

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOTIVE ENGINEERING

PŘÍLOHA – HNACÍ ÚSTROJÍ ČTYŘVÁLCOVÉHO LETECKÉHO MOTORU

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

VLADIMÍR PŘÍBORSKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

PROF. ING. VÁCLAV PÍŠTĚK, DRSC.

BRNO 2008

Obsah

1. Hlavní rozměry.....	3
2. Kinematické veličiny.....	4
2.1 Průběh zdvihu pístu.....	4
2.2 Průběh rychlosti pístu.....	4
2.3 Průběh zrychlení pístu.....	4
2.4 Amplitudy harmonických složek dráhy, rychlosti a zrychlení a pístu.....	4
2.5 Grafické vyjádření jednotlivých veličin.....	5
3. Průběhy tlaků.....	8
3.1 p- α digram.....	8
3.2 p-V digram.....	9
4. Síly působící na pístní čep.....	10
4.1 Síly ve směru osy válce.....	10
4.2. Síly ve směru ojnice.....	11
4.3. Boční síly na píst.....	12
5 Tangenciální, radiální síla a kroutící moment na jednom zalomení.....	13
5.1 Radiální a tangenciální a celková síla v oj.čepu.....	13
5.2 Kroutící moment jednoho zalomení.....	14
6 Průběh kroutícího momentu na zalomení, hlavních a oj. čepch.....	15
6.1 Pořadí zapalování 1-2-4-3.....	15
6.1.1 Kroutící moment na jednotlivých zalomeních.....	15
6.1.2 Průběh kroutícího momentu na hlavních čepch.....	16
6.1.3 Průběh kroutícího momentu na ojních čepch.....	18
6.2 Pořadí zapalování 1-3-4-2.....	15
6.2.1 Kroutící moment na jednotlivých zalomeních.....	19
6.2.2 Průběh kroutícího momentu na hlavních čepch.....	20
6.2.3 Průběh kroutícího momentu na ojních čepch.....	21
7 Pevnostní výpočet.....	22
7.1 Základní rozměry klikového hřídele.....	22
7.2. Materiálové charakteristiky.....	22
7.3 Kontrolní výpočet klikového hřídele.....	23
7.3.1 Kontrolní pevnostní výpočet hlavního čepu.....	23
7.3.2 Kontrolní pevnostní výpočet ojního čepu.....	24
7.3.2.1 Silové vyvážení.....	24
7.3.2.2 Momentové vyvážení.....	29
7.3.2.3 Kombinované vyvážení.....	34
7.3.3 Kontrolní pevnostní výpočet ramene kliky.....	39
7.3.3.1 Silové vyvážení.....	39
7.3.3.2 Momentové vyvážení.....	42
7.3.3.3 Kombinované vyvážení.....	45
8 Vyvažování klikového hřídele.....	48
8.1 Odstředivé síly.....	48
8.2 Momenty odstředivých sil.....	49
8.2.1 Silové vyvážení.....	49
8.2.2 Momentové vyvážení.....	49
8.2.3 Kombinace silového a momentového vyvážení.....	50
8.3 Setrvačné síly posuvných částí I. řádu.....	51
8.4 Setrvačné síly posuvných částí II. řádu.....	51
8.5 Momenty setrvačné sil posuvných částí I. řádu.....	52

8.6	Momenty setrvačné sil posuvných částí I. řádu.....	53
9	Torzní kmitání.....	55
9.1	Vlastní torzní kmitání.....	55
9.1.1	Silové vyvážení.....	55
9.1.1.1	Redukce hmot klikového mechanismu.....	55
9.1.1.2	Redukce délek klikového mechanismu.....	56
9.1.1.3	Výpočet vlastních torzních kmitů.....	57
9.1.1.4	Vlastní tvary torzního kmitání.....	58
9.1.2	Momentové vyvážení.....	59
9.1.2.1	Redukce hmot klikového mechanismu.....	59
9.1.2.2	Redukce délek klikového mechanismu.....	61
9.1.2.3	Výpočet vlastních torzních kmitů.....	62
9.1.2.4	Vlastní tvary torzního kmitání.....	63
9.1.3	Kombinované vyvážení.....	64
9.1.3.1	Redukce hmot klikového mechanismu.....	64
9.1.3.2	Redukce délek klikového mechanismu.....	65
9.1.3.3	Výpočet vlastních torzních kmitů.....	66
9.1.3.4	Vlastní tvary torzního kmitání.....	67
9.2	Vynucené torzní kmitání.....	68
9.2.1	Harmonická analýza budícího momentu.....	68
9.2.2	Kritické otáčky.....	70
9.2.2.1	Silové vyvážení.....	70
9.2.2.2	Momentové vyvážení.....	71
9.2.2.3	Kombinované vyvážení.....	72
9.2.3	Pořadí zapalování 1-2-4-3.....	73
9.2.3.1	vydatnost rezonancí.....	73
9.2.3.2	Závislost vydatnosti rezonance na řádu harmonické pro I. frekvenci.....	75
9.2.3.3	Závislost vydatnosti rezonance na řádu harmonické pro II. frekvenci.....	78
9.2.3.4	Torzní výchylky v rezonanci.....	79
9.2.3.5	Přídavné torzní napětí.....	81
9.2.4	Pořadí zapalování 1-3-4-2.....	81
9.2.4.1	vydatnost rezonancí.....	81
9.2.4.2	Závislost vydatnosti rezonance na řádu harmonické pro I. frekvenci.....	84
9.2.4.3	Závislost vydatnosti rezonance na řádu harmonické pro II. frekvenci.....	87
9.2.4.4	Torzní výchylky v rezonanci.....	88
9.2.4.5	Přídavné torzní napětí.....	90

1. Hlavní rozměry

počet válců:	$i := 4$	
výkon:	$P_e := 60 \cdot 10^3 \cdot W$	$P_e = 60 \text{ kW}$
jmenovité otáčky:	$n := 5000 \cdot \text{min}^{-1}$	$n = 83.333 \frac{1}{s}$
taktnost motoru:	$\tau := 0.5$	
poloměr klikového hřídele:	$r := 43.45 \cdot \text{mm}$	$r = 0.043 \text{ m}$
délka ojnice:	$l := 138 \cdot \text{mm}$	$l = 0.138 \text{ m}$
klikový poměr:	$\lambda := \frac{r}{l} \quad \lambda_{\text{oj}} := \lambda$	$\lambda = 0.315$
vrtání:	$D := 76.5 \cdot \text{mm}$	$D = 0.077 \text{ m}$
zdvih:	$Z := 2 \cdot r$	$Z = 0.087 \text{ m}$
zdvihový objem válce:	$V_Z := \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot Z$	$V_Z = 0.399 \text{ L}$
zdvihový objem motoru:	$V_{Zm} := V_Z \cdot i$	$V_{Zm} = 1.598 \text{ L}$
střední efektivní tlak:	$p_e := \frac{P_e}{n \cdot i \cdot \tau \cdot V_Z}$	$p_e = 0.901 \text{ MPa}$
litrový výkon:	$P_l := \frac{P_e}{V_Z \cdot i}$	$P_l = 37.554 \frac{\text{kW}}{\text{L}}$
kontrola litového výkonu:	37.554 kW/L vyhovuje rozmezí 25 - 80 kW/L	
zdvihový poměr:	$k := \frac{Z}{D}$	$k = 1.136$
střední pístová rychlost:	$c_s := 2 \cdot Z \cdot n$	$c_s = 14.483 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
kontrola střední pístové rychlosti:	14.483 m/s vyhovuje rozmezí 11,5 - 24m/s	

2 Kinematické veličiny

úhel natočení kliky: $\alpha := 0\text{deg}, 10\text{deg} \dots 360\text{deg}$

2.1 Průběh zdvihu pístu

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

harmonické složky zdvihu: $Z_1(\alpha) := r \cdot (1 - \cos(\alpha))$

$$Z_2(\alpha) := r \cdot \left(\frac{\lambda}{4}\right) \cdot (1 - \cos(2\alpha))$$

2.2 Průběh rychlosti pístu

úhlová rychlost: $\omega := 2\pi n$

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

harmonické složky rychlosti $v_1(\alpha) := r \cdot \omega \cdot \sin(\alpha)$

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

2.3 Průběh zrychlení pístu:

zrychlení pístu: $a(\alpha) := r \cdot \omega^2 \cdot (\cos(\alpha) + \lambda \cdot \cos(2\alpha))$

harmonické složky zrychlení: $a_1(\alpha) := r \cdot \omega^2 \cdot \cos(\alpha)$

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

2.4 Amplitudy harmonických složek dráhy, rychlosti a zrychlení pístu

Zdvih:

maxima složek $S_{1\max} := r \cdot (1 - \cos(180\text{deg}))$ $S_{1\max} = 2r$ $S_{1\max} = 86.9 \text{ mm}$

$$S_{2\max} := r \cdot \left(\frac{\lambda}{4}\right) \cdot (1 - \cos(2 \cdot 90\text{deg}))$$
 $S_{2\max} = 0.157r$ $S_{2\max} = 6.84 \text{ mm}$

amplitudy složek $S_1 := \frac{S_{1\max}}{2}$ $S_1 = 1r$ $S_1 = 43.45 \text{ mm}$

$$S_2 := \frac{S_{2\max}}{2}$$
 $S_2 = 0.079r$ $S_2 = 3.42 \text{ mm}$

míjivý cyklus
- amplituda je polovina maxima

Rychlost:

maxima složek

$$V_{1\max} := r \cdot \omega \cdot \sin(90\text{deg})$$

$$V_{1\max} = 22.75 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$V_{2\max} := r \cdot \omega \cdot \left(\frac{\lambda}{2}\right) \cdot \sin(2 \cdot 45\text{deg})$$

$$V_{2\max} = 3.582 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

amplitudy složek

$$V_1 := V_{1\max}$$

$$V_1 = 22.75 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$V_2 := V_{2\max}$$

$$V_2 = 3.582 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

střídavý cyklus
- amplitudy jsou maxima

Zrychlení:

maxima složek

$$A_{1\max} := r \cdot \omega^2 \cdot \cos(0\text{deg})$$

$$A_{1\max} = 1.191 \times 10^4 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$A_{2\max} := r \cdot \omega^2 \cdot \lambda \cdot \cos(2 \cdot 0\text{deg})$$

$$A_{2\max} = 3.751 \times 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

amplitudy složek

$$A_1 := A_{1\max}$$

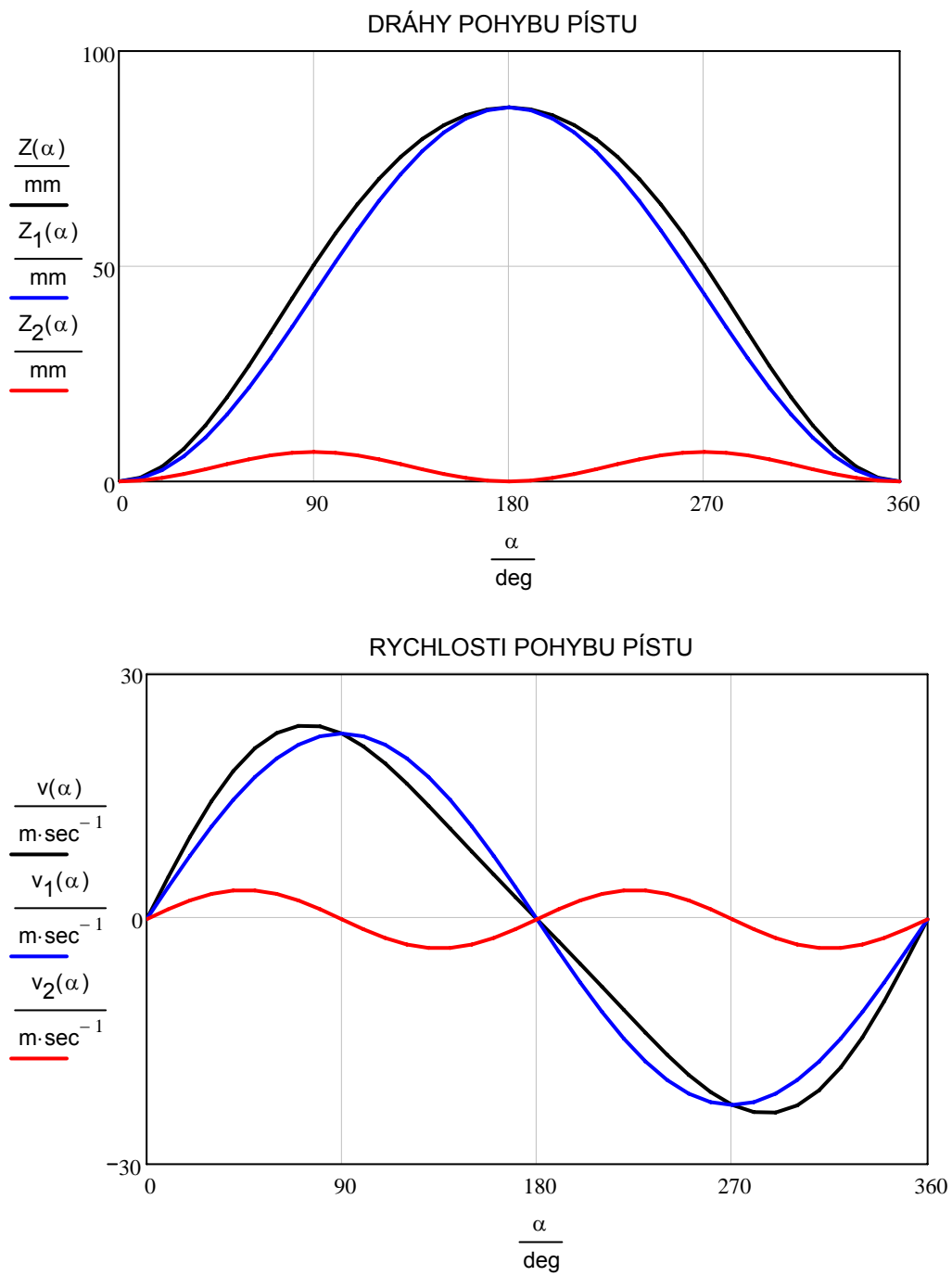
$$A_1 = 1.191 \times 10^4 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

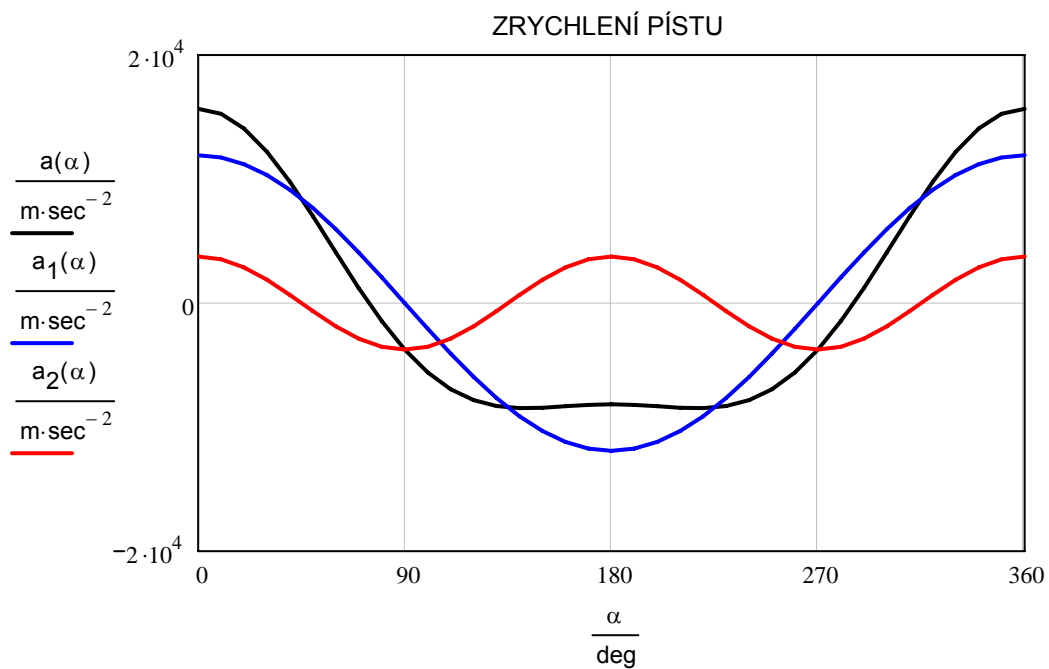
$$A_2 := A_{2\max}$$

$$A_2 = 3.751 \times 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

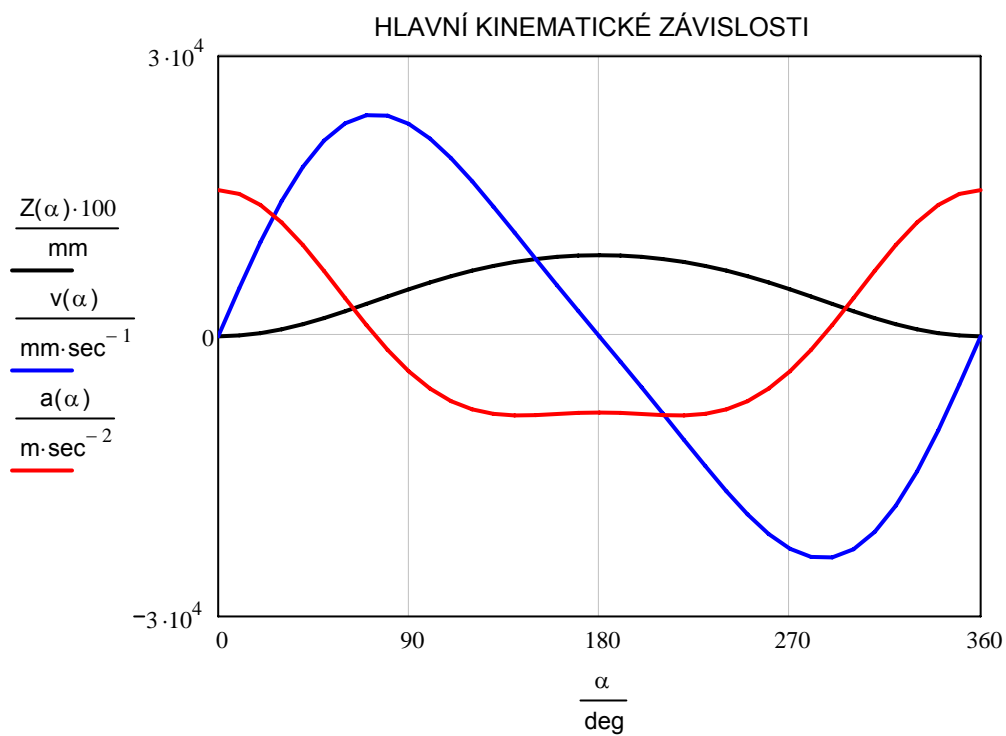
střídavý cyklus
- amplitudy jsou maxima

2.5 Grafické vyjádření jednotlivých veličin





Společný graf - dráha, rychlost, zrychlení pístu



3 Průběhy tlaků

3.1 p- α diagram válcové jednotky motoru

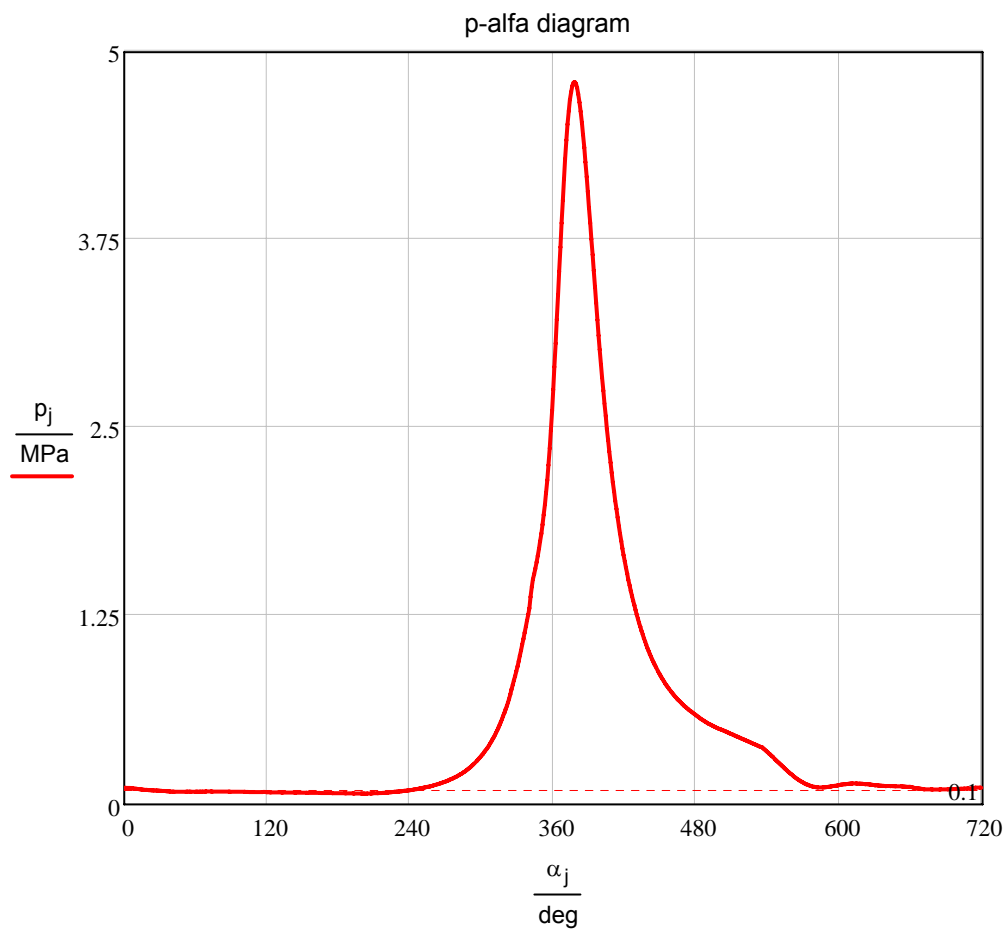
$p := \text{READPRN}(\text{"In_diag07.dat"}) \cdot \text{MPa}$ $\text{MPa} \equiv 10^6 \cdot \text{Pa}$

$P_{\text{atm}} := 0.1 \text{MPa}$ $P_{\text{atm}} = 0.1 \text{MPa}$

$j := 0..719$

$\alpha_j := j \cdot \text{deg}$

$p_j := p_{j+1}$



3.2 p-V diagram válčové jednotky motoru

kompresní poměr:

$$\varepsilon := 10.5$$

zdvihový objem:

$$V_Z = 0.399 \text{ L}$$

$$V_Z = 399.423 \text{ cm}^3$$

kompresní objem:

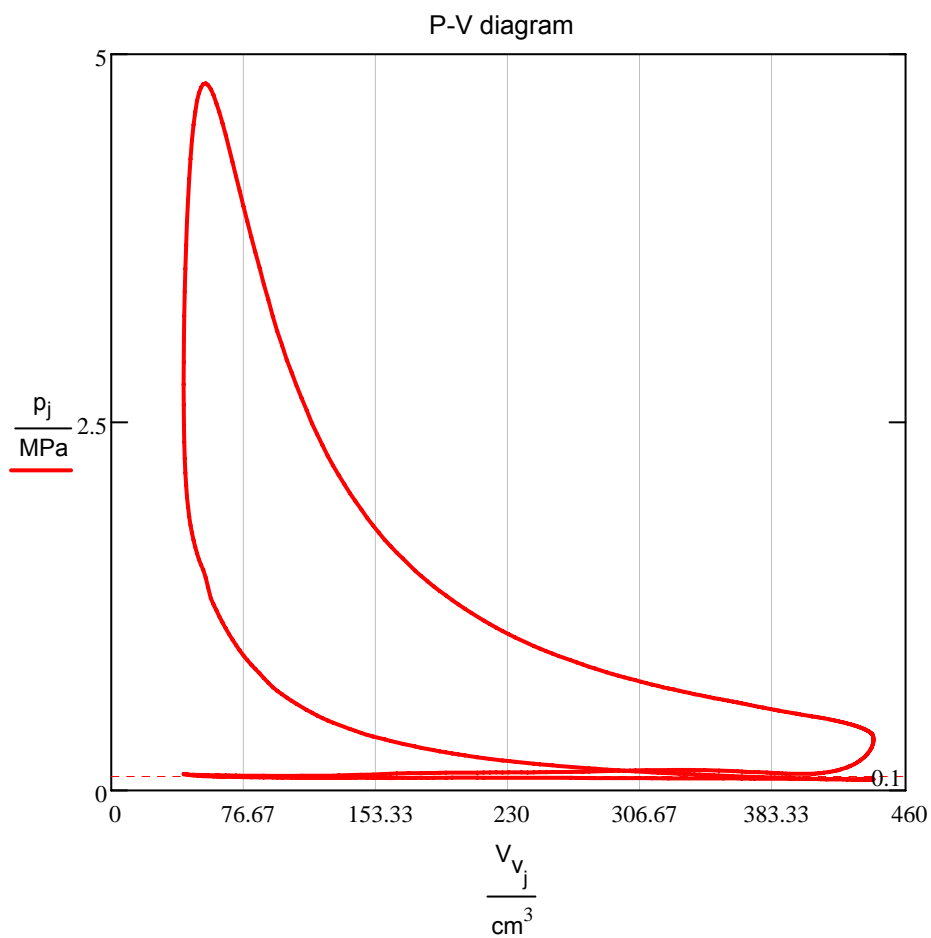
$$V_K := \frac{V_Z}{\varepsilon - 1}$$

$$V_K = 42.044 \text{ cm}^3$$

celkový objem:

$$V_V(\alpha) := V_K + \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot Z(\alpha)$$

$$V_{V_j} := V_K + \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot Z(\alpha_j)$$



4. Síly působící na pístní čep

hmotnost pístní skupiny:

$$m_{\text{pist}} := 0.2868 \cdot \text{kg}$$

hmotnost ojnice:

$$m_{\text{oj}} := 0.223661 \cdot \text{kg}$$

moment setrvačnosti k těžišti ojnice:

$$J_T := 799.2 \cdot \text{kg} \cdot \text{mm}^2$$

vzdálenost těžiště od středu hlavy ojnice:

$$b_{\text{oj}} := 42.18 \cdot \text{mm}$$

vzdálenost těžiště od středu oka ojnice:

$$a_{\text{oj}} := l - b_{\text{oj}}$$

$$a_{\text{oj}} = 95.82 \text{ mm}$$

hmotnost posuvných částí ojnice:

$$m_1 := 0.068 \cdot \text{kg}$$

hmotnost rotačních částí ojnice:

$$m_2 := 0.155 \cdot \text{kg}$$

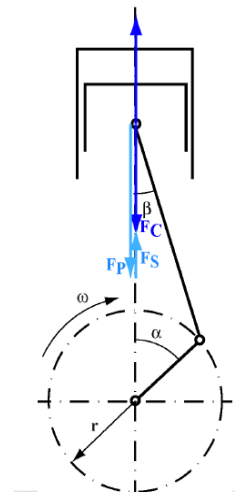
4.1 Síly ve směru osy válce

Zrychlení pístu: $\ddot{x}(\alpha) := r \cdot \omega^2 \cdot (\cos(\alpha) + \lambda \cdot \cos(2 \cdot \alpha))$

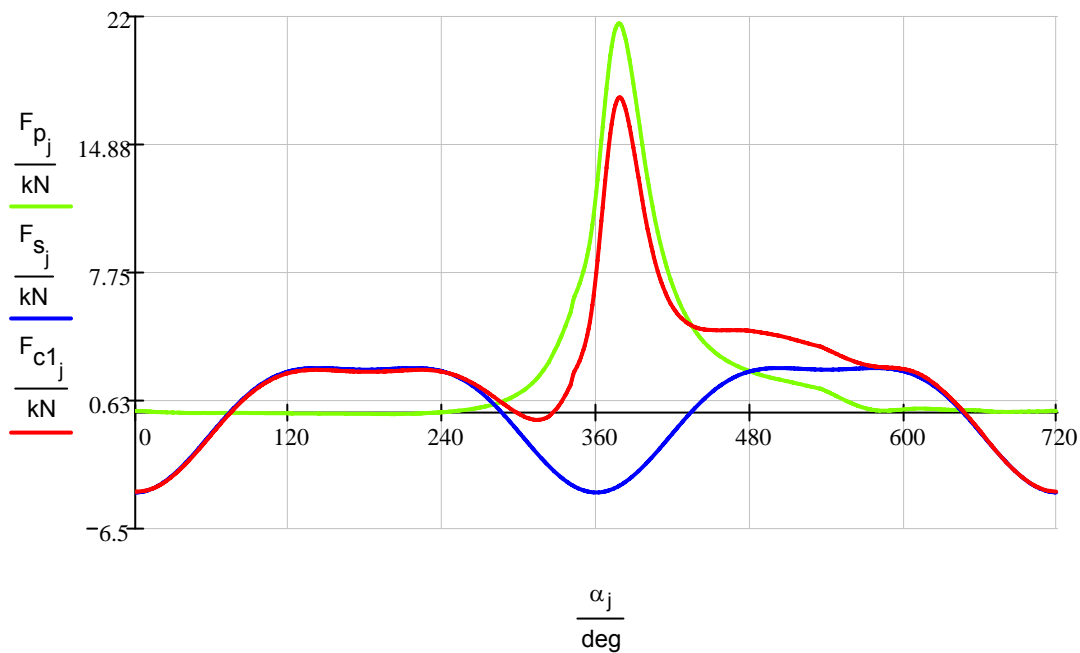
Tlakové síly (primární): $F_{p_j} := (p_j - P_{\text{atm}}) \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}$

Setrvačné síly (sekundární): $F_{s_j} := -m_{\text{pist}} \cdot a(\alpha_j)$

Celkové síly: $F_{c1_j} := F_{p_j} + F_{s_j}$



Síly ve směru osy válce



Maximum složky $\max(F_p) = 21.612 \text{ kN}$ $\max(F_s) = 2.432 \text{ kN}$ $\max(F_{c1}) = 17.493 \text{ kN}$

Minimum složky $\min(F_p) = -0.133 \text{ kN}$ $\min(F_s) = -4.492 \text{ kN}$ $\min(F_{c1}) = -4.446 \text{ kN}$

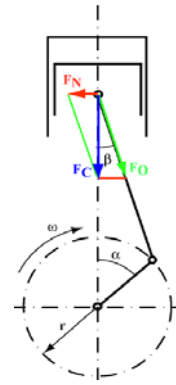
4.2 Síly ve směru ojnice

Úhel odklonu ojnice:

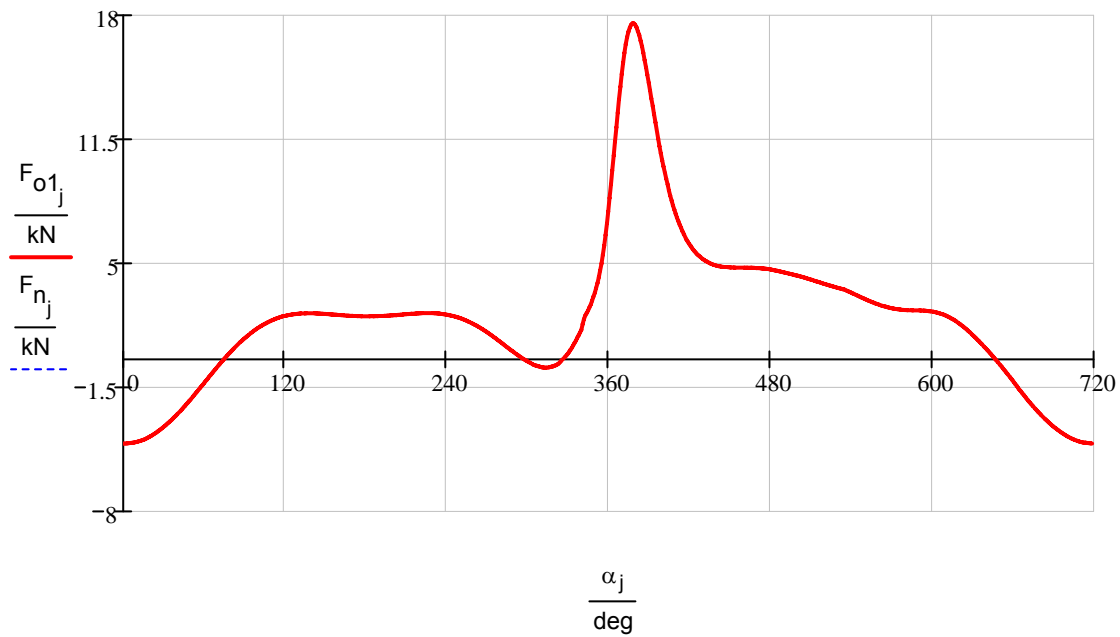
$$\beta := \text{asin}(\lambda \cdot \sin(\alpha))$$

Síly přenášené pístním čepem ve směru ojnice:

$$F_{O1j} := \frac{F_{c1j}}{\cos(\beta_j)}$$



Síly ve směru ojnice



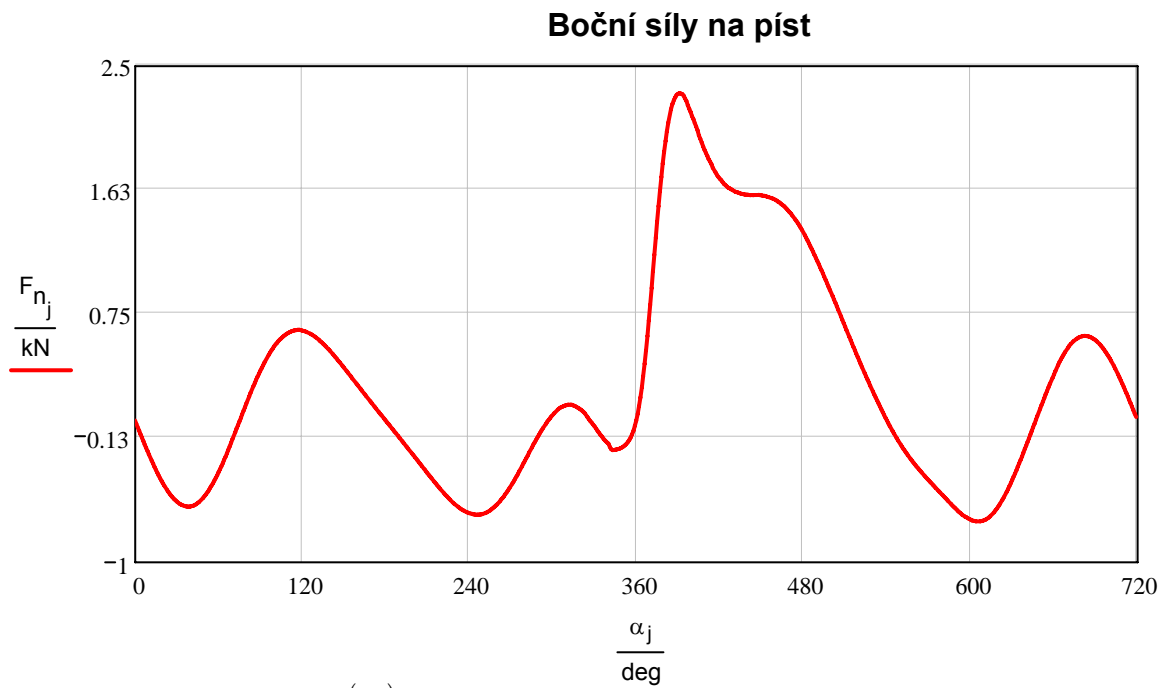
Maxima složek: $\max(F_{O1}) = 17.576 \text{ kN}$

Minima složek: $\min(F_{O1}) = -4.446 \text{ kN}$

4.3 Boční síly na píst

Normálová síla:

$$F_{n_j} := F_{o1_j} \cdot \tan(\beta_j)$$



Maximum složky $\max(F_n) = 2.309 \text{ kN}$

Minimum složky $\min(F_n) = -0.712 \text{ kN}$

5 Tangenciální, radiální síla a kroutící moment na jednom zalomení

5.1 Radiální a tangenciální a celková síla v oj. čepu

Síly přenášené ojnicí:
$$F_{o2j} := F_{o1j} - \frac{m_1 \cdot (a(\alpha_j))}{\cos(\beta_j)}$$

Tangenciální síla:
$$F_{tj} := F_{o2j} \cdot \sin(\alpha_j + \beta_j)$$

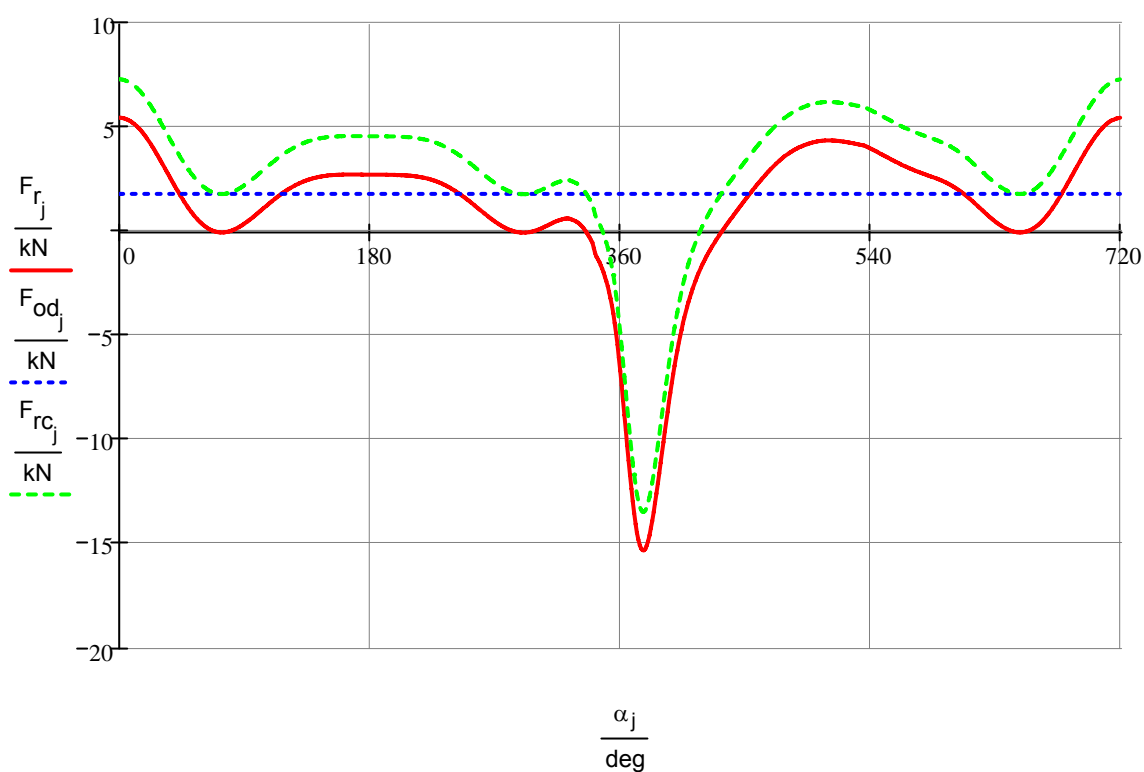
Radiální složka síly od ojnice:
$$F_{rj} := -\cos(\alpha_j + \beta_j) \cdot F_{o2j}$$

Odstředivá síla rotační části ojnice:
$$F_{odj} := m_2 \cdot \omega^2 \cdot r$$

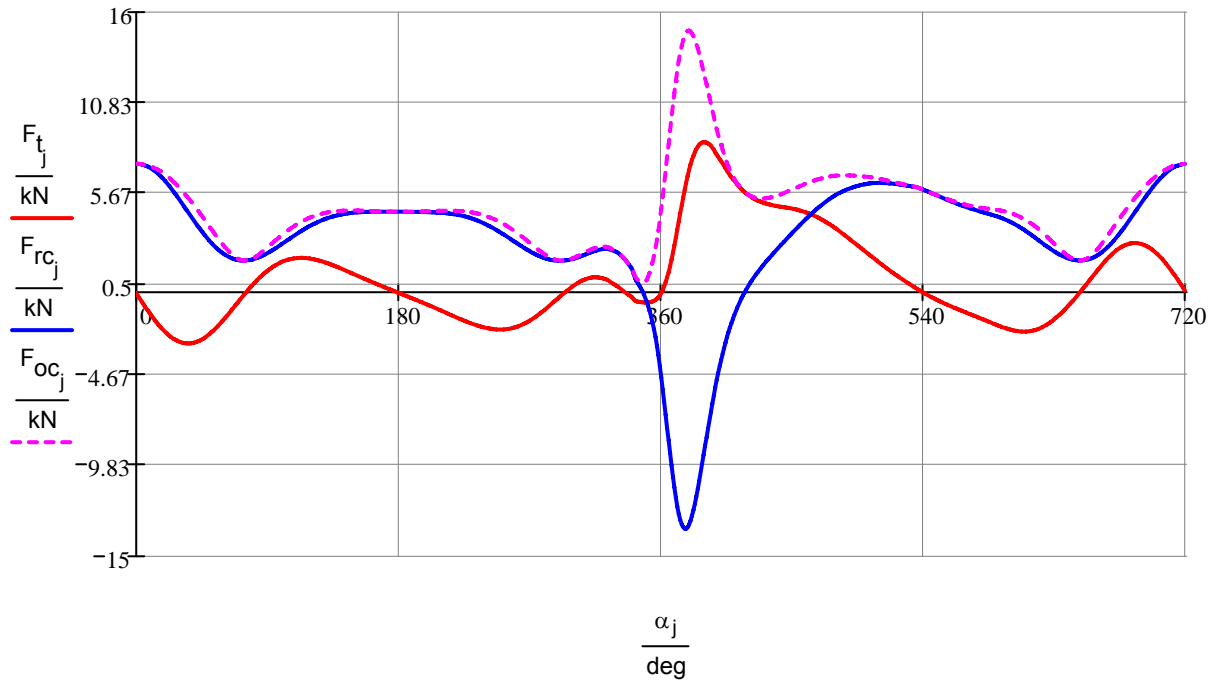
Celková radiální síla:
$$F_{rcj} := F_{rj} + F_{odj}$$

Celková síla působící v ojnicím čepu:
$$F_{ocj} := \sqrt{(F_{rcj})^2 + (F_{tj})^2}$$

Radiální síla v ojnicím čepu



Síly působící v ojnicím čepu



5.2 Kroutící moment jednoho válce

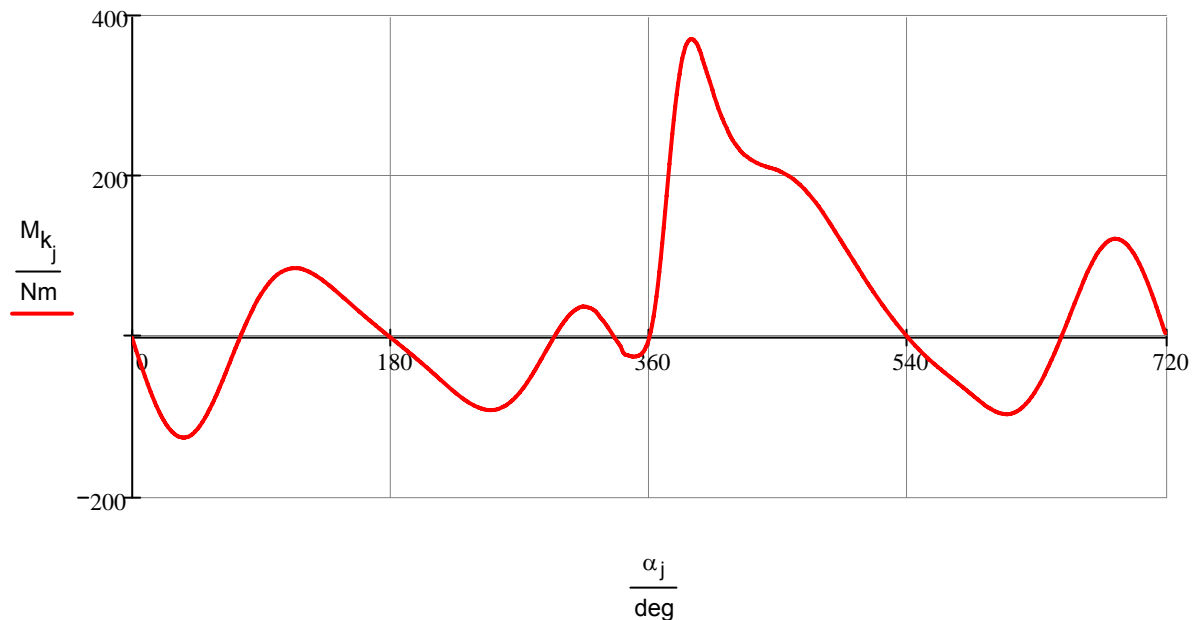
Kroutící moment $M_{k_j} := F_{t_j} \cdot r$ $Nm \equiv J$

Střední idikovaný moment $M_{kis} := \frac{\sum_{j=0}^{719} M_{k_j}}{720}$

$$M_{kis} = 36.263 \text{ Nm}$$

Střední indikovaný výkon jednoho válce $P_{str} := M_{kis} \cdot \omega$ $P_{str} = 18.987 \text{ kW}$

Průběh mometu jednoho válce



6 Průběh kroutícího momentu na zalomení, hlavních a ojnicích čepech

počet měření:

$$n_p := 720$$

celkový úhel pracovního cyklu:

$$\alpha_c := 720 \text{ deg}$$

$$j2C := 0 .. 2 \cdot n_p - 1$$

kroutící moment jednoho zalomení:

$$M_{k2C_j} := M_{K_j}$$

$$M_{k2C_{j+n_p}} := M_{K_j}$$

úhel pro dva po sobě jdoucí cykly:

$$\alpha_{j+n_p} := \alpha_c + \alpha_j$$

6.1 Pořadí zapalování 1 - 2 - 4 - 3

6.1.1 Kroutící moment na jednotlivých zalomeních

$$M_{kV_{j,1}} := M_{k2C_{j+720}}$$

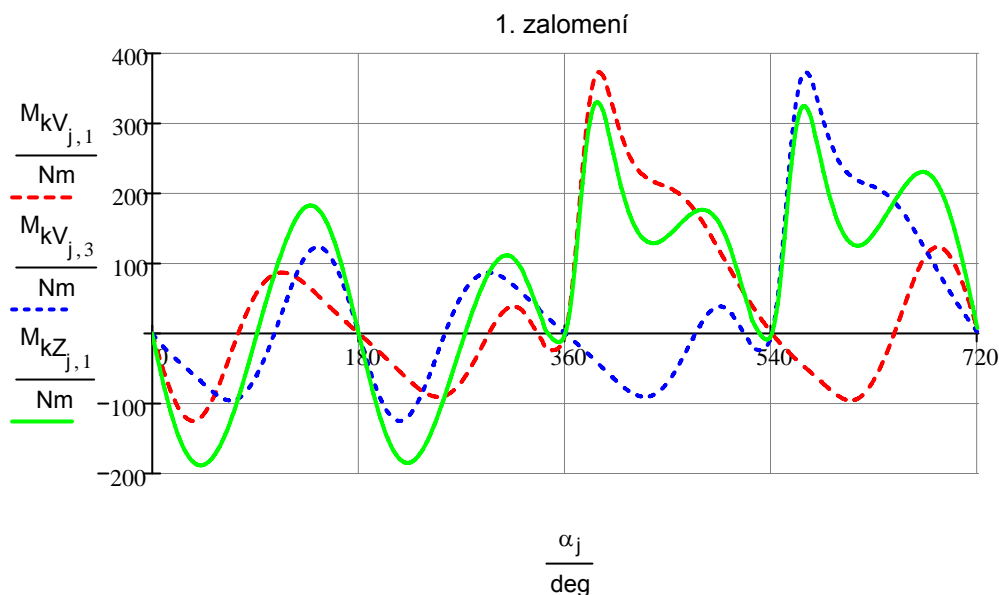
$$M_{kV_{j,3}} := M_{k2C_{j+540}}$$

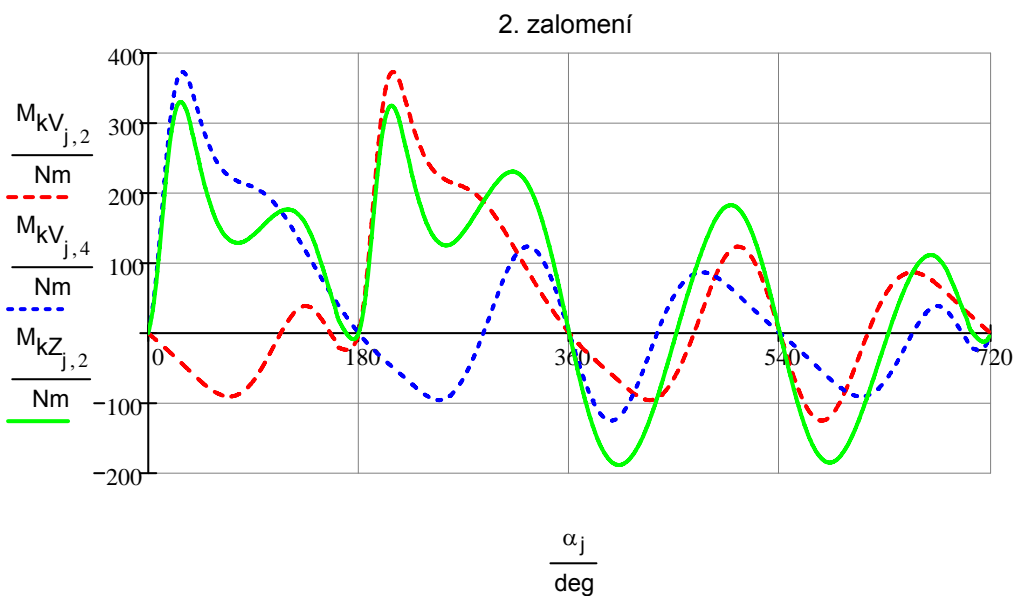
$$M_{kZ_{j,1}} := M_{kV_{j,1}} + M_{kV_{j,3}}$$

$$M_{kV_{j,2}} := M_{k2C_{j+180}}$$

$$M_{kV_{j,4}} := M_{k2C_{j+360}}$$

$$M_{kZ_{j,2}} := M_{kV_{j,2}} + M_{kV_{j,4}}$$

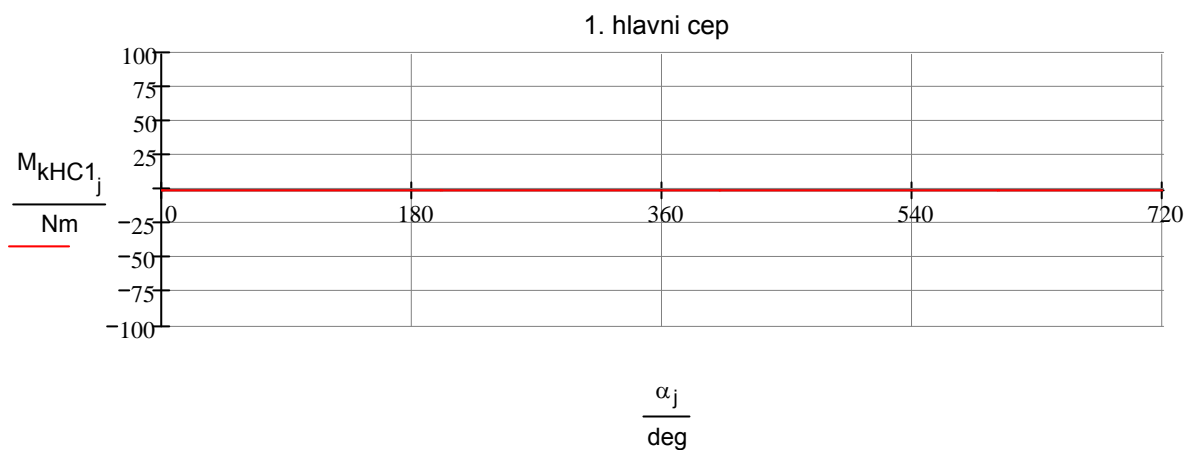




6.1.2 Průběh kroutícího momentu na hlavních čepch

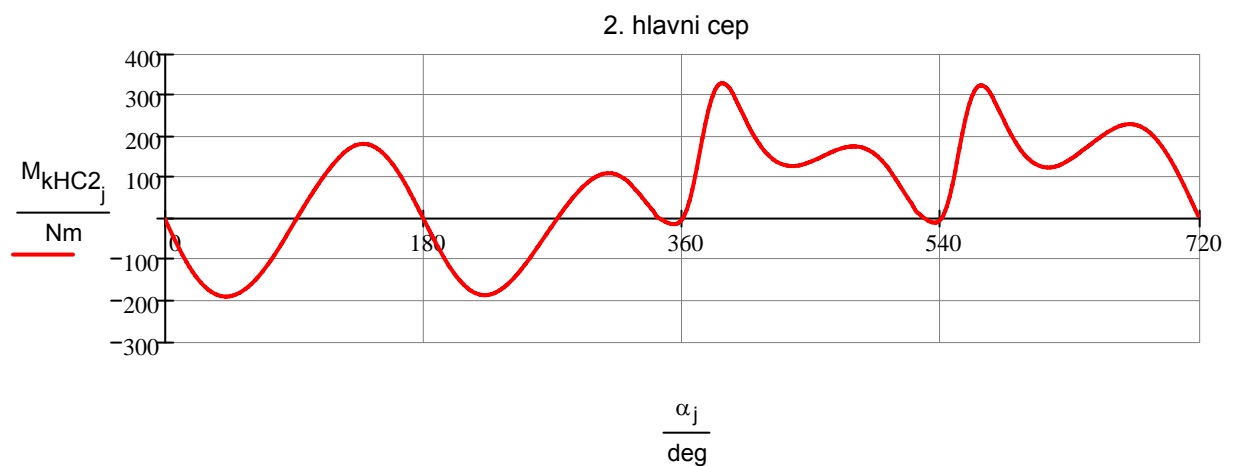
1. hlavní čep

$$M_{kHC1_j} := 0 \text{ Nm}$$



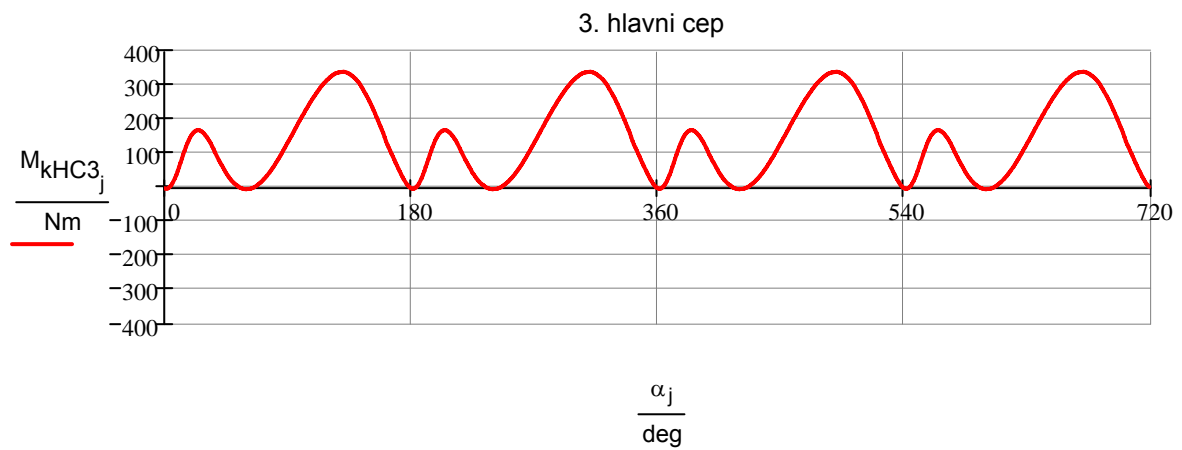
2. hlavní čep

$$M_{kHC2_j} := M_{kZ_{j,1}}$$



3. hlavní čep

$$M_{\text{kHC}3_j} := M_{\text{kHC}2_j} + M_{\text{kZ}_{j,2}}$$



Nejvíce zatížený hlavní čep:

$$M_{\text{kHC}_1} := (\max(M_{\text{kHC}1}) - \min(M_{\text{kHC}1}))$$

$$M_{\text{kHC}_1} = 0 \text{ Nm}$$

$$M_{\text{kHC}_2} := (\max(M_{\text{kHC}2}) - \min(M_{\text{kHC}2}))$$

$$M_{\text{kHC}_2} = 518.462 \text{ Nm}$$

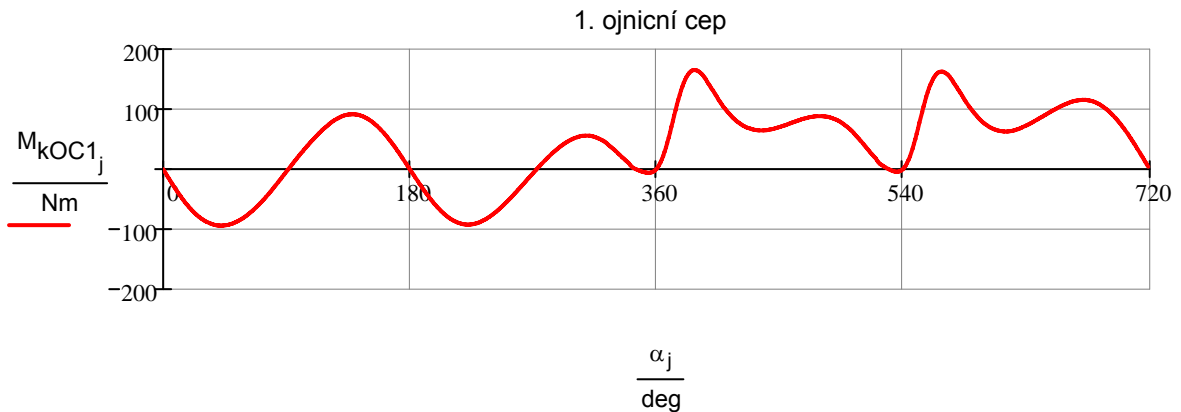
$$M_{\text{kHC}_3} := (\max(M_{\text{kHC}3}) - \min(M_{\text{kHC}3}))$$

$$M_{\text{kHC}_3} = 345.194 \text{ Nm}$$

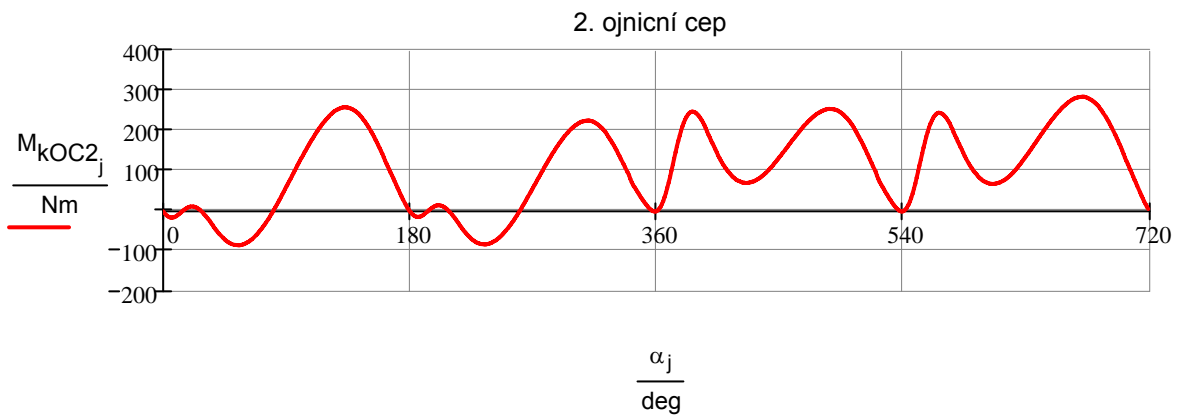
nejvíce zatížený je 2. hlavní čep.

6.1.3 Průběh kroutících momentů na ojnicích čepch:

$$M_{kOC1_j} := \frac{M_{kZ_{j,1}}}{2}$$



$$M_{kOC2_j} := M_{kHC2_j} + \frac{M_{kZ_{j,2}}}{2}$$



Nejvíce zatížený ojnicí čep:

$$M_{kOC_1} := (\max(M_{kOC1}) - \min(M_{kOC1}))$$

$$M_{kOC_1} = 259.231 \text{ Nm}$$

$$M_{kOC_2} := (\max(M_{kOC2}) - \min(M_{kOC2}))$$

$$M_{kOC_2} = 371.264 \text{ Nm}$$

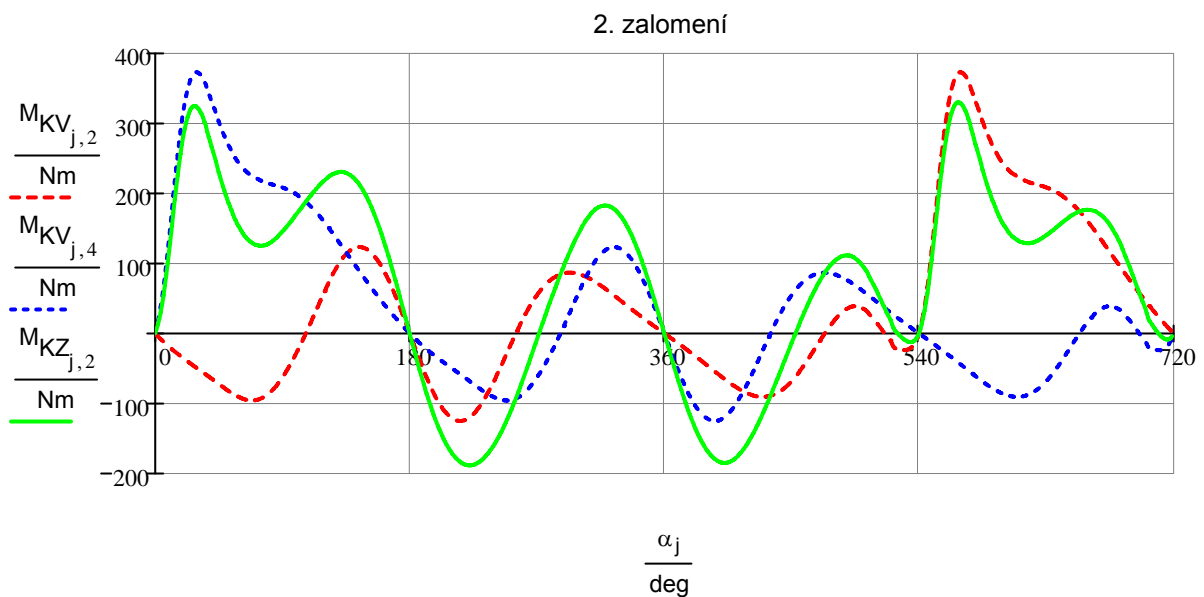
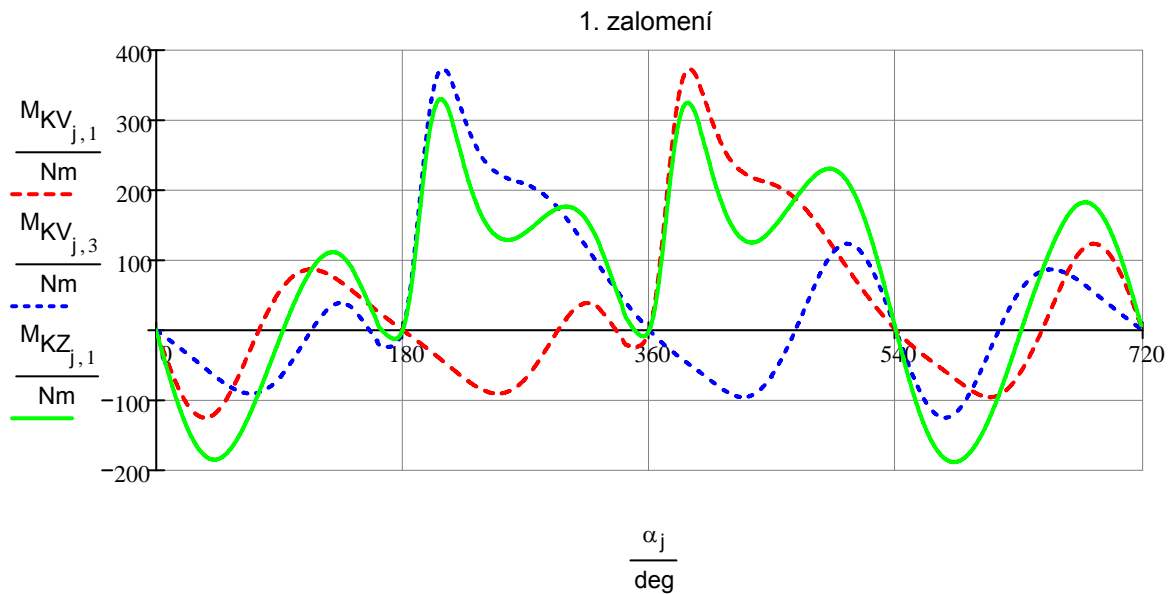
nejvíce zatížený ojnicí čep je 2.

6.2 Pořadí zapalování 1 - 3 - 4 - 2

6.2.1 Průběh krouticího momentu na jednotlivých zalomení

$$M_{KV_{j,1}} := M_{k2C_{j+720}} \quad M_{KV_{j,3}} := M_{k2C_{j+180}} \quad M_{KZ_{j,1}} := M_{KV_{j,1}} + M_{KV_{j,3}}$$

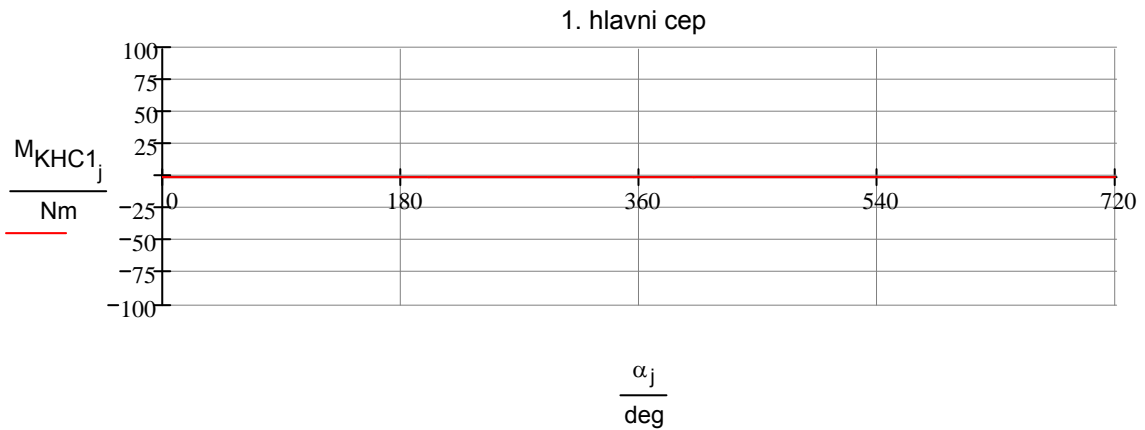
$$M_{KV_{j,2}} := M_{k2C_{j+540}} \quad M_{KV_{j,4}} := M_{k2C_{j+360}} \quad M_{KZ_{j,2}} := M_{KV_{j,2}} + M_{KV_{j,4}}$$



6.2.2 Průběh krouticího momentu na hlavních čepch

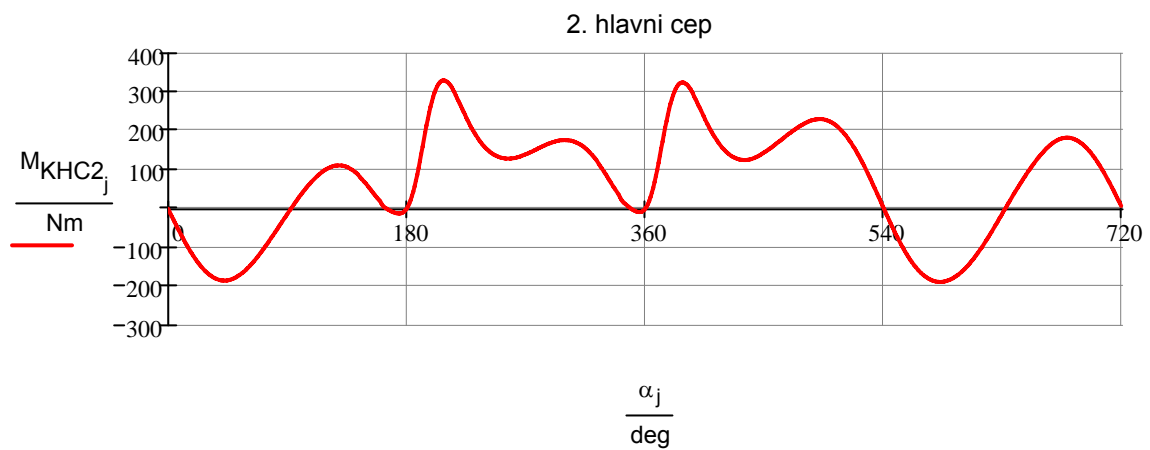
1. hlavní čep

$$M_{KHC1_j} := 0 \text{ Nm}$$



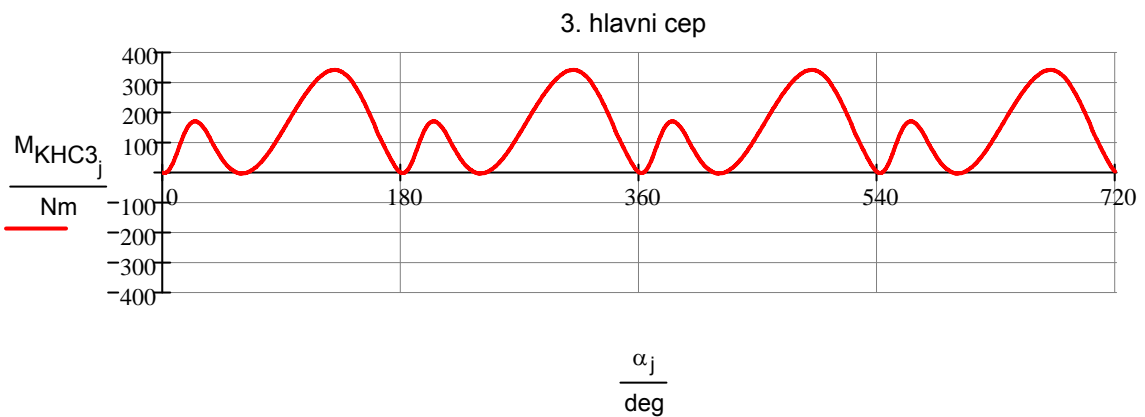
2. hlavní čep

$$M_{KHC2_j} := M_{KZ_{j,1}}$$



3. hlavní čep

$$M_{KHC3_j} := M_{KHC2_j} + M_{KZ_{j,2}}$$



Nejvíce zatížený hlavní čep:

$$M_{KHC_1} := (\max(M_{KHC1}) - \min(M_{KHC1})) \quad M_{KHC_1} = 0 \text{ Nm}$$

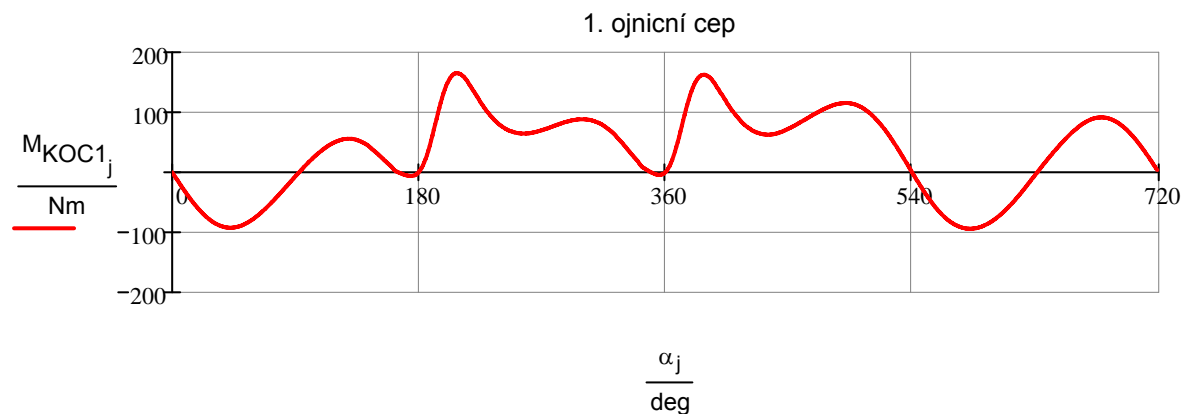
$$M_{KHC_2} := (\max(M_{KHC2}) - \min(M_{KHC2})) \quad M_{KHC_2} = 518.462 \text{ Nm}$$

$$M_{KHC_3} := (\max(M_{KHC3}) - \min(M_{KHC3})) \quad M_{KHC_3} = 345.194 \text{ Nm}$$

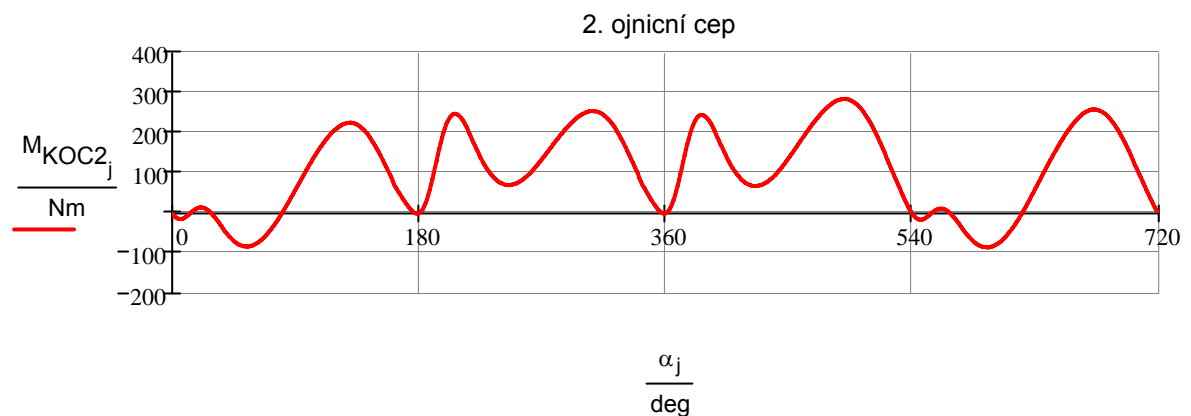
nejvíce zatížený je 2. hlavní čep.

6.2.3 Průběh kroutících momentů na ojnicích čepch:

$$M_{KOC1_j} := \frac{M_{KZ_{j,1}}}{2}$$



$$M_{KOC2_j} := M_{KHC2_j} + \frac{M_{KZ_{j,2}}}{2}$$



Nejvíce zatížený ojnicí čep:

$$M_{KOC_1} := (\max(M_{KOC1}) - \min(M_{KOC1})) \quad M_{KOC_1} = 259.231 \text{ Nm}$$

$$M_{KOC_2} := (\max(M_{KOC2}) - \min(M_{KOC2})) \quad M_{KOC_2} = 371.264 \text{ Nm}$$

nejvíce zatížený ojnicí čep je 2.

7. Pevnostní výpočet

7.1 Základní rozměry klikového hřídele:

vrtání:	$D = 76.5 \text{ mm}$	
průměr hlavního čepu:	$D_{HC} := 0.048 \cdot m$	$D_{HC} = 48 \text{ mm}$
délka hlavního čepu:	$l_{HC} := 0.0242 \cdot m$	$l_{HC} = 24.2 \text{ mm}$
průměr ojnicního čepu:	$D_{OC} := 0.042 \cdot m$	$D_{OC} = 42 \text{ mm}$
délka ojnicního čepu:	$l_{OC} := 0.025 \cdot m$	$l_{OC} = 25 \text{ mm}$
rozteč válců:	$a_k := 0.082 \cdot m$	$a_k = 82 \text{ mm}$
rameno kliky:	$l_R := 0.015 \cdot m$	$l_R = 15 \text{ mm}$
vnitřní průměr hlavního čepu:	$d_{HC} := 0.035 \cdot m$	$d_{HC} = 35 \text{ mm}$
vnitřní průměr ojnicního čepu:	$d_{OC} := 0.024 \cdot m$	$d_{OC} = 24 \text{ mm}$

7.2 Materiálové charakteristiky:

Litina EN-GJS-1000-5

Mez pevnosti v tahu:	$R_m := 1000 \cdot \text{MPa}$
Modul pružnosti:	$E := 1.68 \cdot 10^5 \cdot \text{MPa}$
Pissonovo číslo:	$\mu := 0.27$
Mez únavy v tahu tlaku:	$\sigma_c := 238 \cdot \text{MPa}$
Mez únavy v ohybu:	$\sigma_{co} := 350 \cdot \text{MPa}$
Mez únavy v krutu:	$\tau_{ck} := 225.8 \cdot \text{MPa}$

7.3 Kontrolní výpočet klikového hřídele:

7.3.1 Kontrolní pevnostní výpočet hlavního čepu:

Nejvíce zatížený je 2. hlavní čep

maximální moment na 2. hlavním čepu: $M_{2\max} := \max(M_{\text{KHC2}})$ $M_{2\max} = 330.026 \text{ N}\cdot\text{m}$

minimální moment na 2. hlavním čepu: $M_{2\min} := \min(M_{\text{KHC2}})$ $M_{2\min} = -188.437 \text{ N}\cdot\text{m}$

průřezový modul hlavního čepu v krutu:
$$W_{\tau\text{HC}} := \frac{\pi}{16} \cdot D_{\text{HC}}^3 \cdot \left[1 - \left(\frac{d_{\text{HC}}}{D_{\text{HC}}} \right)^4 \right]$$

$$W_{\tau\text{HC}} = 1.558 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

maximální tangenciální zatížení hl. čepu: $\tau_{\max} := \frac{M_{2\max}}{W_{\tau\text{HC}}}$ $\tau_{\max} = 21.188 \text{ MPa}$

minimální tangenciální zatížení hl. čepu: $\tau_{\min} := \frac{M_{2\min}}{W_{\tau\text{HC}}}$ $\tau_{\min} = -12.098 \text{ MPa}$

Střední napětí cyklu: $\tau_m := \frac{\tau_{\max} + \tau_{\min}}{2}$ $\tau_m = 4.545 \text{ MPa}$

Amplituda cyklu: $\tau_a := \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2}$ $\tau_a = 16.643 \text{ MPa}$

Součinitel vlivu koncentrace napětí: $K_{\tau} := 1.8$

Součinitel vlivu velikosti součástí: $\varepsilon_{\tau 1} := 0.6$

Součinitel vlivu povrchu: $\varepsilon_{\tau 2} := 1$ $\varepsilon_{\tau} := \varepsilon_{\tau 1} \cdot \varepsilon_{\tau 2}$

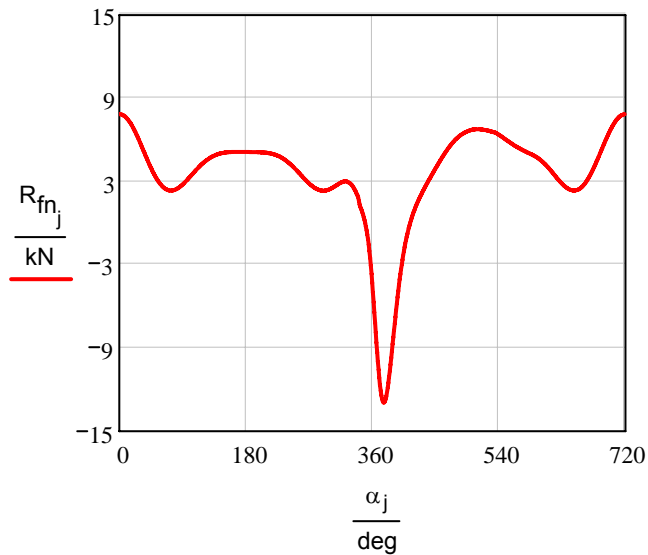
Součinitel asymetrie cyklu: $\psi_{\tau} := 0.05$

Míra bezpečnosti hlavních čepů
$$n_{\tau} := \frac{\tau_{\text{ck}}}{\frac{K_{\tau}}{\varepsilon_{\tau}} \cdot \tau_a + \psi_{\tau} \cdot \tau_m}$$
 $n_{\tau} = 4.502$

7.3.2 Kontrolní pevnostní výpočet ojničního čepu:

7.3.2.1 Silové vyvážení

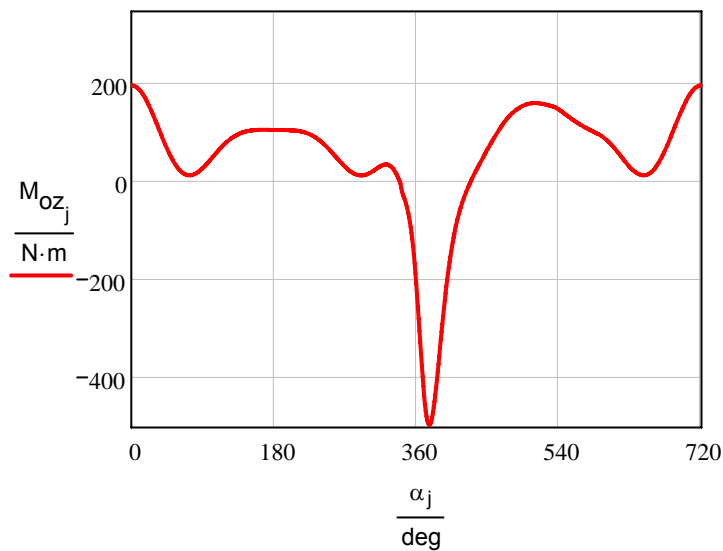
Vzdálenosti působících sil:	$aa := \frac{l_{HC} + l_R}{2}$	$l_k := l_{HC} + l_{OC} + 2 \cdot l_R$
Poloha težiště vývažku:	$r_V := 44 \cdot \text{mm}$	
Hmotnost vývažku:	$m_V := 0.437 \cdot \text{kg}$	
Redukovaná hmotnost vývažku:	$m_{Vred} := m_V \cdot \frac{r_V}{r}$	$m_{Vred} = 0.443 \text{ kg}$
Poloha težiště ramene:	$r_r := 25.1 \cdot \text{mm}$	
Hmotnost ramene:	$m_r := 0.200 \text{ kg}$	
Redukovaná hmotnost ramene kliky:	$m_{rred} := m_r \cdot \frac{r_r}{r}$	$m_{rred} = 0.116 \text{ kg}$
Hmotnost rotačních částí ojnice:	$m_2 = 0.155 \text{ kg}$	
Hmotnost ojničního čepu:	$m_{OC} := 0.1046 \cdot \text{kg}$	
Odstředivá síla rotačních částí ojnice:	$F_{SRO} := m_2 \cdot r \cdot \omega^2$	$F_{SRO} = 1.846 \text{ kN}$
Odstředivá síla ojničního čepu:	$F_{SOC} := m_{OC} \cdot r \cdot \omega^2$	$F_{SOC} = 1.246 \text{ kN}$
Odstředivá síla vývažku	$F_{SV} := m_{Vred} \cdot r \cdot \omega^2$	$F_{SV} = 5.271 \text{ kN}$
Odstředivá síla ramene kliky:	$F_{SRK} := m_{rred} \cdot r \cdot \omega^2$	$F_{SRK} = 1.376 \text{ kN}$
Celková odstředivá síla rotačních částí:	$F_C := 2 \cdot F_{SRO} + F_{SOC} + 2 \cdot F_{SRK} - 2 \cdot F_{SV}$	
Reakční síla na normálovou sílu:	$R_{fn} := F_r - \frac{F_{SRO} + F_{SOC} + 2 \cdot F_{SRK} - 2 \cdot F_{SV}}{2}$	



Maximum reakční síly: $\max(R_{fn}) = 7.86 \text{ kN}$

Minimum reakční síly: $\min(R_{fn}) = -12.932 \text{ kN}$

Ohybový moment v rovině zalomení: $M_{oz} := R_{fn} \cdot \frac{l_k}{2} + (F_{SRK} - F_{SV}) \cdot \left(\frac{l_k}{2} - aa \right) - F_r \cdot \frac{l_{OC}}{4}$

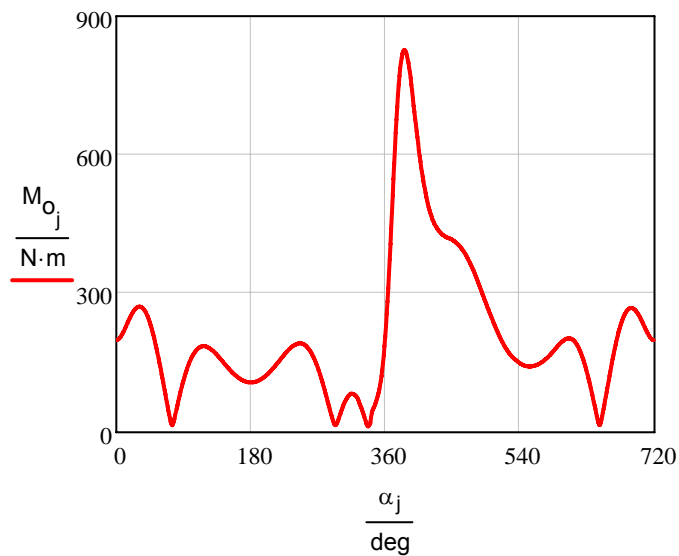


Reakce od tangenciální síly: $R_{ft} := F_t$

Moment namáhající čep na ohyb v rovině kolmé k rovině zalomení klikového hřídele:

$$M_{ot} := F_t \cdot \frac{l_{OC}}{4} + R_{ft} \cdot l_k$$

Celkový ohybový moment:
$$M_{O_j} := \sqrt{(M_{Oz_j})^2 + (M_{Ot_j})^2}$$

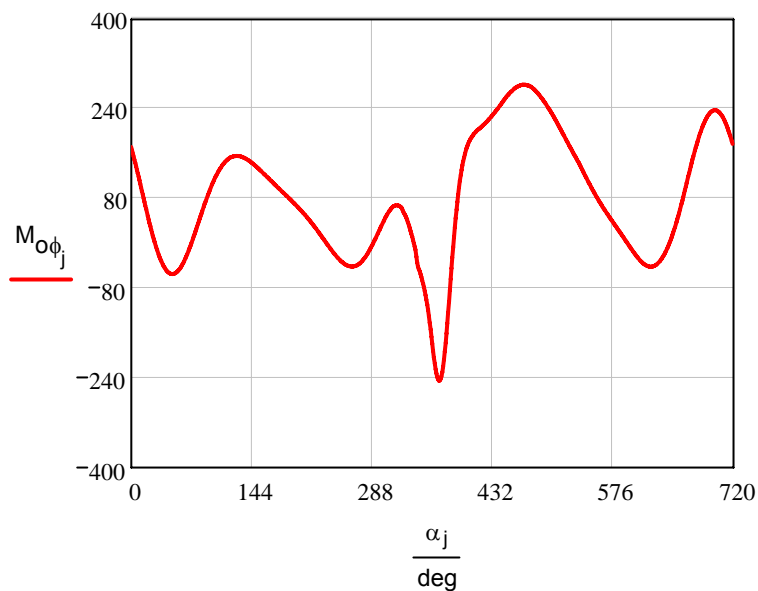


Úhel mezi rovinou zalomení a rovinou mazacího otvoru:

$$\phi := 30 \cdot \text{deg}$$

Moment procházející rovinou mazacího otvoru:

$$M_{O\phi_j} := (M_{Oz_j} \cdot \cos(\phi) + M_{Ot_j} \cdot \sin(\phi))$$



$$M_{O\phi\text{MAX}} := \max(M_{O\phi})$$

$$M_{O\phi\text{MAX}} = 283.16 \text{ Nm}$$

$$M_{O\phi\text{MIN}} := \min(M_{O\phi})$$

$$M_{O\phi\text{MIN}} = -245.221 \text{ Nm}$$

Tento moment nabývá kladných i záporných hodnot to znamená, že na okrajích mazacího otvoru vyvolává střídavě tlak a tah.

Stanovení míry bezpečnosti při únavovém namáhání ohybem:

Průřezový modul ojnicního čepu:
$$W_{\sigma OC} := \frac{\pi}{32} \cdot D_{OC}^3 \cdot \left[1 - \left(\frac{d_{OC}}{D_{OC}} \right)^4 \right]$$

$$W_{\sigma OC} = 6.498 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

Mezní hodnoty napětí.

$$\sigma_{\max} := \frac{M_{o\phi MAX}}{W_{\sigma OC}} \quad \sigma_{\max} = 43.576 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\min} := \frac{M_{o\phi MIN}}{W_{\sigma OC}} \quad \sigma_{\min} = -37.738 \text{ MPa}$$

Střední napětí cyklu:

$$\sigma_m := \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad \sigma_m = 2.919 \text{ MPa}$$

Amplituda cyklu:

$$\sigma_a := \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad \sigma_a = 40.657 \text{ MPa}$$

Součinitel vlivu koncentrace napětí:

$$K_{\sigma} := 2$$

Součinitel vlivu velikosti součástí:

$$\varepsilon_{\sigma 1} := 0.7$$

Součinitel vlivu povrchu:

$$\varepsilon_{\sigma 2} := 1 \quad \varepsilon_{\sigma} := \varepsilon_{\sigma 1} \cdot \varepsilon_{\sigma 2}$$

Součinitel asymetrie cyklu:

$$\psi_{\sigma} := 0.1$$

Míra bezpečnosti ojnicních čepů:

$$n_{\sigma} := \frac{\sigma_{co}}{\frac{K_{\sigma}}{\varepsilon_{\sigma}} \cdot \sigma_a + \psi_{\sigma} \cdot \sigma_m} \quad n_{\sigma} = 3.005$$

Stanovení míry bezpečnosti při únavovém namáhání krutem:

$$M_{KOCmax} := \max(M_{KOC2}) \quad M_{KOCmax} = 286.231 \text{ J}$$

$$M_{KOCmin} := \min(M_{KOC2}) \quad M_{KOCmin} = -85.033 \text{ N}\cdot\text{m}$$

průřezový modul ojnicního čepu v krutu:

$$W_{\tau OC} := \frac{\pi}{16} \cdot D_{OC}^3 \cdot \left[1 - \left(\frac{d_{OC}}{D_{OC}} \right)^4 \right]$$

$$W_{\tau OC} = 1.3 \times 10^4 \text{ mm}^3$$

maximální tangenciální zatížení oj. čepu:

$$\tau_{\max} := \frac{M_{KOCmax}}{W_{\tau OC}} \quad \tau_{\max} = 22.024 \text{ MPa}$$

minimální tangenciální zatížení oj. čepu: $\tau_{\min} := \frac{M_{KOCmin}}{W_{\tau OC}}$ $\tau_{\min} = -6.543 \text{ MPa}$

Střední napětí cyklu: $\tau_m := \frac{\tau_{\max} + \tau_{\min}}{2}$ $\tau_m = 7.741 \text{ MPa}$

Amplituda cyklu: $\tau_a := \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2}$ $\tau_a = 14.284 \text{ MPa}$

Součinitel vlivu koncentrace napětí: $K_{\tau} = 1.8$

Součinitel vlivu velikosti součásti: $\varepsilon_{\tau 1} = 0.6$

Součinitel vlivu povrchu: $\varepsilon_{\tau} = 0.6$

$$\varepsilon_{\tau 2} := \varepsilon_{\tau 1} \cdot \varepsilon_{\tau}$$

Součinitel asymetrie cyklu: $\psi_{\tau} := 0.05$

Míra bezpečnosti oj. čepů $n_{\tau} := \frac{\tau_{ck}}{\frac{K_{\tau}}{\varepsilon_{\tau}} \cdot \tau_a + \psi_{\tau} \cdot \tau_m}$ $n_{\tau} = 5.222$

Výsledná míra bezpečnosti kombinovaného namáhání krutem a ohybem:

$$n := \frac{n_{\sigma} \cdot n_{\tau}}{\sqrt{n_{\sigma}^2 + n_{\tau}^2}}$$
 $n = 2.605$

7.3.2.2 Momentové vyvážení:

Vzdálenosti působících sil:
$$aa := \frac{l_{HC} + l_R}{2} \quad ll := l_{HC} + l_{OC} + 2 \cdot l_R$$

Poloha těžiště vývažku:
$$r_{TV} := 44 \cdot \text{mm}$$

Hmotnost vývažku:
$$m_v := 0.67 \cdot \text{kg}$$

Redukovaná hmotnost vývažku:
$$m_{v_red} := m_v \cdot \frac{r_{TV}}{r} \quad m_{v_red} = 0.678 \text{ kg}$$

Poloha těžiště ramene:
$$r_{Tr} := 28.653 \cdot \text{mm}$$

Hmotnost ramene:
$$m_r := 0.225 \cdot \text{kg}$$

Redukovaná hmotnost ramene kliky:
$$m_{r_red} := m_r \cdot \frac{r_{Tr}}{r} \quad m_{r_red} = 0.148 \text{ kg}$$

Hmotnost rotační části ojnice:
$$m_2 = 0.155 \text{ kg}$$

Hmotnost ojnicního čepu (dutého):
$$m_{oc} := 0.1046 \cdot \text{kg}$$

Redukovaná hmotnost ramene kliky:
$$m_{r_red} = 0.148 \text{ kg}$$

Odstředivá síla rotujících částí ojnice:
$$F_{SRO} := m_2 \cdot r \cdot \omega^2 \quad F_{SRO} = 1.846 \text{ kN}$$

Odstředivá síla ojnicního čepu:
$$F_{SOC} := m_{oc} \cdot r \cdot \omega^2 \quad F_{SOC} = 1.246 \text{ kN}$$

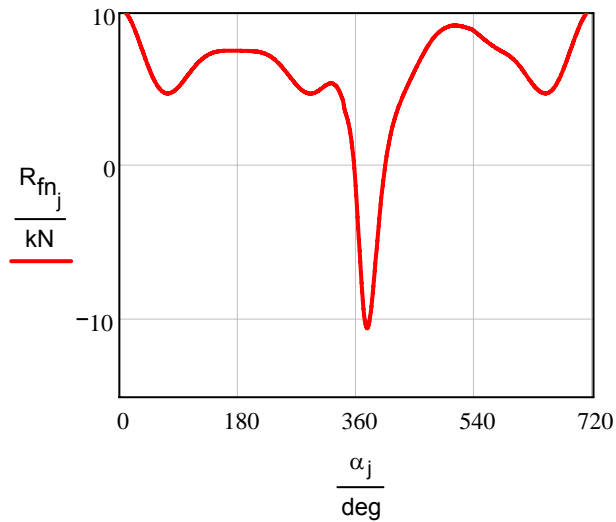
Odstředivá síla ramene kliky:
$$F_{SRK} := m_{r_red} \cdot r \cdot \omega^2 \quad F_{SRK} = 1.767 \text{ kN}$$

Odstředivá síla vývažku:
$$F_{SV} := m_{v_red} \cdot r \cdot \omega^2 \quad F_{SV} = 8.082 \text{ kN}$$

Celková odstředivá síla rotujících hmotností:
$$F_C := 2 \cdot F_{SRO} + F_{SOC} + 2 \cdot F_{SRK} - 2 \cdot F_{SV}$$

Reakční síla na normálovou sílu:

$$R_{fn} := F_r - \frac{F_{SRO} + F_{SOC} + 2 \cdot F_{SRK} - 2 \cdot F_{SV}}{2}$$

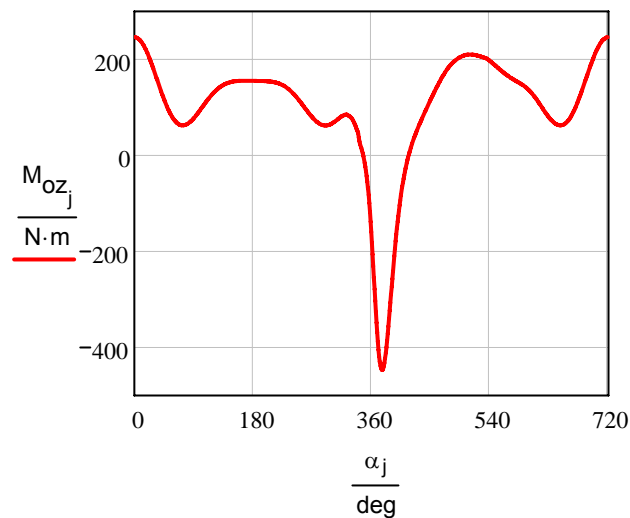


Maximum reakční síly: $\max(R_{fn}) = 10.28 \text{ kN}$

Minimum reakční síly: $\min(R_{fn}) = -10.513 \text{ kN}$

Ohybový moment v rovine zalomení:

$$M_{oz_j} := R_{fn} \cdot \frac{l}{2} + (F_{SRK} - F_{SV}) \cdot \left(\frac{l}{2} - aa \right) - F_t \cdot \frac{l_{OC}}{4}$$



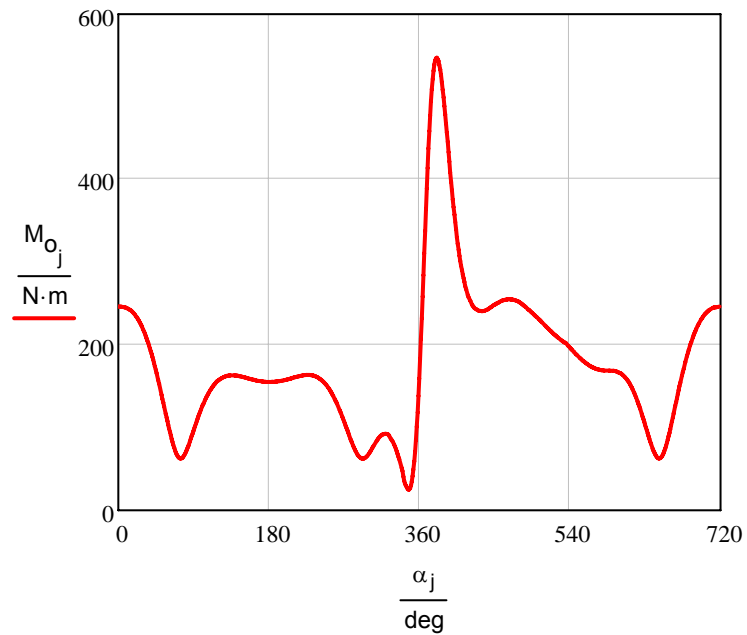
Reakce od tangencialni síly: $R_{ft} := F_t$

Moment ohybající klikový cep v rovine kolme na rovinu zalomení:

$$M_{ot} := R_{ft} \cdot \frac{l}{2} + F_t \cdot \frac{l_{OC}}{4}$$

Celkový ohybový moment:

$$M_o := \sqrt{M_{Oz}^2 + M_{Ot}^2}$$

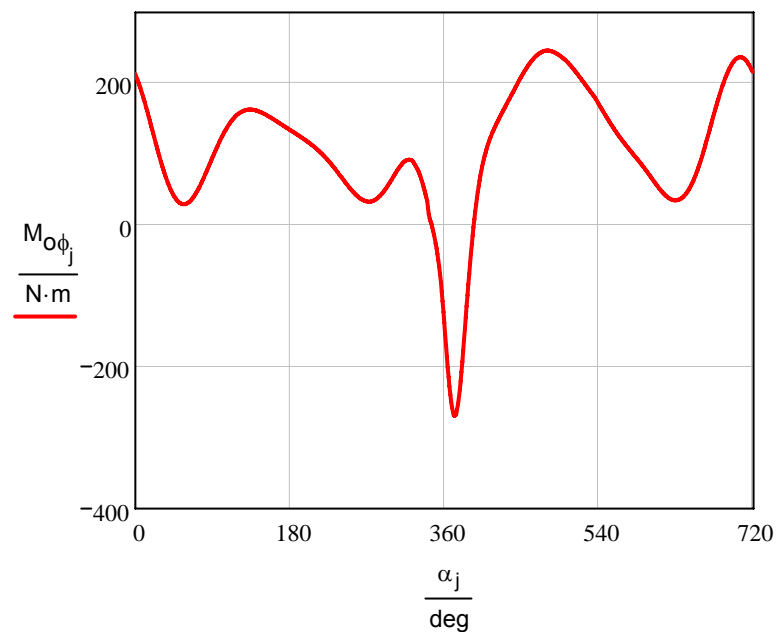


Uhel mezi rovinou zalomeni a rovinou mazaciho otvoru:

$$\phi := 30 \cdot \text{deg}$$

Ohybový moment pusobici v rovine mazaciho otvoru:

$$M_{O\phi} := M_{Oz} \cdot \cos(\phi) + M_{Ot} \cdot \sin(\phi)$$



Tento moment nabývá záporných i kladných hodnot, to znamená, že na okrajích mazaciho otvoru vyvolává střídavě tlakové a tahové napětí.

Stanovení míry bezpečnosti při unavovém namáhání ohybem:

$$M_{O\phi\max} := \max(M_{O\phi}) \quad M_{O\phi\max} = 246.182 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$M_{O\phi\min} := \min(M_{O\phi}) \quad M_{O\phi\min} = -269.4 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Mezni hodnoty napětí:

$$\sigma_{\max} := \frac{M_{O\phi\max}}{W_{\sigma OC}} \quad \sigma_{\max} = 37.886 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\min} := \frac{M_{O\phi\min}}{W_{\sigma OC}} \quad \sigma_{\min} = -41.459 \text{ MPa}$$

Střední napětí cyklu:

$$\sigma_m := \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad \sigma_m = -1.787 \text{ MPa}$$

Amplituda cyklu:

$$\sigma_a := \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad \sigma_a = 39.672 \text{ MPa}$$

Součinitel vlivu koncentrace napětí:

$$K_{\sigma} := 2$$

Součinitel vlivu velikosti součásti:

$$\varepsilon_{\sigma 1} := 0.7$$

Součinitel vlivu povrchu:

$$\varepsilon_{\sigma 2} := 1 \quad \varepsilon_{\sigma} := \varepsilon_{\sigma 1} \cdot \varepsilon_{\sigma 2}$$

Součinitel vlivu asymetrie cyklu:

$$\psi_{\sigma} := 0.1$$

Míra bezpečnosti ojnicích čepů :

$$n_{\sigma} := \frac{\sigma_{co}}{\frac{K_{\sigma}}{\varepsilon_{\sigma}} \cdot \sigma_a + \psi_{\sigma} \cdot \sigma_m} \quad n_{\sigma} = 3.093$$

Stanovení míry bezpečnosti při unavovém namáhání krutem:

Maximální a minimální moment na nejvíce zatíženém ojnicním čepu:

$$M_{KOCmax} := \max(M_{KOC2})$$

$$M_{KOCmax} = 286.231 \text{ J}$$

$$M_{KOCmin} := \min(M_{KOC2})$$

$$M_{KOCmin} = -85.033 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Maximální a minimální tangenciální napětí:

$$\tau_{max} := \frac{M_{KOCmax}}{W_{\tau OC}} \quad \tau_{max} = 22.024 \text{ MPa}$$

$$\tau_{min} := \frac{M_{KOCmin}}{W_{\tau OC}} \quad \tau_{min} = -6.543 \text{ MPa}$$

Střední napětí cyklu:

$$\tau_m := \frac{\tau_{max} + \tau_{min}}{2} \quad \tau_m = 7.741 \text{ MPa}$$

Amplituda cyklu:

$$\tau_a := \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{2} \quad \tau_a = 14.284 \text{ MPa}$$

Součinitel vlivu koncentrace napětí:

$$K_{\tau} = 1.8$$

Součinitel vlivu velikosti součásti:

$$\varepsilon_{\tau 1} = 0.6$$

Součinitel vlivu povrchu:

$$\varepsilon_{\tau 2} = 1 \quad \varepsilon_{\tau} := \varepsilon_{\tau 1} \cdot \varepsilon_{\tau 2}$$

Součinitel vlivu asymetrie cyklu:

$$\psi_{\tau} = 0.05$$

Míra bezpečnosti ojnicních čepů :

$$n_{\tau} := \frac{\tau_{ck}}{\frac{K_{\tau}}{\varepsilon_{\tau}} \cdot \tau_a + \psi_{\tau} \cdot \tau_m} \quad n_{\tau} = 5.222$$

Výsledná míra bezpečnosti pro kombinované namáhání ojnicního čepu ohybem a krutem:

$$n := \frac{n_{\sigma} \cdot n_{\tau}}{\sqrt{n_{\sigma}^2 + n_{\tau}^2}} \quad n = 2.661$$

7.3.2.3 Momentové vyvážení

Vzdálenosti působících sil:
$$a_a := \frac{I_{HC} + I_R}{2} \quad I_a := I_{HC} + I_{OC} + 2 \cdot I_R$$

Poloha těžiště vývažku:
$$r_{TV} := 44 \cdot \text{mm}$$

Hmotnost vývažku:
$$m_v := 0.207 \cdot \text{kg}$$

Redukovaná hmotnost vývažku:
$$m_{v_red} := m_v \cdot \frac{r_{TV}}{r} \quad m_{v_red} = 0.21 \text{ kg}$$

Poloha těžiště ramene:
$$r_{Tr} := 28.653 \cdot \text{mm}$$

Hmotnost ramene:
$$m_r := 0.225 \cdot \text{kg}$$

Redukovaná hmotnost ramene kliky:
$$m_{r_red} := m_r \cdot \frac{r_{Tr}}{r} \quad m_{r_red} = 0.148 \text{ kg}$$

Hmotnost rotační části ojnice:
$$m_2 = 0.155 \text{ kg}$$

Hmotnost ojnicního čepu (dutého):
$$m_{oc} := 0.1046 \cdot \text{kg}$$

Redukovaná hmotnost ramene kliky:
$$m_{r_red} = 0.148 \text{ kg}$$

Odstředivá síla rotujících částí ojnice:
$$F_{SRO} := m_2 \cdot r \cdot \omega^2 \quad F_{SRO} = 1.846 \text{ kN}$$

Odstředivá síla ojnicního čepu:
$$F_{SOC} := m_{oc} \cdot r \cdot \omega^2 \quad F_{SOC} = 1.246 \text{ kN}$$

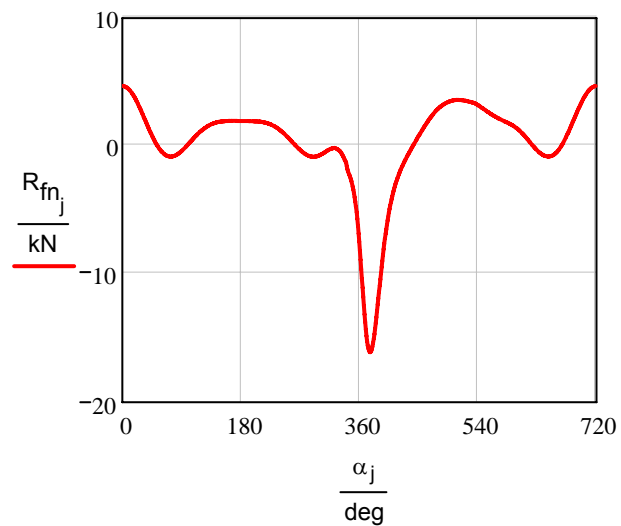
Odstředivá síla ramene kliky:
$$F_{SRK} := m_{r_red} \cdot r \cdot \omega^2 \quad F_{SRK} = 1.767 \text{ kN}$$

Odstředivá síla vývažku:
$$F_{SV} := m_{v_red} \cdot r \cdot \omega^2 \quad F_{SV} = 2.497 \text{ kN}$$

Celková odstředivá síla rotujících hmotností:
$$F_C := 2 \cdot F_{SRO} + F_{SOC} + 2 \cdot F_{SRK} - 2 \cdot F_{SV}$$

Reakční síla na normálovou sílu:

$$R_{fn} := F_r - \frac{F_{SRO} + F_{SOC} + 2 \cdot F_{SRK} - 2 \cdot F_{SV}}{2}$$

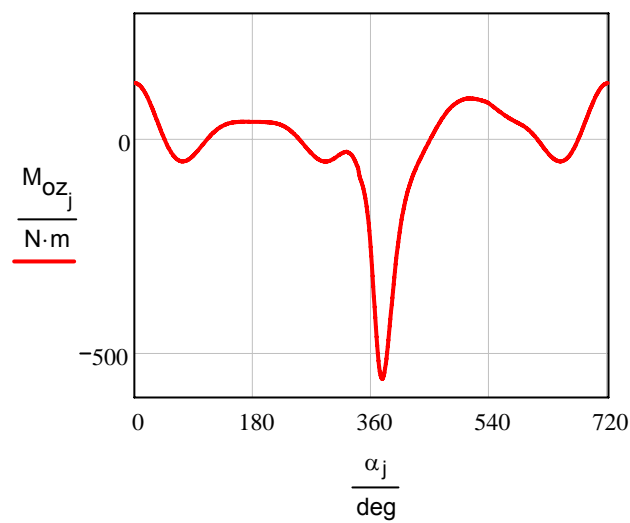


Maximum reakční síly: $\max(R_{fn}) = 4.695 \text{ kN}$

Minimum reakční síly: $\min(R_{fn}) = -16.098 \text{ kN}$

Ohybový moment v rovine zalomení:

$$M_{ozj} := R_{fn} \cdot \frac{l}{2} + (F_{SRK} - F_{SV}) \cdot \left(\frac{l}{2} - aa \right) - F_r \cdot \frac{l_{OC}}{4}$$



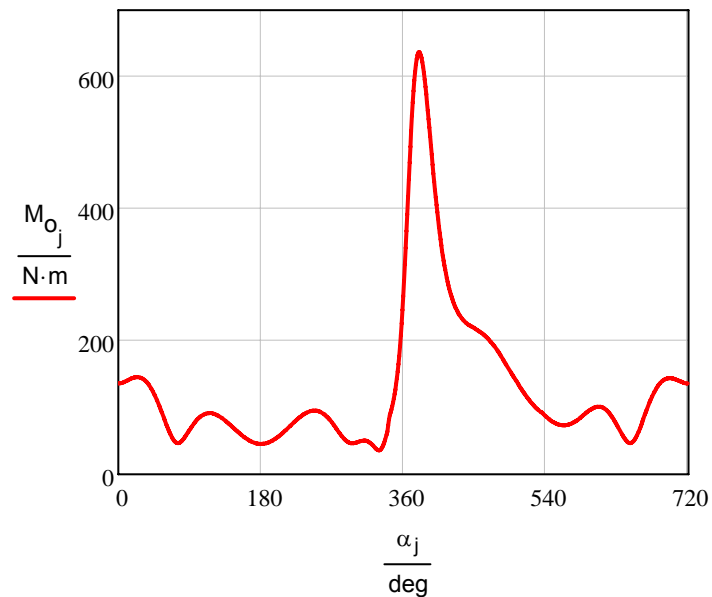
Reakce od tangencialni síly: $R_{ft} := F_t$

Moment ohybající klikový cep v rovine kolme na rovinu zalomení:

$$M_{ot} := R_{ft} \cdot \frac{l}{2} + F_t \cdot \frac{l_{OC}}{4}$$

Celkový ohybový moment:

$$M_{O\alpha} := \sqrt{M_{OZ}^2 + M_{Ot}^2}$$

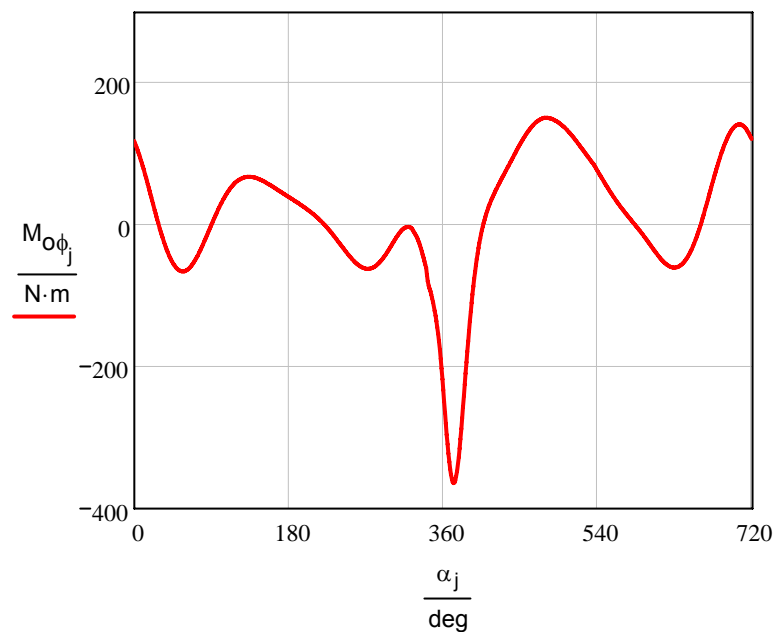


Uhel mezi rovinou zalomeni a rovinou mazaciho otvoru:

$$\phi := 30 \cdot \text{deg}$$

Ohybový moment pusobici v rovine mazaciho otvoru:

$$M_{O\phi} := M_{OZ} \cdot \cos(\phi) + M_{Ot} \cdot \sin(\phi)$$



Tento moment nabývá záporných i kladných hodnot, to znamená, že na okrajích mazaciho otvoru vyvolává střídavě tlakové a tahové napětí.

Stanovení míry bezpečnosti při unavovém namáhání ohybem:

$$M_{o\phi\max} := \max(M_{o\phi}) \quad M_{o\phi\max} = 151.38 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$M_{o\phi\min} := \min(M_{o\phi}) \quad M_{o\phi\min} = -364.202 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Mezni hodnoty napeti:

$$\sigma_{\max} := \frac{M_{o\phi\max}}{W_{\sigma OC}} \quad \sigma_{\max} = 23.296 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\min} := \frac{M_{o\phi\min}}{W_{\sigma OC}} \quad \sigma_{\min} = -56.048 \text{ MPa}$$

Střední napětí cyklu:

$$\sigma_m := \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad \sigma_m = -16.376 \text{ MPa}$$

Amplituda cyklu:

$$\sigma_a := \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad \sigma_a = 39.672 \text{ MPa}$$

Součinitel vlivu koncentrace napětí:

$$K_{\sigma} := 2$$

Součinitel vlivu velikosti součásti:

$$\varepsilon_{\sigma 1} := 0.7$$

Součinitel vlivu povrchu:

$$\varepsilon_{\sigma 2} := 1 \quad \varepsilon_{\sigma} := \varepsilon_{\sigma 1} \cdot \varepsilon_{\sigma 2}$$

Součinitel vlivu asymetrie cyklu:

$$\psi_{\sigma} := 0.1$$

Míra bezpečnosti ojnicních čepů :

$$n_{\sigma} := \frac{\sigma_{co}}{\frac{K_{\sigma}}{\varepsilon_{\sigma}} \cdot \sigma_a + \psi_{\sigma} \cdot \sigma_m} \quad n_{\sigma} = 3.133$$

Stanovení míry bezpečnosti při unavovém namáhání krutem:

Maximální a minimální moment na nejvíce zatíženém ojnicním čepu:

$$M_{KOCmax} := \max(M_{KOC2})$$

$$M_{KOCmax} = 286.231 \text{ J}$$

$$M_{KOCmin} := \min(M_{KOC2})$$

$$M_{KOCmin} = -85.033 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Průřezový modul ojnicního čepu v krutu:

$$W_{\tau OC} := \frac{\pi}{16} \cdot D_{OC}^3 \cdot \left[1 - \left(\frac{d_{OC}}{D_{OC}} \right)^4 \right]$$

$$W_{\tau OC} = 1.3 \times 10^4 \text{ mm}^3$$

Maximální a minimální tangenciální napětí:

$$\tau_{max} := \frac{M_{KOCmax}}{W_{\tau OC}} \quad \tau_{max} = 22.024 \text{ MPa}$$

$$\tau_{min} := \frac{M_{KOCmin}}{W_{\tau OC}} \quad \tau_{min} = -6.543 \text{ MPa}$$

Střední napětí cyklu:

$$\tau_m := \frac{\tau_{max} + \tau_{min}}{2} \quad \tau_m = 7.741 \text{ MPa}$$

Amplituda cyklu:

$$\tau_a := \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{2} \quad \tau_a = 14.284 \text{ MPa}$$

Součinitel vlivu koncentrace napětí:

$$K_{\tau} = 1.8$$

Součinitel vlivu velikosti součásti:

$$\varepsilon_{\tau 1} = 0.6$$

Součinitel vlivu povrchu:

$$\varepsilon_{\tau 2} = 1$$

$$\varepsilon_{\tau} := \varepsilon_{\tau 1} \cdot \varepsilon_{\tau 2}$$

Součinitel vlivu asymetrie cyklu:

$$\psi_{\tau} = 0.05$$

Míra bezpečnosti ojnicních čepů :

$$n_{\tau} := \frac{\tau_{ck}}{\frac{K_{\tau}}{\varepsilon_{\tau}} \cdot \tau_a + \psi_{\tau} \cdot \tau_m}$$

$$n_{\tau} = 5.222$$

Výsledná míra bezpečnosti pro kombinované namáhání ojnicního čepu ohybem a krutem:

$$n := \frac{n_{\sigma} \cdot n_{\tau}}{\sqrt{n_{\sigma}^2 + n_{\tau}^2}}$$

$$n = 2.687$$

7.3.3 Kontrolní pevnostní výpočet ramene kliky:

7.3.3.1 Silové vyvážení

Vzdálenosti působících sil:
$$a_a := \frac{l_{HC} + l_R}{2} \quad l_l := l_{HC} + l_{OC} + 2 \cdot l_R$$

Poloha těžiště vývažku:
$$r_{TV} := 44 \cdot \text{mm}$$

Hmotnost vývažku:
$$m_v := 0.437 \cdot \text{kg}$$

Redukovaná hmotnost vývažku:
$$m_{v_red} := m_v \cdot \frac{r_{TV}}{r} \quad m_{v_red} = 0.443 \text{ kg}$$

Poloha těžiště ramene:
$$r_{Tr} := 28.653 \cdot \text{mm}$$

Hmotnost ramene:
$$m_r := 0.245 \cdot \text{kg}$$

Redukovaná hmotnost ramene kliky:
$$m_{r_red} := m_r \cdot \frac{r_{Tr}}{r} \quad m_{r_red} = 0.162 \text{ kg}$$

Hmotnost rotační části ojnice:
$$m_2 = 0.155 \text{ kg}$$

Hmotnost ojničního čepu (dutého):
$$m_{oc} := 0.1046 \cdot \text{kg}$$

Redukovaná hmotnost ramene kliky:
$$m_{r_red} = 0.162 \text{ kg}$$

Odstředivá síla rotujících částí ojnice:
$$F_{SRO} := m_2 \cdot r \cdot \omega^2 \quad F_{SRO} = 1.846 \text{ kN}$$

Odstředivá síla ojničního čepu:
$$F_{SOC} := m_{oc} \cdot r \cdot \omega^2 \quad F_{SOC} = 1.246 \text{ kN}$$

Odstředivá síla ramene kliky:
$$F_{SRK} := m_{r_red} \cdot r \cdot \omega^2 \quad F_{SRK} = 1.925 \text{ kN}$$

Odstředivá síla vývažku:
$$F_{SV} := m_{v_red} \cdot r \cdot \omega^2 \quad F_{SV} = 5.271 \text{ kN}$$

Celková odstředivá síla rotujících hmotností:
$$F_C := 2 \cdot F_{SRO} + F_{SOC} + 2 \cdot F_{SRK} - 2 \cdot F_{SV}$$

Reakční síla na normálovou sílu:

$$R_{fn} := F_r - \frac{F_{SRO} + F_{SOC} + 2 \cdot F_{SRK} - 2 \cdot F_{SV}}{2}$$

Reakce od tangencialní síly:
$$R_{ft} := F_t$$

Stanovení míry bezpečnosti při unavovém namáhání ohybem:

Ohybový moment namáhající rameno: $M_{OR} := R_{fn} \cdot aa$

Šířka ramene: $b := 48 \cdot \text{mm}$

Tloušťka ramene kliky: $h := 16.5 \cdot \text{mm}$

$$S_R := b \cdot h \quad W_{\sigma R} := \frac{b \cdot h^2}{6}$$

Celkové normálové napětí od ohybu a tahu/tlaku: $\sigma := \frac{M_{OR}}{W_{\sigma R}} + \frac{R_{fn}}{S_R}$

Největší a nejmenší napětí vyvolané dynamickým cyklickým namáháním:

$$\sigma_{\max} := \frac{\max(F_{rc}) - F_C}{2} \cdot \left(\frac{aa}{W_{\sigma R}} + \frac{1}{S_R} \right) \quad \sigma_{\max} = 46.755 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\min} := \frac{\min(F_{rc}) - F_C}{2} \cdot \left(\frac{aa}{W_{\sigma R}} + \frac{1}{S_R} \right) \quad \sigma_{\min} = -59.927 \text{ MPa}$$

Střední napětí cyklu: $\sigma_m := \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad \sigma_m = -6.586 \text{ MPa}$

Amplituda cyklu: $\sigma_a := \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad \sigma_a = 53.341 \text{ MPa}$

Součinitel vlivu koncentrace napětí: $K_{\sigma} := 2$

Součinitel vlivu velikosti součásti: $\varepsilon_{\sigma 1} := 1$

Součinitel vlivu povrchu: $\varepsilon_{\sigma 2} := 1.15 \quad \varepsilon_{\sigma} := \varepsilon_{\sigma 1} \cdot \varepsilon_{\sigma 2}$

Součinitel asymetrie cyklu: $\psi_{\sigma} := 0.1$

Míra bezpečnosti ramene kliky: $n_{\sigma} := \frac{\sigma_{co}}{\frac{K_{\sigma}}{\varepsilon_{\sigma}} \cdot \sigma_a + \psi_{\sigma} \cdot \sigma_m} \quad n_{\sigma} = 3.8$

Stanovení míry bezpečnosti při unavovém namáhání krutem:

Kroutící moment namáhající rameno: $M_{KR} := R_{ft} \cdot aa$

Součinitel α : $\alpha := 0.27$

Průřezový modul obdélníkového profilu ramene kliky pro krut:

$$W_{\tau R} := \alpha \cdot b \cdot h^2 \quad W_{\tau R} = 3.528 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

maximální smykové napětí:

$$\tau_{\max} := \frac{\max(M_{KR})}{W_{\tau R}} \quad \tau_{\max} = 47.71 \text{ MPa}$$

minimální smykové napětí:

$$\tau_{\min} := \frac{\min(M_{KR})}{W_{\tau R}} \quad \tau_{\min} = -15.994 \text{ MPa}$$

Střední napětí cyklu:

$$\tau_m := \frac{\tau_{\max} + \tau_{\min}}{2} \quad \tau_m = 15.858 \text{ MPa}$$

Amplituda cyklu:

$$\tau_a := \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2} \quad \tau_a = 31.852 \text{ MPa}$$

Součinitel vlivu koncentrace napětí:

$$K_{\tau} := 2$$

Součinitel vlivu velikosti součásti:

$$\varepsilon_{\tau 1} := 1$$

Součinitel vlivu povrchu:

$$\varepsilon_{\tau 2} := 1.15 \quad \varepsilon_{\tau} := \varepsilon_{\tau 1} \cdot \varepsilon_{\tau 2}$$

Součinitel asymetrie cyklu:

$$\psi_{\tau} := 0.05$$

Míra bezpečnosti ramene v krutu

$$n_{\tau} := \frac{\tau_{ck}}{\frac{K_{\tau}}{\varepsilon_{\tau}} \cdot \tau_a + \psi_{\tau} \cdot \tau_m} \quad n_{\tau} = 4.019$$

Výsledná míra bezpečnosti kombinovaného namáhání krutem a ohybem:

$$n := \frac{n_{\sigma} \cdot n_{\tau}}{\sqrt{n_{\sigma}^2 + n_{\tau}^2}} \quad n = 2.761$$

7.3.3.2 Momentové vyvážení

Vzdálenosti působících sil:
$$a_a := \frac{l_{HC} + l_R}{2} \quad l_l := l_{HC} + l_{OC} + 2 \cdot l_R$$

Poloha těžiště vývažku:
$$r_{TV} := 44 \cdot \text{mm}$$

Hmotnost vývažku:
$$m_v := 0.67 \cdot \text{kg}$$

Redukovaná hmotnost vývažku:
$$m_{v_red} := m_v \cdot \frac{r_{TV}}{r} \quad m_{v_red} = 0.678 \text{ kg}$$

Poloha těžiště ramene:
$$r_{Tr} := 28.653 \cdot \text{mm}$$

Hmotnost ramene:
$$m_r := 0.245 \cdot \text{kg}$$

Redukovaná hmotnost ramene kliky:
$$m_{r_red} := m_r \cdot \frac{r_{Tr}}{r} \quad m_{r_red} = 0.162 \text{ kg}$$

Hmotnost rotační části ojnice:
$$m_2 = 0.155 \text{ kg}$$

Hmotnost ojnicního čepu (dutého):
$$m_{oc} := 0.1046 \cdot \text{kg}$$

Redukovaná hmotnost ramene kliky:
$$m_{r_red} = 0.162 \text{ kg}$$

Odstředivá síla rotujících částí ojnice:
$$F_{SRO} := m_2 \cdot r \cdot \omega^2 \quad F_{SRO} = 1.846 \text{ kN}$$

Odstředivá síla ojnicního čepu:
$$F_{SOC} := m_{oc} \cdot r \cdot \omega^2 \quad F_{SOC} = 1.246 \text{ kN}$$

Odstředivá síla ramene kliky:
$$F_{SRK} := m_{r_red} \cdot r \cdot \omega^2 \quad F_{SRK} = 1.925 \text{ kN}$$

Odstředivá síla vývažku:
$$F_{SV} := m_{v_red} \cdot r \cdot \omega^2 \quad F_{SV} = 8.082 \text{ kN}$$

Celková odstředivá síla rotujících hmotností:
$$F_{C} := 2 \cdot F_{SRO} + F_{SOC} + 2 \cdot F_{SRK} - 2 \cdot F_{SV}$$

Reakční síla na normálovou sílu:

$$R_{fn} := F_r - \frac{F_{SRO} + F_{SOC} + 2 \cdot F_{SRK} - 2 \cdot F_{SV}}{2}$$

Reakce od tangencialní síly:
$$R_{ft} := F_t$$

Stanovení míry bezpečnosti při unavovém namáhání ohybem:

Ohybový moment namáhající rameno: $M_{OR} := R_{fn} \cdot aa$

Šířka ramene v přechodu do ojnicního čepu: $b := 48 \cdot \text{mm}$

Tloušťka ramene kliky: $h := 16.5 \cdot \text{mm}$

$$S_R := b \cdot h \quad W_{\sigma R} := \frac{b \cdot h^2}{6}$$

Celkové normálové napětí od ohybu a tahu-tlaku: $\sigma_w := \frac{M_{OR}}{W_{\sigma R}} + \frac{R_{fn}}{S_R}$

Největší a nejmenší napětí vyvolané dynamickým cyklickým namáháním:

$$\sigma_{\max} := \frac{\max(F_{rc}) - F_C}{2} \cdot \left(\frac{aa}{W_{\sigma R}} + \frac{1}{S_R} \right) \quad \sigma_{\max} = 75.597 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\min} := \frac{\min(F_{rc}) - F_C}{2} \cdot \left(\frac{aa}{W_{\sigma R}} + \frac{1}{S_R} \right) \quad \sigma_{\min} = -31.085 \text{ MPa}$$

Amplituda napětí: $\sigma_a := \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad \sigma_a = 53.341 \text{ MPa}$

Střední napětí: $\sigma_m := \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad \sigma_m = 22.256 \text{ MPa}$

Součinitel vlivu koncentrace napětí: $K_{\sigma} := 2$

Součinitel vlivu velikosti součásti: $\varepsilon_{\sigma 1} := 1$

Součinitel vlivu povrchu: $\varepsilon_{\sigma 2} := 1.15 \quad \varepsilon_{\sigma} := \varepsilon_{\tau 1} \cdot \varepsilon_{\tau 2}$

Součinitel vlivu asymetrie cyklu: $\psi_{\sigma} := 0.1$

Míra bezpečnosti ramene kliky v ohybu: $n_{\sigma} := \frac{\sigma_{co}}{\frac{K_{\sigma}}{\varepsilon_{\sigma}} \cdot \sigma_a + \psi_{\sigma} \cdot \sigma_m} \quad n_{\sigma} = 3.684$

Stanovení míry bezpečnosti při unavovém namáhání krutem:

Krouticí moment namáhající rameno: $M_{KR} := R_{ft} \cdot (aa)$

Součinitel α : $\alpha := 0.27$

Průřezový modul obdélníkového profilu ramene pro krut:

$$W_{\tau R} := \alpha \cdot b \cdot h^2 \quad W_{\tau R} = 3.528 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

Maximální a minimální smykové napětí:

$$\tau_{\max} := \frac{\max(M_{KR})}{W_{\tau R}} \quad \tau_{\max} = 47.71 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\min} := \frac{\min(M_{KR})}{W_{\tau R}} \quad \tau_{\min} = -15.994 \text{ MPa}$$

Střední napětí cyklu:

$$\tau_m := \frac{\tau_{\max} + \tau_{\min}}{2} \quad \tau_m = 15.858 \text{ MPa}$$

Amplituda cyklu:

$$\tau_a := \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2} \quad \tau_a = 31.852 \text{ MPa}$$

Součinitel vlivu koncentrace napětí:

$$K_{\tau} := 2$$

Součinitel vlivu velikosti součásti:

$$\varepsilon_{\tau 1} := 1$$

Součinitel vlivu povrchu:

$$\varepsilon_{\tau 2} := 1.15$$

$$\varepsilon_{\tau} := \varepsilon_{\tau 1} \cdot \varepsilon_{\tau 2}$$

Součinitel vlivu asymetrie cyklu:

$$\psi_{\tau} := 0.05$$

Míra bezpečnosti ramene v krutu :

$$n_{\tau} := \frac{\tau_{ck}}{K_{\tau} \cdot \frac{\tau_a}{\varepsilon_{\tau}} + \psi_{\tau} \cdot \tau_m} \quad n_{\tau} = 4.019$$

Výsledná míra bezpečnosti pro kombinované namáhání ramene kliky ohybem a krutem:

$$n := \frac{n_{\sigma} \cdot n_{\tau}}{\sqrt{n_{\sigma}^2 + n_{\tau}^2}} \quad n = 2.716$$

7.3.3.3 Kombinované vyvážení

Vzdálenosti působících sil:
$$a_a := \frac{l_{HC} + l_R}{2} \quad l_l := l_{HC} + l_{OC} + 2 \cdot l_R$$

Poloha těžiště vývažku:
$$r_{TV} := 44 \cdot \text{mm}$$

Hmotnost vývažku:
$$m_v := 0.207 \cdot \text{kg}$$

Redukovaná hmotnost vývažku:
$$m_{v_red} := m_v \cdot \frac{r_{TV}}{r} \quad m_{v_red} = 0.21 \text{ kg}$$

Poloha těžiště ramene:
$$r_{Tr} := 28.653 \cdot \text{mm}$$

Hmotnost ramene:
$$m_r := 0.245 \cdot \text{kg}$$

Redukovaná hmotnost ramene kliky:
$$m_{r_red} := m_r \cdot \frac{r_{Tr}}{r} \quad m_{r_red} = 0.162 \text{ kg}$$

Hmotnost rotační části ojnice:
$$m_2 = 0.155 \text{ kg}$$

Hmotnost ojničního čepu (dutého):
$$m_{oc} := 0.1046 \cdot \text{kg}$$

Redukovaná hmotnost ramene kliky:
$$m_{r_red} = 0.162 \text{ kg}$$

Odstředivá síla rotujících částí ojnice:
$$F_{SRO} := m_2 \cdot r \cdot \omega^2 \quad F_{SRO} = 1.846 \text{ kN}$$

Odstředivá síla ojničního čepu:
$$F_{SOC} := m_{oc} \cdot r \cdot \omega^2 \quad F_{SOC} = 1.246 \text{ kN}$$

Odstředivá síla ramene kliky:
$$F_{SRK} := m_{r_red} \cdot r \cdot \omega^2 \quad F_{SRK} = 1.925 \text{ kN}$$

Odstředivá síla vývažku:
$$F_{SV} := m_{v_red} \cdot r \cdot \omega^2 \quad F_{SV} = 2.497 \text{ kN}$$

Celková odstředivá síla rotujících hmotností:
$$F_C := 2 \cdot F_{SRO} + F_{SOC} + 2 \cdot F_{SRK} - 2 \cdot F_{SV}$$

Reakční síla na normálovou sílu:

$$R_{fn} := F_r - \frac{F_{SRO} + F_{SOC} + 2 \cdot F_{SRK} - 2 \cdot F_{SV}}{2}$$

Reakce od tangencialní síly:
$$R_{ft} := F_t$$

Stanovení míry bezpečnosti při unavovém namáhání ohybem:

Ohybový moment namáhající rameno: $M_{OR} := R_{fn} \cdot aa$

Šířka ramene v přechodu do ojnicního čepu: $b := 48 \cdot \text{mm}$

Tloušťka ramene kliky: $h := 16.5 \cdot \text{mm}$

$$S_R := b \cdot h \quad W_{\sigma R} := \frac{b \cdot h^2}{6}$$

Celkové normálové napětí od ohybu a tahu-tlaku: $\sigma := \frac{M_{OR}}{W_{\sigma R}} + \frac{R_{fn}}{S_R}$

Největší a nejmenší napětí vyvolané dynamickým cyklickým namáháním:

$$\sigma_{\max} := \frac{\max(F_{rc}) - F_C}{2} \cdot \left(\frac{aa}{W_{\sigma R}} + \frac{1}{S_R} \right) \quad \sigma_{\max} = 18.285 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\min} := \frac{\min(F_{rc}) - F_C}{2} \cdot \left(\frac{aa}{W_{\sigma R}} + \frac{1}{S_R} \right) \quad \sigma_{\min} = -88.397 \text{ MPa}$$

Amplituda napětí: $\sigma_a := \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad \sigma_a = 53.341 \text{ MPa}$

Střední napětí: $\sigma_m := \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad \sigma_m = -35.056 \text{ MPa}$

Součinitel vlivu koncentrace napětí: $K_{\sigma} := 2$

Součinitel vlivu velikosti součásti: $\varepsilon_{\sigma 1} := 1$

Součinitel vlivu povrchu: $\varepsilon_{\sigma 2} := 1.15 \quad \varepsilon_{\sigma} := \varepsilon_{\tau 1} \cdot \varepsilon_{\tau 2}$

Součinitel vlivu asymetrie cyklu: $\psi_{\sigma} := 0.1$

Míra bezpečnosti ramene kliky v ohybu: $n_{\sigma} := \frac{\sigma_{co}}{\frac{K_{\sigma}}{\varepsilon_{\sigma}} \cdot \sigma_a + \psi_{\sigma} \cdot \sigma_m} \quad n_{\sigma} = 3.921$

Stanovení míry bezpečnosti při unavovém namáhání krutem:

Krouticí moment namáhající rameno: $M_{KR} := R_{ft} \cdot (aa)$

Součinitel α : $\alpha := 0.27$

Průřezový modul obdélníkového profilu ramene pro krut:

$$W_{\tau R} := \alpha \cdot b \cdot h^2 \quad W_{\tau R} = 3.528 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

Maximální a minimální smykové napětí:

$$\tau_{\max} := \frac{\max(M_{KR})}{W_{\tau R}} \quad \tau_{\max} = 47.71 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\min} := \frac{\min(M_{KR})}{W_{\tau R}} \quad \tau_{\min} = -15.994 \text{ MPa}$$

Střední napětí cyklu:

$$\tau_m := \frac{\tau_{\max} + \tau_{\min}}{2} \quad \tau_m = 15.858 \text{ MPa}$$

Amplituda cyklu:

$$\tau_a := \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2} \quad \tau_a = 31.852 \text{ MPa}$$

Součinitel vlivu koncentrace napětí:

$$K_{\tau} := 2$$

Součinitel vlivu velikosti součásti:

$$\varepsilon_{\tau 1} := 1$$

Součinitel vlivu povrchu:

$$\varepsilon_{\tau 2} := 1.15$$

$$\varepsilon_{\tau} := \varepsilon_{\tau 1} \cdot \varepsilon_{\tau 2}$$

Součinitel vlivu asymetrie cyklu:

$$\psi_{\tau} := 0.05$$

Míra bezpečnosti ramene v krutu :

$$n_{\tau} := \frac{\tau_{ck}}{K_{\tau} \cdot \frac{\tau_a}{\varepsilon_{\tau}} + \psi_{\tau} \cdot \tau_m} \quad n_{\tau} = 4.019$$

Výsledná míra bezpečnosti pro kombinované namáhání ramene kliky ohybem a krutem:

$$n := \frac{n_{\sigma} \cdot n_{\tau}}{\sqrt{n_{\sigma}^2 + n_{\tau}^2}} \quad n = 2.806$$

8 Vyvažování klikového hřídele:

$$\text{krok} := 1 \cdot \text{deg} \quad i_{\text{max}} := 720 \cdot \frac{\text{deg}}{\text{krok}} \quad i_{\text{max}} = 720 \quad i := 0 .. i_{\text{max}} \quad \alpha_j := i \cdot \text{krok}$$

8.1 Odstředivé síly

úhel rozevření válců:

$$\delta := 180 \cdot \text{deg}$$

poloha těžiště:

$$r_T := 19.386 \cdot \text{mm}$$

Hmotnost zalomení bez vývažku:

$$m_{\text{zal}} := 1.209 \cdot \text{kg}$$

Redukovaná hmotnost zalomení:

$$m_{\text{zalred}} := m_{\text{zal}} \cdot \frac{r_T}{r} \quad m_{\text{zalred}} = 0.539 \text{ kg}$$

Hmotnost ojnicího ložiska:

$$m_{\text{ojl}} := 0.018 \cdot \text{kg}$$

Hmotnost rot. částí:

$$m_r := m_{\text{zalred}} + 2 \cdot m_2 + 2 \cdot m_{\text{ojl}}$$

$$m_r = 0.885 \text{ kg}$$

Odstředivá síla jednoho zalomení:

$$F_{\text{rzal}} := m_r \cdot r \cdot \omega^2 \quad F_{\text{rzal}} = 10.547 \text{ kN}$$

Odstředivá síla 1. zalomení

$$F_{\text{od}_1} := (F_{\text{rzal}} \cdot \cos(0 \cdot \text{deg}) \quad F_{\text{rzal}} \cdot \sin(0 \cdot \text{deg}))$$

Odstředivá síla 2. zalomení

$$F_{\text{od}_2} := (F_{\text{rzal}} \cdot \cos(180 \cdot \text{deg}) \quad F_{\text{rzal}} \cdot \sin(180 \cdot \text{deg}))$$

Výslednice odstředivých sil je rovna nule:

$$\sum_{i=1}^2 F_{\text{od}_i} = (0 \quad 0) \text{ kN}$$

8.2 Momenty odstředivých sil

Vztažný bod pro výpočet momentů leží na průsečíku podélné osy klikového hřídele a osy symetrie 2. zalomení.

Moment odstředivých sil 1.zalomení:

$$M_{od_1} := F_{od_1} \cdot a_k$$

$$M_{od} := \sum_{i=1}^1 M_{od_i} \quad M_{od} = (864.866 \quad 0) \text{ N}\cdot\text{m}$$

Velikost momentu:

$$M_{odv} := \sum M_{od} \quad M_{odv} = 864.866 \text{ N}\cdot\text{m}$$

8.2.1 Silové vyvážení

Vzdálenost těžiště vývažku:

$$r_{vF} := 44 \cdot \text{mm}$$

Silová rovnováha pro vyvážení odstředivých sil rotujících částí:

$$2 \cdot m_{vF} \cdot r_{vF} \cdot \omega^2 - F_{rzal} = 0$$

$$m_{vF} := 1 \cdot \text{kg}$$

$$m_{vF} := \text{root}\left(2 \cdot m_{vF} \cdot r_{vF} \cdot \omega^2 - F_{rzal}, m_{vF}\right)$$

Hmotnost vývažku pro silové vyvážení:

$$m_{vF} = 0.437 \text{ kg}$$

8.2.2 Momentové vyvážení

Rameno síly vyvažující moment:

$$b_k := a_k + l_{OC} \quad b_k = 107 \text{ mm}$$

Momentová rovnováha pro vyvážení momentů odstředivých sil rotujících částí:

$$M_{od} - m_{vM} \cdot r_{vF} \cdot \omega^2 \cdot b_k = 0$$

$$m_{vM} := 0 \cdot \text{kg}$$

$$m_{vM} := \text{root}\left(m_{vM} \cdot r_{vF} \cdot \omega^2 \cdot b_k - M_{odv}, m_{vM}\right) \quad m_{vM} = 0.67 \text{ kg}$$

8.2.3 Kombinace silového a momentového vyvážení:

Rameno síly vyvažující moment: $b_k := a_k + l_{OC}$ $b_k = 107 \text{ mm}$

Momentová rovnováha pro vyvážení momentů odstředivých sil rotujících částí:

volím: $m_{VK} := 0.200 \cdot \text{kg}$

Zbytková odstředivá síla: $F_{Zr} := 2 \cdot m_{VK} \cdot r_{VF} \cdot \omega^2 - F_{rZal}$ $|F_{Zr}| = 5.722 \text{ kN}$

Zbytkový moment:

Vztažný bod pro výpočet momentu leží na průsečíku podélné osy klikového hřídele a osy symetrie 2. zalomení.

Zbytkový moment odstředivých sil 1. zalomení: $M_{Zr} := F_{Zr} \cdot a_k$ $|M_{Zr}| = 469.204 \text{ Nm}$

hmotnost vývažku vyvažující zbytek odstředivé síly a momentu:

$$m_{VK} := \frac{M_{Zr}}{\omega^2 \cdot b_k \cdot r_{VF}} \quad |m_{VK}| = 0.364 \text{ kg}$$

Momentová rovnováha pro vyvážení momentů odstředivých sil rotujících částí:

$$M_{Od} - m_{VM} \cdot r_{VF} \cdot \omega^2 \cdot b_k = 0$$

$$m_{VM} := 0 \cdot \text{kg}$$

$$m_{VM} := \text{root}(m_{VM} \cdot r_{VF} \cdot \omega^2 \cdot b_k - M_{Odv}, m_{VM}) \quad m_{VM} = 0.67 \text{ kg}$$

8.3 Setrvačné síly posuvných částí I.řádu:

Hmotnost posuvných částí:

$$m_p := m_{\text{pist}} + m_1 \quad m_p = 0.355 \text{ kg}$$

Setrvačná síla posuvných částí I. řádu 1.válce

$$F_{I1}(\alpha) := -m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \cos(\alpha)$$

Setrvačná síla posuvných částí I. řádu 2.válce

$$F_{I2}(\alpha) := -m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \cos(\alpha + 180 \cdot \text{deg})$$

Setrvačná síla posuvných částí I. řádu 3.válce

$$F_{I3}(\alpha) := -m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \cos(\alpha - \delta)$$

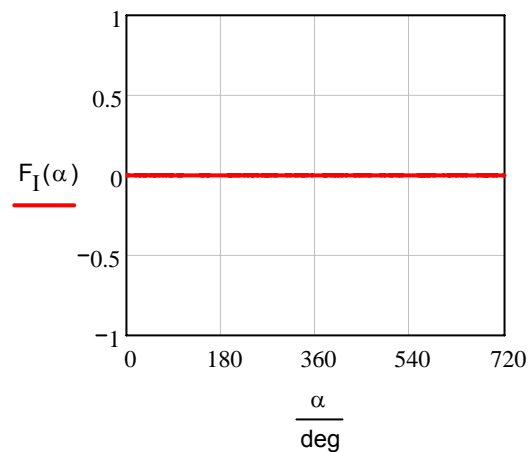
Setrvačná síla posuvných částí I. řádu 4.válce

$$F_{I4}(\alpha) := -m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \cos(\alpha + 180 \cdot \text{deg} - \delta)$$

Součet setrvačných sil posuvných prvního řádu:

$$F_I(\alpha) := F_{I1}(\alpha) + F_{I2}(\alpha) + F_{I3}(\alpha) + F_{I4}(\alpha)$$

$$F_I(\alpha) = \boxed{0} \text{ N}$$



8.4 Setrvačné síly posuvných částí II.řádu:

Setrvačná síla posuvných částí II. řádu 1.válce

$$F_{II1}(\alpha) := -\lambda \cdot m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \cos(2\alpha)$$

Setrvačná síla posuvných částí II. řádu 2.válce

$$F_{II2}(\alpha) := -\lambda \cdot m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \cos[2 \cdot (\alpha + 180 \cdot \text{deg})]$$

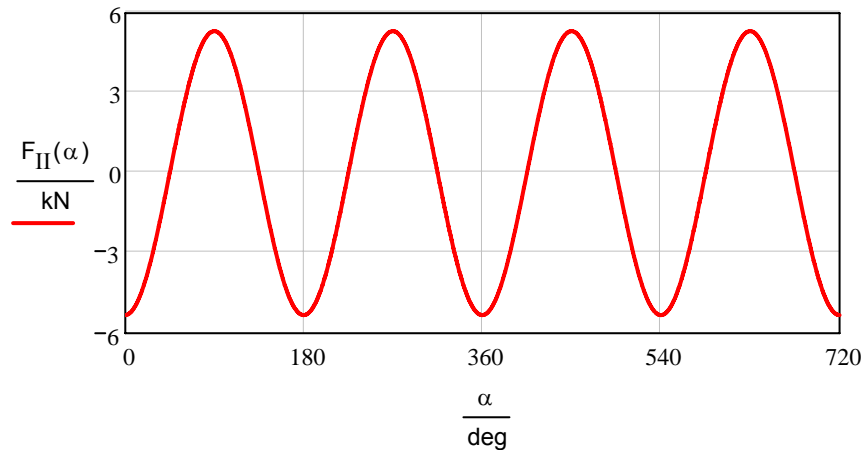
Setrvačná síla posuvných částí II. řádu 3.válce

$$F_{II3}(\alpha) := -\lambda \cdot m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \cos[2 \cdot (\alpha - \delta)]$$

Setrvačná síla posuvných částí II. řádu 4.válce

$$F_{II4}(\alpha) := -\lambda \cdot m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \cos[2 \cdot (\alpha + 180 \cdot \text{deg} - \delta)]$$

Součet setrvačných sil posuvných částí prvního řádu: $F_{II}(\alpha) := F_{II1}(\alpha) + F_{II2}(\alpha) + F_{II3}(\alpha) + F_{II4}(\alpha)$



Maximální a minimální hodnoty výslednice posuvných sil posuvných částí II. řádu:

$$F_{II\max} := \max(F_{II}(\alpha)) \quad F_{II\max} = 5.323 \text{ kN}$$

$$F_{II\min} := \min(F_{II}(\alpha)) \quad F_{II\min} = -5.323 \text{ kN}$$

Vzálenost těžiště vývažku od středu protiběžných kol, otáčející se dvojnásobnou úhlovou rychlostí než klikový hřídel, vyvažující setrvačné síly posuvných částí II.řádu:

$$r_{VFII} := 20 \cdot \text{mm}$$

Silová rovnováha pro vyvážení setrvačných sil posuvných II.řádu:

$$2 \cdot m_{VFII} \cdot r_{VFII} \cdot (2 \cdot \omega)^2 - F_{II\max} = 0$$

$$m_{VFII} := 0 \cdot \text{kg}$$

$$m_{VFII} := \text{root}\left[2 \cdot m_{VFII} \cdot r_{VFII} \cdot (2 \cdot \omega)^2 - F_{II\max}, m_{VFII}\right]$$

Hmotnost vývažku: $m_{VFII} = 0.121 \text{ kg}$

8.5 Momenty setrvačných sil posuvných částí I. řádu

Vztažný bod pro výpočet momentů leží na průsečíku podélné osy klikového hřídele a osy 4.válce

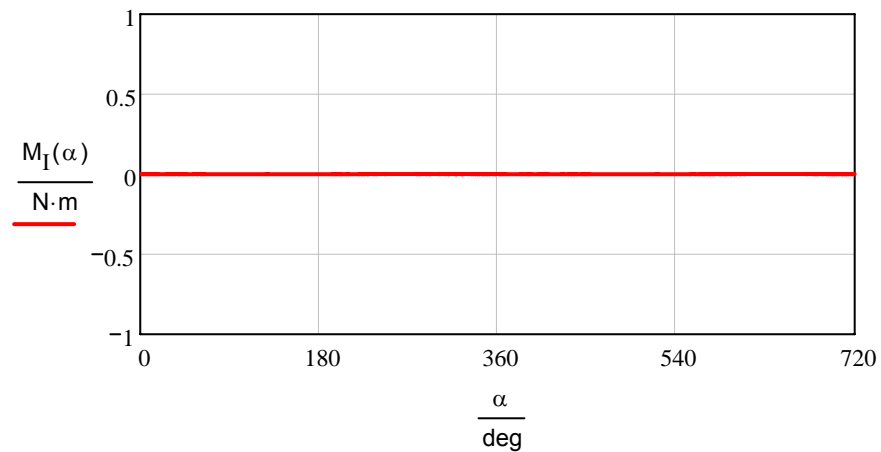
Moment setrvačné síly posuvných částí I.řádu 1.válce: $M_{I1}(\alpha) := F_{I1}(\alpha) \cdot \left(a_k + \frac{l_{OC}}{2}\right)$

Moment setrvačné síly posuvných částí I.řádu 3.válce: $M_{I3}(\alpha) := F_{I3}(\alpha) \cdot (a_k)$

Moment setrvačné síly posuvných částí I.řádu 1.válce: $M_{I2}(\alpha) := F_{I2}(\alpha) \cdot \left(\frac{l_{OC}}{2}\right)$

Součet momentů setrvačných sil posuvných částí I. řádu:

$$M_I(\alpha) := M_{I1}(\alpha) + M_{I2}(\alpha) + M_{I3}(\alpha)$$



8.6 Momenty setrvačných sil posuvných částí II. řádu

Vztažný bod pro výpočet momentů leží na průsečíku podélné osy klikového hřídele a osy 4.válce

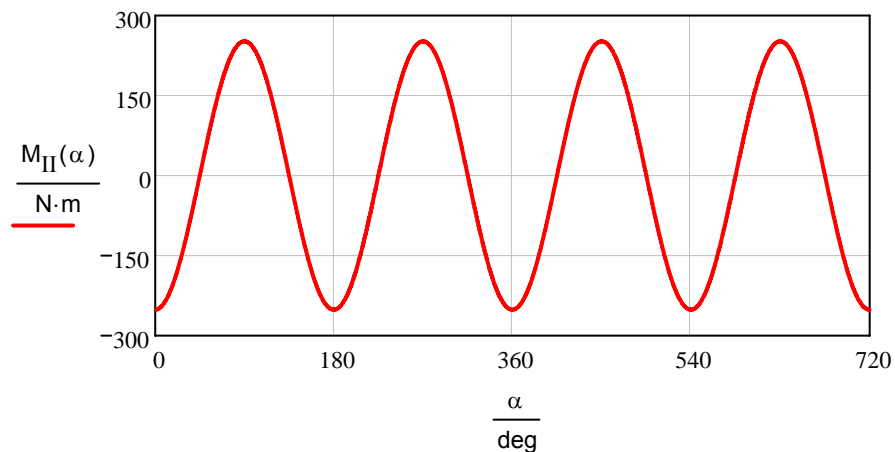
Moment setrvačné síly posuvných částí II.řádu 1.válce: $M_{II1}(\alpha) := F_{II1}(\alpha) \cdot \left(a_k + \frac{l_{OC}}{2} \right)$

Moment setrvačné síly posuvných částí II.řádu 3.válce: $M_{II3}(\alpha) := F_{II3}(\alpha) \cdot (a_k)$

Moment setrvačné síly posuvných částí II.řádu 1.válce: $M_{II2}(\alpha) := F_{II2}(\alpha) \cdot \left(\frac{l_{OC}}{2} \right)$

Součet momentů setrvačných sil posuvných částí II. řádu:

$$M_{II}(\alpha) := M_{II1}(\alpha) + M_{II2}(\alpha) + M_{II3}(\alpha)$$



Maximální a minimální hodnoty výslednice posuvných sil posuvných částí II. řádu:

$$M_{II\max} := \max(M_{II}(\alpha)) \quad M_{II\max} = 251.503 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$M_{II\min} := \min(M_{II}(\alpha)) \quad M_{II\min} = -251.503 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Vzálenost těžiště vývažku od osi protiběžného hřídele,
otáčející se dvojnásobnou úhlovou rychlostí než klikový hřídel,
vyvažující moment setrvačné síly posuvných částí II.řádu:

$$r_{VMII} := r_{VFII} \quad r_{VMII} = 0.02 \text{ m}$$

Rameno síly vyvažující moment setrvačných sil posuvných částí II. řádu: $l_{VMII} := 160 \cdot \text{mm}$

Momentová rovnováha pro vyvážení momentu setrvačných sil posuvných II.řádu:

$$2 \cdot m_{MFII} \cdot r_{VMII} \cdot (2 \cdot \omega)^2 \cdot l_{VMII} - M_{II\max} = 0$$

$$m_{VMII} := 0 \cdot \text{kg}$$

$$m_{VMII} := \text{root}\left[2 \cdot m_{MFII} \cdot r_{VMII} \cdot (2 \cdot \omega)^2 \cdot l_{VMII} - M_{II\max}, m_{VMII}\right]$$

Hmotnost vývažku: $m_{VMII} = 0.036 \text{ kg}$

9 Torzní kmitání

9.1 Vlastní torzní kmitání

9.1.1 Silové vyvážení

9.1.1.1 Redukce hmot klikového hřídele

Momenty setrvačnosti

moment setrvačnosti jednotlivých zalomení: $I_{zal_1} := 4019 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$

$$I_{zal_2} := 4019 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$$

redukovaný průměr kliky: $D_{red} := 48 \cdot \text{mm}$

Redukce rotačních hmot

rotační hmota ojnice: $m_{oj_rot} := m_2$ $m_{oj_rot} = 0.155 \text{ kg}$

moment setrvačnosti rotační hmoty ojnice: $I_{oj_rot} := m_{oj_rot} \cdot r^2$ $I_{oj_rot} = 2.926 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$

Redukce posuvných hmot

posuvná hmota ojnice: $m_{oj_pos} := m_1$ $m_{oj_pos} = 0.068 \text{ kg}$

posuvná hmota klik. mechanismu: $m_{pos} := m_{oj_pos} + m_{pist}$

$$m_{pos} = 0.355 \text{ kg}$$

redukovaná posuvná hmotnost: $m_{red_pos} := m_{pos} \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{\lambda^2}{8} \right)$

$$m_{red_pos} = 0.182 \text{ kg}$$

moment setrvačnosti pos. částí: $I_{pos} := m_{red_pos} \cdot r^2$ $I_{pos} = 3.432 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$

Moment setrvačnosti klikového mechanismu

redukovaný moment setrvačnosti 1. klikového mechanismu:

$$I_{red_1} := I_{zal_1} + 2 \cdot I_{oj_rot} + 2 \cdot I_{pos} \quad I_{red_1} = 5290.678 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$$

redukovaný moment setrvačnosti 2. klikového mechanismu:

$$I_{red_2} := I_{zal_2} + 2 \cdot I_{oj_rot} + 2 \cdot I_{pos} \quad I_{red_2} = 5290.678 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$$

moment setrvačnosti vrtule: $I_{vrt} := 0.340 \cdot 10^6 \cdot \text{kg} \cdot \text{mm}^2$

převodové číslo reduktoru: $u := 2.75$

redukovaný moment setrvačnosti vrtule: $I_{vrtule} := I_{vrt} \cdot \left(\frac{1}{u}\right)^2$ $I_{vrtule} = 0.045 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$

moment setrvačnosti řemenice: $I_{rem} := 0.002 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

9.1.1.2 Redukce délek klikového mechanismu

redukovaná délka jednoho zalomení klik. hřídele:

$$I_{red} := D_{red}^4 \cdot \left[\frac{I_{HC} + 0.4 \cdot D_{HC}}{D_{HC}^4} + \frac{I_{OC} + 0.4 \cdot D_{OC}}{D_{OC}^4} + \frac{r - 0.2 \cdot (D_{HC} + D_{OC})}{h \cdot b^3} \right]$$

$$I_{red} = 188.745 \text{ mm}$$

délka příruby vrtule: $l_p := 0.016 \text{ m}$

roztečný průměr šroubů vrtule: $d_p := 0.071 \text{ m}$

redukovaná délka vrtule: $l_{red_vrt} := \frac{D_{HC}}{2} + l_p \cdot \frac{D_{red}^4}{d_p^4} + \frac{1}{2} \cdot I_{red}$

$$l_{red_vrt} = 121.715 \text{ mm}$$

redukovaná délka řemenice: $l_{red_rem} := \frac{I_{HC}}{2} + \frac{1}{2} \cdot I_{red}$

$$l_{red_rem} = 106.473 \text{ mm}$$

Výpočet torzních tuhostí

model pružnosti ve smyku: $G := 64 \cdot \text{GPa}$

polární moment setrvačnosti: $I_p := \frac{\pi \cdot D_{\text{red}}^4}{32}$

torzní tuhost za řemenicí: $c_0 := \frac{G \cdot I_p}{l_{\text{red_rem}}} \quad c_0 = 313261.279 \frac{\text{Nm}}{\text{rad}}$

torzní tuhost za 1.zalomením: $c_1 := \frac{G \cdot I_p}{l_{\text{red}}} \quad c_1 = 176713.053 \frac{\text{Nm}}{\text{rad}}$

torzní tuhost za 2.zalomením: $c_2 := \frac{G \cdot I_p}{l_{\text{red_vrt}}} \quad c_2 = 274031.629 \frac{\text{Nm}}{\text{rad}}$

9.1.1.3 Výpočet vlastních torzních kmitů

redukované momenty setrvačnosti: $I := \begin{pmatrix} I_{\text{rem}} \\ I_{\text{red_1}} \\ I_{\text{red_2}} \\ I_{\text{vrtule}} \end{pmatrix} \quad I = \begin{pmatrix} 0.002 \\ 0.0053 \\ 0.0053 \\ 0.045 \end{pmatrix} \text{m}^2 \cdot \text{kg}$

torzní tuhosti: $c := \begin{pmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} \quad c = \begin{pmatrix} 313261.279 \\ 176713.053 \\ 274031.629 \end{pmatrix} \frac{\text{Nm}}{\text{rad}}$

matice hmotností: $M := \begin{pmatrix} I_{\text{rem}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_{\text{red_1}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_{\text{red_2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{\text{vrtule}} \end{pmatrix}$

matice tuhosti: $C := \begin{pmatrix} c_0 & -c_0 & 0 & 0 \\ -c_0 & c_0 + c_1 & -c_1 & 0 \\ 0 & -c_1 & c_1 + c_2 & -c_2 \\ 0 & 0 & -c_2 & c_2 \end{pmatrix}$

$$\underline{\underline{A}} := M^{-1} \cdot C$$

$$\underline{\underline{\lambda}} := \text{eigenvals}(A)$$

$$\omega_s := \sqrt{\underline{\underline{\lambda}}}$$

$$\lambda = \begin{pmatrix} 2.289 \times 10^8 \\ 9.587 \times 10^7 \\ 1.581 \times 10^7 \\ -3.402 \times 10^{-9} \end{pmatrix} \frac{1}{s^2}$$

$$\omega_s = \begin{pmatrix} 1.513 \times 10^4 \\ 9.791 \times 10^3 \\ 3.976 \times 10^3 \\ 5.833i \times 10^{-5} \end{pmatrix} \frac{1}{s}$$

$$x := \text{eigenvecs}(A)$$

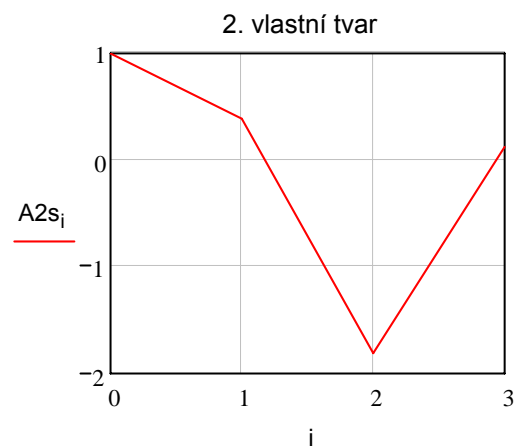
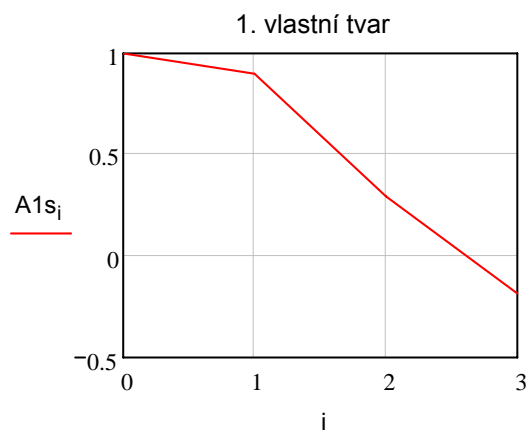
$$x = \begin{pmatrix} 0.904 & 0.474 & -0.72 & 0.5 \\ -0.417 & 0.184 & -0.647 & 0.5 \\ 0.098 & -0.859 & -0.212 & 0.5 \\ -2.678 \times 10^{-3} & 0.058 & 0.133 & 0.5 \end{pmatrix} \frac{1}{s}$$

9.1.1.4 Vlastní tvary torzního kmitání

$$i := 0..3$$

$$A1s_i := \frac{x_{i,2}}{x_{0,2}} \quad A1s = \begin{pmatrix} 1 \\ 0.899 \\ 0.295 \\ -0.185 \end{pmatrix}$$

$$A2s_i := \frac{x_{i,1}}{x_{0,1}} \quad A2s = \begin{pmatrix} 1 \\ 0.388 \\ -1.811 \\ 0.123 \end{pmatrix}$$



první vlastní frekvence: $\omega_{s_2} = 3975.7 \frac{1}{s}$

$$N_{s1} := \frac{\omega_{s_2}}{2\pi}$$

$$N_{s1} = 632.759 \frac{1}{s} \quad N_{s1} = 37965.6 \frac{1}{\text{min}}$$

druhá vlastní frekvence:

$$\omega_{s_1} = 9791.3 \frac{1}{s}$$

$$N_{s2} := \frac{\omega_{s_1}}{2\pi}$$

$$N_{s2} = 1558.3 \frac{1}{s} \quad N_{s2} = 93499.8 \frac{1}{\text{min}}$$

9.1.2 Momentové vyvážení

9.1.2.1 Redukce hmot klikového hřídele

Momenty setrvačnosti

moment setrvačnosti jednotlivých zalomení: $I_{za_1} := 1919 \text{kg} \cdot \text{mm}^2$

$$I_{za_2} := 1919 \text{kg} \cdot \text{mm}^2$$

redukovaný průměr kliky: $D_{\text{red}} = 48 \text{mm}$

Redukce rotačních hmot

rotační hmota ojnice: $m_{\text{oj_rot}} = 0.155 \text{kg}$

moment setrvačnosti rotační hmoty ojnice: $I_{\text{oj_rot}} = 2.926 \times 10^{-4} \text{m}^2 \cdot \text{kg}$

Redukce posuvných hmot

posuvná hmota ojnice: $m_{oj_pos} = 0.068 \text{ kg}$

posuvná hmota klik. mechanismu: $m_{pos} = 0.355 \text{ kg}$

redukována posuvná hmotnost: $m_{red_pos} := m_{pos} \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{\lambda_{oj}^2}{8} \right)$

$$m_{red_pos} = 0.182 \text{ kg}$$

moment setrvačnosti pos. částí: $I_{pos} = 3.432 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$

Moment setrvačnosti klikového mechanismu

redukový moment setrvačnosti 1. klikového mechanismu:

$$I_{red_1} := I_{za_1} + 2 \cdot I_{oj_rot} + 2 \cdot I_{pos} \quad I_{red_1} = 3190.678 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$$

redukový moment setrvačnosti 2. klikového mechanismu:

$$I_{red_2} := I_{za_2} + 2 \cdot I_{oj_rot} + 2 \cdot I_{pos} \quad I_{red_2} = 3190.678 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$$

moment setrvačnosti vrtule: $I_{vrt} = 3.4 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$

převodové číslo reduktoru: $u = 2.75$

redukový moment setrvačnosti vrtule: $I_{vrtule} = 0.045 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$

moment setrvačnosti řemenice: $I_{rem} = 2 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$

9.1.2.2 Redukce délek klikového mechanismu

redukovaná délka jednoho zalomení klik. hřídele:

$$l_{red} := D_{red}^4 \left[\frac{l_{HC} + 0.4 \cdot D_{HC}}{D_{HC}^4} + \frac{l_{OC} + 0.4 \cdot D_{OC}}{D_{OC}^4} + \frac{r - 0.2 \cdot (D_{HC} + D_{OC})}{h \cdot b^3} \right]$$

$$l_{red} = 188.745 \text{ mm}$$

délka příruby vrtule: $l_p = 0.016 \text{ m}$

roztečný průměr šroubů vrtule: $d_p = 0.071 \text{ m}$

redukovaná délka vrtule: $l_{red_vrt} = 121.715 \text{ mm}$

redukovaná délka řemenice: $l_{red_rem} = 106.473 \text{ mm}$

Výpočet torzních tuhostí

modul pružnosti ve smyku: $G = 64 \text{ GPa}$

polární moment setrvačnosti: $I_p := \frac{\pi \cdot D_{red}^4}{32}$

torzní tuhost za řemenicí: $c_0 := \frac{G \cdot I_p}{l_{red_rem}} \quad c_0 = 313261.279 \frac{\text{Nm}}{\text{rad}}$

torzní tuhost za 1.zalomením: $c_1 := \frac{G \cdot I_p}{l_{red}} \quad c_1 = 176713.053 \frac{\text{Nm}}{\text{rad}}$

torzní tuhost za 2.zalomením: $c_2 := \frac{G \cdot I_p}{l_{red_vrt}} \quad c_2 = 274031.629 \frac{\text{Nm}}{\text{rad}}$

9.1.2.3 Výpočet vlastních torzních kmitů

redukované momenty setrvacnosti:

$$I := \begin{pmatrix} I_{\text{rem}} \\ I_{\text{red_1}} \\ I_{\text{red_2}} \\ I_{\text{vrtule}} \end{pmatrix} \quad I = \begin{pmatrix} 0.002 \\ 0.0032 \\ 0.0032 \\ 0.045 \end{pmatrix} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

torzní tuhosti:

$$c := \begin{pmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} \quad c = \begin{pmatrix} 313261.279 \\ 176713.053 \\ 274031.629 \end{pmatrix} \frac{\text{Nm}}{\text{rad}}$$

matice hmotností:

$$M := \begin{pmatrix} I_{\text{rem}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_{\text{red_1}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_{\text{red_2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{\text{vrtule}} \end{pmatrix}$$

matice tuhosti:

$$C := \begin{pmatrix} c_0 & -c_0 & 0 & 0 \\ -c_0 & c_0 + c_1 & -c_1 & 0 \\ 0 & -c_1 & c_1 + c_2 & -c_2 \\ 0 & 0 & -c_2 & c_2 \end{pmatrix}$$

$$\underline{\underline{A}} := M^{-1} \cdot C \quad \underline{\underline{\lambda}} := \text{eigenvals}(A) \quad \omega_m := \sqrt{\underline{\underline{\lambda}}}$$

$$\lambda = \begin{pmatrix} 2.899 \times 10^8 \\ 1.469 \times 10^8 \\ 2.075 \times 10^7 \\ -1.95 \times 10^{-9} \end{pmatrix} \frac{1}{\text{s}^2} \quad \omega_m = \begin{pmatrix} 1.703 \times 10^4 \\ 1.212 \times 10^4 \\ 4.556 \times 10^3 \\ 4.416i \times 10^{-5} \end{pmatrix} \frac{1}{\text{s}}$$

$$\underline{\underline{x}} := \text{eigenvecs}(A)$$

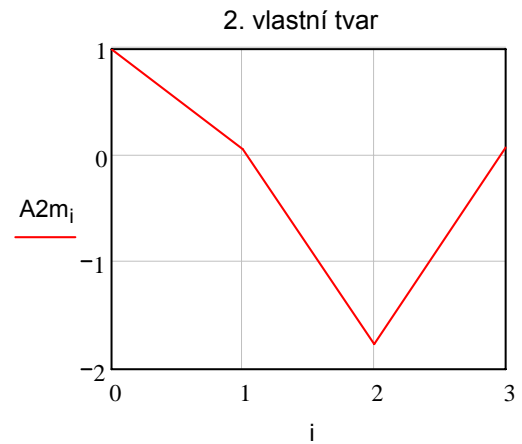
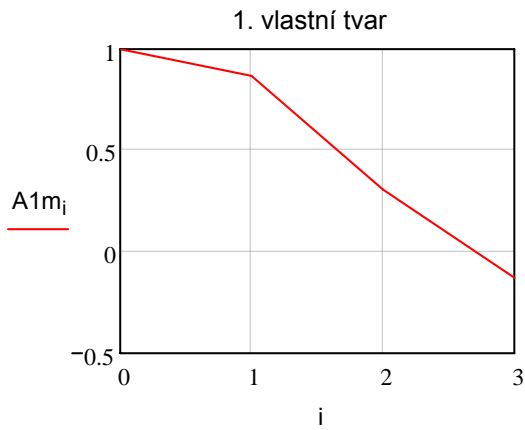
$$x = \begin{pmatrix} 0.74 & 0.492 & -0.733 & 0.5 \\ -0.629 & 0.03 & -0.635 & 0.5 \\ 0.238 & -0.869 & -0.225 & 0.5 \\ -5.102 \times 10^{-3} & 0.038 & 0.094 & 0.5 \end{pmatrix} \frac{1}{\text{s}^2}$$

9.1.2.4 Vlastní tvary torzního kmitání

$i := 0..3$

$$A1m_i := \frac{x_{i,2}}{x_{0,2}} \quad A1m = \begin{pmatrix} 1 \\ 0.867 \\ 0.308 \\ -0.128 \end{pmatrix}$$

$$A2m_i := \frac{x_{i,1}}{x_{0,1}} \quad A2m = \begin{pmatrix} 1 \\ 0.062 \\ -1.765 \\ 0.076 \end{pmatrix}$$



první vlastní frekvence: $\omega_{m_2} = 4555.6 \frac{1}{s}$

$$N_{m1} := \frac{\omega_{m_2}}{2\pi}$$

$$N_{m1} = 725.052 \frac{1}{s}$$

$$N_{m1} = 43503.1 \frac{1}{\text{min}}$$

druhá vlastní frekvence: $\omega_{m_1} = 12121.4 \frac{1}{s}$

$$N_{m2} := \frac{\omega_{m_1}}{2\pi}$$

$$N_{m2} = 1929.2 \frac{1}{s}$$

$$N_{m2} = 115751.3 \frac{1}{\text{min}}$$

9.1.3 Kombinované vyvážení

9.1.3.1 Redukce hmot klikového hřídele

Momenty setrvačnosti

moment setrvačnosti jednotlivých zalomení: $I_{zak_1} := 3850 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$

$$I_{zak_2} := 3850 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$$

redukovaný průměr kliky: $D_{red} = 48 \text{ mm}$

Redukce rotačních hmot

rotační hmota ojnice: $m_{oj_rot} = 0.155 \text{ kg}$

moment setrvačnosti rotační hmoty ojnice: $I_{oj_rot} = 2.926 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$

Redukce posuvných hmot

posuvná hmota ojnice: $m_{oj_pos} = 0.068 \text{ kg}$

posuvná hmota klik. mechanismu: $m_{pos} = 0.355 \text{ kg}$

redukovaná posuvná hmotnost: $m_{red_pos} := m_{pos} \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{\lambda_{oj}^2}{8} \right)$

$$m_{red_pos} = 0.182 \text{ kg}$$

moment setrvačnosti pos. částí: $I_{pos} = 3.432 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$

Moment setrvačnosti klikového mechanismu

redukovaný moment setrvačnosti 1. klikového mechanismu:

$$I_{red_1} := I_{zak_1} + 2 \cdot I_{oj_rot} + 2 \cdot I_{pos} \quad I_{red_1} = 5121.678 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$$

redukovaný moment setrvačnosti 2. klikového mechanismu:

$$I_{red_2} := I_{zak_2} + 2 \cdot I_{oj_rot} + 2 \cdot I_{pos} \quad I_{red_2} = 5121.678 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$$

moment setrvačnosti vrtule: $I_{\text{vrt}} = 3.4 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$

převodové číslo reduktoru: $u = 2.75$

redukovaný moment setrvačnosti vrtule: $I_{\text{vrtule}} = 0.045 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$

moment setrvačnosti řemenice: $I_{\text{rem}} = 2 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$

9.1.3.2 Redukce délek klikového mechanismu

redukovaná délka jednoho zalomení klik. hřídele:

$$I_{\text{red}} := D_{\text{red}}^4 \cdot \left[\frac{I_{\text{HC}} + 0.4 \cdot D_{\text{HC}}}{D_{\text{HC}}^4} + \frac{I_{\text{OC}} + 0.4 \cdot D_{\text{OC}}}{D_{\text{OC}}^4} + \frac{r - 0.2 \cdot (D_{\text{HC}} + D_{\text{OC}})}{h \cdot b^3} \right]$$

$$I_{\text{red}} = 188.745 \text{ mm}$$

délka příruby vrtule: $l_p = 0.016 \text{ m}$

roztečný průměr šroubů vrtule: $d_p = 0.071 \text{ m}$

redukovaná délka vrtule: $l_{\text{red_vrt}} = 121.715 \text{ mm}$

redukovaná délka řemenice: $l_{\text{red_rem}} = 106.473 \text{ mm}$

Výpočet torzních tuhostí

modul pružnosti ve smyku: $G = 64 \text{ GPa}$

polární moment setrvačnosti: $I_p := \frac{\pi \cdot D_{\text{red}}^4}{32}$

torzní tuhost za řemenicí: $c_0 := \frac{G \cdot I_p}{l_{\text{red_rem}}} \quad c_0 = 313261.279 \frac{\text{Nm}}{\text{rad}}$

torzní tuhost za 1.zalomením: $c_1 := \frac{G \cdot I_p}{l_{\text{red}}} \quad c_1 = 176713.053 \frac{\text{Nm}}{\text{rad}}$

torzní tuhost za 2.zalomením: $c_2 := \frac{G \cdot I_p}{l_{\text{red_vrt}}} \quad c_2 = 274031.629 \frac{\text{Nm}}{\text{rad}}$

9.1.3.3 Výpočet vlastních torzních kmitů

redukované momenty setrvacnosti:

$$I := \begin{pmatrix} I_{\text{rem}} \\ I_{\text{red_1}} \\ I_{\text{red_2}} \\ I_{\text{vrtule}} \end{pmatrix} \quad I = \begin{pmatrix} 0.002 \\ 0.0051 \\ 0.0051 \\ 0.045 \end{pmatrix} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

torzní tuhosti:

$$c := \begin{pmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} \quad c = \begin{pmatrix} 313261.279 \\ 176713.053 \\ 274031.629 \end{pmatrix} \frac{\text{Nm}}{\text{rad}}$$

matice hmotností:

$$M := \begin{pmatrix} I_{\text{rem}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_{\text{red_1}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_{\text{red_2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{\text{vrtule}} \end{pmatrix}$$

matice tuhosti:

$$C := \begin{pmatrix} c_0 & -c_0 & 0 & 0 \\ -c_0 & c_0 + c_1 & -c_1 & 0 \\ 0 & -c_1 & c_1 + c_2 & -c_2 \\ 0 & 0 & -c_2 & c_2 \end{pmatrix}$$

$$A := M^{-1} \cdot C$$

$$\lambda := \text{eigenvals}(A)$$

$$\omega_k := \sqrt{\lambda}$$

$$\lambda = \begin{pmatrix} 2.317 \times 10^8 \\ 9.861 \times 10^7 \\ 1.61 \times 10^7 \\ -8.717 \times 10^{-10} \end{pmatrix} \frac{1}{\text{s}^2} \quad \omega_k = \begin{pmatrix} 1.522 \times 10^4 \\ 9.931 \times 10^3 \\ 4.013 \times 10^3 \\ 2.953i \times 10^{-5} \end{pmatrix} \frac{1}{\text{s}}$$

$$x := \text{eigenvecs}(A)$$

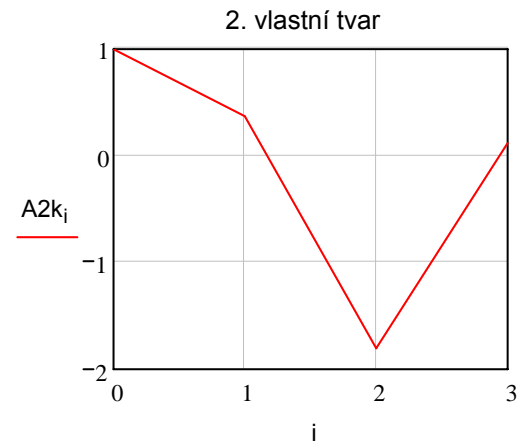
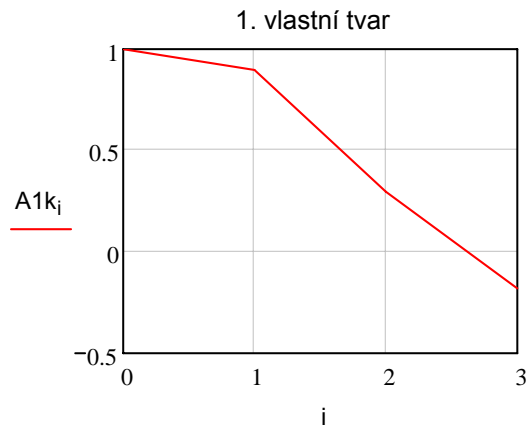
$$x = \begin{pmatrix} 0.897 & 0.476 & -0.721 & 0.5 \\ -0.43 & 0.176 & -0.647 & 0.5 \\ 0.104 & -0.86 & -0.214 & 0.5 \\ -2.817 \times 10^{-3} & 0.057 & 0.13 & 0.5 \end{pmatrix} \frac{1}{\text{s}^2}$$

9.1.3.4 Vlastní tvary torzního kmitání

$i := 0..3$

$$A1k_i := \frac{x_{i,2}}{x_{0,2}} \quad A1k = \begin{pmatrix} 1 \\ 0.897 \\ 0.296 \\ -0.18 \end{pmatrix}$$

$$A2k_i := \frac{x_{i,1}}{x_{0,1}} \quad A2k = \begin{pmatrix} 1 \\ 0.37 \\ -1.804 \\ 0.119 \end{pmatrix}$$



první vlastní frekvence: $\omega_{k_2} = 4012.7 \frac{1}{s}$

$$N_{k1} := \frac{\omega_{k_2}}{2\pi}$$

$$N_{k1} = 638.648 \frac{1}{s}$$

$$N_{k1} = 38318.9 \frac{1}{\text{min}}$$

druhá vlastní frekvence: $\omega_{k_1} = 9930.5 \frac{1}{s}$

$$N_{k2} := \frac{\omega_{k_1}}{2\pi}$$

$$N_{k2} = 1580.5 \frac{1}{s}$$

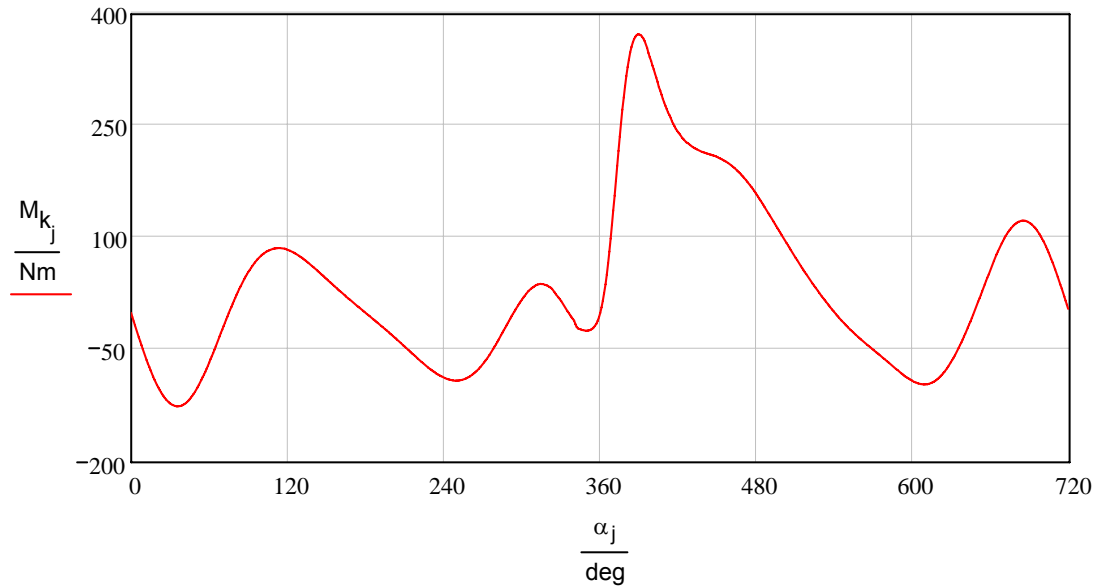
$$N_{k2} = 94829.3 \frac{1}{\text{min}}$$

9.2 Vynucené torzní kmitání

moment := READPRN("Mk.dat") $Nm := J$ $M_k := \text{moment} \cdot Nm$

9.2.1 Harmonická analýza budícího momentu

$n := 720$ $j := 0..n-1$ $\text{krok} := 1 \cdot \text{deg}$ $j_{\text{max}} := 720 \cdot \frac{\text{deg}}{\text{krok}}$ $\alpha_j := j \cdot \text{krok}$



Fourierova analýza kroutícího momentu v komplexním oboru:

$i := 0..3$

$k := 0, 1..20$

$\kappa := 0, 0.5..10$

$n = 720$

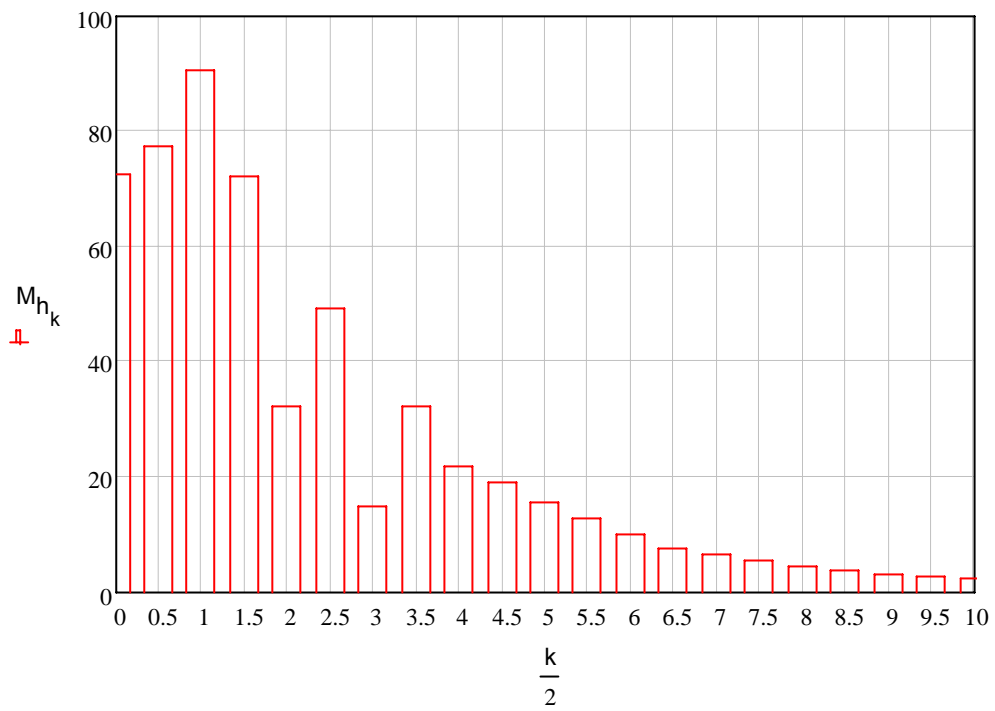
$$h_k := \frac{2}{n} \cdot \sum_{j=0}^{n-1} \left[M_{k_j} \cdot e^{i \left(k \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{j}{n} \right)} \right]$$

realná složka: $a_{h_k} := \text{Re}(h_k)$

imaginární složka: $b_{h_k} := \text{Im}(h_k)$

absolutní hodnota: $M_{h_k} := |h_k|$

$\kappa =$	$\frac{k}{2} =$	$\frac{\text{Re}(h_k)}{Nm} =$	$\frac{\text{Im}(h_k)}{Nm} =$	$\frac{ h_k }{Nm} =$
0	0	72.527	0	72.527
0.5	0.5	-64.109	-43.386	77.411
1	1	35.124	83.353	90.451
1.5	1.5	-6.902	-71.605	71.937
2	2	-5.524	-31.673	32.151
2.5	2.5	11.564	-47.745	49.125
3	3	-13.188	-6.725	14.804
3.5	3.5	14.773	-28.501	32.102
4	4	-15.342	15.442	21.768
4.5	4.5	13.487	-13.495	19.079
5	5	-11.938	9.98	15.56
5.5	5.5	10.952	-6.062	12.518
6	6	-9.331	3.354	9.916
6.5	6.5	7.49	-1.469	7.633
7	7	-6.439	0.568	6.464
7.5	7.5	5.341	0.695	5.386



9.2.2 Kritické otáčky:

$\kappa := 0.5, 1 \dots 10$

9.2.2.1 Silové vyvážení

Kritické otáčky: $n_{kr_1(\kappa)} := \frac{N_{s1}}{\kappa}$ $n_{kr_2(\kappa)} := \frac{N_{s2}}{\kappa}$

$\kappa =$	$\frac{n_{kr_1(\kappa)}}{\text{min}^{-1}} =$	$\frac{n_{kr_2(\kappa)}}{\text{min}^{-1}} =$
0.5	75931	187000
1	37966	93500
1.5	25310	62333
2	18983	46750
2.5	15186	37400
3	12655	31167
3.5	10847	26714
4	9491	23375
4.5	8437	20778
5	7593	18700
5.5	6903	17000
6	6328	15583
6.5	5841	14385
7	5424	13357
7.5	5062	12467
8	4746	11687
8.5	4467	11000
9	4218	10389
9.5	3996	9842
10	3797	9350

9.2.2.2 Momentové vyvážení

Kritické otáčky: $n_{krm_1}(\kappa) := \frac{N_{m1}}{\kappa}$ $n_{krm_2}(\kappa) := \frac{N_{m2}}{\kappa}$

$\kappa =$	$\frac{n_{krm_1}(\kappa)}{\text{min}^{-1}} =$	$\frac{n_{krm_2}(\kappa)}{\text{min}^{-1}} =$
0.5	87006	231503
1	43503	115751
1.5	29002	77168
2	21752	57876
2.5	17401	46301
3	14501	38584
3.5	12429	33072
4	10876	28938
4.5	9667	25723
5	8701	23150
5.5	7910	21046
6	7251	19292
6.5	6693	17808
7	6215	16536
7.5	5800	15434
8	5438	14469
8.5	5118	13618
9	4834	12861
9.5	4579	12184
10	4350	11575

9.2.2.3 Kombinované vyvážení

Kritické otáčky: $\eta_{krk_1}(\kappa) := \frac{N_{k1}}{\kappa}$ $\eta_{krk_2}(\kappa) := \frac{N_{k2}}{\kappa}$

$\kappa =$	$\frac{\eta_{krk_1}(\kappa)}{\min^{-1}} =$	$\frac{\eta_{krk_2}(\kappa)}{\min^{-1}} =$
0.5	76638	189659
1	38319	94829
1.5	25546	63220
2	19159	47415
2.5	15328	37932
3	12773	31610
3.5	10948	27094
4	9580	23707
4.5	8515	21073
5	7664	18966
5.5	6967	17242
6	6386	15805
6.5	5895	14589
7	5474	13547
7.5	5109	12644
8	4790	11854
8.5	4508	11156
9	4258	10537
9.5	4034	9982
10	3832	9483

9.2.3 Pořadí zapalování 1 - 2 - 4 - 3

9.2.3.1 Vydutnost rezonancí

1. Vlastní frekvence

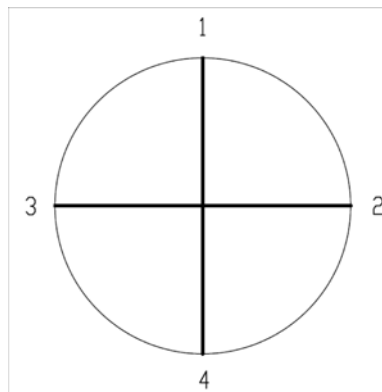
$$i := 0..3 \quad j := 0..1$$

poměrné torzní výchylky:

$$a1 := \begin{pmatrix} A1s_1 \\ A1s_2 \\ A1s_1 \\ A1s_2 \end{pmatrix}$$

1. $\kappa = 0.5; 2.5; 4.5; 6.5; 8.5$

$$a := \begin{pmatrix} 0 \\ 90 \\ 270 \\ 180 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$



$$\varepsilon_0 := \left[\sum_{i=0}^1 (a1_i \cdot \cos(a_i)) \quad \sum_{i=0}^1 (a1_i \cdot \sin(a_i)) \right]^T$$

$$\varepsilon_0 = \begin{pmatrix} 0.899 \\ 0.295 \end{pmatrix}$$

$$\varepsilon_1 := \left[\sum_{i=2}^3 (a1_i \cdot \cos(a_i)) \quad \sum_{i=2}^3 (a1_i \cdot \sin(a_i)) \right]^T$$

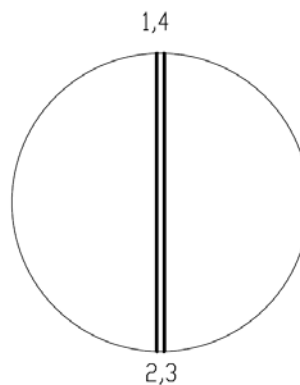
$$\varepsilon_1 = \begin{pmatrix} -0.295 \\ -0.899 \end{pmatrix}$$

$$\varepsilon_1 := \left| \sum_j \varepsilon_j \right|$$

$$\varepsilon_1 = 0.855$$

2. $\kappa = 1; 3; 5; 7; 9$

$$a := \begin{pmatrix} 0 \\ 180 \\ 180 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$



$$\varepsilon_0 := \left[\sum_{i=0}^1 (a_{1i} \cdot \cos(a_i)) \quad \sum_{i=0}^1 (a_{1i} \cdot \sin(a_i)) \right]^T$$

$$\varepsilon_0 = \begin{pmatrix} 0.604 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\varepsilon_1 := \left[\sum_{i=2}^3 (a_{1i} \cdot \cos(a_i)) \quad \sum_{i=2}^3 (a_{1i} \cdot \sin(a_i)) \right]^T$$

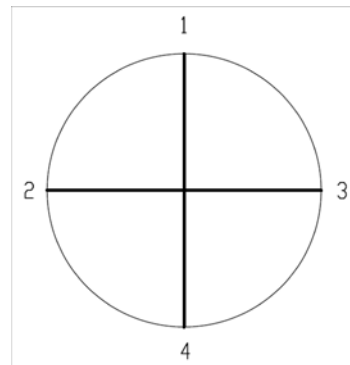
$$\varepsilon_1 = \begin{pmatrix} -0.604 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\varepsilon_2 := \left| \sum_j \varepsilon_j \right|$$

$$\varepsilon_2 = 0$$

3. $\kappa = 1.5; 3.5; 5.5; 7.5; 9.5$

$$\underline{a}_\kappa := \begin{pmatrix} 0 \\ 270 \\ 90 \\ 180 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$



$$\varepsilon_0 := \left[\sum_{i=0}^1 (a_{1i} \cdot \cos(a_i)) \quad \sum_{i=0}^1 (a_{1i} \cdot \sin(a_i)) \right]^T$$

$$\varepsilon_0 = \begin{pmatrix} 0.899 \\ -0.295 \end{pmatrix}$$

$$\varepsilon_1 := \left[\sum_{i=2}^3 (a_{1i} \cdot \cos(a_i)) \quad \sum_{i=2}^3 (a_{1i} \cdot \sin(a_i)) \right]^T$$

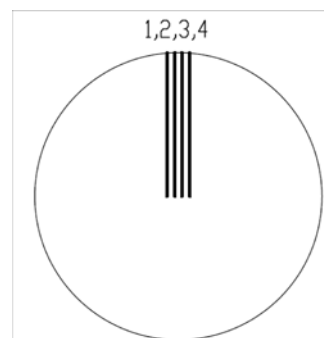
$$\varepsilon_1 = \begin{pmatrix} -0.295 \\ 0.899 \end{pmatrix}$$

$$\varepsilon_3 := \left| \sum_j \varepsilon_j \right|$$

$$\varepsilon_3 = 0.855$$

4. $\kappa = 2; 4; 6; 8; 10$

$$\underline{a}_\kappa := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$



2. Vlastní frekvence

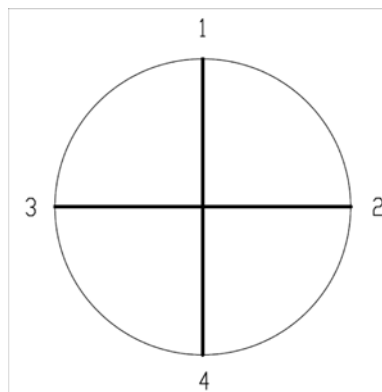
$i := 0..3$ $j := 0..1$

poměrné torzní výchylky:

$$a_2 := \begin{pmatrix} A_2 s_1 \\ A_2 s_2 \\ A_2 s_1 \\ A_2 s_2 \end{pmatrix}$$

1. $\kappa = 0.5; 2.5; 4.5; 6.5; 8.5$

$$a := \begin{pmatrix} 0 \\ 90 \\ 270 \\ 180 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$



$$\varepsilon_0 := \left[\sum_{i=0}^1 (a_{2i} \cdot \cos(a_i)) \quad \sum_{i=0}^1 (a_{2i} \cdot \sin(a_i)) \right]^T$$

$$\varepsilon_0 = \begin{pmatrix} 0.388 \\ -1.811 \end{pmatrix}$$

$$\varepsilon_1 := \left[\sum_{i=2}^3 (a_{2i} \cdot \cos(a_i)) \quad \sum_{i=2}^3 (a_{2i} \cdot \sin(a_i)) \right]^T$$

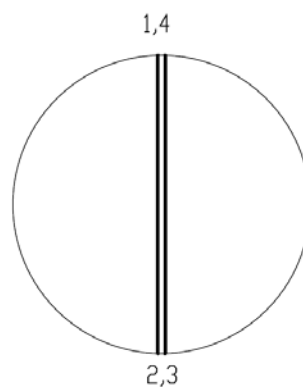
$$\varepsilon_1 = \begin{pmatrix} 1.194 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\varepsilon_1 := \left| \sum_j \varepsilon_j \right|$$

$$\varepsilon_1 = 3.109$$

2. $\kappa = 1; 3; 5; 7; 9$

$$a := \begin{pmatrix} 0 \\ 180 \\ 180 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$



$$\varepsilon_0 := \left[\sum_{i=0}^1 (a_{2i} \cdot \cos(a_i)) \quad \sum_{i=0}^1 (a_{2i} \cdot \sin(a_i)) \right]^T$$

$$\varepsilon_0 = \begin{pmatrix} 2.198 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\varepsilon_1 := \left[\sum_{i=2}^3 (a_{2i} \cdot \cos(a_i)) \quad \sum_{i=2}^3 (a_{2i} \cdot \sin(a_i)) \right]^T$$

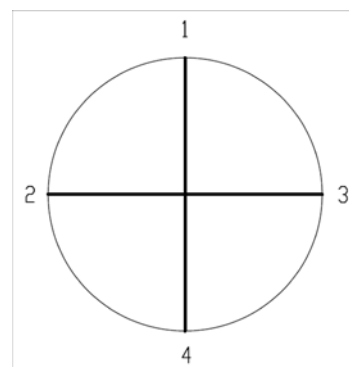
$$\varepsilon_1 = \begin{pmatrix} -2.198 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\varepsilon_2 := \left| \sum_j \varepsilon_j \right|$$

$$\varepsilon_2 = 0$$

3. $\kappa = 1.5; 3.5; 5.5; 7.5; 9.5$

$$\underline{a} := \begin{pmatrix} 0 \\ 270 \\ 90 \\ 180 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$



$$\varepsilon_0 := \left[\sum_{i=0}^1 (a_{2i} \cdot \cos(a_i)) \quad \sum_{i=0}^1 (a_{2i} \cdot \sin(a_i)) \right]^T$$

$$\varepsilon_0 = \begin{pmatrix} 0.388 \\ 1.811 \end{pmatrix}$$

$$\varepsilon_1 := \left[\sum_{i=2}^3 (a_{2i} \cdot \cos(a_i)) \quad \sum_{i=2}^3 (a_{2i} \cdot \sin(a_i)) \right]^T$$

$$\varepsilon_1 = \begin{pmatrix} 1.811 \\ 0.388 \end{pmatrix}$$

$$\varepsilon_3 := \left| \sum_j \varepsilon_j \right|$$

$$\varepsilon_3 = 3.109$$

4. $\kappa = 2; 4; 6; 8; 10$

$$\underline{a} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

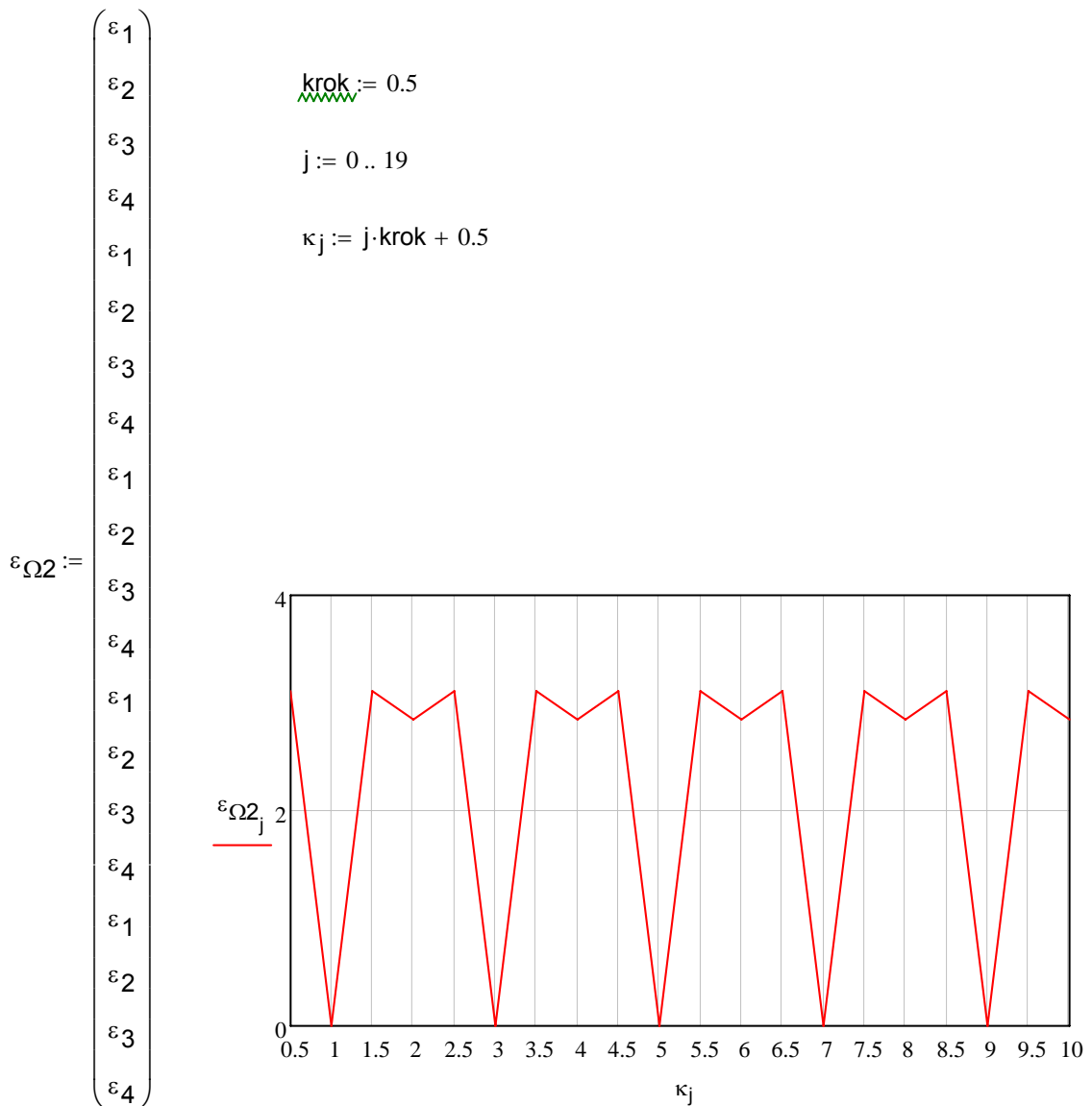


$$\varepsilon_0 := \left[\sum_{i=0}^1 (a_{2i} \cdot \cos(a_i)) \quad \sum_{i=0}^1 (a_{2i} \cdot \sin(a_i)) \right]^T \quad \varepsilon_0 = \begin{pmatrix} -1.423 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\varepsilon_1 := \left[\sum_{i=2}^3 (a_{2i} \cdot \cos(a_i)) \quad \sum_{i=2}^3 (a_{2i} \cdot \sin(a_i)) \right]^T \quad \varepsilon_1 = \begin{pmatrix} -1.423 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\varepsilon_4 := \left| \sum_j \varepsilon_j \right| \quad \varepsilon_4 = 2.845$$

9.2.3.3 Závislost vydatnosti rezonance na řádu harmonické



9.2.3.4 Torzní výchylky v rezonanci

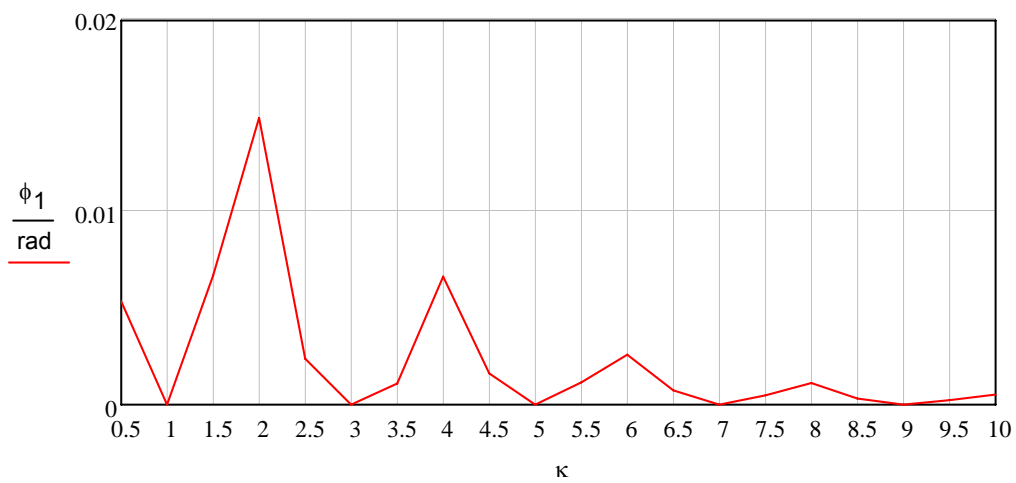
velikost tlumicích odporů: $\xi := 1.5 \cdot \frac{\text{Nm} \cdot \text{s}}{\text{rad}}$

1. vlastní frekvence

$i := 0..3$

$$\phi_{1j} := \frac{M_{h_j} \cdot \varepsilon \Omega_{1j}}{\omega_{s_2} \cdot \xi \cdot \left[\sum_i (A_{1s_i})^2 \right]}$$

0.5	$5.388 \cdot 10^{-3}$
1	0
1.5	$6.719 \cdot 10^{-3}$
2	$1.493 \cdot 10^{-2}$
2.5	$2.388 \cdot 10^{-3}$
3	0
3.5	$1.1 \cdot 10^{-3}$
4	$6.661 \cdot 10^{-3}$
4.5	$1.617 \cdot 10^{-3}$
5	0
5.5	$1.156 \cdot 10^{-3}$
6	$2.598 \cdot 10^{-3}$
6.5	$7.365 \cdot 10^{-4}$
7	0
7.5	$4.801 \cdot 10^{-4}$
8	$1.118 \cdot 10^{-3}$
8.5	$3.148 \cdot 10^{-4}$
9	0
9.5	$2.26 \cdot 10^{-4}$
10	$5.2 \cdot 10^{-4}$

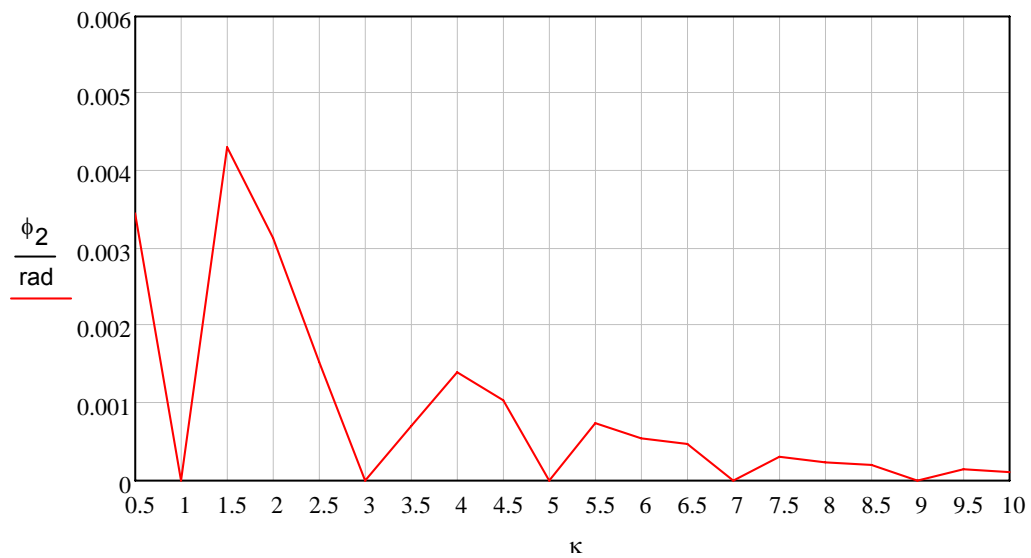


2. vlastní frekvence

$i := 0..3$

$$\phi_{2j} := \frac{M_{h_j} \cdot \varepsilon \Omega_{2j}}{\omega_{s_1} \cdot \xi \cdot \left[\sum_i (A_{2s_i})^2 \right]}$$

$\kappa =$ 0.5	$\phi_2 =$ 3.455·10 ⁻³
1	0
1.5	4.309·10 ⁻³
2	3.136·10 ⁻³
2.5	1.532·10 ⁻³
3	0
3.5	7.053·10 ⁻⁴
4	1.4·10 ⁻³
4.5	1.037·10 ⁻³
5	0
5.5	7.413·10 ⁻⁴
6	5.457·10 ⁻⁴
6.5	4.724·10 ⁻⁴
7	0
7.5	3.079·10 ⁻⁴
8	2.348·10 ⁻⁴
8.5	2.019·10 ⁻⁴
9	0
9.5	1.449·10 ⁻⁴
10	1.092·10 ⁻⁴



9.2.3.5 Přídavné torzní napětí

1. vlastní frekvence

Poměrné nakroucení: $\Delta a_{123} := A1s_2 - A1s_3$ $\Delta a_{123} = 0.48$

Torzní moment: $M_{23} := \phi_{115} \cdot \Delta a_{123} \cdot c_2$ $M_{23} = 146.903 \text{ Nm}$

Přídavné torzní napětí: $\tau_1 := \frac{M_{23}}{W_{\tau OC}}$ $\tau_1 = 11.304 \text{ MPa}$

2. vlastní frekvence

Poměrné nakroucení: $\Delta a_{212} := A2s_1 - A2s_2$ $\Delta a_{212} = 2.198$

Torzní moment: $M_{12} := \phi_{217} \cdot \Delta a_{212} \cdot c_1$ $M_{12} = 3.812 \times 10^{-15} \text{ Nm}$

Přídavné torzní napětí: $\tau_2 := \frac{M_{12}}{W_{\tau OC}}$ $\tau_2 = 0 \text{ MPa}$

9.2.4 Pořadí zapalování 1 - 3 - 4 - 2

9.2.4.1 Vydatnost rezonancí

1. Vlastní frekvence

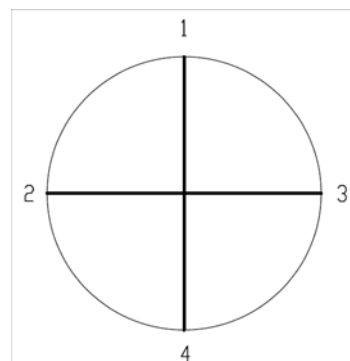
$i := 0..3$ $j := 0..1$

poměrné torzní výchylky:

$$a1 := \begin{pmatrix} A1s_1 \\ A1s_2 \\ A1s_1 \\ A1s_2 \end{pmatrix}$$

1. $\kappa = 0.5; 2.5; 4.5; 6.5; 8.5$

$$a_i := \begin{pmatrix} 0 \\ 270 \\ 90 \\ 180 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$



$$\varepsilon_0 := \left[\sum_{i=0}^1 (a_{1i} \cdot \cos(a_i)) \quad \sum_{i=0}^1 (a_{1i} \cdot \sin(a_i)) \right]^T$$

$$\varepsilon_0 = \begin{pmatrix} 0.899 \\ -0.295 \end{pmatrix}$$

$$\varepsilon_1 := \left[\sum_{i=2}^3 (a_{1i} \cdot \cos(a_i)) \quad \sum_{i=2}^3 (a_{1i} \cdot \sin(a_i)) \right]^T$$

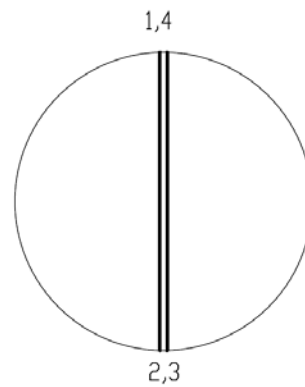
$$\varepsilon_1 = \begin{pmatrix} -0.295 \\ 0.899 \end{pmatrix}$$

$$\varepsilon_1 := \left| \sum_j \varepsilon_j \right|$$

$$\varepsilon_1 = 0.855$$

2. $\kappa = 1; 3; 5; 7; 9$

$$\underline{a} := \begin{pmatrix} 0 \\ 180 \\ 180 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$



$$\varepsilon_0 := \left[\sum_{i=0}^1 (a_{1i} \cdot \cos(a_i)) \quad \sum_{i=0}^1 (a_{1i} \cdot \sin(a_i)) \right]^T$$

$$\varepsilon_0 = \begin{pmatrix} 0.604 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\varepsilon_1 := \left[\sum_{i=2}^3 (a_{1i} \cdot \cos(a_i)) \quad \sum_{i=2}^3 (a_{1i} \cdot \sin(a_i)) \right]^T$$

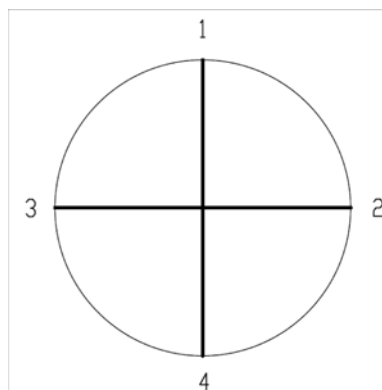
$$\varepsilon_1 = \begin{pmatrix} -0.604 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\varepsilon_2 := \left| \sum_j \varepsilon_j \right|$$

$$\varepsilon_2 = 0$$

3. $\kappa = 1.5; 3.5; 5.5; 7.5; 9.5$

$$\underline{a} := \begin{pmatrix} 0 \\ 90 \\ 270 \\ 180 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$



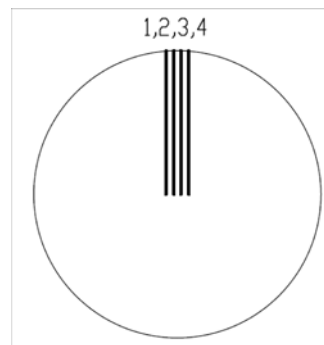
$$\varepsilon_0 := \left[\sum_{i=0}^1 (a_{1i} \cdot \cos(a_i)) \quad \sum_{i=0}^1 (a_{1i} \cdot \sin(a_i)) \right]^T \quad \varepsilon_0 = \begin{pmatrix} 0.899 \\ 0.295 \end{pmatrix}$$

$$\varepsilon_1 := \left[\sum_{i=2}^3 (a_{1i} \cdot \cos(a_i)) \quad \sum_{i=2}^3 (a_{1i} \cdot \sin(a_i)) \right]^T \quad \varepsilon_1 = \begin{pmatrix} -0.295 \\ -0.899 \end{pmatrix}$$

$$\varepsilon_3 := \left| \sum_j \varepsilon_j \right| \quad \varepsilon_3 = 0.855$$

4. $\kappa = 2; 4; 6; 8; 10$

$$\underline{a} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

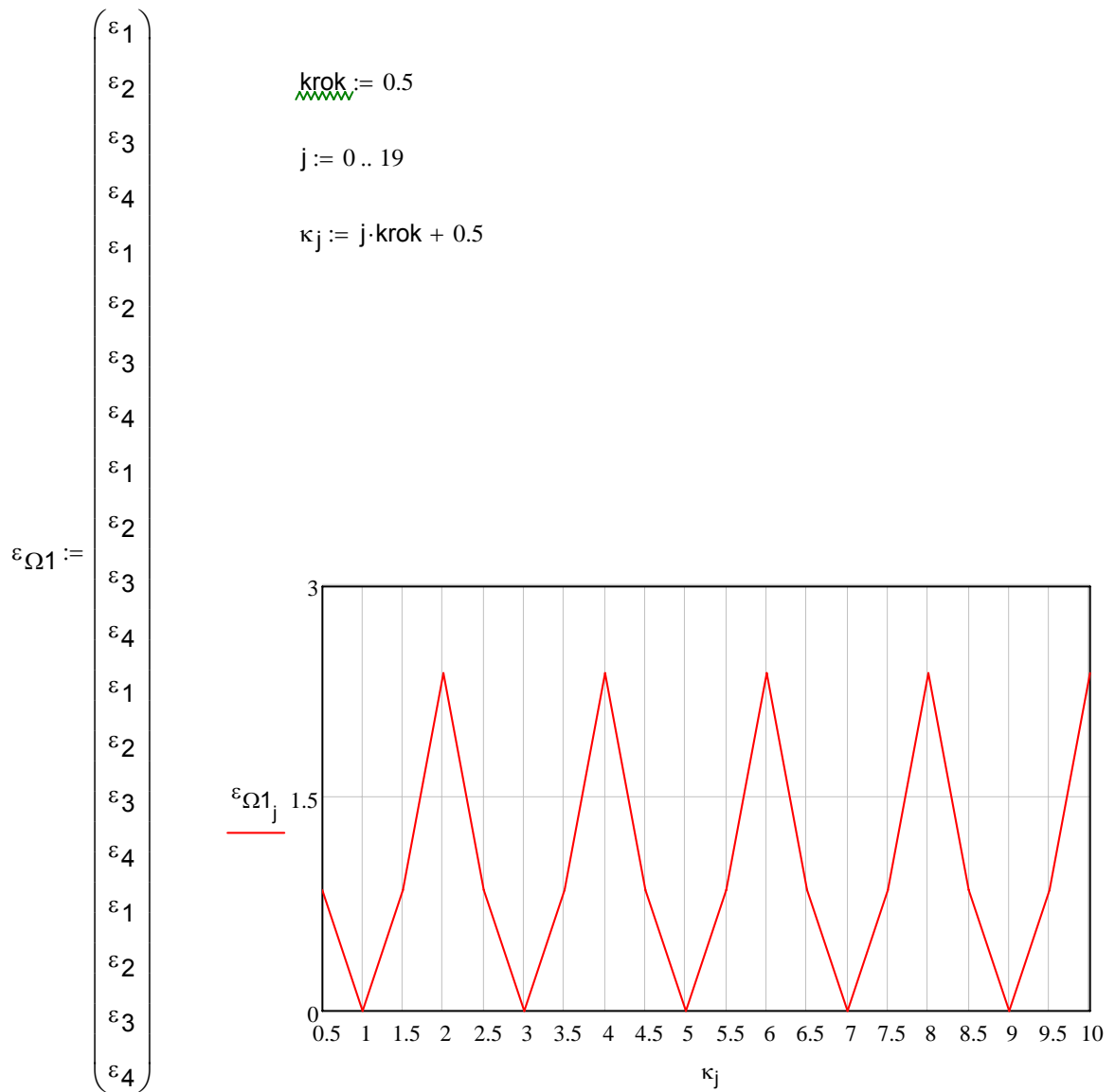


$$\varepsilon_0 := \left[\sum_{i=0}^1 (a_{1i} \cdot \cos(a_i)) \quad \sum_{i=0}^1 (a_{1i} \cdot \sin(a_i)) \right]^T \quad \varepsilon_0 = \begin{pmatrix} 1.194 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\varepsilon_1 := \left[\sum_{i=2}^3 (a_{1i} \cdot \cos(a_i)) \quad \sum_{i=2}^3 (a_{1i} \cdot \sin(a_i)) \right]^T \quad \varepsilon_1 = \begin{pmatrix} 1.194 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\varepsilon_4 := \left| \sum_j \varepsilon_j \right| \quad \varepsilon_4 = 2.388$$

9.2.4.2 Závislost vydatnosti rezonance na řádu harmonické



2. Vlastní frekvence

$i := 0..3$ $j := 0..1$

poměrné torzní výchylky:

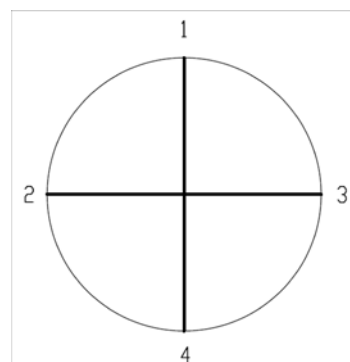
$a_2 :=$

$$\begin{pmatrix} A2s_1 \\ A2s_2 \\ A2s_1 \\ A2s_2 \end{pmatrix}$$

1. $\kappa = 0.5; 2.5; 4.5; 6.5; 8.5$

$a_i :=$

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 270 \\ 90 \\ 180 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$



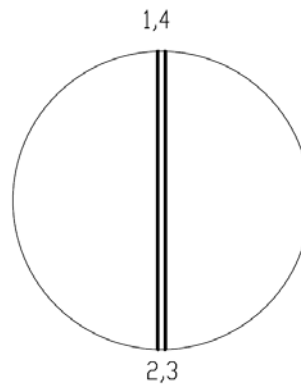
$$\varepsilon_0 := \left[\sum_{i=0}^1 (a_{2i} \cdot \cos(a_i)) \quad \sum_{i=0}^1 (a_{2i} \cdot \sin(a_i)) \right]^T \quad \varepsilon_0 = \begin{pmatrix} 0.388 \\ 1.811 \end{pmatrix}$$

$$\varepsilon_1 := \left[\sum_{i=2}^3 (a_{2i} \cdot \cos(a_i)) \quad \sum_{i=2}^3 (a_{2i} \cdot \sin(a_i)) \right]^T \quad \varepsilon_1 = \begin{pmatrix} 1.811 \\ 0.388 \end{pmatrix}$$

$$\varepsilon_1 := \left| \sum_j \varepsilon_j \right| \quad \varepsilon_1 = 3.109$$

2. $\kappa = 1; 3; 5; 7; 9$

$$\underline{a} := \begin{pmatrix} 0 \\ 180 \\ 180 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$



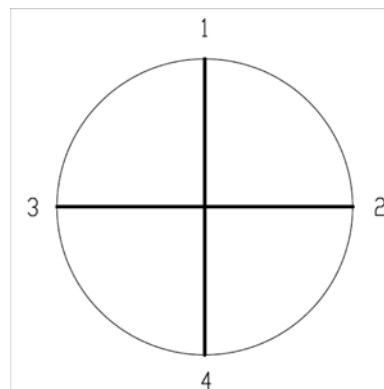
$$\varepsilon_0 := \left[\sum_{i=0}^1 (a_{2i} \cdot \cos(a_i)) \quad \sum_{i=0}^1 (a_{2i} \cdot \sin(a_i)) \right]^T \quad \varepsilon_0 = \begin{pmatrix} 2.198 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\varepsilon_1 := \left[\sum_{i=2}^3 (a_{2i} \cdot \cos(a_i)) \quad \sum_{i=2}^3 (a_{2i} \cdot \sin(a_i)) \right]^T \quad \varepsilon_1 = \begin{pmatrix} -2.198 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\varepsilon_2 := \left| \sum_j \varepsilon_j \right| \quad \varepsilon_2 = 0$$

3. $\kappa = 1.5; 3.5; 5.5; 7.5; 9.5$

$$\underline{a} := \begin{pmatrix} 0 \\ 90 \\ 270 \\ 180 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$



$$\varepsilon_0 := \left[\sum_{i=0}^1 (a_{2i} \cdot \cos(a_i)) \quad \sum_{i=0}^1 (a_{2i} \cdot \sin(a_i)) \right]^T \quad \varepsilon_0 = \begin{pmatrix} 0.388 \\ -1.811 \end{pmatrix}$$

$$\varepsilon_1 := \left[\sum_{i=2}^3 (a_{2i} \cdot \cos(a_i)) \quad \sum_{i=2}^3 (a_{2i} \cdot \sin(a_i)) \right]^T \quad \varepsilon_1 = \begin{pmatrix} 1.811 \\ -0.388 \end{pmatrix}$$

$$\varepsilon_3 := \left| \sum_j \varepsilon_j \right| \quad \varepsilon_3 = 3.109$$

4. $\kappa = 2; 4; 6; 8; 10$

$$\underline{a} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$



$$\varepsilon_0 := \left[\sum_{i=0}^1 (a_{2i} \cdot \cos(a_i)) \quad \sum_{i=0}^1 (a_{2i} \cdot \sin(a_i)) \right]^T \quad \varepsilon_0 = \begin{pmatrix} -1.423 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\varepsilon_1 := \left[\sum_{i=2}^3 (a_{2i} \cdot \cos(a_i)) \quad \sum_{i=2}^3 (a_{2i} \cdot \sin(a_i)) \right]^T \quad \varepsilon_1 = \begin{pmatrix} -1.423 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\varepsilon_4 := \left| \sum_j \varepsilon_j \right| \quad \varepsilon_4 = 2.845$$

9.2.4.4 Torzní výchylky v rezonanci

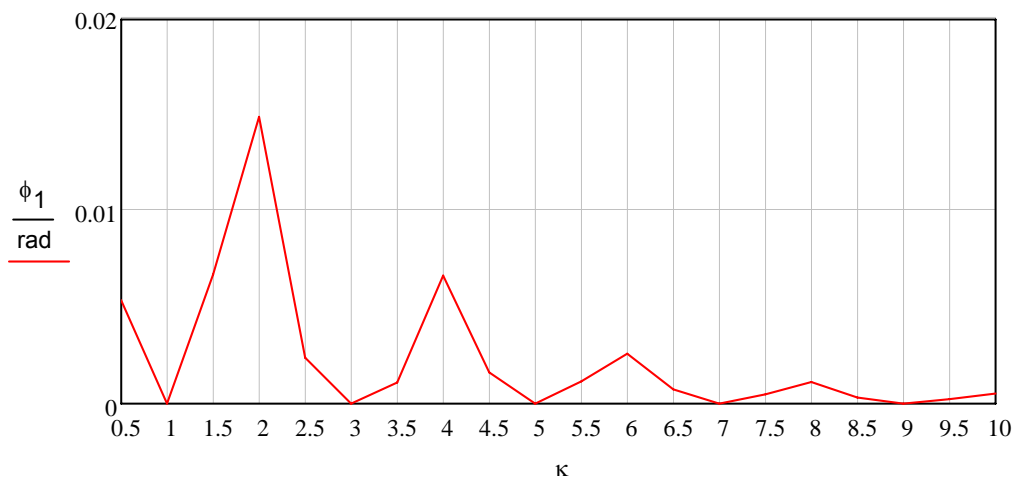
velikost tlumicích odporů: $\xi := 1.5 \cdot \frac{\text{Nm} \cdot \text{s}}{\text{rad}}$

1. vlastní frekvence

$i := 0..3$

$$\phi_{1j} := \frac{M_{h_j} \cdot \varepsilon \Omega_{1j}}{\omega_{s_2} \cdot \xi \cdot \left[\sum_i (A1s_i)^2 \right]}$$

$\kappa =$	0.5	$\phi_1 =$	$5.388 \cdot 10^{-3}$
	1		0
	1.5		$6.719 \cdot 10^{-3}$
	2		$1.493 \cdot 10^{-2}$
	2.5		$2.388 \cdot 10^{-3}$
	3		0
	3.5		$1.1 \cdot 10^{-3}$
	4		$6.661 \cdot 10^{-3}$
	4.5		$1.617 \cdot 10^{-3}$
	5		0
	5.5		$1.156 \cdot 10^{-3}$
	6		$2.598 \cdot 10^{-3}$
	6.5		$7.365 \cdot 10^{-4}$
	7		0
	7.5		$4.801 \cdot 10^{-4}$
	8		$1.118 \cdot 10^{-3}$
	8.5		$3.148 \cdot 10^{-4}$
	9		0
	9.5		$2.26 \cdot 10^{-4}$
	10		$5.2 \cdot 10^{-4}$

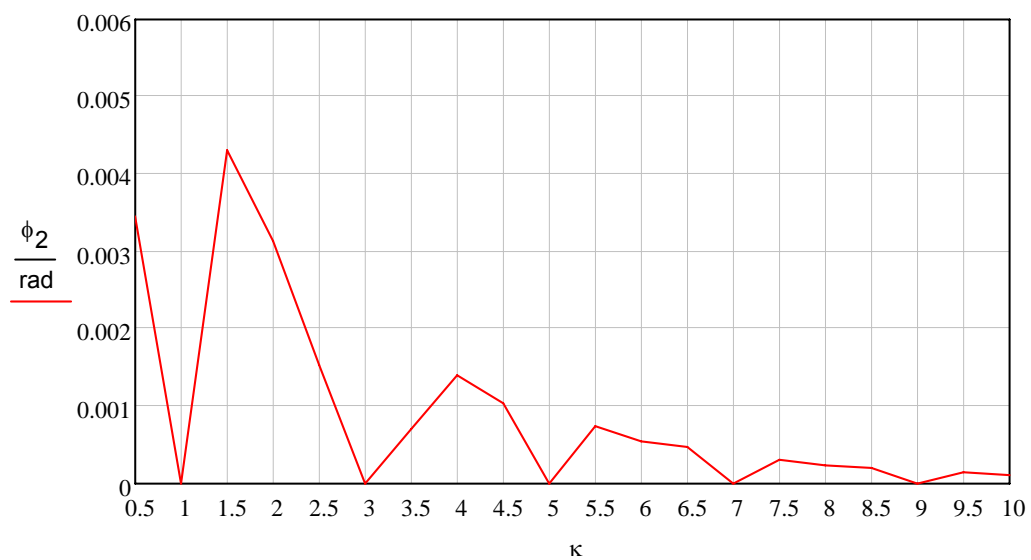


2. vlastní frekvence

$i := 0..3$

$$\phi_{2j} := \frac{M_{h_j} \cdot \varepsilon \Omega_{2j}}{\omega_{s_1} \cdot \xi \cdot \left[\sum_i (A_{2s_i})^2 \right]}$$

$\kappa =$	0.5	$\phi_2 =$	$3.455 \cdot 10^{-3}$
	1		0
	1.5		$4.309 \cdot 10^{-3}$
	2		$3.136 \cdot 10^{-3}$
	2.5		$1.532 \cdot 10^{-3}$
	3		0
	3.5		$7.053 \cdot 10^{-4}$
	4		$1.4 \cdot 10^{-3}$
	4.5		$1.037 \cdot 10^{-3}$
	5		0
	5.5		$7.413 \cdot 10^{-4}$
	6		$5.457 \cdot 10^{-4}$
	6.5		$4.724 \cdot 10^{-4}$
	7		0
	7.5		$3.079 \cdot 10^{-4}$
	8		$2.348 \cdot 10^{-4}$
	8.5		$2.019 \cdot 10^{-4}$
	9		0
	9.5		$1.449 \cdot 10^{-4}$
	10		$1.092 \cdot 10^{-4}$



9.2.4.5 Přídavné torzní napětí

1. vlastní frekvence

Poměrné nakroucení: $\Delta a_{123} := A1s_2 - A1s_3$ $\Delta a_{123} = 0.48$

Torzní moment: $M_{23} := \phi_{115} \cdot \Delta a_{123} \cdot c_2$ $M_{23} = 146.903 \text{ Nm}$

Přídavné torzní napětí: $\tau_{11} := \frac{M_{23}}{W_{\tau OC}}$ $\tau_1 = 11.304 \text{ MPa}$

2. vlastní frekvence

Poměrné nakroucení: $\Delta a_{212} := A2s_1 - A2s_2$ $\Delta a_{212} = 2.198$

Torzní moment: $M_{12} := \phi_{217} \cdot \Delta a_{212} \cdot c_1$ $M_{12} = 3.812 \times 10^{-15} \text{ Nm}$

Přídavné torzní napětí: $\tau_{22} := \frac{M_{12}}{W_{\tau OC}}$ $\tau_2 = 0 \text{ MPa}$