



# 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

## ŠESTIVÁLCOVÝ VZNĚTOVÝ MOTOR PRO UŽITKOVÁ VOZIDLA

SIX CYLINDER DIESEL ENGINE FOR COMMERCIAL VEHICLES

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Oleksandr Pulava

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.

BRNO 2018

Zadané parametry motoru:

Vrtání válce	$D := 130 \cdot \text{mm}$
Zdvih	$z := 74.5 \cdot 2 \cdot \text{mm}$
Délka ojnice	$l_{oj} := 275 \cdot \text{mm}$
Poloměr kliky	$r := \frac{z}{2} = 0.075 \text{ m}$
Kompresní poměr	$\varepsilon := 15$
Ojniční poměr	$\lambda := \frac{r}{\cdot} = 0.271$
Otáčky motoru	$n := 2200 \cdot \text{min}^{-1}$
Hmotnost pístní skupiny	$m_{p\_sk} := 5 \cdot \text{kg} \quad \omega := 2 \cdot \pi \cdot n = 230.383 \frac{1}{s}$
Hmotnost posuvné části ojnice	$m_{oj\_pos} := 0.72 \cdot \text{kg}$
Hmotnost rotační části ojnice	$m_{oj\_rot} := 3.09 \cdot \text{kg}$
Celková dráha pístu	$s_p(\alpha) := r \cdot \left[ (1 - \cos(\alpha)) + \frac{\lambda}{4} \cdot (1 - \cos(2 \cdot \alpha)) \right]$
První harmonická složka dráhy pístu	$s_{p1}(\alpha) := r \cdot (1 - \cos(\alpha))$
Druhá harmonická složka dráhy pístu	$s_{p2}(\alpha) := r \cdot \frac{\lambda}{4} \cdot (1 - \cos(2 \cdot \alpha))$
Celková rychlost pístu	$v(\alpha) := \omega \cdot r \cdot \left( \sin(\alpha) + \frac{\lambda}{2} \cdot \sin(2 \cdot \alpha) \right)$
První harmonická složka rychlosti pístu	$v_1(\alpha) := \omega \cdot r \cdot \sin(\alpha)$
Druhá harmonická složka rychlosti pístu	$v_2(\alpha) := \omega \cdot r \cdot \frac{\lambda}{2} \cdot \sin(2 \cdot \alpha)$
Celkové zrychlení pístu	$a(\alpha) := \omega^2 \cdot r \cdot (\cos(\alpha) + \lambda \cdot \cos(2 \cdot \alpha))$
První harmonická složka zrychlení pístu	$\underline{\underline{a}}_1(\alpha) := \omega^2 \cdot r \cdot \cos(\alpha)$
Druhá harmonická složka zrychlení pístu	$\underline{\underline{a}}_2(\alpha) := \omega^2 \cdot r \cdot \lambda \cdot \cos(2 \cdot \alpha)$

**Grafické znázornění dráhy, rychlosti a zrychlení pístu**

krok := 5 deg	iMAX := 360 · $\frac{\text{deg}}{\text{krok}}$	iMAX = 72	i := 0 .. iMAX	$\alpha_i := i \cdot \text{krok}$
		tlak <sub>i</sub> := READPRN("tlaky.txt")		
Diagram p - alfa a p-V		tlak :=		
Načtení indikovaného tlaku				... \tlaky.txt
Počet hodnot	$n_p := 720$			
Přifazení indexu a úhlu	$i := 0 .. (n_p - 1)$			
	$\alpha_i := i \cdot 0.017$			
Velikost atmosférického tlaku	$p_a := 100000 \cdot \text{Pa}$			
Načtení tlaku	$p_i := \text{tlak}_i \cdot 1000000 \cdot \text{Pa}$			

Plocha pístu	$S_p := \pi \cdot \frac{D^2}{4} = 0.013 \text{ m}^2$
Zdvihový objem válce motoru	$V_z := S_p \cdot z = 1.978 \text{ L}$
Kompresní objem	$V_k := \frac{V_z}{\varepsilon - 1} = 0.141 \text{ L}$
Celkový objem motoru při pohybu pístu	$\underline{\underline{V}}_i := V_k + S_p \cdot s_p(\alpha_i)$
Síly v klikovém mechanismu	$V_{z'6} = 11.866 \text{ L}$
<b>Síly působící na píst</b>	
Síla od tlaku plynů	$F_{p_i} := (p_i - p_a) \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4}$

Setrvačná síla pístní skupiny	$F_{s_i} := -(m_{p\_sk} + m_{oj\_pos}) \cdot a(\alpha_i)$
Setrvačná síla prvního řádu:	$F_{s_1} := -(m_{p\_sk} + m_{oj\_pos}) \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \cos(\alpha)$
Setrvačná síla druhého řádu:	$F_{s_2} := -(m_{p\_sk} + m_{oj\_pos}) \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \lambda \cdot \cos(2\alpha)$

Celková síla v ose válce působící na pístní čep	$F_{c_i} := F_{p_i}$
---	----------------------

Síly přenášené pístním čepem	$\alpha_i := \alpha_i$
Úhel odklonu ojnice	$\beta_i := \frac{\text{asin}(\lambda \cdot \sin(\alpha_i))}{\text{deg}}$
Maximální odklon ojnice	$\max(\beta) = 15.718$
Síla působící v ose ojnice	$F_{o_i} := \frac{F_{c_i}}{\cos(\beta_i)}$

Síly působící na pístní čep ve směru kolmém na osu válce	
Normálová síla působící na píst	
Maximální normálová síla	
Minimální normálová síla	
Tangenciální složka síly od ojnice	$F_{t_i} := F_{o_i} \cdot \sin(\alpha_i + \beta_i)$

## Torzní kmitání

### Redukce hmot

Redukovaný moment setrvačnosti rotačního podílu ojnice

$$m_{oj\_rot} := 3.09 \cdot \text{kg}$$

$$r := 74.5 \cdot \text{mm}$$

$$J_{oj\_rot} := m_{oj\_rot} \cdot r^2$$

$$J_{oj\_rot} = 0.017 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

$$m_{pos} := 5.72 \cdot \text{kg}$$

$$l := 267 \cdot \text{mm}$$

$$\lambda := \frac{r}{l} \quad \lambda = 0.279$$

$$J_{pos} := m_{pos} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda^2}{8} \cdot r^2$$

$$J_{pos} = 1.545 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

### Momenty setrvačnosti

moment setrvačnosti řemenice (včetně příruby pro uchycení řemenice a šroubů)

$$J_{\text{rem}} := 0.023 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

moment setrvačnosti volného konce hřídele

$$J_{\text{volny\_konec}} := 0.003878 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

moment setrvačnosti prvního zalomení

$$J_{\text{zal\_1}} := 0.10982 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

moment setrvačnosti druhého zalomení

$$J_{\text{zal\_2}} := J_{\text{zal\_1}}$$

moment setrvačnosti třetího zalomení

$$J_{\text{zal\_3}} := J_{\text{zal\_1}}$$

moment setrvačnosti čtvrtého zalomení

$$J_{\text{zal\_4}} := J_{\text{zal\_1}}$$

moment setrvačnosti pátého zalomení

$$J_{\text{zal\_5}} := J_{\text{zal\_1}}$$

moment setrvačnosti šestého zalomení

$$J_{\text{zal\_6}} := J_{\text{zal\_1}}$$

moment setrvačnosti příruby setrvačnicku

$$J_{\text{přir}} := 0 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

moment setrvačnosti setrvačnicku

$$J_{\text{setr}} := 3.12 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

Moment setrvačnosti setrvačnicku byl určen z podkladů od prof. Pištěka a z programu Creo.

### Momenty setrvačnosti náhradních kotoučů

Redukovaný moment setrvačnosti předního konce hřídele

$$J_0 := J_{\text{volny\_konec}} + J_{\text{rem}}$$

### Momenty setrvačnosti náhradních kotoučů

Redukovaný moment setrvačnosti předního konce hřídele

$$J_0 := J_{\text{volny\_konec}} + J_{\text{rem}}$$

$$J_0 = 0.027 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

Redukovaný moment setrvačnosti zalomení hřídele

$$J_1 := J_{\text{zal\_1}} + J_{\text{oj\_rot}} + J_{\text{pos}}$$

$$J_1 = 0.127 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

$$J_2 := J_{\text{zal\_2}} + J_{\text{oj\_rot}} + J_{\text{pos}}$$

$$J_2 = 0.127 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

$$J_3 := J_{\text{zal\_3}} + J_{\text{oj\_rot}} + J_{\text{pos}}$$

$$J_3 = 0.127 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

$$J_4 := J_{\text{zal\_4}} + J_{\text{oj\_rot}} + J_{\text{pos}}$$

$$J_4 = 0.127 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

$$J_5 := J_{\text{zal\_5}} + J_{\text{oj\_rot}} + J_{\text{pos}}$$

$$J_5 = 0.127 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

$$J_6 := J_{\text{zal\_6}} + J_{\text{oj\_rot}} + J_{\text{pos}}$$

$$J_6 = 0.127 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

Redukovaný moment setrvačnosti zadního konce hřídele

$$J_7 := J_{\text{setr}} + J_{\text{přir}}$$

$$J_7 = 3.12 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

$$\begin{array}{l}
 (J_0) \\
 J_1 \quad (0.027) \\
 J_2 \quad 0.127 \\
 J_3 \quad 0.127 \\
 J_4 \quad 0.127 \\
 J_5 \quad 0.127 \\
 J_6 \quad 0.127 \\
 (J_7)
 \end{array}
 \quad
 J = 0.127 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

### Redukce délek

Redukce délek dle Ker Wilson:

průměr hlavního čepu	$D_{hc} := 99 \text{ mm}$
redukovaný průměr	$D_{red} := D_{hc}$
průměr ojnicního čepu	$D_{oc} := 82 \text{ mm}$
délka hlavního čepu	$L_{hc} := 54 \text{ mm}$
délka ojnicního čepu	$L_{oc} := 50 \text{ mm}$
tloušťka ramene	$l_{ram} := 32 \text{ mm}$
šířka ramene	$b_{ram} := 215.33 \text{ mm}$

Poissonova konstanta	$\mu := 0.3$
Modul pružnosti materiálu v tahu (ocel)	$E := 210000 \text{ MPa}$
Modul pružnosti materiálu ve smyku (ocel)	$G := \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} = 8.077 \times 10^{10} \text{ Pa}$

$$\text{Redukce délky zalomení hřídele} \quad L_{red\_zal} := D_{red}^4 \cdot \left[ \frac{L_{hc} + 0.4 \cdot D_{hc}}{D_{hc}^4} + \frac{L_{oc} + 0.4 \cdot D_{oc}}{D_{oc}^4} + \frac{r - 0.2 \cdot (D_{oc} + D_{hc})}{l_{ram} \cdot b_{ram}^3} \right]$$

$$L_{red\_zal} = 0.281 \text{ m}$$

Redukce délky na straně řemenice

Délka volného konce	$l_{konce} := 90 \text{ mm}$
Vnitřní průměr volného konce	$D_1 := 22 \text{ mm}$
Vnější průměr volného konce	$D_2 := 93 \text{ mm}$

$$\text{Redukovaná délka nultého úseku} \quad L_0 := \frac{1}{2} \cdot L_{hc} + \frac{1}{2} \cdot L_{red\_zal} + l_{konce} \cdot \frac{D_{red}^4}{D_2^4 - D_1^4} = 0.283 \text{ m}$$

Redukovaná délka nultého úseku	$L_1 := L_{red\_zal} = 0.281 \text{ m}$
Redukovaná délka druhého úseku	$L_2 := L_{red\_zal} = 0.281 \text{ m}$
Redukovaná délka třetího úseku	$L_3 := L_{red\_zal} = 0.281 \text{ m}$
Redukovaná délka čtvrtého úseku	$L_4 := L_{red\_zal} = 0.281 \text{ m}$
Redukovaná délka patého úseku	$L_5 := L_{red\_zal} = 0.281 \text{ m}$

Redukce délky na straně setrvačníku

Délka příruby pro setrvačník	$l_p := 42 \text{ mm}$
Roztečný průměr děr pro upevnění setrvačníku	$D_r := 84 \text{ mm}$

$$\text{Redukovaná délka šestého úseku} \quad L_6 := \frac{1}{2} \cdot L_{hc} + \frac{1}{2} \cdot L_{red\_zal} + l_p \cdot \frac{D_{red}^4}{D_r^4} = 0.249 \text{ m}$$

Torzní tuhost

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

$$J_p = 9.431 \times 10^{-6} \text{ m}^4$$

Jednotlivé torzní tuhosti

$$c_0 := G \cdot \frac{J_p}{L_0} = 2.687 \times 10^6 \text{ J} \quad c_0 = 2.687 \times 10^6 \text{ J}$$

$$c_1 := G \cdot \frac{J_p}{L_1} = 2.71 \times 10^6 \text{ J} \quad c_1 = 2.71 \times 10^6 \text{ J}$$

$$c_2 := G \cdot \frac{J_p}{L_2} = 2.71 \times 10^6 \text{ J} \quad c_2 = 2.71 \times 10^6 \text{ J}$$

$$c_3 := G \cdot \frac{J_p}{L_3} = 2.71 \times 10^6 \text{ J} \quad c_3 = 2.71 \times 10^6 \text{ J}$$

$$c_4 := G \cdot \frac{J_p}{L_4} = 2.71 \times 10^6 \text{ J} \quad c_4 = 2.71 \times 10^6 \text{ J}$$

$$c_5 := G \cdot \frac{J_p}{L_5} = 2.71 \times 10^6 \text{ J} \quad c_5 = 2.71 \times 10^6 \text{ J}$$

$$c_6 := G \cdot \frac{J_p}{L_6} = 3.065 \times 10^6 \text{ J} \quad c_6 = 3.065 \times 10^6 \text{ J}$$

vektory poměrných výchylek první vlastní frekvence

$$a_{10} := 1$$

$$a_{11} := 0.98544$$

$$a_{12} := 0.90378$$

$$a_{13} := 0.76047$$

$$a_{14} := 0.56528$$

$$a_{15} := 0.33153$$

$$a_{16} := 0.07517$$

$$a_{17} := -0.15604$$

efektivního momentu setrvačnosti soustavy bez tlumiče

$$J_{\text{ef}} := J_0 \cdot a_{10}^2 + J_1 \cdot a_{11}^2 + J_2 \cdot a_{12}^2 + J_3 \cdot a_{13}^2 + J_4 \cdot a_{14}^2 + J_5 \cdot a_{15}^2 + J_6 \cdot a_{16}^2 + J_7 \cdot a_{17}^2$$

Poměrná velikost tlumiče

$$\mu := 0.4$$

Moment setrvačnosti tlumiče

$$J_{\text{tl}} := J_{\text{ef}} \cdot \mu \quad J_{\text{tl}} = 0.184 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

Poměrný útlum

$$\gamma_t := \frac{1}{\sqrt{2 \cdot [(1 + \mu) \cdot (2 + \mu)]}} \quad \gamma_t = 0.386$$

vlastní frekvence soustavy bez tlumiče

$$\Omega_1 := 1206.49 \cdot \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Součinitel tlumení tlumi

$$k_t := 2 \cdot \gamma_t \cdot J_{\text{tl}} \cdot \Omega_1 \quad k_t = 170.886 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{kg}}{\text{s}}$$

Ladění tlumiče

$$w_{\text{opt}} := \frac{1}{1 + \mu} \quad w_{\text{opt}} = 0.714$$

Poměr úhlové rychlosti vynuceného kmitání

$$\eta_t := \sqrt{\frac{2}{2 + \mu}} \quad \eta_t = 0.913$$

Vlastní úhlová frekvence tlumiče

$$\Omega_{\text{tl}} := \Omega_1 \cdot w_{\text{opt}} \quad \Omega_{\text{tl}} = 861.779 \frac{1}{\text{s}}$$

Tuhost tlumiče

$$c_{\text{tl}} := J_{\text{tl}} \cdot \Omega_{\text{tl}}^2 \quad c_{\text{tl}} = 1.363 \times 10^5 \text{ J}$$

$$J_{\text{skr\_tl}} := 0.088191 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2 \quad J_{\text{skr\_tl}} = 0.088 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

$$J_0 := J_{\text{volny\_konec}} + J_{\text{rem}} + J_{\text{skr\_tl}} \quad J_0 = 0.115 \, \text{m}^2 \cdot \text{kg}$$

$(J_{\text{tl}})$		$(c_{\text{tl}})$	$(1.363 \times 10^5)$
$J_0$	$(0.184)$	$c_0$	$2.687 \times 10^6$
$J_1$	0.115	$c_1$	$2.71 \times 10^6$
$J_2$	0.127	$c_2$	$2.71 \times 10^6$
$J_3$	0.127	$c_3$	$2.71 \times 10^6$
$J_4$	0.127	$c_4$	$2.71 \times 10^6$
$J_5$	0.127	$c_5$	$2.71 \times 10^6$
$J_6$	$(3.12)$	$c_6$	$(3.065 \times 10^{-6})$
$(J_7)$			

$J_{\text{tl}} = 0.127 \, \text{m}^2 \cdot \text{kg}$        $c_{\text{tl}} =$

$$i_i := 0 \dots (n_p - 1)$$

**Vynucené torzní kmitání**       $i := \text{vec}(0 \dots 719)$

Načtení hodnot krouticího momentu       $j := \text{vec}(0 \dots 7)$

$$n_p = 720 \quad u := 0 \dots 24 \quad j := i \quad k := \text{vec}(0 \dots 24)$$

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

Fourierova analýza krouticího momentu v komplexním oboru

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

Harmonická složka       $a_{h_u} := \text{Re}(q_u)$

Harmonická složka       $b_{h_u} := \text{Im}(q_u)$

Harmonická složka       $M_{h_u} := q_u$

		0			0			0			0
		0	$\kappa_k =$			0	$a_{h_u} =$			0	$b_{h_u} =$
		0				88.613				0	
		1				-62.415				-190.876	
		2				-27.578				305.042	
		3				100.644				-310.311	
		4				-122.164				267.572	
		5				127.21				-218.393	
		6				-120.403				172.738	
		7				113.402				-131.061	
		8				-99.431				97.783	
		9				83.31				-71.324	
		10				-72.634				55.074	
		11				58.534				-37.181	
		12				-46.89				26.572	
		13				36.11				-16.86	
		14				-27.91				12.239	

$$\begin{array}{lcl}
 & \begin{pmatrix} 1 \\ 0.98544 \\ 0.90378 \\ 0.76047 \\ 0.56528 \\ 0.33153 \\ 0.07517 \\ (-0.15604) \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 1 \\ 0.8931 \\ 0.33983 \\ -0.38363 \\ -0.91497 \\ -0.98807 \\ -0.56634 \\ (0.05733) \end{pmatrix} \\
 N_1 := 11521 \cdot \text{min}^{-1} & N_1 = 192.017 \frac{1}{\text{s}} & \\
 N_2 := 31217 \cdot \text{min}^{-1} & N_2 = 520.283 \frac{1}{\text{s}} & a_1 := a_2 := \\
 \text{Vlastní úhlové frekvence} & & \\
 \Omega_1 := N_1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \text{deg} = 21.057 & & 
 \end{array}$$

Vlastní úhlové frekvence

$$\begin{array}{lcl}
 & 0.07517 & \\
 \Omega_1 := N_1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \text{deg} = 21.057 \frac{1}{\text{s}} & (-0.15604) & \\
 \Omega_2 := N_2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \text{deg} = 57.055 \frac{1}{\text{s}} & & \\
 \Omega_1 := N_1 \cdot 2 \cdot \pi = 1.206 \times 10^3 \frac{1}{\text{s}} & & \\
 \Omega_2 := N_2 \cdot 2 \cdot \pi = 3.269 \times 10^3 \frac{1}{\text{s}} & & 
 \end{array}$$

Kritické otáčky

$$i := 1..24 \quad \text{do 12 řádů} \quad \kappa_i := 0.5 \cdot i$$

$$\text{rezonanční otáčky první vlastní frekvence} \quad n_{r1i} := \frac{N_1}{\kappa_i}$$

$$\text{rezonanční otáčky druhé vlastní frekvence} \quad n_{r2i} := \frac{N_2}{\kappa_i}$$

$$\begin{array}{lcl}
 \begin{pmatrix} 62434 \\ 31217 \\ 20811 \\ 15609 \\ 12487 \\ 10406 \\ 8919 \\ 7804 \\ 6937 \\ 6243 \\ 5676 \\ 5203 \\ 4803 \\ 4460 \\ 4162 \\ 3902 \\ 3673 \\ 3469 \\ 3286 \\ 3122 \\ 2973 \\ 2838 \\ 2715 \\ (2601) \end{pmatrix} & & \begin{pmatrix} 23042 \\ 11521 \\ 7681 \\ 5761 \\ 4608 \\ 3840 \\ 3292 \\ 2880 \\ 2560 \\ 2304 \\ 2095 \\ 1920 \\ 1772 \\ 1646 \\ 1536 \\ 1440 \\ 1355 \\ 1280 \\ 1213 \\ 1152 \\ 1097 \\ 1047 \\ 1002 \\ (960) \end{pmatrix} \\
 n_{r1} = & & n_{r2} = \\
 \frac{1}{\text{min}} & & \frac{1}{\text{min}}
 \end{array}$$

Vydatnost rezonancí

$$\text{Úhel mezi rozestupy zážehu} \quad \theta_{4D} := 120$$

pořadí zážehu

$$1 - 5 - 3 - 6 - 2 - 4$$

$$\theta := \begin{pmatrix} 0 \cdot \theta_{4D} \\ 4 \cdot \theta_{4D} \\ 2 \cdot \theta_{4D} \\ 5 \cdot \theta_{4D} \\ 1 \cdot \theta_{4D} \\ 3 \cdot \theta_{4D} \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

Pro harmonické řády 0,5; 3,5; 6,5; 9,5

$$\varepsilon_{1\_1} := \sqrt{\sum_{ix=0}^{n_v-1} a_{1_{ix+1}} \cdot \sin(\kappa_1 \cdot \theta_{ix})}^2 + \sqrt{\sum_{ix=0}^{n_v-1} a_{1_{ix+1}} \cdot \cos(\kappa_1 \cdot \theta_{ix})}^2 \quad \varepsilon_{1\_1} = 1.148$$

Pro harmonické řády 1; 4; 7; 10

$$\varepsilon_{1\_2} := \sqrt{\sum_{ix=0}^{n_v-1} a_{1_{ix+1}} \cdot \sin(\kappa_2 \cdot \theta_{ix})}^2 + \sqrt{\sum_{ix=0}^{n_v-1} a_{1_{ix+1}} \cdot \cos(\kappa_2 \cdot \theta_{ix})}^2 \quad \varepsilon_{1\_2} = 0.621$$

Pro harmonické řády 1,5; 4,5; 7,5; 10,5

$$\varepsilon_{1\_3} := \sqrt{\sum_{ix=0}^{n_v-1} a_{1_{ix+1}} \cdot \sin(\kappa_3 \cdot \theta_{ix})}^2 + \sqrt{\sum_{ix=0}^{n_v-1} a_{1_{ix+1}} \cdot \cos(\kappa_3 \cdot \theta_{ix})}^2 \quad \varepsilon_{1\_3} = 0.533$$

Pro harmonické řády 2; 5; 8; 11

$$\varepsilon_{1\_4} := \sqrt{\sum_{ix=0}^{n_v-1} a_{1_{ix+1}} \cdot \sin(\kappa_4 \cdot \theta_{ix})}^2 + \sqrt{\sum_{ix=0}^{n_v-1} a_{1_{ix+1}} \cdot \cos(\kappa_4 \cdot \theta_{ix})}^2 \quad \varepsilon_{1\_4} = 0.621$$

Pro harmonické řády 2,5; 5,5; 8,5; 11,5

$$n_v := 6 \quad \varepsilon_{1\_5} := \sqrt{\sum_{ix=0}^{n_v-1} a_{1_{ix+1}} \cdot \sin(\kappa_5 \cdot \theta_{ix})}^2 + \sqrt{\sum_{ix=0}^{n_v-1} a_{1_{ix+1}} \cdot \cos(\kappa_5 \cdot \theta_{ix})}^2 \quad \varepsilon_{1\_5} = 1.148$$

Pro harmonické řády 3; 6; 9; 12

Pro první vlastní frekvenci

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

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

$$\varepsilon_{1\_6} := \sqrt{\sum_{ix=0}^{n_v-1} a_{1_{ix+1}} \cdot \sin(\kappa_6 \cdot \theta_{ix})}^2 + \sqrt{\sum_{ix=0}^{n_v-1} a_{1_{ix+1}} \cdot \cos(\kappa_6 \cdot \theta_{ix})}^2 \quad \varepsilon_{1\_6} = 3.622$$

$$\varepsilon_{\Omega 1} := \begin{pmatrix} \varepsilon_{1\_1} \\ \varepsilon_{1\_2} \\ \varepsilon_{1\_3} \\ \varepsilon_{1\_4} \\ \varepsilon_{1\_5} \\ \varepsilon_{1\_6} \\ \varepsilon_{1\_1} \\ \varepsilon_{1\_2} \\ \varepsilon_{1\_3} \\ \varepsilon_{1\_4} \\ \varepsilon_{1\_5} \\ \varepsilon_{1\_6} \end{pmatrix}$$

$\varepsilon_{1\_2}$   
 $\varepsilon_{1\_3}$   
 $\varepsilon_{1\_4}$   
 $\varepsilon_{1\_5}$   
 $\varepsilon_{1\_6}$   
 $\varepsilon_{1\_1}$   
 $\varepsilon_{1\_2}$   
 $\varepsilon_{1\_3}$   
 $\varepsilon_{1\_4}$   
 $\varepsilon_{1\_5}$   
 $(\varepsilon_{1\_6})$

Pro druhou vlastní frekvenci

$ix := 0 \dots (n_v - 1) \quad k := 0 \dots 23$

$\kappa_k := 0.5 \cdot k$

Pro harmonické řady 0,5; 3,5; 6,5; 9,5

$$\varepsilon_{2\_1} := \sqrt{\sum_{ix=0}^{n_v-1} a_{2_{ix+1}} \cdot \sin(\kappa_1 \cdot \theta_{ix})}^2 + \sum_{ix=0}^{n_v-1} a_{2_{ix+1}} \cdot \cos(\kappa_1 \cdot \theta_{ix})}^2 \quad \varepsilon_{2\_1} = 2.716$$

Pro harmonické řady 1; 4; 7; 10

$$\varepsilon_{2\_2} := \sqrt{\sum_{ix=0}^{n_v-1} a_{2_{ix+1}} \cdot \sin(\kappa_2 \cdot \theta_{ix})}^2 + \sum_{ix=0}^{n_v-1} a_{2_{ix+1}} \cdot \cos(\kappa_2 \cdot \theta_{ix})}^2 \quad \varepsilon_{2\_2} = 0.82$$

Pro harmonické řady 1,5; 4,5; 7,5; 10,5

$$\varepsilon_{2\_3} := \sqrt{\sum_{ix=0}^{n_v-1} a_{2_{ix+1}} \cdot \sin(\kappa_3 \cdot \theta_{ix})}^2 + \sum_{ix=0}^{n_v-1} a_{2_{ix+1}} \cdot \cos(\kappa_3 \cdot \theta_{ix})}^2 \quad \varepsilon_{2\_3} = 0.663$$

Pro harmonické řady 2; 5; 8; 11

$$\varepsilon_{2\_4} := \sqrt{\sum_{ix=0}^{n_v-1} a_{2_{ix+1}} \cdot \sin(\kappa_4 \cdot \theta_{ix})}^2 + \sum_{ix=0}^{n_v-1} a_{2_{ix+1}} \cdot \cos(\kappa_4 \cdot \theta_{ix})}^2 \quad \varepsilon_{2\_4} = 0.82$$

Pro harmonické řady 2,5; 5,5; 8,5; 11,5

$$\varepsilon_{2\_5} := \sqrt{\sum_{ix=0}^{n_v-1} a_{2_{ix+1}} \cdot \sin(\kappa_5 \cdot \theta_{ix})}^2 + \sum_{ix=0}^{n_v-1} a_{2_{ix+1}} \cdot \cos(\kappa_5 \cdot \theta_{ix})}^2 \quad \varepsilon_{2\_5} = 2.716$$

Pro harmonické řady 3; 6; 9; 12

$$\varepsilon_{2\_6} := \sqrt{\sum_{ix=0}^{n_v-1} a_{2_{ix+1}} \cdot \sin(\kappa_6 \cdot \theta_{ix})}^2 + \sum_{ix=0}^{n_v-1} a_{2_{ix+1}} \cdot \cos(\kappa_6 \cdot \theta_{ix})}^2 \quad \varepsilon_{2\_6} = 1.62$$

$$\varepsilon_{\Omega 2} := \begin{pmatrix} \varepsilon_{2\_1} \\ \varepsilon_{2\_2} \\ \varepsilon_{2\_3} \\ \varepsilon_{2\_4} \\ \varepsilon_{2\_5} \\ \varepsilon_{2\_6} \\ \varepsilon_{2\_1} \\ \varepsilon_{2\_2} \\ \varepsilon_{2\_3} \\ \varepsilon_{2\_4} \\ \varepsilon_{2\_5} \\ \varepsilon_{2\_6} \\ \varepsilon_{2\_1} \\ \varepsilon_{2\_2} \\ \varepsilon_{2\_3} \\ \varepsilon_{2\_4} \\ \varepsilon_{2\_5} \\ \varepsilon_{2\_6} \end{pmatrix}$$

**Torzní výchylky volného konce v rezonanci**

$$\xi := 5.2 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{sec} \cdot \text{rad}^{-1}$$

$$x := 0 \dots 7$$

**Pro první vlastní frekvenci**

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

**Pro první vlastní frekvenci**

$$\Phi_{\Omega 2_i} := \frac{M h_{i+1} \cdot \varepsilon_{\Omega 2_i}}{\Omega_2 \cdot \xi \cdot \left[ \sum_x a_{2_x}^2 \right]}$$

**Kritické otáčky**

$$i := 1 \dots 24 \quad \text{do 12 řádů} \quad \kappa_i := 0.5 \cdot i$$

$$\text{rezonanční otáčky první vlastní frekvence} \quad n t_{H1_i} := \frac{N t_1}{\kappa_i}$$

$$\text{rezonanční otáčky druhé vlastní frekvence} \quad n t_{L_i} := \frac{N t_2}{\kappa_i}$$

$\begin{pmatrix} 62434 \\ 31217 \\ 20811 \\ 15609 \\ 12487 \\ 10406 \\ 8919 \\ 7804 \\ 6937 \\ 6243 \\ 5676 \\ 5203 \\ 4803 \\ 4460 \\ 4162 \\ 3902 \\ 3673 \\ 3469 \\ 3286 \\ 3122 \\ 2973 \\ 2838 \\ 2715 \\ 2601 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 23042 \\ 11521 \\ 7681 \\ 5761 \\ 4608 \\ 3840 \\ 3292 \\ 2880 \\ 2560 \\ 2304 \\ 2095 \\ 1920 \\ 1772 \\ 1646 \\ 1536 \\ 1440 \\ 1355 \\ 1280 \\ 1213 \\ 1152 \\ 1097 \\ 1047 \\ 1002 \\ 960 \end{pmatrix}$
$n_{r_i} = \frac{1}{4803} \cdot \frac{1}{\text{min}}$	$n_{rII_i} = \frac{1}{1772} \cdot \frac{1}{\text{min}}$

#### Vydatnost rezonanci

Úhel mezi rozestupy zážehu	$\theta_{4D} := 120$	
pořadí zážehu	$\begin{pmatrix} 0 \cdot \theta_{4D} \\ 4 \cdot \theta_{4D} \\ 2 \cdot \theta_{4D} \\ 5 \cdot \theta_{4D} \\ 1 \cdot \theta_{4D} \\ 3 \cdot \theta_{4D} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 8.378 \\ 4.189 \\ 10.472 \\ 2.094 \\ 6.283 \end{pmatrix}$
1 - 5 - 3 - 6 - 2 - 4	$\theta := \text{deg}$	$\theta =$
$n_v := 6$		

#### Pro první vlastní frekvenci

$ix := 0 \dots (n_v - 1) \quad k := 0 \dots 23$   
 $\kappa_k := 0.5 \cdot k$

Pro první vlastní frekvenci

$$ix := 0..(n_v - 1) \quad k := 0..23$$

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

Pro harmonické řády 0,5; 3,5; 6,5; 9,5

$$\varepsilon_{t1\_1} := \sqrt{\sum_{ix=0}^{n_v-1} at_{1_{ix+1}} \cdot \sin(\kappa_1 \cdot \theta_{ix})}^2 + \sqrt{\sum_{ix=0}^{n_v-1} at_{1_{ix+1}} \cdot \cos(\kappa_1 \cdot \theta_{ix})}^2 \quad \varepsilon_{t1\_1} = 0.315$$

Pro harmonické řády 1; 4; 7; 10

$$\varepsilon_{t1\_2} := \sqrt{\sum_{ix=0}^{n_v-1} at_{1_{ix+1}} \cdot \sin(\kappa_2 \cdot \theta_{ix})}^2 + \sqrt{\sum_{ix=0}^{n_v-1} at_{1_{ix+1}} \cdot \cos(\kappa_2 \cdot \theta_{ix})}^2 \quad \varepsilon_{t1\_2} = 0.179$$

Pro harmonické řády 1,5; 4,5; 7,5; 10,5

$$\varepsilon_{t1\_3} := \sqrt{\sum_{ix=0}^{n_v-1} at_{1_{ix+1}} \cdot \sin(\kappa_3 \cdot \theta_{ix})}^2 + \sqrt{\sum_{ix=0}^{n_v-1} at_{1_{ix+1}} \cdot \cos(\kappa_3 \cdot \theta_{ix})}^2 \quad \varepsilon_{t1\_3} = 0.155$$

Pro harmonické řády 2; 5; 8; 11

$$\varepsilon_{t1\_4} := \sqrt{\sum_{ix=0}^{n_v-1} at_{1_{ix+1}} \cdot \sin(\kappa_4 \cdot \theta_{ix})}^2 + \sqrt{\sum_{ix=0}^{n_v-1} at_{1_{ix+1}} \cdot \cos(\kappa_4 \cdot \theta_{ix})}^2 \quad \varepsilon_{t1\_4} = 0.179$$

Pro harmonické řády 2,5; 5,5; 8,5; 11,5

$$\varepsilon_{t1\_5} := \sqrt{\sum_{ix=0}^{n_v-1} at_{1_{ix+1}} \cdot \sin(\kappa_5 \cdot \theta_{ix})}^2 + \sqrt{\sum_{ix=0}^{n_v-1} at_{1_{ix+1}} \cdot \cos(\kappa_5 \cdot \theta_{ix})}^2 \quad \varepsilon_{t1\_5} = 0.315$$

Pro harmonické řády 3; 6; 9; 12

$$\varepsilon_{t1\_6} := \sqrt{\sum_{ix=0}^{n_v-1} at_{1_{ix+1}} \cdot \sin(\kappa_6 \cdot \theta_{ix})}^2 + \sqrt{\sum_{ix=0}^{n_v-1} at_{1_{ix+1}} \cdot \cos(\kappa_6 \cdot \theta_{ix})}^2 \quad \varepsilon_{t1\_6} = 0.915$$

$$(\varepsilon_{t1\_1})$$

$$\varepsilon_{t1\_2}$$

$$\varepsilon_{t1\_3}$$

$$\varepsilon_{t1\_4}$$

$$\varepsilon_{t1\_5}$$

$$\varepsilon_{t1\_6}$$

$$\varepsilon_{t1\_1}$$

$$\varepsilon_{t1\_2}$$

$$\varepsilon_{t1\_3}$$

$$\varepsilon_{t1\_4}$$

$$\varepsilon_{t1\_5}$$

$$\varepsilon_{t1\_6}$$

$$\varepsilon_{t\Omega 1} := \varepsilon_{t1\_1}$$

$\varepsilon_{t1\_2}$   
 $\varepsilon_{t1\_3}$   
 $\varepsilon_{t1\_4}$   
 $\varepsilon_{t1\_5}$   
 $\varepsilon_{t1\_6}$   
 $\varepsilon_{t1\_1}$   
 $\varepsilon_{t1\_2}$   
 $\varepsilon_{t1\_3}$   
 $\varepsilon_{t1\_4}$   
 $\varepsilon_{t1\_5}$   
 $(\varepsilon_{t1\_6})$

**Pro druhou vlastní frekvenci**

$$ix := 0 \dots (n_v - 1) \quad k := 0 \dots 23$$

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

**Pro harmonické řady 0,5; 3,5; 6,5; 9,5**

$$\varepsilon_{t2\_1} := \sqrt{\left[ \sum_{ix=0}^{n_v-1} a_{t2\_ix+1} \cdot \sin(\kappa_1 \cdot \theta_{ix}) \right]^2 + \left[ \sum_{ix=0}^{n_v-1} a_{t2\_ix+1} \cdot \cos(\kappa_1 \cdot \theta_{ix}) \right]^2} \quad \varepsilon_{t2\_1} = 1.053$$

**Pro harmonické řady 1; 4; 7; 10**

$$\varepsilon_{t2\_2} := \sqrt{\left[ \sum_{ix=0}^{n_v-1} a_{t2\_ix+1} \cdot \sin(\kappa_2 \cdot \theta_{ix}) \right]^2 + \left[ \sum_{ix=0}^{n_v-1} a_{t2\_ix+1} \cdot \cos(\kappa_2 \cdot \theta_{ix}) \right]^2} \quad \varepsilon_{t2\_2} = 0.529$$

**Pro harmonické řady 1,5; 4,5; 7,5; 10,5**

$$\varepsilon_{t2\_3} := \sqrt{\left[ \sum_{ix=0}^{n_v-1} a_{t2\_ix+1} \cdot \sin(\kappa_3 \cdot \theta_{ix}) \right]^2 + \left[ \sum_{ix=0}^{n_v-1} a_{t2\_ix+1} \cdot \cos(\kappa_3 \cdot \theta_{ix}) \right]^2} \quad \varepsilon_{t2\_3} = 0.45$$

**Pro harmonické řady 2; 5; 8; 11**

$$\varepsilon_{t2\_4} := \sqrt{\left[ \sum_{ix=0}^{n_v-1} a_{t2\_ix+1} \cdot \sin(\kappa_4 \cdot \theta_{ix}) \right]^2 + \left[ \sum_{ix=0}^{n_v-1} a_{t2\_ix+1} \cdot \cos(\kappa_4 \cdot \theta_{ix}) \right]^2} \quad \varepsilon_{t2\_4} = 0.529$$

**Pro harmonické řady 2,5; 5,5; 8,5; 11,5**

$$\varepsilon_{t2\_5} := \sqrt{\left[ \sum_{ix=0}^{n_v-1} a_{t2\_ix+1} \cdot \sin(\kappa_5 \cdot \theta_{ix}) \right]^2 + \left[ \sum_{ix=0}^{n_v-1} a_{t2\_ix+1} \cdot \cos(\kappa_5 \cdot \theta_{ix}) \right]^2} \quad \varepsilon_{t2\_5} = 1.053$$

**Pro harmonické řady 3; 6; 9; 12**

$$\varepsilon_{t2\_6} := \sqrt{\left[ \sum_{ix=0}^{n_v-1} a_{t2\_ix+1} \cdot \sin(\kappa_6 \cdot \theta_{ix}) \right]^2 + \left[ \sum_{ix=0}^{n_v-1} a_{t2\_ix+1} \cdot \cos(\kappa_6 \cdot \theta_{ix}) \right]^2} \quad \varepsilon_{t2\_6} = 5.995$$

$$\begin{aligned} & (\varepsilon_{t2\_1}) \\ & \varepsilon_{t2\_2} \\ & \varepsilon_{t2\_3} \\ & \varepsilon_{t2\_4} \\ & \varepsilon_{t2\_5} \\ & \varepsilon_{t2\_6} \\ & \varepsilon_{t2\_1} \\ & \varepsilon_{t2\_2} \\ & \varepsilon_{t2\_3} \\ & \varepsilon_{t2\_4} \\ & \varepsilon_{t2\_5} \\ & \varepsilon_{t2\_6} \\ \varepsilon_{t\Omega 2} := & \varepsilon_{t2\_1} \\ & \varepsilon_{t2\_2} \\ & \varepsilon_{t2\_3} \\ & \varepsilon_{t2\_4} \\ & \varepsilon_{t2\_5} \\ & \varepsilon_{t2\_6} \\ & \varepsilon_{t2\_1} \\ & \varepsilon_{t2\_2} \\ & \varepsilon_{t2\_3} \\ & \varepsilon_{t2\_4} \\ & \varepsilon_{t2\_5} \\ & (\varepsilon_{t2\_6}) \end{aligned}$$

**Torzní výchylky volného konce v rezonanci**

$$\xi := 5.2 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{sec} \cdot \text{rad}^{-1} \quad \Delta a_{1d} := 1 - a_{t1} \quad \Delta a_{1d} = 0.724$$

$$x := 0..8$$

$$\text{Pro první vlastní frekvenci} \quad \Delta a_{2d} := 1 - a_{t2} \quad \Delta a_{2d} = 2.245$$

$$\Phi_{t\Omega 1_i} := \frac{M_{h_{i+1}} \cdot \varepsilon_{t\Omega 1_i}}{\Omega_{t1} \cdot \left[ \xi \cdot \left[ \sum_x a_{t_x}^2 \right] + \xi_{t1} \cdot (\Delta a_{1d})^2 \right]} \cdot \text{deg}$$

**Pro první vlastní frekvenci**

$$\Phi_{t\Omega 2_i} := \frac{M_{h_{i+1}} \cdot \varepsilon_{t\Omega 2_i}}{\Omega_{t2} \cdot \left[ \xi \cdot \left[ \sum_x a_{t_x}^2 \right] + \xi_{t1} \cdot (\Delta a_{2d})^2 \right]} \cdot \text{deg}$$

## Pro celý hřídel

### Pevnostní analýza a bezpečnost

#### Vlastnosti materiálu

Mez kluzu	$R_e := 900 \cdot \text{MPa}$
Mez pevnosti	$R_m := 1283 \cdot \text{MPa}$
Mez únavy v ohybu	$\sigma_o := 525 \cdot \text{MPa}$
Mez únavy v tahu	$\sigma_T := 495 \cdot \text{MPa}$

#### Konstanty

Vliv velikosti součásti	$\eta_G := 1.189 \cdot 70.6^{-0.097} = 0.787$
Vliv zpracování povrchu (jemně broušeno)	$v_G := 0.9$
Průměr zkušební vzorku	$d_{\text{vzorek}} := 7.5$

#### Bez tlumiče

##### 1. zatížení

$$\sigma_{VMa} := 1092 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{1a} := 1113 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{3a} := -1051 \cdot \text{MPa}$$

Poměrný gradient napětí

##### 2. zatížení

$$\sigma_{VMb} := 680 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{1b} := 701 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{3b} := -586 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{eX} := 1084 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{eX1} := 637 \cdot \text{MPa}$$

$$XX1_n := 3.3934$$

$$X_R := \frac{1}{\sigma_{eX}} \cdot \frac{\sigma_{eX} - \sigma_{eX1}}{XX1}$$

$$X_R = 0.122$$

$$\text{Korekční součinitel} \quad f_G := 1 + X_R \cdot \frac{\frac{\sigma_o}{\sigma_T}}{\frac{2}{d_{\text{vzorek}}}} \quad f_G = 1.483$$

$$\text{Poměr } \beta/\alpha \quad \text{pomer} := 1 + \sqrt{X_R} \cdot 10^{-\left(0.35 + \frac{R_e}{810 \cdot \text{MPa}}\right)} \\ \text{pomer} = 1.012$$

#### Stanovení ekvivalentních napětí

$$\text{Maximální ekvivalentní napětí} \quad \sigma_{\text{emax}} := \text{sign}(\sigma_{1a}) \cdot \sigma_{VMa} \quad \sigma_{\text{emax}} = 1.092 \times 10^9 \text{ Pa}$$

$$\text{Minimální ekvivalentní napětí} \quad \sigma_{\text{emin}} := \text{sign}(\sigma_{1b}) \cdot \sigma_{VMb} \quad \sigma_{\text{emin}} = 6.8 \times 10^8 \text{ Pa}$$

$$\text{Amplituda ekvivalentního napětí} \quad \sigma_{\text{eamp}} := \frac{\sigma_{\text{emax}} - \sigma_{\text{emin}}}{2} \quad \sigma_{\text{eamp}} = 2.06 \times 10^8 \text{ Pa}$$

$$\text{Střední hodnota ekvivalentního napětí} \quad \sigma_{\text{estr}} := \frac{\sigma_{\text{emax}} + \sigma_{\text{emin}}}{2} \quad \sigma_{\text{estr}} = 8.86 \times 10^8 \text{ Pa}$$

$$\text{Bezpečnost} \quad k := \left( \text{pomer} \cdot \frac{\sigma_{\text{eamp}}}{\sigma_o \cdot \eta_G \cdot v_G \cdot f_G} + \frac{\sigma_{\text{estr}}}{R_m} \right)^{-1} \\ k = 0.936$$

$$\text{Bezpečnost po zakalení rádiusů} \quad k_{\text{kaleno}} := 1.3 \cdot k$$

$$k_{\text{kaleno}} = 1.216$$

## S tlumičem

1. zatížení

$$\sigma_{VMa} := 873 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{1a} := 948 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{3a} := -940 \cdot \text{MPa}$$

Poměrný gradient napětí

2. zatížení

$$\sigma_{VMb} := 252 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{1b} := 259 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{3b} := -216 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{eX} := 880 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{eX1} := 464 \cdot \text{MPa}$$

$$XX1_0 := 2.783$$

$$X_R := \frac{1}{\sigma_{eX}} \cdot \frac{\sigma_{eX} - \sigma_{eX1}}{XX1}$$

$$X_R = 0.17$$

$$\text{Korekční součinitel } f_G := 1 + X_R \cdot \frac{\frac{\sigma_o}{\sigma_T}}{\frac{2}{d_{\text{vzorek}}}} \quad f_G = 1.676$$

$$\text{Poměr } \beta/\alpha \quad \text{pomer} := 1 + \sqrt{X_R} \cdot 10^{-\left(0.35 + \frac{Re}{810 \cdot \text{MPa}}\right)} \\ \text{pomer} = 1.014$$

## Stanovení ekvivalentních napětí

Maximální ekvivalentní napětí

$$\sigma_{\text{amax}} := \text{sign}(\sigma_{1a}) \cdot \sigma_{VMa} \quad \sigma_{\text{amax}} = 8.73 \times 10^8 \text{ Pa}$$

Minimální ekvivalentní napětí

$$\sigma_{\text{amin}} := \text{sign}(\sigma_{1b}) \cdot \sigma_{VMb} \quad \sigma_{\text{amin}} = 2.52 \times 10^8 \text{ Pa}$$

Amplituda ekvivalentního napětí

$$\sigma_{\text{eamp}} := \frac{\sigma_{\text{emax}} - \sigma_{\text{emin}}}{2} \quad \sigma_{\text{eamp}} = 3.105 \times 10^8 \text{ Pa}$$

Střední hodnota ekvivalentního napětí

$$\sigma_{\text{estr}} := \frac{\sigma_{\text{emax}} + \sigma_{\text{emin}}}{2} \quad \sigma_{\text{estr}} = 5.625 \times 10^8 \text{ Pa}$$

Bezpečnost

$$k := \left( \text{pomer} \cdot \frac{\sigma_{\text{eamp}}}{\sigma_o \cdot \eta_{\sigma} \cdot v_{\sigma} \cdot f_G} + \frac{\sigma_{\text{estr}}}{R_m} \right)^{-1}$$

$$k = 1.059$$

Bezpečnost po zakalení rádiusů

$$k_{\text{kaleno}} := 1.3 \cdot k$$

$$k_{\text{kaleno}} = 1.377$$

## Pro jedno zalomení

### Bez tlumiče

1. zatížení

$$\sigma_{VMa} := 905 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{1a} := 720 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{3a} := -926 \cdot \text{MPa}$$

Poměrný gradient napětí

2. zatížení

$$\sigma_{VMb} := 671 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{1b} := 689 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{3b} := -580 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{eX} := 907 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{eX1} := 509 \cdot \text{MPa}$$

$$XX1_0 := 0.758552$$

$$X_R := \frac{1}{\sigma_{eX}} \cdot \frac{\sigma_{eX} - \sigma_{eX1}}{XX1}$$

$$X_R = 0.578$$

$$\text{Korekční součinitel} \quad f_G := 1 + X_R \cdot \frac{\frac{\sigma_o}{\sigma_T}}{\frac{2}{d_{\text{vzorek}}}} \quad f_G = 3.301$$

$$\text{Poměr } \beta/\alpha \quad \text{pomer} := 1 + \sqrt{X_R} \cdot 10^{-\left(0.35 + \frac{Re}{810 \cdot \text{MPa}}\right)} \\ \text{pomer} = 1.026$$

#### Stanovení ekvivalentních napětí

$$\text{Maximální ekvivalentní napětí} \quad \sigma_{\text{amax}} := \text{sign}(\sigma_{1a}) \cdot \sigma_{VMa} \quad \sigma_{\text{amax}} = 9.05 \times 10^8 \text{ Pa}$$

$$\text{Minimální ekvivalentní napětí} \quad \sigma_{\text{amin}} := \text{sign}(\sigma_{1b}) \cdot \sigma_{VMb} \quad \sigma_{\text{amin}} = 6.71 \times 10^8 \text{ Pa}$$

$$\text{Amplituda ekvivalentního napětí} \quad \sigma_{\text{eamp}} := \frac{\sigma_{\text{emax}} - \sigma_{\text{emin}}}{2} \quad \sigma_{\text{eamp}} = 1.17 \times 10^8 \text{ Pa}$$

$$\text{Střední hodnota ekvivalentního napětí} \quad \sigma_{\text{estr}} := \frac{\sigma_{\text{emax}} + \sigma_{\text{emin}}}{2} \quad \sigma_{\text{estr}} = 7.88 \times 10^8 \text{ Pa}$$

$$\text{Bezpečnost} \quad k := \left( \text{pomer} \cdot \frac{\sigma_{\text{eamp}}}{\sigma_o \cdot \eta_{\sigma} \cdot v_{\sigma} \cdot f_G} + \frac{\sigma_{\text{estr}}}{R_m} \right)^{-1} \\ k = 1.404$$

$$\text{Bezpečnost po zakalení rádiusů} \quad k_{\text{kaleno}} := 1.3 \cdot k \\ k_{\text{kaleno}} = 1.826$$

#### S tlumičem

1. zatížení

$$\sigma_{VMa} := 491 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{1a} := 447 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{2a} := -501 \cdot \text{MPa}$$

Poměrný gradient napětí

2. zatížení

$$\sigma_{VMb} := 249 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{1b} := 255 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{2b} := -215 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{eX} := 478 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{eX1} := 242 \cdot \text{MPa}$$

$$XX1_0 := .391202$$

$$X_R := \frac{1}{\sigma_{eX}} \cdot \frac{\sigma_{eX} - \sigma_{eX1}}{XX1}$$

$$X_R = 1.262$$

$$\text{Korekční součinitel} \quad f_G := 1 + X_R \cdot \frac{\frac{\sigma_o}{\sigma_T}}{\frac{2}{d_{\text{vzorek}}}} \quad f_G = 6.02$$

$$\text{Poměr } \beta/\alpha \quad \text{pomer} := 1 + \sqrt{X_R} \cdot 10^{-\left(0.35 + \frac{Re}{810 \cdot \text{MPa}}\right)} \\ \text{pomer} = 1.039$$

### Stanovení ekvivalentních napětí

Maximální ekvivalentní napětí	$\sigma_{\text{emax}} := \text{sign}(\sigma_{1a}) \cdot \sigma_{VMa}$	$\sigma_{\text{emax}} = 4.91 \times 10^8 \text{ Pa}$
Minimální ekvivalentní napětí	$\sigma_{\text{emin}} := \text{sign}(\sigma_{1b}) \cdot \sigma_{VMb}$	$\sigma_{\text{emin}} = 2.49 \times 10^8 \text{ Pa}$
Amplituda ekvivalentního napětí	$\sigma_{\text{eamp}} := \frac{\sigma_{\text{emax}} - \sigma_{\text{emin}}}{2}$	$\sigma_{\text{eamp}} = 1.21 \times 10^8 \text{ Pa}$
Střední hodnota ekvivalentního napětí	$\sigma_{\text{estr}} := \frac{\sigma_{\text{emax}} + \sigma_{\text{emin}}}{2}$	$\sigma_{\text{estr}} = 3.7 \times 10^8 \text{ Pa}$
Bezpečnost	$k := \left( \text{pomer} \cdot \frac{\sigma_{\text{eamp}}}{\sigma_o \cdot \eta_{\sigma} \cdot v_{\sigma} \cdot f_G} + \frac{\sigma_{\text{estr}}}{R_m} \right)^{-1}$	
	$k = 2.902$	
Bezpečnost po zakalení rádiusů	$k_{\text{kaleno}} := 1.3 \cdot k$	
	$k_{\text{kaleno}} = 3.773$	