



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

DVOUVÁLCOVÝ ČTYŘDOBÝ PLOCHÝ ZÁŽEHOVÝ MOTOR

TWO-CYLINDER FOUR STROKE SPARK IGNITION FLAT ENGINE

PŘÍLOHY K DIPLOMOVÉ PRÁCI
MASTER'S THESIS APPENDICES

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAN DRAGOUN

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. VÁCLAV PÍŠTĚK, DrSr.

OBSAH

Úvod - zadané parametry	2
1 Kinematika klikového mechanismu a teoretický výkon	3
2 Síly a momenty v klikovém mechanismu	10
3 Torzní kmitání klikového mechanismu	25
4 Kontrolní pevnostní výpočet analýzy klikového hřídele	52
5 Jemné drážkování	55
Výkres klikového hřídele	

Úvod - zadané parametry motoru

Počet válců		$i_v = 2$
Vrtání válce		$D = 76.5\text{mm}$
Zdvih pístu		$Z = 86.9\text{mm}$
Kompresní poměr		$\epsilon = 9.5$
Otáčky motoru		$n_{\text{zad}} = 5000\text{min}^{-1}$
Rameno kliky		$r = 43.45\text{mm}$
Délka ojnice		$l = 138\text{mm}$
Zapalování	$\varphi = \frac{720^\circ}{i_v}$	$\varphi = 360^\circ$
Taktnost motoru		$\tau = 0.5$
Objem jednoho válce	$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot Z$	$V = 399.423 \cdot \text{cm}^3$
Objem válců	$V_c = V \cdot i_v$	$V_c = 798.845 \cdot \text{cm}^3$
Kompresní objem	$V_k = \frac{V}{\epsilon}$	$V_k = 42.044 \cdot \text{cm}^3$
Celkový objem válce	$V_{\text{cel}} = V_k + V$	$V_{\text{cel}} = 441.467 \cdot \text{cm}^3$
Celkový objem motorů	$V_{\text{celkovy}} = V_{\text{cel}} \cdot i_v$	$V_{\text{celkovy}} = 882.934 \cdot \text{cm}^3$
Úhlová rychlost klikového hřídele	$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n_{\text{zad}}$	$\omega = 523.599 \cdot \text{sec}^{-1}$
Plocha pístu	$S_p = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$	$S_p = 45.963 \cdot \text{cm}^2$
Klikový poměr	$\lambda = \frac{r}{l}$	$\lambda = 0.315$
Střední pístová rychlost	$v_{\text{ps}} = 2 \cdot Z \cdot n_{\text{zad}}$	$v_{\text{ps}} = 14.483 \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

1 Kinematika klikového mechanismu a teoretický výkon

Načtení naměřených hodnot tlaků dodaných vedoucím DP

$$T1 =$$

tlak.dat

Volba kroku výpočtu (natočení KH)

$$n_p = T1_0$$

$$n_p = 360$$

$$\text{last}(T1) = 360$$

$$\text{krok} = \frac{720^\circ}{n_p} = 2^\circ$$

$$i = 0..n_p - 1$$

$$\alpha_i = i \cdot \text{krok}$$

Naměřený tlak

$$p_i = T1_{i+1} \cdot \text{bar}$$

$$\max(p) = 8.51 \cdot \text{MPa}$$

$$\min(p) = 0.106 \cdot \text{MPa}$$

Průměrná hodnota atmosférického tlaku $T2 =$

atm.dat

$$p_{\text{atm}} = T2 \cdot \text{MPa}$$

$$p_{\text{atm}} = 0.1 \cdot \text{MPa}$$

Síla na píst od tlaků plynů

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

$$\max(F_p) = 38.654 \cdot \text{kN}$$

$$\min(F_p) = 0.026 \cdot \text{kN}$$

Dráha pístu

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

$$\max(s_{\alpha}) = 86.9 \cdot \text{mm}$$

$$\min(s_{\alpha}) = 0 \cdot \text{mm}$$

1. harmonická složka dráhy

$$s1_{\alpha_i} = r \cdot (1 - \cos(\alpha_i))$$

2. harmonická složka dráhy

$$s2_{\alpha_i} = r \cdot \frac{\lambda}{4} \cdot (1 - \cos(2 \cdot \alpha_i))$$

Rychlost pístu

$$v_{\alpha_i} = r \cdot \omega \cdot \left(\sin(\alpha_i) + \frac{\lambda}{2} \cdot \sin(2 \cdot \alpha_i) \right)$$

$$\max(v_{\alpha}) = 23.767 \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\min(v_{\alpha}) = -23.767 \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

1. harmonická složka rychlosti

$$v1_{\alpha_i} = r \cdot \omega \cdot \sin(\alpha_i)$$

2. harmonická složka rychlosti

$$v2_{\alpha_i} = r \cdot \omega \cdot \frac{\lambda}{2} \cdot \sin(2 \cdot \alpha_i)$$

Zrychlení pístu

$$a_{\alpha_i} = r \cdot \omega^2 \cdot (\cos(\alpha_i) + \lambda \cdot \cos(2 \cdot \alpha_i))$$

$$\max(a_{\alpha}) = 15.663 \times 10^3 \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$\min(a_{\alpha}) = -8.479 \times 10^3 \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$$

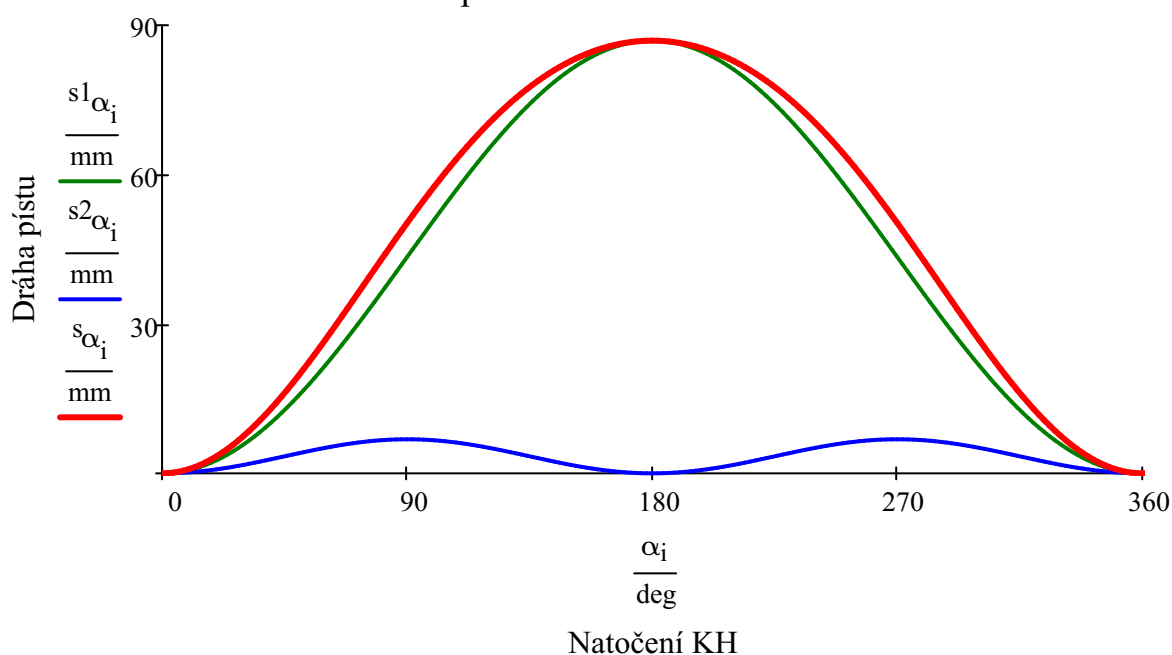
1. harmonická složka zrychlení

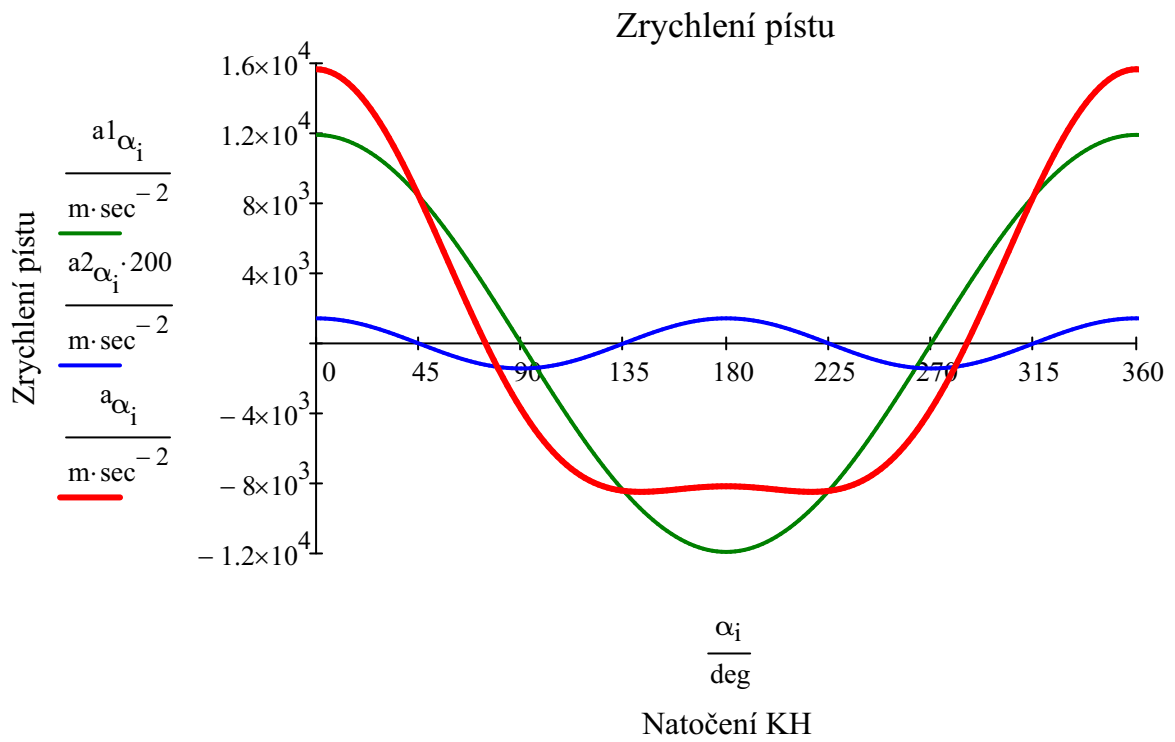
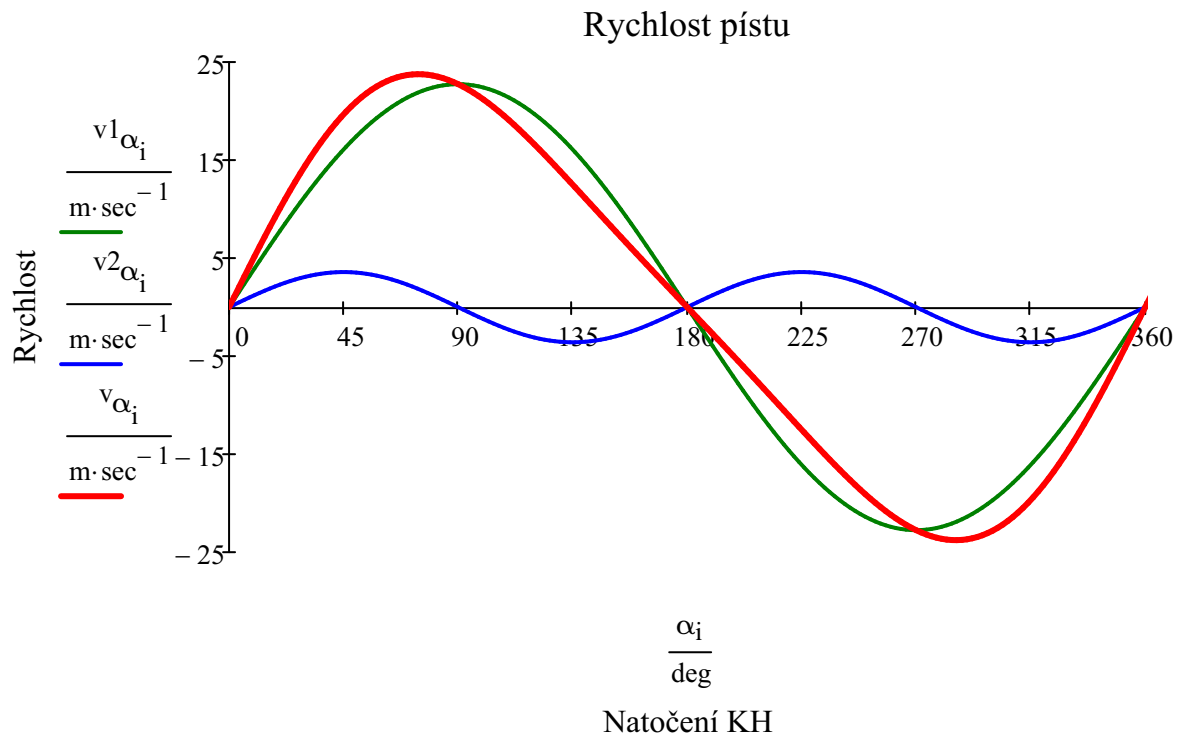
$$a1_{\alpha_i} = r \cdot \omega^2 \cdot \cos(\alpha_i)$$

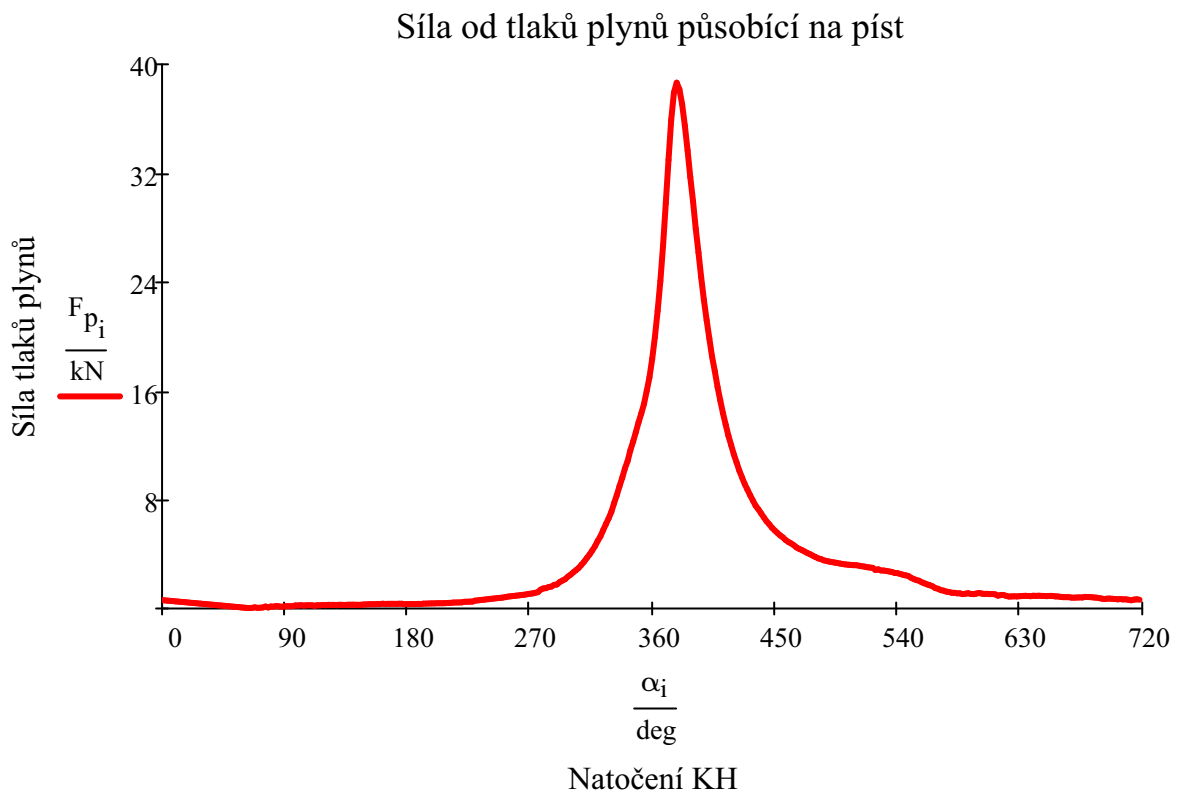
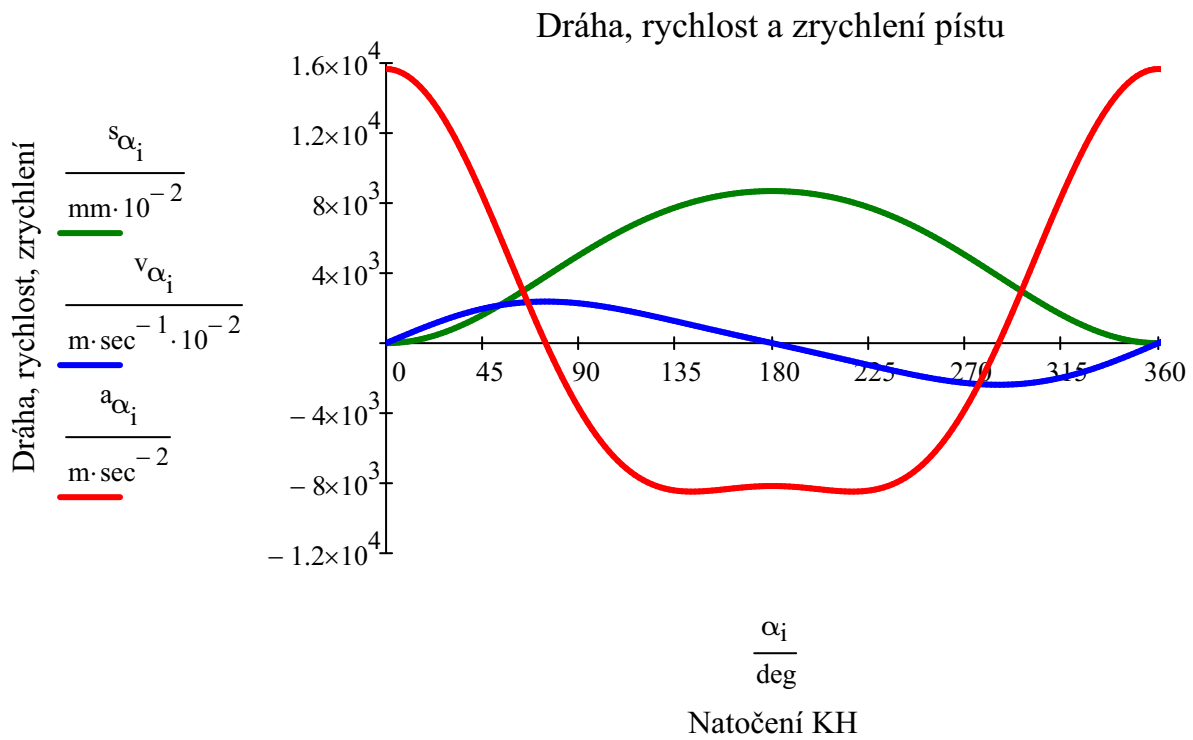
2. harmonická složka zrychlení

$$a2_{\alpha_i} = r \cdot \omega \cdot \lambda \cdot \cos(2 \cdot \alpha_i)$$

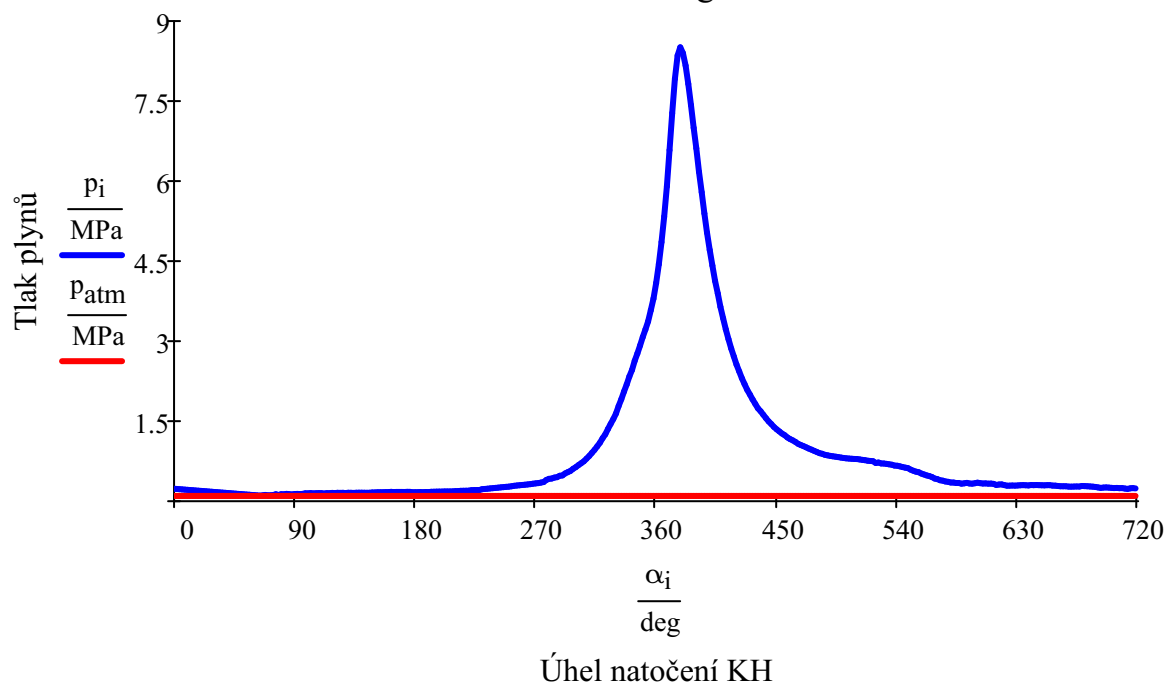
Dráha pístu v závislosti na natočení KH







P - alfa diagram



Indikátorový diagram

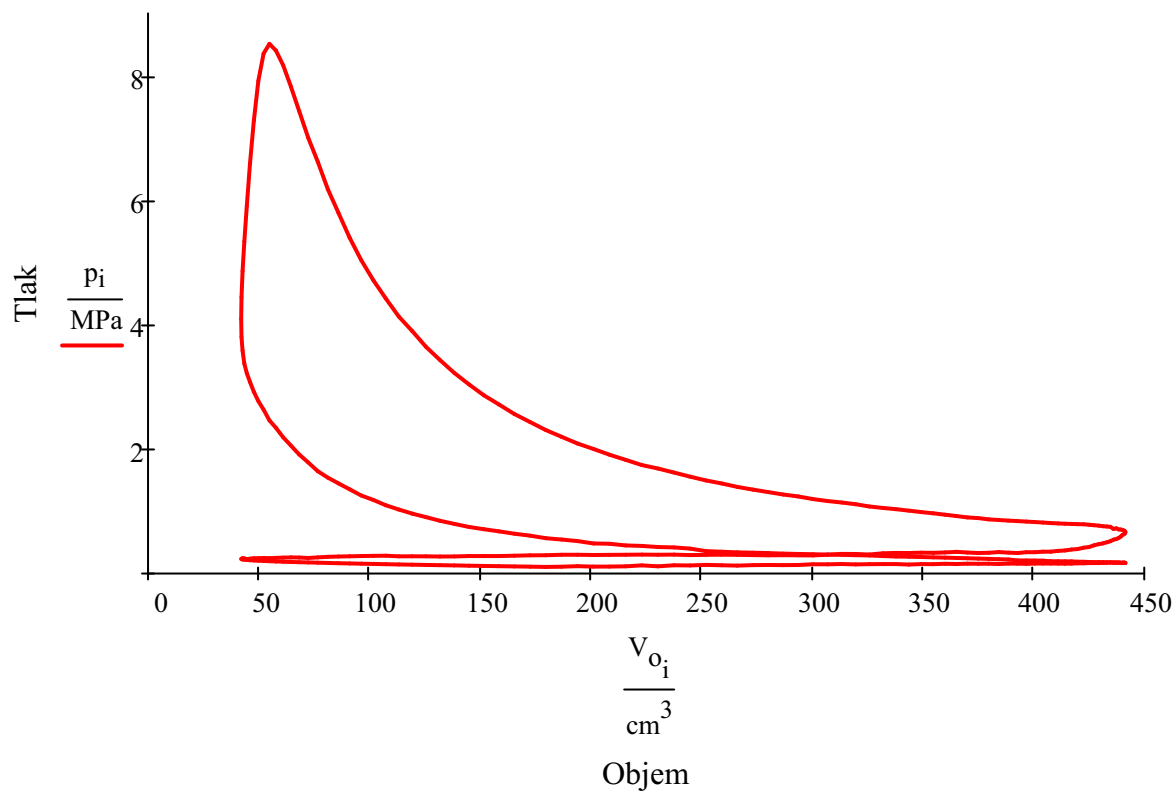
Okamžitý objem

$$V_{o_i} = V_k + S_p \cdot s \cdot \alpha_i$$

$$\max(V_o) = 441.467 \cdot \text{cm}^3$$

$$\min(V_o) = 42.044 \cdot \text{cm}^3$$

P - V diagram



Výpočet práce oběhu z indikátorového diagramu

Práce vykonaná sáním

$$W_{sa} = \sum_{i=0}^{89} \left[\frac{p_{i+1} + p_i}{2} \cdot (V_{o_{i+1}} - V_{o_i}) \right]$$

$$W_{sa} = 58.161 \text{ J}$$

Práce vykonaná kompresí

$$W_{ko} = \sum_{i=90}^{179} \left[\frac{p_{i+1} + p_i}{2} \cdot (V_{o_{i+1}} - V_{o_i}) \right]$$

$$W_{ko} = -263.684 \text{ J}$$

Práce vykonaná expanzí

$$W_{ex} = \sum_{i=180}^{269} \left[\frac{p_{i+1} + p_i}{2} \cdot (V_{o_{i+1}} - V_{o_i}) \right]$$

$$W_{ex} = 983.178 \text{ J}$$

Práce vykonaná výfukem

$$W_{vy} = \sum_{i=270}^{358} \left[\frac{p_{i+1} + p_i}{2} \cdot (V_{o_{i+1}} - V_{o_i}) \right]$$

$$W_{vy} = -123.91 \text{ J}$$

Výsledná indikovaná práce oběhu

$$W_i = W_{ex} - |W_{ko}| - |W_{sa} + W_{vy}|$$

$$W_i = 653.745 \text{ J}$$

Střední indikovaný tlak

$$p_i = \frac{W_i}{V}$$

$$p_i = 1.637 \cdot \text{MPa}$$

$$\tau = 2$$

Indikovaný výkon

$$P_i = \frac{p_i \cdot V \cdot n_{zad}}{\tau}$$

$$P_i = 27.239 \cdot \text{kW}$$

Efektivní tlak a výkon

Efektivní výkon pro tříválec HTP

$$P_{efe3} = 73.2 \text{ kW}$$

$$i_3 = 3$$

$$p_{efe} = \frac{P_{efe3} \cdot \tau}{V \cdot n_{zad} \cdot i_3}$$

$$p_{efe} = 1.466 \cdot \text{MPa}$$

$$P_{efe} = \frac{p_{efe} \cdot V \cdot n_{zad}}{\tau}$$

$$P_{efe} = 24.4 \cdot \text{kW}$$

Efektivní výkon pro dvouválec

$$P_{\text{efec}} = P_{\text{efe}} \cdot i_v$$

$$P_{\text{efec}} = 48.8 \cdot \text{kW}$$

Litrový výkon

$$V_1 = 1000 \text{cm}^3$$

$$P_{\text{lit}} = \frac{P_{\text{efec}} \cdot V_1}{V \cdot i_v}$$

$$P_{\text{lit}} = 61.088 \cdot \text{kW}$$

Ztrátový výkon

$$P_{\text{zt}} = P_i - P_{\text{efe}}$$

$$P_{\text{zt}} = 2.839 \cdot \text{kW}$$

$$\text{jedno\%} = \frac{P_{\text{zt}}}{100}$$

$$\text{jedno\%} = 0.028 \cdot \text{kW}$$

Pokud je průměrná ztráta na tření v hlavních ložiscích 25 % celkových ztrát, pak použitím valivých ložisek klesnou ztráty na 12 %.

Efektivní výkon s valivými ložisky
pro oba válce

$$P_{\text{efecval}} = 2 \left[P_i - (P_{\text{zt}} - 12 \cdot \text{jedno\%}) \right]$$

$$P_{\text{efecval}} = 49.481 \cdot \text{kW}$$

2 Síly a momenty působící v klikovém mechanismu

Hmotnost pístní skupiny

$$m_{\text{pist}} = 0.285\text{kg}$$

Hmotnost ojnice s ložisky pánve

$$m_{\text{o}} = 0.443\text{kg}$$

Hmotnost posuvné části ojnice

$$m_{\text{op}} = 0.109\text{kg}$$

Hmotnost rotační části ojnice s ložisky

$$m_{\text{or}} = 0.334\text{kg}$$

Celková posuvná hmotnost

$$m_{\text{p}} = m_{\text{pist}} + m_{\text{op}}$$

Celková rotační hmotnost (polovina HČ, bez vývažku, mor)

$$m_{\text{r}} = 1.2143\text{kg}$$

Setrvačné posuvné síly

$$F_{\text{sp}_i} = -m_{\text{p}} \cdot a_{\alpha_i}$$

$$\max(F_{\text{sp}}) = 3.341 \cdot \text{kN}$$

$$\min(F_{\text{sp}}) = -6.171 \cdot \text{kN}$$

Odstředivá síla rotační části ojnice

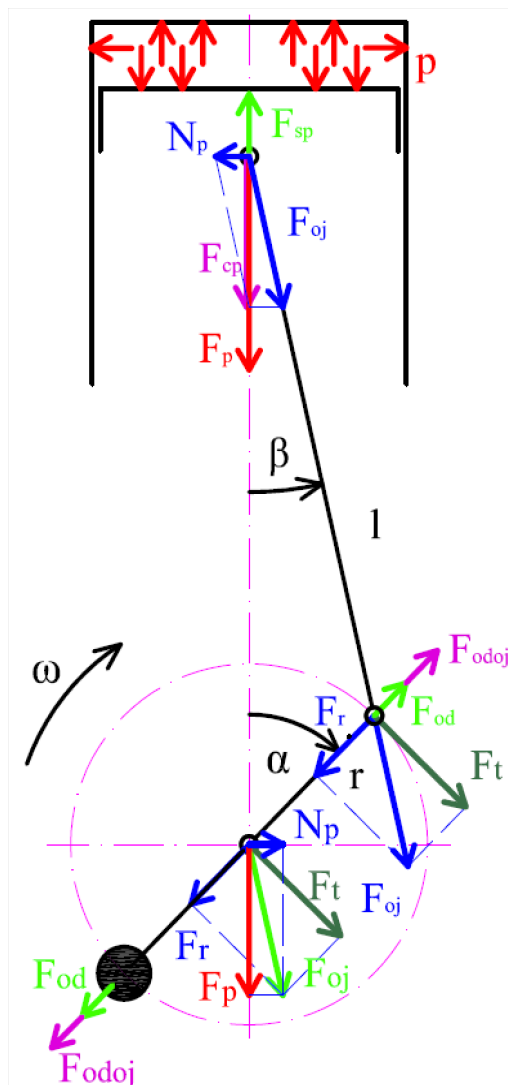
$$F_{\text{odoj}} = m_{\text{or}} \cdot r \cdot \omega^2$$

$$F_{\text{odoj}} = 3.979 \cdot \text{kN}$$

Odstředivá síla redukované hmotnosti do ojnicního čepu

$$F_{\text{od}} = m_{\text{r}} \cdot r \cdot \omega^2$$

$$F_{\text{od}} = 14.465 \cdot \text{kN}$$



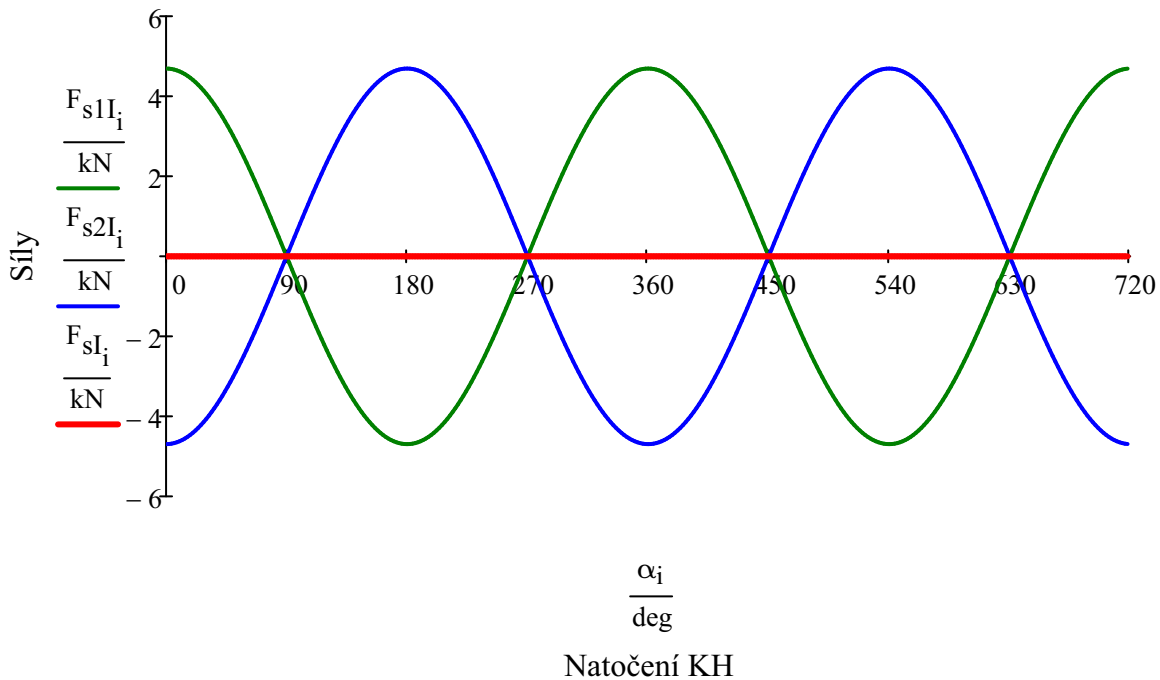
Setrvačné síly posuvných částí 1. řádu

$$F_{s1I_i} = m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \cos(\alpha_i) \quad \begin{array}{l} \min(F_{s1I}) = -4.693 \cdot \text{kN} \\ \max(F_{s1I}) = 4.693 \cdot \text{kN} \end{array}$$

$$F_{s2I_i} = m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \cos(\alpha_i + 180^\circ) \quad \begin{array}{l} \min(F_{s2I}) = -4.693 \cdot \text{kN} \\ \max(F_{s2I}) = 4.693 \cdot \text{kN} \end{array}$$

$$F_{sI_i} = F_{s1I_i} - F_{s2I_i} \quad \max(F_{sI}) = 0 \cdot \text{N}$$

Setrvačné síly prvního řádu



Setrvačné síly posuvných částí 2. řádu

$$F_{s1II_i} = m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \lambda \cdot \cos(2 \cdot \alpha_i) \quad \begin{array}{l} \min(F_{s1II}) = -1.478 \cdot \text{kN} \\ \max(F_{s1II}) = 1.478 \cdot \text{kN} \end{array}$$

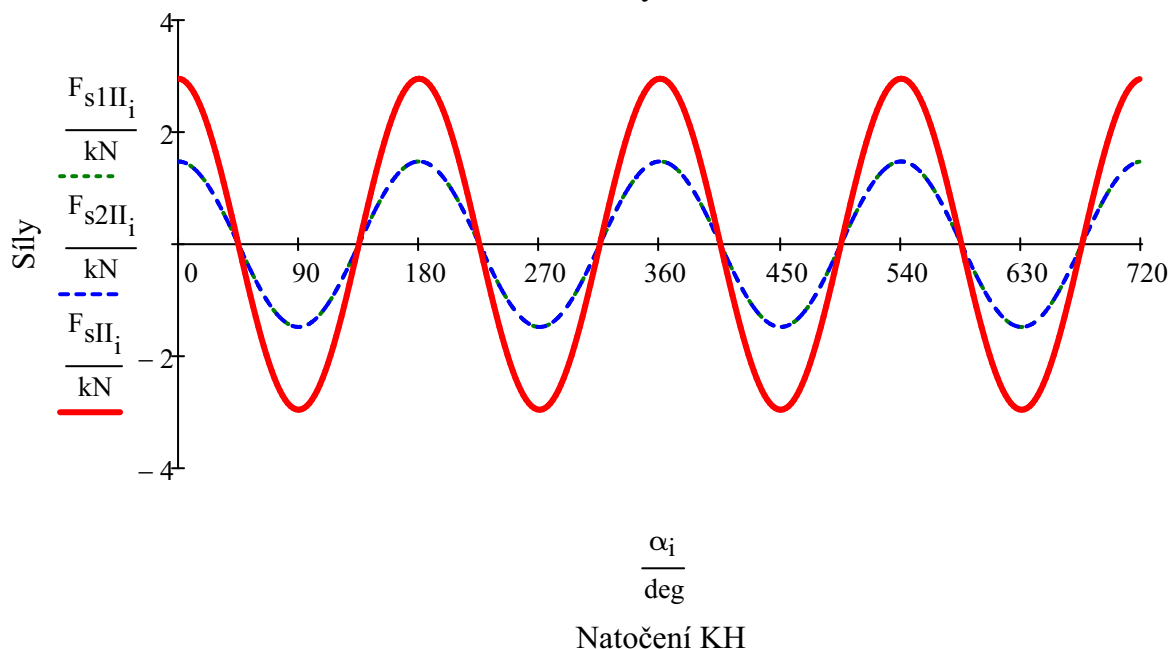
$$F_{s2II_i} = m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \lambda \cdot \cos[2 \cdot (\alpha_i + 180^\circ)] \quad \begin{array}{l} \min(F_{s2II}) = -1.478 \cdot \text{kN} \\ \max(F_{s2II}) = 1.478 \cdot \text{kN} \end{array}$$

$$F_{sII_i} = F_{s1II_i} + F_{s2II_i}$$

$$\min(F_{sII}) = -2.955 \cdot \text{kN}$$

$$\max(F_{sII}) = 2.955 \cdot \text{kN}$$

Setrvačné síly druhého řádu



Setrvačná síla 4. řádu

$$F_{s1IV_i} = -m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \frac{\lambda^3}{4} \cdot \cos(4 \cdot \alpha_i)$$

$$\min(F_{s1IV}) = -0.037 \cdot \text{kN}$$

$$\max(F_{s1IV}) = 0.037 \cdot \text{kN}$$

$$F_{s2IV_i} = -m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \frac{\lambda^3}{4} \cdot \cos[4 \cdot (\alpha_i + 180^\circ)]$$

$$\min(F_{s2IV}) = -0.037 \cdot \text{kN}$$

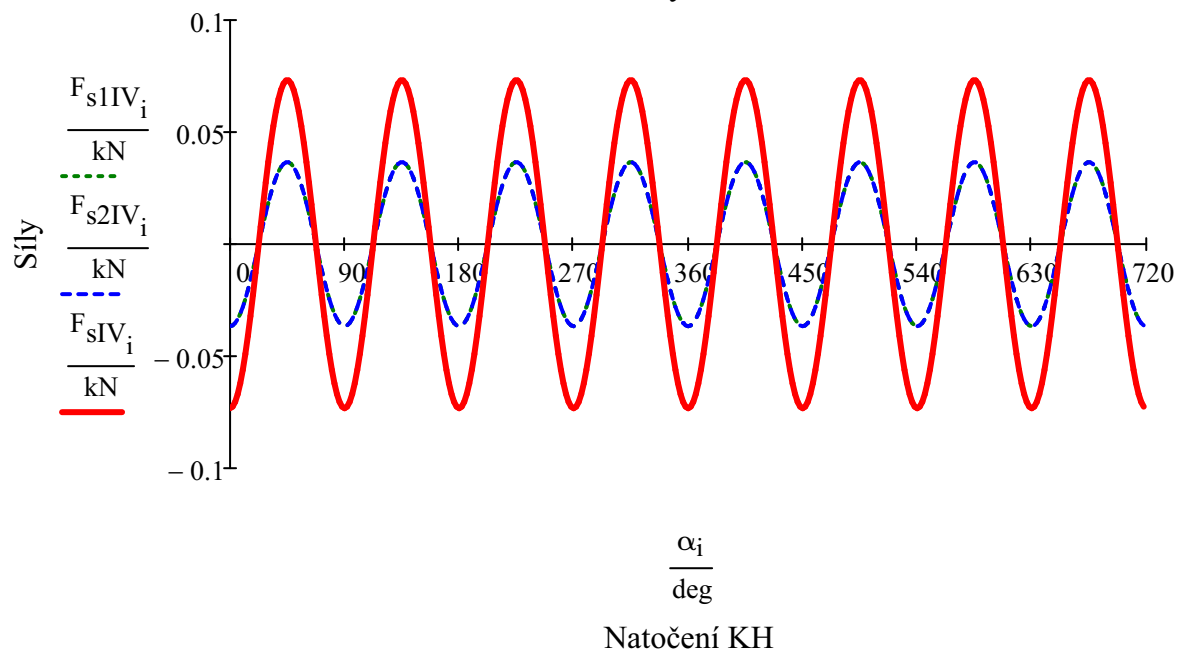
$$\max(F_{s2IV}) = 0.037 \cdot \text{kN}$$

$$F_{sIV} = F_{s1IV} + F_{s2IV}$$

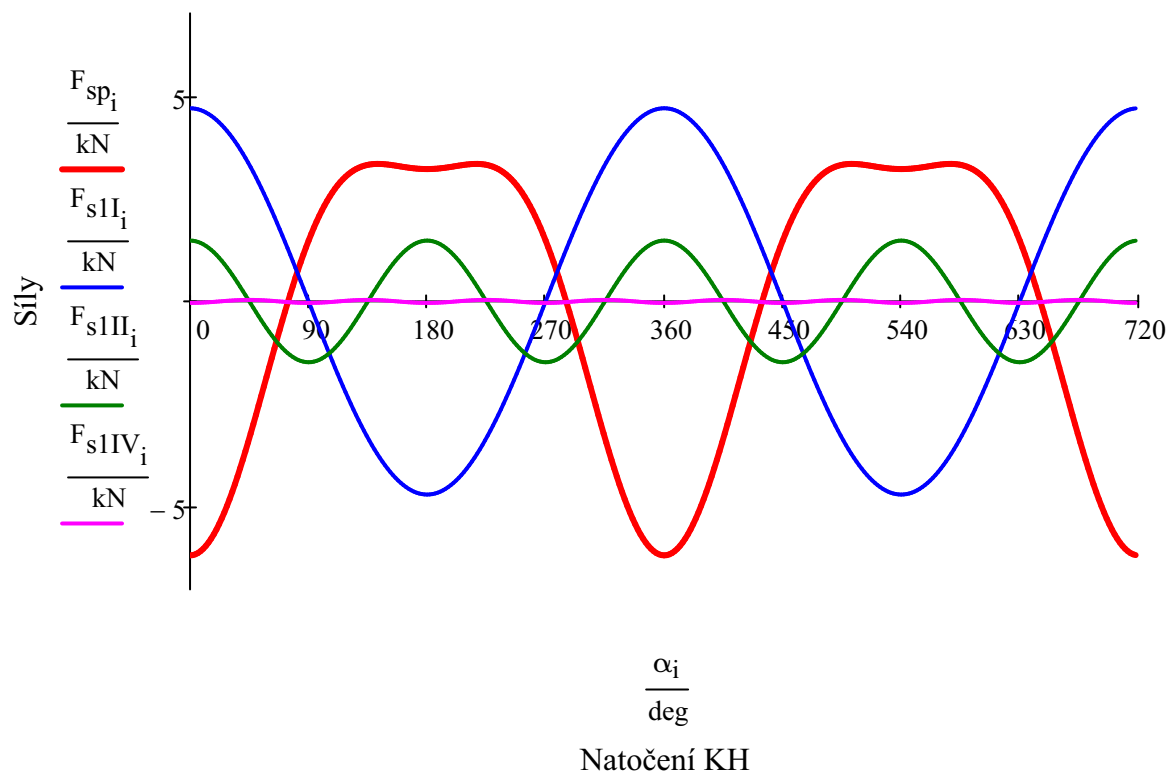
$$\min(F_{sIV}) = -0.073 \cdot \text{kN}$$

$$\max(F_{sIV}) = 0.073 \cdot \text{kN}$$

Setrvačné síly čtvrtého řádu



Posuvné setrvačné síly

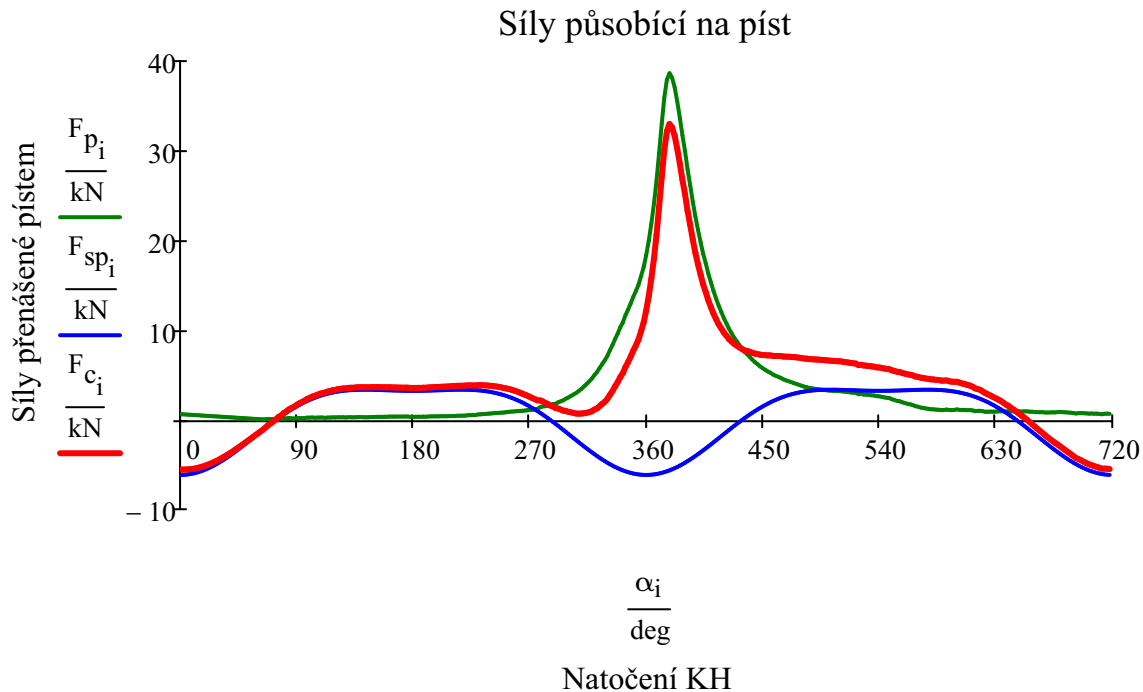


Celkové síly působící na píst

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

$$\max(F_c) = 32.995 \cdot \text{kN}$$

$$\min(F_c) = -5.567 \cdot \text{kN}$$



Setrvačné momenty

Vzdálenost os pístů

$$b = 40.8 \text{ mm}$$

Setrvačný moment 1. řádu

$$M_{FsI1_i} = m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \frac{b}{2} \cdot \cos(\alpha_i)$$

$$\max(M_{FsI1}) = 95.744 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

$$\min(M_{FsI1}) = -95.744 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

$$M_{FsI2_i} = -m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \frac{b}{2} \cdot \cos(\alpha_i + 180^\circ)$$

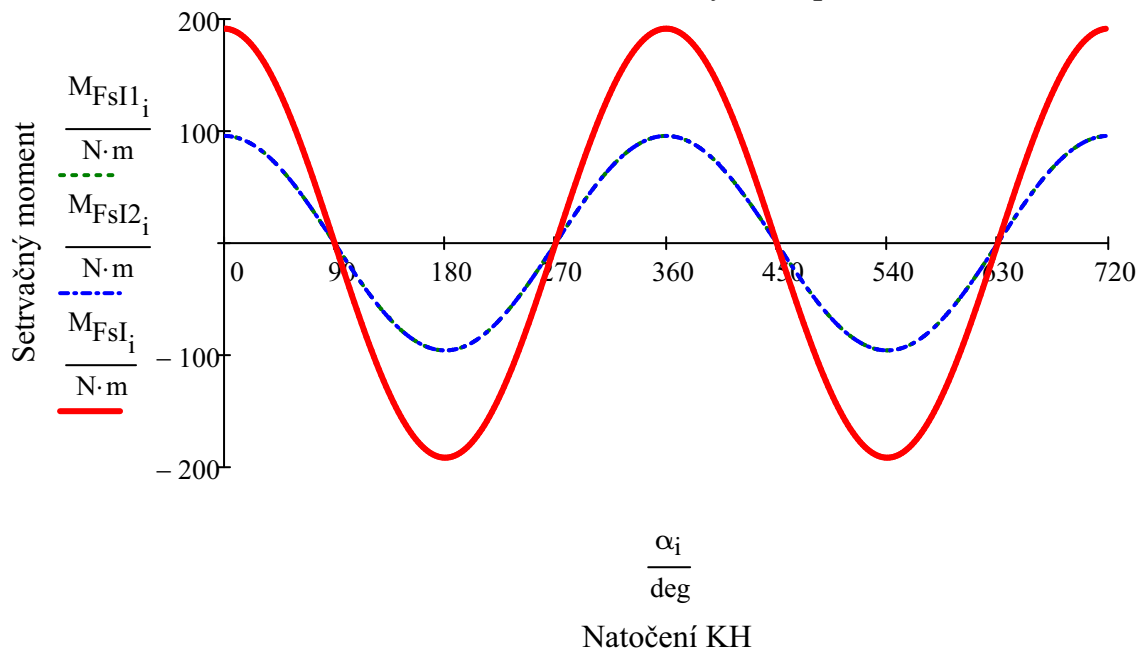
$$\max(M_{FsI2}) = 95.744 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

$$\min(M_{FsI2}) = -95.744 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

$$M_{FsI_i} = M_{FsI1_i} + M_{FsI2_i}$$

$$\max(M_{FsI}) = 191.489 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

Průběh momentů setrvačných sil prvního řádu



Vyvažovací hřídel

Poloměr těžiště vývažku přední části

$$r_{vp} = 10.11 \text{ mm}$$

Poloměr těžiště vývažku zadní části

$$r_{vz} = 14.87 \text{ mm}$$

Rameno vývažku přední části

$$b_{vp} = 75.8 \text{ mm}$$

Rameno vývažku zadní části

$$b_{vz} = 73.9 \text{ mm}$$

Hmotnost vývažku přední části

$$m_{vp} = \frac{\max(M_{FsI})}{4 \cdot r_{vp} \cdot \omega^2 \cdot b_{vp}}$$

$$m_{vp} = 0.228 \text{ kg}$$

Hmotnost vývažků zadní části

$$m_{vz} = \frac{\max(M_{FsI})}{4 \cdot r_{vz} \cdot \omega^2 \cdot b_{vz}}$$

$$m_{vz} = 0.159 \text{ kg}$$

Hmotnost čtyř vývažků

$$m_{vMFsI} = 2 \cdot (m_{vp} + m_{vz})$$

$$m_{vMFsI} = 0.774 \text{ kg}$$

Moment vyvažovacího hřídele představujícího klikový hřídel

$$M_{vKH_i} = -\left(m_{vp} \cdot r_{vp} \cdot \omega^2 \cdot b_{vp} + m_{vz} \cdot r_{vz} \cdot \omega^2 \cdot b_{vz}\right) \cdot \cos(\alpha_i)$$

$$\max(M_{vKH}) = 95.744 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

$$\min(M_{vKH}) = -95.744 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

Moment vyvolaný vyvažovacím hřídelem

$$M_{vVH_i} = (m_{vp} \cdot r_{vp} \cdot \omega^2 \cdot b_{vp} + m_{vz} \cdot r_{vz} \cdot \omega^2 \cdot b_{vz}) \cdot \cos(\alpha_i + 180^\circ)$$

$$\max(M_{vVH}) = 95.744 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

$$\min(M_{vVH}) = -95.744 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

Výsledný moment vývažků

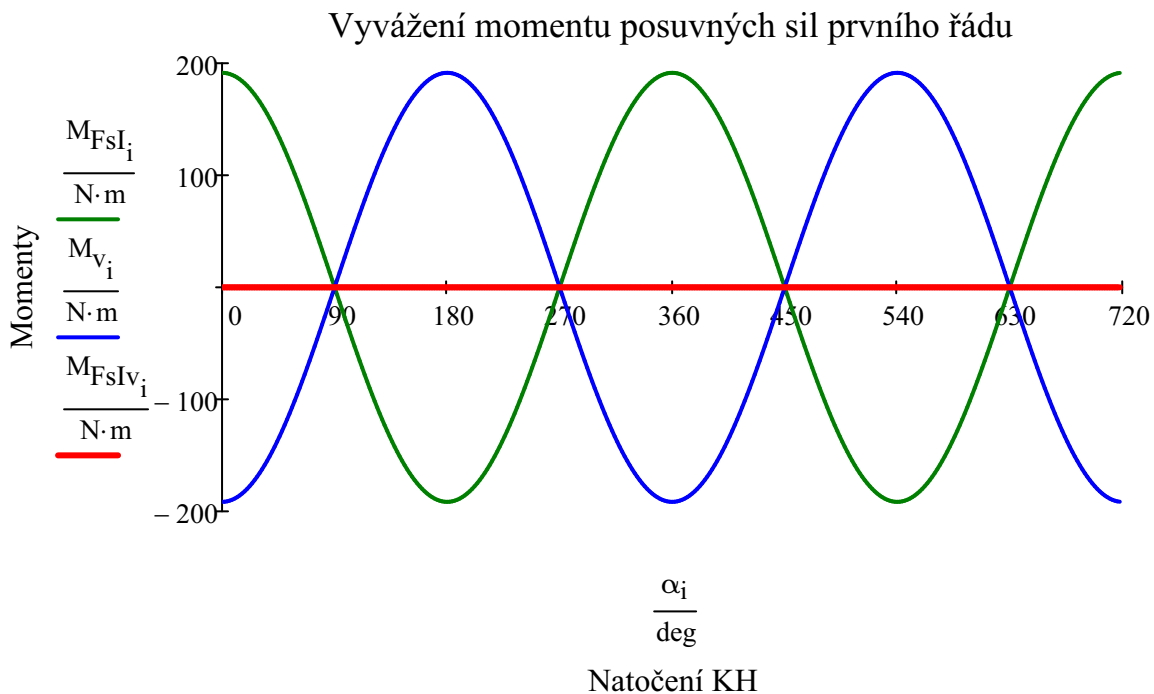
$$M_{v_i} = M_{vKH_i} + M_{vVH_i}$$

Výsledný moment posuvných sil prvního řádu

$$M_{FsIv_i} = M_{FsI_i} + M_{v_i}$$

$$\max(M_{FsIv}) = 0 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

$$\min(M_{FsIv}) = 0 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$



Setrvačný moment 2. řádu

$$M_{FsII1_i} = m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \lambda \cdot \frac{b}{2} \cdot \cos(2 \cdot \alpha_i)$$

$$\max(M_{FsII1}) = 30.146 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

$$\min(M_{FsII1}) = -30.146 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

$$M_{FsII2_i} = -m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \lambda \cdot \frac{b}{2} \cdot \cos[2 \cdot (\alpha_i + 180^\circ)]$$

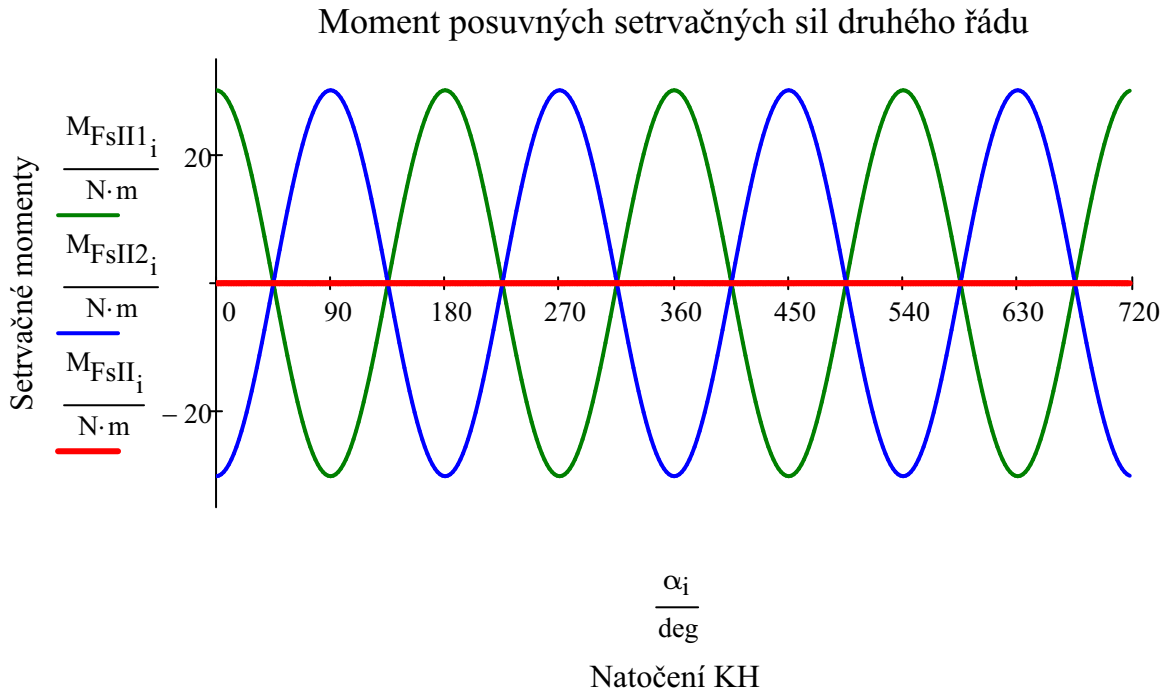
$$\max(M_{FsII2}) = 30.146 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

$$\min(M_{FsII2}) = -30.146 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

$$M_{FsII_i} = M_{FsIII1_i} + M_{FsII2_i}$$

$$\max(M_{FsII}) = 0 \cdot N \cdot m$$

$$\min(M_{FsII}) = 0 \cdot N \cdot m$$



Moment odstředivých sil

Rameno působení m_r

$$b_{od} = 27.396 \text{ mm}$$

$$M_{sr1} = m_r \cdot r \cdot \omega^2 \cdot b_{od}$$

$$M_{sr1} = 396.278 \cdot N \cdot m$$

$$M_{sr2} = m_r \cdot r \cdot \omega^2 \cdot b_{od}$$

$$M_{sr2} = 396.278 \cdot N \cdot m$$

$$M_{sr} = M_{sr1} + M_{sr2}$$

$$M_{sr} = 792.556 \cdot N \cdot m$$

Vyvážení pomocí programu ProEngineer

Rameno působení m_v

$$b_{vz} = 36.94 \text{ mm}$$

Hmotnost vývažku

$$m_v = 0.9 \text{ kg}$$

$$M_{v1} = m_v \cdot r \cdot \omega^2 \cdot b_{vz}$$

$$M_{v1} = 396.028 \cdot N \cdot m$$

$$M_{v2} = m_v \cdot r \cdot \omega^2 \cdot b_{vz}$$

$$M_{v2} = 396.028 \cdot N \cdot m$$

$$M_v = M_{v1} + M_{v2}$$

$$M_v = 792.057 \cdot N \cdot m$$

Síly přenášené malým okem ojnice

Úhel odklonu ojnice

$$\beta_i = \text{asin}(\lambda \cdot \sin(\alpha_i))$$

Síla působící v ose ojnice

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

$$\max(F_{oj}) = 33.152 \cdot \text{kN}$$

$$\min(F_{oj}) = -5.567 \cdot \text{kN}$$

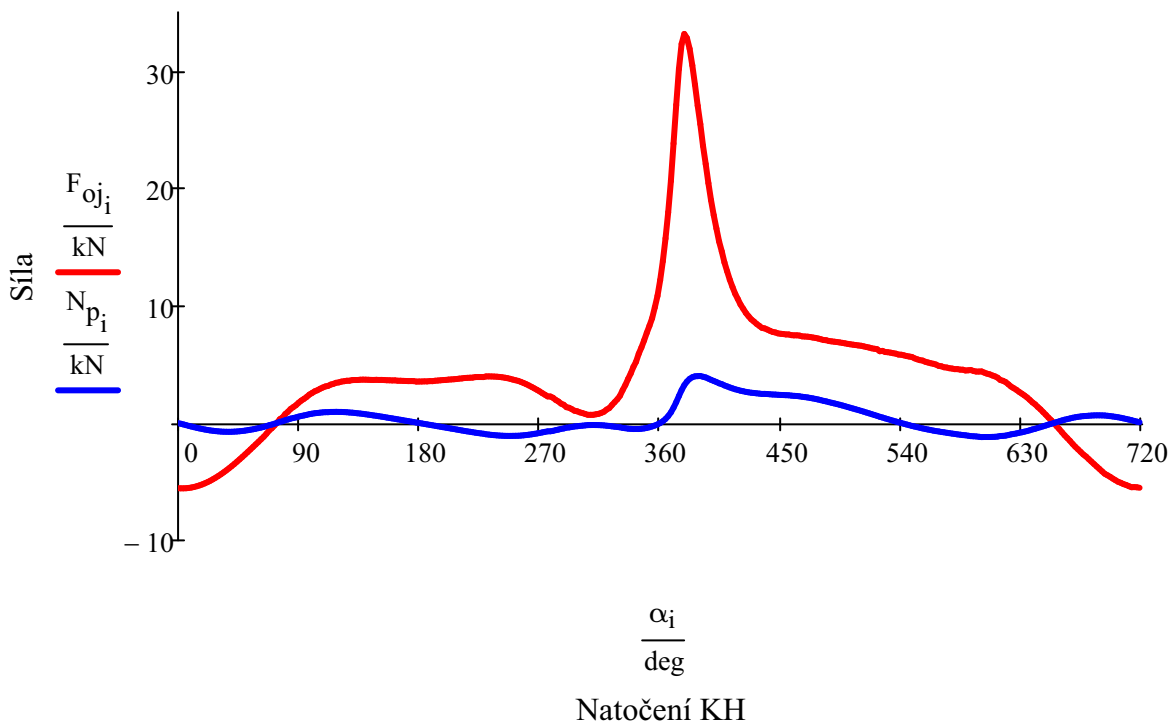
Normálová síla na píst

$$N_{p_i} = F_{c_i} \cdot \tan(\beta_i)$$

$$\max(N_p) = 4.009 \cdot \text{kN}$$

$$\min(N_p) = -1.198 \cdot \text{kN}$$

Síly působící v malém oku ojnice



Síly přenášené velkým okem ojnice

Radiální složka ojnice

$$F_{r_i} = F_{oj_i} \cdot \cos(\alpha_i + \beta_i) - F_{odoj}$$

$$\max(F_r) = 26.405 \cdot \text{kN}$$

$$\min(F_r) = -10.14 \cdot \text{kN}$$

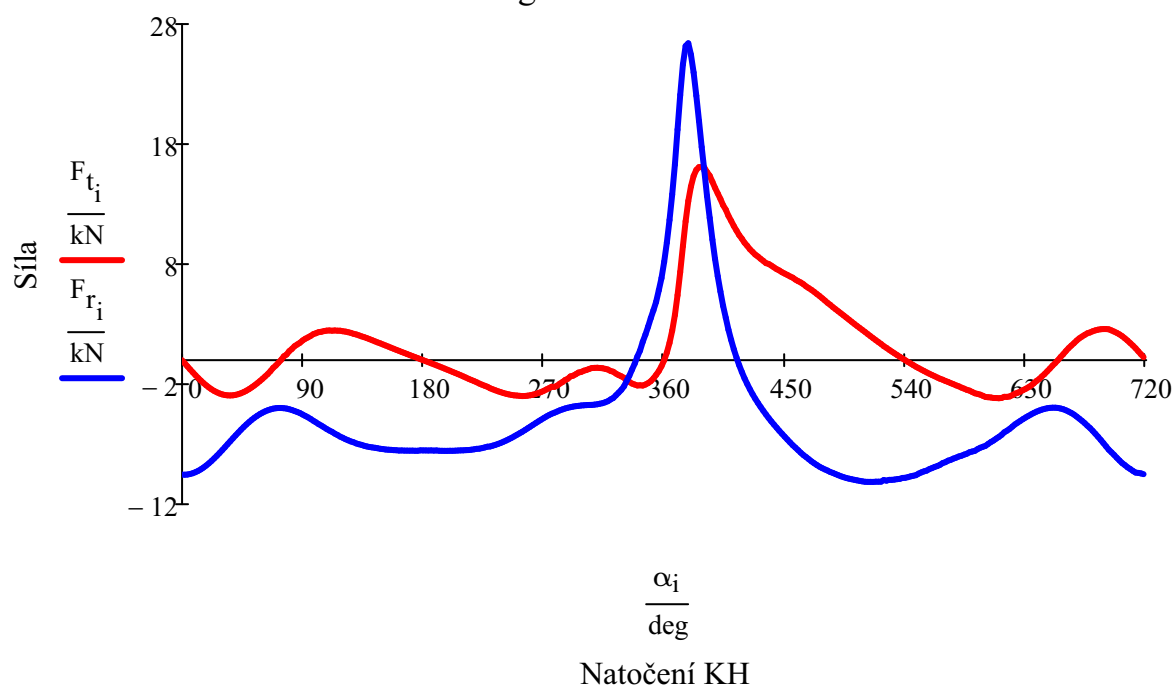
Tangenciální složka ojnice

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

$$\max(F_t) = 16.088 \cdot \text{kN}$$

$$\min(F_t) = -3.167 \cdot \text{kN}$$

Tangenciální a radiální síla



Točivý moment

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

$$\max(M_k) = 699.034 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

$$\min(M_k) = -137.591 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

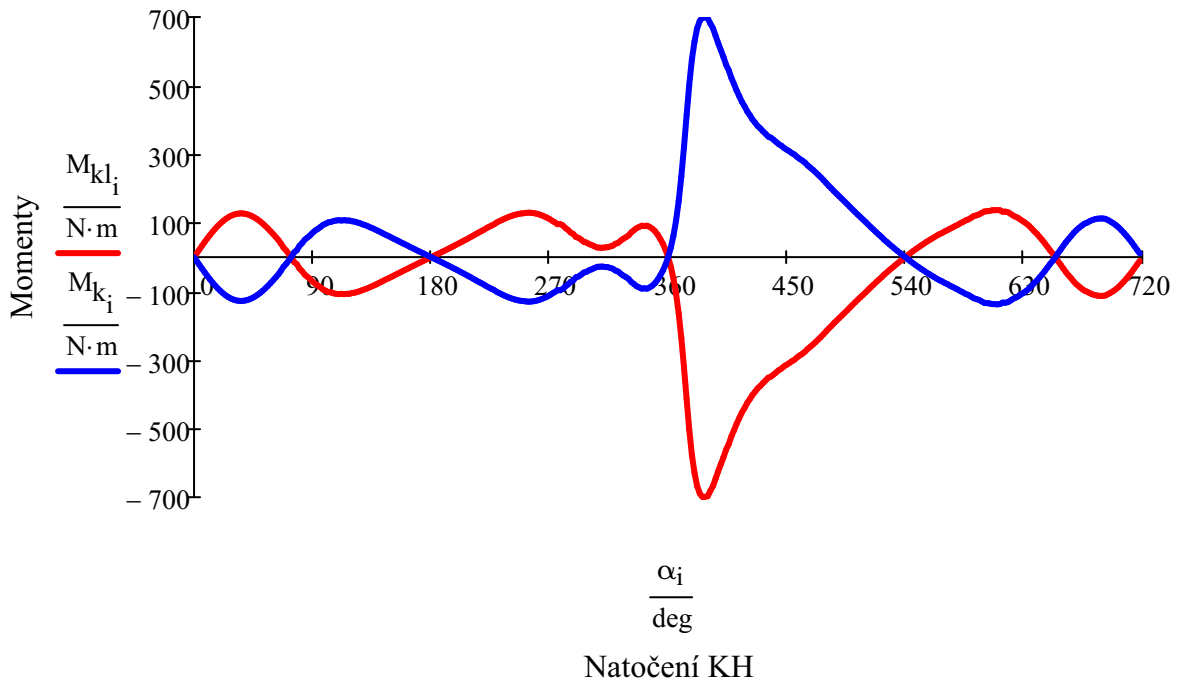
Klopný moment motoru

$$M_{kl_i} = -F_{c_i} \cdot \left(r \cdot \frac{\sin(\alpha_i + \beta_i)}{\cos(\beta_i)} \right)$$

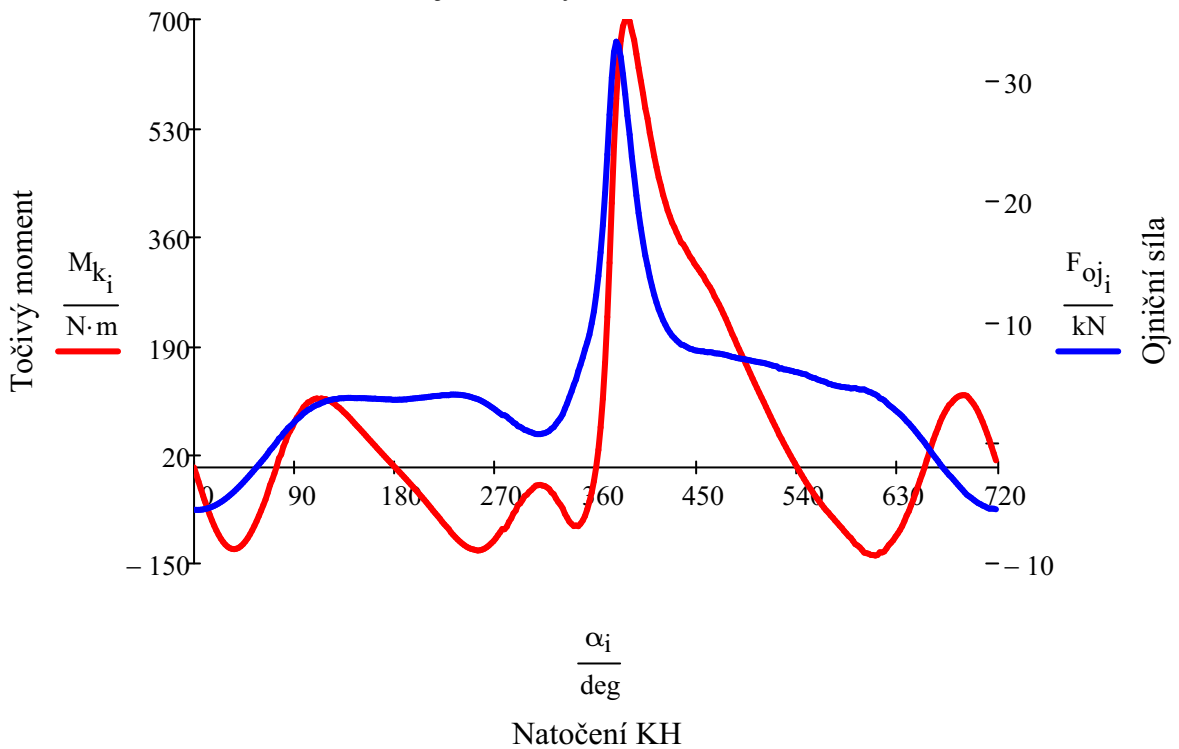
$$\max(M_{kl}) = 137.591 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

$$\min(M_{kl}) = -699.034 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

Točivý moment a klopný moment



Průběh ojníční síly a točivého momentu



Síly zatěžující hlavní a ojniční čep

$$F_{toj_i} = F_{t_i}$$

$$F_{toj_{i+360}} = F_{t_i}$$

Tangenciální síla 1. ojničního čepu

$$F_{toj1_i} = F_{toj_i}$$

$$\max(F_{toj1}) = 16.088 \cdot \text{kN}$$

$$\min(F_{toj1}) = -3.167 \cdot \text{kN}$$

Tangenciální síla 2. ojničního čepu

$$F_{toj2_i} = F_{toj_{i+180}}$$

$$\max(F_{toj2}) = 16.088 \cdot \text{kN}$$

$$\min(F_{toj2}) = -3.167 \cdot \text{kN}$$

$$F_{croj_i} = F_{r_i}$$

$$F_{croj_{i+360}} = F_{r_i}$$

Celková radiální síla na 1. ojničním čepu $F_{croj1_i} = F_{croj_i}$

$$\max(F_{croj1}) = 26.405 \cdot \text{kN}$$

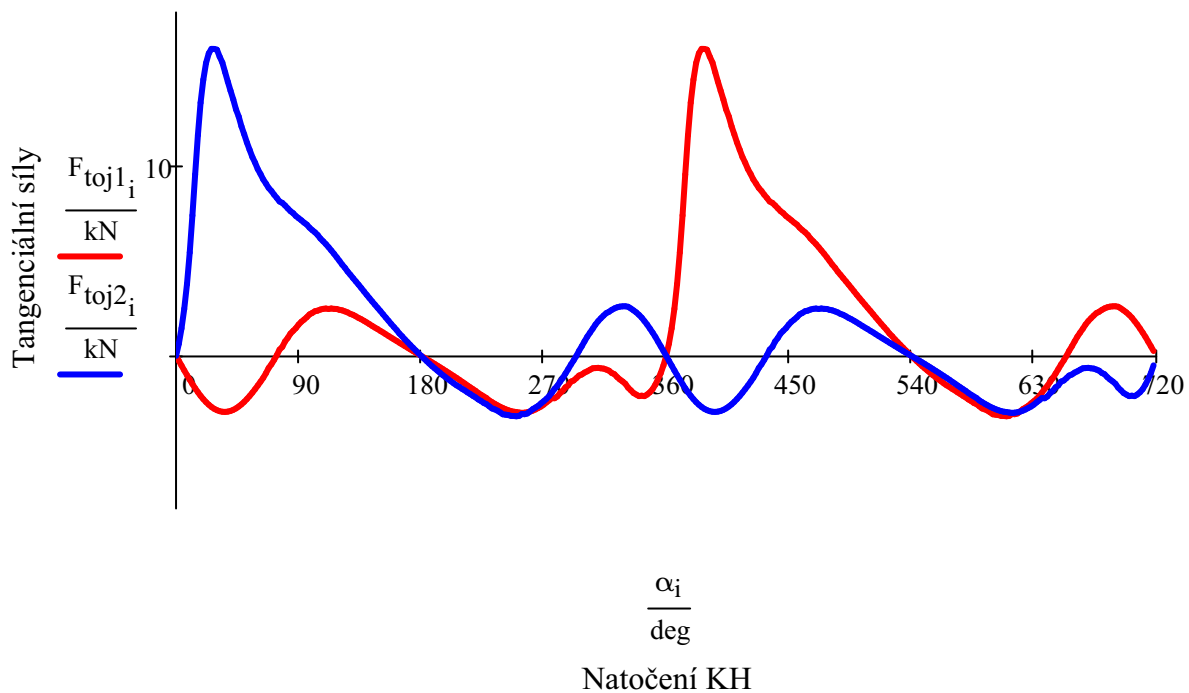
$$\min(F_{croj1}) = -10.14 \cdot \text{kN}$$

Celková radiální síla na 2. ojničním čepu $F_{croj2_i} = F_{croj_{i+180}}$

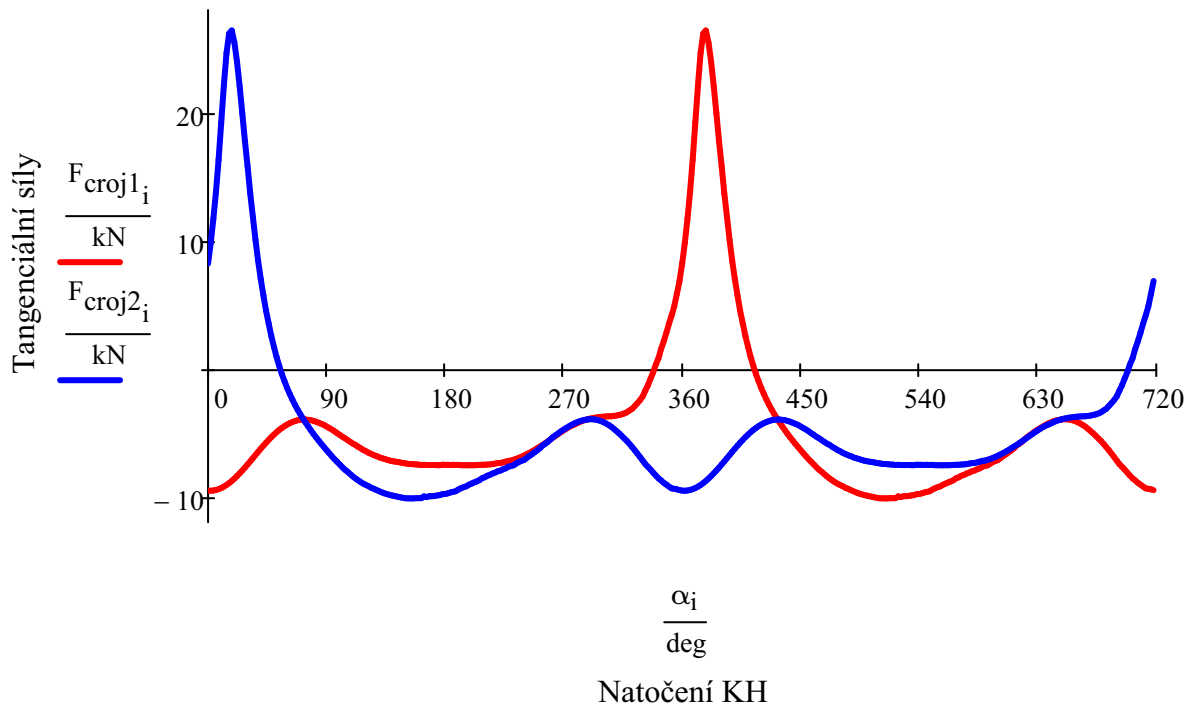
$$\max(F_{croj2}) = 26.405 \cdot \text{kN}$$

$$\min(F_{croj}) = -10.14 \cdot \text{kN}$$

Průběhy tangenciálních sil na ojničních čepch



Průběhy radiálních sil na ojničných čepch



$$M_{kp_i} = M_{k_i}$$

$$M_{kp_{i+360}} = M_{k_i}$$

Točivý moment na 1. ojničním čepu

$$M_{koj1_i} = M_{kp_i}$$

$$\max(M_{koj1}) = 699.034 \cdot N \cdot m$$

$$\min(M_{koj1}) = -137.591 \cdot N \cdot m$$

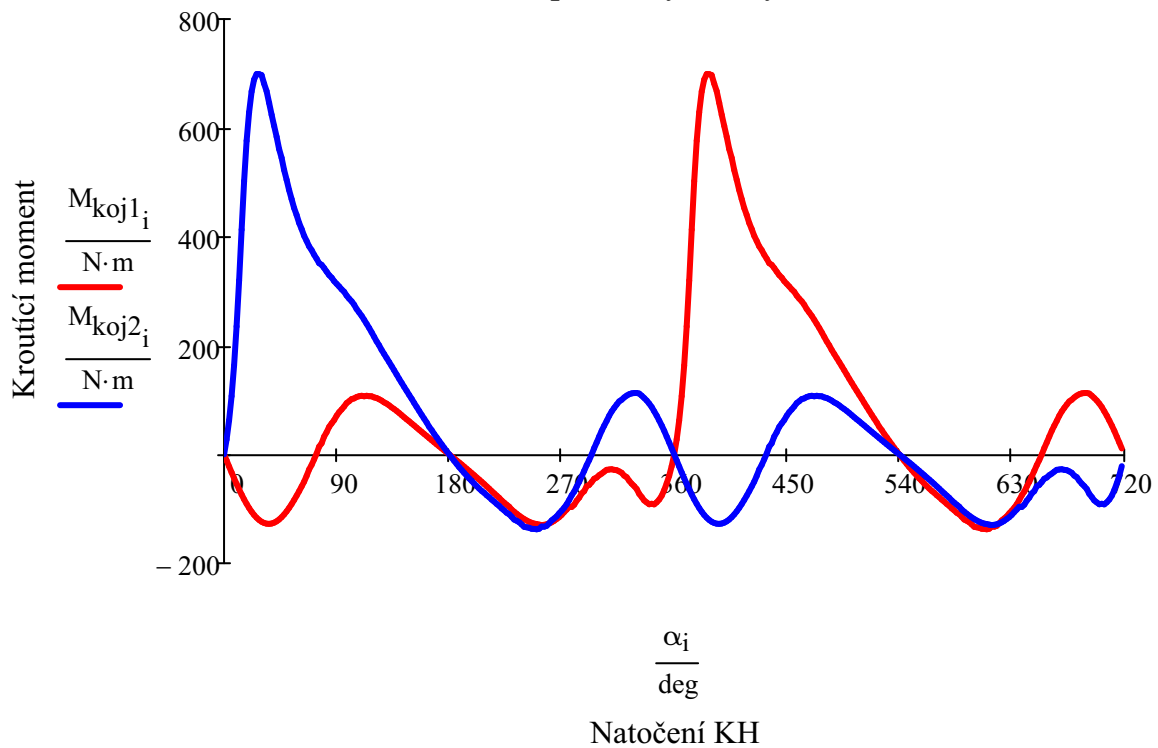
Točivý moment na 2. ojničním čepu

$$M_{koj2_i} = M_{kp_{i+180}}$$

$$\max(M_{koj2}) = 699.034 \cdot N \cdot m$$

$$\min(M_{koj2}) = -137.591 \cdot N \cdot m$$

Fázově posunutý točivý moment



Průběh krouťicího momentu na hlavních čepch

1. hlavní čep $M_{k1hc_i} = 0\text{N}\cdot\text{m}$

2. hlavní čep $M_{k2hc_i} = M_{k1hc_i} + M_{koj1_i} + M_{koj2_i}$

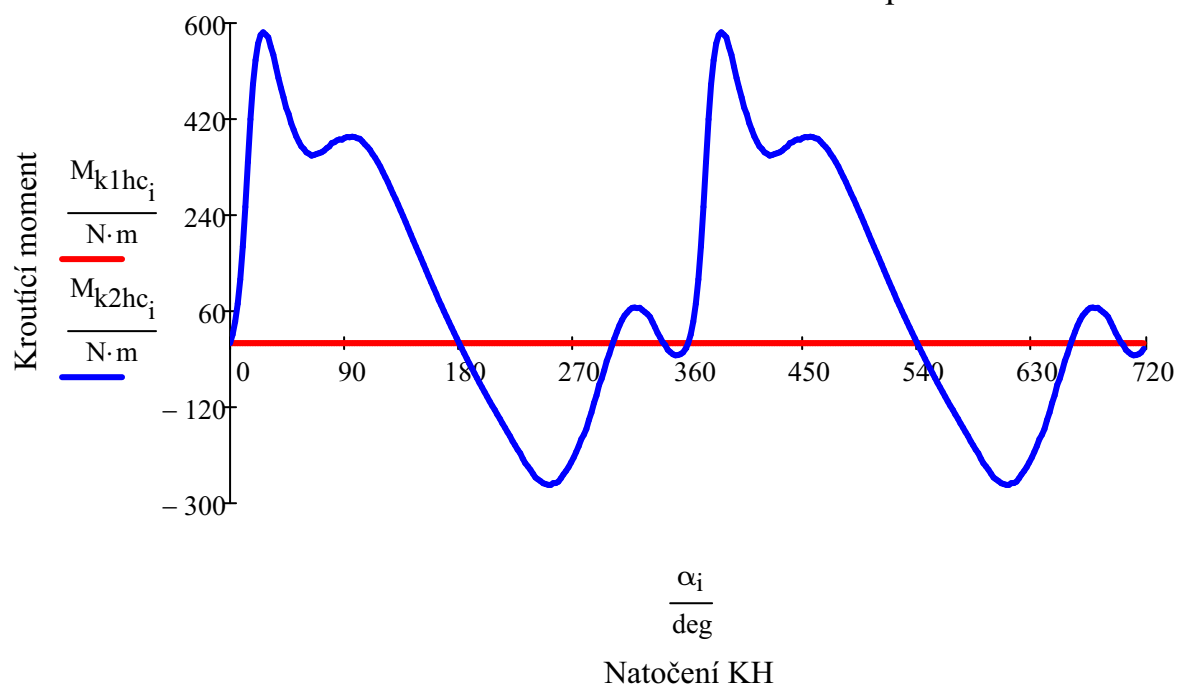
$$\max(M_{k2hc}) = 582.678\cdot\text{N}\cdot\text{m}$$

$$\min(M_{k2hc}) = -265.724\cdot\text{N}\cdot\text{m}$$

Maximální rozsah momentů 2. hlavního čepu $M_{khcmax} = \max(M_{k2hc}) + |\min(M_{k2hc})|$

$$M_{khcmax} = 848.402\cdot\text{N}\cdot\text{m}$$

Kroučící moment na hlavních čepch



3 Torzní kmitání klikového mechanismu

Vlastní frekvence

Moment setrvačnosti předního konce KH

$$I_{pk} = 1.827 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

Moment setrvačnosti zadního konce KH

$$I_{zk} = 106.8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

Moment setrvačnosti ozubení

$$I_{oz} = 1.1173 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

Moment setrvačnosti střední části

$$I_{st} = 9.9618 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

Moment setrvačnosti 1. hlavního čepu KH

$$I_{1hc} = 1.7804 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

Moment setrvačnosti 2. hlavního čepu KH

$$I_{2hc} = 1.7295 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

Redukce momentů setrvačnosti

Redukovaný moment posuvných hmotností

$$I_{tranr} = \frac{1}{2} \cdot (m_p + m_{op}) \cdot \left(1 + \frac{\lambda^2}{4}\right) \cdot r^2$$

$$I_{tranr} = 4.866 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

Redukovaný moment setrvačnosti předního konce KH

$$I_1 = I_{pk} + \frac{I_{1hc}}{2}$$

$$I_1 = 1.916 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

Redukovaný moment zalomení

$$I_2 = \frac{I_{st} + I_{1hc}}{2} + I_{tranr}$$

$$I_2 = 5.556 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

$$I_3 = \frac{I_{st} + I_{2hc}}{2} + I_{tranr}$$

$$I_3 = 5.554 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

Redukovaný moment setrvačnosti zadního konce KH

$$I_4 = I_{zk} + \frac{I_{2hc}}{2} + I_{oz}$$

$$I_4 = 0.108 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

Redukované délky

Redukce na průměr hlavního klikového čepu D_{hc}

Délka předního konce KH

$$l_{pk} = 55 \text{ mm}$$

Průměr předního konce KH

$$D_{pk} = 25 \text{ mm}$$

Průměr díry předního konce KH

$$d_{pk} = 14.5 \text{ mm}$$

Průměr hlavního čepu

$$D_{hc} = 50 \text{ mm}$$

Otvor v hlavním čepu

$$d_{hc} = 10 \text{ mm}$$

Délka 1. hlavního čepu		$l_{hc1} = 27\text{mm}$
Délka 2. hlavního čepu		$l_{hc2} = 33\text{mm}$
Průměr ojnicního čepu		$D_{oc} = 42\text{mm}$
Průměr otvoru v ojnicím čepu		$d_{oc} = 16\text{mm}$
Délka ojnicního čepu		$l_{ojc} = 20.8\text{mm}$
Délka spojovacího ramene		$l_{sr} = 20\text{mm}$
Délka ramene		$l_r = 17\text{mm}$
Poissonovo číslo		$\mu = 0.3$
Modul pružnosti v tahu		$E = 2.05 \cdot 10^5 \text{MPa}$
Modul pružnosti ve smyku	$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)}$	$G = 7.885 \times 10^4 \cdot \text{MPa}$
Redukovaná délka předního konce KH	$l_{rpk} = l_{pk} \cdot \frac{D_{hc}^4}{D_{hc}^4 - d_{hc}^4}$	$l_{rpk} = 55.088 \cdot \text{mm}$
Redukovaná délka 1. hlavního čepu	$l_{r1hc} = l_{hc1} \cdot \frac{D_{hc}^4}{D_{hc}^4 - d_{hc}^4}$	$l_{r1hc} = 27.043 \cdot \text{mm}$
Redukovaná délka 2. hlavního čepu	$l_{r2hc} = l_{hc2} \cdot \frac{D_{hc}^4}{D_{hc}^4 - d_{hc}^4}$	$l_{r2hc} = 33.053 \cdot \text{mm}$
Redukovaná délka ojnicního čepu	$l_{roc} = l_{ojc} \cdot \frac{D_{hc}^4}{D_{oc}^4 - d_{oc}^4}$	$l_{roc} = 42.677 \cdot \text{mm}$
Redukovaná délka ramene kliky	$l_{rr} = \frac{3}{8} \cdot \pi \cdot \frac{G}{E} \cdot r \cdot \frac{D_{hc}^4}{\left(\frac{D_{hc} + D_{oc}}{2}\right)^3 \cdot l_r}$	$l_{rr} = 74.363 \cdot \text{mm}$
Největší šířka spojovacího ramene		$b_{sr} = 54\text{mm}$

Redukovaná délka spojovacího ramene kliky

$$l_{rsr} = \frac{3}{8} \cdot \pi \cdot \frac{G}{E} \cdot r \cdot \frac{D_{hc}^4}{\left(\frac{D_{oc} + D_{oc} + b_{sr}}{3}\right)^3} \cdot l_{sr}$$

$$l_{rsr} = 63.208 \cdot \text{mm}$$

Redukované délky podle Geigera

$$l_1 = \frac{D_{hc} + D_{oc}}{2}$$

$$l_1 = 46 \cdot \text{mm}$$

$$l = 0.4$$

Redukovaná délka ojnicního čepu, ramene kliky a poloviny ojnicního čepu

$$l_{r1Gr} = \frac{(l_{ojc} + 0.4l_r) \cdot \frac{D_{hc}^4}{D_{oc}^4 - d_{oc}^4}}{2} + (l_{hc1} + 0.4l_r) \cdot \frac{D_{hc}^4}{D_{hc}^4 - d_{hc}^4}$$

$$l_{r2Gr} = 2.36 \cdot \frac{G}{E} \cdot (r - l \cdot D_{hc}) \cdot \frac{D_{hc}^4}{\left(\frac{D_{hc} + D_{oc}}{2}\right)^3} \cdot l_r$$

$$l_{rGr} = l_{r1Gr} + l_{r2Gr} \quad l_{rGr} = 142.565 \cdot \text{mm}$$

Redukovaná délka středního ramene a ojnicního čepu

$$l_{rGsc} = (l_{ojc} + 0.4l_r) \cdot \frac{D_{hc}^4}{D_{oc}^4 - d_{oc}^4} + 2.36 \cdot \frac{G}{E} \cdot (r - l \cdot D_{hc}) \cdot \frac{D_{hc}^4}{\left(\frac{D_{oc} + D_{oc} + b_{sr}}{3}\right)^3} \cdot l_{sr}$$

$$l_{rGsc} = 124.966 \cdot \text{mm}$$

Redukovaná délka poloviny ojnicního čepu, ramene kliky a druhého hlavního čepu

$$l_{r1Gr2} = \frac{(l_{ojc} + 0.4l_r) \cdot \frac{D_{hc}^4}{D_{oc}^4 - d_{oc}^4}}{2} + (l_{hc2} + 0.4l_r) \cdot \frac{D_{hc}^4}{D_{hc}^4 - d_{hc}^4}$$

$$l_{r2Gr2} = 2.36 \cdot \frac{G}{E} \cdot (r - \nu \cdot D_{hc}) \cdot \frac{D_{hc}^4}{\left(\frac{D_{hc} + D_{oc}}{2}\right)^3} \cdot l_r$$

$$l_{rGr2} = l_{r1Gr2} + l_{r2Gr2} \quad l_{rGr2} = 148.575 \cdot \text{mm}$$

$$l_{rGpc} = l_{rpk} + l_{rGr} \quad l_{rGpc} = 197.654 \cdot \text{mm}$$

Torzni tuhosti

Polární moment setrvačnosti redukovaného hřídele

$$I_p = \frac{\pi \cdot D_{hc}^4}{32} \quad I_p = 6.136 \times 10^{-7} \text{ m}^4$$

Torzni tuhost předního konce KH

$$c_1 = \frac{G \cdot I_p}{l_{rGpc}} \quad c_1 = 2.448 \times 10^5 \cdot \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$$

Torzni tuhost ramen

$$c_2 = \frac{G \cdot I_p}{l_{rGsc}} \quad c_2 = 3.871 \times 10^5 \cdot \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$$

Torzni tuhost konce KH

$$c_3 = \frac{G \cdot I_p}{l_{rGr2}} \quad c_3 = 3.256 \times 10^5 \cdot \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$$

Matice momentů setrvačnosti

$$M_m = \begin{pmatrix} I_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_4 \end{pmatrix}$$

Matice tuhostí

$$C_c = \begin{pmatrix} c_1 & -c_1 & 0 & 0 \\ -c_1 & c_1 + c_2 & -c_2 & 0 \\ 0 & -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 \\ 0 & 0 & -c_3 & c_3 \end{pmatrix}$$

Čtvercová matice

$$A_t = M_m^{-1} \cdot C_c$$

Vlastní čísla

$$\chi = \text{eigenvals}(A_t)$$

$$\chi = \begin{pmatrix} 2.237 \times 10^8 \\ 1.288 \times 10^8 \\ 2.029 \times 10^7 \\ -4.076 \times 10^{-10} \end{pmatrix} \frac{1}{s^2}$$

Vektor vlastních úhlových rychlostí

$$\Omega_0 = \sqrt{\chi}$$

$$\Omega_0 = \begin{pmatrix} 1.496 \times 10^4 \\ 1.135 \times 10^4 \\ 4.505 \times 10^3 \\ 2.019i \times 10^{-5} \end{pmatrix} \frac{\text{rad}}{s}$$

Modální matice

$$W_m = \text{eigenvecs}(A_t)$$

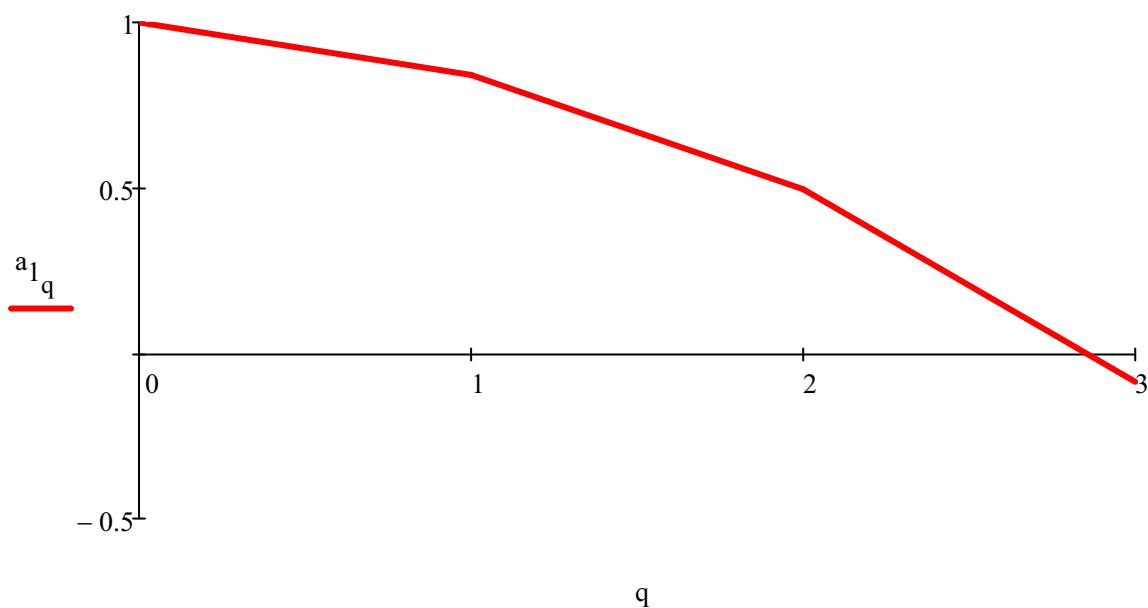
$$W_m^T = \begin{pmatrix} 0.731 & -0.549 & 0.405 & -5.529 \times 10^{-3} \\ 0.846 & -7.067 \times 10^{-3} & -0.533 & 0.013 \\ -0.714 & -0.601 & -0.354 & 0.062 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{pmatrix}$$

$$q = 0..3$$

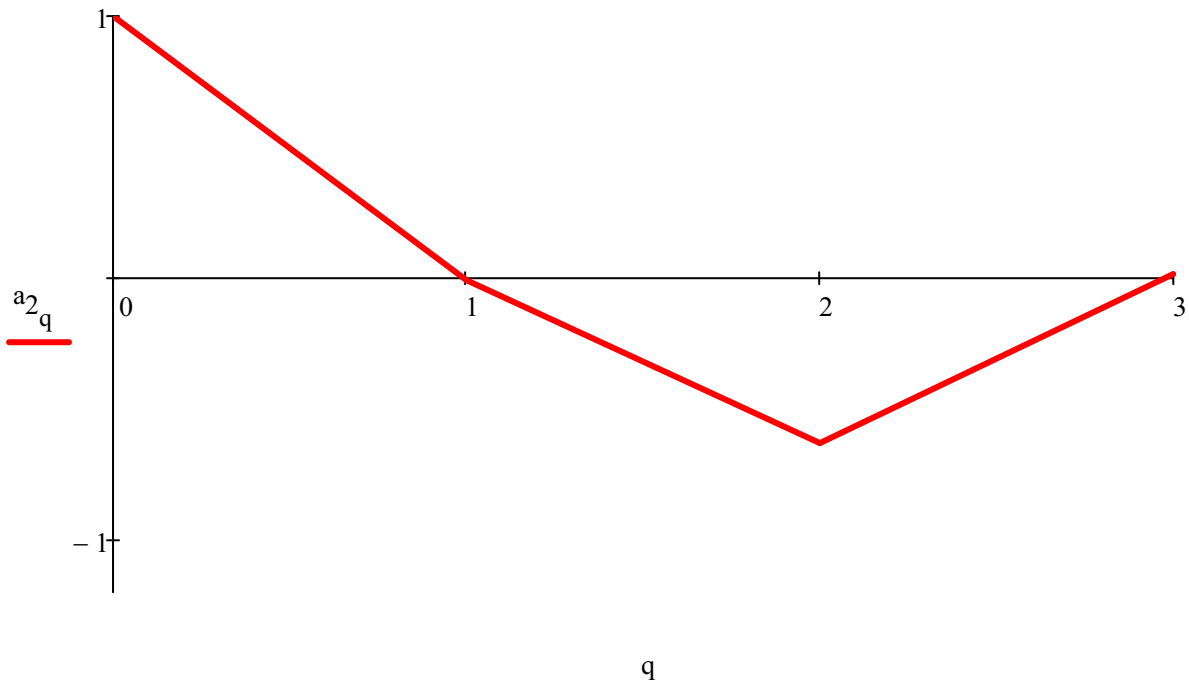
První tvar vlastních torzních výchylek

$$a_{1q} = \frac{W_{m,q,2}}{W_{m,0,2}}$$

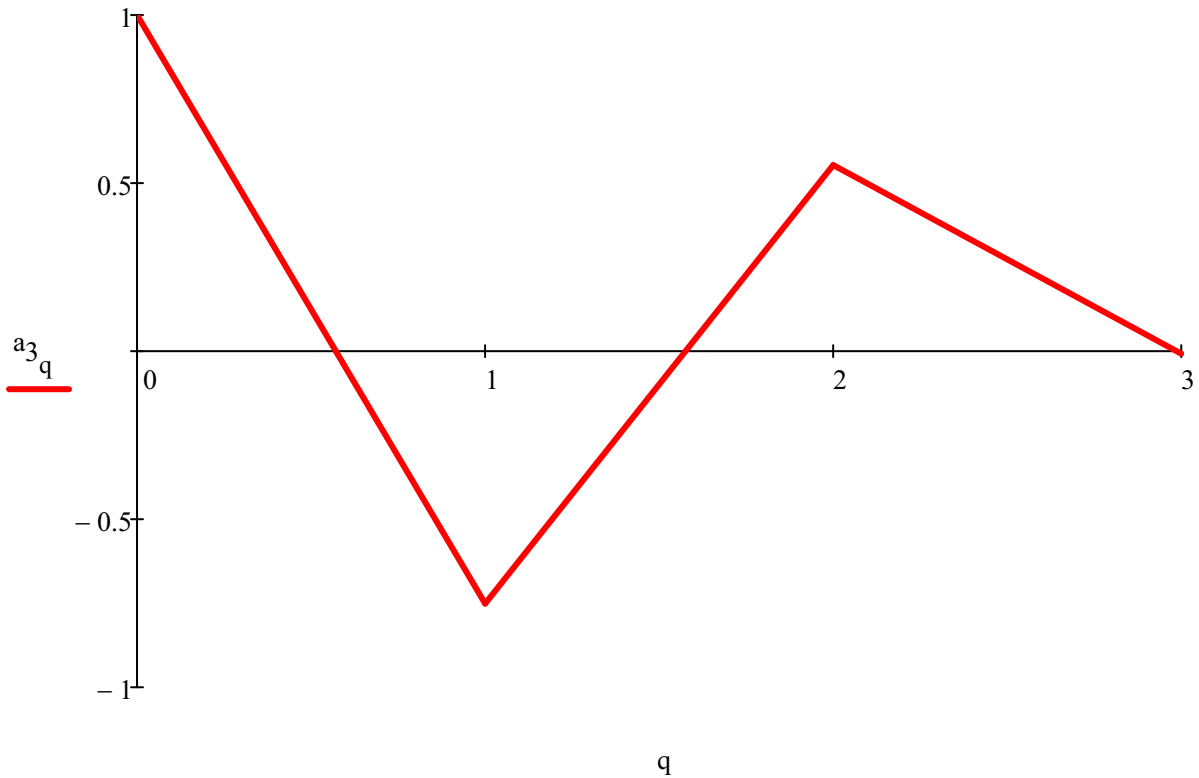
$$a_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0.841 \\ 0.496 \\ -0.087 \end{pmatrix}$$



Druhý tvar vlastních torzních výchylek $a_{2_q} = \frac{W_{m_{q,1}}}{W_{m_{0,1}}}$ $a_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ -8.355 \times 10^{-3} \\ -0.63 \\ 0.015 \end{pmatrix}$



Třetí tvar vlastních torzních výchylek $a_{3_q} = \frac{W_{m_{q,0}}}{W_{m_{0,0}}}$ $a_3 = \begin{pmatrix} 1 \\ -0.751 \\ 0.554 \\ -7.563 \times 10^{-3} \end{pmatrix}$



Vlastní frekvence

První vlastní úhlová rychlost

$$\Omega_{0_2} = 4.505 \times 10^3 \cdot \text{sec}^{-1}$$

První vlastní frekvence

$$N_1 = \frac{\Omega_{0_2}}{2 \cdot \pi}$$

$$N_1 = 716.942 \cdot \text{Hz}$$

Doba jednoho kmitu

$$T_1 = \frac{2 \cdot \pi}{\Omega_{0_2}}$$

$$T_1 = 1.395 \times 10^{-3} \text{ s}$$

Druhá vlastní úhlová rychlost

$$\Omega_{0_1} = 1.135 \times 10^4 \cdot \text{sec}^{-1}$$

Druhá vlastní frekvence

$$N_2 = \frac{\Omega_{0_1}}{2 \cdot \pi}$$

$$N_2 = 1806.362 \cdot \text{Hz}$$

Doba jednoho kmitu

$$T_2 = \frac{2 \cdot \pi}{\Omega_{0_1}}$$

$$T_2 = 5.536 \times 10^{-4} \text{ s}$$

Třetí vlastní úhlová rychlost

$$\Omega_{0_0} = 1.496 \times 10^4 \cdot \text{sec}^{-1}$$

Třetí vlastní frekvence

$$N_3 = \frac{\Omega_{0_0}}{2 \cdot \pi}$$

$$N_3 = 2380.494 \cdot \text{Hz}$$

Doba jednoho kmitu

$$T_3 = \frac{2 \cdot \pi}{\Omega_{0_0}}$$

$$T_3 = 4.201 \times 10^{-4} \text{ s}$$

Vynucené torzní kmitání

Fourierova analýza točivého momentu v komplexním oboru

Počet harmonických složek

$$n_k = 40$$

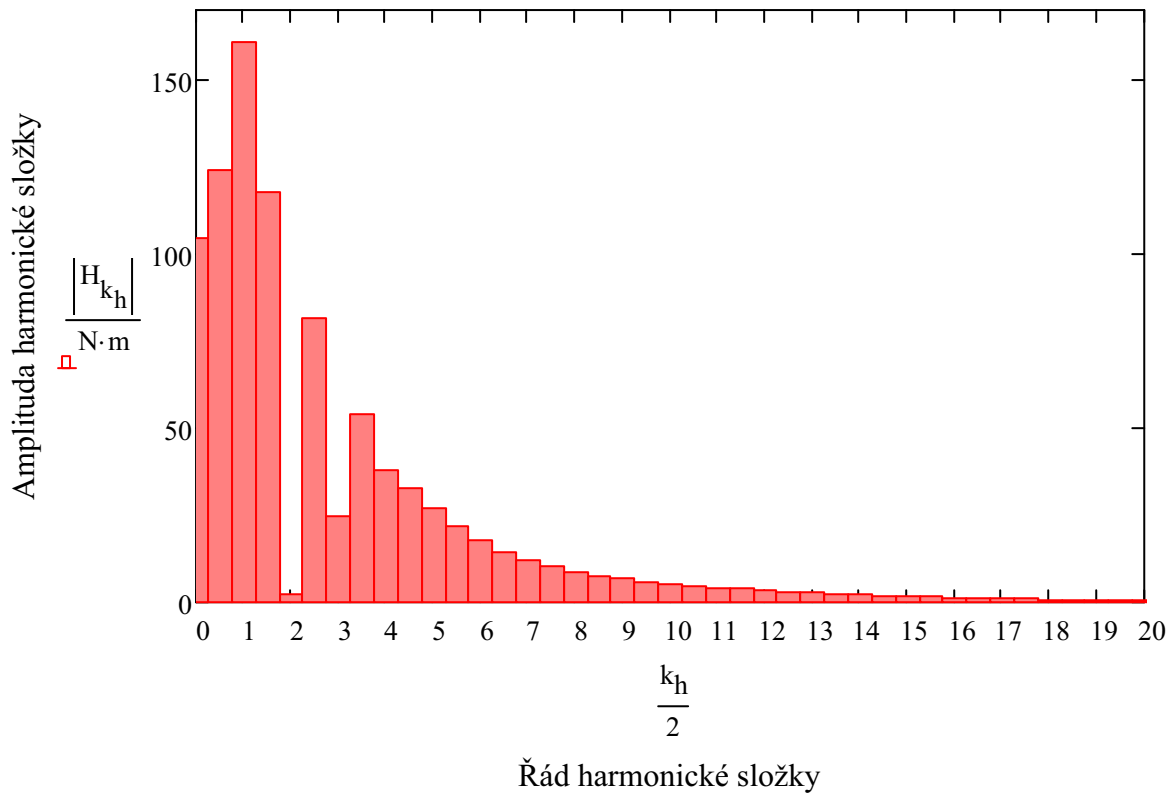
$$k_h = 0..n_k$$

$$n_p = 360$$

$$H_{k_h} = \frac{2}{n_p} \cdot \sum_{i=0}^{n_p-1} \left[M_{k_i} \cdot e^{j \cdot \left(2 \cdot \pi \cdot k_h \cdot \frac{i}{n_p} \right)} \right]$$

$\frac{k_h}{2} =$	0	$\frac{\text{Re}(H_{k_h})}{\text{N}\cdot\text{m}} =$	$\frac{\text{Im}(H_{k_h})}{\text{N}\cdot\text{m}} =$	$\frac{ H_{k_h} }{\text{N}\cdot\text{m}} =$
		0	0	104.302
1	0.5	-103.645	-68.611	124.297
2	1	56.054	150.618	160.71
3	1.5	-12.038	-117.154	117.771
4	2	-2.373	-0.056	2.373
5	2.5	16.969	-80.025	81.804
6	3	-18.762	15.631	24.42
7	3.5	24.379	-47.895	53.742
8	4	-23.256	30.259	38.164
9	4.5	21.529	-24.618	32.704
10	5	-20.292	18.063	27.166
11	5.5	18.391	-11.375	21.624
12	6	-16.881	6.319	18.025
13	6.5	13.935	-3.15	14.286
14	7	-11.973	0.971	12.012
15	7.5	10.481	0.873	10.518
16	8	-8.237	-2.487	8.605
17	8.5	7.147	2.924	7.722
18	9	-5.931	-3.902	7.099
19	9.5	4.37	4.126	6.01
20	10	-3.652	-3.758	5.24
21	10.5	2.621	4.03	4.808
22	11	-1.946	-3.634	4.122
23	11.5	1.261	3.654	3.866
24	12	-0.726	-3.408	3.485
25	12.5	0.251	3.125	3.135
26

Absolutní hodnoty Fourierovy analýzy točivého momentu



Rezonanční otáčky motoru

$$\kappa = 0.5, 1..20$$

Rezonanční otáčky pro
1. vlastní frekvenci

$$n_{\text{rez1}}(\kappa) = \frac{N_1}{\kappa}$$

Rezonanční otáčky pro
2. vlastní frekvenci

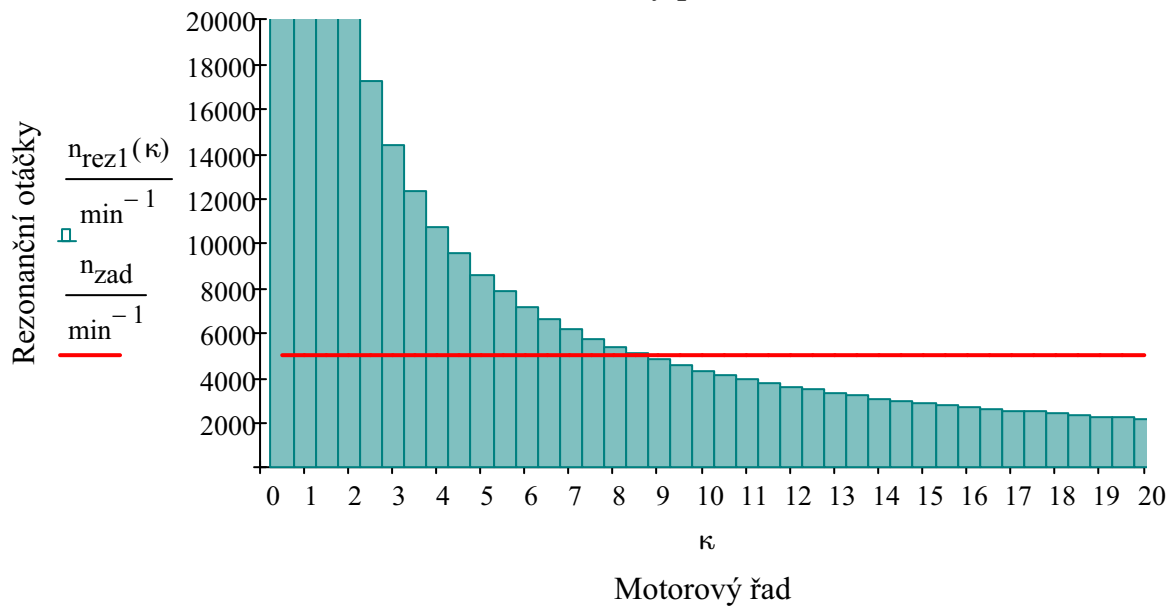
$$n_{\text{rez2}}(\kappa) = \frac{N_2}{\kappa}$$

Rezonanční otáčky pro
3. vlastní frekvenci

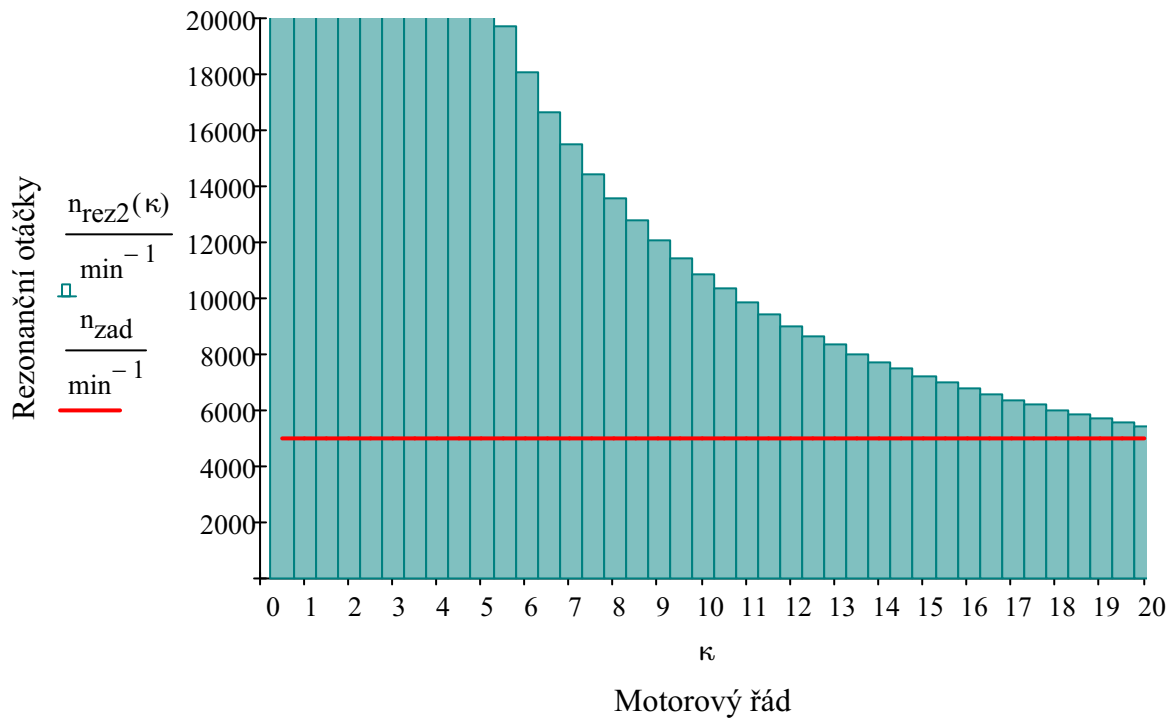
$$n_{\text{rez3}}(\kappa) = \frac{N_3}{\kappa}$$

$\kappa =$	$\frac{n_{rez1}(\kappa)}{\min^{-1}} =$	$\frac{n_{rez2}(\kappa)}{\min^{-1}} =$	$\frac{n_{rez3}(\kappa)}{\min^{-1}} =$
0.5	86033.082	216763.405	285659.256
1	43016.541	108381.702	142829.628
1.5	28677.694	72254.468	95219.752
2	21508.27	54190.851	71414.814
2.5	17206.616	43352.681	57131.851
3	14338.847	36127.234	47609.876
3.5	12290.44	30966.201	40808.465
4	10754.135	27095.426	35707.407
4.5	9559.231	24084.823	31739.917
5	8603.308	21676.34	28565.926
5.5	7821.189	19705.764	25969.023
6	7169.423	18063.617	23804.938
6.5	6617.929	16674.108	21973.789
7	6145.22	15483.1	20404.233
7.5	5735.539	14450.894	19043.95
8	5377.068	13547.713	17853.703
8.5	5060.77	12750.789	16803.486
9	4779.616	12042.411	15869.959
9.5	4528.057	11408.6	15034.698
10	4301.654	10838.17	14282.963
10.5	4096.813	10322.067	13602.822
11	3910.595	9852.882	12984.512
11.5	3740.569	9424.496	12419.968
12	3584.712	9031.809	11902.469
12.5	3441.323	8670.536	11426.37
13	3308.965	8337.054	10986.894
13.5	3186.41	8028.274	10579.972
14	3072.61	7741.55	10202.116
14.5	2966.658	7474.6	9850.319
15	2867.769	7225.447	9521.975
15.5	2775.261	6992.368	9214.815
16	2688.534	6773.856	8926.852
16.5	2607.063	6568.588	8656.341
17	2530.385	6375.394	8401.743
17.5	2458.088	6193.24	8161.693
18	2389.808	6021.206	7934.979
18.5	2325.218	5858.47	7720.52
19	2264.028	5704.3	7517.349
19.5	2205.976	5558.036	7324.596
20	2150.827	5419.085	7141.481

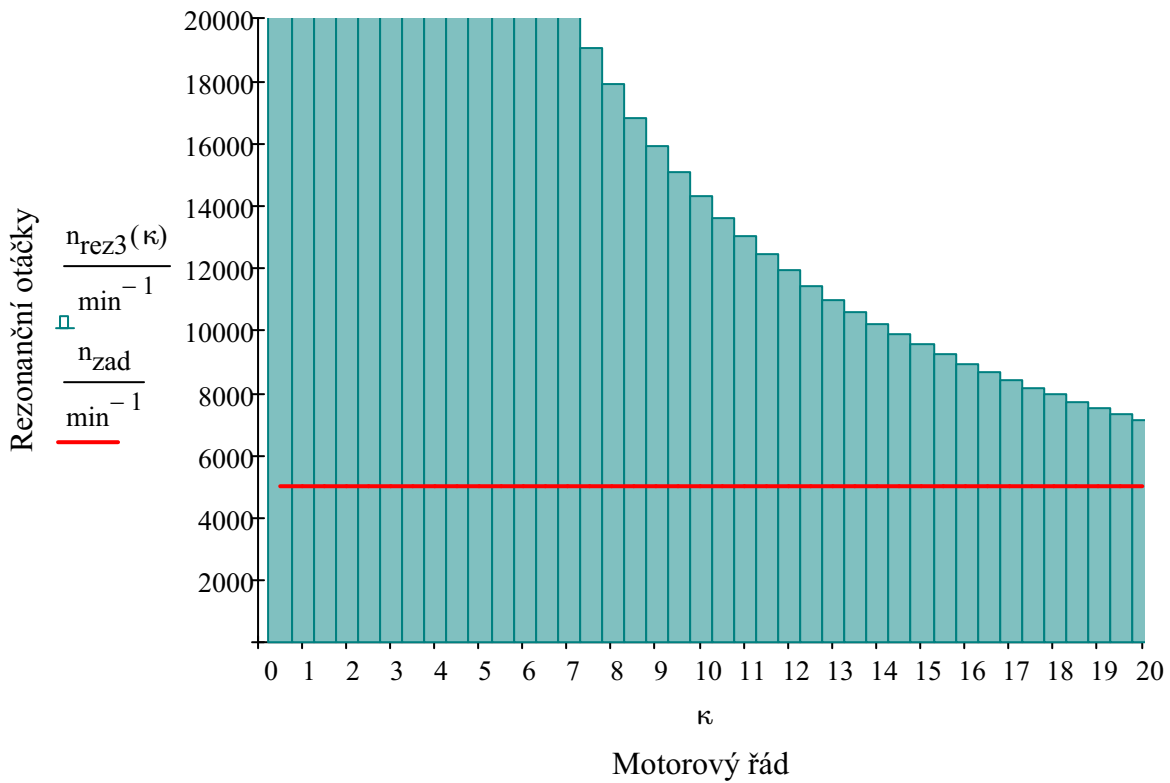
Rezonanční otáčky první vlastní frekvence



Rezonanční otáčky druhé vlastní frekvence



Rezonanční otáčky třetí vlastní frekvence



Vydatnost rezonancí

Počet válců

$$v = 1..2$$

v =

1
2

Rozestupy zážehů

$$\nu = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 360 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

Vydatnost rezonance pro první vlastní frekvenci $\kappa_{k_h} = 0.5 \cdot k_h$

Vydatnost rezonance pro řády 0.5 až 19.5

$$\epsilon_1 = \sqrt{\left[\sum_{v=1}^2 \left(a_{1v} \cdot \sin(\kappa_1 \cdot \nu_v) \right) \right]^2 + \left[\sum_{v=1}^2 \left(a_{1v} \cdot \cos(\kappa_1 \cdot \nu_v) \right) \right]^2}$$

$$\epsilon_1 = 0.345$$

Vydatnost rezonance pro řády 1 až 20

$$\epsilon_2 = \sqrt{\left[\sum_{v=1}^2 \left(a_{1v} \cdot \sin(\kappa_2 \cdot \nu_v) \right) \right]^2 + \left[\sum_{v=1}^2 \left(a_{1v} \cdot \cos(\kappa_2 \cdot \nu_v) \right) \right]^2}$$

$$\epsilon_2 = 1.337$$

Vydatnost rezonance pro 2. vlastní frekvenci

Vydatnost rezonance pro řády 0.5 až 19.5

$$\varepsilon'_1 = \sqrt{\left[\sum_{v=1}^2 \left(a_{2v} \cdot \sin(\kappa_1 \cdot \nu_v) \right) \right]^2 + \left[\sum_{v=1}^2 \left(a_{2v} \cdot \cos(\kappa_1 \cdot \nu_v) \right) \right]^2}$$

$\varepsilon'_1 = 0.622$

Vydatnost rezonance pro řády 1 až 20

$$\varepsilon'_2 = \sqrt{\left[\sum_{v=1}^2 \left(a_{2v} \cdot \sin(\kappa_2 \cdot \nu_v) \right) \right]^2 + \left[\sum_{v=1}^2 \left(a_{2v} \cdot \cos(\kappa_2 \cdot \nu_v) \right) \right]^2}$$

$\varepsilon'_2 = 0.639$

Vydatnost rezonance pro 3. vlastní frekvenci

Vydatnost rezonance pro řády 0.5 až 19.5

$$\varepsilon''_1 = \sqrt{\left[\sum_{v=1}^2 \left(a_{3v} \cdot \sin(\kappa_1 \cdot \nu_v) \right) \right]^2 + \left[\sum_{v=1}^2 \left(a_{3v} \cdot \cos(\kappa_1 \cdot \nu_v) \right) \right]^2}$$

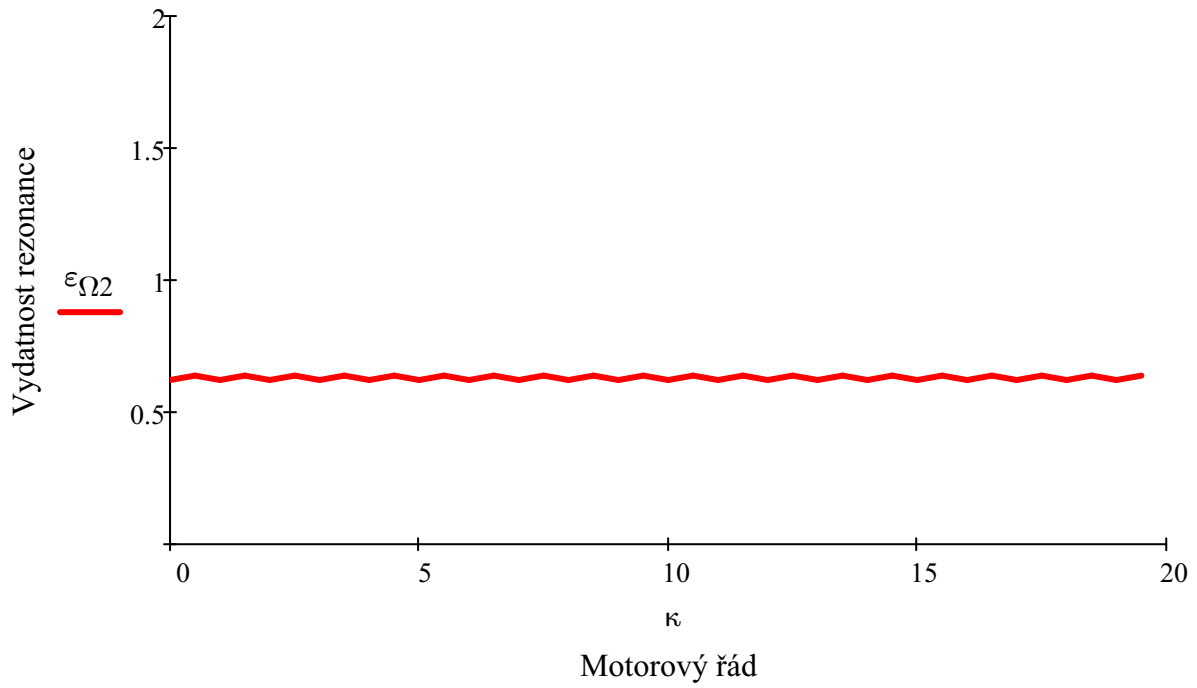
$\varepsilon''_1 = 1.305$

Vydatnost rezonance pro řády 1 až 20

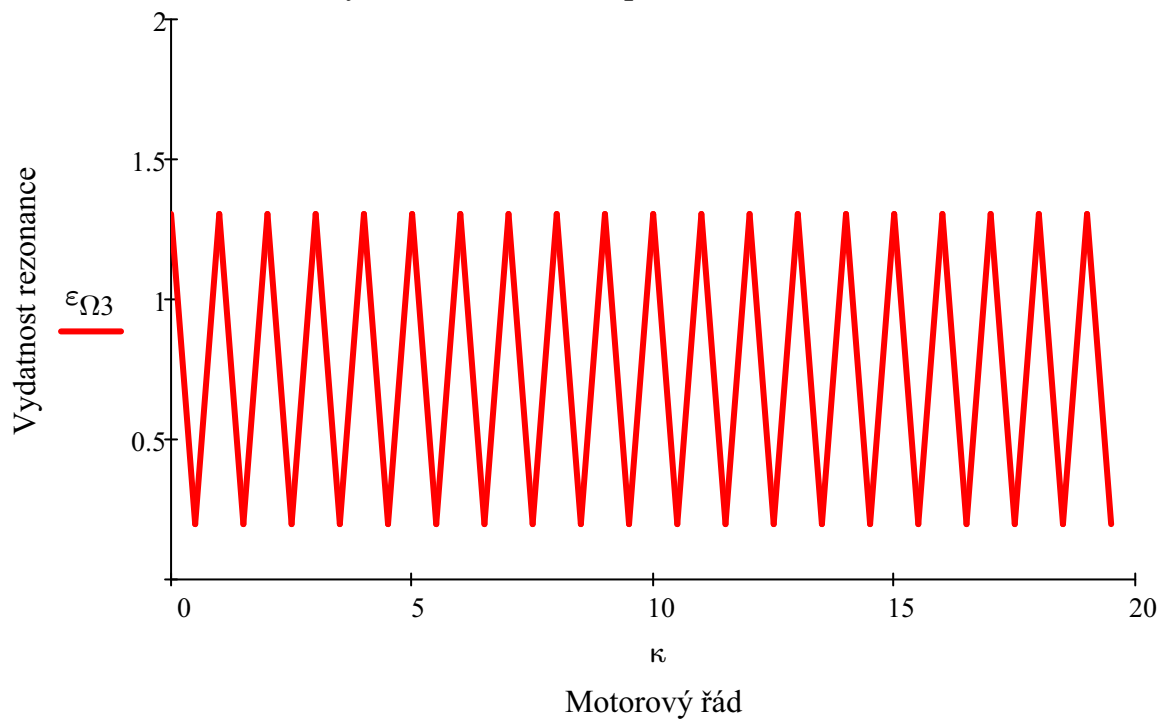
$$\varepsilon''_2 = \sqrt{\left[\sum_{v=1}^2 \left(a_{3v} \cdot \sin(\kappa_2 \cdot \nu_v) \right) \right]^2 + \left[\sum_{v=1}^2 \left(a_{3v} \cdot \cos(\kappa_2 \cdot \nu_v) \right) \right]^2}$$

$\varepsilon''_2 = 0.198$

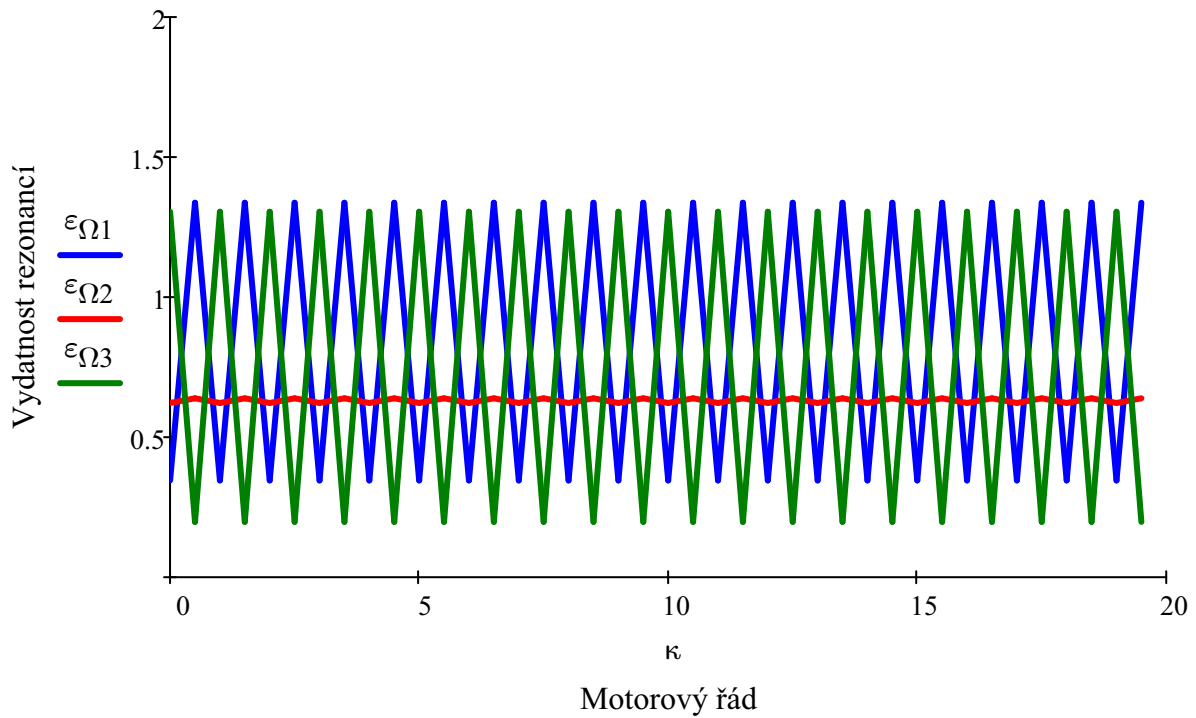
Vydatnost rezonancí pro druhou vlastní frekvenci



Vydatnost rezonancí pro třetí vlastní frekvenci



Vydatnost rezonancí



Výpočet torzních výchylek volného konce hřídele

$$j = 0..39$$

Velikost tlumících odporů

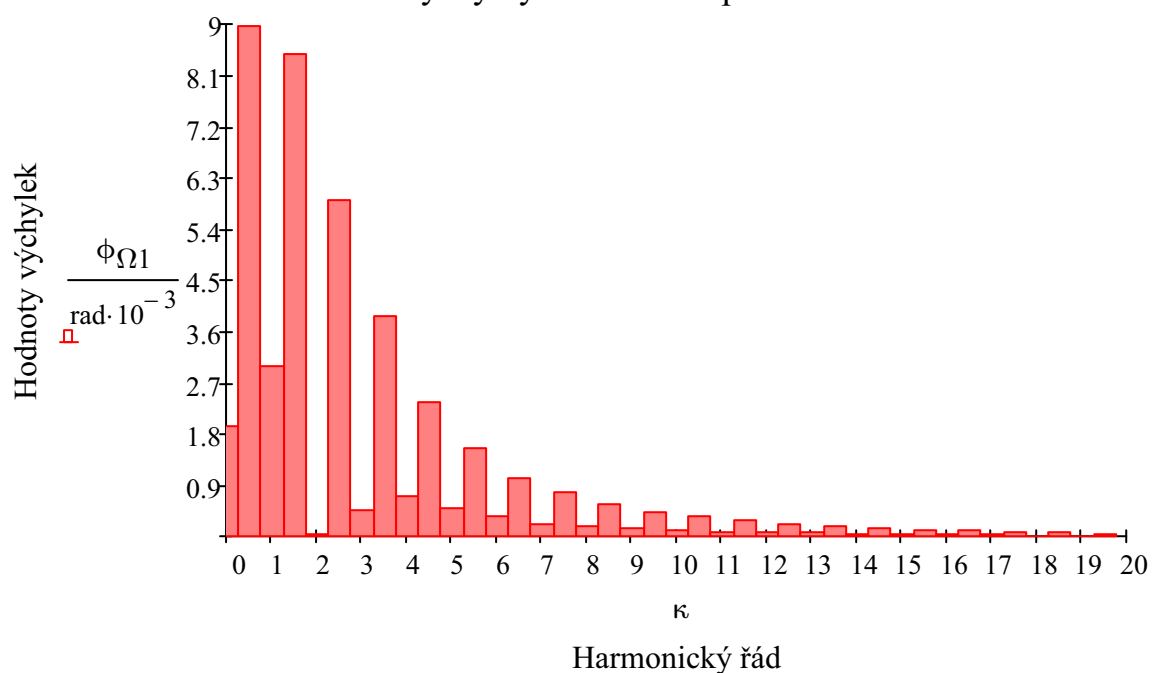
$$\xi = 2.1 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{sec} \cdot \text{rad}^{-1}$$

Amplituda rezonančního torzního kmitání

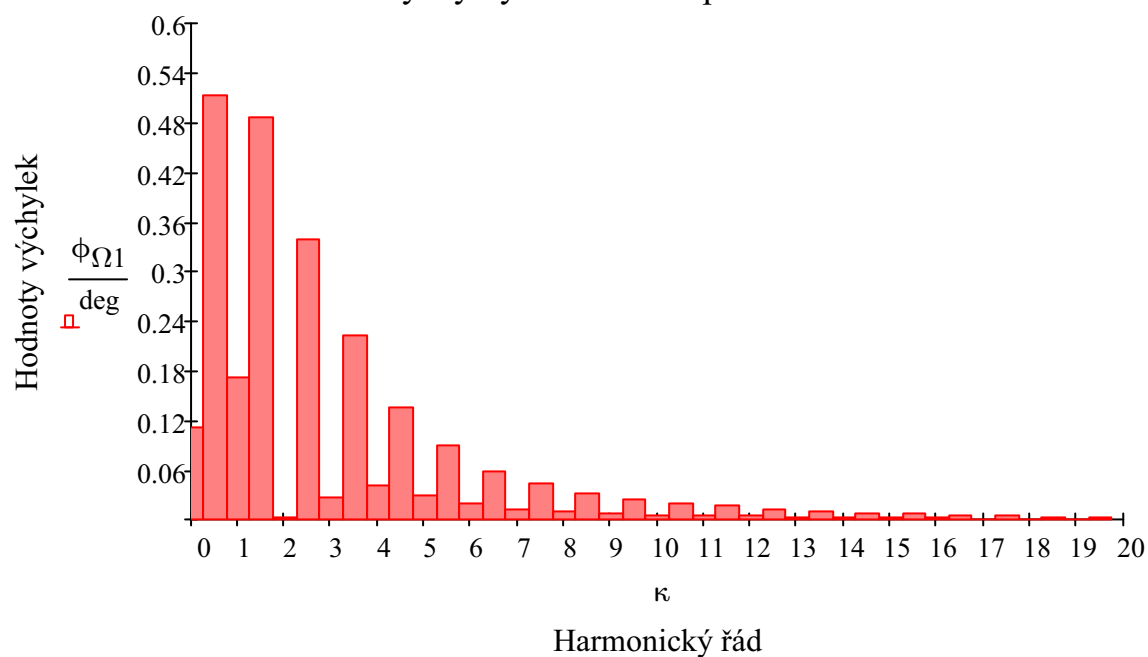
$$\phi_{\Omega 1_j} = \frac{|H_j| \cdot \varepsilon_{\Omega 1_j}}{\Omega_{0_2} \cdot \xi \cdot \left[\sum_q (a_{1_q})^2 \right]}$$

$\frac{j}{2} =$	$\frac{\phi_{\Omega 1_j}}{\text{rad} \cdot 10^{-3}} =$	$\frac{\phi_{\Omega 1_j}}{\text{deg}} =$
0	1.942	0.111
0.5	8.959	0.513
1	2.993	0.171
1.5	8.488	0.486
2	0.044	$2.532 \cdot 10^{-3}$
2.5	5.896	0.338
3	0.455	0.026
3.5	3.873	0.222
4	0.711	0.041
4.5	2.357	0.135
5	0.506	0.029
5.5	1.559	0.089
6	0.336	0.019
6.5	1.03	0.059
7	0.224	0.013
7.5	0.758	0.043
8	0.16	$9.181 \cdot 10^{-3}$
8.5	0.557	0.032
9	0.132	$7.574 \cdot 10^{-3}$
9.5	0.433	0.025
10	0.098	$5.591 \cdot 10^{-3}$
10.5	0.347	0.02
11	0.077	$4.398 \cdot 10^{-3}$
11.5	0.279	0.016
12	0.065	$3.718 \cdot 10^{-3}$
12.5	0.226	0.013
13	0.054	$3.07 \cdot 10^{-3}$
13.5	0.18	0.01
14	0.041	$2.324 \cdot 10^{-3}$
14.5	0.132	$7.566 \cdot 10^{-3}$
15	0.031	$1.772 \cdot 10^{-3}$
15.5	0.108	$6.181 \cdot 10^{-3}$
16	0.027	$1.527 \cdot 10^{-3}$
16.5	0.094	$5.396 \cdot 10^{-3}$
17	0.021	$1.197 \cdot 10^{-3}$
17.5	0.068	$3.885 \cdot 10^{-3}$
18	0.014	$8.233 \cdot 10^{-4}$
18.5	0.053	$3.049 \cdot 10^{-3}$
...

Torzní výchylky v rezonanci první vlastní frekvence



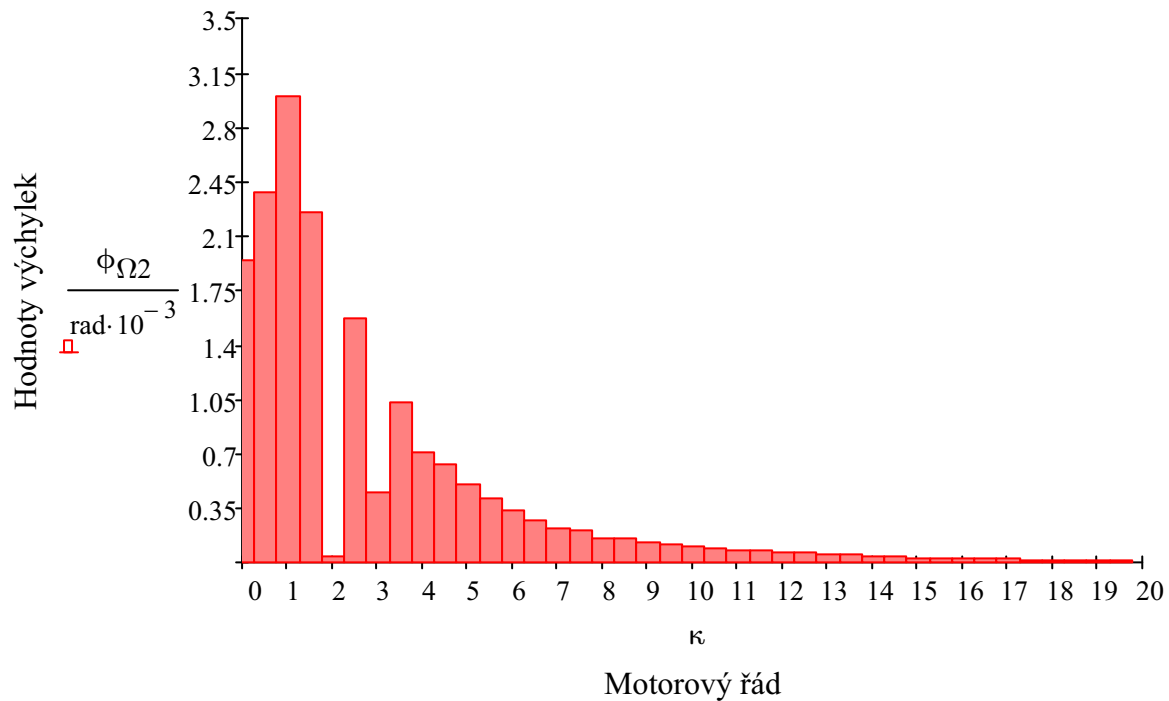
Torzní výchylky v rezonanci první vlastní frekvence



Amplituda rezonančního torzního kmitár $\phi_{\Omega 2j} = \frac{|H_j| \cdot \epsilon_{\Omega 2j}}{\Omega_{01} \cdot \xi \cdot \left[\sum_q (a_{2q})^2 \right]}$

$\frac{j}{2} =$	$\frac{\phi_{\Omega 2_j}}{\text{rad} \cdot 10^{-3}} =$	$\frac{\phi_{\Omega 2_j}}{\text{deg}} =$
0	1.948	0.112
0.5	2.383	0.137
1	3.001	0.172
1.5	2.258	0.129
2	0.044	$2.539 \cdot 10^{-3}$
2.5	1.569	0.09
3	0.456	0.026
3.5	1.03	0.059
...

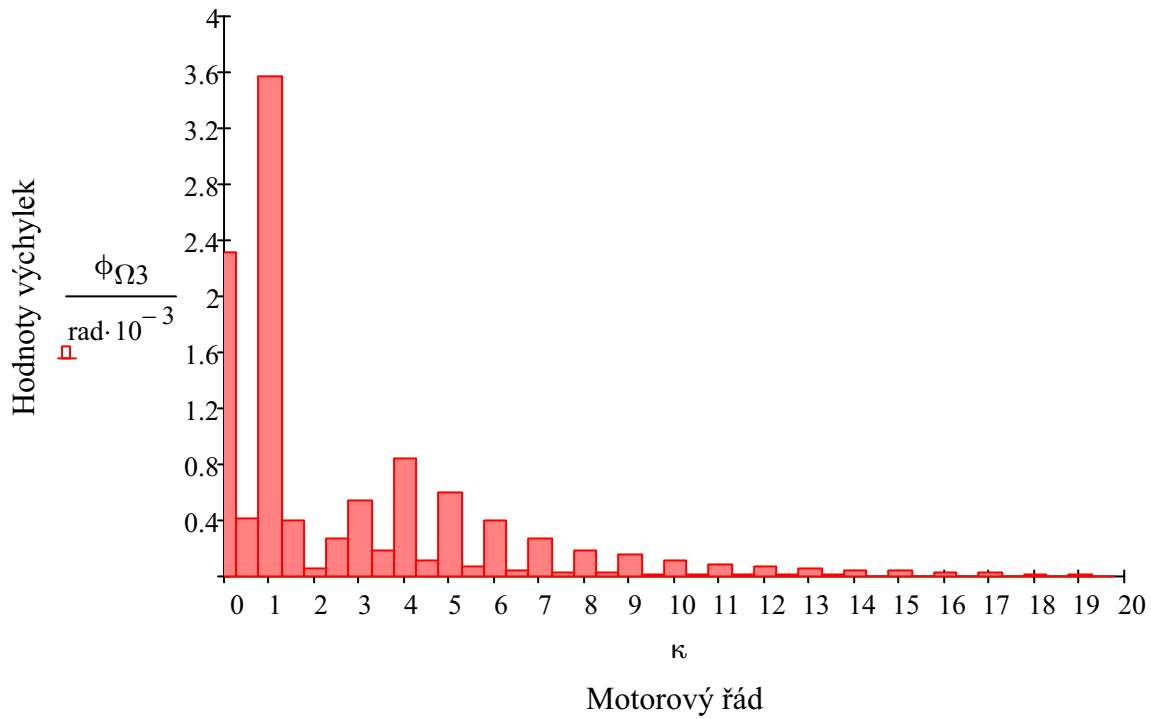
Torzní výchylky v rezonanci druhé vlastní frekvence



Amplituda rezonančního torzního kmitár $\phi_{\Omega 3_j} = \frac{|H_j| \cdot \varepsilon_{\Omega 3_j}}{\Omega_{0_0} \cdot \xi \cdot \left[\sum_q (a_{3_q})^2 \right]}$

$\frac{j}{2} =$	$\frac{\phi_{\Omega 3_j}}{\text{rad} \cdot 10^{-3}} =$	$\frac{\phi_{\Omega 3_j}}{\text{deg}} =$
0	2.316	0.133
0.5	0.418	0.024
1	3.569	0.204
1.5	0.396	0.023
2	0.053	$3.019 \cdot 10^{-3}$
2.5	0.275	0.016
3	0.542	0.031
3.5	0.181	0.01
...

Torzní výchylky v rezonanci třetí vlastní frekvence



Přídavné torzní napětí

Největší výchylka při provozních otáčkách

$$\phi_{\Omega 1_{14}} = 0.013 \cdot \text{deg}$$

$$M_{\text{torz}} = \phi_{\Omega 1_{14}} \cdot c_3$$

$$M_{\text{torz}} = 72.838 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

Torzní namáhání pomocí Syntézy

Tabulka dat z programu Syntéza

$$Q = \dots \backslash \text{TABULKA.dat}$$

Řádky

$$s = 1 \dots 181$$

$$s2 = 367 \dots 547$$

$$s4 = 733 \dots 913$$

$$s1 = 184 \dots 364$$

$$s3 = 550 \dots 730$$

$$s5 = 916 \dots 1096$$

$$s6 = 1099 \dots 1279$$

Otáčky

$$ot_s = Q_{s,1} \cdot \frac{1}{\text{min}}$$

$$ot_{s2} = Q_{s2,1} \cdot \frac{1}{\text{min}}$$

$$ot_{s4} = Q_{s4,1} \cdot \frac{1}{\text{min}}$$

$$ot_{s1} = Q_{s1,1} \cdot \frac{1}{\text{min}}$$

$$ot_{s3} = Q_{s3,1} \cdot \frac{1}{\text{min}}$$

$$ot_{s5} = Q_{s5,1} \cdot \frac{1}{\text{min}}$$

$$ot_{s6} = Q_{s6,1} \cdot \frac{1}{\text{min}}$$

Průběhy výchylek

Absolutní výchylky

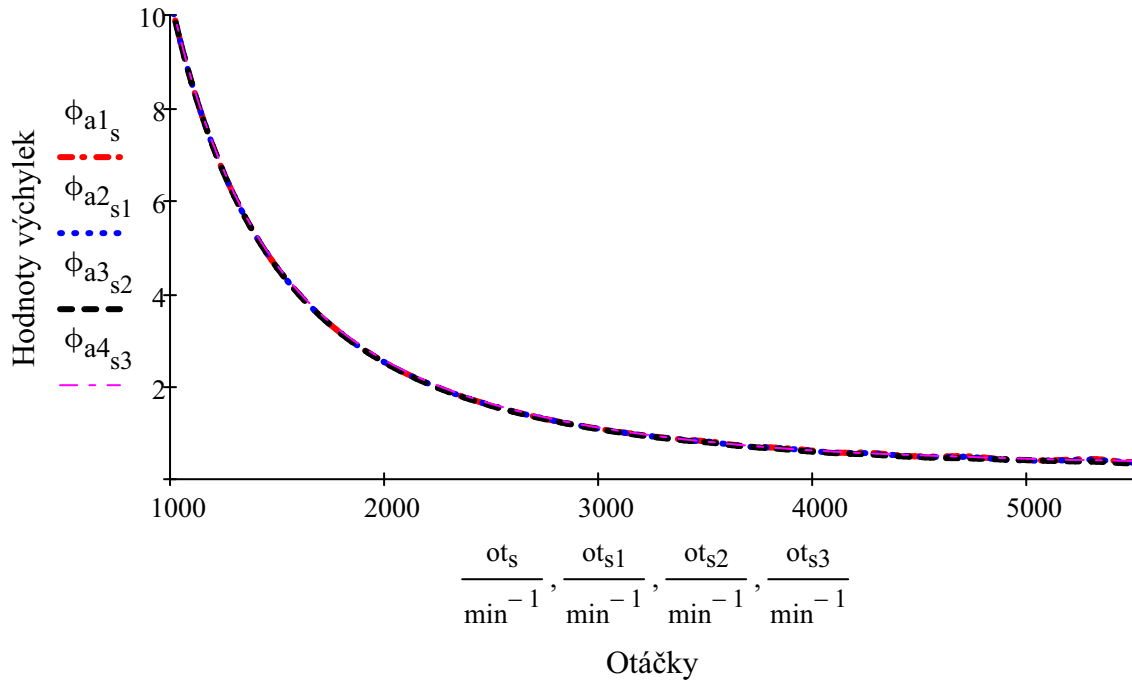
$$\phi_{a1_s} = Q_{s,2}$$

$$\phi_{a2_{s1}} = Q_{s1,2}$$

$$\phi_{a3_{s2}} = Q_{s2,2}$$

$$\phi_{a4_{s3}} = Q_{s3,2}$$

Průběhy absolutních výchylek



Průběhy výchylek v kladné oblasti

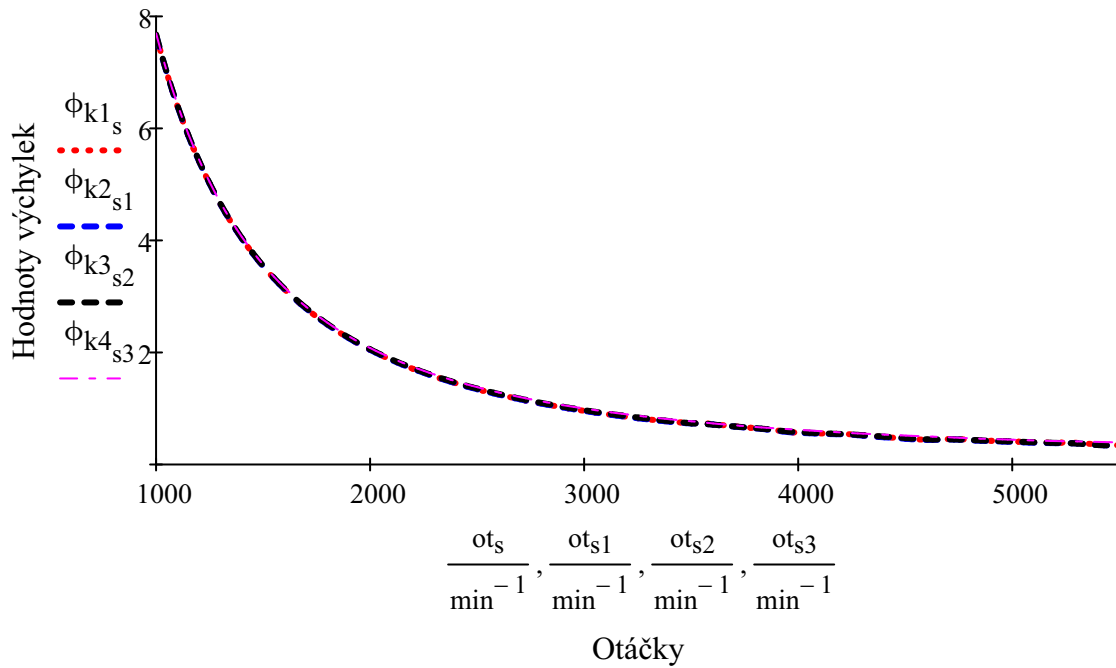
$$\phi_{k1_s} = Q_{s,3}$$

$$\phi_{k3_{s2}} = Q_{s2,3}$$

$$\phi_{k2_{s1}} = Q_{s1,3}$$

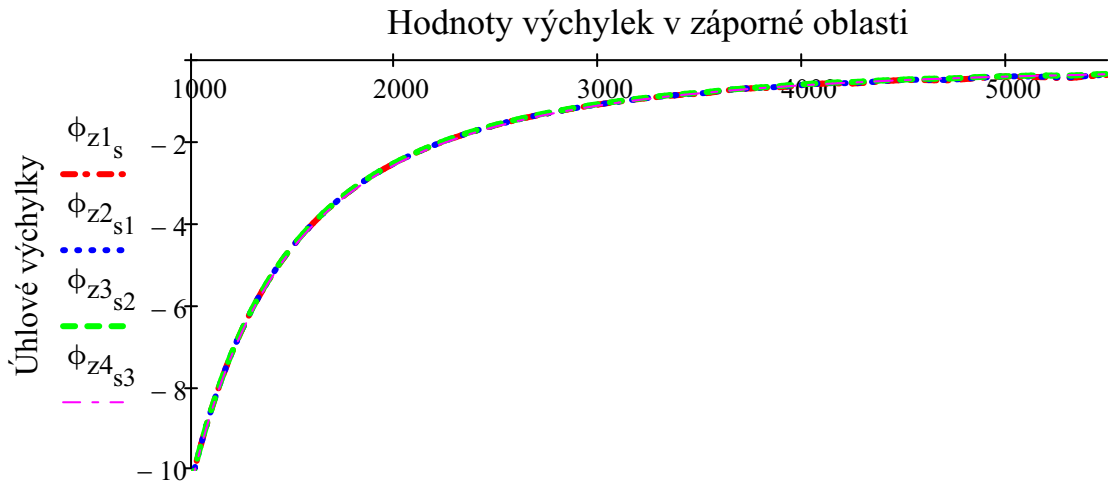
$$\phi_{k4_{s3}} = Q_{s3,3}$$

Průběh výchylek v kladné oblasti



Hodnoty výchylek v záporné oblasti

$$\begin{aligned} \phi_{z1_s} &= Q_{s,4} & \phi_{z3_{s2}} &= Q_{s2,4} \\ \phi_{z2_{s1}} &= Q_{s1,4} & \phi_{z4_{s3}} &= Q_{s3,4} \end{aligned}$$



$$\frac{\text{ot}_s}{\text{min}^{-1}}, \frac{\text{ot}_{s1}}{\text{min}^{-1}}, \frac{\text{ot}_{s2}}{\text{min}^{-1}}, \frac{\text{ot}_{s3}}{\text{min}^{-1}}$$

Otáčky

Torzní momenty

Torzní momenty pro první úsek redukovaného KH

Absolutní moment $M_{1ab_{s4}} = Q_{s4,2} \cdot N \cdot m$

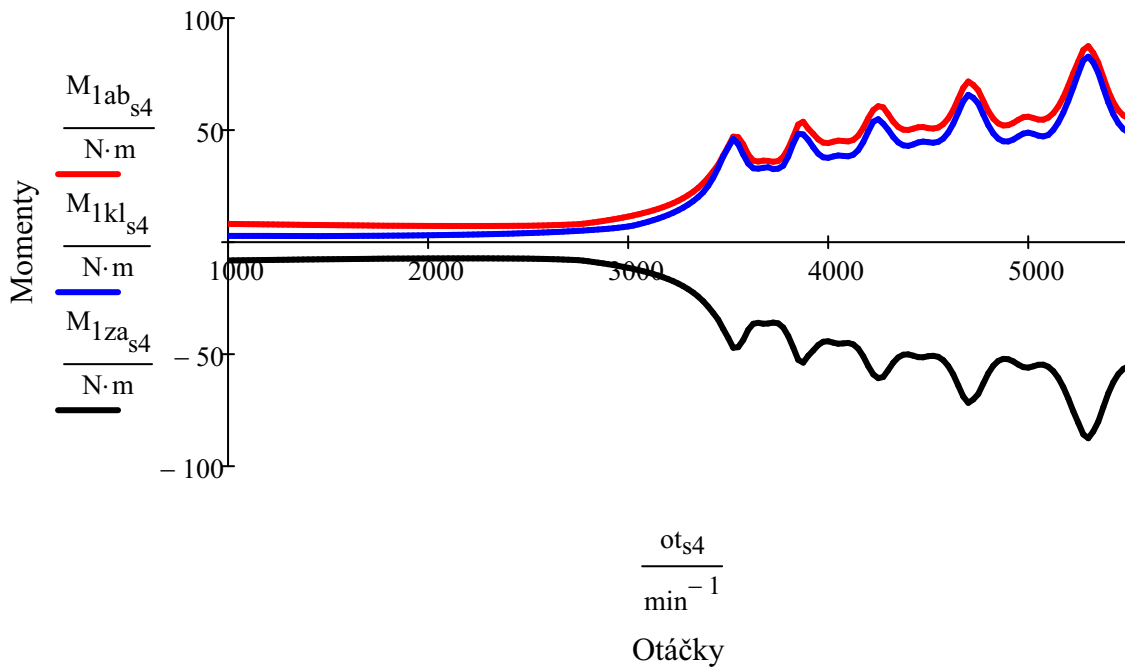
Kladný moment $M_{1kl_{s4}} = Q_{s4,3} \cdot N \cdot m$

Záporný moment $M_{1za_{s4}} = Q_{s4,4} \cdot N \cdot m$

$$\max(M_{1kl}) = 82.789 \cdot N \cdot m$$

$$\min(M_{1za}) = -87.5 \cdot N \cdot m$$

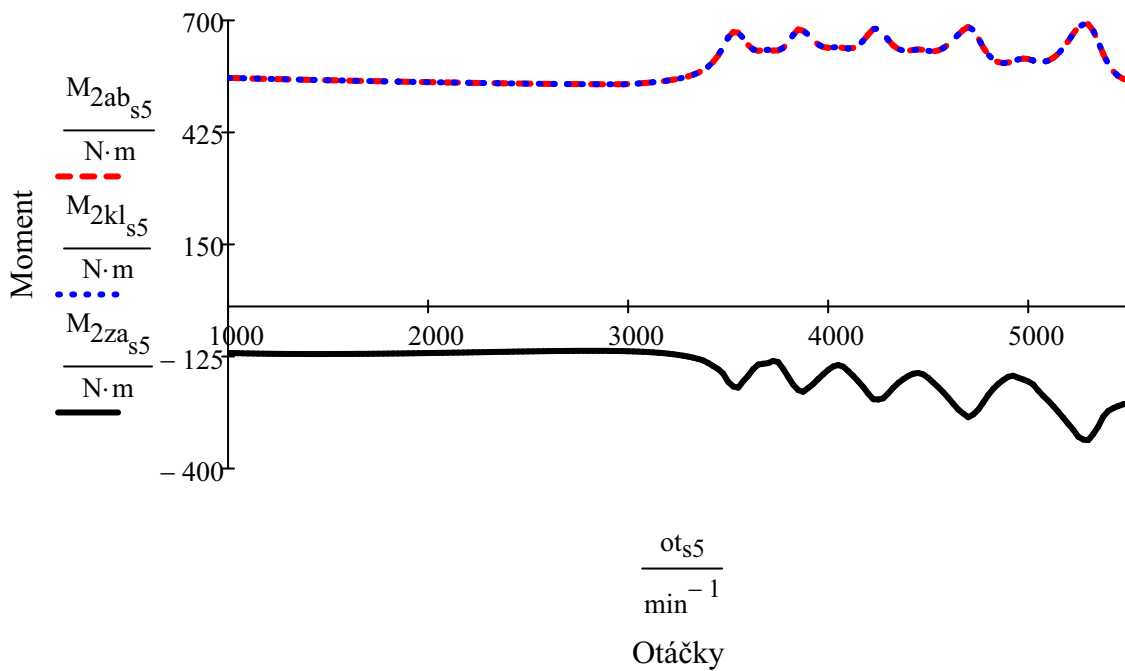
Torzní momenty v úseku 1



Torzní momenty pro druhý úsek redukovaného KH

Absolutní moment	$M_{2ab_{s5}} = Q_{s5,2} \cdot N \cdot m$	
Kladný moment	$M_{2kl_{s5}} = Q_{s5,3} \cdot N \cdot m$	$\max(M_{2kl}) = 690.48 \cdot N \cdot m$
Záporný moment	$M_{2za_{s5}} = Q_{s5,4} \cdot N \cdot m$	$\min(M_{2za}) = -330.392 \cdot N \cdot m$

Torzní moment v úseku 2



Torzní momenty pro druhý úsek redukovaného KH

Absolutní moment

$$M_{3ab_{s6}} = Q_{s6,2} \cdot N \cdot m$$

Kladný moment

$$M_{3kl_{s6}} = Q_{s6,3} \cdot N \cdot m$$

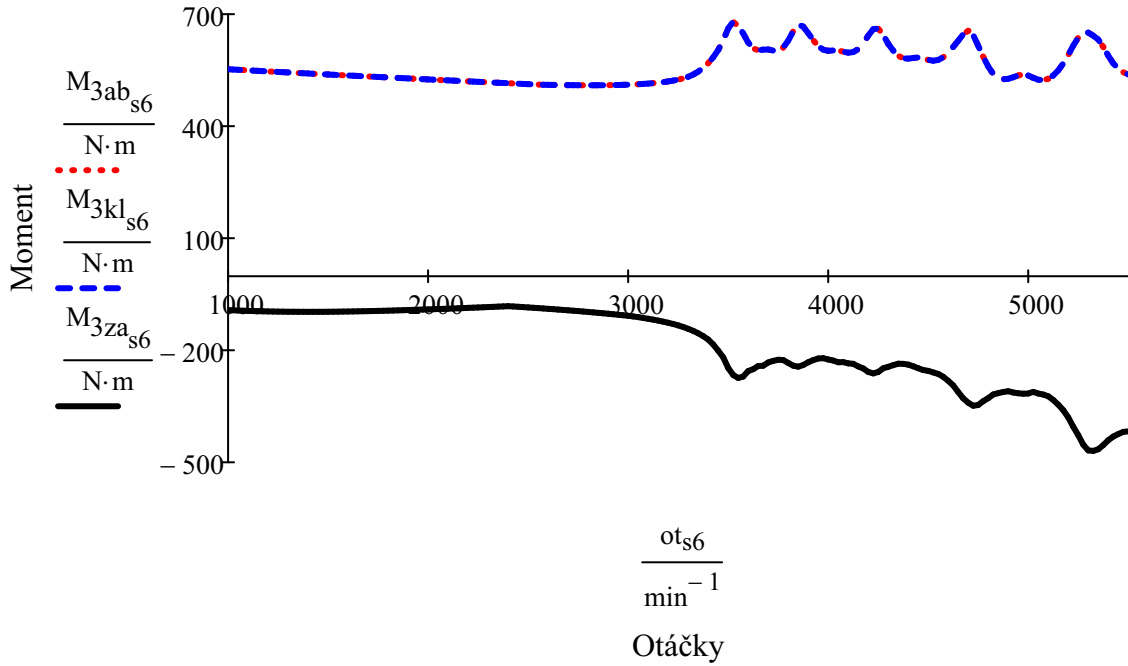
$$\max(M_{3kl}) = 679.814 \cdot N \cdot m$$

Záporný moment

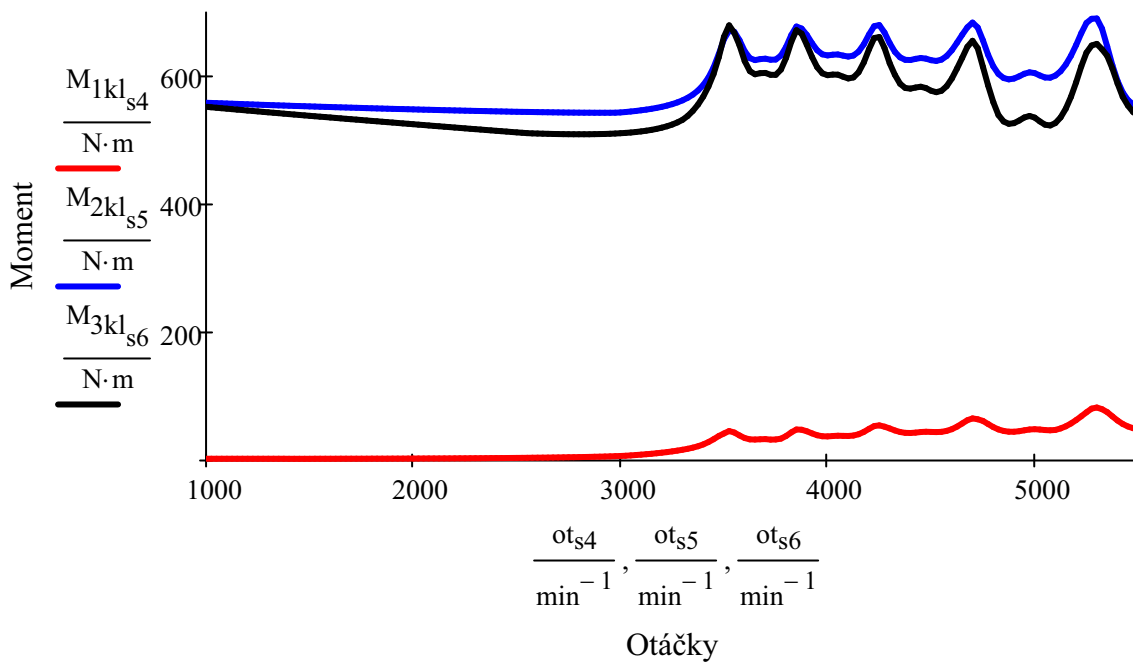
$$M_{3za_{s6}} = Q_{s6,4} \cdot N \cdot m$$

$$\min(M_{3za}) = -469.511 \cdot N \cdot m$$

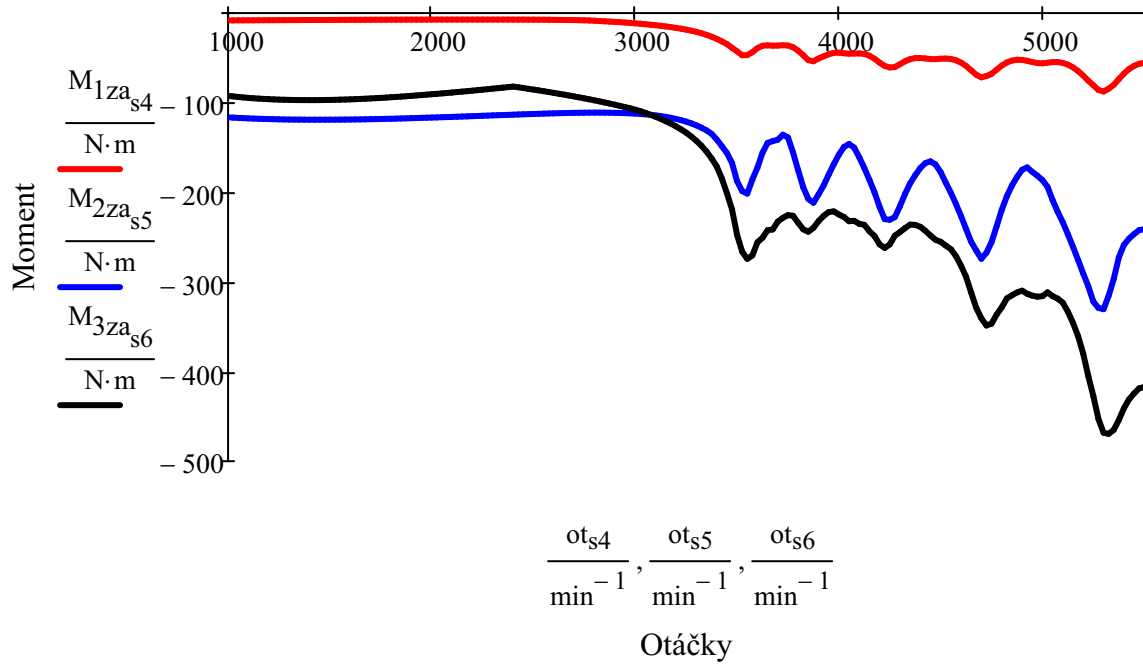
Torzní moment v úseku 3



Kladné torzní momenty úseků 1, 2 a 3



Záporné torzní momenty úseků 1, 2 a 3



4 Kontrolní pevnostní výpočet analýzy napjatosti KH

$$\max(F_{oj}) = 33.152 \cdot \text{kN}$$

Maximální síla působící na klikový čep $F_{\check{c}max} = \max(F_{oj}) - F_{odoj}$

$$F_{\check{c}max} = 29.174 \cdot \text{kN}$$

Minimální síla působící na klikový čep $F_{\check{c}min} = \min(F_{oj}) - F_{odoj}$

$$F_{\check{c}min} = -9.546 \cdot \text{kN}$$

Analýza napjatosti klikového hřídele

Materiálové charakteristiky

Mez pevnosti

$$R_e = 835 \text{MPa}$$

Mez kluzu v tahu

$$R_m = 980 \text{MPa}$$

Mez únavy v ohybu

$$\sigma_{co} = 470.4 \text{MPa}$$

Mez únavy pro tlak - tah

$$\sigma_c = 352.8 \text{MPa}$$

Použité konstanty

Vliv velikosti součásti

Průměr ojnicního čepu

$$d = 42$$

$$\eta_{\sigma} = 1.189 \cdot d^{-0.097}$$

$$\eta_{\sigma} = 0.827$$

Vliv velikosti součásti

$$\nu_{\sigma} = 0.9$$

Průměr zkušební vzorku

$$d_{vz} = 7.5 \text{mm}$$

Ložisková vůle

$$c = \frac{D_{hc}}{1000}$$

$$c = 0.05 \cdot \text{mm}$$

Stanovení tuhosti

$$k_c = \frac{0.5 \cdot \max(F_p)}{0.8 \cdot c}$$

$$k_c = 483179.425 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Napětí získání pomocí MKP (Ansys Workbench)

Stav A

$$\sigma_{vmA} = 351.45 \text{MPa}$$

$$\sigma_{1A} = 344.82 \text{MPa}$$

$$\sigma_{3A} = 59.8 \text{MPa}$$

Stav B

$$\sigma_{vmB} = 182.56 \text{MPa}$$

$$\sigma_{1B} = 118.67 \text{MPa}$$

$$\sigma_{3B} = -107.5 \text{MPa}$$

Poměrný gradient napětí

$$\sigma_{eX} = 351.18 \text{MPa}$$

$$\sigma_{eX1} = 55.387 \text{MPa}$$

Vzdálenost mezi hodnotami gradientu

$$xx_1 = 5.538 \text{mm}$$

$$\chi_R = \frac{1}{\sigma_{eX}} \cdot \left(\frac{\sigma_{eX} - \sigma_{eX1}}{|xx_1|} \right)$$

$$\chi_R = 0.152 \cdot \text{mm}^{-1}$$

$$\chi_r = 0.269$$

Korekční součinitel

$$f_G = 1 + \frac{\frac{\sigma_{co}}{\sigma_c} - 1}{\frac{2}{d_{vz}}} \cdot \chi_R$$

$$f_G = 1.19$$

Poměr β/α

$$\beta I \alpha = 1 + \sqrt{\chi_r} \cdot 10^{-\left(0.35 + \frac{R_e}{810 \cdot \text{MPa}}\right)}$$

$$\beta I \alpha = 1.022$$

Ekvivalentní napětí

Maximální ekvivalentní napětí

$$\sigma_{e_max} = \text{sign}(\sigma_{1A}) \cdot \sigma_{vmA}$$

$$\sigma_{e_max} = 351.45 \cdot \text{MPa}$$

Minimální ekvivalentní napětí

$$\sigma_{e_min} = \text{sign}(\sigma_{1B}) \cdot \sigma_{vmB}$$

$$\sigma_{e_min} = 182.56 \cdot \text{MPa}$$

Amplituda ekvivalentního napětí

$$\sigma_{e_amp} = \frac{\sigma_{e_max} - \sigma_{e_min}}{2}$$

$$\sigma_{e_amp} = 84.445 \cdot \text{MPa}$$

Střední hodnota ekvivalentního napětí $\sigma_{e_st} = \frac{\sigma_{e_max} + \sigma_{e_min}}{2}$

$$\sigma_{e_st} = 267.005 \cdot \text{MPa}$$

Bezpečnost $k = \left(\beta I \alpha \cdot \frac{\sigma_{e_amp}}{\sigma_{co} \cdot \eta_{\sigma} \cdot \nu_{\sigma} \cdot f_G} + \frac{\sigma_{e_st}}{R_m} \right)^{-1}$

$$k = 2.086$$

Bezpečnost při kalení rádiusů $k_{kal} = 1.3 \cdot k$

$$k_{kal} = 2.712$$

5 Jemné drážkování

Velikost drážkování		velikost 40
Počet zubů		$z = 38$
Hlavová kružnice		$D_{1a} = 44\text{mm}$
Patní kružnice		$D_{2a} = 40\text{mm}$
Dovolený tlak		$p_D = 70\text{MPa}$
Modul	$h = \frac{D_{1a} - D_{2a}}{2}$	$h = 2\cdot\text{mm}$
Průměr modulové kružnice	$D_s = \frac{D_{1a} + D_{2a}}{2}$	$D_s = 42\cdot\text{mm}$
Síla působící na zub	$F_1 = \frac{2\cdot M_k}{0.5\cdot z\cdot D_s}$	$\max(F_1) = 1.752\cdot\text{kN}$ $\min(F_1) = -0.345\cdot\text{kN}$
Minimální délka drážkování	$l_{dr} = \frac{F_1}{h\cdot p_D}$	$\max(l_{dr}) = 12.514\cdot\text{mm}$
Skutečná délka		$l_{zk} = 15\text{mm}$
Maximální možná přenesená síla	$F_{1\max} = l_{zk}\cdot h\cdot p_D$	$F_{1\max} = 2.1\cdot\text{kN}$
Maximální možný přenesený moment	$M_{k\max} = \frac{F_{1\max}\cdot 0.5\cdot z\cdot D_s}{2}$	$M_{k\max} = 837.9\cdot\text{N}\cdot\text{m}$
Určení rezervy M_k	$M_{k1\%} = \frac{\max(M_k)}{100}$	$M_{k1\%} = 6.99\cdot\text{N}\cdot\text{m}$
	$\text{rezerva} = \frac{M_{k\max} - \max(M_k)}{M_{k1\%}}$	$\text{rezerva} = 19.865\%$

