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

MODIFIKACE ČTYŘVÁLCOVÉHO VZNĚTOVÉHO MOTORU NA ZKUŠEBNÍ JEDNOVÁLEC
MODIFICATION OF A FOUR CYLINDER DIESEL ENGINE TO A SINGLE CYLINDER TEST ENGINE

PŘÍLOHY K DIPLOMOVÉ PRÁCI
MASTER'S THESIS APPENDIX

AUTOR PRÁCE Bc. Attila Mátyás
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
SUPERVISOR

BRNO 2020

Príloha 1 Výpočet síl pôsobiacich v kľukovom mechanizme

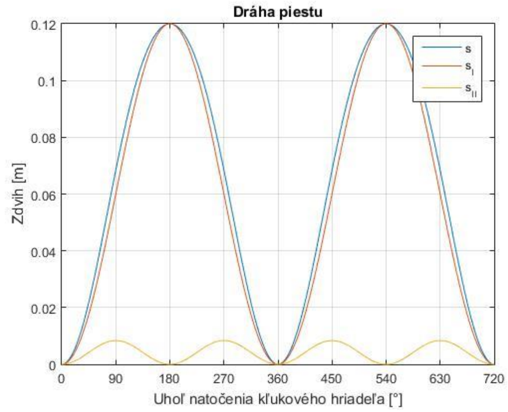
```
% DIPLOMOVÁ PRÁCA
% Modifikace čtyřvalcového vznětového motoru na zkušební jednoválec
% Attila Mátyás
% 2019 - 2020
% Copyright © 2019 Attila Mátyás All Rights Reserved
%__________________________________________________________________________%

clear all
clc

% Vstupné parametre

Z = 120;                             % zdvih [mm]
L = 215;                             % dĺžka ojnice [mm]
n = 2200;                            % otáčky motoru [1/min]
D = 105;                             % vŕtanie [mm]
p0 = load('diesel2200rpm.dat')';     % tlak [MPa]
mp = 2.0539;                         % hmotnosť piestnej skupiny [kg]
m_p = 2.9609;                        % hmotnosť posuvných častí [kg]
mro = 1.645;                         % hmotnosť rotačných častí ojnice [kg]

% Prevod jednotiek

p = p0*1000000;                      % tlak [Pa]
r = Z*0.001/2;                       % polomer kľukovej hriadele [m]
l = L*0.001;                         % dĺžka ojnice [m]
d = D*0.001;                         % vŕtanie [m]
omega = 2*pi*n/60;                   % úhlová rýchlosť [rad/s]
x = linspace(0, 4*pi, length(p));
x_deg = x*180/pi;

% Dráha piestu

s = r*((1-cos(x))+(r/l)*(1-cos(2*x))/4);
sI = r*(1-cos(x));
sII = r*(r/l)*(1-cos(2*x))/4;
plot(x_deg, s, x_deg, sI, x_deg ,sII)
legend('s','s_I','s_I_I')
ax1 = gca;
ax1.XTick = 0:90:720;
ax1.XLim = [0, 720];
xlabel('Uhol natočenia kľukového hriadeľa [°]')
ylabel('Zdvih [m]')
title('Dráha piestu')
grid on

% Rýchlosť piestu

v = r*omega*(sin(x)+(r/l)*sin(2*x)/2);
vI = r*omega*sin(x);
vII = r*omega*(r/l)*sin(2*x)/2;
figure
plot(x_deg, v, x_deg, vI, x_deg ,vII)
legend('v','v_I','v_I_I')
ax1 = gca;
```

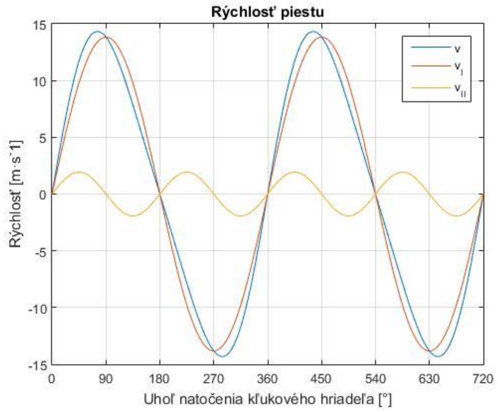
```
ax1.XTick = 0:90:720;
ax1.XLim = [0, 720];
xlabel('Uhol natočenia kľukového hriadeľa [°]')
ylabel('Rýchlosť [m·s^-1]')
title('Rýchlosť piestu')
grid on

% Zrýchlenie piestu

a = r*omega^2*(cos(x)+(r/l)*cos(2*x));
aI = r*omega^2*cos(x);
aII = r*omega^2*(r/l)*cos(2*x);
figure
plot(x_deg, a, x_deg, aI, x_deg ,aII)
legend('a','a_I','a_I_I')
ax1 = gca;
ax1.XTick = 0:90:720;
ax1.XLim = [0, 720];
xlabel('Uhol natočenia kľukového hriadeľa [°]')
ylabel('Zrýchlenie [m·s^-2]')
title('Zrýchlenie piestu')
grid on

% Priebeh tlaku

figure
plot(x_deg, p0)
legend('p_i')
ax1 = gca;
ax1.XTick = 0:90:720;
ax1.XLim = [0, 720];
xlabel('Uhol natočenia kľukového hriadeľa [°]')
ylabel('Spaľovací tlak [MPa]')
title('Priebeh spaľovacieho tlaku')
grid on

% Silové pôsobenie na piest

beta = asin(sin(x)*r/l);
Fp = p*pi*(d^2)/4;
Foy = -Fp + m_p*a;
Fox = Foy.*tan(beta);
Fo = Foy./cos(beta);
Fv = -Fox;

% Sila od tlaku plynov

figure
plot(x_deg, Fp)
legend('F_p')
ax1 = gca;
ax1.XTick = 0:90:720;
ax1.XLim = [0, 720];
xlabel('Uhol natočenia kľukového hriadeľa [°]')
ylabel('Sila od tlaku plynov [N]')
title('Priebeh sily od tlaku plynov')
grid on
```

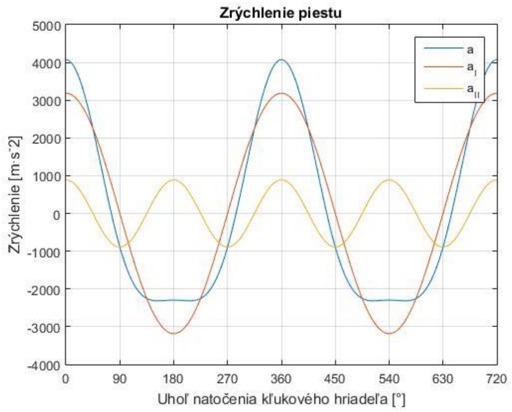
```
% Sila zotrvačná v osi valca

Fs = -m_p * a;
figure
plot(x_deg, Fs)
legend('F_s')
ax1 = gca;
ax1.XTick = 0:90:720;
ax1.XLim = [0, 720];
xlabel('Uhol natočenia kľukového hriadeľa [°]')
ylabel('Zotrvačná sila [N]')
title('Zotrvačná sila v osi valca')
grid on

% Sila celková v osi valca

Fc = Fs + Fp;
figure
plot(x_deg, Fc)
legend('F_c')
ax1 = gca;
ax1.XTick = 0:90:720;
ax1.XLim = [0, 720];
xlabel('Uhol natočenia kľukového hriadeľa [°]')
ylabel('Celková sila [N]')
title('Celková sila v osi valca')
grid on

% Silové pôsobenie na ojničný čap

gamma = pi-x-beta;
Fod = mro*r*omega^2;
Fn = Fod-Fo.*cos(gamma);
Ft = -Fo.*sin(gamma);
figure
plot(x_deg, Fn, x_deg, Ft)
legend('F_r','F_t')
ax1 = gca;
ax1.XTick = 0:90:720;
ax1.XLim = [0, 720];
xlabel('Uhol natočenia kľukového hriadeľa [°]')
ylabel('Síla [N]')
title('Radiálna a tangenciálna zložka výslednej sily')
grid on

% Priebeh točivého momentu

Mk = Ft*r;
figure
plot(x_deg, Mk)
legend('M_k')
ax1 = gca;
ax1.XTick = 0:90:720;
ax1.XLim = [0, 720];
xlabel('Uhol natočenia kľukového hriadeľa [°]')
ylabel('Krútiaci moment [N·m]')
title('Priebeh krútiaceho momentu jednovalcového motora')
grid on
```

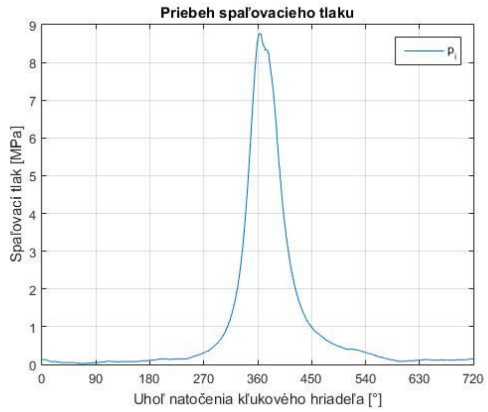
```
% Zotrvačné sily od posuvných častí 1. rádu

FsI = -m_p*r*(omega^2)*cos(x);
FsI_50 = -0.50*m_p*r*(omega^2)*cos(x);

% Zotrvačné sily od posuvných častí 2. rádu

FsII = -m_p*r*(omega^2)*(r/l)*cos(2*x);

% Celková zotrvačné sily od posuvných častí pred

Fs_c = FsI + FsII;
figure
plot(x_deg, Fs_c, x_deg, FsI, x_deg, FsII)
ylim([-15000,10000]);
legend('Fs_c', 'Fs_I','Fs_I_I')
ax1 = gca;
ax1.XTick = 0:90:720;
ax1.XLim = [0, 720];
xlabel('Uhol natočenia kľukového hriadeľa [°]')
ylabel('Zotrvačná síla posuvných častí [N]')
title('Celková zotrvačná síla posuvných častí')
grid on

% Celková zotrvačné sily od posuvných častí po

Fs_c = FsI_50 + FsII;
figure
plot(x_deg, Fs_c, x_deg, FsI_50, x_deg, FsII)
ylim([-15000,10000]);
legend('Fs_c', 'Fs_I_5_0','Fs_I_I')
ax1 = gca;
ax1.XTick = 0:90:720;
ax1.XLim = [0, 720];
xlabel('Uhol natočenia kľukového hriadeľa [°]')
ylabel('Zotrvačná síla posuvných častí [N]')
title('Celková zotrvačná síla posuvných častí')
grid on
A = max(FsI);
B = max(FsI_50);
C = A - B;
D = min(Fn);
E = max(Fp);
disp(['Zotrvacna sila pred = ' num2str(A) ' N'])
disp(['Zotrvacna sila po = ' num2str(B) ' N'])

% Točivý moment a výkon motora

Mk_prum = mean(Mk);
disp(['Priemerny moment jednovalcoveho motora = ' num2str(Mk_prum) ' Nm'])
P_prum = Mk_prum*omega;
disp(['Priemerny vykon jednovalcoveho motora = ' num2str(P_prum/1000) ' kW'])
```

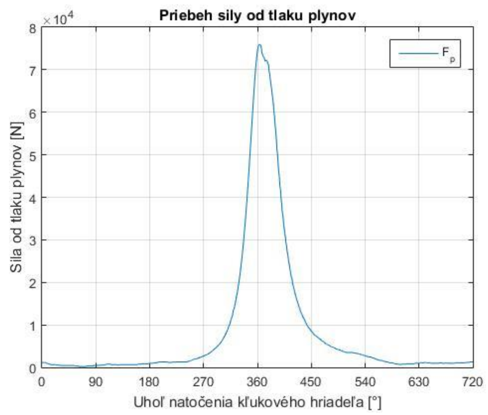
```
Zotrvacna sila pred = 9429.1695 N
Zotrvacna sila po = 4714.5847 N
Priemerny moment jednovalcoveho motora = 103.2119 Nm
Priemerny vykon jednovalcoveho motora = 23.7783 kW
```

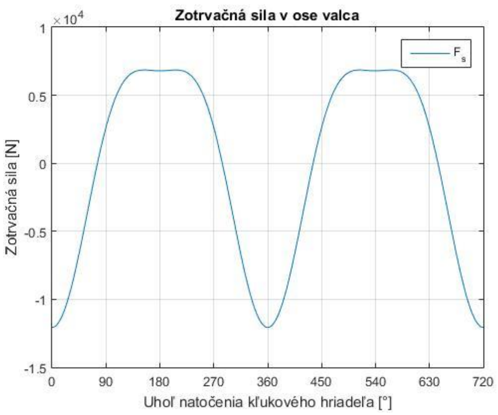

Dráha piestu
Zdvih [m]
Uhol natočenia kľukového hriadeľa [°]
s
s_I
s_{II}

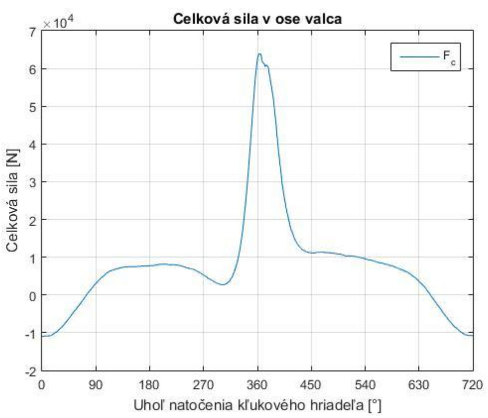

Rýchlosť piestu
Rýchlosť [m·s^-1]
Uhol natočenia kľukového hriadeľa [°]
v
v_I
v_{II}

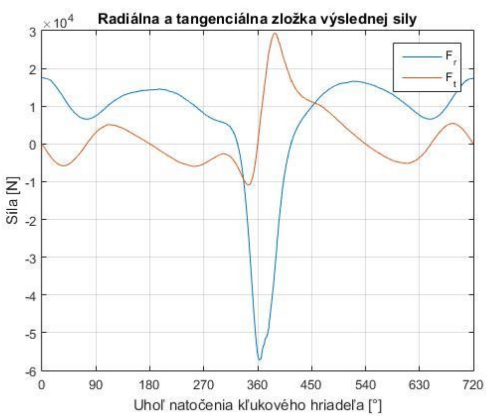

Zrýchlenie piestu
Zrýchlenie [m·s^-2]
Uhol natočenia kľukového hriadeľa [°]
a
a_I
a_{II}

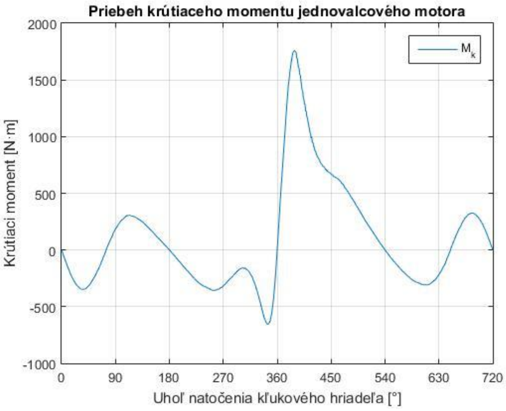

Priebeh spaľovacieho tlaku
Spaľovací tlak [MPa]
Uhol natočenia kľukového hriadeľa [°]
p_i

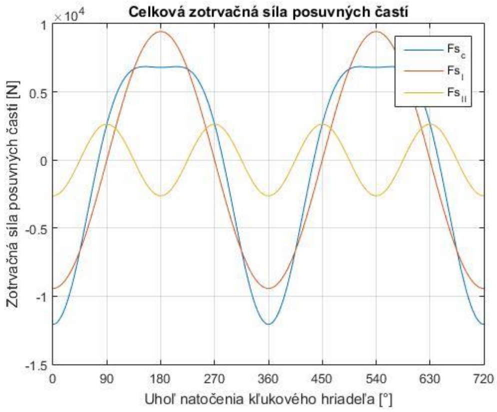

Priebeh sily od tlaku plynov
Sila od tlaku plynov [N]
Uhol natočenia kľukového hriadeľa [°]
F_p

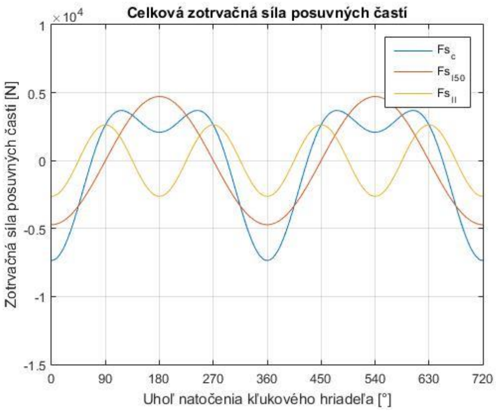

Zotrvačná sila v ose valca
Zotrvačná sila [N]
Uhol natočenia kľukového hriadeľa [°]
F_s


Celková sila v ose valca
Celková sila [N]
Uhol natočenia kľukového hriadeľa [°]
F_c


Radiálna a tangenciálna zložka výslednej sily
Sila [N]
Uhol natočenia kľukového hriadeľa [°]
F_r
F_t


Priebeh krútiaceho momentu jednovalcového motora
Krútiaci moment [N·m]
Uhol natočenia kľukového hriadeľa [°]
M_k


Celková zotrvačná sila posuvných častí
Zotrvačná sila posuvných častí [N]
Uhol natočenia kľukového hriadeľa [°]
Fs_c
Fs_I
Fs_II


Celková zotrvačná sila posuvných častí
Zotrvačná sila posuvných častí [N]
Uhol natočenia kľukového hriadeľa [°]
Fs_c
Fs_I50
Fs_II

Príloha 2 Výpočet torzného kmitania skúšobného motora

1.1 Vstupné parametre

$J_{rem} := 1.4498448 \cdot 10^7 \ gm \cdot mm^2 = 0.0145 \ kg \cdot m^2$

$J_{zal\_1} := 2.6212335 \cdot 10^7 \ gm \cdot mm^2 = 0.02621 \ kg \cdot m^2$

$J_{zal\_2} := 2.6212335 \cdot 10^7 \ gm \cdot mm^2 = 0.02621 \ kg \cdot m^2$

$J_{zal\_3} := 2.6212335 \cdot 10^7 \ gm \cdot mm^2 = 0.02621 \ kg \cdot m^2$

$J_{zal\_4} := 3.1010654 \cdot 10^7 \ gm \cdot mm^2 = 0.03101 \ kg \cdot m^2$

$J_{zotr} := 6.8710211 \cdot 10^8 \ gm \cdot mm^2 = 0.6871 \ kg \cdot m^2$

$J_{vol\_kon} := 7.9713281 \cdot 10^5 \ gm \cdot mm^2 = 0.0008 \ kg \cdot m^2$

$J_{prir} := 4.1786378 \cdot 10^6 \ gm \cdot mm^2 = 0.00418 \ kg \cdot m^2$

$m_{psk} := 2053.9 \ gm$

$m_{oj\_rot} := 1645 \ gm$

$m_{oj\_pos} := 907 \ gm$

$r := 60 \ mm$

$l := 215 \ mm$

$\lambda := \frac{r}{l} = 0.27907$

1.2 Výpočet momentov zotrvačnosti

1.2.1 Redukovaný moment zotrvačnosti rotačných častí

$J_{rot} := m_{oj\_rot} \cdot r^2 = 0.00592 \ kg \cdot m^2$

1.2.2 Redukovaný moment zotrvačnosti posuvných častí

$J_{pos} := \left(\left(m_{psk} + m_{oj\_pos}\right) \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{\lambda^2}{8}\right)\right) r^2 = 0.00543 \ kg \cdot m^2$

1.2.3 Redukovaný moment zotrvačnosti jednotlivých zalomení

$J_{zal\_1\_red} := J_{zal\_1} + J_{rot} = 0.03213 \ kg \cdot m^2$

$J_{zal\_2\_red} := J_{zal\_2} + J_{rot} = 0.03213\ \boldsymbol{kg \cdot m^2}$

$J_{zal\_3\_red} := J_{zal\_3} + J_{rot} = 0.03213\ \boldsymbol{kg \cdot m^2}$

$J_{zal\_4\_red} := J_{zal\_4} + J_{rot} + J_{pos} = 0.04237\ \boldsymbol{kg \cdot m^2}$

1.2.4 Redukovaný moment zotrvačnosti na strane remenice

$J_{rem\_red} := J_{rem} + J_{vol\_kon} = 0.0153\ \boldsymbol{kg \cdot m^2}$

1.2.5 Redukovaný moment zotrvačnosti na strane zotrvačníka

$J_{zotr\_red} := J_{zotr} + J_{prir} = 0.69128\ \boldsymbol{kg \cdot m^2}$

1.3 Výpočet redukovaných dĺžok

1.3.1 Redukovaná dĺžka zalomenia

$D_{red\_zal} := 80\ \boldsymbol{mm}$

$L_{hc} := 44\ \boldsymbol{mm}$ $\quad L_{oc} := 40\ \boldsymbol{mm}$ $\quad L_{zal} := 26\ \boldsymbol{mm}$

$D_{hc} := 80\ \boldsymbol{mm}$ $\quad D_{oc} := 66\ \boldsymbol{mm}$ $\quad B_{zal} := 90\ \boldsymbol{mm}$

$$L_{red\_zal} := D_{red\_zal}{}^4 \cdot \left(\frac{L_{hc} + 0.4 \cdot D_{hc}}{D_{hc}{}^4} + \frac{L_{oc} + 0.4 \cdot D_{oc}}{D_{oc}{}^4} + \frac{r - 0.2 \cdot (D_{hc} + D_{oc})}{L_{zal} \cdot B_{zal}{}^3} \right) = 285.89447\ \boldsymbol{mm}$$

1.3.2 Redukovaná dĺžka na strane remenice

$l_{1\_rem} := 34\ \boldsymbol{mm}$ $\quad d_{1\_rem} := 20\ \boldsymbol{mm}$ $\quad D_{red\_rem} := 80\ \boldsymbol{mm}$

$l_{2\_rem} := 18\ \boldsymbol{mm}$ $\quad d_{2\_rem} := 40\ \boldsymbol{mm}$

$l_{3\_rem} := 29\ \boldsymbol{mm}$ $\quad d_{3\_rem} := 40\ \boldsymbol{mm}$

$$L_{red\_rem} := l_{2\_rem} + \frac{L_{red\_zal}}{2} + l_{1\_rem} \cdot \frac{D_{red\_rem}{}^4}{d_{2\_rem}{}^4 - d_{1\_rem}{}^4} + l_{3\_rem} \cdot \frac{D_{red\_rem}{}^4}{d_{3\_rem}{}^4} = 1205.2139\ \boldsymbol{mm}$$

1.3.3 Redukovaná dĺžka na strane zotrvačníka

$D_{red\_zotr} := 80\ \boldsymbol{mm}$ $\quad D_{rozt} := 84\ \boldsymbol{mm}$

$l_{1\_zotr} := 25\ \boldsymbol{mm}$ $\quad l_{2\_zotr} := 35\ \boldsymbol{mm}$

$$L_{red\_zotr} := l_{1\_zotr} + \frac{L_{red\_zal}}{2} + l_{2\_zotr} \cdot \frac{{D_{red\_zotr}}^4}{{D_{rozt}}^4} = 196.74182\ mm$$

1.4 Výpočet torzných tuhostí

1.4.1 Výpočet polárneho momentu zotrvačnosti

$$G_{ocel} := 81\ GPa$$

$$D_{red} := 80\ mm$$

$$J_p := \frac{\pi \cdot {D_{red}}^4}{32} = 4021238.59659\ mm^4$$

1.4.2 Výpočet torznej tuhosti za remenici

$$c_1 := \frac{G_{ocel} \cdot J_p}{L_{red\_rem}} = 270259.35042\ \frac{N \cdot m}{rad}$$

1.4.3 Výpočet torznej tuhosti za jednotlivé zalomenia

$$c_2 := \frac{G_{ocel} \cdot J_p}{L_{red\_zal}} = 1139302.642239\ \frac{N \cdot m}{rad}$$

$$c_3 := \frac{G_{ocel} \cdot J_p}{L_{red\_zal}} = 1139302.642239\ \frac{N \cdot m}{rad}$$

$$c_4 := \frac{G_{ocel} \cdot J_p}{L_{red\_zal}} = 1139302.642239\ \frac{N \cdot m}{rad}$$

$$c_5 := \frac{G_{ocel} \cdot J_p}{L_{red\_zotr}} = 1655572.377731\ \frac{N \cdot m}{rad}$$

1.5 Výpočet vlastných frekvencií jednovalcového motora

1.5.1 Výpočet vlastných frekvencií torzného kmitania

$$M := \begin{bmatrix} J_{rem\_red} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_{zal\_1\_red} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{zal\_2\_red} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_{zal\_3\_red} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_{zal\_4\_red} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{zotr\_red} \end{bmatrix}$$

$$C := \begin{bmatrix} c_1 & -c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c_1 & c_1+c_2 & -c_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c_2 & c_2+c_3 & -c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_3 & c_3+c_4 & -c_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -c_4 & c_4+c_5 & -c_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -c_5 & c_5 \end{bmatrix}$$

$$A_1 := M^{-1} \cdot C$$

$$\lambda_c := \text{eigenvals}\left(A_1\right)$$

$$\lambda_c = \begin{bmatrix} 122941084.03756 \\ 82072446.70996 \\ 42562320.07307 \\ 19689951.21012 \\ 4450099.98803 \\ 0 \end{bmatrix} \frac{1}{s^2}$$

$$\Omega_0 := \sqrt[2]{\lambda_c} \qquad \Omega_0 = \begin{bmatrix} 11087.88005 \\ 9059.38446 \\ 6523.98039 \\ 4437.33605 \\ 2109.52601 \\ 0.00001 \end{bmatrix} \frac{1}{s}$$

$$f_0 := \frac{\Omega_0}{2 \cdot \pi} \qquad f_0 = \begin{bmatrix} 1764.69092 \\ 1441.84582 \\ 1038.32373 \\ 706.22397 \\ 335.74149 \\ 0 \end{bmatrix} \frac{1}{s}$$

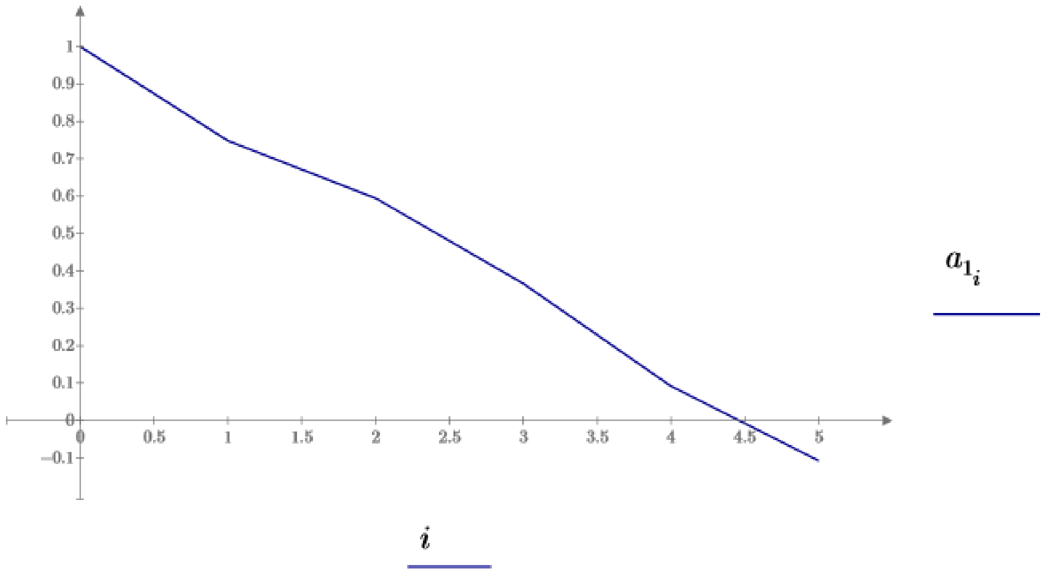
$$n_0 := f_0 \qquad n_0 = \begin{bmatrix} 105881.45512 \\ 86510.74905 \\ 62299.42362 \\ 42373.43798 \\ 20144.48953 \\ 0.00005 \end{bmatrix} \frac{1}{min}$$

1.5.2 Výpočet vlastných tvarov torzného kmitania

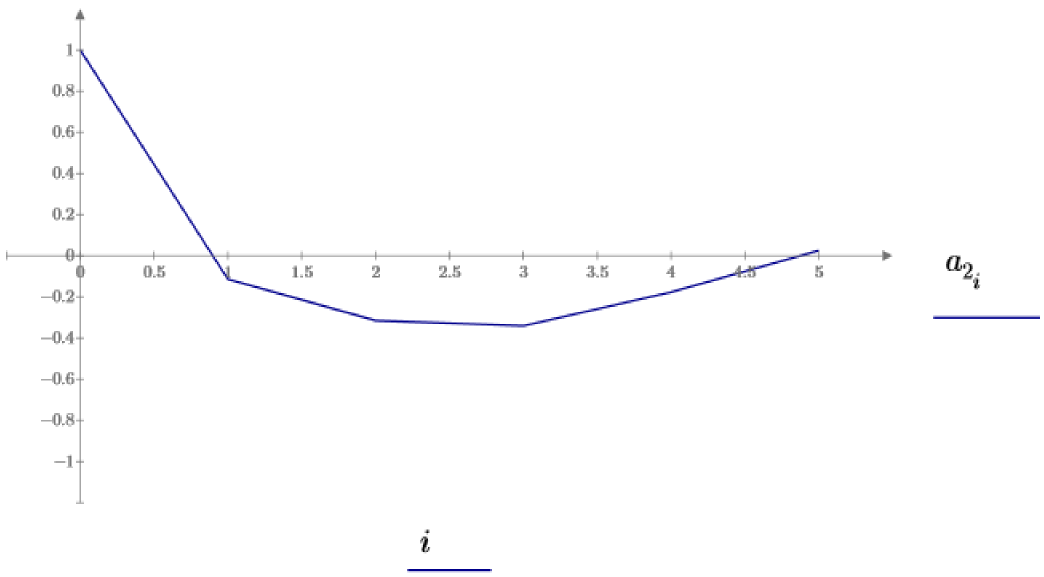
$w := \text{eigenvecs}\left(A_1\right)$

$i := 0 \,..\, 5$

$a_{1_i} := \dfrac{w_{i,4}}{w_{0,4}}$ $\qquad a_{1_i} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.74814 \\ 0.59449 \\ 0.36623 \\ 0.09199 \\ -0.1072 \end{bmatrix}$



$a_{2_i} := \dfrac{w_{i,3}}{w_{0,3}}$ $\qquad a_{2_i} = \begin{bmatrix} 1 \\ -0.11437 \\ -0.3152 \\ -0.34098 \\ -0.17739 \\ 0.02456 \end{bmatrix}$



1.6 Vynútené torzné kmitanie

1.6.1 Harmonické zložky krútiaceho momentu

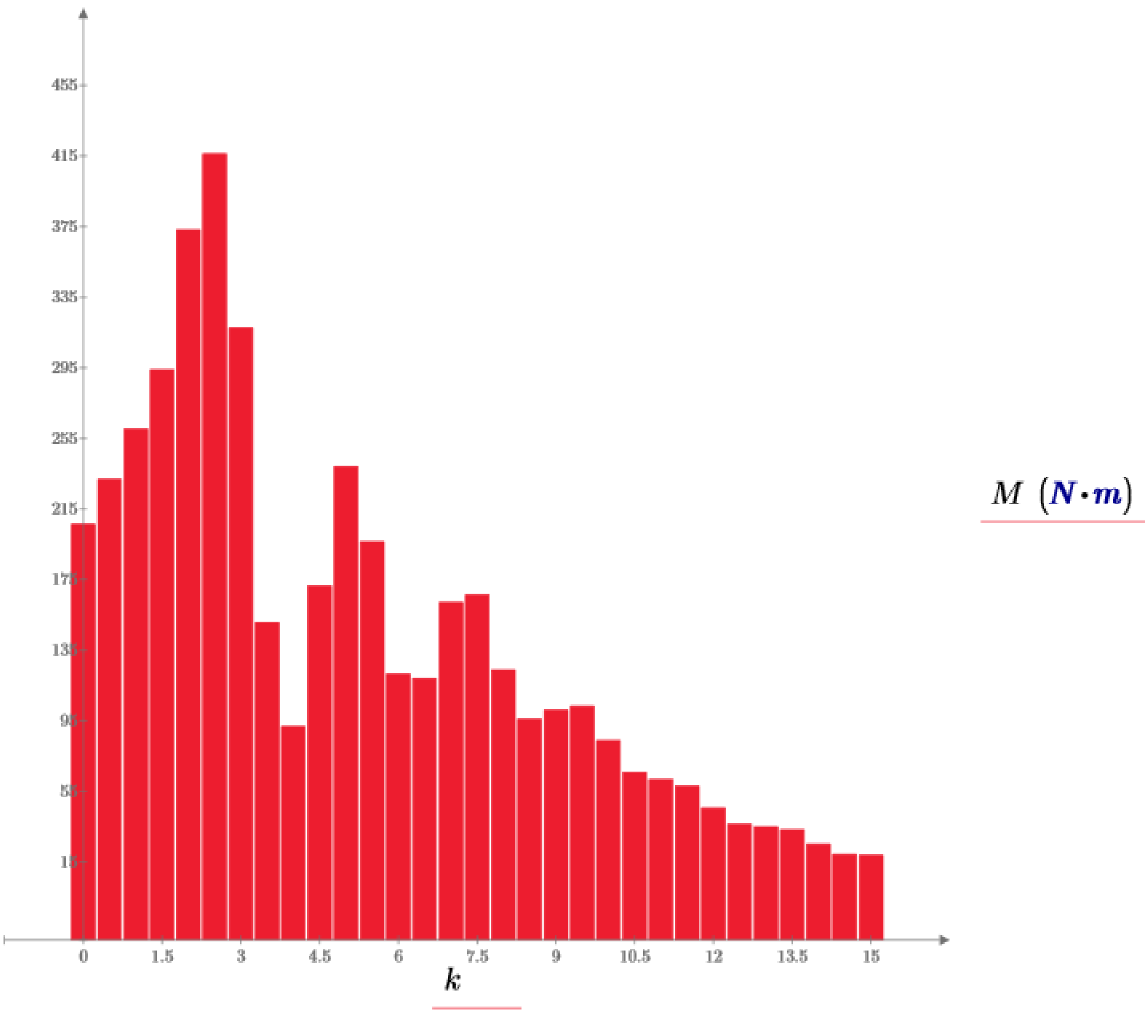
$$M_k := \text{READEXCEL}\left(\text{“.\textbackslash Mt.xlsx”}, \text{“Hárok1!A1:AAR1”}\right)^{T} = \begin{bmatrix} 0 \\ -9.76615 \\ -19.55695 \\ \vdots \end{bmatrix}$$

$$n_{vz} := 720$$

$$k := 0, 0.5 .. 15 = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \end{bmatrix} \qquad j := 0 .. 720 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \vdots \end{bmatrix}$$

$$h := \frac{2}{n_{vz}} \cdot \sum_{j=0}^{n_{vz}-1} \left(M_{k_j} \cdot e^{1i \cdot \left(2 \cdot \pi \cdot k \cdot \frac{j}{n_{vz}}\right)} \right) = \begin{bmatrix} 206.42388 \\ -108.08597 + 205.05275i \\ \vdots \end{bmatrix}$$

$$M := \overrightarrow{|h|} \cdot N \cdot m = \begin{bmatrix} 206.42388 \\ 231.79562 \\ 260.33798 \\ \vdots \end{bmatrix} N \cdot m$$



$$\kappa := 0.5, 1 .. 15 = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 1 \\ \vdots \end{bmatrix}$$

1.6.2 Kritické otáčky jednovalcového motora

$$M = \begin{bmatrix} 206.42388 \\ 231.79562 \\ 260.33798 \\ 294.01377 \\ 373.13745 \\ 416.17748 \\ 317.70355 \\ 150.99878 \\ 92.00177 \\ 171.51415 \\ 239.08516 \\ 196.36091 \\ 121.64095 \\ 118.98011 \\ 162.33914 \\ 166.60043 \\ 123.99602 \\ 96.14156 \\ 101.06657 \\ 103.4203 \\ 84.09508 \\ 66.1159 \\ 61.77569 \\ 58.17126 \\ 45.86837 \\ 36.57707 \\ 35.16605 \\ 33.33502 \\ 25.34084 \\ 19.51387 \\ 18.94756 \end{bmatrix} \boldsymbol{N \cdot m} \quad n_1 := \frac{n_{0_4}}{\kappa} = \begin{bmatrix} 40288.97905 \\ 20144.48953 \\ 13429.65968 \\ 10072.24476 \\ 8057.79581 \\ 6714.82984 \\ 5755.56844 \\ 5036.12238 \\ 4476.55323 \\ 4028.89791 \\ 3662.63446 \\ 3357.41492 \\ 3099.15223 \\ 2877.78422 \\ 2685.93194 \\ 2518.06119 \\ 2369.93994 \\ 2238.27661 \\ 2120.47258 \\ 2014.44895 \\ 1918.52281 \\ 1831.31723 \\ 1751.69474 \\ 1678.70746 \\ 1611.55916 \\ 1549.57612 \\ 1492.18441 \\ 1438.89211 \\ 1389.27514 \\ 1342.96597 \end{bmatrix} \frac{1}{\boldsymbol{min}} \quad n_2 := \frac{n_{0_3}}{\kappa} = \begin{bmatrix} 84746.87596 \\ 42373.43798 \\ 28248.95865 \\ 21186.71899 \\ 16949.37519 \\ 14124.47933 \\ 12106.69657 \\ 10593.35949 \\ 9416.31955 \\ 8474.6876 \\ 7704.26145 \\ 7062.23966 \\ 6518.99046 \\ 6053.34828 \\ 5649.79173 \\ 5296.67975 \\ 4985.11035 \\ 4708.15978 \\ 4460.36189 \\ 4237.3438 \\ 4035.56552 \\ 3852.13073 \\ 3684.64678 \\ 3531.11983 \\ 3389.87504 \\ 3259.49523 \\ 3138.77318 \\ 3026.67414 \\ 2922.30607 \\ 2824.89587 \end{bmatrix} \frac{1}{\boldsymbol{min}}$$

1.6.3 Relatívna výdatnosť kmitov

$z := 1$

$\delta := \dfrac{720 \cdot deg}{z}$

$\psi := \delta \cdot k$

$\varepsilon_{1\_1} := \sqrt[2]{\left(\sum_{i=1}^{1} a_{1_i} \cdot \sin\left(\psi_i\right)\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{1} a_{1_i} \cdot \cos\left(\psi_i\right)\right)^2}$ $\qquad \varepsilon_{1\_1} = 0.74814$

$\varepsilon_{2\_1} := \sqrt[2]{\left(\sum_{i=1}^{1} a_{2_i} \cdot \sin\left(\psi_i\right)\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{1} a_{2_i} \cdot \cos\left(\psi_i\right)\right)^2}$ $\qquad \varepsilon_{2\_1} = 0.11437$

$\varepsilon_1 := \begin{bmatrix} \vdots \\ \varepsilon_{1\_1} \\ \varepsilon_{1\_1} \\ \varepsilon_{1\_1} \\ \varepsilon_{1\_1} \\ \vdots \end{bmatrix} \qquad \varepsilon_2 := \begin{bmatrix} \varepsilon_{2\_1} \\ \varepsilon_{2\_1} \\ \varepsilon_{2\_1} \\ \varepsilon_{2\_1} \\ \varepsilon_{2\_1} \\ \vdots \end{bmatrix}$

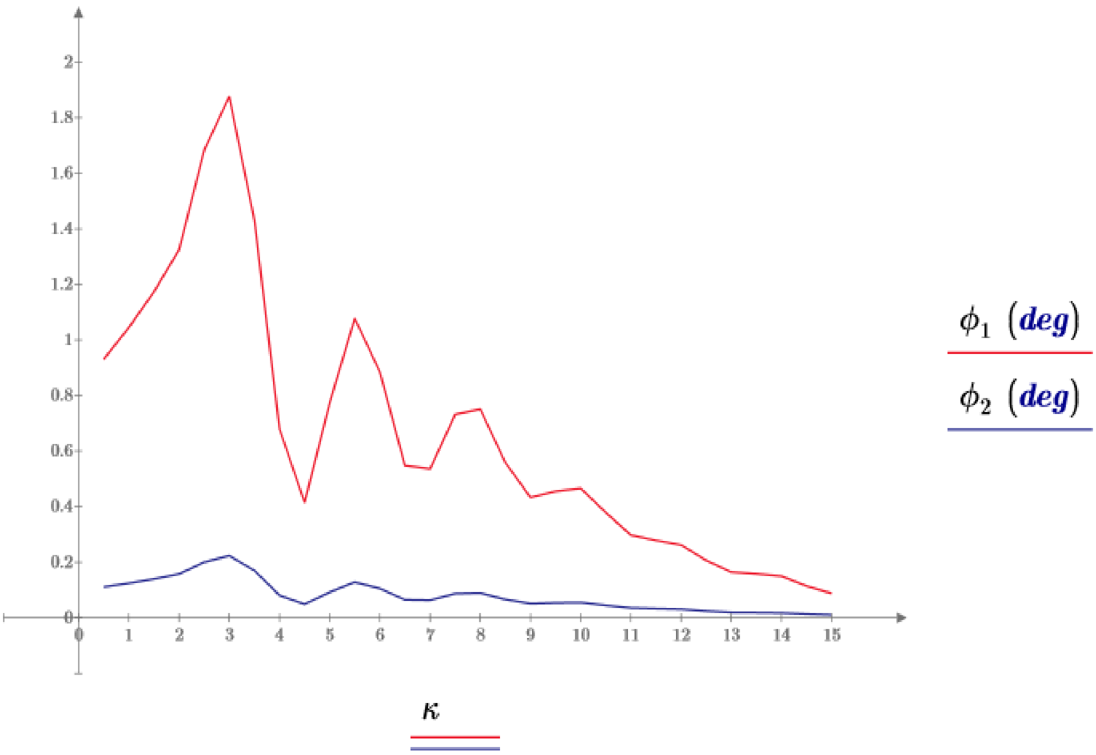
$\xi := 2.18 \cdot \dfrac{N \cdot m \cdot s}{rad}$

$l := 0 .. 30$

$\phi_{1_l} := \dfrac{M_l \cdot \varepsilon_{1_l}}{\Omega_{0_4} \cdot \xi \cdot \left(\sum_{i=0}^{5} \left(a_{1_i}\right)^2\right)}$ $\qquad \phi_{1_l} = \begin{bmatrix} 0.93076 \\ 1.04516 \\ 1.17386 \\ \vdots \end{bmatrix} deg$

$\phi_{2_l} := \dfrac{M_l \cdot \varepsilon_{2_l}}{\Omega_{0_3} \cdot \xi \cdot \left(\sum_{i=0}^{5} \left(a_{2_i}\right)^2\right)}$ $\qquad \phi_{2_l} = \begin{bmatrix} 0.11091 \\ 0.12455 \\ 0.13988 \\ \vdots \end{bmatrix} deg$

1.6.4 Torzné výchylky voľného konca kľukového hriadeľa



2 Výpočet bezpečnosti voči vysokocyklovej únave

$\sigma_{ctah} := 495\ MPa$

$R_m := 1250\ MPa$

$\sigma_{cohyb} := 525\ MPa$

$R_e := 900\ MPa$

$\sigma_{eX} := 411.11\ MPa$

$d_{vz} := 7.5\ mm$

$\sigma_{eX1} := 16.567\ MPa$

$\sigma_{eXB} := 117.78\ MPa$

$xx_1 := 0.662206\ mm$

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

$$\chi_R = 1.44925\ \frac{1}{mm}$$

$$f_G := 1 + \frac{\dfrac{\sigma_{cohyb}}{\sigma_{ctah}} - 1}{\dfrac{2}{d_{vz}}} \cdot \chi_R$$

$$f_G = 1.32937$$

$$f_{\beta\alpha} := 1 + \sqrt[2]{\chi_R \cdot mm} \cdot 10^{-\left(0.35 + \frac{R_e}{810 \cdot MPa}\right)}$$

$$f_{\beta\alpha} = 1.04164$$

$\sigma_{emax} := \sigma_{eX}$

$\sigma_{emax} = 411.11\ MPa$

$\sigma_{emin} := \sigma_{eXB}$

$\sigma_{emin} = 117.78\ MPa$

$$\sigma_{ea} := \left|\frac{\sigma_{emax} - \sigma_{emin}}{2}\right|$$

$$\sigma_{ea} = 146.665\ MPa$$

$$\sigma_{em} := \left|\frac{\sigma_{emax} + \sigma_{emin}}{2}\right|$$

$$\sigma_{em} = 264.445\ MPa$$

$\eta_\sigma := 0.814$

$\eta_\sigma = 0.814$

$\nu_\sigma := 1.51 \cdot 80^{-0.157}$

$\nu_\sigma = 0.75891$

$$k_U := \frac{1}{f_{\beta\alpha} \cdot \dfrac{\sigma_{ea}}{\sigma_{ctah} \cdot f_G \cdot \eta_\sigma \cdot \nu_\sigma} + \dfrac{\sigma_{em}}{R_m}}$$

$$k_U = 1.7025$$

$k_{Ukal} := k_U \cdot 1.3$

$k_{Ukal} = 2.21325$

3 Torzné kmitanie jednovalcového motora v spojení s dynamometrom

3.1 Výpočet vlatných frekvencí

3.1.1 Výpočet vlastných frekvencií torzného kmitania

$J_{dyn} := 0.4\ kg \cdot m^2$

$J_2 := 0.01\ kg \cdot m^2$

$J_1 := 0.004\ kg \cdot m^2$

$J_{22} := 0.257298\ kg \cdot m^2$

$J_{11} := 0.01233\ kg \cdot m^2$

$c_6 := 280 \cdot \frac{N \cdot m}{rad}$

$$M_M := \begin{bmatrix} J_{rem\_red} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_{zal\_1\_red} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{zal\_2\_red} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_{zal\_3\_red} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_{zal\_4\_red} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{zotr\_red}+J_1+J_{11} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{22}+J_2+J_{dyn} \end{bmatrix}$$

$$C := \begin{bmatrix} c_1 & -c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c_1 & c_1+c_2 & -c_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c_2 & c_2+c_3 & -c_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_3 & c_3+c_4 & -c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -c_4 & c_4+c_5 & -c_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -c_5 & c_5+c_6 & -c_6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_6 & c_6 \end{bmatrix}$$

$A_1 := {M_M}^{-1} \cdot C$

$\lambda_c := \text{eigenvals}\left(A_1\right)$

$$\lambda_c = \begin{bmatrix} 122938869.10013 \\ 82060248.09901 \\ 42543512.0684 \\ 19682187.36009 \\ 4435886.65784 \\ 744.54154 \\ 0 \end{bmatrix} \frac{1}{s^2}$$

$$\Omega_0 := \sqrt[2]{\lambda_c}$$

$$\Omega_0 = \begin{bmatrix} 11087.78017 \\ 9058.71117 \\ 6522.53877 \\ 4436.46113 \\ 2106.15447 \\ 27.28629 \\ 0.00003 \end{bmatrix} \frac{1}{s}$$

$$f_0 := \frac{\Omega_0}{2 \cdot \pi}$$

$$f_0 = \begin{bmatrix} 1764.67502 \\ 1441.73866 \\ 1038.09429 \\ 706.08472 \\ 335.2049 \\ 4.34275 \\ 0 \end{bmatrix} \frac{1}{s}$$

$$n_0 := f_0$$

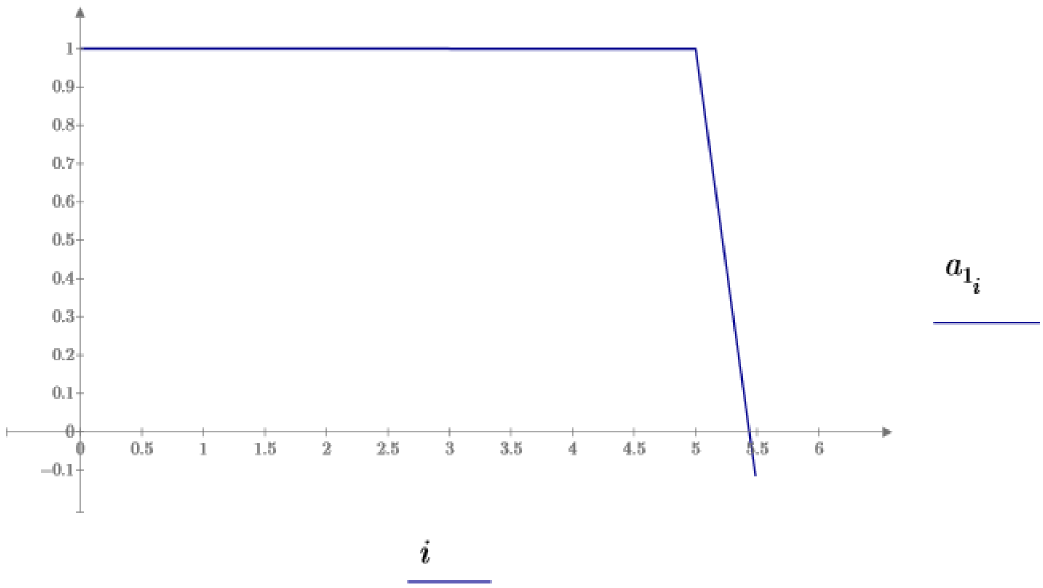
$$n_0 = \begin{bmatrix} 105880.50132 \\ 86504.31966 \\ 62285.65725 \\ 42365.08312 \\ 20112.2937 \\ 260.56486 \\ 0.00026 \end{bmatrix} \frac{1}{min}$$

3.1.2 Výpočet vlastných tvarov torzného kmitania

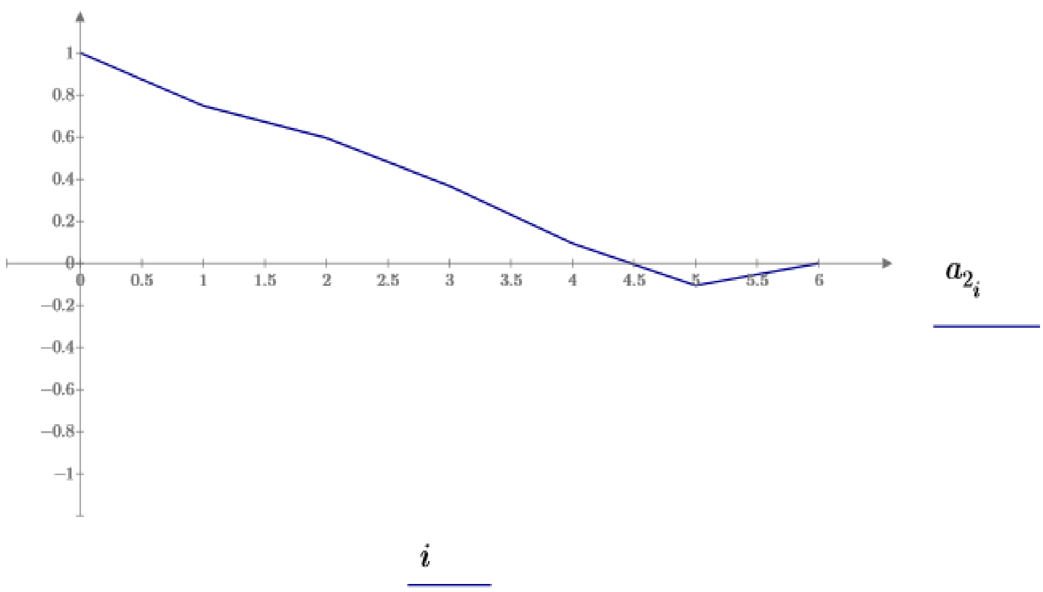
$w := \text{eigenvecs}\left(A_1\right)$

$i := 0..6$

$a_{1_i} := \dfrac{w_{i,5}}{w_{0,5}}$ $\qquad a_{1_i} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.99996 \\ 0.99993 \\ 0.99987 \\ 0.9998 \\ 0.99973 \\ -1.29098 \end{bmatrix}$



$a_{2_i} := \dfrac{w_{i,4}}{w_{0,4}}$ $\qquad a_{2_i} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.74895 \\ 0.59569 \\ 0.3679 \\ 0.09408 \\ -0.10503 \\ 0.00001 \end{bmatrix}$



$$\kappa := 0.5, 1 .. 15 = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 1 \\ \vdots \end{bmatrix}$$

3.2 Vynútené torzné kmitanie jednovalcového motora v spojení s dynamometrom

3.2.1 Kritické otáčky jednovalcového motora v spojení s dynamometrom

$$n_1 := \frac{n_{0_5}}{\kappa} = \begin{bmatrix} 521.12972 \\ 260.56486 \\ 173.70991 \\ 130.28243 \\ 104.22594 \\ 86.85495 \\ 74.4471 \\ 65.14122 \\ 57.9033 \\ 52.11297 \\ 47.37543 \\ 43.42748 \\ 40.0869 \\ 37.22355 \\ 34.74198 \\ 32.57061 \\ 30.65469 \\ 28.95165 \\ 27.42788 \\ 26.05649 \\ 24.8157 \\ 23.68771 \\ 22.65781 \\ 21.71374 \\ 20.84519 \\ 20.04345 \\ 19.3011 \\ 18.61178 \\ 17.96999 \\ 17.37099 \end{bmatrix} \frac{1}{min}$$

$$n_2 := \frac{n_{0_4}}{\kappa} = \begin{bmatrix} 40224.58741 \\ 20112.2937 \\ 13408.1958 \\ 10056.14685 \\ 8044.91748 \\ 6704.0979 \\ 5746.36963 \\ 5028.07343 \\ 4469.3986 \\ 4022.45874 \\ 3656.78067 \\ 3352.04895 \\ 3094.19903 \\ 2873.18481 \\ 2681.63916 \\ 2514.03671 \\ 2366.1522 \\ 2234.6993 \\ 2117.08355 \\ 2011.22937 \\ 1915.45654 \\ 1828.39034 \\ 1748.8951 \\ 1676.02448 \\ 1608.9835 \\ 1547.09952 \\ 1489.79953 \\ 1436.59241 \\ 1387.05474 \\ 1340.81958 \end{bmatrix} \frac{1}{min}$$

3.2.2 Relatívna výdatnosť kmitov

$z := 1$ $\qquad k := 0, 0.5 .. 15 = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \end{bmatrix}$

$$\delta := \frac{720 \cdot deg}{z}$$

$$\psi := \delta \cdot k$$

$$\varepsilon_{1\_1} := \sqrt[2]{\left(\sum_{i=1}^{1} a_{1_i} \cdot \sin\left(\psi_i\right)\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{1} a_{1_i} \cdot \cos\left(\psi_i\right)\right)^2} \qquad \varepsilon_{1\_1} = 0.99996$$

$$\varepsilon_{2\_1} := \sqrt[2]{\left(\sum_{i=1}^{1} a_{2_i} \cdot \sin\left(\psi_i\right)\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{1} a_{2_i} \cdot \cos\left(\psi_i\right)\right)^2} \qquad \varepsilon_{2\_1} = 0.74895$$

$$\varepsilon_1 := \begin{bmatrix} \varepsilon_{1\_1} \\ \varepsilon_{1\_1} \\ \varepsilon_{1\_1} \\ \vdots \end{bmatrix} \qquad \varepsilon_2 := \begin{bmatrix} \varepsilon_{2\_1} \\ \varepsilon_{2\_1} \\ \varepsilon_{2\_1} \\ \vdots \end{bmatrix}$$

$$\xi := 2.18 \cdot \frac{N \cdot m \cdot s}{rad}$$

$$I_{spoj} := J_1 + J_2$$

$$\Omega_{spoj} := \Omega_{0_4}$$

$$\gamma := 0.2$$

$$\xi_{spoj} := 2 \cdot I_{spoj} \cdot \Omega_{spoj} \cdot \gamma$$

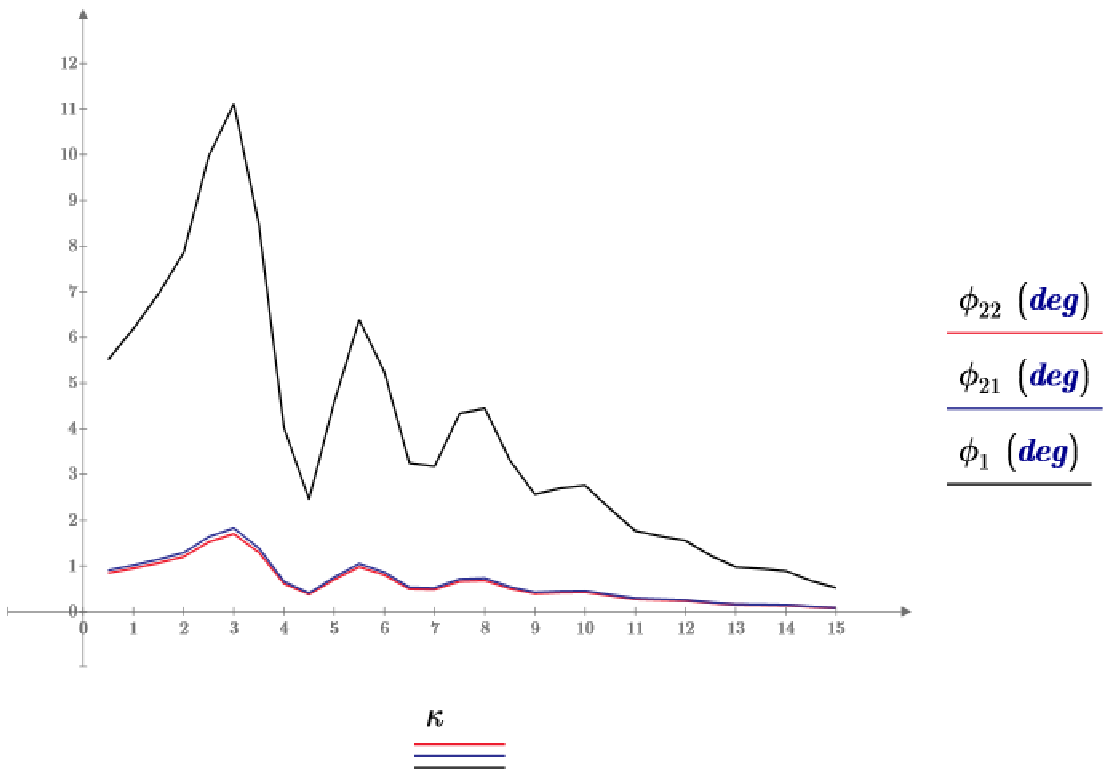
3.2.3 Výchylky voľného konca kľukového hriadeľa

$l := 0..30$

$$\phi_{1_l} := \frac{M_l \cdot \varepsilon_{1_l}}{\Omega_{0_5} \cdot \left(\xi \cdot \sum_{i=0}^{6} \left(a_{1_i}\right)^2 + \xi_{spoj} \cdot \left(a_{1_5} - a_{1_6}\right)^2 \right)} \qquad \phi_{1_l} = \begin{bmatrix} 5.51437 \\ 6.19215 \\ 6.95463 \\ \vdots \end{bmatrix} \boldsymbol{deg}$$

$$\phi_{21_l} := \frac{M_l \cdot \varepsilon_{2_l}}{\Omega_{0_4} \cdot \left(\xi \cdot \sum_{i=0}^{6} \left(a_{2_i}\right)^2 + \xi_{spoj} \cdot \left(a_{2_5} - a_{2_6}\right)^2 \right)} \qquad \phi_{21_l} = \begin{bmatrix} 0.90545 \\ 1.01674 \\ 1.14194 \\ \vdots \end{bmatrix} \boldsymbol{deg}$$

$$\phi_{22_l} := \frac{M_l \cdot \varepsilon_{2_l}}{\Omega_{0_4} \cdot \left(\xi \cdot \sum_{i=0}^{6} \left(a_{2_i}\right)^2 + \xi_{spoj} \cdot \left(a_{2_4} - a_{2_5}\right)^2 \right)} \qquad \phi_{22_l} = \begin{bmatrix} 0.84413 \\ 0.94788 \\ 1.0646 \\ \vdots \end{bmatrix} \boldsymbol{deg}$$



4 Overenie spojenia jednovalcového motora s dynamometrom

4.1 Kontrola skrutkových spojov

4.1.1 Vstupné parametre

$i_s := 6$

$D_{r1} := 130\ mm$

$D_{r2} := 240\ mm$

$M_{kmax} := 162\ N \cdot m$

$k_n := 2$

$f := 0.2$

$d := 12\ mm$

$l_{z1} := 10\ mm$

$l_{z2} := 30\ mm$

$P := 1.75\ mm$

$A_S := 84.3\ mm^2$

$\alpha := 60\ deg$

$s := 18\ mm$

$d_h := 13.5\ mm$

$R_{p0.2} := 640\ MPa$

$p_d := 150\ MPa$

4.1.2 Kontrola skrutkových spojov na strane motora

$$F := \frac{2 \cdot M_{kmax}}{D_{r1} \cdot i_s} \qquad F = 415.38462\ N$$

$$F_i := \frac{k_n \cdot F}{f} \qquad F_i = 4153.84615\ N$$

$$H := 0.5 \cdot \sqrt[2]{3} \cdot P \qquad H = 1.51554\ mm$$

$$d_2 := d - \frac{3}{4} \cdot H \qquad d_2 = 10.86334\ mm$$

$$d_3 := d - \frac{17}{12} \cdot H \qquad d_3 = 9.85298\ mm$$

$$d_O := \frac{s + d_h}{2} \qquad d_O = 15.75\ mm$$

$$M_Z := \frac{F_i \cdot d_2}{2} \cdot \left(\frac{P + \pi \cdot f \cdot d_2 \cdot sec\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\pi \cdot d_2 - f \cdot P \cdot sec\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right) \qquad M_Z = 6443.78693\ N \cdot mm$$

$$M_O := \frac{F_i \cdot f \cdot d_O}{2} \qquad M_O = 6542.30769\ N \cdot mm$$

$M_U := M_Z + M_O$ $\quad$ $M_U = 12986.09462\ N \cdot mm$

$\sigma_i := \dfrac{F_i}{A_S}$ $\quad$ $\sigma_i = 49.27457\ MPa$

$\tau := \dfrac{16 \cdot M_Z}{\pi \cdot d_3^{\ 3}}$ $\quad$ $\tau = 34.30905\ MPa$

$\sigma_{red} := \sqrt{\sigma_i^{\ 2} + 3 \cdot \tau^2}$ $\quad$ $\sigma_{red} = 77.1966\ MPa$

$k_{k1} := \dfrac{R_{p0.2}}{\sigma_{red}}$ $\quad$ $k_{k1} = 8.29052$

$D_1 := d - \dfrac{10}{8} \cdot H$ $\quad$ $D_1 = 10.10557\ mm$

$n_z := \dfrac{l_{z1}}{P}$ $\quad$ $n_z = 5.71429$

$n_z := 5$

$p_1 := \dfrac{F_i}{n_z \cdot \dfrac{\pi}{4} \cdot \left(d^2 - D_1^{\ 2}\right)}$ $\quad$ $p_1 = 25.25865\ MPa$

$p_1 < p_d = 1$

4.1.2 Kontrola skrutkových spojov na strane dynamomtra

$F := \dfrac{2 \cdot M_{kmax}}{D_{r2} \cdot i_s}$ $\quad$ $F = 225\ N$

$F_i := \dfrac{k_n \cdot F}{f}$ $\quad$ $F_i = 2250\ N$

$H := 0.5 \cdot \sqrt[2]{3} \cdot P$ $\quad$ $H = 1.51554\ mm$

$d_2 := d - \dfrac{3}{4} \cdot H$ $\quad$ $d_2 = 10.86334\ mm$

$d_3 := d - \dfrac{17}{12} \cdot H$ $\quad$ $d_3 = 9.85298\ mm$

$d_O := \dfrac{s + d_h}{2}$ $\quad$ $d_O = 15.75\ mm$

$$M_Z := \frac{F_i \cdot d_2}{2} \cdot \left(\frac{P + \pi \cdot f \cdot d_2 \cdot sec\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\pi \cdot d_2 - f \cdot P \cdot sec\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right) \qquad M_Z = 3490.38459 \ \mathbf{N \cdot mm}$$

$$M_O := \frac{F_i \cdot f \cdot d_O}{2} \qquad M_O = 3543.75 \ \mathbf{N \cdot mm}$$

$$M_U := M_Z + M_O \qquad M_U = 7034.13459 \ \mathbf{N \cdot mm}$$

$$\sigma_i := \frac{F_i}{A_S} \qquad \sigma_i = 26.69039 \ \mathbf{MPa}$$

$$\tau := \frac{16 \cdot M_Z}{\pi \cdot {d_3}^3} \qquad \tau = 18.58407 \ \mathbf{MPa}$$

$$\sigma_{red} := \sqrt{{\sigma_i}^2 + 3 \cdot \tau^2} \qquad \sigma_{red} = 41.81483 \ \mathbf{MPa}$$

$$k_{k2} := \frac{R_{p0.2}}{\sigma_{red}} \qquad k_{k2} = 15.30558$$

$$D_1 := d - \frac{10}{8} \cdot H \qquad D_1 = 10.10557 \ \mathbf{mm}$$

$$n_z := \frac{l_{z2}}{P} \qquad n_z = 17.14286$$

$$n_z := 17$$

$$p_2 := \frac{F_i}{n_z \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left(d^2 - {D_1}^2\right)} \qquad p_2 = 4.02405 \ \mathbf{MPa}$$

$$p_2 < p_d = 1$$

4.2 Kontrola pružnej spojky

4.2.1 Vstupné parametre

$S_t := 1.25$

$S_B := 1.1$

$f_x := 35$

$T_{KN} := 250 \cdot \mathbf{N} \cdot \mathbf{m}$

$T_{KW} := 80 \cdot \mathbf{N} \cdot \mathbf{m}$

$M_{kspojmax} := 162 \cdot \mathbf{N} \cdot \mathbf{m}$

4.2.2 Kontrola prekročenia limitnú hodnotu krútiaceho momentu

$T_{AN} := M_{kspojmax} \cdot S_t \cdot S_B$ $\quad$ $T_{AN} = 222.75\ \mathbf{N} \cdot \mathbf{m}$

$T_{KN} \geq T_{AN} = 1$

4.2.3 Kontrola pružnej spojky z hľadiska únavy

$M_{kamax} := 40 \cdot \mathbf{N} \cdot \mathbf{m}$

$f_x := \frac{1100}{60}$

$S_f := \sqrt[2]{\frac{f_x}{10}}$ $\quad$ $S_f = 1.35401$

$T_W := M_{kamax} \cdot S_f \cdot S_t$ $\quad$ $T_W = 67.70032\ \mathbf{N} \cdot \mathbf{m}$

$T_{KW} \geq T_W = 1$