

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO**  
**INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

# **LETECKÝ MOTOR**

AIRCRAFT ENGINE

**PŘÍLOHY K DIPLOMOVÉ PRÁCI**  
MASTER'S THESIS APPENDICIES

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**Bc. IVAN KALUGIN**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**prof. Ing. VÁCLAV PÍŠTĚK, DrSc.**

BRNO 2011



## OBSAH

1	Základní parametry motoru .....	3
1.1	Hlavní charakteristiky motoru .....	3
2	Kinematika klikového mechanismu .....	4
2.1	Dráha pístu .....	4
2.2	Rychlost pístu .....	4
2.3	Zrychlení pístu .....	4
2.4	Grafická interpretace kinematických veličin .....	5
3	p-alfa a p-v diagramy válcové jednotky motoru.....	7
3.1	p-alfa diagram .....	7
3.2	p-V diagram .....	7
4	Průběh sil přenášených pístním čepem.....	9
4.1	Síly působící na píst ve směru osy válce .....	9
4.2	Grafická interpretace sil působících na píst ve směru osy válce .....	10
5	Průběh sil působících na klikovém hřídeli .....	12
5.1	Síly působící na ojnicím čepu .....	12
5.2	Grafická interpretace sil působících na ojnicím čepu .....	13
6	Krouticí moment na klikovém hřídeli .....	15
7	Vyvážení klikového hřídele.....	19
7.1	Odstředivé síly rotačního pohybu .....	19
7.2	Momenty odstředivých sil rotačního pohybu .....	19
7.2.1	Momentové vyvážení .....	19
7.3	Setrvačné síly posuvných částí I. řádu .....	20
7.4	Momenty setrvačných sil posuvných částí I. řádu .....	21
7.4.1	Vyvážení momentů posuvných částí prvního řádu.....	22
7.5	Setrvačné síly posuvných částí II. řádu .....	22
7.6	Momenty setrvačných sil posuvných částí II. řádu.....	23



# 1 ZÁKLADNÍ PARAMETRY MOTORU

## 1.1 HLAVNÍ CHARAKTERISTIKY MOTORU

Výkon motoru:	$P_e = 102 \text{ kW}$
Počet válců:	$i = 6$
Jmenovité otáčky:	$n = 5250 \text{ min}^{-1}$
Výkon motoru:	$P_e = 102 \text{ kW}$
Taktnost motoru:	$\tau = 0.5$
Vrtání válce:	$D = 76.5 \text{ mm}$
Zdvih pístu:	$Z = 86.9 \text{ mm}$
Délka ojnice:	$l_o = 138 \text{ mm}$
Zdvihový objem válce:	$V_z = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot Z = 399.422 \text{ cm}^3$
Střední pístová rychlost:	$c_s = 2 \cdot n \cdot Z = 15.207 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Střední efektivní tlak:	$p_e = \frac{P_e}{n \cdot V_z \cdot i \cdot \tau} = 0.973 \text{ MPa}$
Stupeň komprese:	$\epsilon_k = 10.5$
Kompresní objem:	$V_k = \frac{V_z}{\epsilon_k - 1} = 42.04 \text{ cm}^3$
Hmotnost pístní skupiny:	$m_p = 0.285 \text{ kg}$
Hmotnost posuvných částí ojnice:	$m_{p\check{c}} = 0.105 \text{ kg}$
Hmotnost rotačních částí ojnice:	$m_{r\check{c}} = 0.307 \text{ kg}$
Redukovaná hmota ojnice:	$m_{red} = 0.607 \text{ kg}$
Rameno momentu:	$h = 82 \text{ mm}$
Rameno vývažku:	$b = 192.9 \text{ mm}$
Poloměr těžiště vývažku :	$r_v = 42 \text{ mm}$



## 2 KINEMATIKA KLIKOVÉHO MECHANISMU

Úhel pootočení klikového hřídele volím  $\alpha=10^\circ$ .

### 2.1 DRÁHA PÍSTU

Klikový poměr:  $\lambda = \frac{r}{l_0} = 0.315$

Základní vztah pro dráhu pístu, při zanedbání 3. A následujících vyšších řádů, lze definovat vztahem:

$$s(\alpha) = r \cdot \left[ 1 - \cos(\alpha) + \frac{\lambda}{4} \cdot (1 - \cos(2\alpha)) \right]$$

a první dvě harmonické složky:

$$s_1(\alpha) = r \cdot (1 - \cos(\alpha))$$

$$s_2(\alpha) = r \cdot \left[ \frac{\lambda}{4} (1 - \cos(2\alpha)) \right]$$

### 2.2 RYCHLOST PÍSTU

Úhlová rychlost

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n = 32986 \text{ min}^{-1}$$

Základní vztah pro rychlost pístu lze získat pomocí první derivace dráhy pístu podle času. Následnou úpravou dostávám vztah:

$$v(\alpha) = r \cdot \omega \left[ \sin(\alpha) + \frac{\lambda}{2} \cdot (\sin(2\alpha)) \right]$$

a první dvě harmonické složky:

$$v_1(\alpha) = r \cdot \omega \cdot \sin(\alpha)$$

$$v_2(\alpha) = r \cdot \omega \cdot \frac{\lambda}{2} \cdot \sin(2\alpha)$$

### 2.3 ZRYCHLENÍ PÍSTU

Vztah pro zrychlení pístu získám obdobným způsobem, a to první derivací rychlosti pístu podle času:

$$a(\alpha) = r \cdot \omega^2 \cdot [\cos(\alpha) + \lambda \cdot \cos(2\alpha)]$$

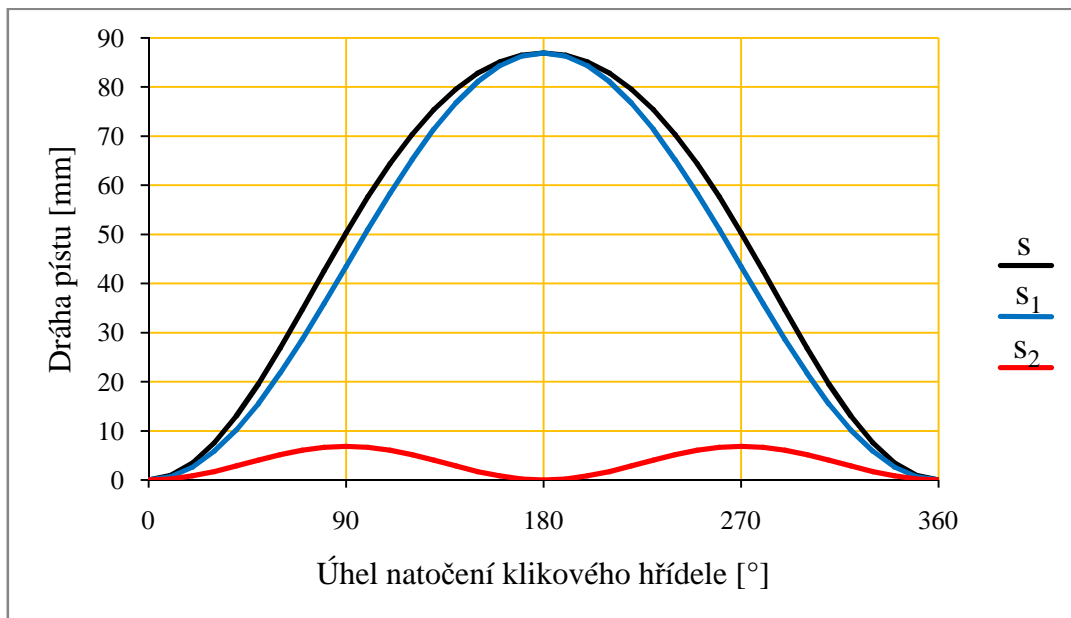
a první dvě harmonické složky:

$$a_1(\alpha) = r \cdot \omega^2 \cdot \cos(\alpha)$$

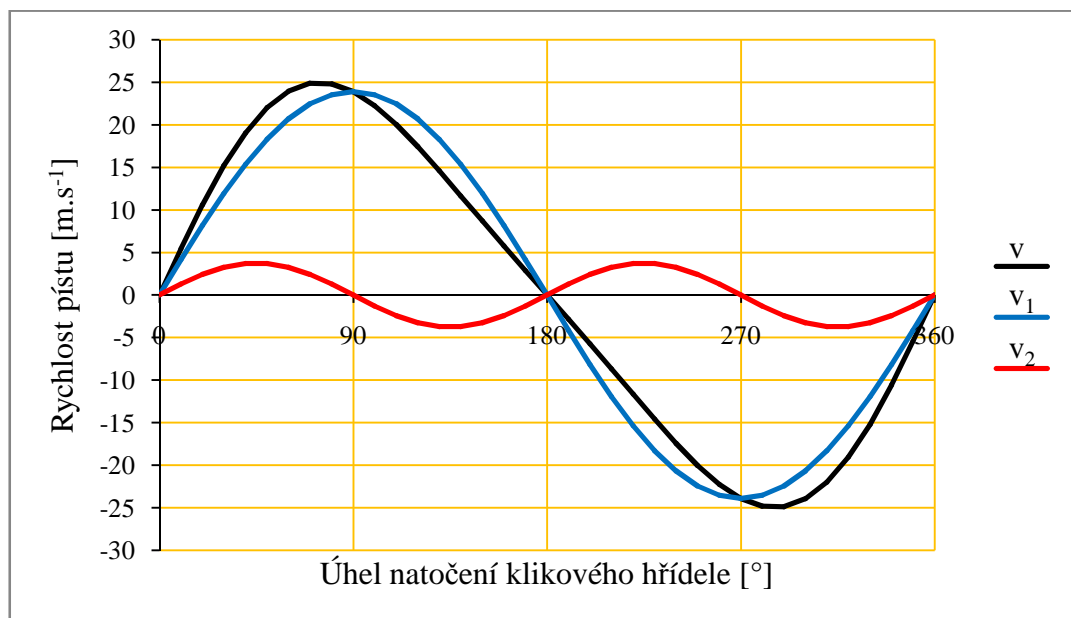
$$a_2(\alpha) = r \cdot \omega^2 \cdot \lambda \cdot \cos(2\alpha)$$



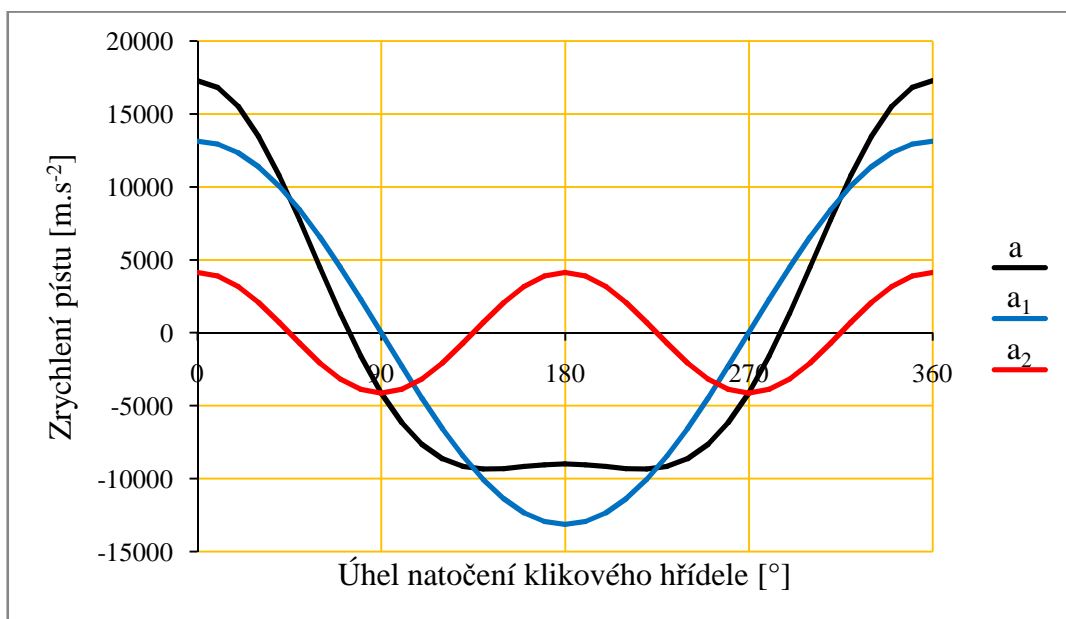
## 2.4 GRAFICKÁ INTERPRETACE KINEMATICKÝCH VELIČIN



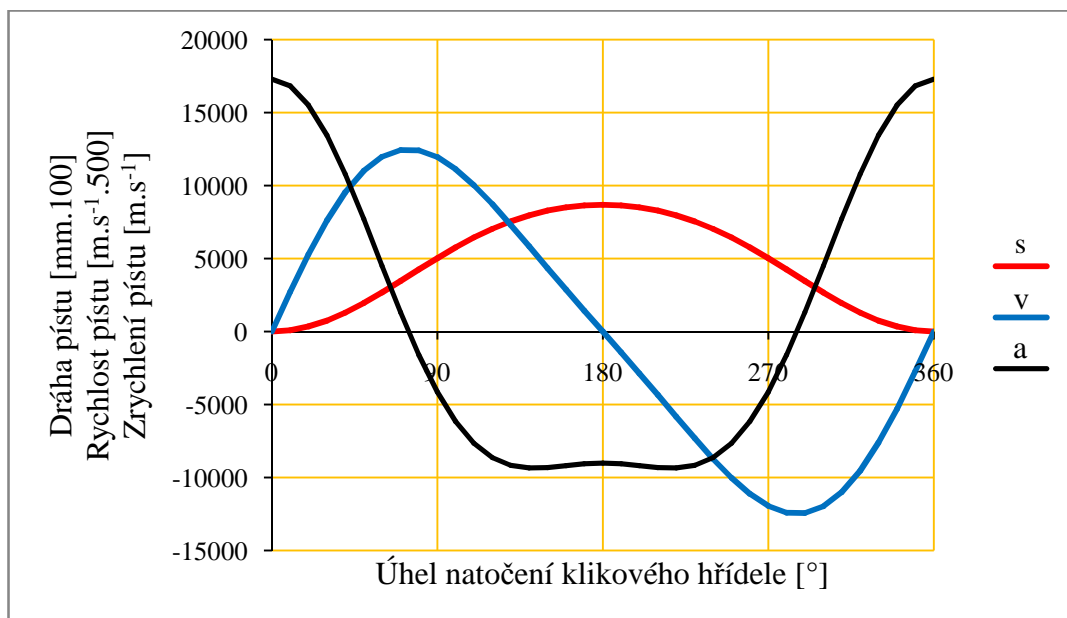
Obr. 1 Dráha pístu a jeho harmonické složky



Obr. 2 Rychlost pístu a jeho harmonické složky



Obr. 3 Zrychlení pístu a jeho harmonické složky



Obr. 4 Dráha rychlost a zrychlení pístu



### 3 P-ALFA A P-V DIAGRAMY VÁLCOVÉ JEDNOTKY MOTORU

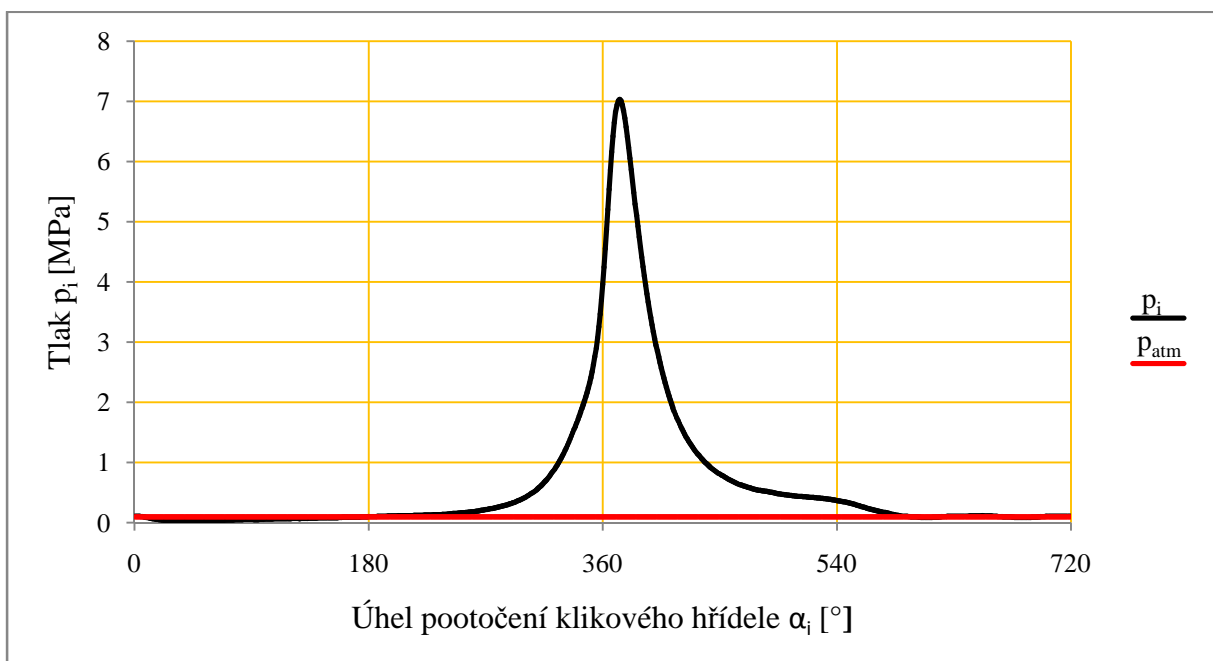
Úhel pootočení klikové hřídele pro sestavení p- $\alpha$  diagramu je dán zadavatelem práce  $\alpha=1^\circ$  a toto krokování jsem zachoval i u p-V digramu.

#### 3.1 P-ALFA DIAGRAM

Přiřazení indexů a úhlů

$$i = 0 \dots 719 \quad \alpha_i = 1 \cdot i$$

Hodnota tlaku okolního prostředí  $p_{atm}=0.1$  MPa a dílčí tlaky  $p_i$ , odpovídající příslušnému natočení klikového hřídele, jsem získal od zadavatele této práce.



Obr. 5 p- $\alpha$  diagram

#### 3.2 P-V DIAGRAM

Plocha pístu

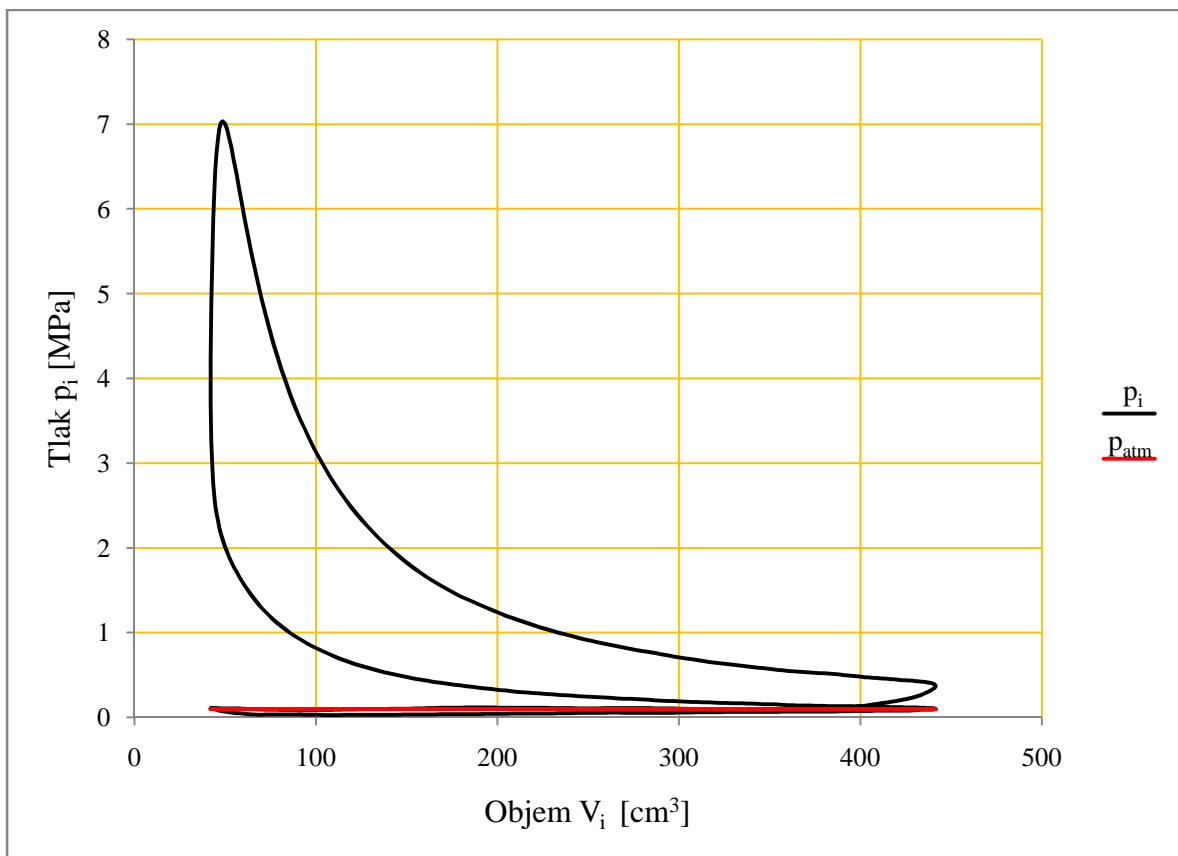
$$S_p = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 45.96 \text{ mm}^2$$

Dráha pístu

$$s_i = r \cdot \left[ 1 - \cos(\alpha_i) + \frac{\lambda}{4} \cdot (1 - \cos(2\alpha_i)) \right]$$

Okamžitý objem

$$V_i = V_k + S_p \cdot s_i$$



Obr. 6 p-V diagram



## 4 PRŮBĚH SIL PŘENÁŠENÝCH PÍSTNÍM ČEPEM

### 4.1 SÍLY PŮSOBÍCÍ NA PÍST VE SMĚRU OSY VÁLCE

Odklon ojnice od osy válce

$$\beta_i = a \sin\left(\frac{r \cdot \sin(\alpha_i)}{l_o}\right)$$

Zrychlení pístu

$$a_i = r \cdot \omega^2 \cdot (\cos(\alpha_i) + \lambda \cdot \cos(2\alpha_i))$$

**Tlakové síly od tlaku plynů**

$$F_{p_i} = (p_i - p_{atm}) \cdot S_p$$

Maximální tlaková síla

$$F_{p_{max}} = \max(F_p) = 31.85 \text{ kN}$$

**Setrvačné síly**

$$F_{s_i} = -m_p \cdot a_i$$

Maximální setrvačná síla

$$F_{s_{max}} = \max(|\max(F_s)|, |\min(F_s)|) = 4.92 \text{ kN}$$

**Celková síly působící na píst**

$$F_{c_i} = F_{p_i} + F_{s_i}$$

Maximální celková síla

$$F_{c_i} = \max(|\max(F_c)|, |\min(F_c)|) = 27.15 \text{ kN}$$

**Síly přenášené pístním čepem**

$$F_{p_{c_i}} = \frac{F_{c_i}}{\cos(\beta_i)}$$

Maximální síla přenášená pístním čepem

$$F_{p_{c_{max}}} = \max(|\max(F_{pc})|, |\min(F_{pc})|) = 27.2 \text{ kN}$$



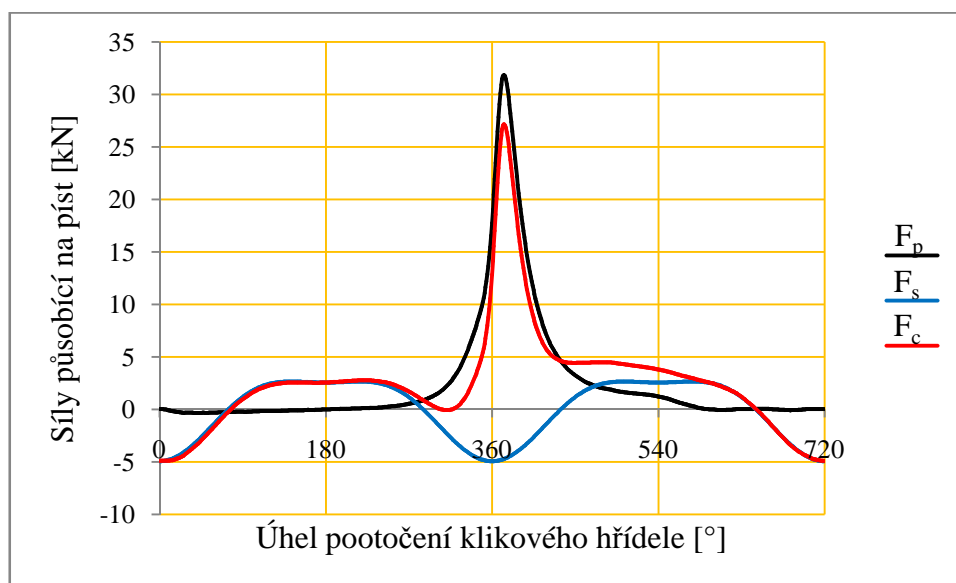
### Boční síla na píst

$$F_{n_i} = F_{c_i} \cdot \sin(\beta_i)$$

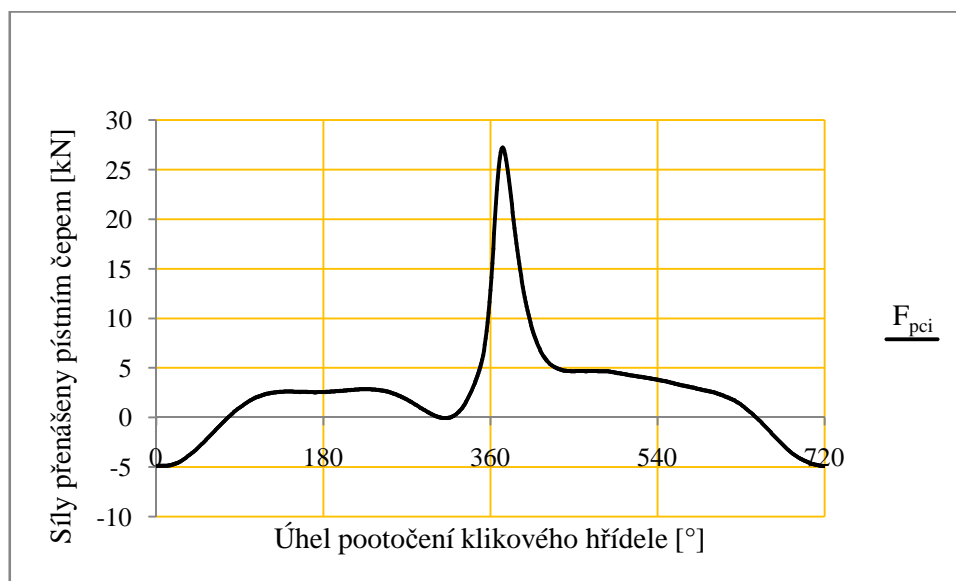
Maximální boční síla na píst

$$F_{n_i} = \max(|\max(F_n)|, |\min(F_n)|) = 2.63 \text{ kN}$$

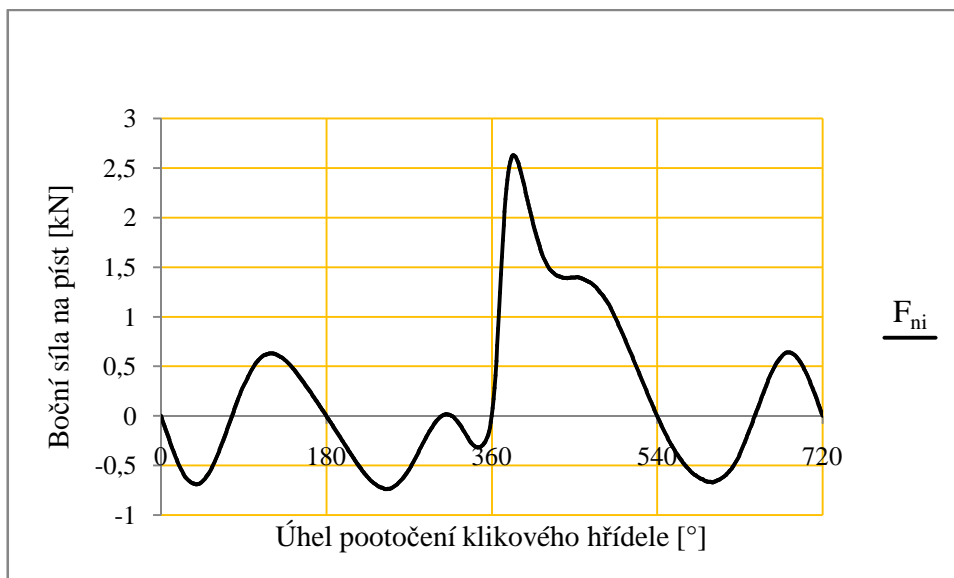
## 4.2 GRAFICKÁ INTERPRETACE SIL PŮSOBÍCÍCH NA PÍST VE SMĚRU OSY VÁLCE



Obr. 7 Síly působící na píst ve směru osy válce



Obr. 8 Síly přenášeny pístním čepem



Obr. 9 Boční síla působící na píst



## 5 PRŮBĚH SIL PŮSOBÍCÍCH NA KLIKOVÉM HŘÍDELI

### 5.1 SÍLY PŮSOBÍCÍ NA OJNIČNÍM ČEPU

Celková hmotnost posuvných částí

$$m_{cp\check{c}} = m_{op} + m_p = 0.390 \text{ kg}$$

Odstředivá síla

$$F_{od} = m_r \cdot \omega^2 \cdot r = 4.031 \text{ kN}$$

**Setrvačná síla sekundární**

$$F_{sII_i} = -m_{cp\check{c}} \cdot a_i$$

Maximální setrvačná síla sekundární

$$F_{sII_{max}} = \max(|\max(F_{sII})|, |\min(F_{sII})|) = 6.736 \text{ kN}$$

**Celková síla působící na ojniční čep**

$$F_{co\check{c}_i} = F_p + F_{sII_i}$$

Maximální síla působící na ojniční čep

$$F_{co\check{c}_{max}} = \max(|\max(F_{co\check{c}})|, |\min(F_{co\check{c}})|) = 25.413 \text{ kN}$$

**Síla přenášená přes ojnici**

$$F_{oo\check{c}_i} = \frac{F_{co\check{c}_i}}{\cos(\beta_i)}$$

Maximální síla přenášená přes ojnici

$$F_{oo\check{c}_{max}} = \max(|\max(F_{oo\check{c}})|, |\min(F_{oo\check{c}})|) = 25.477 \text{ kN}$$

**Radiální síla**

$$F_{r_i} = F_{oo\check{c}_i} \cdot \cos(\alpha_i + \beta_i)$$

Maximální radiální síla

$$F_{r_{max}} = \max(|\max(F_r)|, |\min(F_r)|) = 24.385 \text{ kN}$$



### Tangenciální síla

$$F_{t_i} = F_{ooc_i} \cdot \sin(\alpha_i + \beta_i)$$

Maximální hodnota tangenciální síly

$$F_{t_{max}} = \max(|\max(F_t)|, |\min(F_t)|) = 9.990 \text{ kN}$$

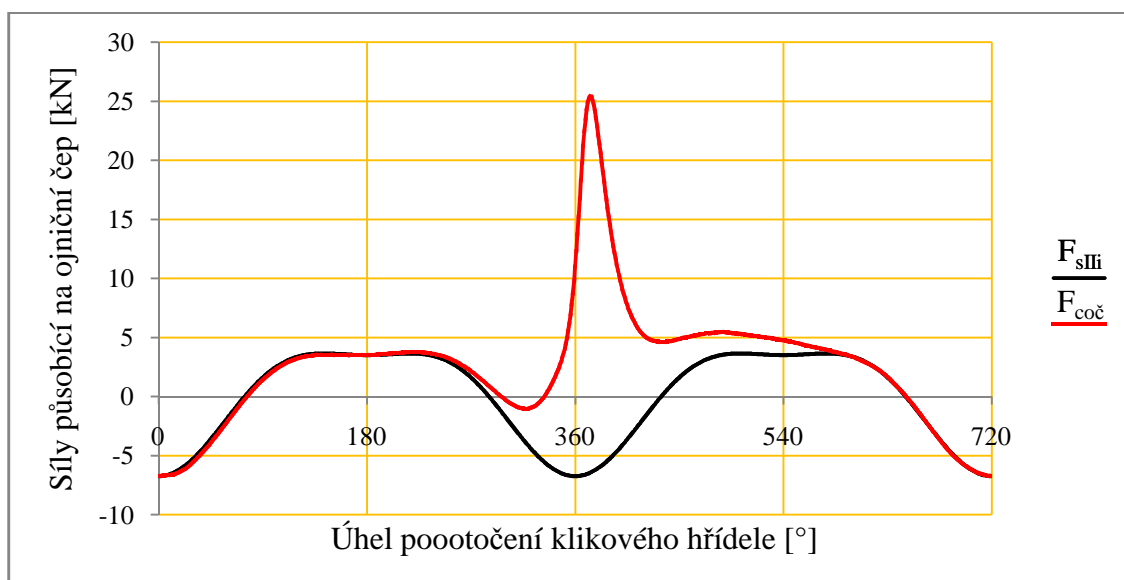
### Celková radiální síla

$$F_{rc_i} = F_{r_i} - F_{od}$$

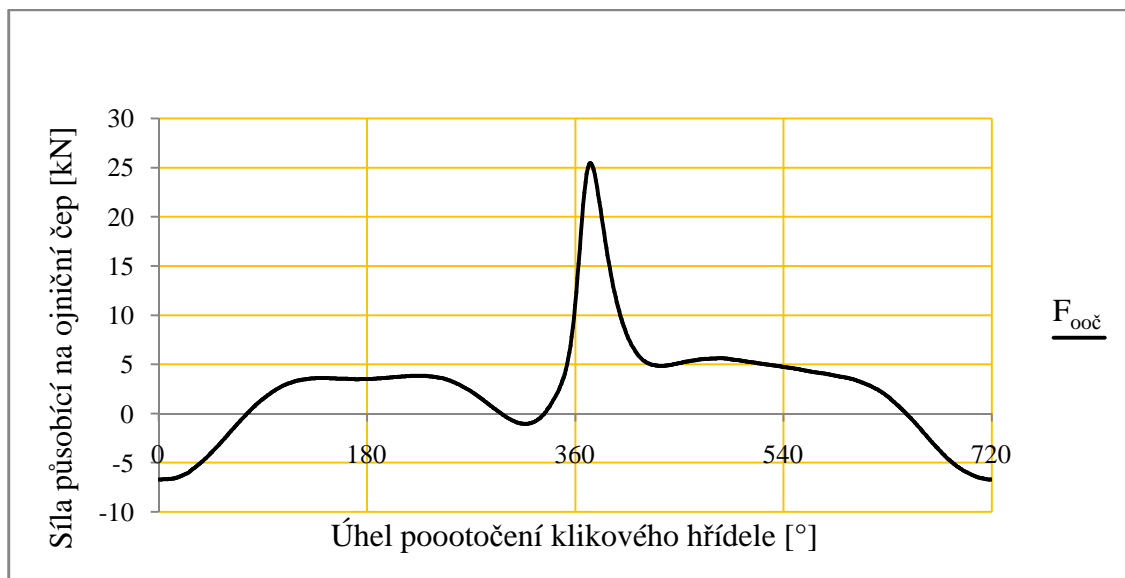
Maximální celková radiální síla

$$F_{rc_{max}} = \max(|\max(F_{rc})|, |\min(F_{rc})|) = 18.975 \text{ kN}$$

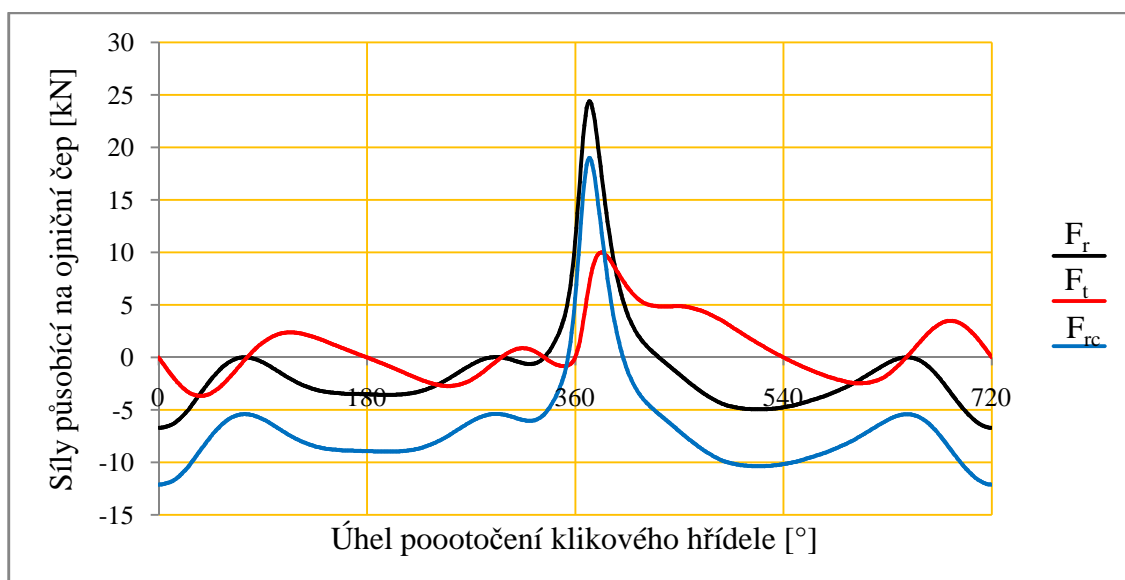
## 5.2 GRAFICKÁ INTERPRETACE SIL PŮSOBÍCÍCH NA OJNIČNÍM ČEPU



Obr. 10 Setrvačná síla druhého řádu a celková síla působící na ojniční čep



Obr. 11 Celková síla přenášená přes ojnici



Obr. 12 Průběh radiálních a tangenciálních sil



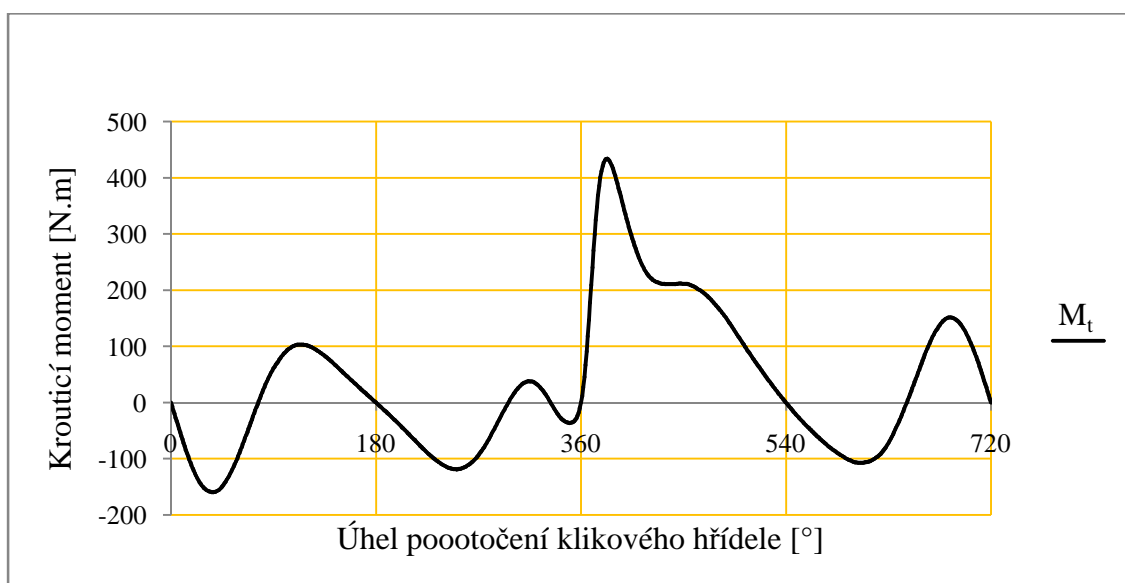
## 6 KROUTICÍ MOMENT NA KLIKOVÉM HŘÍDELI

Krouticí moment od jednoho válce

$$M_{k_i} = F_{t_i} \cdot r$$

Maximální krouticí moment od jednoho válce

$$M_{k_{\max}} = \max(|\max(M_k)|, |\min(M_k)|) = 434.054 \text{ N} \cdot \text{m}$$

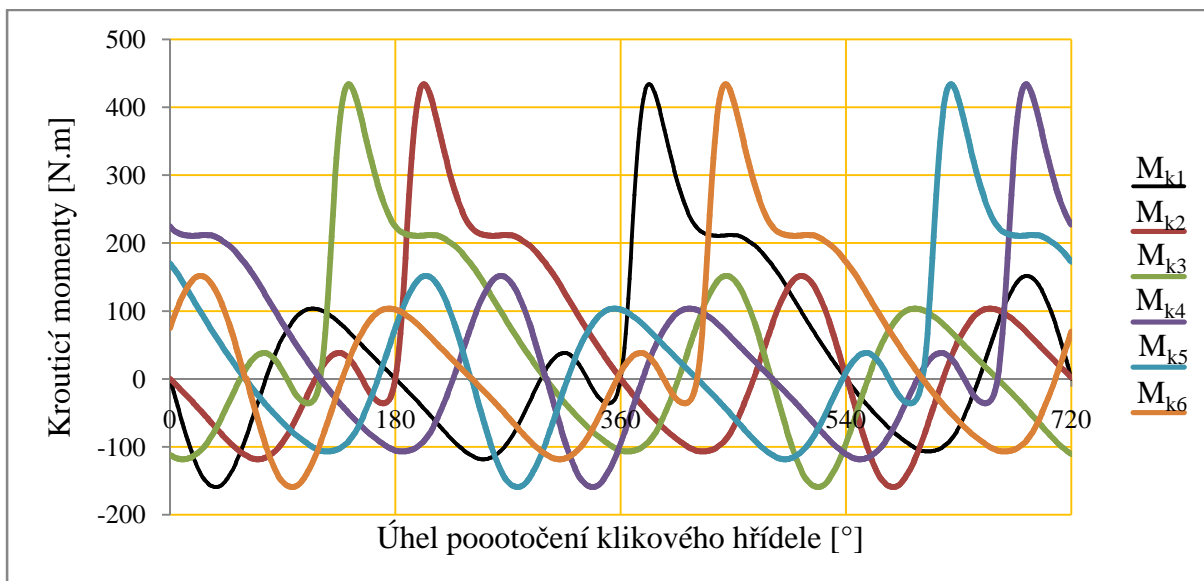


Obr. 13 Průběh krouticího momentu jednoho válce motoru

Pořadí zapalování a úhlové rozestupy mezi jednotlivými zážehy

Tab. 1 Pořadí zážehů a jejich úhlové rozestupy

Pořadí zápalů	
1-4-2-5-3-6	
$\varphi_{1,4}$	180°
$\varphi_{4,2}$	60°
$\varphi_{2,5}$	180°
$\varphi_{5,3}$	60°
$\varphi_{3,6}$	180°
$\varphi_{6,1}$	60°



Obr. 14 Průběhy krouťicíh momentů na jednotlivých válcích

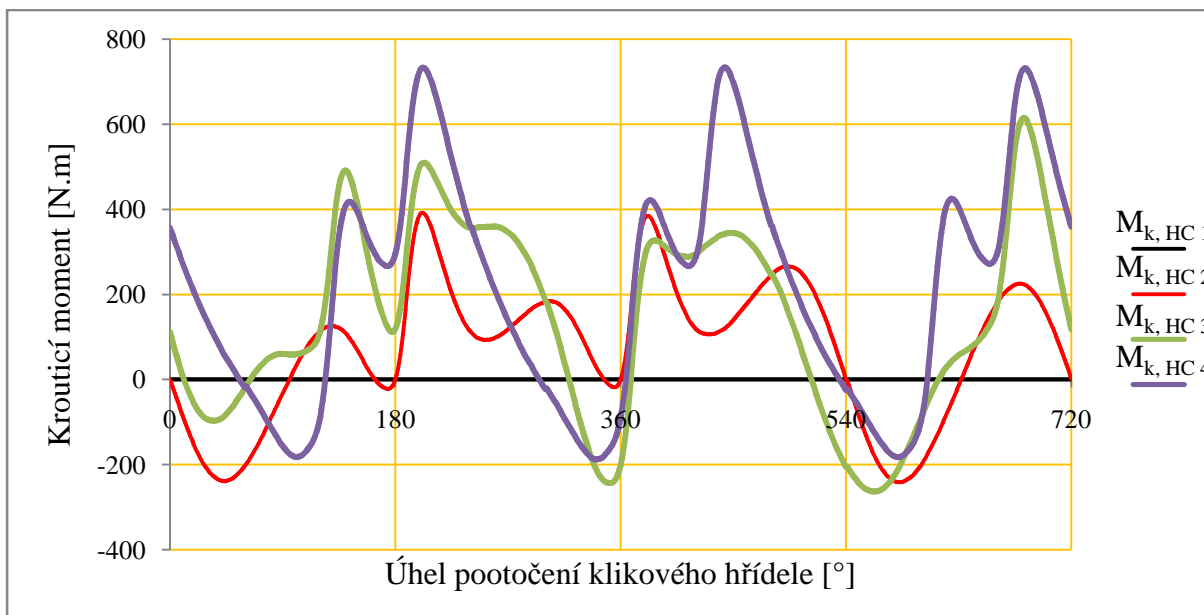
#### Krouťicí moment na hlavních čepch

$$M_{k,HC 1} = 0 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_{k,HC 2} = M_{k,HC 1} + M_{k1} + M_{k4} \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_{k,HC 3} = M_{k,HC 2} + M_{k2} + M_{k5} \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_{k,HC 4} = M_{k,HC 3} + M_{k3} + M_{k6} \text{ N} \cdot \text{m}$$



Obr. 15 Průběhy krouťicíh momentů na hlavních čepch



### Nejvíce zatěžovaný hlavní čep

Za nejvíce zatěžovaný hlavní čep budu považovat ten, na kterém je největší rozkmit krouticího momentu.

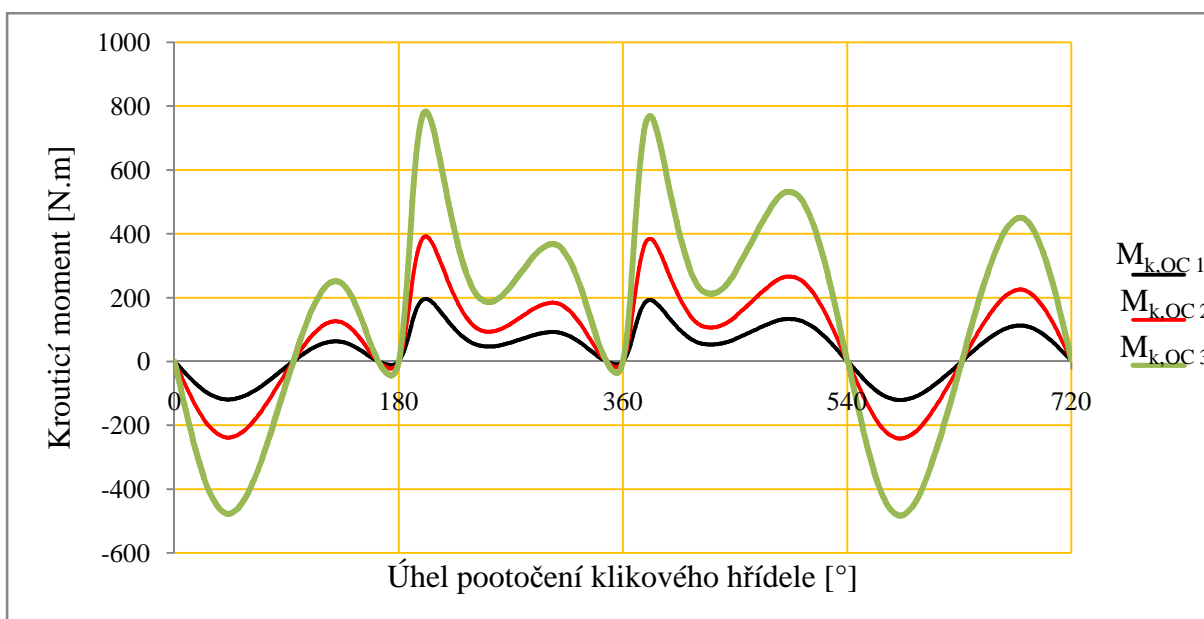
Tab. 2 Krajiní hodnoty ztížení hlavních čepů

	min HC [N.m]	max HC [N.m]	rozkmit HC [N.m]
1. HC	0	0	0
2. HC	-241.599	391.474	633.073
3. HC	-263.229	641.803	905.032
4. HC	-187.747	733.465	921.212

Podle předem určeného kritéria je nejvíce zatěžován 4. hlavní čep. Nejvíce zatížený hlavní čep nemusí být vždy až čep poslední, která již přenáší krouticí moment všech válců.

### Krouticí moment na ojnicích čepech

Krouticí moment na ojnicích čepech je vždy o polovinu větší, než je moment na předcházejícím čepu hlavním.



Obr. 16 Průběhy krouticích momentů na jednotlivých ojnicích čepech

Nejvíce zatěžovaný ojnicí čep

Podobně jako v případě určení nejvíce zatěžovaného hlavního čepu určím nejvíce zatěžovaný ojnicí čep.

*Tab. 3 Krajiné hodnoty ztížení ojnicích čepů*

	min OC [N.m]	max OC [N.m]	rozkmit OC [N.m]
1. OC	-120.8	195.737	316.537
2. OC	-241.599	391.474	633.073
3. OC	-483.198	782.948	1266.146

Z tohoto pohledu je nejvíce zatížen třetí ojnicí čep.



## 7 VYVÁŽENÍ KLIKOVÉHO HŘÍDELE

### 7.1 Odstředivé síly rotačního pohybu

$$F_{r1,4} = m_{rč} \cdot r \cdot \omega^2 \qquad F_{r1,4} = 12006.897 \text{ N}$$

$$F_{r2,5} = m_{rč} \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \cos(60^\circ) \qquad F_{r2,5} = 6003,448 \text{ N}$$

$$F_{r3,6} = m_{rč} \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \cos(300^\circ) \qquad F_{r3,6} = 6003,448 \text{ N}$$

$$\sum F_r = F_{r1,4} - (F_{r2,5} + F_{r3,6}) \qquad \sum F_r = 0 \text{ N}$$

### 7.2 Momenty odstředivých sil rotačního pohybu

Momenty jsou vztaženy k bodu T, což je průsečík osy klikového hřídele a osy válců 2 a 5.

$$M_{r1,4} = F_{r1,4} \cdot h \qquad M_{r1,4} = 984.565 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_{r2,5} = F_{r1,4} \cdot 0 \qquad M_{r2,5} = 0 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_{r3,6} = F_{r1,4} \cdot h \qquad M_{r3,6} = 492.282 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\sum M_r = M_{r1,4} + M_{r2,5} + M_{r3,6} \qquad \sum M_r = 1476.848 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Tento moment působí v rovině YZ a lze jej rozložit do příslušných souřadnic:

$$M_{r,y} = M_r \cdot \cos(30^\circ) \qquad M_{r,y} = -1278.988 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_{r,z} = M_r \cdot \sin(30^\circ) \qquad M_{r,z} = -738.424 \text{ N} \cdot \text{m}$$

#### 7.2.1 Momentové vyvážení

Odhad velikosti vyvažovací hmoty:

$$m_{vo} = 1 \text{ kg}$$

Velikost vyvažovací hmoty:

$$m_v = m_{vo} \cdot r_v \cdot \omega^2 \cdot b - M_r, m_{vo} \qquad m_v = 0.603 \text{ kg}$$



Celková hmota vývažků:

$$m_{vc} = 2 \cdot m_v$$

$$m_{vc} = 1.206 \text{ kg}$$

### 7.3 SETRVAČNÉ SÍLY POSUVNÝCH ČÁSTÍ I. ŘÁDU

Síly působící na prvním a čtvrtém válci:

$$F_I^1 = m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \cos \alpha$$

$$F_I^4 = -m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \cos(\alpha + 180^\circ)$$

Jejich součtem dostávám silovou výslednici na této válcové dvojici:

$$F_I^{1,4} = 2 \cdot m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \cos \alpha$$

Analogickým postupem odvodím i silové výslednice pro další válcové dvojice:

$$F_I^{2,5} = 2 \cdot m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \cos(\alpha + 120^\circ)$$

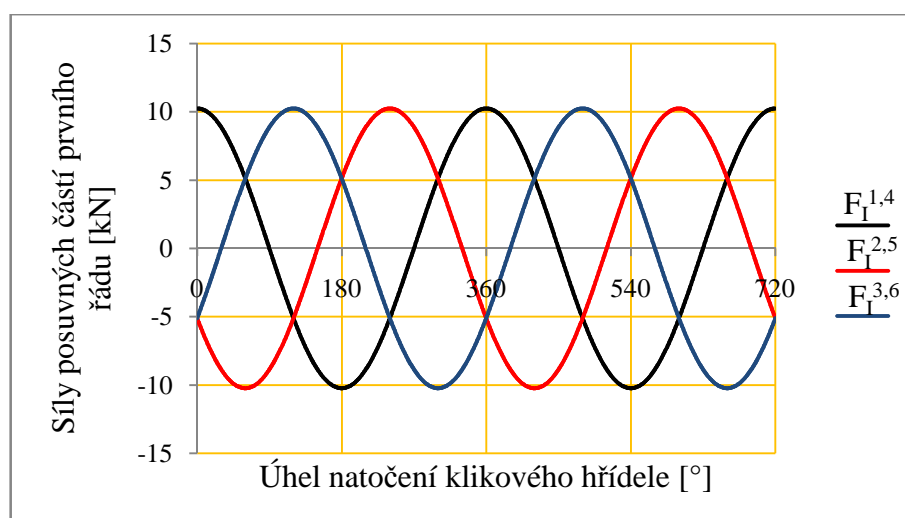
$$F_I^{3,6} = 2 \cdot m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \cos(\alpha + 240^\circ)$$

Výslednice posuvných sil prvního řádu:

$$\sum F_I = F_I^{1,4} + F_I^{2,5} + F_I^{3,6}$$

$$\sum F_I = 0 \text{ N}$$

Součet sil je nulový, ale silové působení v jednotlivých válcových dvojicích je nenulové a průběh těchto sil v závislosti na pootočení klikového hřídele je následující:



Obr. 17 Průběh setrvačných sil prvního řádu



## 7.4 MOMENTY SETVRAČNÝCH SIL POSUVNÝCH ČÁSTÍ I. ŘÁDU

Momenty jsou opět vztaženy k bodu T, což je průsečík osy oklikového hřídele a osy válců 2 a 5.

Moment vyvolaný silovou výslednicí mezi válci 1 a 4:

$$M_I^{1,4} = F_I^{1,4} \cdot h$$

Moment vyvolaný silovou výslednicí mezi válci 2 a 5:

$$M_I^{2,5} = F_I^{2,5} \cdot 0$$

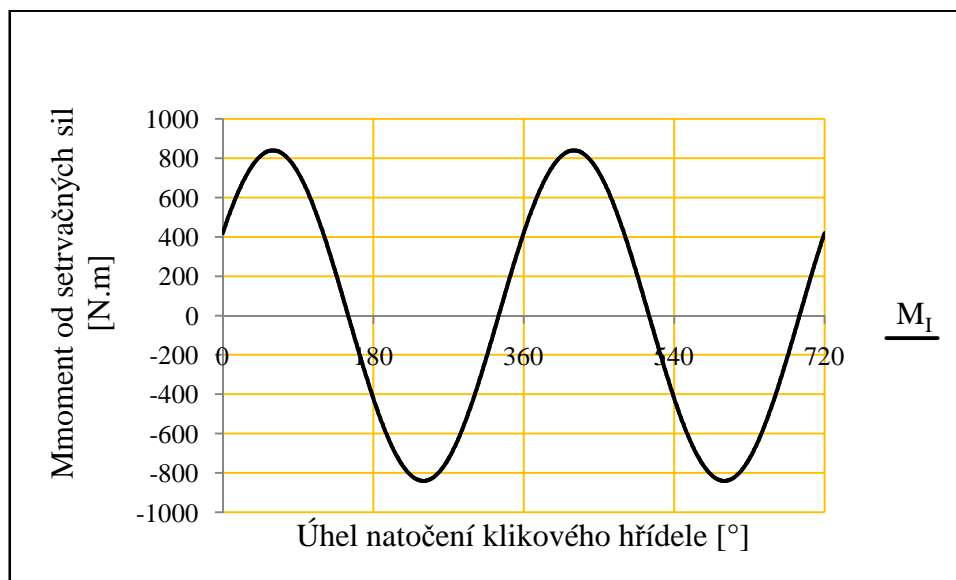
Moment vyvolaný silovou výslednicí mezi válci 3 a 6:

$$M_I^{3,6} = F_I^{3,6} \cdot h$$

Výsledný moment setrvačných sil posuvných částí prvního řádu:

$$M_I = 2 \cdot m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \left( \frac{3}{2} \cdot \cos \alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sin \alpha \right) \cdot h$$

Tento moment proměnný v závislosti na pootočení klikové hřídele a má následující průběh:



Obr. 18 Průběh momentu setrvačných sil prvního řádu

Maximální hodnota momentu setrvačných sil prvního řádu:

$$M_{I,\max} = 839.990 \text{ N} \cdot \text{m}$$



### 7.4.1 VYVÁŽENÍ MOMENTŮ POSUVNÝCH ČÁSTÍ PRVNÍHO ŘÁDU

Odhad velikosti vyvažovací hmoty:

$$m_{vI} = 1 \text{ kg}$$

Poloměr těžiště vývažku :

$$r_{vI} = 42 \text{ mm}$$

Velikost vyvažovací hmoty:

$$m_{vI} = 2m_{vI} \cdot r_{vI} \cdot \omega^2 \cdot b - M_{I,max}, m_{vI} \quad m_v = 0.172 \text{ kg}$$

### 7.5 SETRVAČNÉ SÍLY POSUVNÝCH ČÁSTÍ II. ŘÁDU

Pro silové poměry druhého řádu v první válcové dvojici platí:

$$F_{II}^1 = \lambda \cdot m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \sin 2\alpha$$

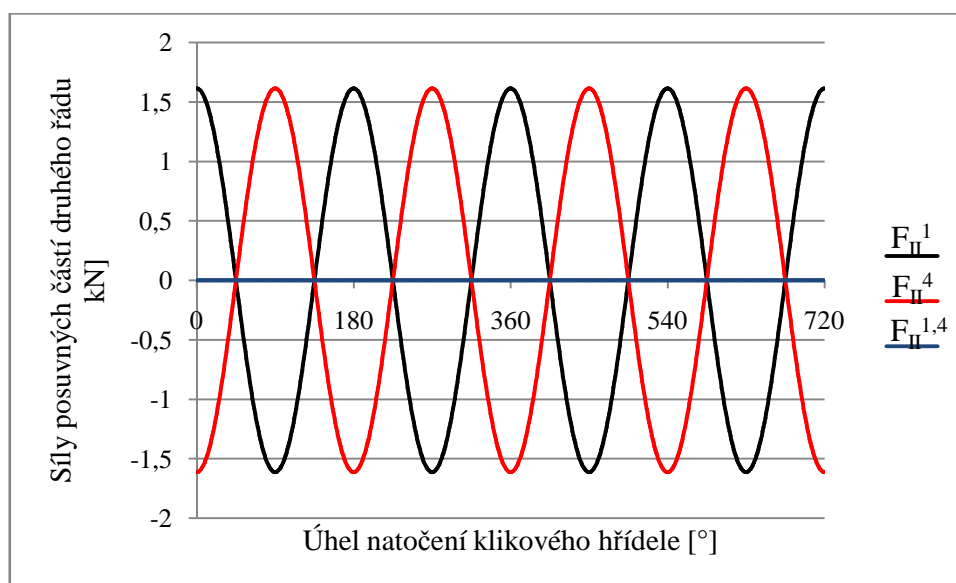
$$F_{II}^4 = -\lambda \cdot m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \sin 2(\alpha + 180^\circ)$$

$$\sum F_{II}^{1,4} = F_{II}^1 + F_{II}^4 \quad \sum F_{II}^{1,4} = 0 \text{ N}$$

Stejný charakter mají i ostatní válcové dvojice, kde jsou jejich výslednice nulové.

$$\sum F_{II}^{2,5} = 0 \text{ N}$$

$$\sum F_{II}^{3,4} = 0 \text{ N}$$



Obr. 19 Průběh sil na první válcové dvojici



## 7.6 MOMENTY SETRVAČNÝCH SIL POSUVNÝCH ČÁSTÍ II. ŘÁDU

I v tomto případě jsou momenty k bodu T, což je průsečík osy oklikového hřídele a osy válců 2 a 5.

$$M_{II}^{1,4} = F_{II}^{1,4} \cdot h$$

$$M_{II}^{2,5} = F_{II}^{2,5} \cdot 0$$

$$M_{II}^{3,6} = F_{II}^{3,6} \cdot h$$

$$\sum M_{II} = M_{II}^{1,4} + M_{II}^{2,5} + M_{II}^{3,6}$$

$$\sum M_{II} = 0 \text{ N} \cdot \text{m}$$