



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**PĚTIVÁLCOVÝ VZNĚTOVÝ MOTOR PRO
UŽITKOVÁ VOZIDLA**

FIVE-CYLINDER DIESEL ENGINE FOR COMMERCIAL VEHICLES

VÝPOČTOVÉ PŘÍLOHY K DIPLOMOVÉ PRÁCI

MASTER'S THESIS APPENDICES

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Marek Švarc

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.

BRNO 2017

OBSAH

Výpočet redukce hmotností a délek	3
Výpočty k vyvážení klikového mechanismu	10
Výpočty dynamiky klikového mechanismu a volného a vynuceného kmitání	11
Návrh tlumiče torzních kmitů	29
Výpočty únavové bezpečnosti	40

Výpočet redukce hmotností a délek

Poloměr kliky	$r := 74.5\text{mm}$
Délka ojnice	$l_o := 270\text{mm}$
Klikový poměr	$\lambda := \frac{r}{l_o} = 0.27593$

Rotační podíl hmotnosti ojnice	$G_{or} := 3.09\text{kg}$
Hmotnost pístu + ojnice	$G_p := 5.72\text{kg}$

Redukce hmotnosti

Momenty setrvačnosti částí klikové hřídele VE SMĚRU OSY KLIK. HŘÍDELE

$J_{zp1} := 6.1782 \cdot 10^3 \text{kg} \cdot \text{mm}^2$	přední konec hřídele
$J_{zr1} := 4.3455 \cdot 10^4 \text{kg} \cdot \text{mm}^2$	řemenice (zvětšení a vývažek)
$J_{z1} := J_{zp1} + J_{zr1}$	$J_{z1} = 4.96332 \times 10^4 \cdot \text{kg} \cdot \text{mm}^2$ přední konec + řemenice
$J_{z2} := 1.3843574 \cdot 10^5 \text{kg} \cdot \text{mm}^2$	1. zalomení
$J_{z3} := 1.3842099 \cdot 10^5 \text{kg} \cdot \text{mm}^2$	2. zalomení
$J_{z4} := 1.3842099 \cdot 10^5 \text{kg} \cdot \text{mm}^2$	3. zalomení
$J_{z5} := 1.3842098 \cdot 10^5 \text{kg} \cdot \text{mm}^2$	4. zalomení
$J_{z6} := 1.3885546 \cdot 10^5 \text{kg} \cdot \text{mm}^2$	5. zalomení
$J_{zh7} := 1.5358393 \cdot 10^4 \text{kg} \cdot \text{mm}^2$	část hřídele k ozubenému kolu
$J_{zok} := 2.1352069 \cdot 10^4 \text{kg} \cdot \text{mm}^2$	ozubené kolo
$J_{z7} := J_{zh7} + J_{zok}$	$J_{z7} = 3.67105 \times 10^4 \cdot \text{kg} \cdot \text{mm}^2$ část hřídele + ozubené kolo
$J_{zh8} := 2.7918647 \cdot 10^2 \text{kg} \cdot \text{mm}^2$	část hřídele k setrvačníku
$J_{zs} := 3.12 \cdot 10^6 \text{kg} \cdot \text{mm}^2$	setrvačník
$J_{z8} := J_{zh8} + J_{zs}$	$J_{z8} = 3.12028 \times 10^6 \cdot \text{kg} \cdot \text{mm}^2$ část hřídele + setrvačník

Redukce otáčejících se (rotačních) hmot - zalomení

$$G_{r_red2} := \frac{J_{z2}}{r^2} + G_{or} \quad G_{r_red2} = 28.03225 \text{ kg} \quad 1. \text{ zalomení}$$

$$G_{r_red3} := \frac{J_{z3}}{r^2} + G_{or} \quad G_{r_red3} = 28.0296 \text{ kg} \quad 2. \text{ zalomení}$$

$$G_{r_red4} := \frac{J_{z4}}{r^2} + G_{or} \quad G_{r_red4} = 28.0296 \text{ kg} \quad 3. \text{ zalomení}$$

$$G_{r_red5} := \frac{J_{z5}}{r^2} + G_{or} \quad G_{r_red5} = 28.02959 \text{ kg} \quad 4. \text{ zalomení}$$

$$G_{r_red6} := \frac{J_{z6}}{r^2} + G_{or} \quad G_{r_red6} = 28.10787 \text{ kg} \quad 5. \text{ zalomení}$$

Redukce posuvných hmot

$$G_{p_red} := \left(\frac{1}{2} + \frac{\lambda^2}{8} \right) \cdot G_p \quad G_{p_red} = 2.91444 \text{ kg}$$

Celková redukovaná hmota - rotační a posuvné hmoty - zalomení

$$G_{2_red} := G_{r_red2} + G_{p_red} \quad G_{2_red} = 30.94669 \text{ kg}$$

$$G_{3_red} := G_{r_red3} + G_{p_red} \quad G_{3_red} = 30.94403 \text{ kg}$$

$$G_{4_red} := G_{r_red4} + G_{p_red} \quad G_{4_red} = 30.94403 \text{ kg}$$

$$G_{5_red} := G_{r_red5} + G_{p_red} \quad G_{5_red} = 30.94403 \text{ kg}$$

$$G_{6_red} := G_{r_red6} + G_{p_red} \quad G_{6_red} = 31.02231 \text{ kg}$$

Momenty setrvačnosti celkové redukované hmoty

$$J_1 := J_{z1} \quad J_1 = 0.04963 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_2 := G_{2_red} \cdot r^2 \quad J_2 = 0.17176 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_3 := G_{3_red} \cdot r^2 \quad J_3 = 0.17175 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_4 := G_{4_red} \cdot r^2 \quad J_4 = 0.17175 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_5 := G_{5_red} \cdot r^2 \quad J_5 = 0.17175 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_6 := G_{6_red} \cdot r^2 \quad J_6 = 0.17218 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_7 := J_{z7} \quad J_7 = 0.03671 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_8 := J_{z8} \quad J_8 = 3.12028 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Redukce délek

$D_{\text{red}} := 99\text{mm}$ průměr na který redukuji - prům. hl. čepu

Reduk. délka volného konce

$d_{11} := 93\text{mm}$ průměr 1. osazení zleva

$d_{12} := 99\text{mm}$ průměr 2. osazení zleva - hl. čep

$l_{11} := 53.9\text{mm}$ od těžiště řemenice k hraně osazení

$l_{12} := 30.5\text{mm}$

Lineární interpolace součinitele zkrutu ξ_1

$$x_{\xi 1} := \frac{d_{12}}{d_{11}} = 1.06452$$

$$y_{0_ \xi 1} := 0$$

$$y_{1_ \xi 1} := 0.055$$

$$x_{0_ \xi 1} := 1$$

$$x_{1_ \xi 1} := 1.25$$

$$y_{\xi 1} := y_{0_ \xi 1} + (x_{\xi 1} - x_{0_ \xi 1}) \cdot \frac{y_{1_ \xi 1} - y_{0_ \xi 1}}{x_{1_ \xi 1} - x_{0_ \xi 1}} \quad y_{\xi 1} = 0.01419$$

$$\xi_1 := y_{\xi 1}$$

$$l_{\text{red}1} := (l_{11} + \xi_1 \cdot d_{11}) \cdot \frac{D_{\text{red}}^4}{d_{11}^4} + (l_{12} - \xi_1 \cdot d_{11}) \cdot \frac{D_{\text{red}}^4}{d_{12}^4} \quad l_{\text{red}1} = 100.08966 \cdot \text{mm}$$

Reduk. délka zalomení

$D_0 := 99\text{mm}$ průměr hlavního čepu

$D_1 := 82\text{mm}$ průměr ojnicního čepu

$l_0 := 55\text{mm}$ celková délka hlavního čepu (i se zaoblením)

$l_1 := 50\text{mm}$ celková délka ojnicního čepu

$h := 33\text{mm}$ tloušťka vývažku

$b := 133.725\text{mm}$ šířka vývažku

$$l_{\text{red_zal}} := l_0 + 0.4 \cdot D_0 + \left[r - 0.2 \cdot (D_0 + D_1) \right] \cdot \frac{D_0^4}{h \cdot b^3} + (l_1 + 0.4 \cdot D_1) \cdot \frac{D_0^4}{D_1^4}$$

$$l_{\text{red_zal}} = 317.14186 \cdot \text{mm}$$

Reduk. délka - pravý zbytek posledního hlavního čepu

$$l_{red2} := 30.5\text{mm}$$

Reduk. délka pravého konce - od zalomení po ozubené kolo

$$d_{31} := 114\text{mm} \quad \text{průměr pod ozubeným kolem}$$

$$d_{32} := 148\text{mm} \quad \text{průměr osazení pro opření ozub. kola}$$

$$l_{31} := 16\text{mm} \quad \text{délky poloviny válcové části pro ozub. kolo}$$

$$l_{32} := 25\text{mm} \quad \text{délka osazení pro opření ozub. kola}$$

Lineární interpoleace součinitele zkrutu ξ_3

$$x_{\xi3} := \frac{d_{32}}{d_{31}} = 1.29825$$

$$y_{0_ \xi3} := 0.055$$

$$y_{1_ \xi3} := 0.085$$

$$x_{0_ \xi3} := 1.25$$

$$x_{1_ \xi3} := 1.5$$

$$y_{\xi3} := y_{0_ \xi3} + (x_{\xi3} - x_{0_ \xi3}) \cdot \frac{y_{1_ \xi3} - y_{0_ \xi3}}{x_{1_ \xi3} - x_{0_ \xi3}} \quad y_{\xi3} = 0.06079$$

$$\xi_3 := y_{\xi3}$$

$$l_{red3} := (l_{31} + \xi_3 \cdot d_{31}) \cdot \frac{D_{red}^4}{d_{31}^4} + (l_{32} - \xi_3 \cdot d_{31}) \cdot \frac{D_{red}^4}{d_{32}^4} \quad l_{red3} = 16.6593 \cdot \text{mm}$$

Reduk. délka pravého konce - od ozubeného kola po setrvačnick

$$d_{41} := 56\text{mm} \quad \text{průměr pod setrvačnickem}$$

$$d_{42} := 114\text{mm} \quad \text{průměr pod ozubeným kolem}$$

$$l_{41} := 31.7\text{mm} \quad \text{od hrany válce. části pro ozub. kolo po těžiště setrvačnicku}$$

$$l_{42} := 16\text{mm} \quad \text{délky poloviny válcové části pro ozub. kolo}$$

Lineární interpoleace součinitele zkrutu ξ_4

$$x_{\xi 4} := \frac{d_{42}}{d_{41}} = 2.03571$$

$$y_{0_ \xi 4} := 0.1$$

$$y_{1_ \xi 4} := 0.107$$

$$x_{0_ \xi 4} := 2$$

$$x_{1_ \xi 4} := 3$$

$$y_{\xi 4} := y_{0_ \xi 4} + (x_{\xi 4} - x_{0_ \xi 4}) \cdot \frac{y_{1_ \xi 4} - y_{0_ \xi 4}}{x_{1_ \xi 4} - x_{0_ \xi 4}} \quad y_{\xi 4} = 0.10025$$

$$\xi_4 := y_{\xi 4}$$

$$l_{\text{red}4} := (l_{41} + \xi_4 \cdot d_{41}) \cdot \frac{D_{\text{red}}^4}{d_{41}^4} + (l_{42} - \xi_4 \cdot d_{41}) \cdot \frac{D_{\text{red}}^4}{d_{42}^4} \quad l_{\text{red}4} = 370.37594 \cdot \text{mm}$$

Redukované délky

$$l_{\text{red}1} = 100.08966 \cdot \text{mm}$$

$$l_{\text{red}2} = 30.5 \cdot \text{mm}$$

$$l_{\text{red}3} = 16.6593 \cdot \text{mm}$$

$$l_{\text{red}4} = 370.37594 \cdot \text{mm}$$

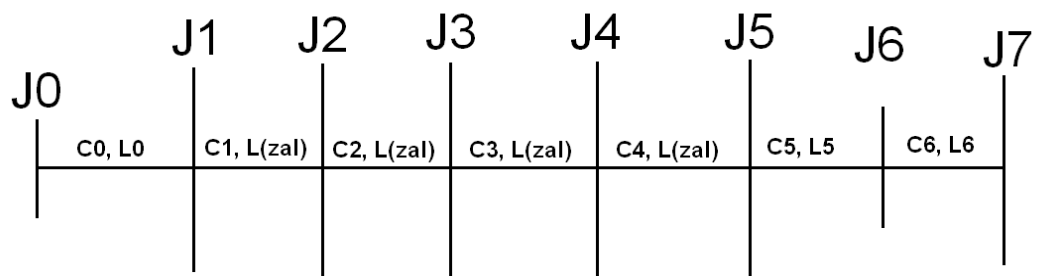
$$l_{\text{red_zal}} = 317.14186 \cdot \text{mm}$$

$$L_0 := \text{round} \left[\left(l_{\text{red}1} + \frac{l_{\text{red_zal}}}{2} \right) \cdot \frac{1}{\text{mm}}, (3) \right] \text{mm} = 258.661 \cdot \text{mm}$$

$$L_{\text{zal}} := \text{round} \left[l_{\text{red_zal}} \cdot \frac{1}{\text{mm}}, (3) \right] \text{mm} = 317.142 \cdot \text{mm}$$

$$L_5 := \text{round} \left[\left(l_{\text{red}2} + l_{\text{red}3} + \frac{l_{\text{red_zal}}}{2} \right) \cdot \frac{1}{\text{mm}}, (3) \right] \text{mm} = 205.73 \cdot \text{mm}$$

$$L_6 := \text{round} \left[l_{\text{red}4} \cdot \frac{1}{\text{mm}}, (3) \right] \text{mm} = 370.376 \cdot \text{mm}$$



Tuhosti úseků torzního modelu klik. hřídele

$$G_o := 8.1 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$$

$$J_p := \frac{\pi \cdot D_{\text{red}}^4}{32} = 9.43063 \times 10^6 \cdot \text{mm}^4$$

$$C_0 := \text{round} \left[\frac{G_o \cdot J_p}{L_0} \cdot \frac{\text{rad}}{\text{N} \cdot \text{m}}, (0) \right] \cdot \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad}} = 2.95321 \times 10^6 \cdot \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad}}$$

$$C_1 := \text{round} \left[\frac{G_o \cdot J_p}{L_{\text{zal}}} \cdot \frac{\text{rad}}{\text{N} \cdot \text{m}}, (0) \right] \cdot \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad}} = 2.40864 \times 10^6 \cdot \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad}}$$

$$C_2 := C_1$$

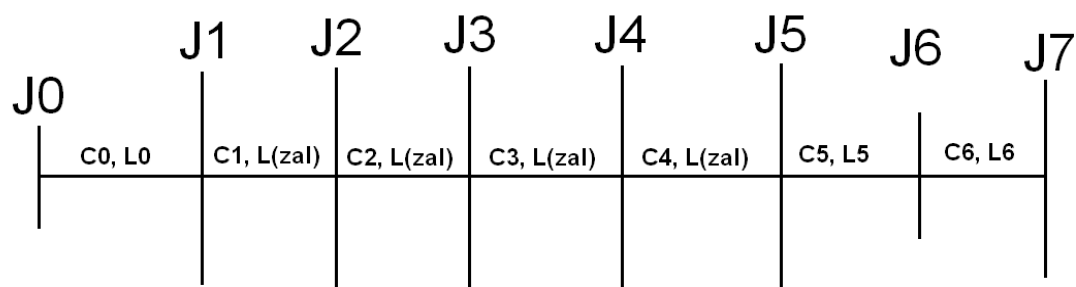
$$C_3 := C_1$$

$$C_4 := C_1$$

$$C_5 := \text{round} \left[\frac{G_o \cdot J_p}{L_5} \cdot \frac{\text{rad}}{\text{N} \cdot \text{m}}, (0) \right] \cdot \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad}} = 3.71303 \times 10^6 \cdot \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad}}$$

$$C_6 := \text{round} \left[\frac{G_o \cdot J_p}{L_6} \cdot \frac{\text{rad}}{\text{N} \cdot \text{m}}, (0) \right] \cdot \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad}} = 2.06245 \times 10^6 \cdot \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad}}$$

Výsledky výpočtu redukce hmot a délek



Momenty setrvačnosti

$$J_1 = 0.04963 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_2 = 0.17176 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_3 = 0.17175 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_4 = 0.17175 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_5 = 0.17175 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_6 = 0.17218 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_7 = 0.03671 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_8 = 3.12028 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Délky mezi hmotami

$$L_0 = 258.661 \cdot \text{mm}$$

$$L_{\text{zal}} = 317.142 \cdot \text{mm}$$

$$L_5 = 205.73 \cdot \text{mm}$$

$$L_6 = 370.376 \cdot \text{mm}$$

Tuhosti úseků KH

$$C_0 = 2.95321 \times 10^6 \cdot \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad}}$$

$$C_1 = 2.40864 \times 10^6 \cdot \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad}}$$

$$C_2 = 2.40864 \times 10^6 \cdot \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad}}$$

$$C_3 = 2.40864 \times 10^6 \cdot \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad}}$$

$$C_4 = 2.40864 \times 10^6 \cdot \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad}}$$

$$C_5 = 3.71303 \times 10^6 \cdot \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad}}$$

$$C_6 = 2.06245 \times 10^6 \cdot \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad}}$$

Rozměry vývažku pro statické vyvážení

$$\begin{aligned}m_v &:= 3.09\text{kg} && \text{hmotnost kroužku} \\x &:= 25\text{mm} && \text{polovina celkové délky ojnicního čepu (s rádiusy R5)} \\z &:= 2 \cdot x - 10\text{mm} \quad z = 40 \cdot \text{mm} && \text{výška kroužku} \\d &:= 82\text{mm} && \text{vnitřní průměr kroužku} \\\rho &:= 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\D &:= \sqrt{\frac{4 \cdot m_v}{\pi \cdot z \cdot \rho} + d^2} && D = 138.758 \cdot \text{mm}\end{aligned}$$

Vývažky momentu setrvačných sil posuvných částí I. řádu

$$\begin{aligned}m_p &:= 5.72 \cdot \text{kg} && \text{hmotnost posuvných částí = píst + pístní čep + posuvná část ojnice} \\m_I &:= 3.09\text{kg} && \text{hmotnost posuvné části ojnice = NEPOTŘEBNÉ} \\r_k &:= 74.5\text{mm} && \text{poloměr kliky (zalomení)} \\a &:= 169\text{mm} && \text{rozteč válců}\end{aligned}$$

Poloha na řemenici

$$\begin{aligned}r_v &:= 70.25\text{mm} && \text{poloměr polohy těžiště vývažku} \\b &:= 1072\text{mm} - 25\text{mm} && \text{podélná vzdálenost těžišť vývažků} \\m_{vI} &:= \frac{0.449 \cdot m_p \cdot r_k \cdot a}{2 \cdot r_v \cdot b} && m_{vI} = 219.818 \cdot \text{gm} \\m_{I_B} &:= 6984\text{gm} && \text{hmotnost řemenice bez vývyžku} \\m_{I_S} &:= 7201\text{gm} && \text{hmotnost řemenice s vývažkem} \\m_{vI_REAL} &:= m_{I_S} - m_{I_B} = 217 \cdot \text{gm}\end{aligned}$$

Poloha na setrvačnicku

$$\begin{aligned}r_{setr} &:= 190\text{mm} \\m_{vII} &:= \frac{0.449 \cdot m_p \cdot r_k \cdot a}{2 \cdot r_{setr} \cdot b} && m_{vII} = 81.275 \cdot \text{gm} \\m_{II_B} &:= 44289\text{gm} && \text{hmotnost setrvačnicku bez vývyžku} \\m_{II_S} &:= 44209\text{gm} && \text{hmotnost setrvačnicku s vývažkem} \\m_{vII_REAL} &:= m_{II_B} - m_{II_S} = 80 \cdot \text{gm}\end{aligned}$$

Výpočty dynamiky klikového mechanismu a volného a vynuceného kmitání

$D := 130\text{mm}$	vrtání válce	
$l_o := 270\text{mm}$	délka ojnice	
$r := 74.5\text{mm}$	poloměr kliky	
$z := 2r = 149\cdot\text{mm}$	zdvih pístu	
$n_v := 5$	počet válců	
$\tau := 0.5$	taktnost motoru	
$n := 2200\text{min}^{-1}$	jmenovité otáčky motoru	
$m_p := 5.72\cdot\text{kg}$	hmotnost posuvných částí = píst + pístní čep + posuvná část ojnice	
$m_2 := 3.09\text{kg}$	hmotnost rotační části ojnice	
$\theta_{4D} := \frac{720\text{deg}}{n_v} = 144\cdot\text{deg}$	úhel rozestupu zážehů	
$\lambda := \frac{r}{l_o}$	$\lambda = 0.2759259$	klikový poměr
$V_{z1} := \frac{\pi\cdot D^2}{4}\cdot z$	$V_{z1} = 1.9777111\text{ L}$	zdvihový objem jednoho válce
$V_z := V_{z1}\cdot n_v$	$V_z = 9.8885556\text{ L}$	zdvihový objem motoru
$c_s := 2\cdot z\cdot n$	$c_s = 10.9266667\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	střední pístová rychlost

Kinematické veličiny v klikovém mechanismu

$\text{krok} := 1\text{deg}$		
$i_{\text{max}} := \frac{2 \cdot 360\text{deg}}{\text{krok}} - 1$		
$i := 0..i_{\text{max}}$		
$\alpha_i := i \cdot \text{krok}$		
$\omega := 2 \cdot \pi \cdot n$	$\omega = 230.3834613 \cdot \text{s}^{-1}$	úhlová rychlost otáčení klikového hřídele
$s(\alpha) := r \cdot \left[1 - \cos(\alpha) + \frac{\lambda}{4} \cdot (1 - \cos(2 \cdot \alpha)) \right]$		dráha pístu
$v(\alpha) := r \cdot \omega \cdot \left(\sin(\alpha) + \frac{\lambda}{2} \cdot \sin(2\alpha) \right)$		rychlost pístu

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

zrychlení pístu

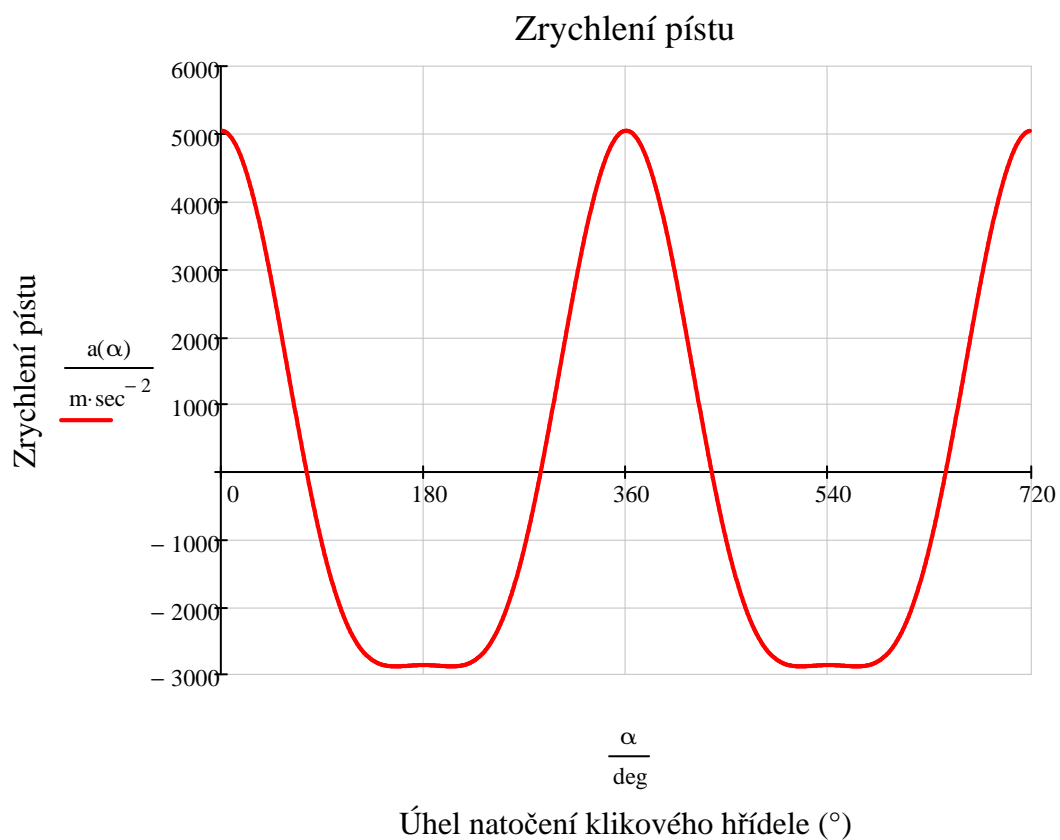
i =

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

I. harmonická složka zrychlení

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

II. harmonická složka zrychlení



0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
...

P := READPRN("tlaky.dat")

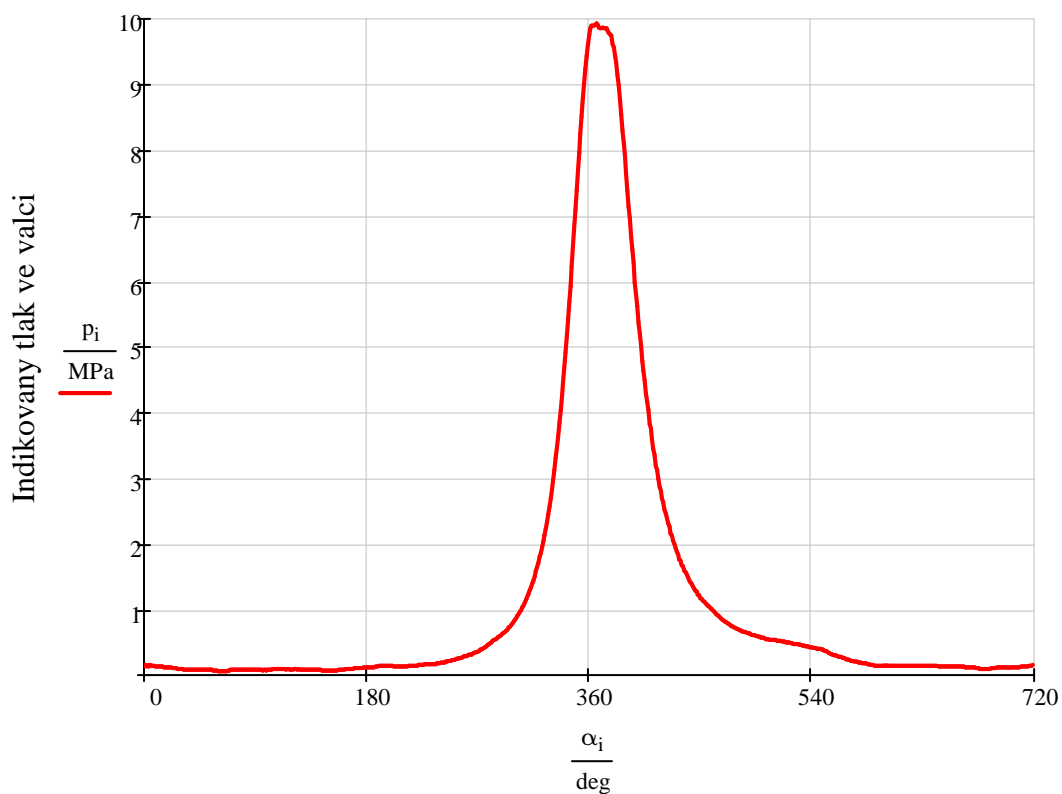
$n_p := 720$

$i := 0..n_p - 1$

$\alpha_i := i \cdot \text{deg}$

$p_i := P_i \cdot \text{MPa}$ indikované tlaky ve válci

$p_{\text{atm}_i} := 0.1 \text{ MPa}$ atmosferický tlak



Úhel natočení klikového hřídele

$p_{i\max} := \max(p)$ $p_{i\max} = 9.939 \cdot \text{MPa}$ maximální indikovaný tlak

$p_{i\min} := \min(p)$ $p_{i\min} = 0.06313 \cdot \text{MPa}$ minimální indikovaný tlak

Síly v klikovém mechanismu

$S_p := \frac{\pi \cdot D^2}{4}$ $S_p = 132.7322896 \cdot \text{cm}^2$ plocha dna pístu

$F_p := (p - p_{\text{atm}}) \cdot S_p$ síla od tlaků plynů

$F_{p\max} := \max(F_p)$ $F_{p\max} = 130.5952998 \cdot \text{kN}$ maximální síla od tlaků plynů

$F_{p\min} := \min(F_p)$ $F_{p\min} = -489.3839518 \text{ N}$ minimální síla od tlaků plynů

$\beta_i := \text{asin}(\lambda \cdot \sin(\alpha_i))$ úhel odklonu ojnice

$F_{cs} := -m_p \cdot a(\alpha)$ setrvačná síla posuvných hmot

$F_{csI} := -m_p \cdot a_1(\alpha)$ I. harmonická složka setrvačné síly posuvných hmot

$F_{csII} := -m_p \cdot a_2(\alpha)$ II. harmonická složka setrvačné síly posuvných hmot

$F_{oj} := \frac{F_{cs} + F_p}{\cos(\beta)}$ celková síla v ojnici

$$F_{t_i} := F_{o_{j_i}} \cdot \sin(\alpha_i + \beta_i)$$

celková tečná síla na ojničním čepu

$$F_{p_o} := \frac{F_p}{\cos(\beta)}$$

síla od tlaku plynů v ojnici

$$F_{p_{t_i}} := F_{p_{o_i}} \cdot \sin(\alpha_i + \beta_i)$$

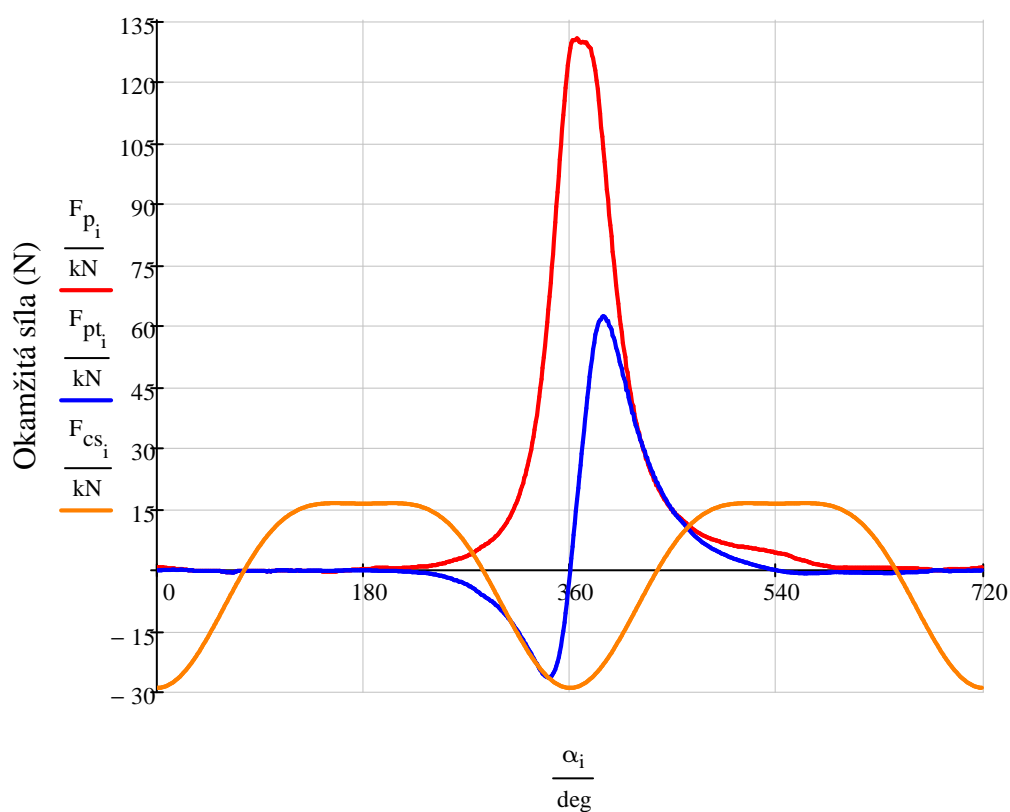
tečná síla od tlaku plynů na ojničním čepu

$$F_{s_o} := \frac{F_{cs}}{\cos(\beta)}$$

setrvačná síla pos. hmot v ojnici

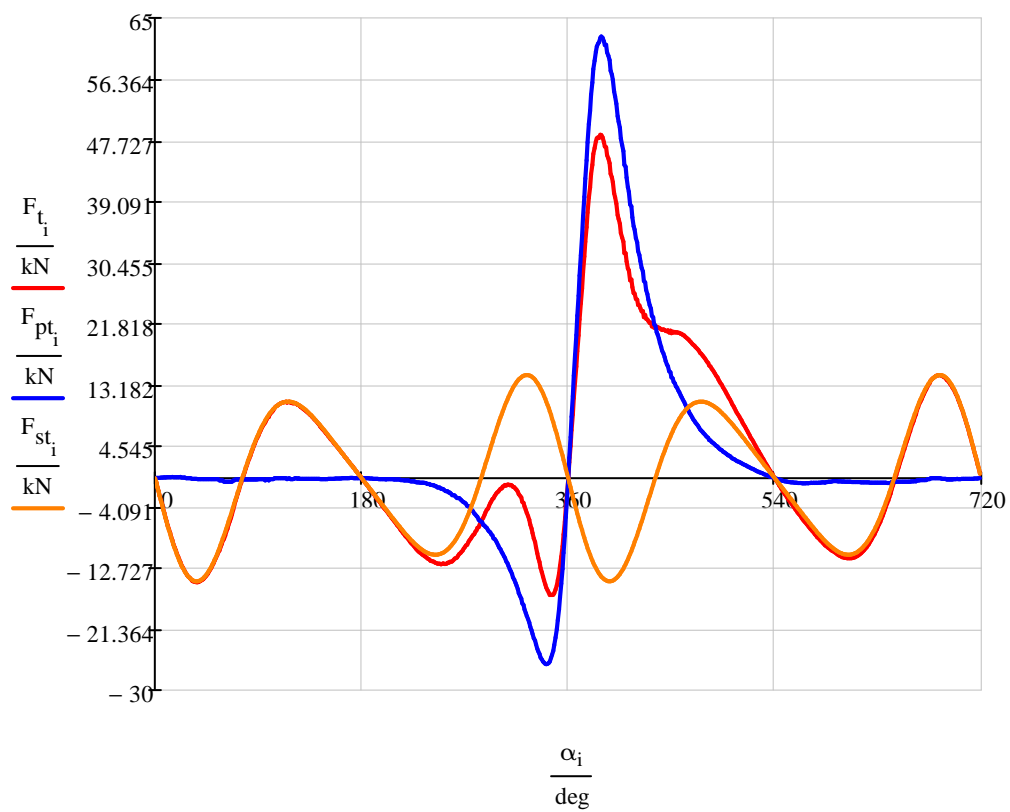
$$F_{s_{t_i}} := F_{s_{o_i}} \cdot \sin(\alpha_i + \beta_i)$$

tečná setrvačná síla pos. hmot na ojničním čepu



Úhel natočení klikového hřídele (°)

- Síla od tlaku plynů
- Tečná síla od tlaku plynů na ojničním čepu
- Setrvačná síla posuvných hmot



Celkový točivý moment na ojnicním čepu

$$M_{to_i} := F_{t_i} \cdot r$$

celkový točivý moment

$$M_{to_{max}} := \max(M_{to})$$

$$M_{to_{max}} = 3.615837 \times 10^3 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

maximální točivý moment

$$M_{to_{min}} := \min(M_{to})$$

$$M_{to_{min}} = -1.2317001 \times 10^3 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

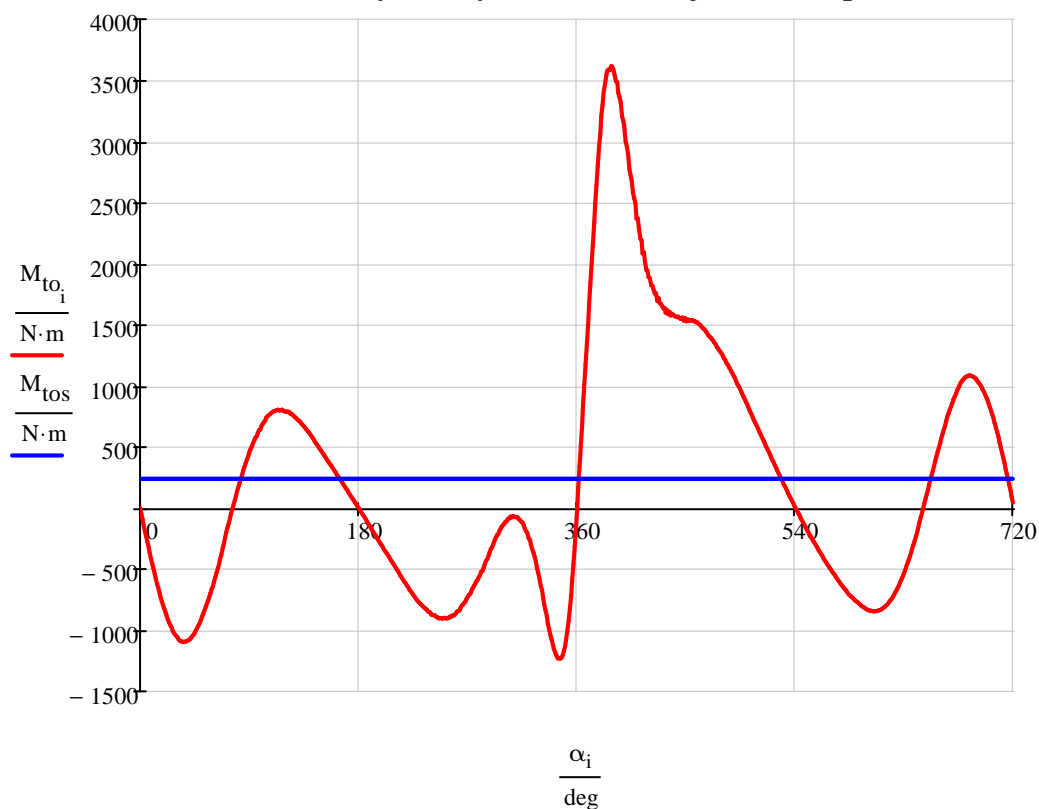
minimální točivý moment

$$M_{to_s} := \text{mean}(M_{to})$$

$$M_{to_s} = 238.2023921 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

průměrný točivý moment

Celkový točivý moment na ojnicním čepu



Úhel natočení klikového hřídele

- Průběh momentu
- Průměrný točivý moment

Točivý moment od tlaku plynů na ojnicím čepu

$$M_{tp_i} := F_{pt_i} \cdot r$$

točivý moment od tlaku plynů

$$M_{tpmax} := \max(M_{tp})$$

$$M_{tpmax} = 4.6499802 \times 10^3 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

maximální točivý moment

$$M_{tpmin} := \min(M_{tp})$$

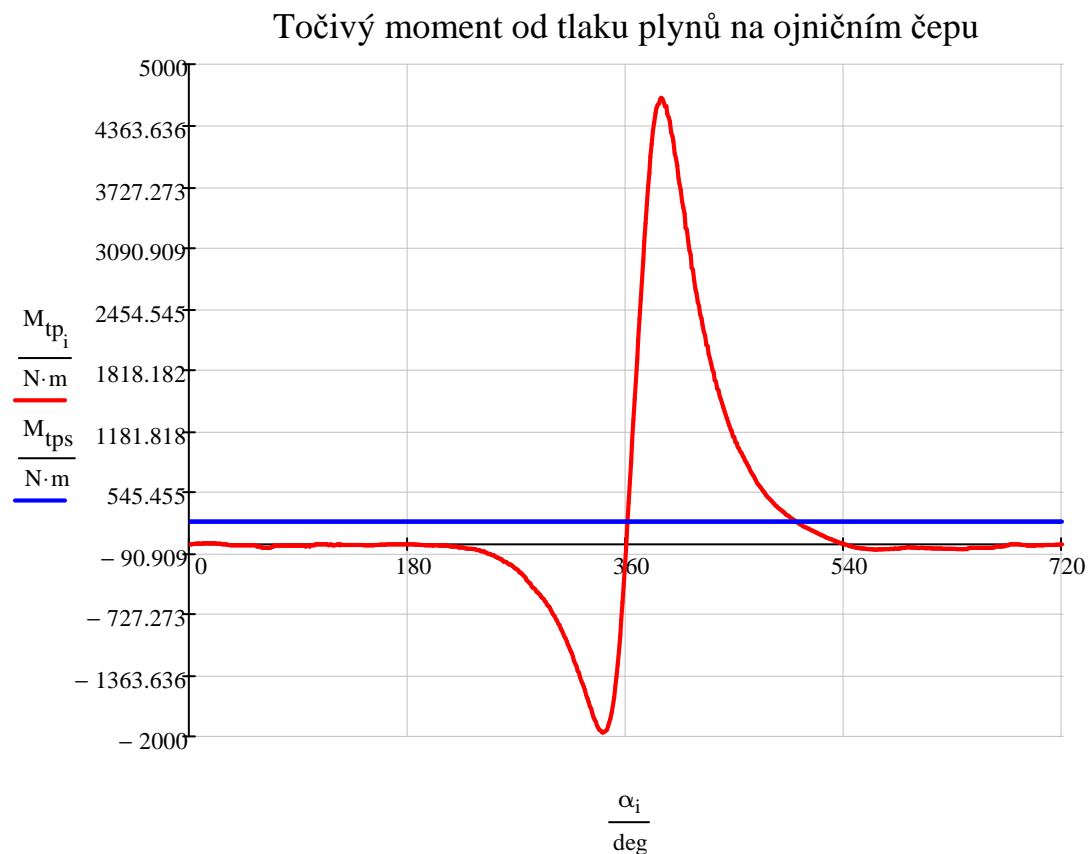
$$M_{tpmin} = -1.9587762 \times 10^3 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

minimální točivý moment

$$M_{tps} := \text{mean}(M_{tp})$$

$$M_{tps} = 238.2023921 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

průměrný točivý moment



Úhel natočení klikového hřídele

- Průběh momentu
- Průměrný točivý moment

Točivý moment od setrvačných sil posunutých hmot

$$M_{ts_i} := F_{st_i} \cdot r$$

točivý moment od strv. sil

$$M_{tsmax} := \max(M_{ts})$$

$$M_{tsmax} = 1.0861117 \times 10^3 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

maximální točivý moment

$$M_{tsmin} := \min(M_{ts})$$

$$M_{tsmin} = -1.0861117 \times 10^3 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

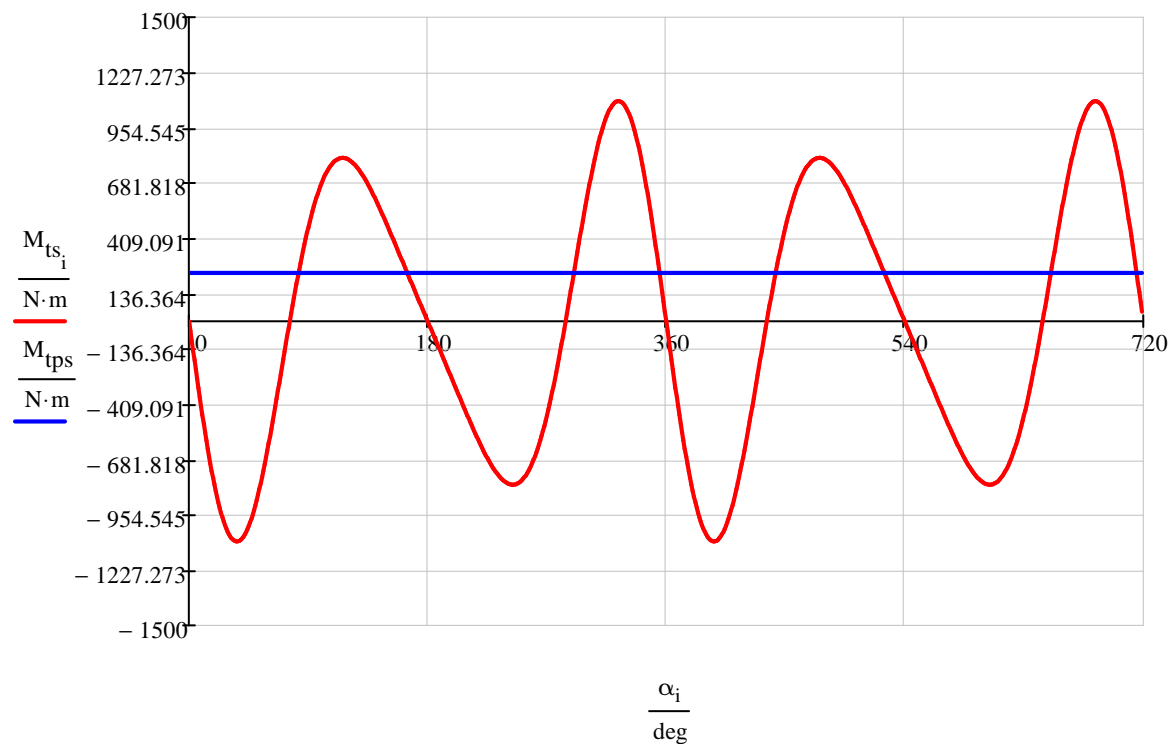
minimální točivý moment

$$M_{tss} := \text{mean}(M_{ts})$$

$$M_{tss} = 5.6152613 \times 10^{-14} \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

průměrný točivý moment

Točivý moment od setrvačných sil posuv. hmot



Úhel natočení klikového hřídele

— Průběh momentu

— Průměrný točivý moment

Harmonická analýza točivého momentu

$n_p = 720$	počet kroků - pro stejné body jako spalovací tlaky = od 0 do 719° natočení KH
$k := 0..24$	počet kroků 2 - počet řádů žádaných harmonických složek, od 0 po 1 do 24
$\kappa_k := 0.5 \cdot k$	řád harmonických složek - po 0,5, poloviční velikost k
$j := i$	definice imaginární jednotky j

Točivý moment od tlaku plynů

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

vyjádření budícího momentu jako součtu harmonických funkcí

$$a_{h_k} := \operatorname{Re}(h_k)$$

koficienty ak Fourierovy řady - reálná část

$$b_{h_k} := \operatorname{Im}(h_k)$$

koficienty bk Fourierovy řady - imaginární část

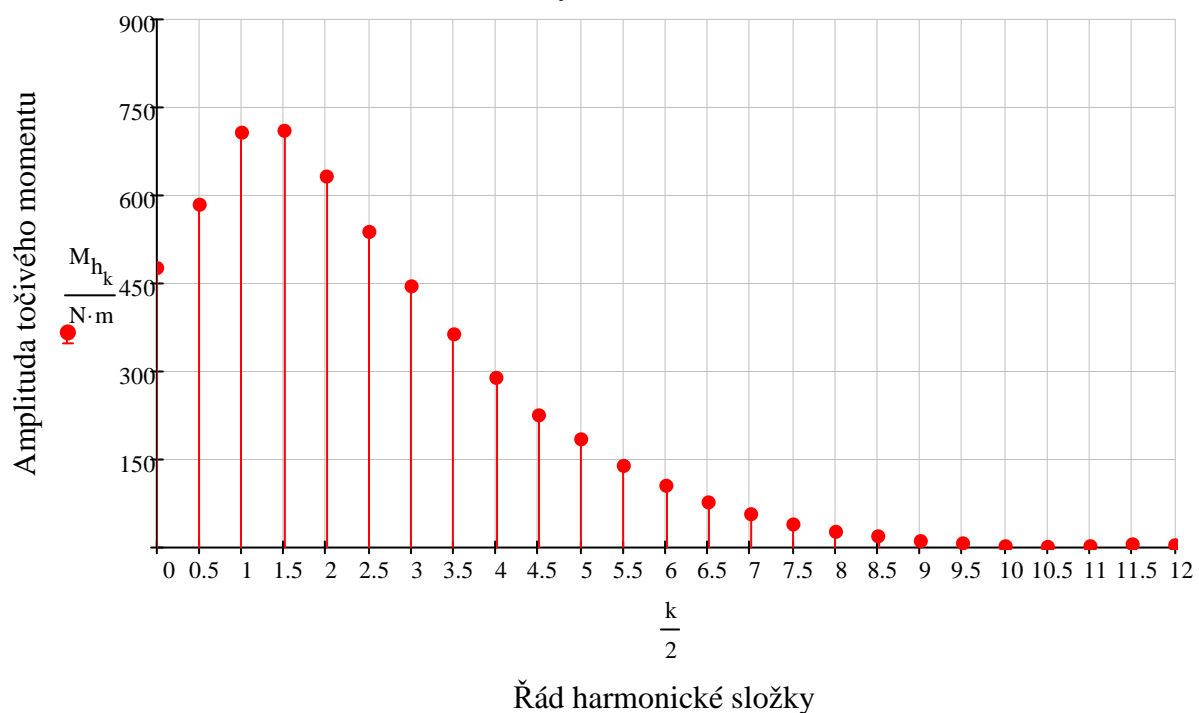
$$M_{h_k} := \sqrt{\left(\operatorname{Re}(h_k) \right)^2 + \left(\operatorname{Im}(h_k) \right)^2}$$

vektor amplitud 24 řádů harmonických složek točivého momentu

$$\gamma_k := \operatorname{atan} \left(\frac{\operatorname{Im}(h_k)}{\operatorname{Re}(h_k)} \right)$$

fázový posun harmonických složek

Harmonické složky točivého momentu do 12. řádu



Výstup z programu HOLZER

$$N_1 := 9589.2 \text{ min}^{-1} \quad N_1 = 159.82 \cdot \text{Hz}$$

$$N_2 := 25854.8 \text{ min}^{-1} \quad N_2 = 430.9133333 \cdot \text{Hz}$$

$$\underline{a_1} := \begin{pmatrix} 1 \\ 0.98306 \\ 0.89159 \\ 0.73599 \\ 0.52745 \\ 0.28098 \\ 0.10795 \\ -0.20547 \end{pmatrix} \quad \underline{a_2} := \begin{pmatrix} 1 \\ 0.87688 \\ 0.26742 \\ -0.48186 \\ -0.97919 \\ -0.96453 \\ -0.62710 \\ 0.06216 \end{pmatrix}$$

$$\underline{J_h} := \begin{pmatrix} 0.0496 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \\ 0.1718 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \\ 0.1718 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \\ 0.1718 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \\ 0.1718 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \\ 0.1722 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \\ 0.0367 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \\ 3.12 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \end{pmatrix}$$

$$\underline{C_h} := \begin{pmatrix} 2953200 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad}} \\ 2408600 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad}} \\ 2408600 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad}} \\ 2408600 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad}} \\ 2408600 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad}} \\ 3713000 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad}} \\ 2062500 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad}} \end{pmatrix}$$

Vlastní úhlové frekvence

$$\Omega_1 := N_1 \cdot 2\pi = 1.0041787 \times 10^3 \cdot \text{rad} \cdot \text{sec}^{-1}$$

$$\Omega_2 := N_2 \cdot 2\pi = 2.7075083 \times 10^3 \cdot \text{rad} \cdot \text{sec}^{-1}$$

Kritické otáčky

$$n_1(\kappa) := \frac{N_1}{\kappa}$$

$$n_2(\kappa) := \frac{N_2}{\kappa}$$

$$\kappa := 0.5, 1 \dots 12$$

$\kappa =$	$\frac{n_1(\kappa)}{\min^{-1}} =$	$\frac{n_2(\kappa)}{\min^{-1}} =$
0.5	$1.91784 \cdot 10^4$	$5.17096 \cdot 10^4$
1	$9.5892 \cdot 10^3$	$2.58548 \cdot 10^4$
1.5	$6.3928 \cdot 10^3$	$1.7236533 \cdot 10^4$
2	$4.7946 \cdot 10^3$	$1.29274 \cdot 10^4$
2.5	$3.83568 \cdot 10^3$	$1.034192 \cdot 10^4$
3	$3.1964 \cdot 10^3$	$8.6182667 \cdot 10^3$
3.5	$2.7397714 \cdot 10^3$	$7.3870857 \cdot 10^3$
4	$2.3973 \cdot 10^3$	$6.4637 \cdot 10^3$
4.5	$2.1309333 \cdot 10^3$	$5.7455111 \cdot 10^3$
5	$1.91784 \cdot 10^3$	$5.17096 \cdot 10^3$
5.5	$1.7434909 \cdot 10^3$	$4.7008727 \cdot 10^3$
6	$1.5982 \cdot 10^3$	$4.3091333 \cdot 10^3$
6.5	$1.4752615 \cdot 10^3$	$3.9776615 \cdot 10^3$
7	$1.3698857 \cdot 10^3$	$3.6935429 \cdot 10^3$
7.5	$1.27856 \cdot 10^3$	$3.4473067 \cdot 10^3$
8	$1.19865 \cdot 10^3$	$3.23185 \cdot 10^3$
8.5	$1.1281412 \cdot 10^3$	$3.0417412 \cdot 10^3$
9	$1.0654667 \cdot 10^3$	$2.8727556 \cdot 10^3$
9.5	$1.0093895 \cdot 10^3$	$2.7215579 \cdot 10^3$
10	958.92	$2.58548 \cdot 10^3$
10.5	913.2571429	$2.4623619 \cdot 10^3$
11	871.7454545	$2.3504364 \cdot 10^3$
11.5	833.8434783	$2.2482435 \cdot 10^3$
12	799.1	$2.1545667 \cdot 10^3$

Vydatnost rezonancí

$$\theta_{4D} = 144 \cdot \text{deg}$$

úhel rozestupu zážehů

pořadí zážehů

1-2-4-5-3

$$\theta := \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \cdot \theta_{4D} \\ 3 \cdot \theta_{4D} \\ 4 \cdot \theta_{4D} \\ 2 \cdot \theta_{4D} \end{pmatrix} \quad \theta = \begin{pmatrix} 0 \\ 144 \\ 432 \\ 576 \\ 288 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

Pro 1. vlastní frekvenci

$$ix := 0..(n_v - 1)$$

$$\kappa_k := 0.5 \cdot k$$

Pro harmonické řady 0,5 ; 3 ; 5,5 ; 8

$$\varepsilon_{1_1} := \sqrt{\left[\sum_{ix=0}^{n_v-1} \left(a_{1_{ix+1}} \cdot \sin(\kappa_1 \cdot \theta_{ix}) \right) \right]^2 + \left[\sum_{ix=0}^{n_v-1} \left(a_{1_{ix+1}} \cdot \cos(\kappa_1 \cdot \theta_{ix}) \right) \right]^2} \quad \varepsilon_{1_1} = 0.603993$$

Pro harmonické řady 1 ; 3,5 ; 6 ; 8,5

$$\varepsilon_{1_2} := \sqrt{\left[\sum_{ix=0}^{n_v-1} \left(a_{1_{ix+1}} \cdot \sin(\kappa_2 \cdot \theta_{ix}) \right) \right]^2 + \left[\sum_{ix=0}^{n_v-1} \left(a_{1_{ix+1}} \cdot \cos(\kappa_2 \cdot \theta_{ix}) \right) \right]^2} \quad \varepsilon_{1_2} = 0.6637833$$

Pro harmonické řady 1,5 ; 4 ; 6,5 ; 9

$$\varepsilon_{1_3} := \sqrt{\left[\sum_{ix=0}^{n_v-1} \left(a_{1_{ix+1}} \cdot \sin(\kappa_3 \cdot \theta_{ix}) \right) \right]^2 + \left[\sum_{ix=0}^{n_v-1} \left(a_{1_{ix+1}} \cdot \cos(\kappa_3 \cdot \theta_{ix}) \right) \right]^2} \quad \varepsilon_{1_3} = 0.6637833$$

Pro harmonické řady 2 ; 4,5 ; 7 ; 9,5

$$\varepsilon_{1_4} := \sqrt{\left[\sum_{ix=0}^{n_v-1} \left(a_{1_{ix+1}} \cdot \sin(\kappa_4 \cdot \theta_{ix}) \right) \right]^2 + \left[\sum_{ix=0}^{n_v-1} \left(a_{1_{ix+1}} \cdot \cos(\kappa_4 \cdot \theta_{ix}) \right) \right]^2} \quad \varepsilon_{1_4} = 0.603993$$

Pro harmonické řady 2,5 ; 5 ; 7,5 ; 10

$$\epsilon_{1_5} := \sqrt{\left[\sum_{ix=0}^{n_v-1} \left(a_{1_{ix+1}} \cdot \sin(\kappa_5 \cdot \theta_{ix}) \right) \right]^2 + \left[\sum_{ix=0}^{n_v-1} \left(a_{1_{ix+1}} \cdot \cos(\kappa_5 \cdot \theta_{ix}) \right) \right]^2} \quad \epsilon_{1_5} = 3.41907$$

$$\epsilon_{\Omega 1} := \begin{pmatrix} \epsilon_{1_1} \\ \epsilon_{1_2} \\ \epsilon_{1_3} \\ \epsilon_{1_4} \\ \epsilon_{1_5} \\ \epsilon_{1_1} \\ \epsilon_{1_2} \\ \epsilon_{1_3} \\ \epsilon_{1_4} \\ \epsilon_{1_5} \\ \epsilon_{1_1} \\ \epsilon_{1_2} \\ \epsilon_{1_3} \\ \epsilon_{1_4} \\ \epsilon_{1_5} \\ \epsilon_{1_1} \\ \epsilon_{1_2} \\ \epsilon_{1_3} \\ \epsilon_{1_4} \\ \epsilon_{1_5} \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} i := 0..19 \\ \kappa_i := 0.5 \cdot i + 0.5 \end{array}$$

Pro 2. vlastní frekvenci

$$ix := 0..(n_v - 1)$$

$$\kappa_k := 0.5 \cdot k$$

Pro harmonické řády 0,5 ; 3 ; 5,5 ; 8

$$\varepsilon_{2_1} := \sqrt{\left[\sum_{ix=0}^{n_v-1} \left(a_{2_{ix+1}} \cdot \sin(\kappa_1 \cdot \theta_{ix}) \right) \right]^2} + \left[\sum_{ix=0}^{n_v-1} \left(a_{2_{ix+1}} \cdot \cos(\kappa_1 \cdot \theta_{ix}) \right) \right]^2 \quad \varepsilon_{2_1} = 2.0375588$$

Pro harmonické řády 1 ; 3,5 ; 6 ; 8,5

$$\varepsilon_{2_2} := \sqrt{\left[\sum_{ix=0}^{n_v-1} \left(a_{2_{ix+1}} \cdot \sin(\kappa_2 \cdot \theta_{ix}) \right) \right]^2} + \left[\sum_{ix=0}^{n_v-1} \left(a_{2_{ix+1}} \cdot \cos(\kappa_2 \cdot \theta_{ix}) \right) \right]^2 \quad \varepsilon_{2_2} = 1.5594536$$

Pro harmonické řády 1,5 ; 4 ; 6,5 ; 9

$$\varepsilon_{2_3} := \sqrt{\left[\sum_{ix=0}^{n_v-1} \left(a_{2_{ix+1}} \cdot \sin(\kappa_3 \cdot \theta_{ix}) \right) \right]^2} + \left[\sum_{ix=0}^{n_v-1} \left(a_{2_{ix+1}} \cdot \cos(\kappa_3 \cdot \theta_{ix}) \right) \right]^2 \quad \varepsilon_{2_3} = 1.5594536$$

Pro harmonické řády 2 ; 4,5 ; 7 ; 9,5

$$\varepsilon_{2_4} := \sqrt{\left[\sum_{ix=0}^{n_v-1} \left(a_{2_{ix+1}} \cdot \sin(\kappa_4 \cdot \theta_{ix}) \right) \right]^2} + \left[\sum_{ix=0}^{n_v-1} \left(a_{2_{ix+1}} \cdot \cos(\kappa_4 \cdot \theta_{ix}) \right) \right]^2 \quad \varepsilon_{2_4} = 2.0375588$$

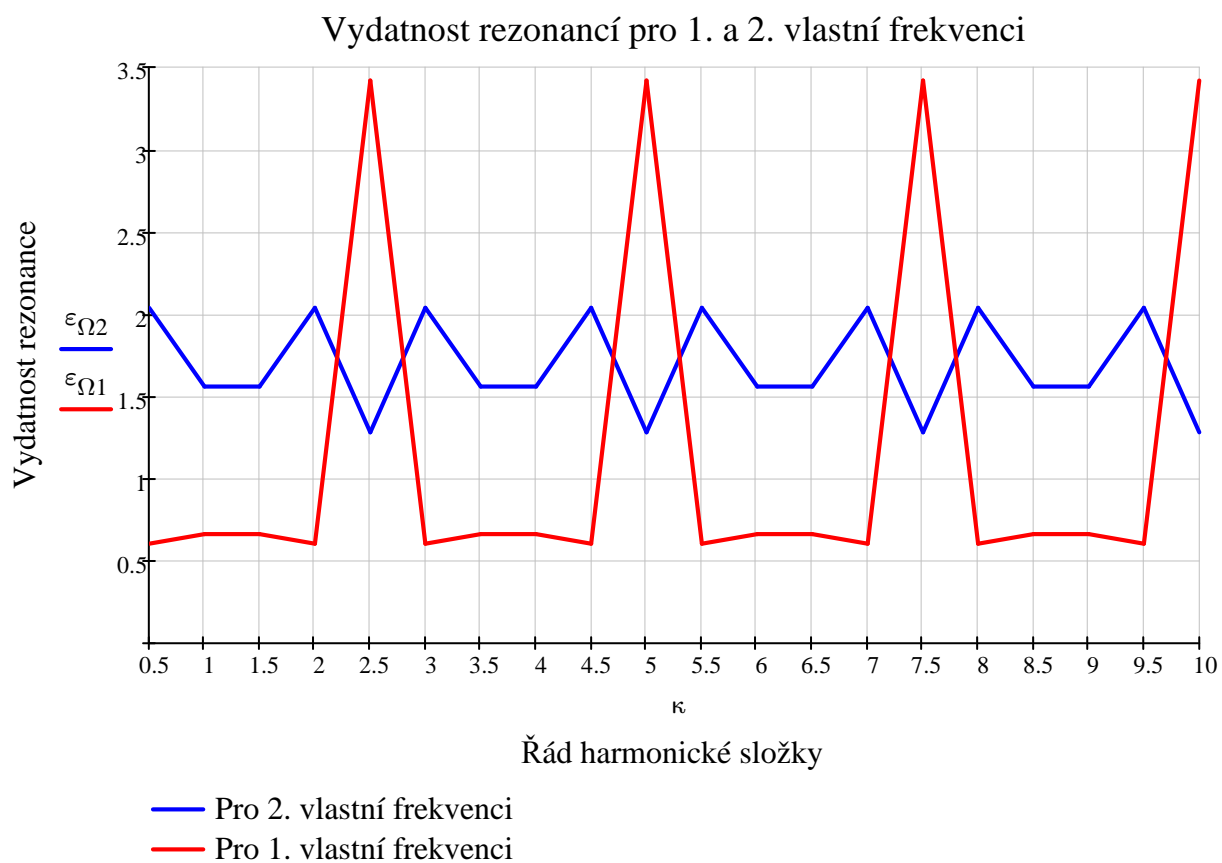
Pro harmonické řády 2,5 ; 5 ; 7,5 ; 10

$$\varepsilon_{2_5} := \sqrt{\left[\sum_{ix=0}^{n_v-1} \left(a_{2_{ix+1}} \cdot \sin(\kappa_5 \cdot \theta_{ix}) \right) \right]^2} + \left[\sum_{ix=0}^{n_v-1} \left(a_{2_{ix+1}} \cdot \cos(\kappa_5 \cdot \theta_{ix}) \right) \right]^2 \quad \varepsilon_{2_5} = 1.28128$$

$$\varepsilon_{\Omega 2} := \begin{pmatrix} \varepsilon_{2_1} \\ \varepsilon_{2_2} \\ \varepsilon_{2_3} \\ \varepsilon_{2_4} \\ \varepsilon_{2_5} \\ \varepsilon_{2_1} \\ \varepsilon_{2_2} \\ \varepsilon_{2_3} \\ \varepsilon_{2_4} \\ \varepsilon_{2_5} \\ \varepsilon_{2_1} \\ \varepsilon_{2_2} \\ \varepsilon_{2_3} \\ \varepsilon_{2_4} \\ \varepsilon_{2_5} \\ \varepsilon_{2_1} \\ \varepsilon_{2_2} \\ \varepsilon_{2_3} \\ \varepsilon_{2_4} \\ \varepsilon_{2_5} \end{pmatrix}$$

$$i := 0..19$$

$$\kappa_i := 0.5 \cdot i + 0.5$$



Torzní výchylky volného konce v rezonanci

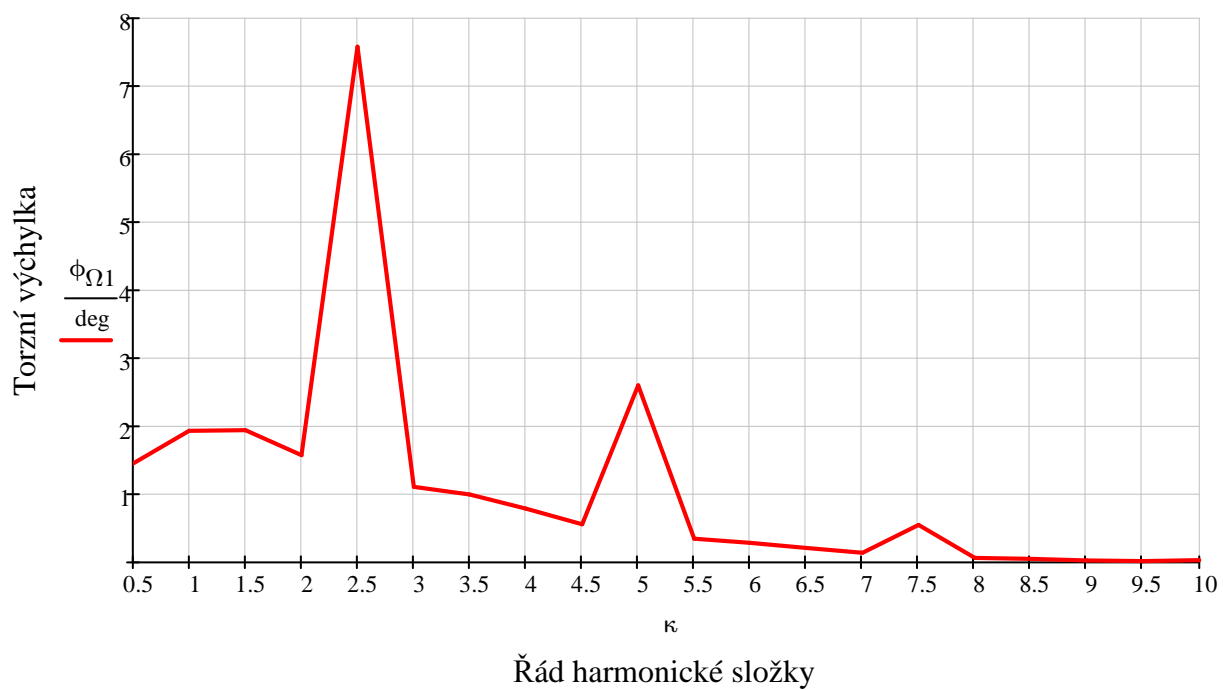
$\xi := 5.2 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{sec} \cdot \text{rad}^{-1}$ tlumící odpory (koeficient tlumení)

$x := 1 \dots 5$

Pro 1. vlastní frekvenci

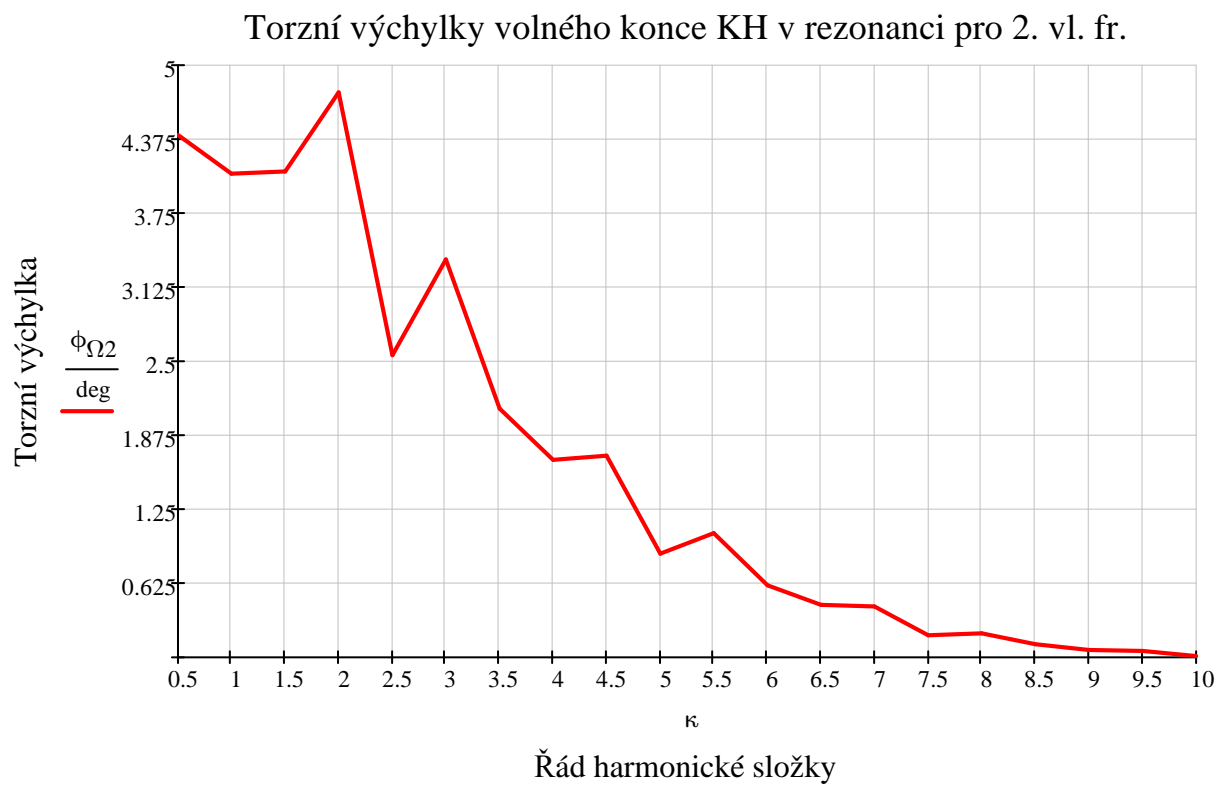
$$\phi_{\Omega 1_i} := \frac{M_{h_{i+1}} \cdot \varepsilon_{\Omega 1_i}}{\Omega_1 \cdot \xi \cdot \left[\sum_x (a_{1_x})^2 \right]}$$

Torzní výchylky volného konce KH v rezonanci pro 1. vl. fr.



Pro 2. vlastní frekvenci

$$\phi_{\Omega 2_i} := \frac{M_{h_{i+1}} \cdot \varepsilon_{\Omega 2_i}}{\Omega_1 \cdot \xi \cdot \left[\sum_x (a_{2_x})^2 \right]}$$



Poměrné nakroucení

$$\Delta a_1 := a_{1_6} - a_{1_7} = 0.31342$$

Návrh tlumiče torzních kmitů

Moment setrvačnosti setrvačníku tlumiče

$$J_{tl} := 0.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad - \text{VOLENO}$$

Moment setrvačnosti skříňě tlumiče

$$J_{sk} := (1.4217 \cdot 10^4 + 3.0536 \cdot 10^4) \text{ kg} \cdot \text{mm}^2 = 0.044753 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

Efektivní moment setrvačnosti torzní soustavy bez tlumiče

$$i := 0..7$$

$$J_{ef} := \sum_i \left[J_{h_i} \cdot (a_{1_i})^2 \right] \quad J_{ef} = 0.6387971 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

$$a_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0.98306 \\ 0.89159 \\ 0.73599 \\ 0.52745 \\ 0.28098 \\ 0.10795 \\ -0.20547 \end{pmatrix} \quad J_h = \begin{pmatrix} 0.0496 \\ 0.1718 \\ 0.1718 \\ 0.1718 \\ 0.1718 \\ 0.1722 \\ 0.0367 \\ 3.12 \end{pmatrix} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Poměrná velikost tlumiče

$$\mu := \frac{J_{tl}}{J_{ef}} \quad \mu = 0.3130885$$

Optimální naladění tlumiče

$$w := \frac{1}{1 + \mu} \quad w = 0.7615633$$

Vlastní úhlová frekvence tlumiče

$$\Omega_{tl} := \Omega_1 \cdot w \quad \Omega_{tl} = 764.7456408 \cdot \text{rad} \cdot \text{sec}^{-1}$$

Tuhost tlumiče

$$c_{tl} := J_{tl} \cdot \Omega_{tl}^2 \quad c_{tl} = 1.1696718 \times 10^5 \cdot \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad}}$$

Momenty setrvačnosti a tuhost tlumené torzní soustavy

$$J_{ht} := \begin{pmatrix} J_{tl} \\ J_{h_0} + J_{sk} \\ J_{h_1} \\ J_{h_2} \\ J_{h_3} \\ J_{h_4} \\ J_{h_5} \\ J_{h_6} \\ J_{h_7} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.2 \\ 0.094353 \\ 0.1718 \\ 0.1718 \\ 0.1718 \\ 0.1718 \\ 0.1722 \\ 0.0367 \\ 3.12 \end{pmatrix} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$C_{ht} := \begin{pmatrix} c_{tl} \\ C_{h_0} \\ C_{h_1} \\ C_{h_2} \\ C_{h_3} \\ C_{h_4} \\ C_{h_5} \\ C_{h_6} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.1696718 \times 10^5 \\ 2.9532 \times 10^6 \\ 2.4086 \times 10^6 \\ 2.4086 \times 10^6 \\ 2.4086 \times 10^6 \\ 2.4086 \times 10^6 \\ 3.713 \times 10^6 \\ 2.0625 \times 10^6 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad}}$$

Matice hmotnosti a tuhosti

$$M := \begin{pmatrix} J_{tl} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_{h_0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{h_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_{h_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_{h_3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{h_4} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{h_5} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{h_6} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{h_7} \end{pmatrix}$$

$$C_t := \begin{pmatrix} c_{tl} & -c_{tl} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c_{tl} & c_{tl} + C_{h_0} & -C_{h_0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -C_{h_0} & C_{h_0} + C_{h_1} & -C_{h_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -C_{h_1} & C_{h_1} + C_{h_2} & -C_{h_2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -C_{h_2} & C_{h_2} + C_{h_3} & -C_{h_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -C_{h_3} & C_{h_3} + C_{h_4} & -C_{h_4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -C_{h_4} & C_{h_4} + C_{h_5} & -C_{h_5} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -C_{h_5} & C_{h_5} + C_{h_6} & -C_{h_6} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -C_{h_6} & C_{h_6} \end{pmatrix} *$$

Matice k řešení problému vlastních čísel

$$A_t := M^{-1} \cdot C_t$$

Spektrální matice

$$\lambda_{vc} := \text{eigenvals}(A_t)$$

Modální matice

$$x_v := \text{eigenvecs}(A_t)$$

Poměrné amplitudy torzních výchylek

$$i := 0..8$$

pro 1. vlastní frekvenci

$$a_{t1,i} := \frac{x_{v,i,8}}{x_{v0,8}} \quad a_{t1} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0.243416 \\ 0.2116411 \\ 0.166002 \\ 0.1151238 \\ 0.0606122 \\ 4.1876152 \times 10^{-3} \\ -0.0325006 \\ -0.0982924 \end{pmatrix}$$

pro 2. vlastní frekvenci

$$a_{t2,i} := \frac{x_{v,i,6}}{x_{v0,6}} \quad a_{t2} = \begin{pmatrix} 1 \\ -1.245246 \\ -1.3067107 \\ -1.2596857 \\ -1.094678 \\ -0.8271422 \\ -0.4821359 \\ -0.2289711 \\ 0.2321368 \end{pmatrix}$$

Vektor vlastních frekvencí

$$\Omega_T := \sqrt{\lambda_{vc}}$$

$$\Omega_T = \begin{pmatrix} 1.3173857 \times 10^4 \\ 9.1201473 \times 10^3 \\ 7.0678348 \times 10^3 \\ 5.9675253 \times 10^3 \\ 4.4496249 \times 10^3 \\ 2.746755 \times 10^3 \\ 1.1459059 \times 10^3 \\ 3.1812255i \times 10^{-5} \\ 665.1898052 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{rad}}{\text{sec}}$$

Pro výpočet parametrů vlastního kmitání hřídele s tlumičem byl využit též program HOLZER a bylo ověřeno, že hodnoty získané oběma metodami se shodují. Při řešení varianty bez tlumiče byl použit pouze program HOLZER.

Frekvence a úhlová frekvence 1. vlastního kmitání tlumené soustavy

$$\Omega_{t1} := \Omega_{T8} = 665.1898052 \cdot \frac{\text{rad}}{\text{sec}}$$

$$N_{t1} := \frac{\Omega_{t1}}{2\pi} = 105.8682456 \cdot \text{Hz} \quad N_{t1} = 6.3520947 \times 10^3 \cdot \text{min}^{-1}$$

Frekvence a úhlová frekvence 2. vlastního kmitání tlumené soustavy

$$\Omega_{t2} := \Omega_{T6} = 1.1459059 \times 10^3 \cdot \frac{\text{rad}}{\text{sec}}$$

$$N_{t2} := \frac{\Omega_{t2}}{2\pi} = 182.3765958 \cdot \text{Hz} \quad N_{t2} = 1.0942596 \times 10^4 \cdot \text{min}^{-1}$$

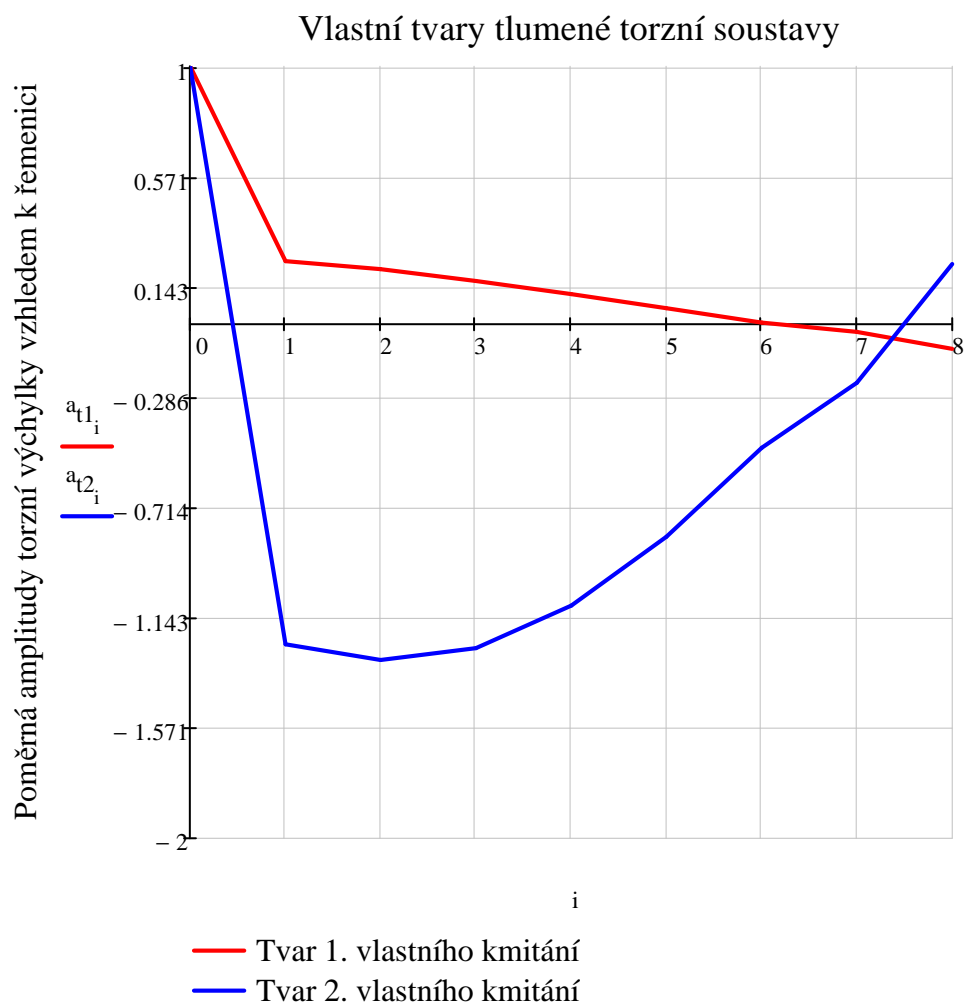
Poměrný útlum

$$\gamma_{\text{opt}} := \sqrt{\frac{1}{2 \cdot (1 + \mu) \cdot (2 + \mu)}} = 0.4057345$$

Tlumící odpor tlumiče (optimální součinitel tlumení)

$$\xi_{t1} := 2 \cdot \gamma_{\text{opt}} \cdot J_{t1} \cdot \Omega_{t1} \quad \xi_{t1} = 107.9561691 \cdot \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{sec} \cdot \text{rad}^{-1}$$

$i := 0..8$



Kritické otáčky tlumené soustavy

$$n_{t1}(\kappa) := \frac{N_{t1}}{\kappa}$$

$$n_{t2}(\kappa) := \frac{N_{t2}}{\kappa}$$

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

$\kappa =$	$n_{t1}(\kappa) =$	$n_{t2}(\kappa) =$
0.5	$1.2704189 \cdot 10^4$	$2.1885191 \cdot 10^4$
1	$6.3520947 \cdot 10^3$	$1.0942596 \cdot 10^4$
1.5	$4.2347298 \cdot 10^3$	$7.2950638 \cdot 10^3$
2	$3.1760474 \cdot 10^3$	$5.4712979 \cdot 10^3$
2.5	$2.5408379 \cdot 10^3$	$4.3770383 \cdot 10^3$
3	$2.1173649 \cdot 10^3$	$3.6475319 \cdot 10^3$
3.5	$1.8148842 \cdot 10^3$	$3.1264559 \cdot 10^3$
4	$1.5880237 \cdot 10^3$	$2.7356489 \cdot 10^3$
4.5	$1.4115766 \cdot 10^3$	$2.4316879 \cdot 10^3$
5	$1.2704189 \cdot 10^3$	$2.1885191 \cdot 10^3$
5.5	$1.1549263 \cdot 10^3$	$1.9895629 \cdot 10^3$
6	$1.0586825 \cdot 10^3$	$1.823766 \cdot 10^3$
6.5	977.2453439	$1.6834763 \cdot 10^3$
7	907.4421051	$1.563228 \cdot 10^3$
7.5	846.9459647	$1.4590128 \cdot 10^3$
8	794.0118419	$1.3678245 \cdot 10^3$
8.5	747.305263	$1.2873642 \cdot 10^3$
9	705.7883039	$1.215844 \cdot 10^3$
9.5	668.6415511	$1.1518522 \cdot 10^3$
10	635.2094736	$1.0942596 \cdot 10^3$

Vydatnost rezonancí tlumené soustavy pro 1. vlastní frekvenci

$$ix := 0 \dots (n_v - 1)$$

$$\kappa_k := 0.5 \cdot k$$

Pro harmonické řady 0,5 ; 3 ; 5,5 ; 8

$$\varepsilon_{t1_1} := \sqrt{\left[\sum_{ix=0}^{n_v-1} \left(a_{t1_ix+2} \cdot \sin(\kappa_1 \cdot \theta_{ix}) \right) \right]^2} + \sqrt{\left[\sum_{ix=0}^{n_v-1} \left(a_{t1_ix+2} \cdot \cos(\kappa_1 \cdot \theta_{ix}) \right) \right]^2} \quad \varepsilon_{t1_1} = 0.1884276$$

Pro harmonické řady 1 ; 3,5 ; 6 ; 8,5

$$\varepsilon_{t1_2} := \sqrt{\left[\sum_{ix=0}^{n_v-1} \left(a_{t1_ix+2} \cdot \sin(\kappa_2 \cdot \theta_{ix}) \right) \right]^2} + \sqrt{\left[\sum_{ix=0}^{n_v-1} \left(a_{t1_ix+2} \cdot \cos(\kappa_2 \cdot \theta_{ix}) \right) \right]^2} \quad \varepsilon_{t1_2} = 0.1796898$$

Pro harmonické řády 1,5 ; 4 ; 6,5 ; 9

$$\varepsilon_{t1_3} := \sqrt{\left[\sum_{ix=0}^{n_v-1} \left(a_{t1_{ix+2}} \cdot \sin(\kappa_3 \cdot \theta_{ix}) \right) \right]^2 + \left[\sum_{ix=0}^{n_v-1} \left(a_{t1_{ix+2}} \cdot \cos(\kappa_3 \cdot \theta_{ix}) \right) \right]^2} \quad \varepsilon_{t1_3} = 0.1796898$$

Pro harmonické řády 2 ; 4,5 ; 7 ; 9,5

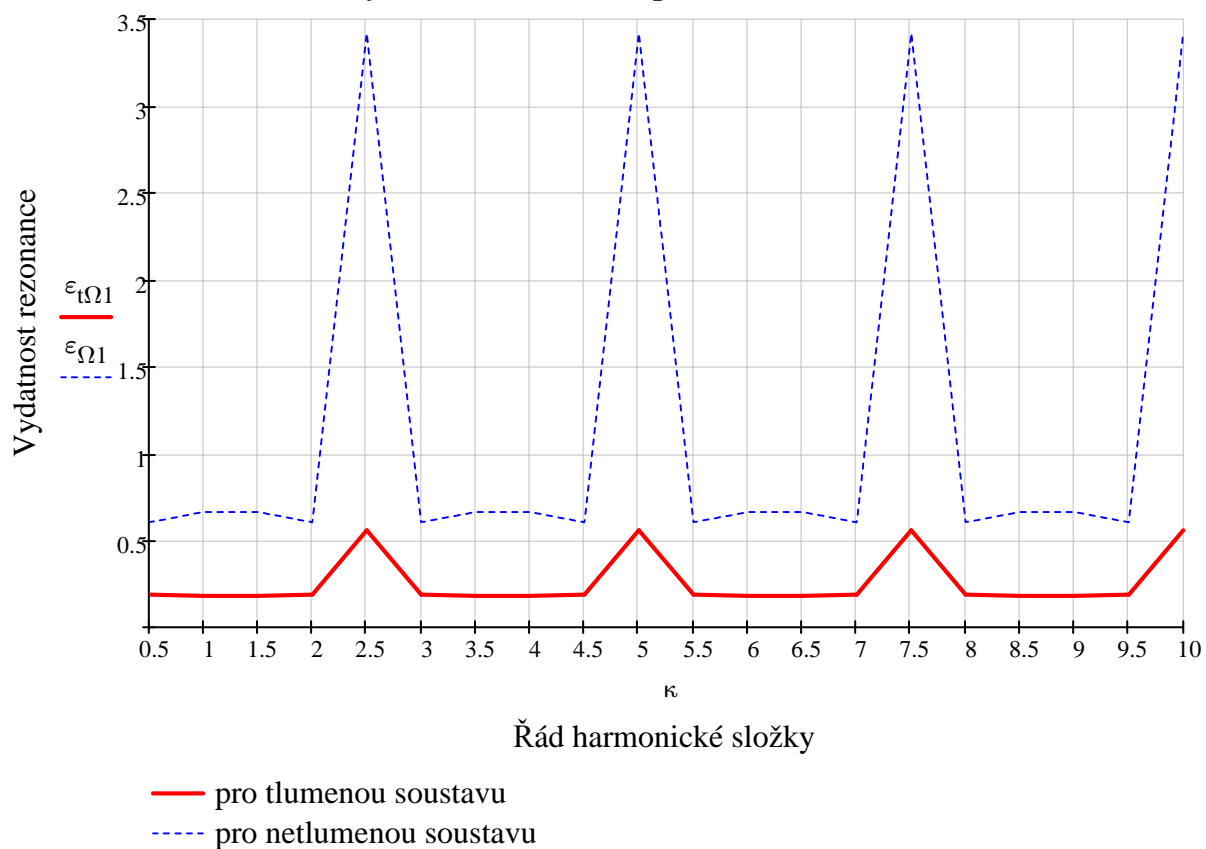
$$\varepsilon_{t1_4} := \sqrt{\left[\sum_{ix=0}^{n_v-1} \left(a_{t1_{ix+2}} \cdot \sin(\kappa_4 \cdot \theta_{ix}) \right) \right]^2 + \left[\sum_{ix=0}^{n_v-1} \left(a_{t1_{ix+2}} \cdot \cos(\kappa_4 \cdot \theta_{ix}) \right) \right]^2} \quad \varepsilon_{t1_4} = 0.1884276$$

Pro harmonické řády 2,5 ; 5 ; 7,5 ; 10

$$\varepsilon_{t1_5} := \sqrt{\left[\sum_{ix=0}^{n_v-1} \left(a_{t1_{ix+2}} \cdot \sin(\kappa_5 \cdot \theta_{ix}) \right) \right]^2 + \left[\sum_{ix=0}^{n_v-1} \left(a_{t1_{ix+2}} \cdot \cos(\kappa_5 \cdot \theta_{ix}) \right) \right]^2} \quad \varepsilon_{t1_5} = 0.5575668$$

$$\varepsilon_{t\Omega 1} := \begin{pmatrix} \varepsilon_{t1_1} \\ \varepsilon_{t1_2} \\ \varepsilon_{t1_3} \\ \varepsilon_{t1_4} \\ \varepsilon_{t1_5} \\ \varepsilon_{t1_1} \\ \varepsilon_{t1_2} \\ \varepsilon_{t1_3} \\ \varepsilon_{t1_4} \\ \varepsilon_{t1_5} \\ \varepsilon_{t1_1} \\ \varepsilon_{t1_2} \\ \varepsilon_{t1_3} \\ \varepsilon_{t1_4} \\ \varepsilon_{t1_5} \\ \varepsilon_{t1_1} \\ \varepsilon_{t1_2} \\ \varepsilon_{t1_3} \\ \varepsilon_{t1_4} \\ \varepsilon_{t1_5} \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} i := 0..19 \\ \kappa_i := 0.5 \cdot i + 0.5 \end{array}$$

Vydatnost rezonance pro 1. vlastní frekvenci



Pro 2. vlastní frekvenci

$$ix := 0..(n_v - 1)$$

$$\kappa_k := 0.5 \cdot k$$

Pro harmonické řády 0,5 ; 3 ; 5,5 ; 8

$$\epsilon_{t2_1} := \sqrt{\left[\sum_{ix=0}^{n_v-1} \left(a_{t2_ix+2} \cdot \sin(\kappa_1 \cdot \theta_{ix}) \right) \right]^2} + \sqrt{\left[\sum_{ix=0}^{n_v-1} \left(a_{t2_ix+2} \cdot \cos(\kappa_1 \cdot \theta_{ix}) \right) \right]^2} \quad \epsilon_{t2_1} = 0.677853$$

Pro harmonické řády 1 ; 3,5 ; 6 ; 8,5

$$\epsilon_{t2_2} := \sqrt{\left[\sum_{ix=0}^{n_v-1} \left(a_{t2_ix+2} \cdot \sin(\kappa_2 \cdot \theta_{ix}) \right) \right]^2} + \sqrt{\left[\sum_{ix=0}^{n_v-1} \left(a_{t2_ix+2} \cdot \cos(\kappa_2 \cdot \theta_{ix}) \right) \right]^2} \quad \epsilon_{t2_2} = 0.8434533$$

Pro harmonické řády 1,5 ; 4 ; 6,5 ; 9

$$\epsilon_{t2_3} := \sqrt{\left[\sum_{ix=0}^{n_v-1} \left(a_{t2_ix+2} \cdot \sin(\kappa_3 \cdot \theta_{ix}) \right) \right]^2} + \sqrt{\left[\sum_{ix=0}^{n_v-1} \left(a_{t2_ix+2} \cdot \cos(\kappa_3 \cdot \theta_{ix}) \right) \right]^2} \quad \epsilon_{t2_3} = 0.8434533$$

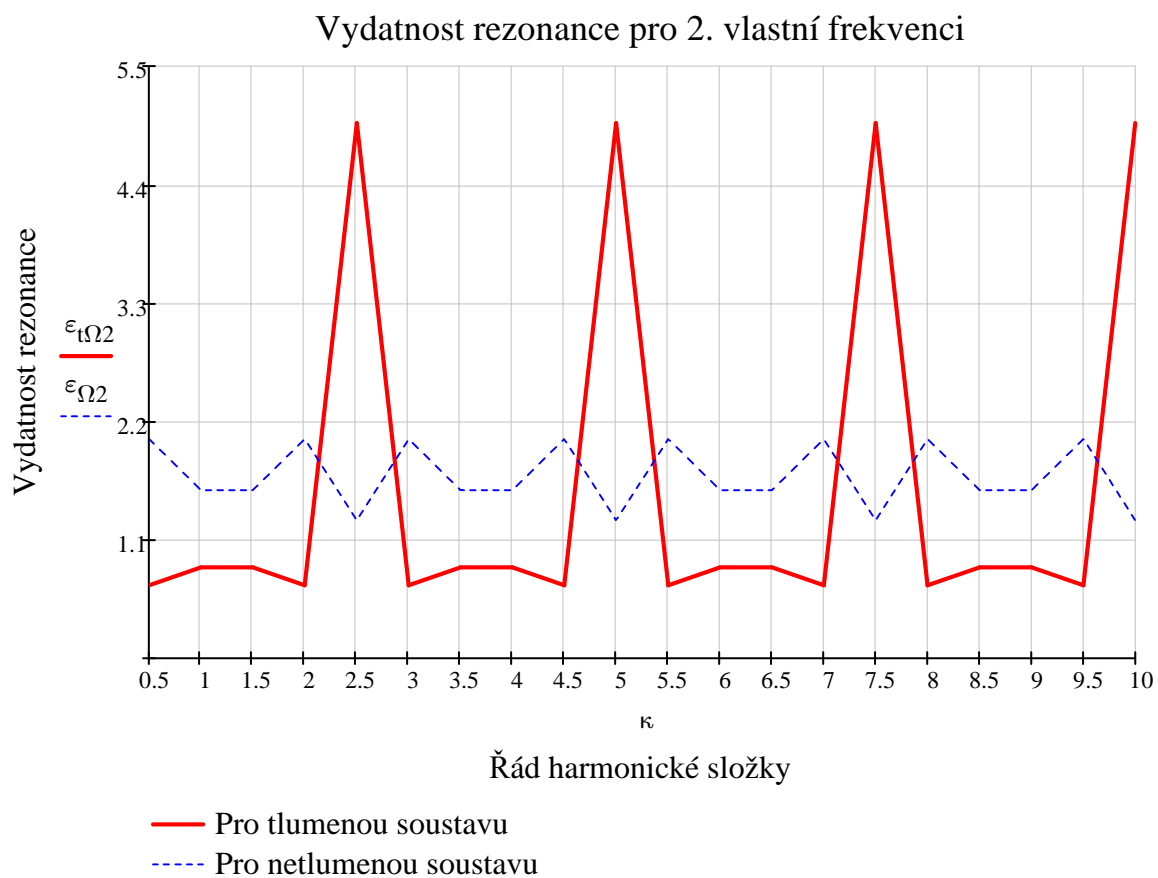
Pro harmonické řády 2 ; 4,5 ; 7 ; 9,5

$$\varepsilon_{t2_4} := \sqrt{\left[\sum_{ix=0}^{n_V-1} \left(a_{t2_ix+2} \cdot \sin(\kappa_4 \cdot \theta_{ix}) \right) \right]^2 + \left[\sum_{ix=0}^{n_V-1} \left(a_{t2_ix+2} \cdot \cos(\kappa_4 \cdot \theta_{ix}) \right) \right]^2} \quad \varepsilon_{t2_4} = 0.677853$$

Pro harmonické řády 2,5 ; 5 ; 7,5 ; 10

$$\varepsilon_{t2_5} := \sqrt{\left[\sum_{ix=0}^{n_V-1} \left(a_{t2_ix+2} \cdot \sin(\kappa_5 \cdot \theta_{ix}) \right) \right]^2 + \left[\sum_{ix=0}^{n_V-1} \left(a_{t2_ix+2} \cdot \cos(\kappa_5 \cdot \theta_{ix}) \right) \right]^2} \quad \varepsilon_{t2_5} = 4.9703526$$

$$\varepsilon_{t\Omega 2} := \begin{pmatrix} \varepsilon_{t2_1} \\ \varepsilon_{t2_2} \\ \varepsilon_{t2_3} \\ \varepsilon_{t2_4} \\ \varepsilon_{t2_5} \\ \varepsilon_{t2_1} \\ \varepsilon_{t2_2} \\ \varepsilon_{t2_3} \\ \varepsilon_{t2_4} \\ \varepsilon_{t2_5} \\ \varepsilon_{t2_1} \\ \varepsilon_{t2_2} \\ \varepsilon_{t2_3} \\ \varepsilon_{t2_4} \\ \varepsilon_{t2_5} \\ \varepsilon_{t2_1} \\ \varepsilon_{t2_2} \\ \varepsilon_{t2_3} \\ \varepsilon_{t2_4} \\ \varepsilon_{t2_5} \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} i := 0..19 \\ \kappa_i := 0.5 \cdot i + 0.5 \end{array}$$



Torzní výchylky v místě tlumiče pro tlumenou soustavu v rezonanci

Pro 1. vlastní frekvenci

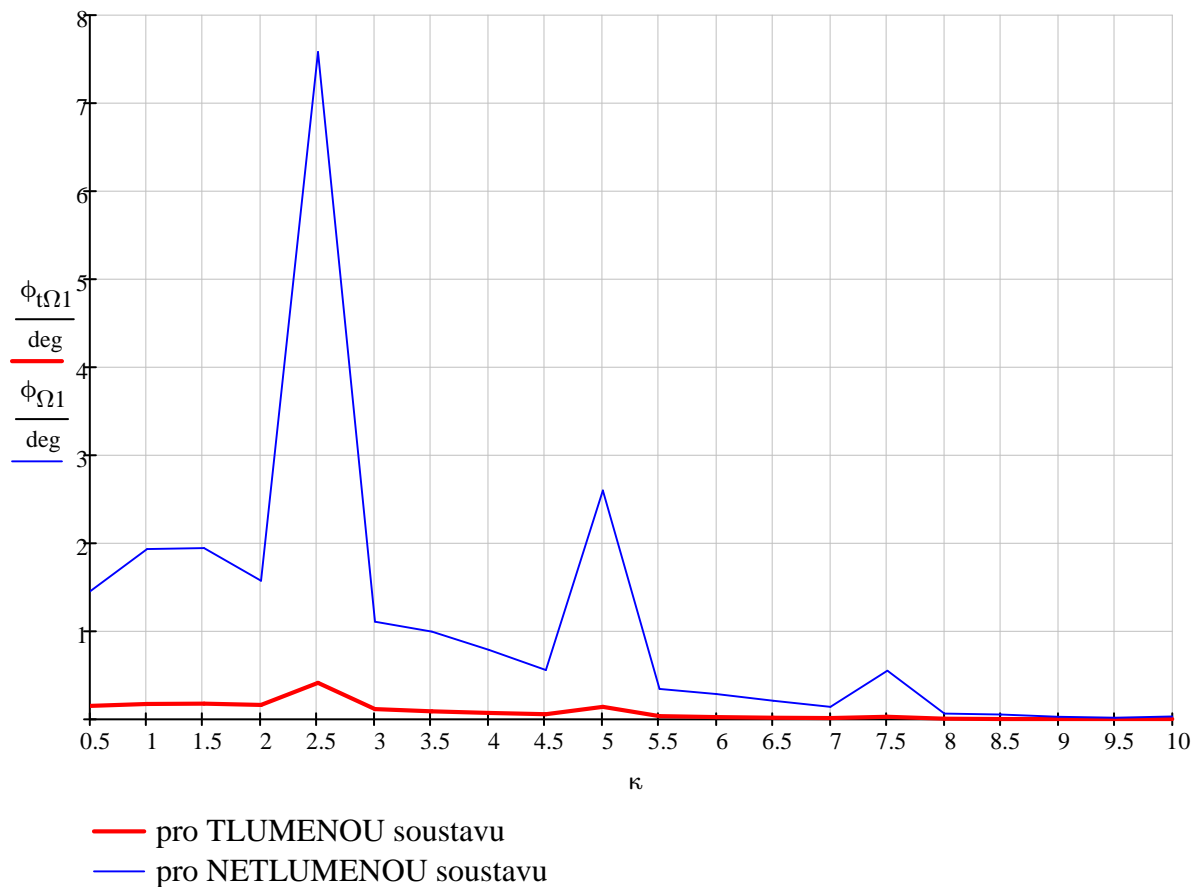
Poměrná amplituda tlumiče

$$\Delta a_{1tl} := 1 - a_{t1_1} \quad \Delta a_{1tl} = 0.756584$$

$$x := 2..6$$

$$\phi_{t\Omega 1_i} := \frac{M_{h_{i+1}} \cdot \epsilon_{t\Omega 1_i}}{\Omega_{t1} \cdot \left[\xi \cdot \left[\sum_x \left(a_{t1_x} \right)^2 \right] + \xi_{t1} \cdot \Delta a_{1tl}^2 \right]}$$

Torzní výchylky v rezonanci pro 1. vlastní frekvenci



Pro 2. vlastní frekvenci

Tlumičí odpor tlumiče

$$\xi_{t2} := 2 \cdot \gamma_{\text{opt}} \cdot J_{tl} \cdot \Omega_{t2} \quad \xi_{t2} = 185.9734097 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}}$$

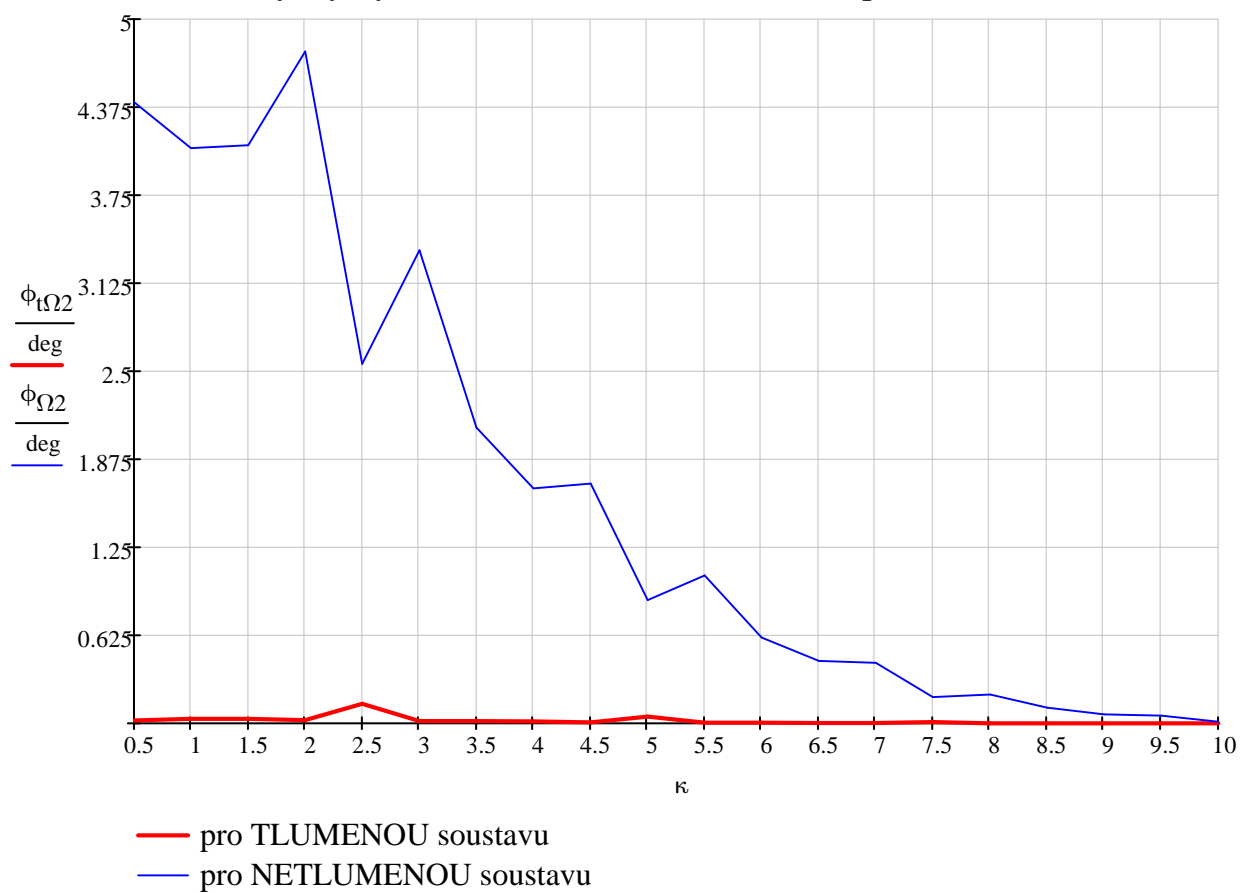
Poměrná amplituda tlumiče

$$\Delta a_{2tl} := 1 - a_{t2_1} \quad \Delta a_{2tl} = 2.245246$$

$$x := 2..6$$

$$\phi_{t\Omega_{2_i}} := \frac{M_{h_{i+1}} \cdot \varepsilon_{t\Omega_{2_i}}}{\Omega_{t2} \cdot \left[\xi \cdot \left[\sum_x \left(a_{t2_x} \right)^2 \right] + \xi_{t2} \cdot \Delta a_{2tl}^2 \right]}$$

Torzní výchylky volného konce KH v rezonanci pro 2. vlastní frekvenci



Tuhost k prvku Spring-Damper14 (COMBIN14)

$$F_{\max} := 130577.7127 \text{ N} \quad \text{maximální síla od tlaku plynů}$$

$$c_L := 0.04 \text{ mm} \quad \text{ložisková vůle - vůle mezi pánví hlavního ložiska a hlavním čepem}$$

$$k_{SD} := \frac{0.5 \cdot F_{\max}}{0.8 \cdot c_L} \quad k_{SD} = 2040276760.9375 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Rozložení síly od tlaku plynů

$$F_y := F_{\max} \cdot \sin(18 \text{ deg}) = 40350.73231 \cdot \text{N}$$

$$F_z := F_{\max} \cdot \cos(18 \text{ deg}) = 124186.78455 \cdot \text{N}$$

Výpočet bezpečnosti

Vlastnosti materiálu
- materiál **42CrMo4**

$$R_m := 1283 \text{ MPa}$$

$$R_e := 900 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\text{cOHYB}} := 525 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\text{cTAH}} := 495 \text{ MPa}$$

$$d_{\text{vzorek}} := 7.5 \text{ mm}$$

Případ s tlumičem

Hodnoty z MKP

$$\sigma_{\text{VMA1l}} := 0.47660 \cdot 10^9 \text{ Pa} = 476.6 \cdot \text{MPa} \quad \text{maximální napětí v uzlu nejzatíženějšího prvku v zatěžovacím stavu A}$$

$$\sigma_{\text{VMA1tl}} := 0.32072 \cdot 10^9 \text{ Pa} = 320.72 \cdot \text{MPa} \quad \text{minimální napětí v uzlu nejzatíženějšího prvku v zatěžovacím stavu A}$$

$$\sigma_{\text{1A1l}} := 0.29996 \cdot 10^7 \text{ Pa} = 2.9996 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{VMB1l}} := 0.20451 \cdot 10^9 \text{ Pa} = 204.51 \cdot \text{MPa} \quad \text{maximální napětí v uzlu nejzatíženějšího prvku v zatěžovacím stavu B}$$

$$\sigma_{\text{1B1l}} := 0.20607 \cdot 10^9 \text{ Pa} = 206.07 \cdot \text{MPa}$$

$$xx_{\text{1tl}} := 6.04798 \cdot 10^{-4} \text{ m} = 0.6048 \cdot \text{mm} \quad \text{vzdálenost mezi uzly s max. a min. napětí v nejzatíženějším prvku}$$

Poměrný gradient

$$\sigma_{\text{eX1l}} := \sigma_{\text{VMA1l}} \quad \sigma_{\text{eX1tl}} := \sigma_{\text{VMA1tl}}$$

$$\chi_{\text{R1l}} := \frac{1}{\sigma_{\text{eX1l}}} \cdot \left(\frac{\sigma_{\text{eX1l}} - \sigma_{\text{eX1tl}}}{xx_{\text{1tl}}} \right) \chi_{\text{R1l}} = 0.54079 \cdot \text{mm}^{-1} \quad \text{poměrný gradient napětí - o jakou část max napětí poklesne hodnotanapětí za 1 mm na vzdálenosti mezi uzly}$$

Poměr

$$p_{\beta\alpha tl} := 1 + \sqrt{\chi_{Rtl} \cdot \text{mm} \cdot 10} - \left(0.35 + \frac{R_e}{810 \text{MPa}} \right) = 1.02543$$

Korekční součinitel

$$f_{Gtl} := 1 + \frac{\frac{\sigma_{cOHYB}}{\sigma_{cTAH}} - 1}{\frac{2}{d_{vzorek}}} \cdot \chi_{Rtl} = 1.12291$$

Aplītuda a střední hodnota ekvivalentního napětí

$$\sigma_{emaxtl} := \text{sign}(\sigma_{lAtl}) \sigma_{VMAtl} = 476.6 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{emintl} := \text{sign}(\sigma_{lBtl}) \sigma_{VMBtl} = 204.51 \cdot \text{MPa}$$

Amplituda ekv. napětí

$$\sigma_{eatl} := \left| \frac{\sigma_{emaxtl} - \sigma_{emintl}}{2} \right| = 136.045 \cdot \text{MPa}$$

Střední hodnota ekv. napětí

$$\sigma_{emtl} := \frac{\sigma_{emaxtl} + \sigma_{emintl}}{2} = 340.555 \cdot \text{MPa}$$

Bezpečnost pro prosté zatěžování

$$D_c := 82 \text{mm} \quad \text{průměr ojnicního čepu}$$

$$\eta_{\sigma} := 1.189 \cdot \left(\frac{D_c}{\text{mm}} \right)^{-0.097} = 0.77543 \quad \text{součinitel zahrnující vliv velikosti součásti}$$

$$\nu_{\sigma} := 0.753 \quad \text{součinitel zahrnující pravděpodobnost přežití}$$

$$k_{tl} := \frac{1}{p_{\beta\alpha tl} \cdot \frac{\sigma_{eatl}}{\sigma_{cOHYB} \cdot \eta_{\sigma} \cdot \nu_{\sigma} \cdot f_{Gtl}} + \frac{\sigma_{emtl}}{R_m}} = 1.49095$$

$$k_{kalenotl} := 1.3 \cdot k_{tl} = 1.93824$$