

# Příloha

## Obsah

|  |    |
|--|----|
| 1. Stanovení hlavních rozměrů motoru.....    | 1  |
| 2. Kinematika klikového mechanismu .....     | 2  |
| 3. Diagramy $p - \alpha$ a $p - V$ .....     | 9  |
| 4. Síly a momenty v klikovém mechanismu..... | 12 |
| 5. Vyvažování motoru .....                   | 25 |
| 6. Torzní kmitání klikového hřídele .....    | 29 |

# 1. Stanovení hlavních rozměrů motoru

|   |  |
|---|--|
| <b>Základní parametry motoru:</b>           | $\text{MPa} \equiv 10^6 \cdot \text{Pa}$ |
| výkon motoru:                               | $P_e := 110 \text{ kW}$                  |
| počtu válců:                                | $i_v := 5$                               |
| jmenovité otáčky:                           | $n_0 := 2200 \text{ min}^{-1}$           |
| taktnost motoru:                            | $\tau := 0.5$                            |
| zdvih válce:                                | $z := 120 \text{ mm}$                    |
| vrtání válce:                               | $D := 105 \text{ mm}$                    |
| zdvihový objem celého motoru:               | $V_Z := 5195 \text{ cm}^3$               |
| kompresní poměr:                            | $\varepsilon := 17$                      |
| hmotnost pístní skupiny:                    | $m_{\text{pist}} := 2.054 \text{ kg}$    |
| redukovaná hmotnost posuvných částí ojnice: | $m_1 := 0.907 \text{ kg}$                |
| redukovaná hmotnost rotačních částí ojnice: | $m_2 := 1.645 \text{ kg}$                |
| redukovaná hmotnost v těžišti ojnice:       | $m_3 := 0 \text{ kg}$                    |
| maximální otáčky:                           | $n := 2500 \text{ min}^{-1}$             |
| délka ojnice:                               | $l := 215 \text{ mm}$                    |
| rozteč klikových čepů:                      | $h := 0.136 \text{ m}$                   |

Stanovení hlavních veličin motoru

|                               |                          |   |
|-------------------------------|--------------------------|---|
| zdvihový objem jednoho válce: | $V_h := \frac{V_Z}{i_v}$ | $V_h = 1.039 \times 10^3 \cdot \text{cm}^3$ |
|-------------------------------|--------------------------|---|

|                           |   |   |
|---------------------------|---|---|
| střední efektivní tlak:   | $p_e := \frac{P_e}{V_h \cdot n_0 \cdot i_v \cdot \tau}$ | $p_e = 1.155 \text{ MPa}$                     |
| litrový výkon:            | $P_l := \frac{P_e}{V_h \cdot i_v}$                      | $P_l = 21.174 \text{ kW} \cdot \text{L}^{-1}$ |
| střední pístová rychlost: | $c_s := 2 \cdot z \cdot n_0$                            | $c_s = 8.8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$         |
| poloměr zalomení kliky:   | $r_k := \frac{z}{2}$                                    | $r_k = 0.06 \text{ m}$                        |
| ojniční poměr:            | $\lambda := \frac{r_k}{l}$                              | $\lambda = 0.279$                             |
| zdvihový poměr:           | $k_z := \frac{z}{D}$                                    | $k_z = 1.143$                                 |

## 2. Kinematika klikového mechanismu

### Dráha pístu

$$i := 0, 1..360$$

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

$$s(\alpha) := r_k \cdot \left[ 1 - \cos(\alpha) + \frac{\lambda \cdot (1 - \cos(2\alpha))}{4} \right]$$

Rozdělení vztahu pro dráhu pístu 1. a 2. harmonickou složku  $s_1()$ ;  $s_2()$  o amplitudách  $S_1$  a  $S_2$

$$s_1(\alpha) := r_k \cdot (1 - \cos(\alpha))$$

$$S_1 := r_k$$

$$s_2(\alpha) := r_k \cdot \frac{\lambda \cdot (1 - \cos(2\alpha))}{4}$$

$$S_2 := r_k \cdot \frac{\lambda}{4}$$

### Rychlost pístu

Při výpočtu rychlosti pístu je potřeba znát úhlové rychlosti klikového hřídele. Derivaci dráhy pístu a úpravou dostaneme:

$$\omega := 2 \cdot \pi \cdot n \quad \omega = 261.799 \frac{1}{s}$$

$$v(\alpha) := r_k \cdot \omega \cdot \left( \sin(\alpha) + \frac{\lambda \cdot \sin(2 \cdot \alpha)}{2} \right)$$

Vztah pro rychlost pístu 1. a 2. harmonické složky  $v_1()$  a  $v_2()$

$$v_1(\alpha) := r_k \cdot \omega \cdot \sin(\alpha) \quad V_1 := r_k \cdot \omega$$

$$v_2(\alpha) := r_k \cdot \omega \cdot \frac{\lambda \cdot \sin(2 \cdot \alpha)}{2} \quad V_2 := r_k \cdot \omega \cdot \frac{\lambda}{2}$$

### Zrychlení pístu

Derivaci rychlosti pístu podle času dostaneme vztah pro zrychlení:

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

Vztah pro zrychlení pístu 1. a 2. harmonické složky:

$$a_1(\alpha) := r_k \cdot \omega^2 \cdot \cos(\alpha) \quad A_1 := r_k \cdot \omega^2$$

$$a_2(\alpha) := r_k \cdot \omega^2 \cdot \lambda \cdot \cos(2\alpha) \quad A_2 := \lambda \cdot r_k \cdot \omega^2$$

### **Amplitudy jednotlivých harmonických složek:**

$$S_1 = 60 \text{ mm}$$

$$S_2 = 4.186 \text{ mm}$$

$$V_1 = 15.708 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$V_2 = 2.192 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$A_1 = 4112 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$A_2 = 1148 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

**Tabulkový výpis výsledných hodnot:**

|    | 0      |
|----|--------|
| 0  | 0      |
| 1  | 0.012  |
| 2  | 0.047  |
| 3  | 0.105  |
| 4  | 0.187  |
| 5  | 0.292  |
| 6  | 0.42   |
| 7  | 0.572  |
| 8  | 0.746  |
| 9  | 0.944  |
| 10 | 1.164  |
| 11 | 1.407  |
| 12 | 1.673  |
| 13 | 1.961  |
| 14 | 2.272  |
| 15 | 2.605  |
| 16 | 2.96   |
| 17 | 3.337  |
| 18 | 3.736  |
| 19 | 4.156  |
| 20 | 4.598  |
| 21 | 5.06   |
| 22 | 5.544  |
| 23 | 6.048  |
| 24 | 6.572  |
| 25 | 7.117  |
| 26 | 7.681  |
| 27 | 8.265  |
| 28 | 8.868  |
| 29 | 9.491  |
| 30 | 10.131 |
| 31 | ...    |

$\frac{s(\alpha_i)}{\text{mm}} =$

|    | 0                     |
|----|-----------------------|
| 0  | 0                     |
| 1  | $9.138 \cdot 10^{-3}$ |
| 2  | 0.037                 |
| 3  | 0.082                 |
| 4  | 0.146                 |
| 5  | 0.228                 |
| 6  | 0.329                 |
| 7  | 0.447                 |
| 8  | 0.584                 |
| 9  | 0.739                 |
| 10 | 0.912                 |
| 11 | 1.102                 |
| 12 | 1.311                 |
| 13 | 1.538                 |
| 14 | 1.782                 |
| 15 | 2.044                 |
| 16 | 2.324                 |
| 17 | 2.622                 |
| 18 | 2.937                 |
| 19 | 3.269                 |
| 20 | 3.618                 |
| 21 | 3.985                 |
| 22 | 4.369                 |
| 23 | 4.77                  |
| 24 | 5.187                 |
| 25 | 5.622                 |
| 26 | 6.072                 |
| 27 | 6.54                  |
| 28 | 7.023                 |
| 29 | 7.523                 |
| 30 | 8.038                 |
| 31 | ...                   |

$\frac{s_1(\alpha)}{\text{mm}} =$

|    | 0                    |
|----|----------------------|
| 0  | 0                    |
| 1  | $2.55 \cdot 10^{-3}$ |
| 2  | 0.01                 |
| 3  | 0.023                |
| 4  | 0.041                |
| 5  | 0.064                |
| 6  | 0.091                |
| 7  | 0.124                |
| 8  | 0.162                |
| 9  | 0.205                |
| 10 | 0.252                |
| 11 | 0.305                |
| 12 | 0.362                |
| 13 | 0.424                |
| 14 | 0.49                 |
| 15 | 0.561                |
| 16 | 0.636                |
| 17 | 0.716                |
| 18 | 0.799                |
| 19 | 0.887                |
| 20 | 0.979                |
| 21 | 1.075                |
| 22 | 1.175                |
| 23 | 1.278                |
| 24 | 1.385                |
| 25 | 1.495                |
| 26 | 1.609                |
| 27 | 1.726                |
| 28 | 1.845                |
| 29 | 1.968                |
| 30 | 2.093                |
| 31 | ...                  |

$\frac{s_2(\alpha_i)}{\text{mm}} =$

|    | 0      |
|----|--------|
| 0  | 0      |
| 1  | 0.351  |
| 2  | 0.701  |
| 3  | 1.051  |
| 4  | 1.401  |
| 5  | 1.75   |
| 6  | 2.098  |
| 7  | 2.445  |
| 8  | 2.79   |
| 9  | 3.135  |
| 10 | 3.477  |
| 11 | 3.818  |
| 12 | 4.157  |
| 13 | 4.494  |
| 14 | 4.829  |
| 15 | 5.161  |
| 16 | 5.491  |
| 17 | 5.818  |
| 18 | 6.142  |
| 19 | 6.463  |
| 20 | 6.781  |
| 21 | 7.096  |
| 22 | 7.407  |
| 23 | 7.714  |
| 24 | 8.018  |
| 25 | 8.317  |
| 26 | 8.613  |
| 27 | 8.904  |
| 28 | 9.192  |
| 29 | 9.474  |
| 30 | 9.752  |
| 31 | 10.025 |
| 32 | 10.294 |
| 33 | 10.557 |
| 34 | 10.816 |
| 35 | 11.069 |
| 36 | ...    |

$$\frac{v(\alpha_i)}{\text{m}\cdot\text{sec}^{-1}} =$$

|    | 0     |
|----|-------|
| 0  | 0     |
| 1  | 0.274 |
| 2  | 0.548 |
| 3  | 0.822 |
| 4  | 1.096 |
| 5  | 1.369 |
| 6  | 1.642 |
| 7  | 1.914 |
| 8  | 2.186 |
| 9  | 2.457 |
| 10 | 2.728 |
| 11 | 2.997 |
| 12 | 3.266 |
| 13 | 3.534 |
| 14 | 3.8   |
| 15 | 4.066 |
| 16 | 4.33  |
| 17 | 4.593 |
| 18 | 4.854 |
| 19 | 5.114 |
| 20 | 5.372 |
| 21 | 5.629 |
| 22 | 5.884 |
| 23 | 6.138 |
| 24 | 6.389 |
| 25 | 6.638 |
| 26 | 6.886 |
| 27 | 7.131 |
| 28 | 7.374 |
| 29 | 7.615 |
| 30 | 7.854 |
| 31 | 8.09  |
| 32 | 8.324 |
| 33 | 8.555 |
| 34 | 8.784 |
| 35 | 9.01  |
| 36 | ...   |

$$\frac{v_1(\alpha_i)}{\text{m}\cdot\text{sec}^{-1}} =$$

|    | 0     |
|----|-------|
| 0  | 0     |
| 1  | 0.076 |
| 2  | 0.153 |
| 3  | 0.229 |
| 4  | 0.305 |
| 5  | 0.381 |
| 6  | 0.456 |
| 7  | 0.53  |
| 8  | 0.604 |
| 9  | 0.677 |
| 10 | 0.75  |
| 11 | 0.821 |
| 12 | 0.891 |
| 13 | 0.961 |
| 14 | 1.029 |
| 15 | 1.096 |
| 16 | 1.161 |
| 17 | 1.226 |
| 18 | 1.288 |
| 19 | 1.349 |
| 20 | 1.409 |
| 21 | 1.467 |
| 22 | 1.523 |
| 23 | 1.577 |
| 24 | 1.629 |
| 25 | 1.679 |
| 26 | 1.727 |
| 27 | 1.773 |
| 28 | 1.817 |
| 29 | 1.859 |
| 30 | 1.898 |
| 31 | 1.935 |
| 32 | 1.97  |
| 33 | 2.002 |
| 34 | 2.032 |
| 35 | 2.06  |
| 36 | ...   |

$$\frac{v_2(\alpha_i)}{\text{m}\cdot\text{sec}^{-1}} =$$

$$\frac{a(\alpha_i)}{\text{m}\cdot\text{sec}^{-2}} =$$

|    | 0        |
|----|----------|
| 0  | 5259.964 |
| 1  | 5258.638 |
| 2  | 5254.663 |
| 3  | 5248.041 |
| 4  | 5238.778 |
| 5  | 5226.88  |
| 6  | 5212.357 |
| 7  | 5195.221 |
| 8  | 5175.485 |
| 9  | 5153.165 |
| 10 | 5128.278 |
| 11 | 5100.843 |
| 12 | 5070.882 |
| 13 | 5038.418 |
| 14 | 5003.477 |
| 15 | 4966.086 |
| 16 | 4926.274 |
| 17 | 4884.073 |
| 18 | 4839.514 |
| 19 | 4792.633 |
| 20 | 4743.465 |
| 21 | 4692.05  |
| 22 | 4638.426 |
| 23 | 4582.634 |
| 24 | 4524.718 |
| 25 | 4464.723 |
| 26 | 4402.693 |
| 27 | 4338.677 |
| 28 | 4272.722 |
| 29 | 4204.88  |
| 30 | 4135.201 |
| 31 | 4063.738 |
| 32 | 3990.545 |
| 33 | 3915.677 |
| 34 | 3839.19  |
| 35 | 3761.14  |
| 36 | ...      |

$$\frac{a_1(\alpha_i)}{\text{m}\cdot\text{sec}^{-2}} =$$

|    | 0        |
|----|----------|
| 0  | 4112.335 |
| 1  | 4111.709 |
| 2  | 4109.83  |
| 3  | 4106.699 |
| 4  | 4102.318 |
| 5  | 4096.686 |
| 6  | 4089.807 |
| 7  | 4081.682 |
| 8  | 4072.314 |
| 9  | 4061.705 |
| 10 | 4049.86  |
| 11 | 4036.78  |
| 12 | 4022.471 |
| 13 | 4006.936 |
| 14 | 3990.181 |
| 15 | 3972.211 |
| 16 | 3953.03  |
| 17 | 3932.646 |
| 18 | 3911.063 |
| 19 | 3888.289 |
| 20 | 3864.331 |
| 21 | 3839.196 |
| 22 | 3812.891 |
| 23 | 3785.424 |
| 24 | 3756.805 |
| 25 | 3727.041 |
| 26 | 3696.142 |
| 27 | 3664.117 |
| 28 | 3630.976 |
| 29 | 3596.729 |
| 30 | 3561.387 |
| 31 | 3524.959 |
| 32 | 3487.458 |
| 33 | 3448.894 |
| 34 | 3409.28  |
| 35 | 3368.628 |
| 36 | ...      |

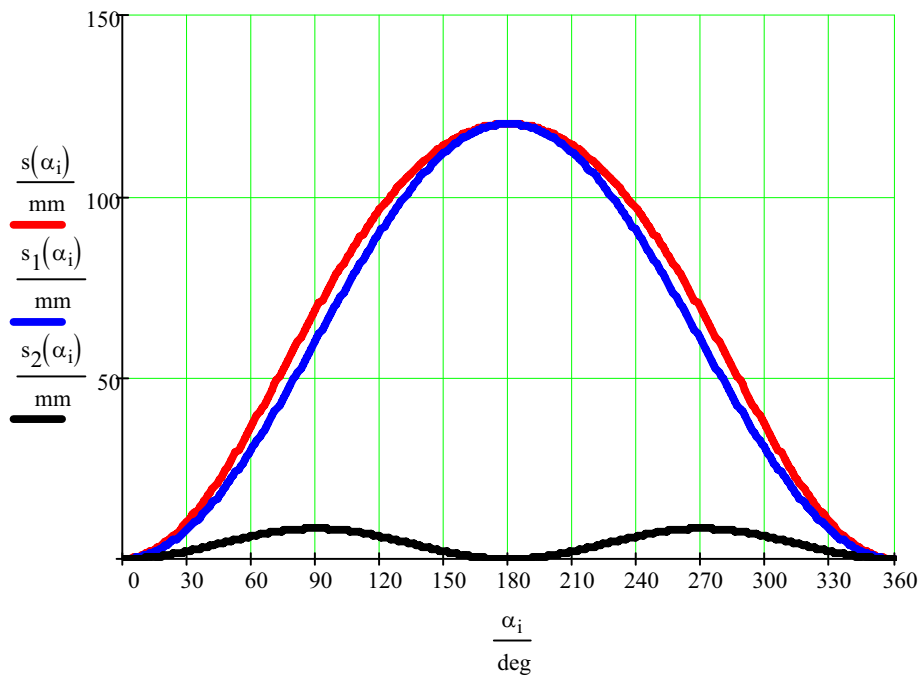
$$\frac{a_2(\alpha_i)}{\text{m}\cdot\text{sec}^{-2}} =$$

|    | 0        |
|----|----------|
| 0  | 1147.628 |
| 1  | 1146.929 |
| 2  | 1144.833 |
| 3  | 1141.342 |
| 4  | 1136.46  |
| 5  | 1130.193 |
| 6  | 1122.55  |
| 7  | 1113.539 |
| 8  | 1103.171 |
| 9  | 1091.459 |
| 10 | 1078.418 |
| 11 | 1064.063 |
| 12 | 1048.411 |
| 13 | 1031.482 |
| 14 | 1013.296 |
| 15 | 993.875  |
| 16 | 973.244  |
| 17 | 951.427  |
| 18 | 928.451  |
| 19 | 904.344  |
| 20 | 879.134  |
| 21 | 852.854  |
| 22 | 825.535  |
| 23 | 797.21   |
| 24 | 767.913  |
| 25 | 737.681  |
| 26 | 706.551  |
| 27 | 674.559  |
| 28 | 641.746  |
| 29 | 608.15   |
| 30 | 573.814  |
| 31 | 538.779  |
| 32 | 503.087  |
| 33 | 466.783  |
| 34 | 429.909  |
| 35 | 392.512  |
| 36 | ...      |

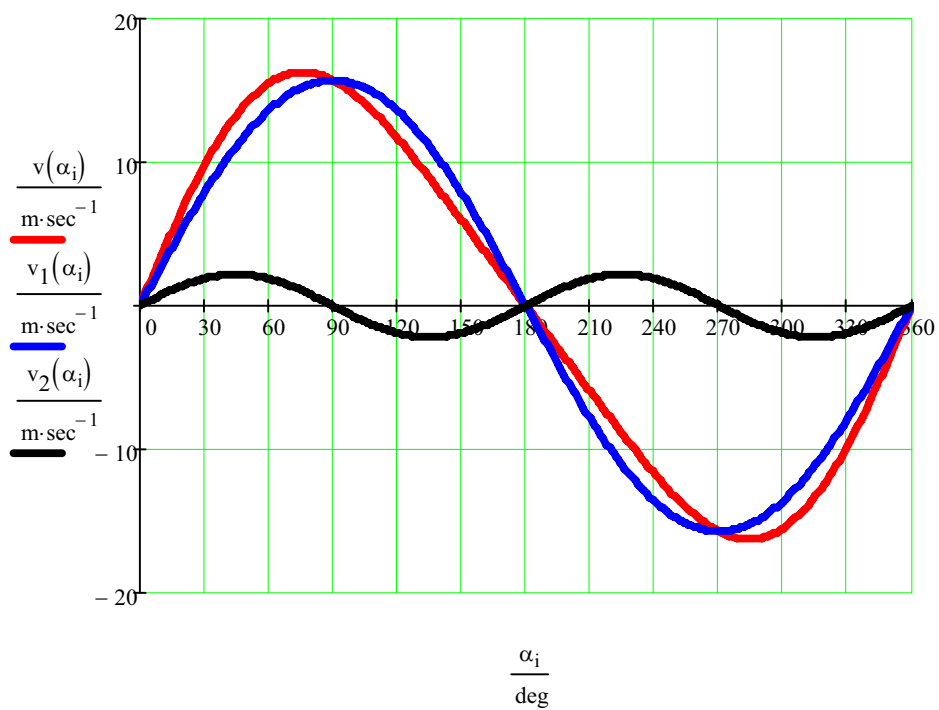


**Grafické zobrazení průběhu veličin:**

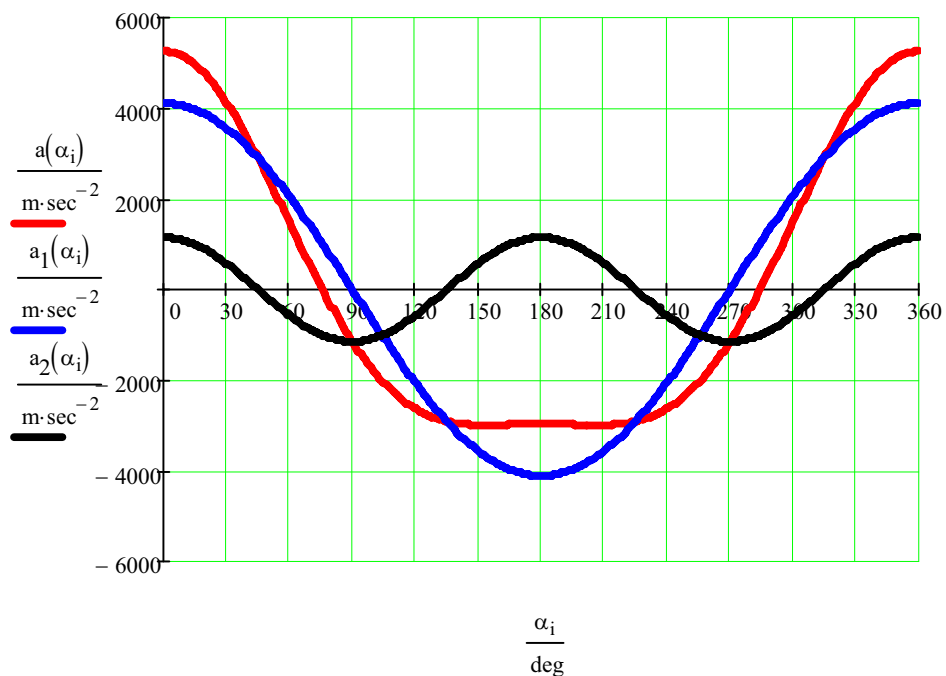
Dráha:



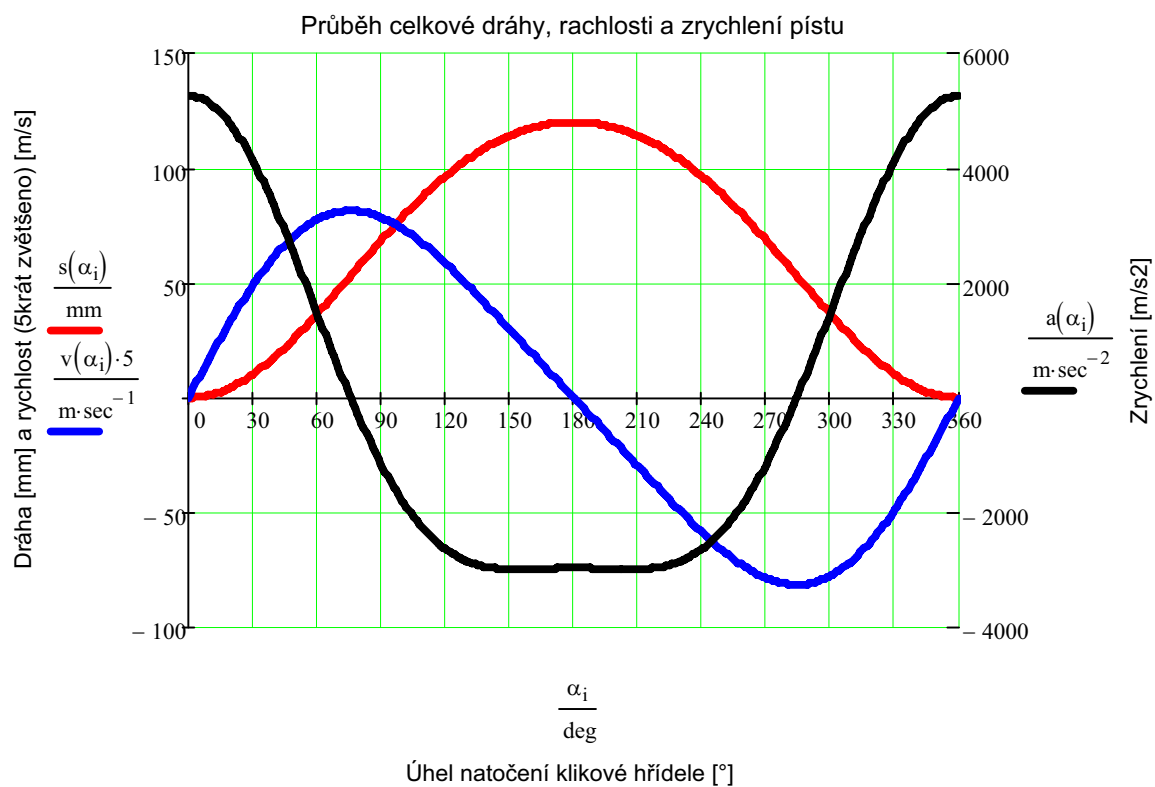
Rychlost:



Zrychlení:



Zobrazení veličin ve společném grafu:



### 3) Diagramy p-alfa a p-V

Zobrazení p- diagramu válcové jednotky:

tlak := READPRN("p-alfa2200.dat")·MPa

i := 0, 1.. 718

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

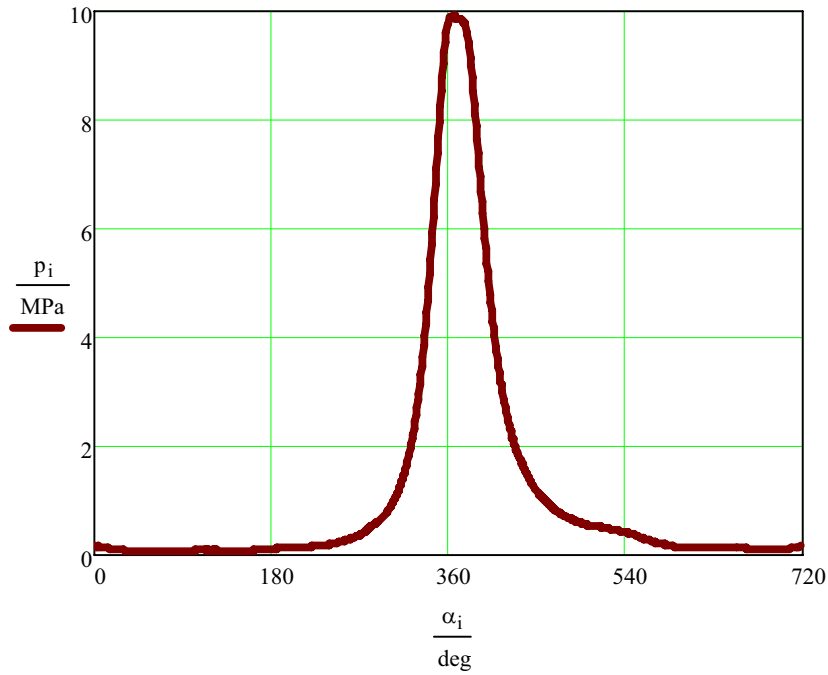
$p_{\text{atm}} := \text{tlak}_1$        $p_{\text{atm}} = 0.161 \cdot \text{MPa}$

$p_i := \text{tlak}_{i+1}$

|        | 0                  |    |
|--------|--------------------|----|
|        | $1.364 \cdot 10^5$ |    |
|        | $1.608 \cdot 10^5$ |    |
|        | $1.364 \cdot 10^5$ |    |
|        | $1.582 \cdot 10^5$ |    |
|        | $1.364 \cdot 10^5$ |    |
|        | $1.608 \cdot 10^5$ |    |
|        | $1.486 \cdot 10^5$ |    |
|        | $1.486 \cdot 10^5$ |    |
|        | $1.486 \cdot 10^5$ |    |
|        | $1.486 \cdot 10^5$ |    |
|        | $1.364 \cdot 10^5$ |    |
|        | $1.364 \cdot 10^5$ |    |
| tlak = | $1.364 \cdot 10^5$ | Pa |
|        | $1.364 \cdot 10^5$ |    |
|        | $1.364 \cdot 10^5$ |    |
|        | $1.364 \cdot 10^5$ |    |
|        | $1.364 \cdot 10^5$ |    |
|        | $1.364 \cdot 10^5$ |    |
|        | $1.242 \cdot 10^5$ |    |
|        | $1.242 \cdot 10^5$ |    |
|        | $1.242 \cdot 10^5$ |    |
|        | $1.242 \cdot 10^5$ |    |
|        | $1.242 \cdot 10^5$ |    |
|        | $1.242 \cdot 10^5$ |    |
|        | $1.242 \cdot 10^5$ |    |
|        | $1.242 \cdot 10^5$ |    |
|        | ...                |    |

| $p_i =$ |                       |
|---------|-----------------------|
|         | $1.608 \cdot 10^5$ Pa |
|         | $1.364 \cdot 10^5$    |
|         | $1.582 \cdot 10^5$    |
|         | $1.364 \cdot 10^5$    |
|         | $1.608 \cdot 10^5$    |
|         | $1.486 \cdot 10^5$    |
|         | $1.486 \cdot 10^5$    |
|         | $1.486 \cdot 10^5$    |
|         | $1.364 \cdot 10^5$    |
|         | $1.364 \cdot 10^5$    |
|         | $1.364 \cdot 10^5$    |
|         | $1.364 \cdot 10^5$    |
|         | $1.364 \cdot 10^5$    |
|         | $1.242 \cdot 10^5$    |
|         | $1.242 \cdot 10^5$    |
|         | $1.242 \cdot 10^5$    |
|         | $1.242 \cdot 10^5$    |
|         | $1.242 \cdot 10^5$    |
|         | $1.242 \cdot 10^5$    |
|         | $1.242 \cdot 10^5$    |
|         | ...                   |

p-α diagram:



**Zobrazení p - V diagramu válcové jednotky:**

$$S := \pi \cdot \frac{D^2}{4}$$

$$V(\alpha) := r_k \cdot \left[ 1 - \cos(\alpha) + \frac{\lambda \cdot (1 - \cos(2\alpha))}{4} \right] \cdot \left( \pi \cdot \frac{D^2}{4} \right)$$

$$V_s := S \cdot 2 \cdot r_k$$

$$V_z = 1.039 \times 10^3 \cdot \text{cm}^3$$

$$V_k := \frac{V_z}{\varepsilon - 1}$$

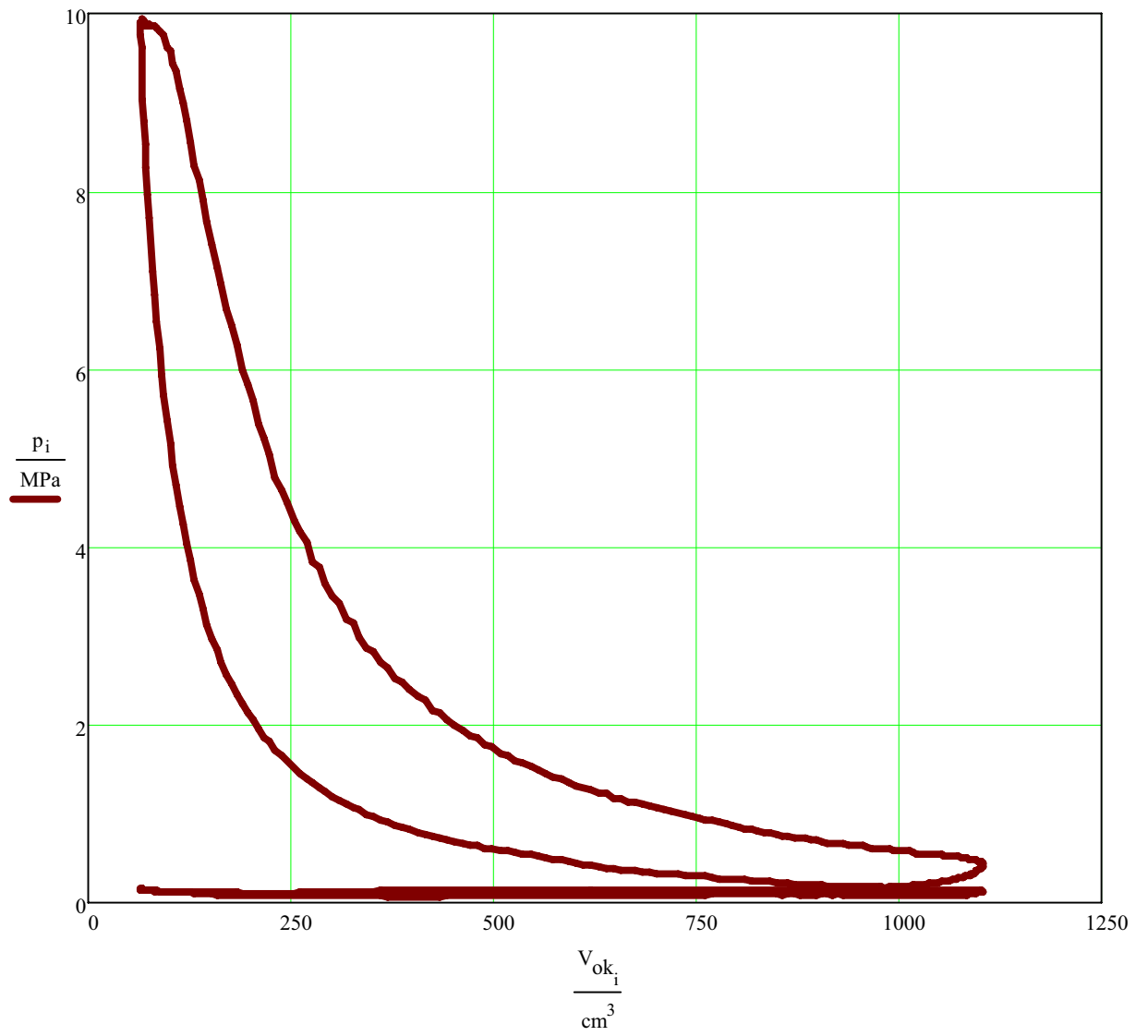
$$V_k = 64.943 \text{ cm}^3$$

$$V_{ok} := V(\alpha) + V_k$$

$$V(\alpha_i) = \quad \cdot \text{cm}^3$$

|    | 0      |
|----|--------|
| 0  | 0      |
| 1  | 0.101  |
| 2  | 0.405  |
| 3  | 0.911  |
| 4  | 1.618  |
| 5  | 2.528  |
| 6  | 3.638  |
| 7  | 4.949  |
| 8  | 6.46   |
| 9  | 8.17   |
| 10 | 10.079 |
| 11 | 12.185 |
| 12 | 14.487 |
| 13 | 16.984 |
| 14 | 19.675 |
| 15 | ...    |

p-V diagram:



## 4) Síly a momenty v klikovém mechanismu

### Určení sil přenášených pístním čepem:

#### Síly ve směru osy válce

- působí zde síla od tlaku plynů (primární síla), síla sekundární a jejich součtem dostaneme sílu celkovou

$$F_{p_i} := (p_i - p_{atm}) \cdot S$$

$$S = 8.659 \times 10^{-3} \cdot m^2$$

$$p_{atm} = 1.608 \times 10^5 \text{ Pa}$$

#### výpočet sekundárních sil:

$$F_s := -(m_{pist} + m_l) \cdot a(\alpha)$$

setrvačná síla I. řádu:

$$F_{s1_i} := -(m_{pist} + m_l) \cdot r_k \cdot \omega^2 \cdot \cos(\alpha_i)$$

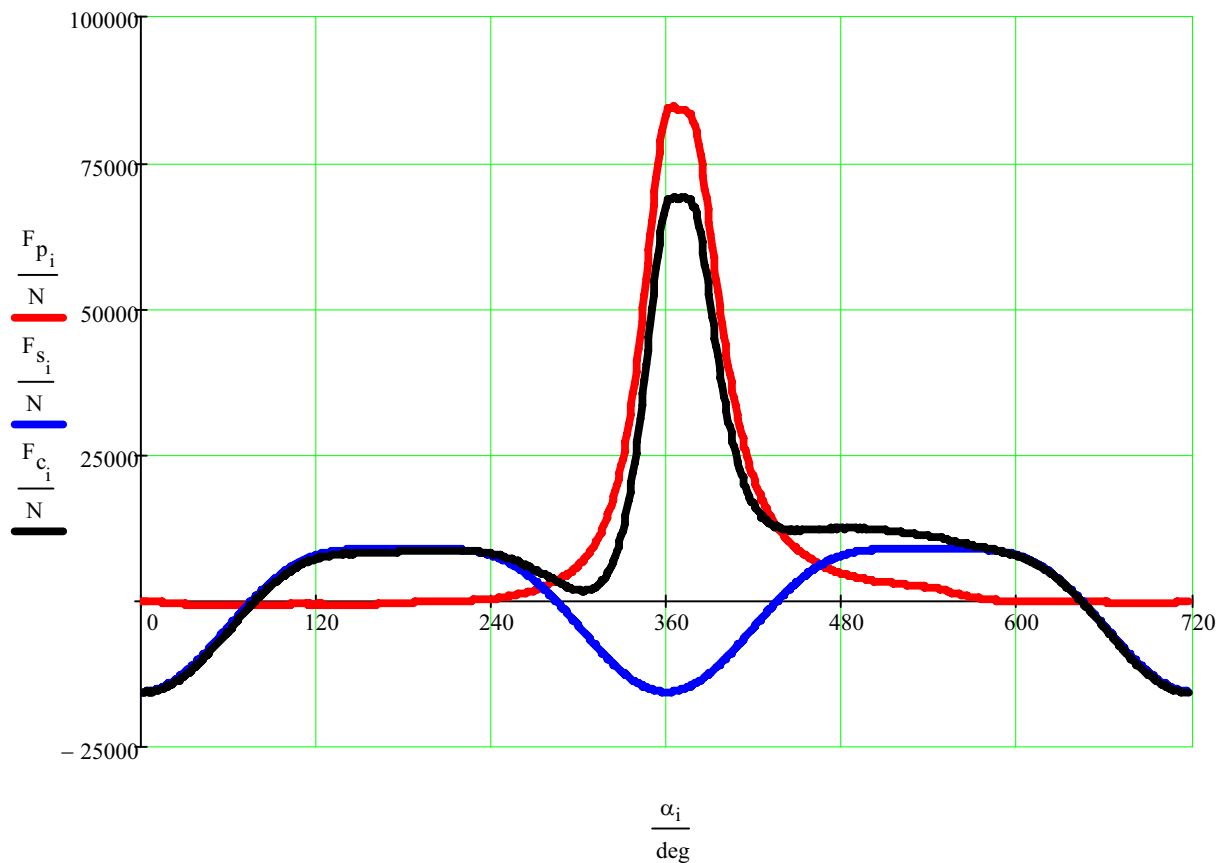
setrvačná síla II. řádu:

$$F_{s2_i} := -\lambda \cdot (m_{pist} + m_l) \cdot r_k \cdot \omega^2 \cdot \cos(2 - \alpha_i)$$

#### výpočet celkových sil:

$$F_{c_i} := F_{p_i} + F_{s_i}$$

zobrazení těchto sil:



### Síly přenášené pístním čepem:

Celková síla na pístní čep:

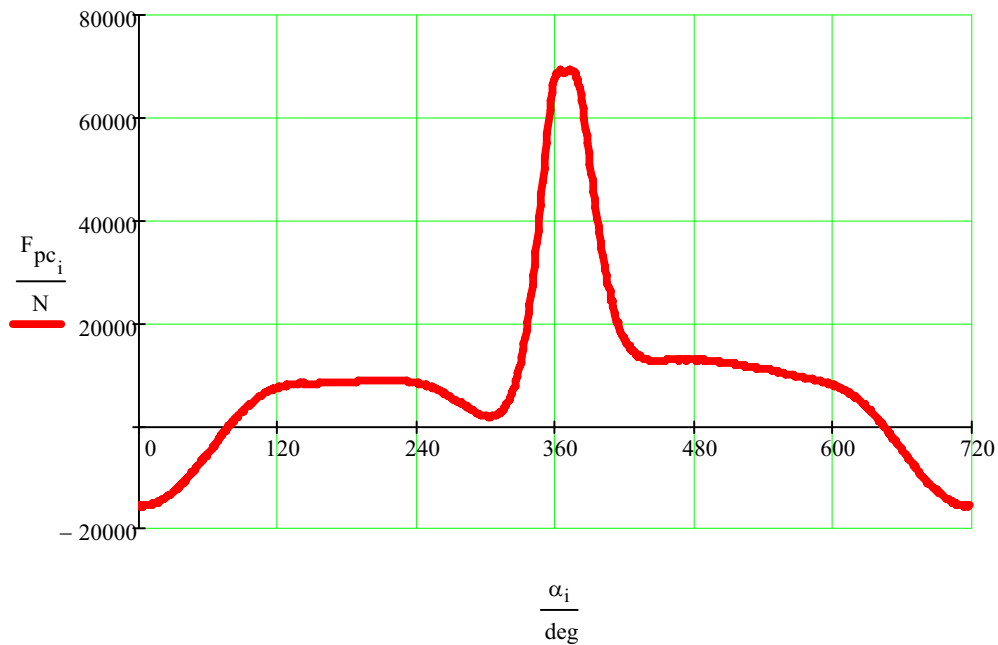
$$\beta_i := \arcsin(\lambda \cdot \sin(\alpha_i))$$

$$F_{cp_i} := F_{p_i} + F_{s_i}$$

Maximální síla ve směru ojnice:

$$F_{pc_i} := \frac{F_{cp_i}}{\cos(\beta_i)}$$

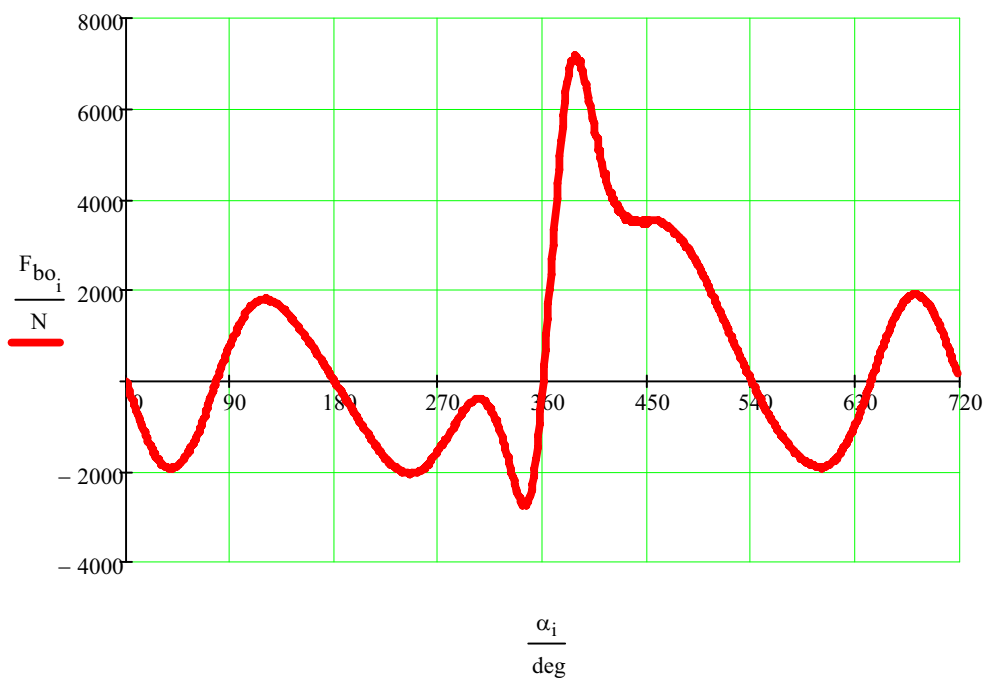
Síla přenášená na pístní čep ve směru ojnice:



**Boční síly na píst:**

$$F_{bo_i} := F_{cp_i} \cdot \tan(\beta_i)$$

Boční síly na píst:





### Maximální a minimální hodnoty vypočtených sil:

|                         |                                  |                                   |
|-------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| primární síla:          | $\max(F_p) = 84669.6\text{N}$    | $\min(F_p) = -845.7\text{N}$      |
| setrvačná síla na píst: | $\max(F_s) = 8852.2\text{N}$     | $\min(F_s) = -15574.8\text{N}$    |
| celková síla:           | $\max(F_c) = 69192.8\text{N}$    | $\min(F_c) = -15782.1\text{N}$    |
| síla přenášená ojnicí:  | $\max(F_{pc}) = 69246.6\text{N}$ | $\min(F_{pc}) = -15782.3\text{N}$ |
| boční síly:             | $\max(F_{bo}) = 7184.2\text{N}$  | $\min(F_{bo}) = -2742.3\text{N}$  |

### Určení radiálních a tangenciálních sil a kroutícího momentu na jednom zalomení KH:

#### Síly a momenty na jednom zalomení klikového hřídele:

##### Radiální, tangenciální a celkové síly v ojnicím čepu:

Setrvačná síla:  $F_{\text{spc}_i} := -(m_1 + m_{\text{pist}}) \cdot a(\alpha_i)$

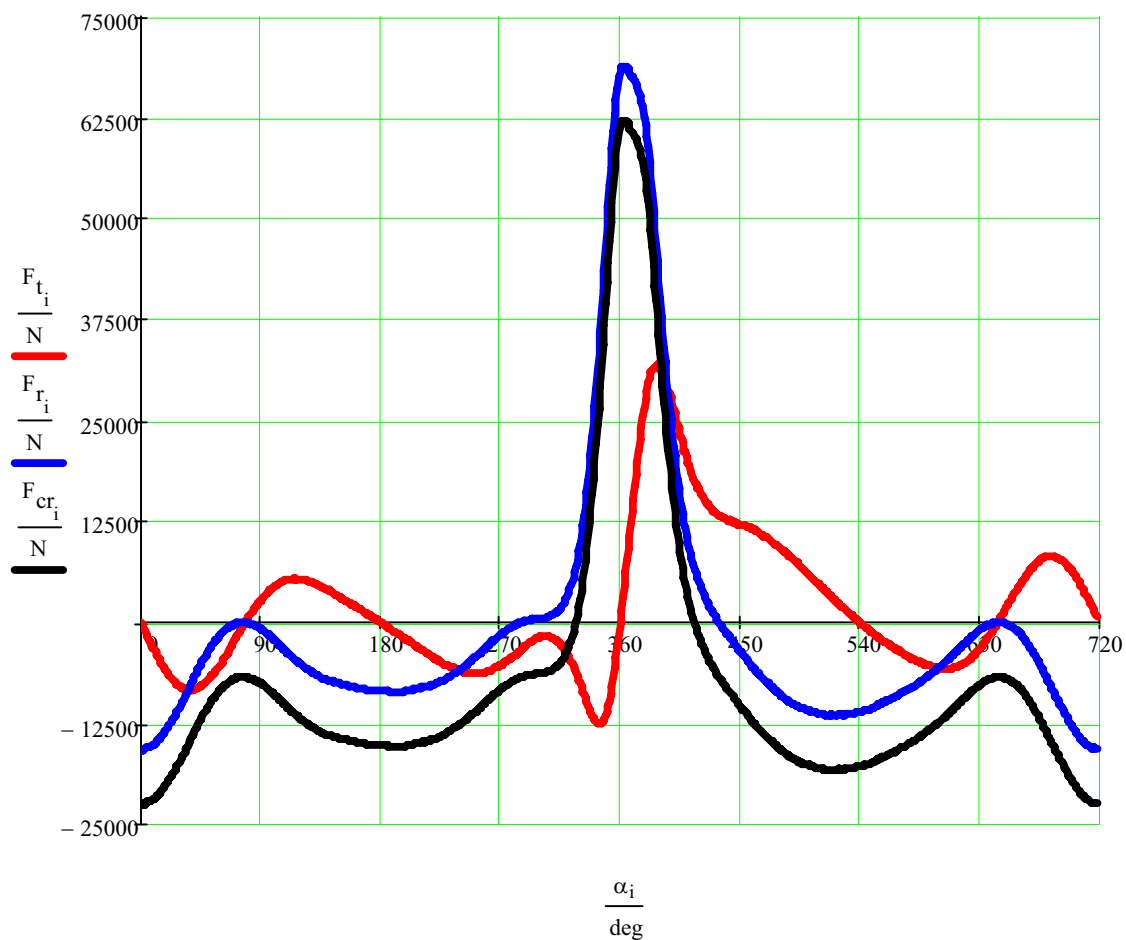
Celková síla přenášená ojnicí:  $F_{o2_i} := \frac{F_{p_i} + F_{\text{spc}_i}}{\cos(\beta_i)}$

tangenciální síla:  $F_{t_i} := F_{o2_i} \cdot \sin(\alpha_i + \beta_i)$

radiální síla:  $F_{r_i} := F_{o2_i} \cdot \cos(\alpha_i + \beta_i)$

celková radiální síla:  $F_{\text{cr}_i} := F_{r_i} - m_2 \cdot r_k \cdot \omega^2$

Radiální, tangenciální a celková síla v ojničím čepu:



**maximální a minimální hodnoty:**

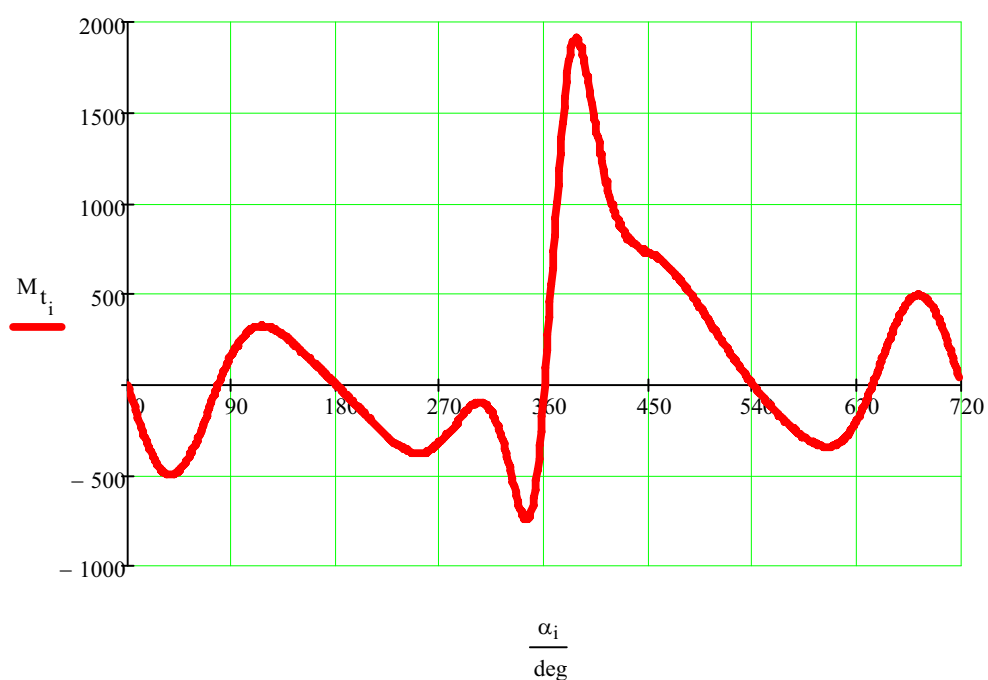
|                        |                                |                                   |
|------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| tangenciální síla:     | $\max(F_t) = 31864.9\text{N}$  | $\min(F_t) = -12437.8\text{N}$    |
| radiální síla:         | $\max(F_r) = 68782.8\text{N}$  | $\min(F_r) = -15778.4\text{N}$    |
| celková radiální síla: | $\max(F_{cr}) = 62018\text{N}$ | $\min(F_{cr}) = -22543.2\text{N}$ |

## Průběhy krouticího momentu na hlavních a ojnicích čepch:

Krouticí moment jednoho zalomení:

$$M_{t_i} := F_{t_i} \cdot r_k$$

Krouticí moment jednoho zalomení:



$$\min(M_t) = -746.268 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\max(M_t) = 1911.891 \text{ N} \cdot \text{m}$$

**Fázově posunuté krouticí momenty na jednotlivých zalomeních:**

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

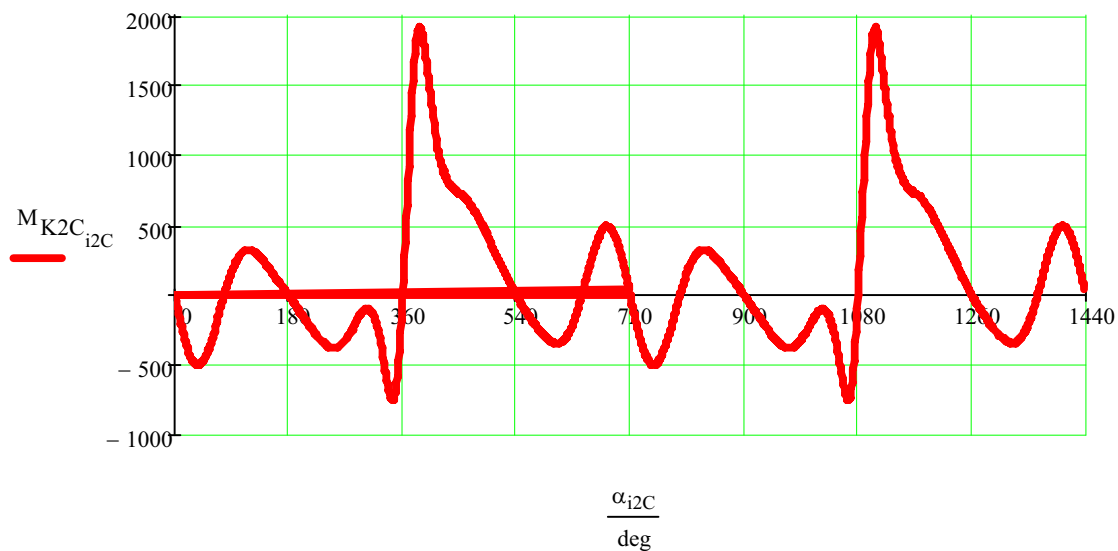
$$i2C := 0..2 \cdot n_p - 1$$

$$M_{K2C_i} := M_{t_i}$$

$$M_{K2C_{i+n_p}} := M_{t_i}$$

$$\alpha_{i+n_p} := \alpha_c + \alpha_i$$

Fázově posunuté kroučící momenty na jednotlivých zalomeních:



$$M_{KV_{i,1}} := M_{K2C_{i+720}}$$

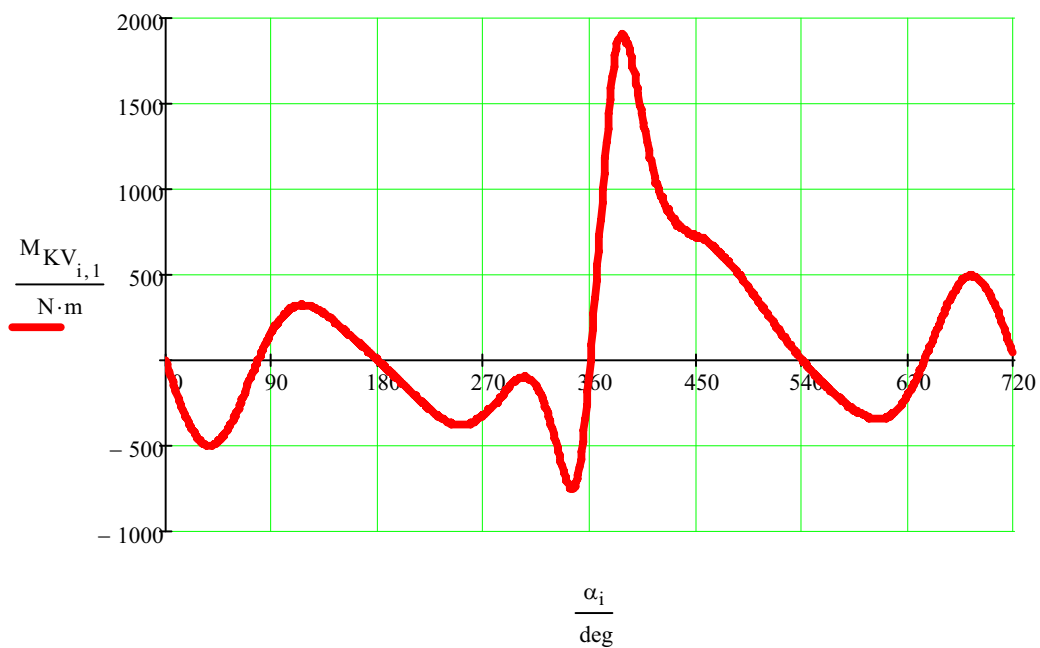
$$M_{KV_{i,2}} := M_{K2C_{i+576}}$$

$$M_{KV_{i,4}} := M_{K2C_{i+432}}$$

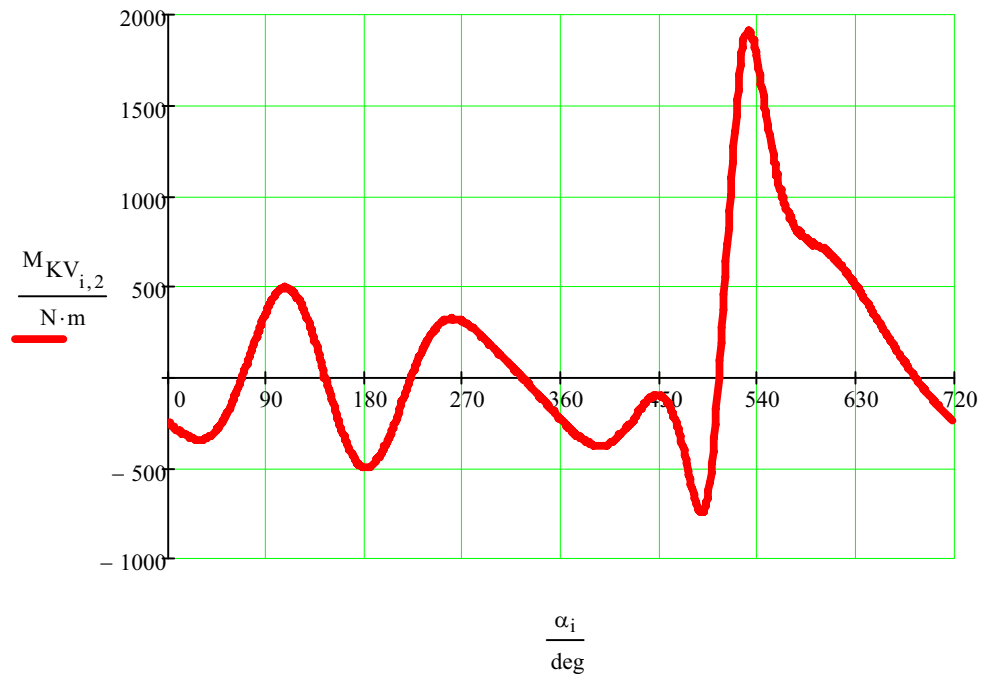
$$M_{KV_{i,5}} := M_{K2C_{i+288}}$$

$$M_{KV_{i,3}} := M_{K2C_{i+144}}$$

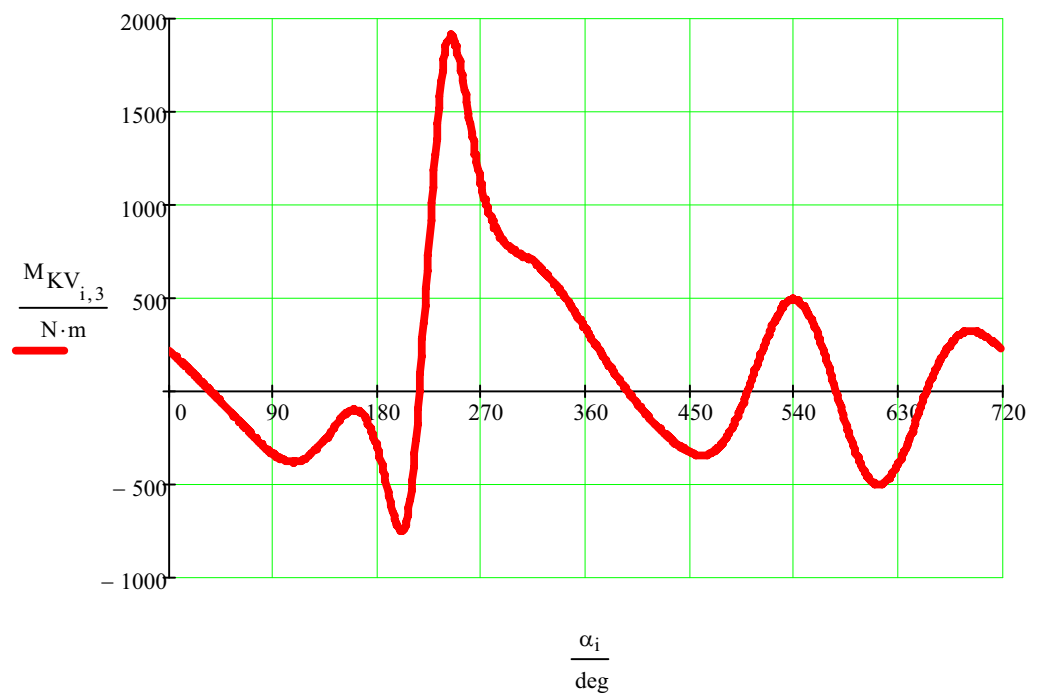
1. válec:



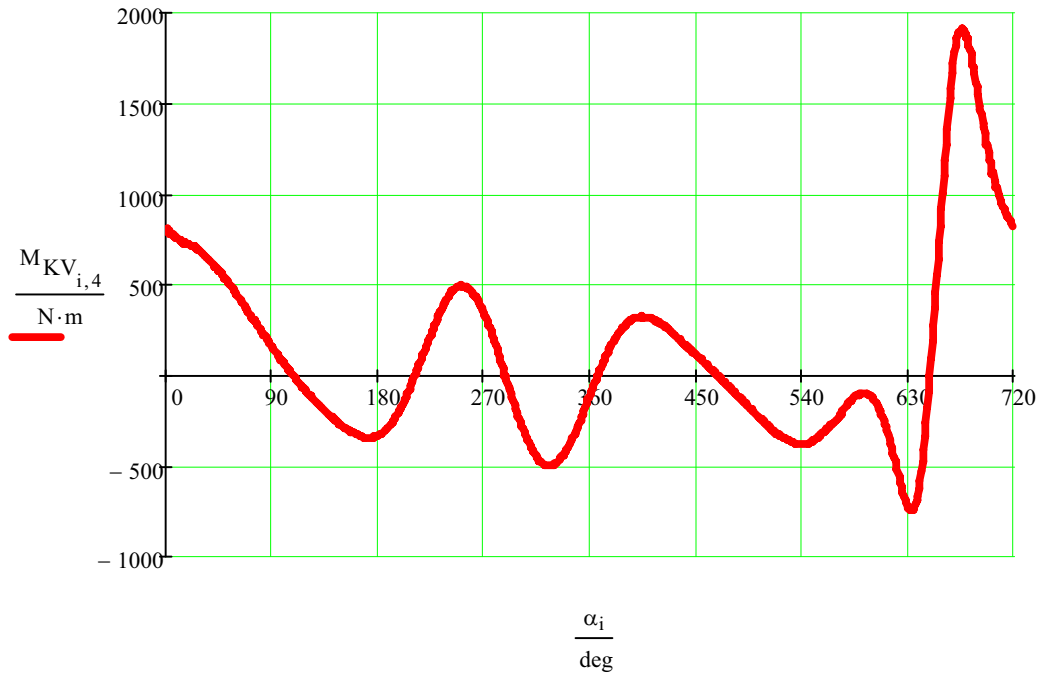
2. válec:



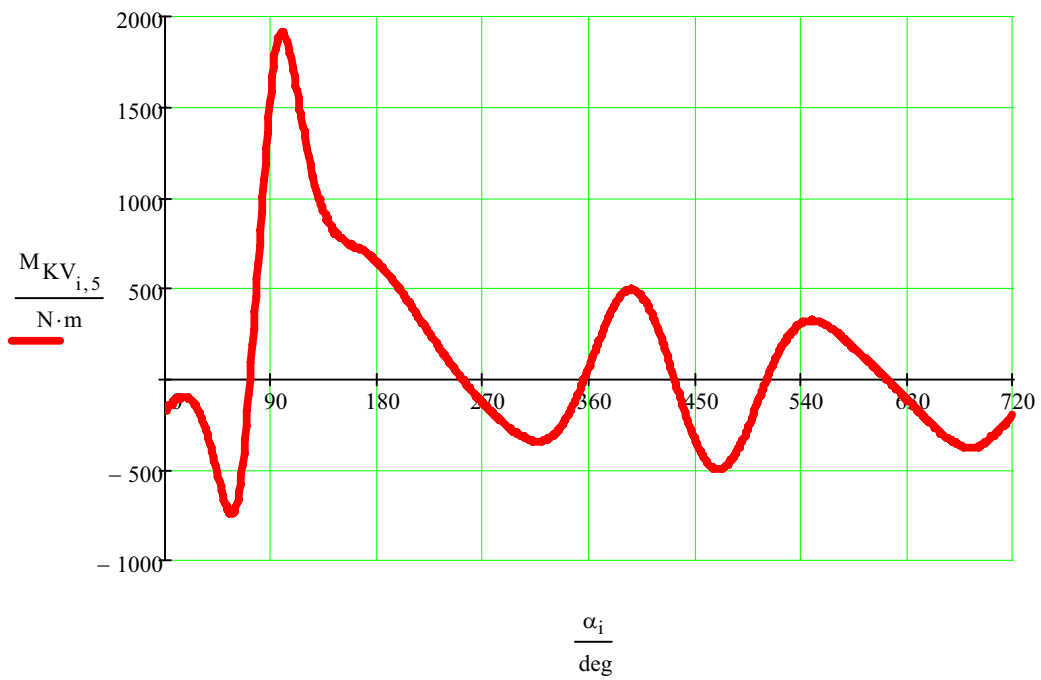
3. válec:



4.válec:



5.válec:



**Průběh kroucího momentu na hlavních čepch:**

$$M_{\text{kHC}1_i} := 0 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

$$M_{\text{kHC}2_i} := M_{\text{KV}_{i,1}}$$

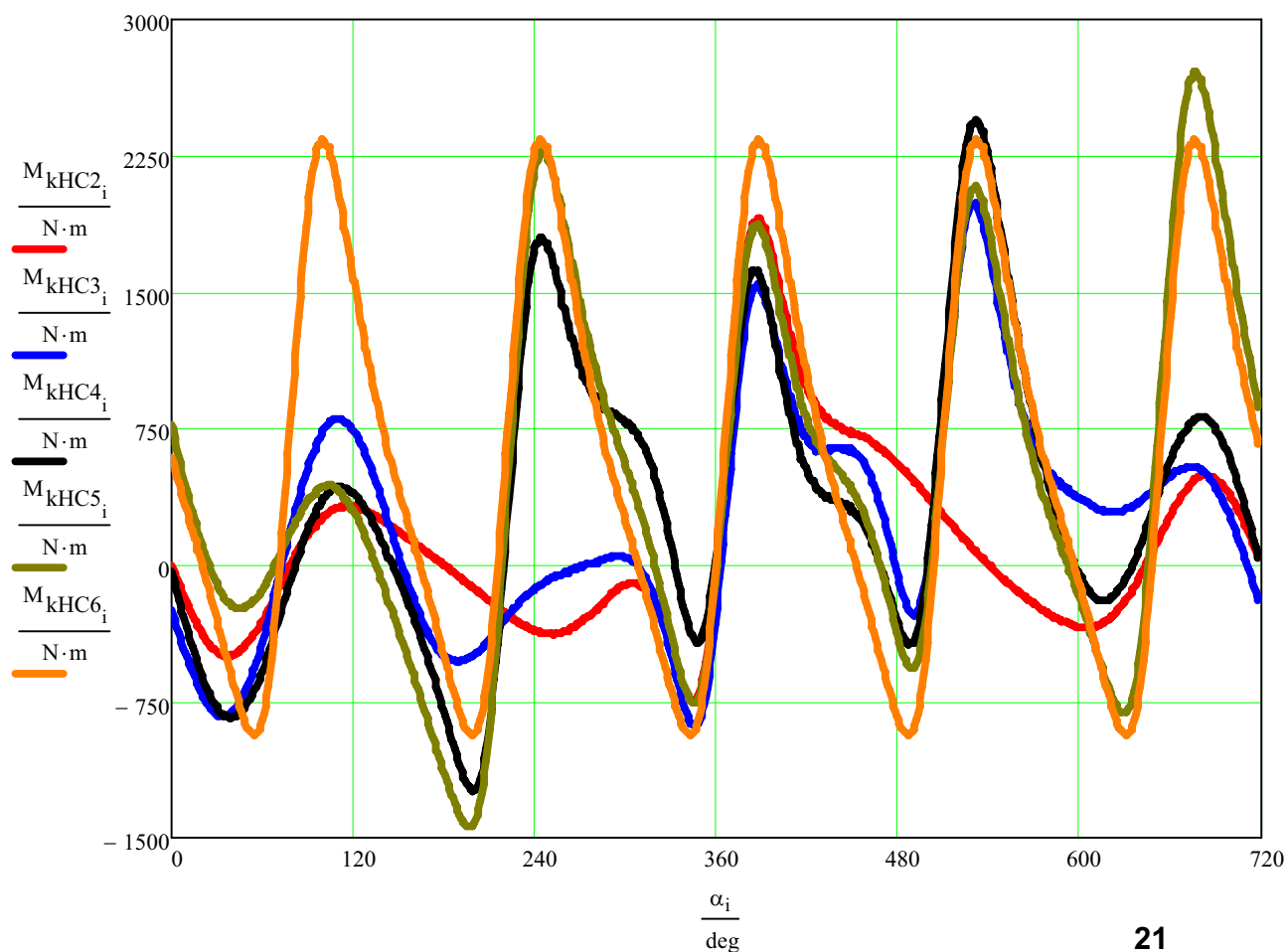
$$M_{\text{kHC}3_i} := M_{\text{KV}_{i,2}} + M_{\text{kHC}2_i}$$

$$M_{\text{kHC}4_i} := M_{\text{KV}_{i,3}} + M_{\text{kHC}3_i}$$

$$M_{\text{kHC}5_i} := M_{\text{KV}_{i,4}} + M_{\text{kHC}4_i}$$

$$M_{\text{kHC}6_i} := M_{\text{KV}_{i,5}} + M_{\text{kHC}5_i}$$

Průběhy kroucích momentů hlavních čepů:



Střední kroučící moment:

$$M_{\text{kstř}} := \text{mean}(M_{\text{kHC}i})$$

$$M_{\text{kstř}} = 584.8 \text{ N}\cdot\text{m}$$

**Průběhy kroučícího momentu na ojnicích čepch:**

$$M_{\text{kOC}1_i} := \frac{M_{\text{KV}_{i,1}}}{2}$$

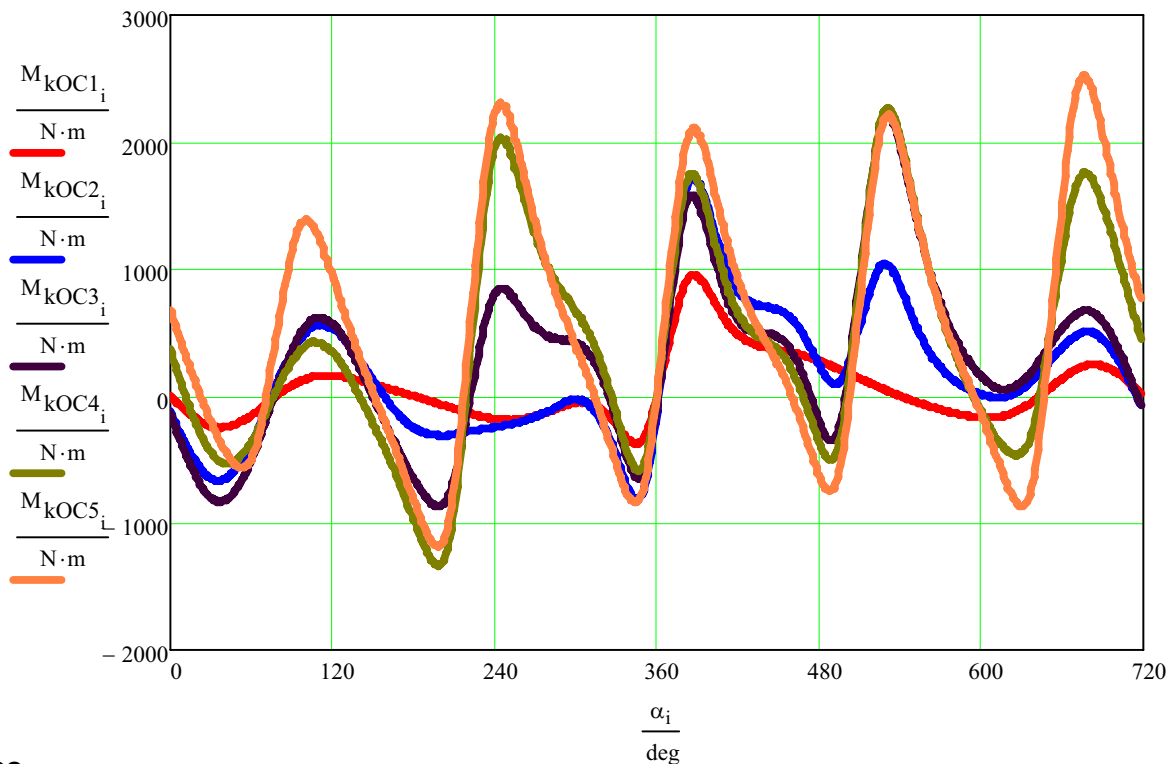
$$M_{\text{kOC}2_i} := M_{\text{kHC}2_i} + \frac{M_{\text{KV}_{i,2}}}{2}$$

$$M_{\text{kOC}3_i} := M_{\text{kHC}3_i} + \frac{M_{\text{KV}_{i,3}}}{2}$$

$$M_{\text{kOC}4_i} := M_{\text{kHC}4_i} + \frac{M_{\text{KV}_{i,4}}}{2}$$

$$M_{\text{kOC}5_i} := M_{\text{kHC}5_i} + \frac{M_{\text{KV}_{i,5}}}{2}$$

Průběhy kroučících momentů na ojnicích čepch:





### Nejvíce zatížený hlavní čep

maximální hodnoty:

$$\begin{aligned}M_{\text{kHC1max}} &:= \max(M_{\text{kHC1}}) & M_{\text{kHC1max}} &= 0 \cdot \text{N} \cdot \text{m} \\M_{\text{kHC2max}} &:= \max(M_{\text{kHC2}}) & M_{\text{kHC2max}} &= 1912 \cdot \text{N} \cdot \text{m} \\M_{\text{kHC3max}} &:= \max(M_{\text{kHC3}}) & M_{\text{kHC3max}} &= 1987 \cdot \text{N} \cdot \text{m} \\M_{\text{kHC4max}} &:= \max(M_{\text{kHC4}}) & M_{\text{kHC4max}} &= 2453 \cdot \text{N} \cdot \text{m} \\M_{\text{kHC5max}} &:= \max(M_{\text{kHC5}}) & M_{\text{kHC5max}} &= 2715 \cdot \text{N} \cdot \text{m}\end{aligned}$$

minimální hodnoty:

$$\begin{aligned}M_{\text{kHC1min}} &:= \min(M_{\text{kHC1}}) & M_{\text{kHC1min}} &= 0 \cdot \text{N} \cdot \text{m} \\M_{\text{kHC2min}} &:= \min(M_{\text{kHC2}}) & M_{\text{kHC2min}} &= -746 \cdot \text{N} \cdot \text{m} \\M_{\text{kHC3min}} &:= \min(M_{\text{kHC3}}) & M_{\text{kHC3min}} &= -888 \cdot \text{N} \cdot \text{m} \\M_{\text{kHC4min}} &:= \min(M_{\text{kHC4}}) & M_{\text{kHC4min}} &= -1246 \cdot \text{N} \cdot \text{m} \\M_{\text{kHC5min}} &:= \min(M_{\text{kHC5}}) & M_{\text{kHC5min}} &= -1437 \cdot \text{N} \cdot \text{m}\end{aligned}$$

největší zatížení:

$$\begin{aligned}M_{\text{kHCextr1}} &:= M_{\text{kHC1max}} - M_{\text{kHC1min}} & M_{\text{kHCextr1}} &= 0 \cdot \text{N} \cdot \text{m} \\M_{\text{kHCextr2}} &:= M_{\text{kHC2max}} - M_{\text{kHC2min}} & M_{\text{kHCextr2}} &= 2658 \cdot \text{N} \cdot \text{m} \\M_{\text{kHCextr3}} &:= M_{\text{kHC3max}} - M_{\text{kHC3min}} & M_{\text{kHCextr3}} &= 2876 \cdot \text{N} \cdot \text{m} \\M_{\text{kHCextr4}} &:= M_{\text{kHC4max}} - M_{\text{kHC4min}} & M_{\text{kHCextr4}} &= 3699 \cdot \text{N} \cdot \text{m}\end{aligned}$$

$$M_{kHCextr5} := M_{kHC5max} - M_{kHC5mi} \quad M_{kHCextr5} = 4151 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Nejvíc zatížený je 5 hlavní čep, hodnota momentu je 4151 Nm

**Nejvíc zatížený ojnicí čep:**

maximální hodnoty:

$$M_{kOC1max} := \max(M_{kOC1}) \quad M_{kOC1max} = 956 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$M_{kOC2max} := \max(M_{kOC2}) \quad M_{kOC2max} = 1727 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$M_{kOC3max} := \max(M_{kOC3}) \quad M_{kOC3max} = 2220 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$M_{kOC4max} := \max(M_{kOC4}) \quad M_{kOC4max} = 2269 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$M_{kOC5max} := \max(M_{kOC5}) \quad M_{kOC5max} = 2530 \text{ N}\cdot\text{m}$$

minimální hodnoty:

$$M_{kOC1min} := \min(M_{kOC1}) \quad M_{kOC1min} = -373 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$M_{kOC2min} := \min(M_{kOC2}) \quad M_{kOC2min} = -817 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$M_{kOC3min} := \min(M_{kOC3}) \quad M_{kOC3min} = -873 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$M_{kOC4min} := \min(M_{kOC4}) \quad M_{kOC4min} = -1339 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$M_{kOC5min} := \min(M_{kOC5}) \quad M_{kOC5min} = -1184 \text{ N}\cdot\text{m}$$

největší zatížení:

$$M_{kOCextr1} := M_{kOC1max} - M_{kOC1mi} \quad M_{kOCextr1} = 1329 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$M_{kOCextr2} := M_{kOC2max} - M_{kOC2mi} \quad M_{kOCextr2} = 2544 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$M_{kOCextr3} := M_{kOC3max} - M_{kOC3mi} \quad M_{kOCextr3} = 3094 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$M_{kOCextr4} := M_{kOC4max} - M_{kOC4mi} \quad M_{kOCextr4} = 3607 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$M_{kOCextr5} := M_{kOC5max} - M_{kOC5mi} \quad M_{kOCextr5} = 3714 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Nejvíc zatížený je ojnicí čep č.5, hodnota momentu je 3714 Nm

## 5) Vyvažování motoru

Hmotnost zalomení zjištěna z Pro Engineeru:

$$m_T := 3.065 \text{ kg}$$

Průběhy momentů setrvačných sil rotačních:

$$M_{r1}(\alpha) := (m_T + m_2) \cdot r_k \cdot \omega^2 \cdot (\cos(\alpha)) \cdot 4 \cdot h$$

$$M_{r2}(\alpha) := (m_T + m_2) \cdot r_k \cdot \omega^2 \cdot \cos((\alpha + 144 \text{ deg})) \cdot 3 \cdot h$$

$$M_{r3}(\alpha) := (m_T + m_2) \cdot r_k \cdot \omega^2 \cdot \cos((\alpha + 576 \text{ deg})) \cdot 2 \cdot h$$

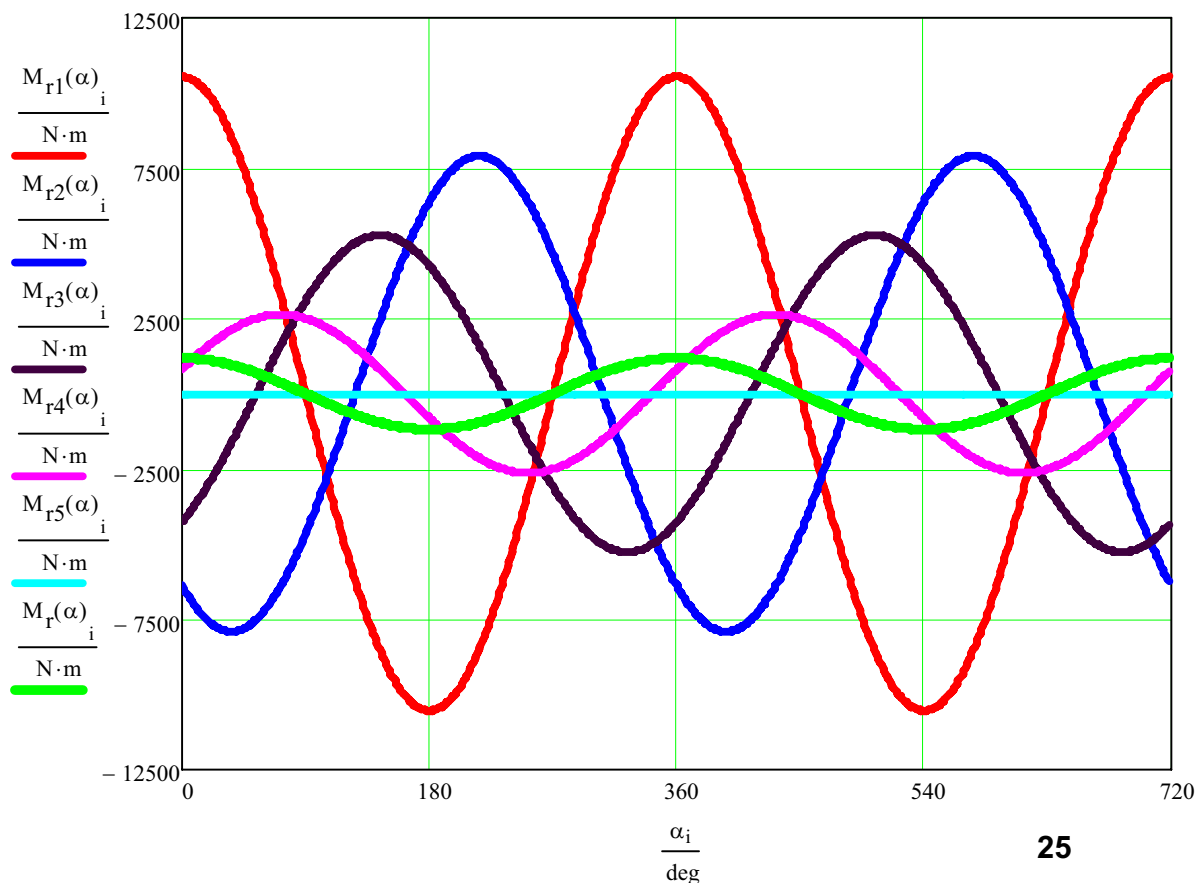
$$M_{r4}(\alpha) := (m_T + m_2) \cdot r_k \cdot \omega^2 \cdot \cos((\alpha + 288 \text{ deg})) \cdot h$$

$$M_{r5}(\alpha) := (m_T + m_2) \cdot r_k \cdot \omega^2 \cdot \cos((\alpha + 432 \text{ deg})) \cdot 0$$

Výslednice momentů setrvačných sil rotačních:

$$M_r(\alpha) := 0.449 (m_T + m_2) \cdot r_k \cdot \omega^2 \cdot h \cdot \cos(\alpha)$$

$$\max(M_r(\alpha)) = 1183 \text{ N}\cdot\text{m}$$



Průběhy momentů setrvačných sil prvního řádu:

$$M_{I1}(\alpha) := (m_{\text{pist}} + m_I) \cdot r_k \cdot \omega^2 \cdot (\cos(\alpha)) \cdot 4 \cdot h$$

$$M_{I2}(\alpha) := (m_{\text{pist}} + m_I) \cdot r_k \cdot \omega^2 \cdot \cos((\alpha + 144 \text{ deg})) \cdot 3 \cdot h$$

$$M_{I3}(\alpha) := (m_{\text{pist}} + m_I) \cdot r_k \cdot \omega^2 \cdot \cos((\alpha + 576 \text{ deg})) \cdot 2 \cdot h$$

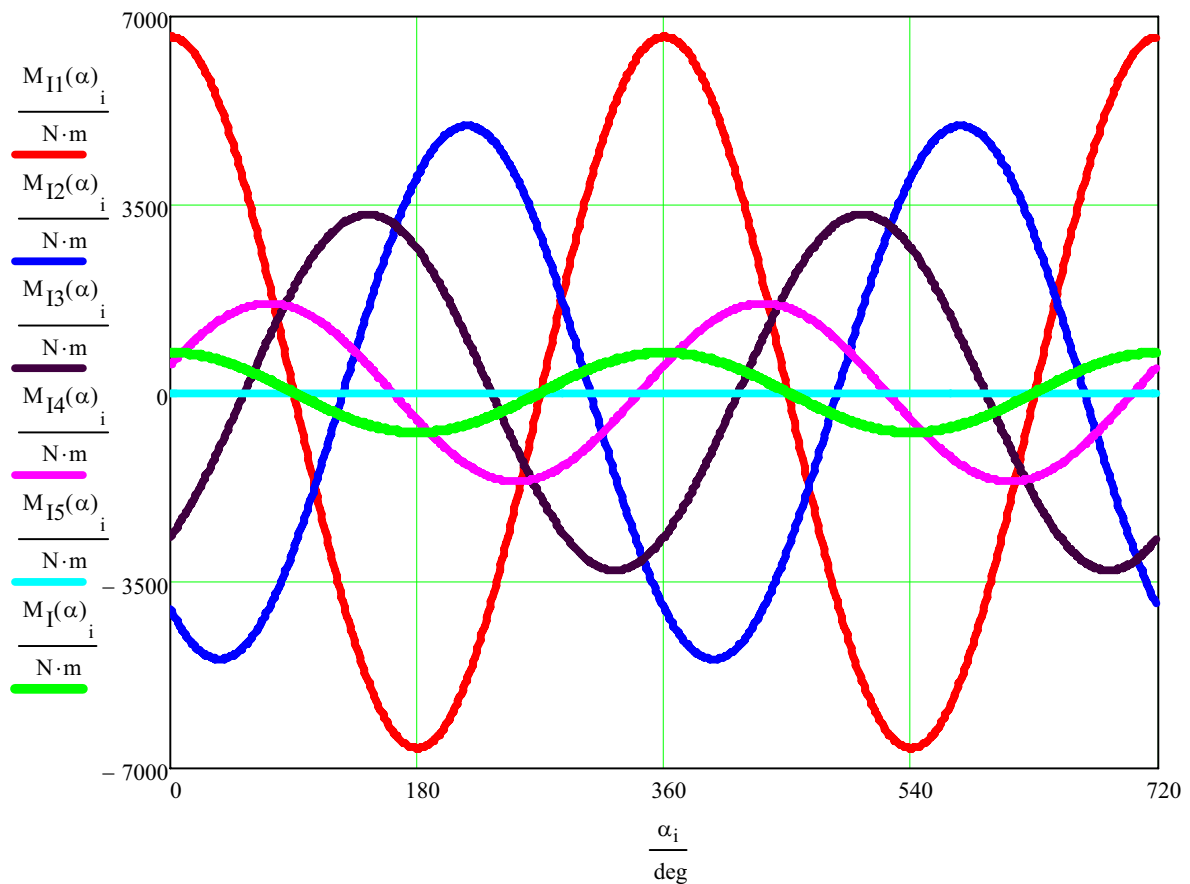
$$M_{I4}(\alpha) := (m_{\text{pist}} + m_I) \cdot r_k \cdot \omega^2 \cdot \cos((\alpha + 288 \text{ deg})) \cdot h$$

$$M_{I5}(\alpha) := (m_{\text{pist}} + m_I) \cdot r_k \cdot \omega^2 \cdot \cos((\alpha + 432 \text{ deg})) \cdot 0$$

Výslednice momentů setrvačných sil prvního řádu:

$$M_I(\alpha) := 0.449 (m_{\text{pist}} + m_I) \cdot r_k \cdot \omega^2 \cdot h \cdot \cos(\alpha)$$

$$\max(M_I(\alpha)) = 744 \text{ N}\cdot\text{m}$$



Průběhy momentů setrvačných sil druhého řádu:

$$M_{II1}(\alpha) := \lambda \cdot (m_{\text{pist}} + m_1) \cdot r_k \cdot \omega^2 \cdot (\cos(2 \cdot \alpha)) \cdot 4 \cdot h$$

$$M_{II2}(\alpha) := \lambda \cdot (m_{\text{pist}} + m_1) \cdot r_k \cdot \omega^2 \cdot \cos[2 \cdot (\alpha + 144 \text{ deg})] \cdot 3 \cdot h$$

$$M_{II3}(\alpha) := \lambda \cdot (m_{\text{pist}} + m_1) \cdot r_k \cdot \omega^2 \cdot \cos[2 \cdot (\alpha + 576 \text{ deg})] \cdot 2 \cdot h$$

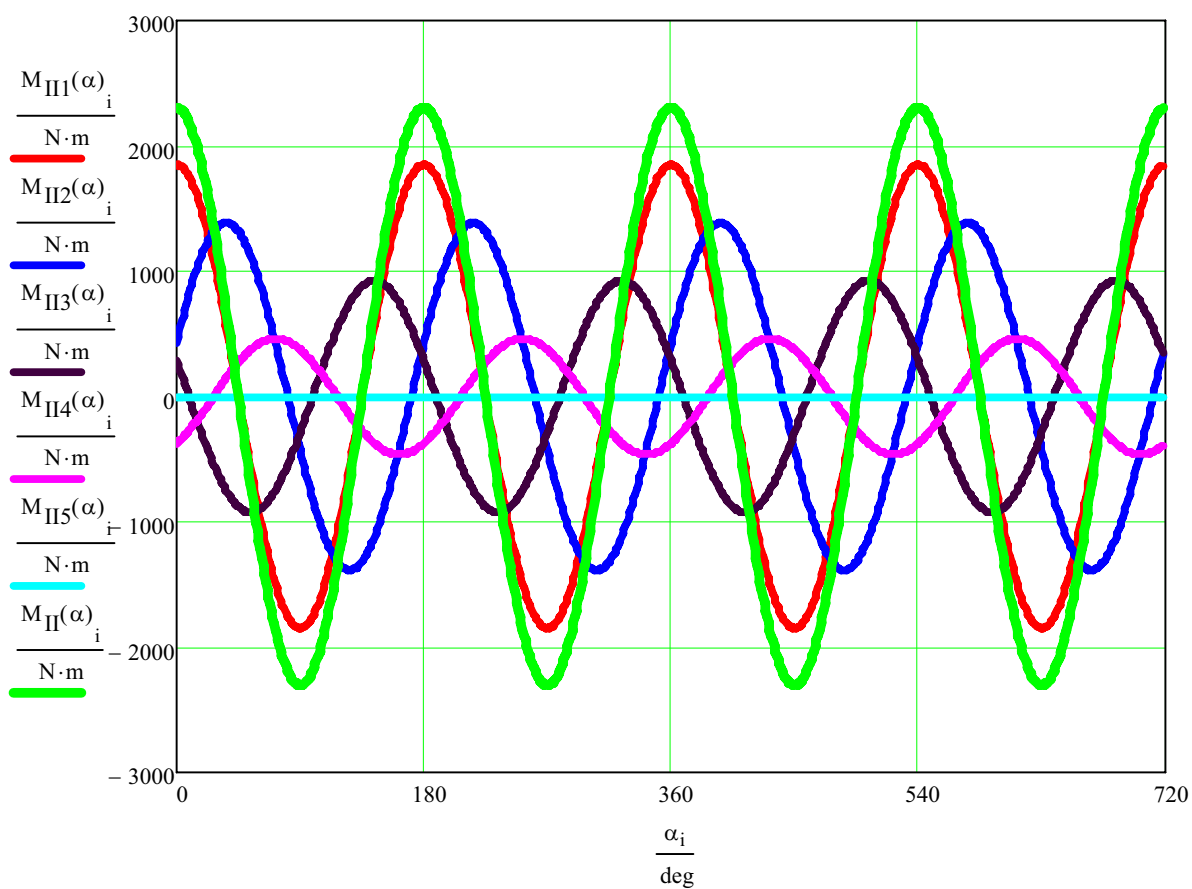
$$M_{II4}(\alpha) := \lambda \cdot (m_{\text{pist}} + m_1) \cdot r_k \cdot \omega^2 \cdot \cos[2 \cdot (\alpha + 288 \text{ deg})] \cdot h$$

$$M_{II5}(\alpha) := \lambda \cdot (m_{\text{pist}} + m_1) \cdot r_k \cdot \omega^2 \cdot \cos[2 \cdot (\alpha + 432 \text{ deg})] \cdot 0$$

Výslednice momentů setrvačných sil druhého řádu:

$$M_{II}(\alpha) := 4.98 \lambda \cdot (m_{\text{pist}} + m_1) \cdot r_k \cdot \omega^2 \cdot h \cdot \cos(2 \cdot \alpha)$$

$$\max(M_{II}(\alpha)) = 2301 \text{ N} \cdot \text{m}$$



## Vyvážení varianty 2:

Moment vývažku musí být stejně velký jako poloviční maximální moment setrvačných sil prvního řádu.

Vzdálenost vývažků:

$$b := 0.88 \text{ m}$$

poloměr vývažku řemenice:

$$r_{v\_rem} := 0.073r$$

poloměr vývažku setrvačníku:

$$r_{v\_set} := 0.15r$$

Hmotnost vývažku na řemenici:

$$m_{v\_rem} := \frac{0.449}{2 \cdot r_{v\_rem} \cdot b} \cdot (m_{pist} + m_1) \cdot r_k \cdot h \qquad m_{v\_rem} = 0.0843 \text{ kg}$$

Hmotnost vývažku na setrvačníku:

$$m_{v\_set} := \frac{0.449}{2 \cdot r_{v\_set} \cdot b} \cdot (m_{pist} + m_1) \cdot r_k \cdot h \qquad m_{v\_set} = 0.041 \text{ kg}$$

Hmotnost vývažků jsem zjistil z Pro Engineeru.

Vývažek na řemenici je ve formě pásoviny šířky 33mm, tloušťky 5mm a úhlu na řemenici 50 stupňů

Vývažek na setrvačníku je ve formě vyvrtaných 3 děr průměru 10mm a délkou 22mm, díry jsou od sebe pod úhlem 10 stupňů.

## 6) Torzní kmitání klikového hřídele

### Náhradní torzní soustava:

#### Redukce hmot:

Redukce posuvných hmot:

$$I_{\text{pos}} := \left[ (m_{\text{pist}} + m_1) \cdot \left( \frac{1}{2} + \frac{\lambda^2}{8} \right) \right] \cdot r_k^2 \quad I_{\text{pos}} = 0.00543 \text{m}^2 \cdot \text{kg}$$

Redukce rotačních hmot:

$$I_{\text{rot}} := m_2 \cdot r_k^2 \quad I_{\text{rot}} = 0.00592 \text{m}^2 \cdot \text{kg}$$

Momenty setrvačnosti zalomení získané z Pro Engineeru:

$$I_{\text{zal1}} := 0.0304 \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

$$I_{\text{zal2}} := 0.0304 \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

$$I_{\text{zal3}} := 0.0304 \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

$$I_{\text{zal4}} := 0.0304 \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

$$I_{\text{zal5}} := 0.0304 \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

Momenty setrvačnosti náhradních kotoučů jednotlivých zalomení:

$$I_{\text{ZAL1}} := I_{\text{zal1}} + I_{\text{pos}} + I_{\text{rot}} \quad I_{\text{ZAL1}} = 0.04185 \text{m}^2 \cdot \text{kg}$$

$$I_{\text{ZAL2}} := I_{\text{zal2}} + I_{\text{pos}} + I_{\text{rot}} \quad I_{\text{ZAL2}} = 0.04185 \text{m}^2 \cdot \text{kg}$$

$$I_{\text{ZAL3}} := I_{\text{zal3}} + I_{\text{pos}} + I_{\text{rot}} \quad I_{\text{ZAL3}} = 0.04185 \text{m}^2 \cdot \text{kg}$$

$$I_{\text{ZAL4}} := I_{\text{zal4}} + I_{\text{pos}} + I_{\text{rot}} \quad I_{\text{ZAL4}} = 0.04185 \text{m}^2 \cdot \text{kg}$$

$$I_{\text{ZAL5}} := I_{\text{zal5}} + I_{\text{pos}} + I_{\text{rot}} \quad I_{\text{ZAL5}} = 0.04185 \text{m}^2 \cdot \text{kg}$$

Redukce hmot na straně řemenice:

Moment setrvačnosti řemenice získané z Pro Engineeru:

$$I_{\text{rem}} := 0.01742 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \qquad I_{\text{rem\_V2}} := 0.0179 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Moment setrvačnosti klikového hřídele pod řemenicí získané z Pro Engineeru:

$$I_{\text{remKH}} := 0.000783 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Moment setrvačnosti náhradního kotouče místo řemenice:

$$I_{\text{REM}} := I_{\text{rem}} + I_{\text{remKH}} \qquad I_{\text{REM}} = 0.0182 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$
$$I_{\text{REM\_V2}} := I_{\text{rem\_V2}} + I_{\text{remKH}} \qquad I_{\text{REM\_V2}} = 0.01869 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

Redukce hmot na straně setrvačníku:

Moment setrvačnosti setrvačníku získané z Pro Engineeru:

$$I_{\text{set}} := 0.5249 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \qquad I_{\text{set\_V2}} := 0.5239 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Moment setrvačnosti klikového hřídele pod setrvačником získané z Pro Engineeru:

$$I_{\text{setKH}} := 0.00418 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Moment setrvačnosti náhradního kotouče místo setrvačníku:

$$I_{\text{SET}} := I_{\text{set}} + I_{\text{setKH}} \qquad I_{\text{SET}} = 0.52909 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$
$$I_{\text{SET\_V2}} := I_{\text{set\_V2}} + I_{\text{setKH}} \qquad I_{\text{SET\_V2}} = 0.52808 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

Redukce délek:

Redukovaná délka zalomení klikového hřídele podle metody Ker-Wilson:

Průměr hlavního čepu:

$$D_{\text{hc}} := 80 \text{ mm}$$

Průměr ojnicního čepu:

$$D_{\text{oc}} := 66 \text{ mm}$$



Šířka hlavního čepu:

$$b_{hc} := 45\text{mm}$$

Šířka ojnicního čepu:

$$b_{oc} := 41\text{mm}$$

Šířka zalomení klikového hřídele:

$$h := 90\text{mm}$$

Tloušťka ramene zalomení klikového hřídele:

$$b_{zal} := 25\text{mm}$$

Redukovaný průměr:

$$D_{red} := D_{hc}$$

$$D_{red} = 0.08\text{m}$$

Redukovaná délka zalomení:

$$l_{red\_zal} := D_{red}^4 \cdot \left[ \frac{b_{hc} + 0.4D_{hc}}{D_{hc}^4} + \frac{b_{oc} + 0.4D_{oc}}{D_{oc}^4} + \frac{r_k - 0.2(D_{oc} + D_{hc})}{b_{zal} \cdot h^3} \right]$$

$$l_{red\_zal} = 0.292\text{m}$$

Redukovaná délka klikového hřídele na straně setrvačnicku:

Zbývající délka ojnicního čepu:

$$l_{1set} := 25\text{mm}$$

Délka náboje uchycení setrvačnicku:

$$l_{2set} := 35\text{mm}$$

Průměr náboje uchycení setrvačnicku:

$$D_{set} := 110\text{mm}$$

$$l_{red\_set} := (l_{1set} + 0.65D_{hc}) \cdot \frac{D_{red}^4}{D_{hc}^4} + (l_{2set} - 0.65D_{hc}) \cdot \frac{D_{red}^4}{D_{set}^4}$$

$$l_{red\_set} = 0.072\text{m}$$

Redukovaná délka klikového hřídele na straně řemenice:

Zbývající délka ojnicního čepu:

$$l_{2rem} := 18\text{mm}$$

Délka náboje uchycení řemenice:

$$l_{1rem} := 65\text{mm}$$

Průměr náboje uchycení řemenice:

$$D_{rem} := 40\text{mm}$$

$$l_{red\_rem} := (l_{1rem} + 0.1 \cdot D_{rem}) \cdot \frac{D_{red}^4}{D_{rem}^4} + (l_{2rem} - 0.1 \cdot D_{rem}) \cdot \frac{D_{red}^4}{D_{hc}^4}$$

$$l_{red\_rem} = 1.118\text{m}$$

### Vlastní torzní kmitání:

Výpočet tuhostí:

Modul pružnosti klikového hřídele ve smyku:

$$G_{ocel} := 8100\text{MPa}$$

Polární moment setrvačnosti náhradního hřídele:

$$I_P := \frac{\pi \cdot D_{red}^4}{32} \quad I_P = 4.02 \times 10^{-6} \text{m}^4$$

Torzní tuhost za řemenicí:

$$C_0 := \frac{G_{ocel} \cdot I_P}{l_{red\_rem}} \quad C_0 = 291342 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad}}$$

$$C_1 := \frac{G_{ocel} \cdot I_P}{l_{red\_zal}} \quad C_1 = 1116568 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad}}$$

$$C_2 := \frac{G_{ocel} \cdot I_P}{l_{red\_zal}} \quad C_2 = 1116568 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad}}$$

$$C_3 := \frac{G_{ocel} \cdot I_P}{l_{red\_zal}} \quad C_3 = 1116568 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad}}$$

$$C_4 := \frac{G_{ocel} \cdot I_P}{I_{red\_zal}}$$

$$C_4 = 1116568 \frac{N \cdot m}{rad}$$

$$C_5 := \frac{G_{ocel} \cdot I_P}{I_{red\_set}}$$

$$C_5 = 4508612 \frac{N \cdot m}{rad}$$

Výpočet vlastní frekvence soustavy první varianty:

$$I := \begin{pmatrix} I_{REM} \\ I_{ZAL1} \\ I_{ZAL2} \\ I_{ZAL3} \\ I_{ZAL4} \\ I_{ZAL5} \\ I_{SET} \end{pmatrix} \quad I = \begin{pmatrix} 0.018 \\ 0.042 \\ 0.042 \\ 0.042 \\ 0.042 \\ 0.042 \\ 0.529 \end{pmatrix} m^2 \cdot kg$$

Matice hmotnosti:

$$M := \begin{pmatrix} I_{REM} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_{ZAL1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_{ZAL2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{ZAL3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_{ZAL4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_{ZAL5} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_{SET} \end{pmatrix}$$

$$M = \begin{pmatrix} 0.018 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.042 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.042 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.042 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.042 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.042 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.529 \end{pmatrix} m^2 \cdot kg$$

Matice tuhosti:

$$C_{\text{mat}} := \begin{pmatrix} C_0 & -C_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -C_0 & C_0 + C_1 & -C_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -C_1 & C_1 + C_2 & -C_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -C_2 & C_2 + C_3 & -C_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -C_3 & C_3 + C_4 & -C_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -C_4 & C_4 + C_5 & -C_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -C_5 & C_5 \end{pmatrix}$$

$$C_{\text{mat}} = \begin{pmatrix} 291342 & -291342 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -291342 & 1407910 & -1116568 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1116568 & 2233137 & -1116568 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1116568 & 2233137 & -1116568 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1116568 & 2233137 & -1116568 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1116568 & 5625180 & -4508612 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4508612 & 4508612 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{N}\cdot\text{m}}{\text{rad}}$$

Čtvercová matice:

$$A_{\text{mat}} := M^{-1} \cdot C_{\text{mat}}$$

Vlastní čísla:

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

Úhlová frekvence vlastního kmitání:

$$\underline{\underline{\Omega}} := \sqrt{\lambda_{\text{vc}}}$$

$$\Omega = \begin{pmatrix} 12210 \\ 9639 \\ 7846 \\ 5521 \\ 3945 \\ 1758 \\ 0i \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{rad}}{\text{sec}}$$

Výpočet amplitud x:

$$x := \text{eigenvecs}(A_{\text{mat}})$$

$$x = \begin{pmatrix} 0.001 & 0.06 & 0.175 & 0.569 & 0.884 & 0.65 & 0.378 \\ -0.006 & -0.286 & -0.498 & -0.514 & 0.024 & 0.525 & 0.378 \\ 0.026 & 0.621 & 0.476 & -0.209 & -0.214 & 0.431 & 0.378 \\ -0.088 & -0.634 & 0.352 & 0.335 & -0.328 & 0.288 & 0.378 \\ 0.29 & 0.318 & -0.584 & 0.497 & -0.25 & 0.111 & 0.378 \\ -0.951 & 0.162 & -0.173 & 0.091 & -0.027 & -0.079 & 0.378 \\ 0.058 & -0.016 & 0.028 & -0.035 & 0.032 & -0.123 & 0.378 \end{pmatrix}$$

První vlastní frekvence:

$$i := 0..6$$

Poměrné amplitudy:

$$a1_i := \frac{x_{1,5}}{x_{0,5}}$$

$$a1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0.80696 \\ 0.66316 \\ 0.44257 \\ 0.17073 \\ -0.12087 \\ -0.18962 \end{pmatrix}$$

Vlastní úhlová frekvence:

$$\Omega_5 = 1758 \frac{\text{rad}}{\text{sec}}$$

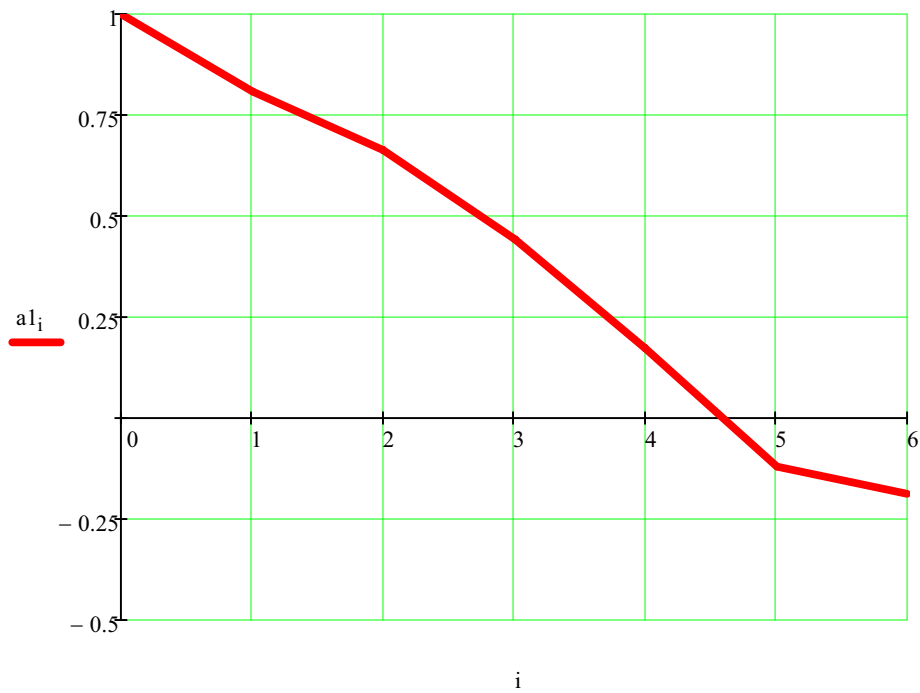
Vlastní frekvence:

$$N_1 := \frac{\Omega_5}{2 \cdot \pi}$$

$$N_1 = 279.7 \text{ Hz}$$

$$N_1 = 16785 \text{ min}^{-1}$$

Vlastní tvar:



Druhá vlastní frekvence:

$$i := 0..6$$

Poměrné amplitudy:

$$a2_i := \frac{x_{i,4}}{x_{0,4}}$$

$$a2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0.02764 \\ -0.2422 \\ -0.37077 \\ -0.2831 \\ -0.03031 \\ 0.03668 \end{pmatrix}$$

Vlastní úhlová frekvence:

$$\Omega_4 = 3945 \frac{\text{rad}}{\text{sec}}$$

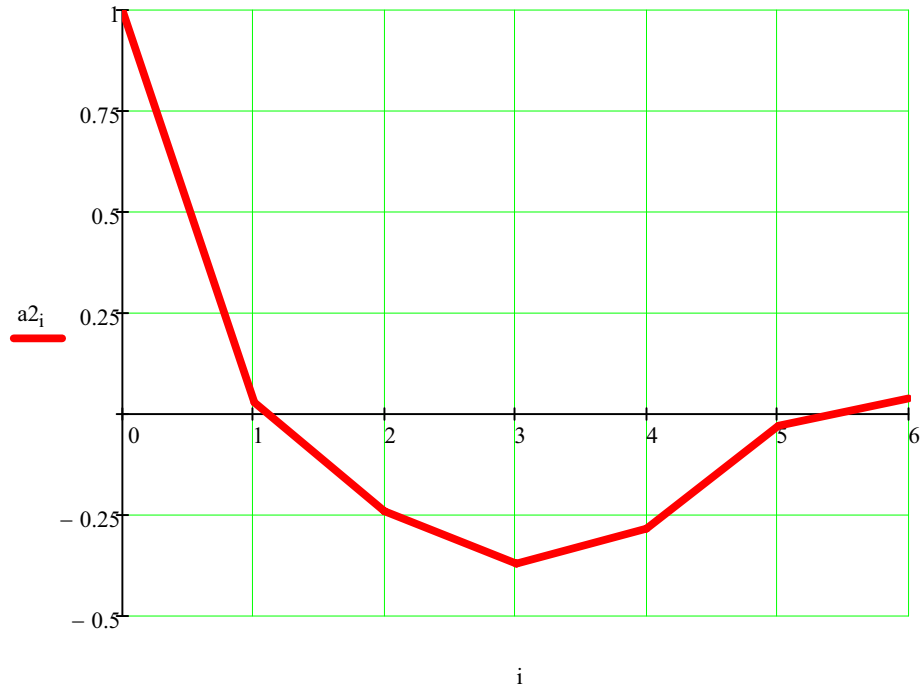
Vlastní frekvence:

$$N_2 := \frac{\Omega_4}{2 \cdot \pi}$$

$$N_2 = 627.9 \text{ Hz}$$

$$N_2 = 37672 \text{ min}^{-1}$$

Vlastní tvar:



Výpočet vlastní frekvence soustavy druhé varianty:

$$I := \begin{pmatrix} I_{REM\_V2} \\ I_{ZAL1} \\ I_{ZAL2} \\ I_{ZAL3} \\ I_{ZAL4} \\ I_{ZAL5} \\ I_{SET\_V2} \end{pmatrix} \quad I = \begin{pmatrix} 0.019 \\ 0.042 \\ 0.042 \\ 0.042 \\ 0.042 \\ 0.042 \\ 0.528 \end{pmatrix} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

Matrice hmotnosti:

$$M_{V2} := \begin{pmatrix} I_{REM\_V2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_{ZAL1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_{ZAL2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{ZAL3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_{ZAL4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_{ZAL5} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_{SET\_V2} \end{pmatrix}$$

$$M_{V2} = \begin{pmatrix} 0.019 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.042 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.042 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.042 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.042 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.042 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.528 \end{pmatrix} \text{m}^2 \cdot \text{kg}$$

Matrice tuhosti:

$$C_{mat} := \begin{pmatrix} C_0 & -C_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -C_0 & C_0 + C_1 & -C_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -C_1 & C_1 + C_2 & -C_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -C_2 & C_2 + C_3 & -C_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -C_3 & C_3 + C_4 & -C_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -C_4 & C_4 + C_5 & -C_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -C_5 & C_5 \end{pmatrix}$$

$$C_{mat} = \begin{pmatrix} 291342 & -291342 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -291342 & 1407910 & -1116568 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1116568 & 2233137 & -1116568 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1116568 & 2233137 & -1116568 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1116568 & 2233137 & -1116568 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1116568 & 5625180 & -4508612 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4508612 & 4508612 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad}}$$



Čtvercová matice:

$$A_{\text{mat\_V2}} := M_{\text{V2}}^{-1} \cdot C_{\text{mat}}$$

Vlastní čísla:

$$\lambda_{\text{vc\_V2}} := \text{eigenvals}(A_{\text{mat\_V2}})$$

Úhlová frekvence vlastního kmitání:

$$\Omega_{\text{V2}} := \sqrt{\lambda_{\text{vc\_V2}}}$$

$$\Omega_{\text{V2}} = \begin{pmatrix} 12211 \\ 9639 \\ 7845 \\ 5509 \\ 3914 \\ 1753 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{rad}}{\text{sec}}$$

Výpočet amplitud x:

$$x_{\text{V2}} := \text{eigenvecs}(A_{\text{mat\_V2}})$$

$$x_{\text{V2}} = \begin{pmatrix} 0.001 & 0.058 & 0.169 & 0.551 & 0.883 & 0.652 & 0.378 \\ -0.006 & -0.286 & -0.498 & -0.522 & 0.015 & 0.524 & 0.378 \\ 0.026 & 0.621 & 0.477 & -0.208 & -0.22 & 0.43 & 0.378 \\ -0.088 & -0.634 & 0.352 & 0.342 & -0.329 & 0.286 & 0.378 \\ 0.29 & 0.318 & -0.585 & 0.504 & -0.249 & 0.11 & 0.378 \\ -0.951 & 0.162 & -0.173 & 0.092 & -0.026 & -0.079 & 0.378 \\ 0.058 & -0.016 & 0.028 & -0.036 & 0.033 & -0.124 & 0.378 \end{pmatrix}$$

První vlastní frekvence:

$$j := 0..6$$

Poměrné amplitudy:

$$b1_j := \frac{x_{j,5}}{x_{0,5}}$$

$$b1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0.80696 \\ 0.66316 \\ 0.44257 \\ 0.17073 \\ -0.12087 \\ -0.18962 \end{pmatrix}$$

Vlastní úhlová frekvence:

$$\Omega_{V2_5} = 1753 \frac{\text{rad}}{\text{sec}}$$

Vlastní frekvence:

$$N_{1\_V2} := \frac{\Omega_{V2_5}}{2 \cdot \pi}$$

$$N_{1\_V2} = 279.1 \text{ Hz}$$

$$N_{1\_V2} = 16744 \text{ min}^{-1}$$

Vlastní tvar:



Druhá vlastní frekvence:

$$j := 0..6$$

Poměrné amplitudy:

$$b2_j := \frac{x_{j,4}}{x_{0,4}}$$

$$b_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0.02764 \\ -0.2422 \\ -0.37077 \\ -0.2831 \\ -0.03031 \\ 0.03668 \end{pmatrix}$$

Vlastní úhlová frekvence:

$$\Omega_{V2_4} = 3914 \frac{\text{rad}}{\text{sec}}$$

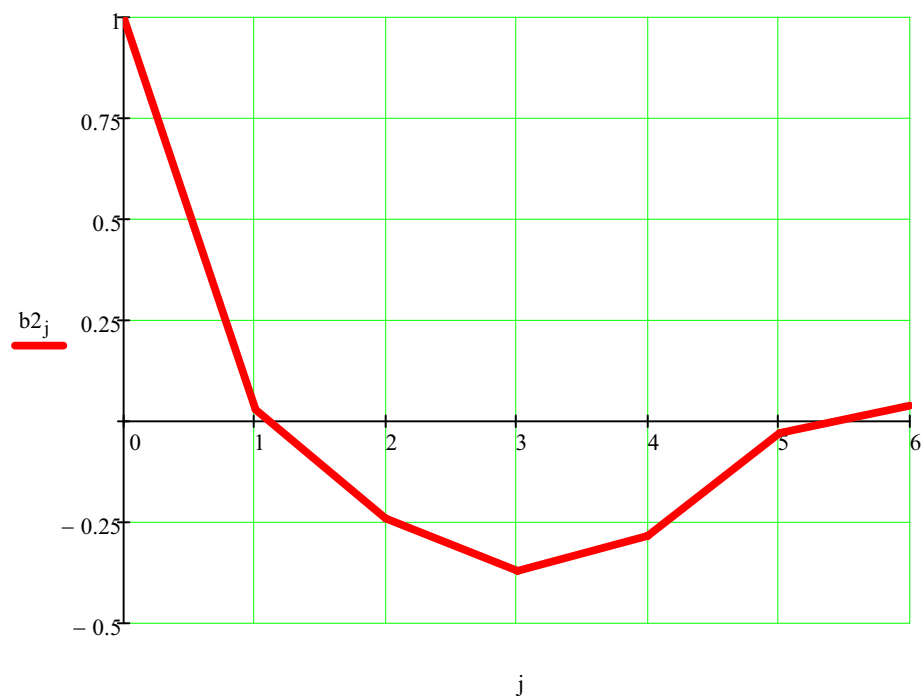
Vlastní frekvence:

$$N_{2\_V2} := \frac{\Omega_{V2_4}}{2 \cdot \pi}$$

$$N_{2\_V2} = 622.9 \text{ Hz}$$

$$N_{2\_V2} = 37375 \text{ min}^{-1}$$

Vlastní tvar:



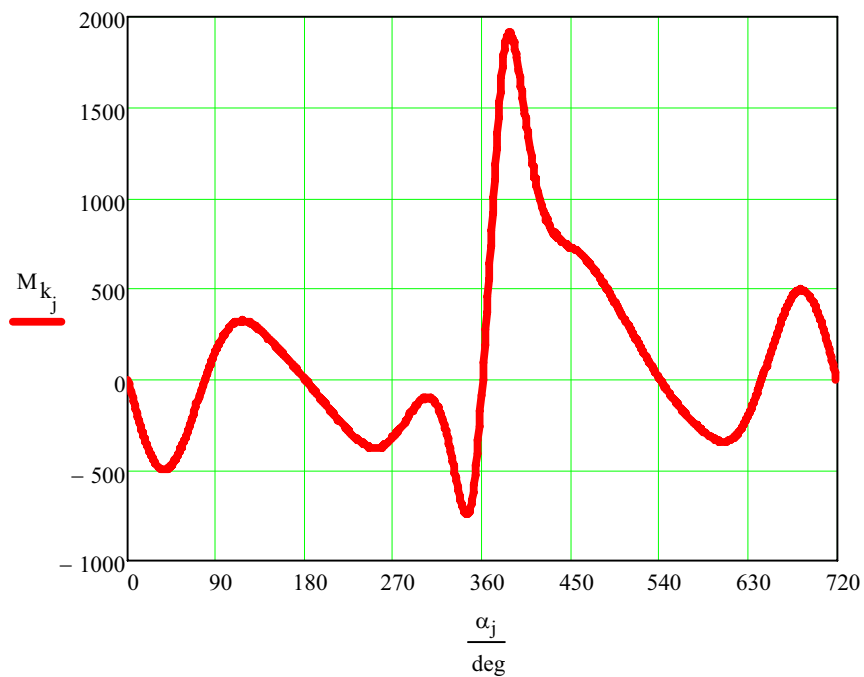
## Vynucené torzní kmitání soustavy:

Budící momenty a jejich harmonická analýza:

Načtení krouticího momentu:      moment := READPRN("Mk.dat" )      Nm := J

Počet vzorků:       $n_{\text{max}} := 720$        $M_k := \text{moment Nm}$

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



Furierova analýza krouticího momentu v komplexním oboru:

$i := 0..5$        $k := 0, 1..20$        $\kappa := 0, 0.5..10$

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

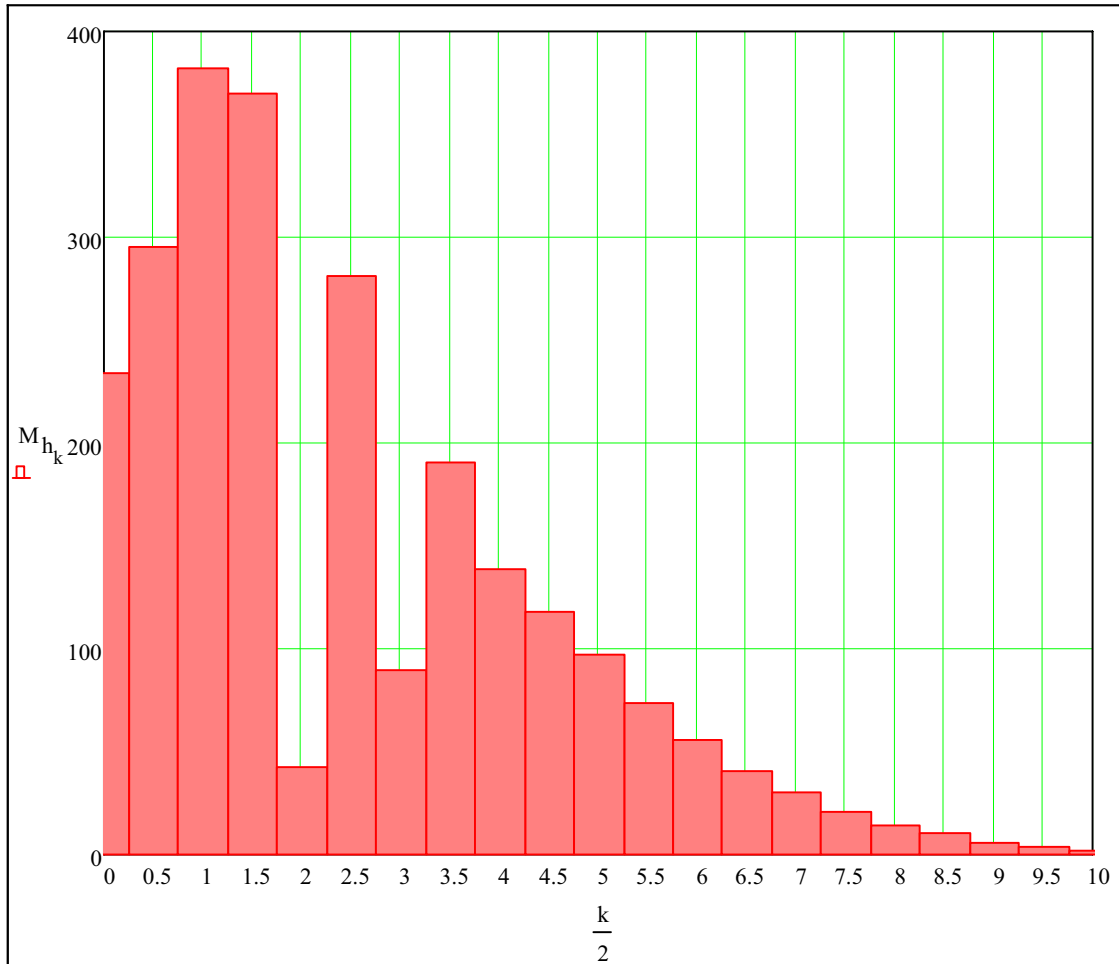
Reálná složka:       $a_{h_k} := \text{Re}(h_k)$

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

Absolutní hodnota:       $M_{h_k} := |h_k|$

| $\kappa =$ | $\frac{k}{2} =$ | $\frac{\text{Re}(h_k)}{Nm} =$ | $\frac{\text{Im}(h_k)}{Nm} =$ | $\frac{ h_k }{Nm} =$ |
|------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------|
| 0          | 0               | 233.94                        | 0                             | 233.94               |
| 0.5        | 0.5             | -212.808                      | -204.077                      | 294.847              |
| 1          | 1               | 123.835                       | 361.053                       | 381.699              |
| 1.5        | 1.5             | -32.142                       | -367.939                      | 369.34               |
| 2          | 2               | -13.065                       | -40.209                       | 42.278               |
| 2.5        | 2.5             | 40.454                        | -278.096                      | 281.023              |
| 3          | 3               | -51.691                       | 73.654                        | 89.982               |
| 3.5        | 3.5             | 61.989                        | -180.131                      | 190.499              |
| 4          | 4               | -61.755                       | 124.018                       | 138.543              |
| 4.5        | 4.5             | 55.396                        | -104.636                      | 118.395              |
| 5          | 5               | -51.675                       | 82.656                        | 97.479               |
| 5.5        | 5.5             | 43.96                         | -58.527                       | 73.197               |
| 6          | 6               | -36.312                       | 42.283                        | 55.735               |
| 6.5        | 6.5             | 28.66                         | -28.683                       | 40.548               |
| 7          | 7               | -22.524                       | 20.202                        | 30.257               |
| 7.5        | 7.5             | 16.587                        | -12.502                       | 20.771               |
| 8          | 8               | -12                           | 8.062                         | 14.457               |
| 8.5        | 8.5             | 9.233                         | -4.616                        | 10.322               |
| 9          | 9               | -5.429                        | 2.577                         | 6.009                |
| 9.5        | 9.5             | 3.789                         | -0.869                        | 3.888                |
| 10         | 10              | -1.435                        | 0.242                         | 1.456                |

Amplitudo-frekvenční charakteristika točivého momentu:



Kritické otáčky:

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

Kritické otáčky první vlastní frekvence:

$$n_{kr}(\kappa) := \frac{N_1}{\kappa}$$

$$n_{kr\_V2}(\kappa) := \frac{N_{1\_V2}}{\kappa}$$

Kritické otáčky druhé vlastní frekvence:

$$n_{kr2}(\kappa) := \frac{N_2}{\kappa}$$

$$n_{kr2\_V2}(\kappa) := \frac{N_{2\_V2}}{\kappa}$$

| $\kappa =$ | $\frac{n_{kr}(\kappa)}{\min^{-1}} =$ | $\frac{n_{kr2}(\kappa)}{\min^{-1}} =$ | $\frac{n_{kr\_V2}(\kappa)}{\min^{-1}} =$ | $\frac{n_{kr2\_V2}(\kappa)}{\min^{-1}} =$ |
|------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--|---|
| 0.5        | 33570                                | 75343                                 | 33488                                    | 74749                                     |
| 1          | 16785                                | 37672                                 | 16744                                    | 37375                                     |
| 1.5        | 11190                                | 25114                                 | 11163                                    | 24916                                     |
| 2          | 8392                                 | 18836                                 | 8372                                     | 18687                                     |
| 2.5        | 6714                                 | 15069                                 | 6698                                     | 14950                                     |
| 3          | 5595                                 | 12557                                 | 5581                                     | 12458                                     |
| 3.5        | 4796                                 | 10763                                 | 4784                                     | 10678                                     |
| 4          | 4196                                 | 9418                                  | 4186                                     | 9344                                      |
| 4.5        | 3730                                 | 8371                                  | 3721                                     | 8305                                      |
| 5          | 3357                                 | 7534                                  | 3349                                     | 7475                                      |
| 5.5        | 3052                                 | 6849                                  | 3044                                     | 6795                                      |
| 6          | 2797                                 | 6279                                  | 2791                                     | 6229                                      |
| 6.5        | 2582                                 | 5796                                  | 2576                                     | 5750                                      |
| 7          | 2398                                 | 5382                                  | 2392                                     | 5339                                      |
| 7.5        | 2238                                 | 5023                                  | 2233                                     | 4983                                      |
| 8          | 2098                                 | 4709                                  | 2093                                     | 4672                                      |
| 8.5        | 1975                                 | 4432                                  | 1970                                     | 4397                                      |
| 9          | 1865                                 | 4186                                  | 1860                                     | 4153                                      |
| 9.5        | 1767                                 | 3965                                  | 1763                                     | 3934                                      |
| 10         | 1678                                 | 3767                                  | 1674                                     | 3737                                      |

Relativní vydatnost rezonančních kmitů:

Úhel mezi rozestupy zážehu:

$$\delta := \frac{720}{i_v}$$

$$\delta = 144$$

$$i := 1..5$$

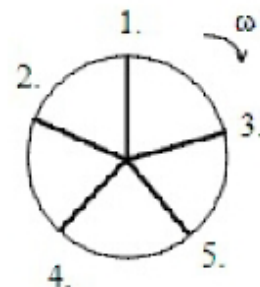
První vlastní frekvence:

**k=0,5; 3; 5,5; 8**

Harmonická složka:

$$\kappa := 0.5$$

$$\sigma := \kappa \cdot \delta \quad \sigma = 72$$



$$\underline{\underline{\sigma}} :=$$

|     |
|-----|
| 0   |
| 72  |
| 288 |
| 144 |
| 216 |

Vydatnost rezonance:

$$\varepsilon_{1,0.5} := \sqrt{\left[ \sum_i (a_{1_i} \cdot \cos(\sigma_i)) \right]^2 + \left[ \sum_i (a_{1_i} \cdot \sin(\sigma_i)) \right]^2}$$

$$\varepsilon_{1,0.5} = 0.735$$

**k=1; 3,5; 6; 8,5**

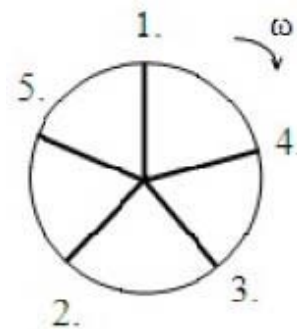
Harmonická složka:

$$\underline{\underline{\kappa}} := 1$$

$$\sigma := \kappa \cdot \delta \quad \sigma = 144$$

$$\underline{\underline{\sigma}} :=$$

|     |
|-----|
| 0   |
| 144 |
| 216 |
| 288 |
| 72  |



Vydatnost rezonance:

$$\varepsilon_{1,1} := \sqrt{\left[ \sum_i (a_{1_i} \cdot \cos(\sigma_i)) \right]^2 + \left[ \sum_i (a_{1_i} \cdot \sin(\sigma_i)) \right]^2}$$

$$\varepsilon_{1,1} = 1.287$$

**k=1,5; 4; 6,5; 9**

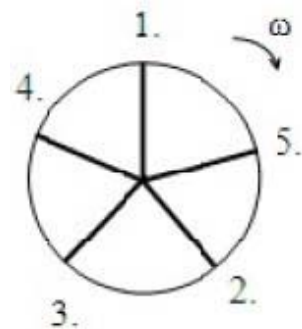
Harmonická složka:

$$\underline{\underline{\kappa}} := 1.5$$

$$\sigma := \kappa \cdot \delta \quad \sigma = 216$$

$$\underline{\underline{\sigma}} :=$$

|     |
|-----|
| 0   |
| 216 |
| 144 |
| 72  |
| 288 |





Vydatnost rezonance:

$$\varepsilon_{1_1.5} := \sqrt{\left[ \sum_i (a_{1_i} \cdot \cos(\sigma_i)) \right]^2 + \left[ \sum_i (a_{1_i} \cdot \sin(\sigma_i)) \right]^2}$$

$$\varepsilon_{1_1.5} = 0.626$$

**k=2; 4,5; 7; 9,5**

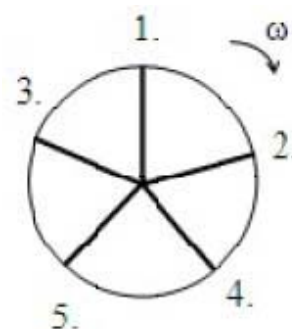
Harmonická složka:

$$k_{\omega} := 2$$

$$\sigma := k \cdot \delta \quad \sigma = 288$$

$$\sigma_{\omega} :=$$

|     |
|-----|
| 0   |
| 288 |
| 72  |
| 216 |
| 144 |



Vydatnost rezonance:

$$\varepsilon_{1_2} := \sqrt{\left[ \sum_i (a_{1_i} \cdot \cos(\sigma_i)) \right]^2 + \left[ \sum_i (a_{1_i} \cdot \sin(\sigma_i)) \right]^2}$$

$$\varepsilon_{1_2} = 0.567$$

**k=2,5; 5; 7,5; 10**

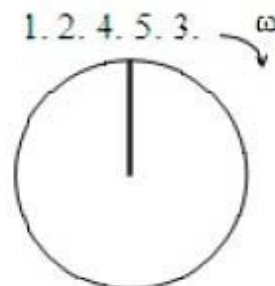
Harmonická složka:

$$k_{\omega} := 2.5$$

$$\sigma := k \cdot \delta \quad \sigma = 360$$

$$\sigma_{\omega} :=$$

|   |
|---|
| 0 |
| 0 |
| 0 |
| 0 |
| 0 |



Vydatnost rezonance:

$$\varepsilon_{1_2.5} := \sqrt{\left[ \sum_i (a_{1_i} \cdot \cos(\sigma_i)) \right]^2 + \left[ \sum_i (a_{1_i} \cdot \sin(\sigma_i)) \right]^2}$$

$$\varepsilon_{1_2.5} = 1.963$$

Druhá vlastní frekvence:

**k=0,5; 3; 5,5; 8**

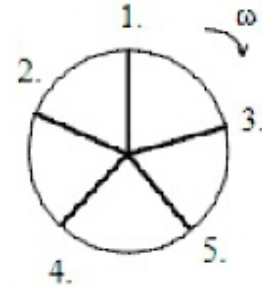
Harmonická složka:

$$\kappa_{\omega} := 0.5$$

$$\sigma := \kappa \cdot \delta \quad \sigma = 72$$

$$\sigma_{\omega} :=$$

|     |
|-----|
| 0   |
| 72  |
| 288 |
| 144 |
| 216 |



Vydatnost rezonance:

$$\varepsilon_{2_0.5} := \sqrt{\left[ \sum_i (a_{2_i}^2 \cdot \cos(\sigma_i)) \right]^2 + \left[ \sum_i (a_{2_i}^2 \cdot \sin(\sigma_i)) \right]^2}$$

$$\varepsilon_{2_0.5} = 0.404$$

**k=1; 3,5; 6; 8,5**

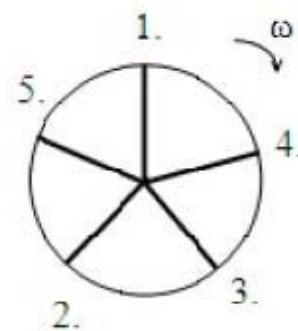
Harmonická složka:

$$\kappa_{\omega} := 1$$

$$\sigma := \kappa \cdot \delta \quad \sigma = 144$$

$$\sigma_{\omega} :=$$

|     |
|-----|
| 0   |
| 144 |
| 216 |
| 288 |
| 72  |



Vydatnost rezonance:

$$\varepsilon_{2_1} := \sqrt{\left[ \sum_i (a_{2_i}^2 \cdot \cos(\sigma_i)) \right]^2 + \left[ \sum_i (a_{2_i}^2 \cdot \sin(\sigma_i)) \right]^2}$$

$$\varepsilon_{2_1} = 0.101$$

**k=1,5; 4; 6,5; 9**

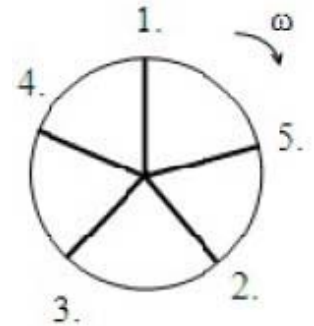
Harmonická složka:

$$\kappa := 1.5$$

$$\sigma := \kappa \cdot \delta \quad \sigma = 216$$

$$\sigma_i :=$$

|     |
|-----|
| 0   |
| 216 |
| 144 |
| 72  |
| 288 |



Vydatnost rezonance:

$$\varepsilon_{2_{1.5}} := \sqrt{\left[ \sum_i (a_{2_i} \cdot \cos(\sigma_i)) \right]^2 + \left[ \sum_i (a_{2_i} \cdot \sin(\sigma_i)) \right]^2}$$

$$\varepsilon_{2_{1.5}} = 0.14$$

**k=2; 4,5; 7; 9,5**

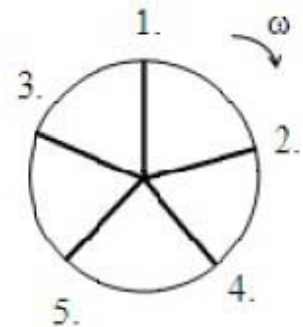
Harmonická složka:

$$\kappa := 2$$

$$\sigma := \kappa \cdot \delta \quad \sigma = 288$$

$$\sigma_i :=$$

|     |
|-----|
| 0   |
| 288 |
| 72  |
| 216 |
| 144 |



Vydatnost rezonance:

$$\varepsilon_{2_2} := \sqrt{\left[ \sum_i (a_{2_i} \cdot \cos(\sigma_i)) \right]^2 + \left[ \sum_i (a_{2_i} \cdot \sin(\sigma_i)) \right]^2}$$

$$\varepsilon_{2_2} = 0.443$$

**k=2,5; 5; 7,5; 10**

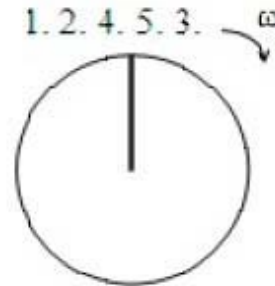
Harmonická složka:

$$\kappa_j := 2.5$$

$$\sigma := \kappa \cdot \delta \quad \sigma = 360$$

$$\sigma_{yy} :=$$

|   |
|---|
| 0 |
| 0 |
| 0 |
| 0 |
| 0 |



Vydatnost rezonance:

$$\varepsilon_{2\_2.5} := \sqrt{\left[ \sum_i (a_{2\_i} \cdot \cos(\sigma_i)) \right]^2 + \left[ \sum_i (a_{2\_i} \cdot \sin(\sigma_i)) \right]^2} \quad \varepsilon_{2\_2.5} = 0.899$$

Přehled vydatnosti rezonance:

Relativní vydatnost 1. vlastní frekvence:

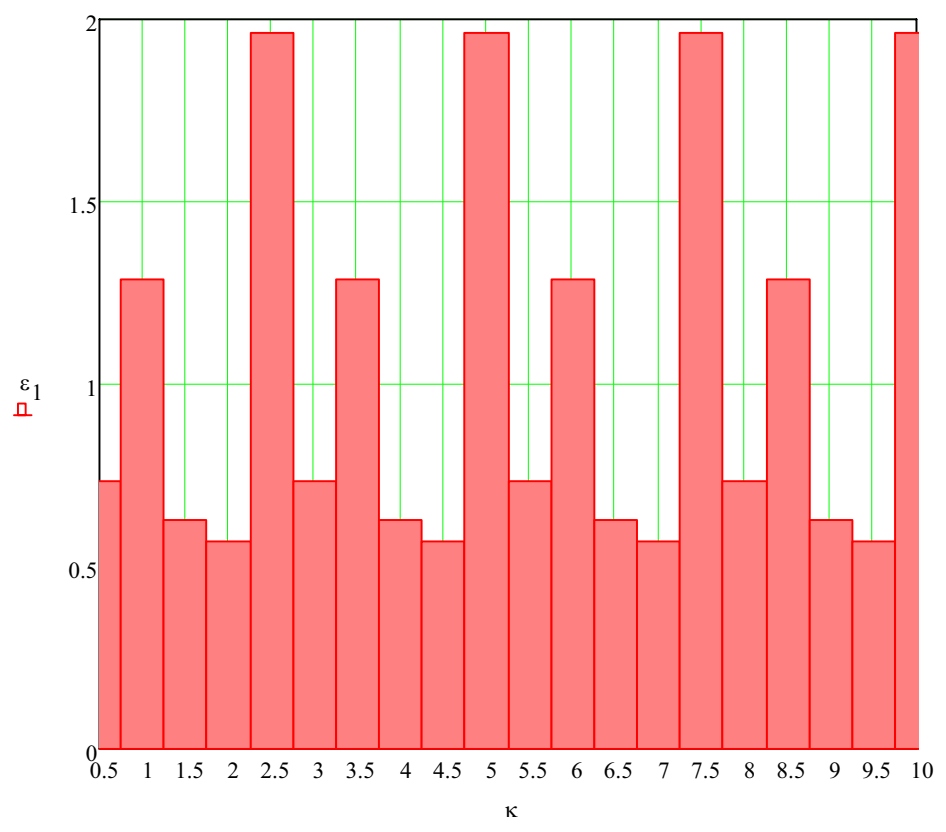
$$\varepsilon_{pr1} := \begin{pmatrix} \varepsilon_{1\_0.5} \\ \varepsilon_{1\_1} \\ \varepsilon_{1\_1.5} \\ \varepsilon_{1\_2} \\ \varepsilon_{1\_2.5} \end{pmatrix} \quad \varepsilon_{pr1} = \begin{pmatrix} 0.735 \\ 1.287 \\ 0.626 \\ 0.567 \\ 1.963 \end{pmatrix} \quad \max(\varepsilon_{pr1}) = 1.963$$

Relativní vydatnost 2. vlastní frekvence:

$$\varepsilon_{pr2} := \begin{pmatrix} \varepsilon_{2\_0.5} \\ \varepsilon_{2\_1} \\ \varepsilon_{2\_1.5} \\ \varepsilon_{2\_2} \\ \varepsilon_{2\_2.5} \end{pmatrix} \quad \varepsilon_{pr2} = \begin{pmatrix} 0.404 \\ 0.101 \\ 0.14 \\ 0.443 \\ 0.899 \end{pmatrix} \quad \max(\varepsilon_{pr2}) = 0.899$$

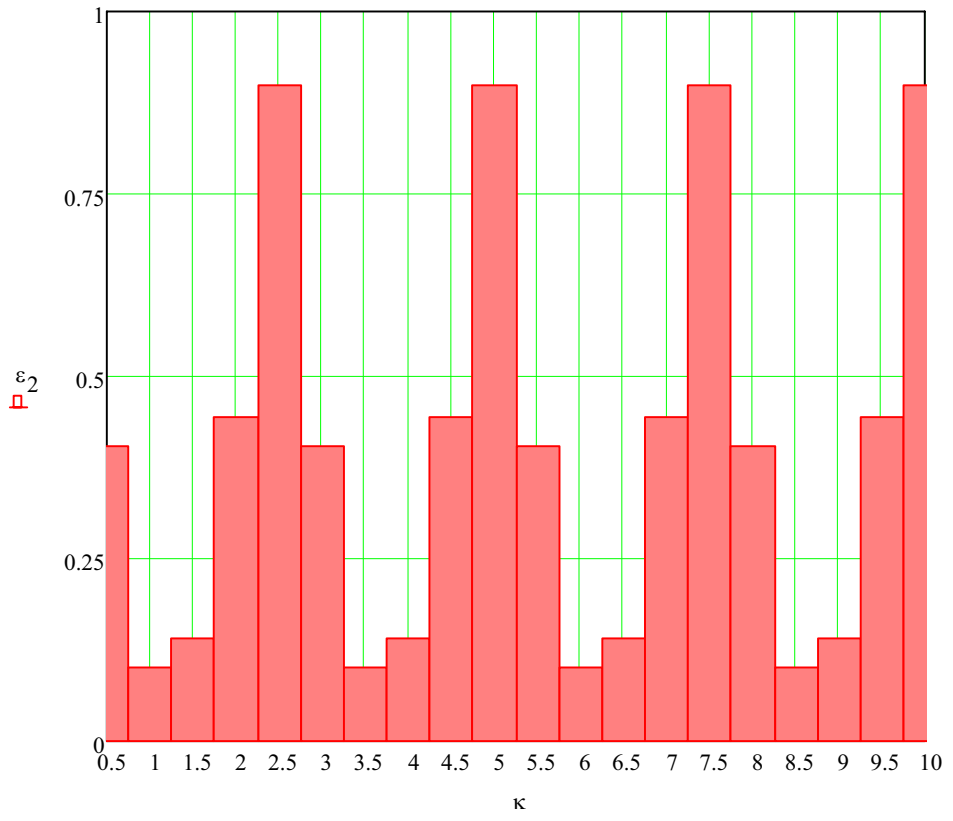
$\varepsilon_1 :=$ 
 $\left( \begin{array}{l} \varepsilon_{1\_0.5} \\ \varepsilon_{1\_1} \\ \varepsilon_{1\_1.5} \\ \varepsilon_{1\_2} \\ \varepsilon_{1\_2.5} \\ \varepsilon_{1\_0.5} \\ \varepsilon_{1\_1} \\ \varepsilon_{1\_1.5} \\ \varepsilon_{1\_2} \\ \varepsilon_{1\_2.5} \\ \varepsilon_{1\_0.5} \\ \varepsilon_{1\_1} \\ \varepsilon_{1\_1.5} \\ \varepsilon_{1\_2} \\ \varepsilon_{1\_2.5} \\ \varepsilon_{1\_0.5} \\ \varepsilon_{1\_1} \\ \varepsilon_{1\_1.5} \\ \varepsilon_{1\_2} \\ \varepsilon_{1\_2.5} \end{array} \right)$

Závislost vydatnosti rezonancí na řádu harmonické složky první vlastní frekvence:



$\varepsilon_2 :=$ 
 $\left( \begin{array}{l} \varepsilon_{2\_0.5} \\ \varepsilon_{2\_1} \\ \varepsilon_{2\_1.5} \\ \varepsilon_{2\_2} \\ \varepsilon_{2\_2.5} \\ \varepsilon_{2\_0.5} \\ \varepsilon_{2\_1} \\ \varepsilon_{2\_1.5} \\ \varepsilon_{2\_2} \\ \varepsilon_{2\_2.5} \\ \varepsilon_{2\_0.5} \\ \varepsilon_{2\_1} \\ \varepsilon_{2\_1.5} \\ \varepsilon_{2\_2} \\ \varepsilon_{2\_2.5} \end{array} \right)$

Závislost vydatnosti rezonancí na řádu harmonické složky druhé vlastní frekvence:



Torzní výchylky v rezonanci:

Velikost tlumícího odporu:

$$\xi := 2.6 \frac{\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{sec}}{\text{rad}}$$

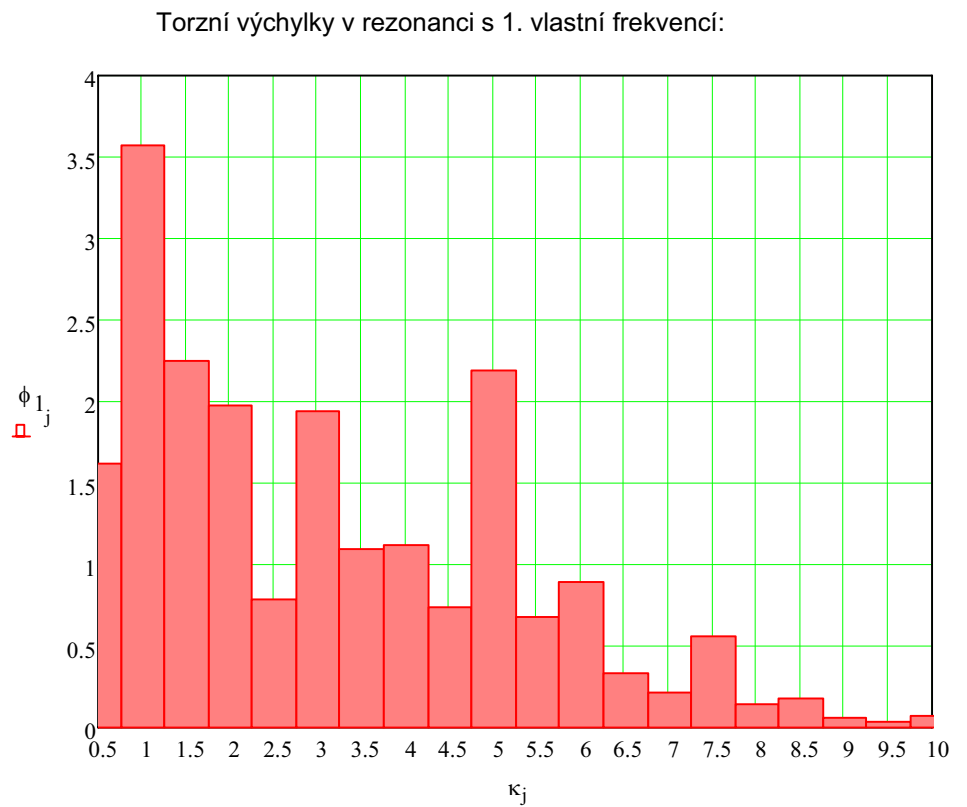
První vlastní frekvence:

$$\phi_{1j} := \frac{M_{h_j} \cdot \varepsilon_{1j}}{\xi \cdot \Omega_j \cdot \left[ \sum_i (a_{1i})^2 \right]} \cdot \frac{180}{\pi}$$

$\kappa_j =$

|     |        |
|-----|--------|
| 0.5 | 1.6201 |
| 1   | 3.5754 |
| 1.5 | 2.2508 |
| 2   | 1.9718 |
| 2.5 | 0.7818 |
| 3   | 1.9462 |
| 3.5 | 1.0911 |
| 4   | 1.1233 |
| 4.5 | 0.7396 |
| 5   | 2.1893 |
| 5.5 | 0.6751 |
| 6   | 0.8876 |
| 6.5 | 0.3287 |
| 7   | 0.2165 |
| 7.5 | 0.5595 |
| 8   | 0.1438 |
| 8.5 | 0.1753 |
| 9   | 0.0609 |
| 9.5 | 0.0321 |
| 10  | 0.0719 |

$\phi_{1j} =$



Druhá vlastní frekvence:

$$\phi_{2j} := \frac{M_{h_j} \cdot \varepsilon_{2j}}{\xi \cdot \Omega_4 \cdot \left[ \sum_i (a_{2i})^2 \right]} \cdot \frac{180}{\pi}$$

| $\kappa_j =$ | $\phi_{2j} =$ |
|--------------|---------------|
| 0.5          | 1.9017        |
| 1            | 0.6006        |
| 1.5          | 1.0775        |
| 2            | 3.2892        |
| 2.5          | 0.7636        |
| 3            | 2.2844        |
| 3.5          | 0.1833        |
| 4            | 0.5378        |
| 4.5          | 1.2338        |
| 5            | 2.1384        |
| 5.5          | 0.7924        |
| 6            | 0.1491        |
| 6.5          | 0.1573        |
| 7            | 0.3611        |
| 7.5          | 0.5465        |
| 8            | 0.1688        |
| 8.5          | 0.0295        |
| 9            | 0.0291        |
| 9.5          | 0.0535        |
| 10           | 0.0702        |

Torzní výchylky v rezonanci s 2. vlastní frekvencí:

