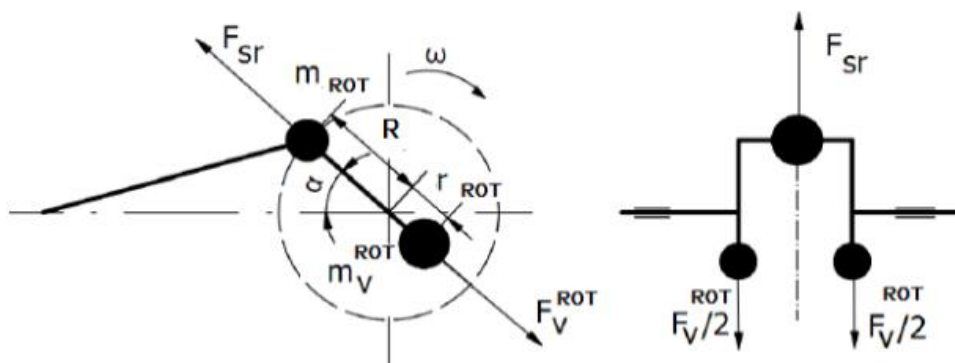
$$F_{sp} = m_{POS} \cdot R \cdot \omega^2 \cdot \cos(\alpha) + m_{POS} \cdot R \cdot \omega^2 \cdot \lambda_0 \cdot \cos(2\alpha)$$

kde: λ_0 [-] poměr zdvihu klikového hřídele ku délce ojnice

m_{POS} [kg] hmotnost rotujících částí

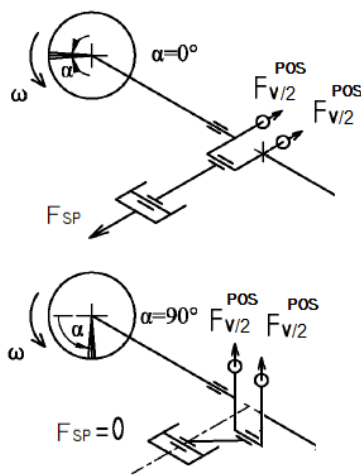
α [°] úhel natočení klikového hřídele

Setrvačná síla rotujících součástí F_{sr} má konstantní velikost při $\omega = konst$ nezávislou na poloze kliky. Vyvažuje se vývažkem o hmotnosti m_v^{ROT} umístěným na straně klikového hřídele protilehlé ojněnému čepu ve vzdálenosti r_{ROT} . Hmotu je třeba rozdělit tak, aby se netvořila silová dvojice. Tyto vývažky vyvozují sílu F_v^{ROT} vyvažující účinky od síly F_{sr} .



Obr. 2 - vyvážení rotujících hmot

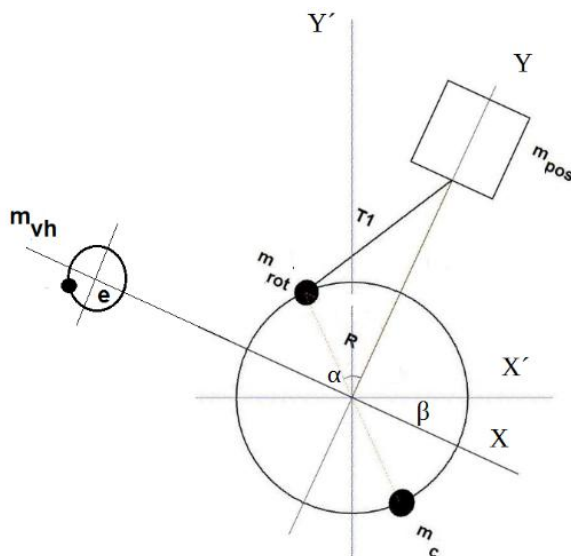
Vyvážení setrvačné síly posuvných částí se provede umístěním vývažku na kliku, obdobně jako u vyvažování rotujících hmot s tím rozdílem, že velikost a poloha vývažku m_v^{POS} způsobujícího sílu F_v^{POS} jsou voleny s ohledem na vyvážení setrvačné síly prvního, případně druhého řádu. Tato vývaha je doplňující k hmotě m_v^{ROT} , rozdělení je pouze virtuální. Lze použít vývažek různých parametrů tak, že jeho výsledná odstředivá síla je 0 až 100% maximální posuvné setrvačné síly. Z následujícího obrázku je patrné, že při použití velikosti vývažku, kdy $F_v^{POS} = 100\%$ maxima setrvačné síly, je sice mechanismus plně vyvážen ve směru osy válce, ale nevyváženost se přesune do směru kolmého na osu vrtání.



Obr. 3 - schéma zobrazující působení sil u jednoválce

2 Matematický model jednoválcového motoru

V této kapitole je popsáno odvození výchozích rovnic pro základní matematický model dále používaný v této práci. Model je dále ověřován tak, že po zadání určitých, v teorii popsaných, hodnot vstupních parametrů ověřujeme, zda se model chová v souladu s teorií. V poslední části kapitoly jsou popsány komplexnější skripty používající tento matematický model.



Obr. 4 schéma matematického modelu

Model se skládá ze čtyř hmotných bodů m_C (kompenzační hmota), m_{ROT} (hmota rotujících částí) a m_{POS} (hmota posouvajících se částí) a m_{vh} (hmota vyvažovacího hřídele) ležících v rovině. Účelem modelu je určit výsledný vektor setrvačných sil, jakým bude působit klikový mechanismus na skříň motoru při libovolné kombinaci vstupních parametrů. V modelu jsou uvažovány dva kartézské souřadné systémy – lokální XY odkloněný od globálního souřadného systému o úhel zaklonění hlavy β , kde osa Y je totožná s osou válce a globální $X'Y'$, osa X je rovnoběžná s povrchem vozovky.

Těmito parametry jsou:

α ... počáteční úhel natočení mechanismu

R ... vzdálenost ojnicního čepu od osy rotace klikového hřídele

T_1 ... délka ojnice

e ... vzdálenost těžiště vyvažovacího hřídele od osy rotace

γ ... vzdálenost m_C od osy rotace klikového hřídele

m_{pistu} ... hmotnost pístu a pístního čepu

$m_{ložisko}$... hmotnost ojnicního ložiska

$m_{rot. ojnice}$... hmotnost ojnice (podíl na rotačním pohybu)

$m_{pos. ojnice}$... hmotnost ojnice (podíl na posuvném pohybu)

m_v^{ROT} ... hmotnost vývažku rotujících částí

m_v^{POS} ... hmotnost vývažku rotujících částí

n ... otáčky za minutu

X ... vyvažovací poměr na klikovém hřídeli

X_2 ... vyvažovací poměr na vyvažovacím hřídeli

β ... úhel zaklonění válce

$$m_{ROT} = m_{lozisko} + m_{rot.onice} \quad (1)$$

$$m_{POS} = m_{pistu} + m_{pos.onice} \quad (2)$$

Jednotlivé hmotné body generují při pohybu mechanismu síly v souřadném systému XY:

síla způsobená posuvným pohybem hmoty m_{POS} :

$$F_{sp} = -m_{POS} \cdot R\omega^2 \left(\cos\alpha \cdot \left(1 + \cos \frac{\alpha}{\sqrt{p^2 - \sin^2\alpha}} \right) + \sin^2\alpha \cdot \frac{(\cos^2\alpha - (p^2 - \sin^2\alpha))}{(p^2 - \sin^2\alpha)^{\frac{3}{2}}} \right) \quad (3)$$

kde:

$$p = \frac{T_z}{R} \quad (4)$$

síla způsobená posuvným pohybem hmoty m_{ROT} :

$$F_{sr} = m_{ROT} \cdot R \cdot \omega^2 \quad (4)$$

síla způsobená posuvným pohybem hmoty m_{vh} :

$$F_{vh} = m_{vh} \cdot e \cdot \omega^2 = \frac{X_z}{100} \cdot F_{SP} \quad (5)$$

síla způsobená posuvným pohybem hmoty m_C :

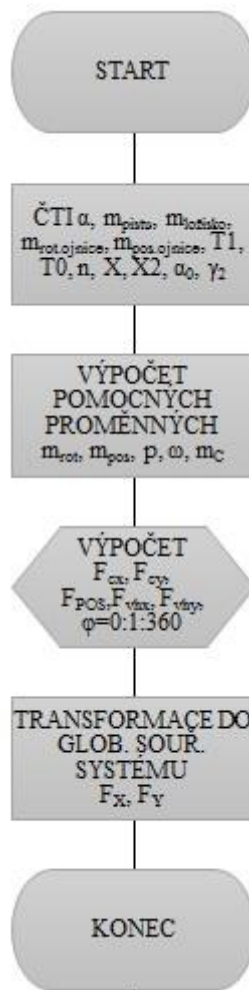
$$F_C = m_C \cdot \gamma \cdot \omega^2 = F_{sr} + \frac{X}{100} \cdot \max(|F_{sp}|) \quad (6)$$

Proces vyvážení setrvačných sil posuvných u jednoválcového motoru si lze představit následovně:

- výchozím stavem je staticky vyvážený klikový hřídel
- na ojnicní čep se přidá hmotný bod ekvivalentní hmotnosti rotujících částí m_{rot}
- klikový hřídel se přidáním hmoty m_v^{ROT} opět staticky vyváží
- na klikový hřídel se přidá hmota m_v^{POS} zvolená tak, aby došlo k vyvážení určité části síly F_{sp} .

Výše přiblížený matematický model byl naprogramován v software Matlab, výstupem skriptu je vektor složek výsledné setrvačné síly v souřadném systému XY. Tento vektor je dále vykreslen ve třech grafech:

- složky F_x a F_y v závislosti na úhlu natočení
- v polárních souřadnicích
- v systému $F_y(F_x)$

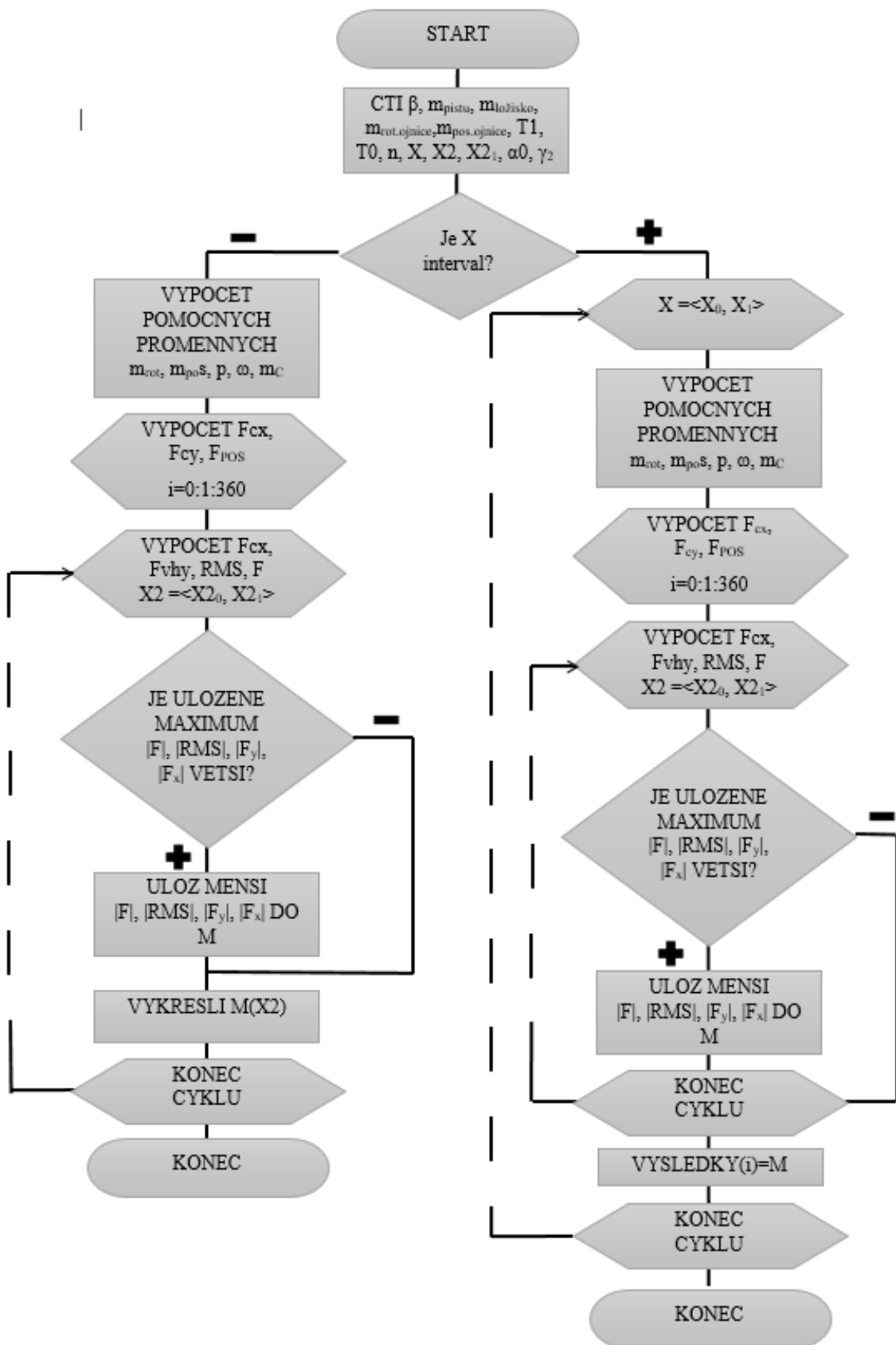


Obr. 5 vývojový diagram

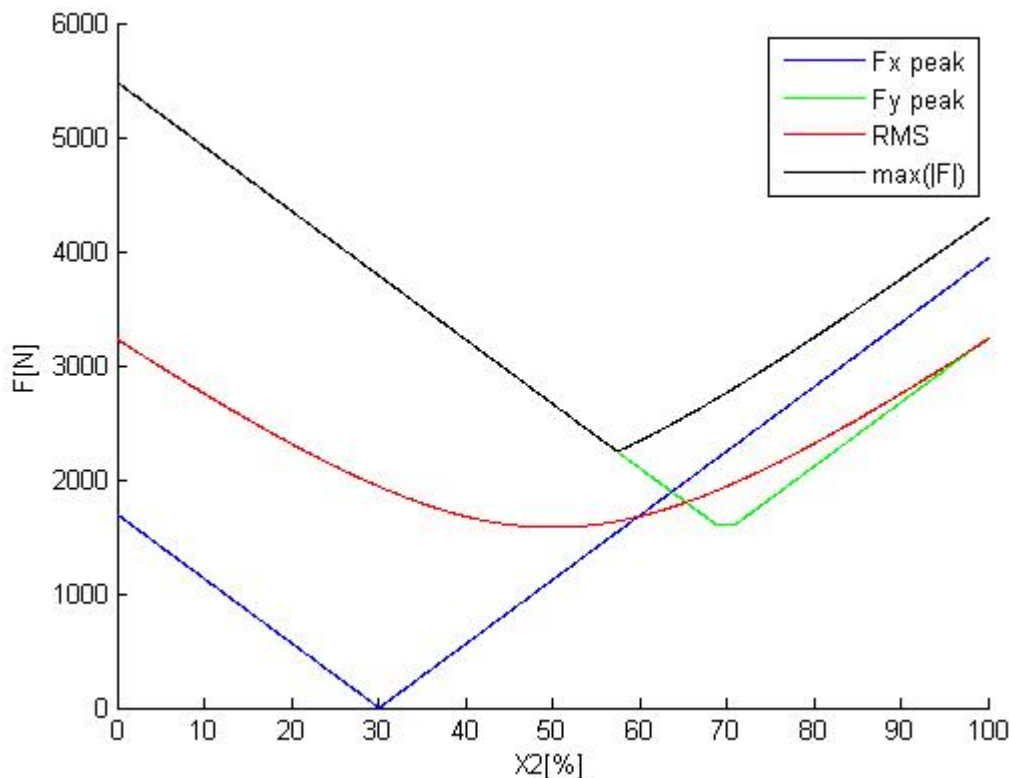
3 Skript pro optimalizaci parametrů

Tento skript používá matematický model popsany v kapitole 2. pro vyhodnocení silových účinků při dané kombinaci vyvažovacích poměrů klikového mechanismu. Mechanismus vykoná vždy jednu plnou otočku, výchozím stavem je horní úvrat'. Sledované silové účinky jsou:

- F_x^{peak} maximální absolutní hodnota výsledné síly F ve směru osy X
- F_y^{peak} maximální absolutní hodnota výsledné síly F ve směru osy Y
- RMS střední efektivní hodnota výsledné síly F
- $\max(|F|)$ maximální absolutní hodnota výsledné síly F



Obr. 6 vývojový diagram



Obr. 7 průběh sil v závislosti na X_2

Z výše uvedeného grafu (Obr. 7) plyne, že v kombinaci zadaného klikového mechanismu a vyvažovacího hřídele o $X_2=31\%$ dojde k potlačení síly F_x (modrá křivka). Střední efektní hodnota síly F (červená křivka) má minimum pro $X_2=50\%$. Maximum absolutní hodnoty síly F (černá křivka) je minimální pro $X_2=57\%$. Minimalizace složky F_y je dosaženo použitím vyvažovacího hřídele $X_2=68\%$.

V druhém režimu není plně definován klikový hřídel (vyvažovací poměr X je další proměnný parametr) a je potlačeno vykreslení grafu. Skript postupně prochází zadaný interval parametru X , ke každé hodnotě X vypočte průběh sil, jako v prvním režimu a do matice uloží minimální hodnotu každého sledovaného silového účinku a hodnotu parametru X_2 , při které bylo toto minimum dosaženo. Výstupem je tedy matice o rozměru $a \times 8$, kde a je počet různých hodnot X v zadaném intervalu. Matice má následující podobu pro vstupní interval parametru $X(31,40)$ s krokem změny 1:

vysledky=

1.0e+003 *

0 1.6051 0.0310 0.0680 1.5480 2.2196 0.0500 0.0570

0 1.6051 0.0320 0.0670 1.5095 2.1632 0.0500 0.0570

0 1.6051 0.0330 0.0660 1.4721 2.1139 0.0500 0.0570

První řádek matice odpovídá mechanismu s $X=31\%$, tedy model byl totožný s modelem uvažovaným při popisu prvního režimu skriptu. Následující řádky odpovídají dalšímu běhu cyklu procházení intervalu parametru X , tedy druhý řádek odpovídá mechanismu s $X=32\%$ a každý další řádek odpovídá následujícímu X v zadaném intervalu. První sloupec uchovává hodnotu minimálního maxima síly F_x . Nahlédneme-li do Obr. 7, odpovídá první sloupec minimu modré křivky. Třetí sloupec uchovává hodnotu parametru X_2 , při kterém bylo této minimální hodnoty dosaženo. Druhý a čtvrtý sloupec obdobně uchovává hodnoty minimálního maxima síly F_y (Obr. 7– zelená křivka), pátý a

sedmý střední efektivní hodnoty (*Obr. 7– červená křivka*) a šestý a osmý maxima absolutní hodnoty síly F (*Obr. 7– černá křivka*).

4 Matematický model dvouválcového motoru

Pro vytvoření matematického modelu dvouválcového klikového mechanismu byl použit model jednoválcce popsany v kapitole 2. tohoto příspěvku.

Pro vytvoření modelu s lomeným klikovým hřídelem byly rovnice popisující jednoválec zduplikovány a díky již implementovanému parametru zaklonění osy válce β v modelu jednoválcce šlo jednoduše oba válce spojit několika parametry popisujícími konstrukční uspořádání dvouválcového motoru.

Pro vytvoření motoru do V se sdíleným ojnicím čepem byl z modelu dvouválcce odstraněn druhý hmotný bod s kompenzační hmotou $m_c/2$.

Model o dvou válcích bude mít následující vstupní parametry:

Válec 1.	Válec 2.	Obecné
$\alpha = 0^\circ$	$\alpha_2 = 0^\circ$	$n=6000$ ot/min
$\beta = 0^\circ$	$\beta_2 = 0^\circ$	$\delta=0^\circ$
$R_1= 0.03$ m	$R_2= 0.03$ m	$\varepsilon=0^\circ$
$T_1= 0.11$ m	$T_{12}= 0.11$ m	
$m_{pistu}= 0.36$ kg	$m_{pistu2}= 0.36$ kg	
$m_{lozisko}= 0.04$ kg	$m_{lozisko2}= 0.04$ kg	
$m_{rot. Ojnice} = 0.15$ kg	$m_{rot. Ojnice2} = 0.15$ kg	
$m_{pos. Ojnice} = 0.12$ kg	$m_{pos. Ojnice2} = 0.12$ kg	
$X = 50$ %	$X_3 = 50$ %	

Kde parametry definující konstrukční uspořádání dvouválcového motoru jsou:

δ [°] úhel mezi válci

ε [°] úhel odsazení ojnicích čepů

Použijeme-li parametry definující konstrukční uspořádání dvouválcového motoru a budeme předpokládat, že parametry komponent klikového mechanismu jsou pro oba válce totožné, pak bude vždy zajištěno vyvážení posuvné setrvačné síly I. řádu F_{SPI} a vstupní parametry modelu dvouválcového motoru budou mít následující tvar:

Válec 1.	Válec 2.	Obecné
$\alpha_{01} = 0^\circ$	$\alpha_{02} = \alpha_{01} - \delta - \varepsilon$	$n=6000$ ot/min
$\beta_1 = \delta/2$	$\beta_2 = -\delta/2$	$\delta=0^\circ$
$R_1= 0.03$ m	$R_2= R$	$\varepsilon=(2\delta-180^\circ)$
$T_1= 0.11$ m	$T_{12}= T_1$	
$m_{pistu}= 0.36$ kg	$m_{pistu2}= m_{pistu}$	
$m_{lozisko}= 0.04$ kg	$m_{lozisko2}= m_{lozisko}$	
$m_{rot. Ojnice} = 0.15$ kg	$m_{rot. Ojnice2} = m_{rot. Ojnice}$	
$m_{pos. Ojnice} = 0.12$ kg	$m_{pos. Ojnice2} = m_{pos. Ojnice}$	
$X = \sin(\delta) \times 100$ %	$X_3 = X$ %	

4.1 Ověření chování matematického modelu dvouválce

Matematický model dvouválcového motoru byl ověřen tak, že bylo zvoleno několik konfigurací, u kterých jsou známy zákonitosti působení setrvačných sil. Parametry komponent klikového mechanismu byly definovány:

$$\alpha_{01} = 0^\circ$$

$$R_1 = 0.03 \text{ m}$$

$$T_1 = 1100 \text{ m} / 0.11 \text{ m}$$

$$m_{\text{pistu}} = 0.36 \text{ kg}$$

$$m_{\text{lozisko}} = 0.04 \text{ kg}$$

$$m_{\text{rot. Ojnice}} = 0.15 \text{ kg}$$

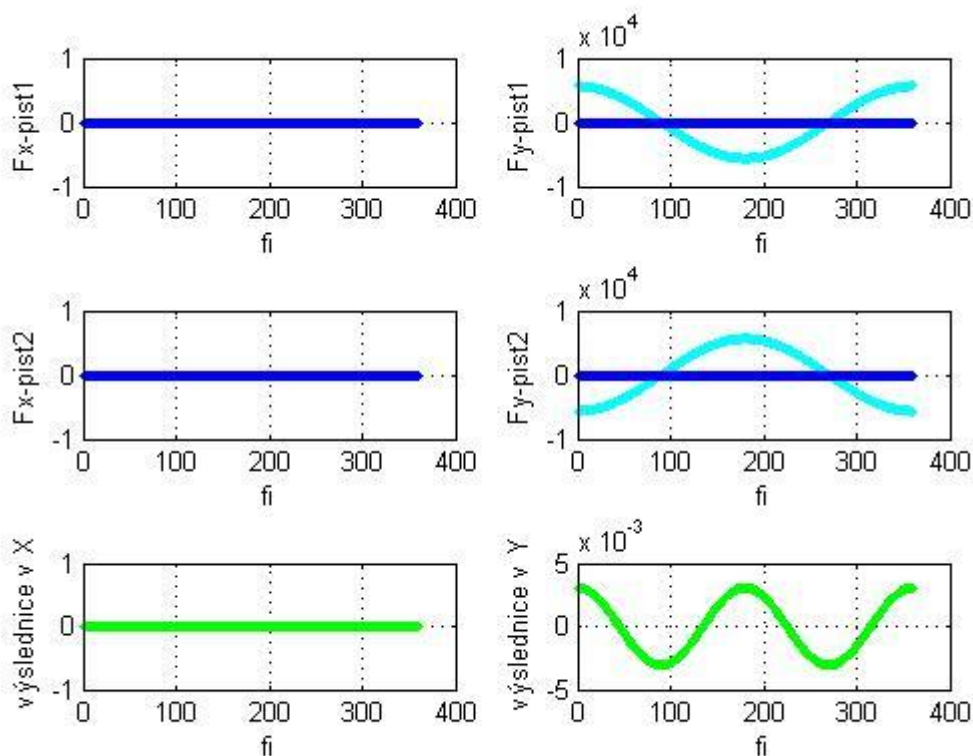
$$m_{\text{pos. Ojnice}} = 0.12 \text{ kg}$$

$$n = 6000 \text{ ot/min}$$

δ ... proměnná

Parametr T_1 (délka ojnice) má první hodnotu 1100 m – pracujeme s „nekonečnou“ ojnicí za účelem potlačení posuvných setrvačných sil vyšších řádů. Pro srovnání budou zobrazeny i výsledky s „konečnou“ ojnicí, kdy $T_1 = 0.11 \text{ m}$.

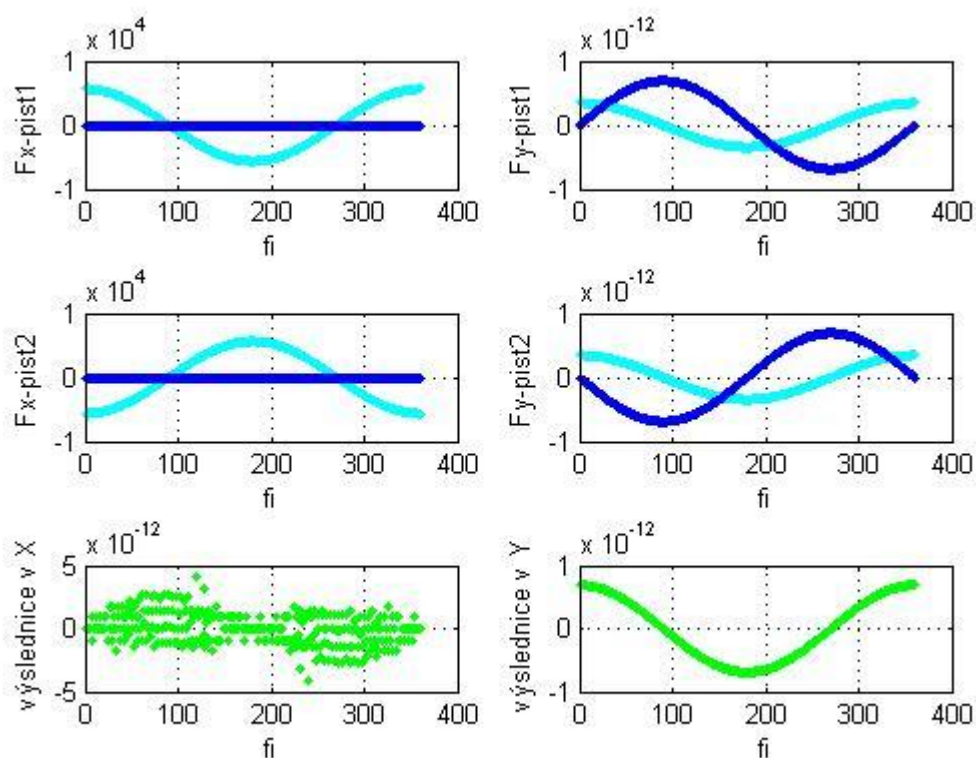
4.1.1 Řadový dvouválec 180° I2



Obr. 8 - řadový dvouválec - nekonečná ojnice

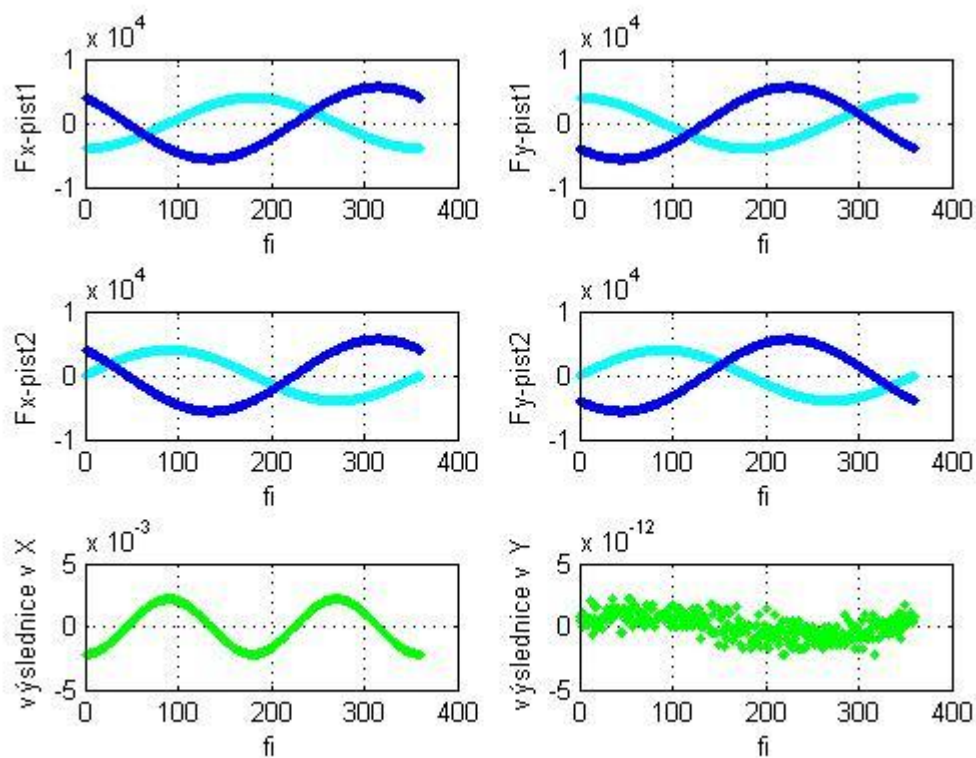
Této konfiguraci odpovídá parametr $\delta=0^\circ$. Podle rovnic uvedených v kapitole 4.3. je vývaha na klikovém hřídeli $X=0\%$. Na Obr. 8 je vyobrazen průběh složek sil F_v^{POS} , F_{sp} a F . Grafy v první řádce odpovídají silám na prvním válci (tmavě modrá je síla F_v^{POS} , světle modrá je síla F_{sp}), druhý řádek odpovídá silám na druhém válci (tmavě modrá je síla F_v^{POS} , světle modrá je síla F_{sp}), ve třetí řádce je vykreslena výsledná síla F (zeleně).

4.1.2 Boxer 180°V2



Obr. 9 - boxer - nekonečná ojnice

4.1.3 Dvouválec 90°V2



Obr. 10 - 90 V2 - nekonečná ojnice

Po vyhodnocení *Obr. 8-10* lze říci, že se modely pro dvouválcové konfigurace chovají dle očekávání. Bez použití vyvažovacího hřídele došlo k vyvážení setrvačné síly I. řádu.

5 Závěr

V tomto příspěvku byla představena série skriptů vytvořených v SW Matlab založených na matematickém modelu klikového mechanismu. Tyto skripty slouží pro výpočet sil v mechanismu a následný návrh vhodných vyvažovacích poměrů. Primárním účelem vytvoření těchto skriptů je použití ve vývoji prototypu jednoválcového čtyřtákního motocyklového motoru o objemu 450 ccm.

Zdroje

[1] HEISLER, H. *Advanced engine technology*. BUTTERWORTH-HEINEMANN, 2001, 794 s. ISBN 0340568224

[2] VLK, F. *Převodová ústrojí motorových vozidel: spojky, převodovky, rozvodovky, diferenciály, hnací hřídele, klouby*. 1. vyd. Brno: Nakladatelství Vlk, 2000, 312 s. ISBN 80-238-5275-2.

[3] VLK, F. *Dynamika motorových vozidel: jízdní odpory, hnací charakteristika, brzdění, odpružení. Říditelnost, ovladatelnost, stabilita*. 1. vyd. Brno: Nakladatelství Vlk, 2000, 434 s. ISBN 80-238-5273-6.

[4] VLK, F. *Dynamika motorových vozidel: jízdní odpory, hnací charakteristika, brzdění, odpružení. Říditelnost, ovladatelnost, stabilita*. 1. vyd. Brno: Nakladatelství Vlk, 2000, 434s. ISBN 80-238-5273-6.

[5] VLK, F. *Teorie a konstrukce motocyklů 1*. Brno: Nakladatelství Vlk, 2003, 355 s. ISBN 80-239-1601-7

[6] VLK, F. *Teorie a konstrukce motocyklů 2*. Brno: Nakladatelství Vlk, 2004, 306 s. ISBN 80-239-1601-7

[7] KOVAŘÍK, L., FERENČEY, V., SKALSKÝ, R., ČÁSTEK, L. *Konstrukce vozidlových spalovacích motorů*. Naše vojsko, 1. vyd., Praha, 1992. ISBN 80-206-0131-7.

Elektronické publikace

[8] *Some science of balance* [online]. [cit. 2016-10-15]. Dostupné z :

<http://www.tonyfoale.com/Articles/EngineBalance>

Pavel Vrátník
vratnikp@students.zcu.cz