



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

PŘÍLOHA

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. TOMÁŠ SLAVÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. LUBOR ZHÁŇAL

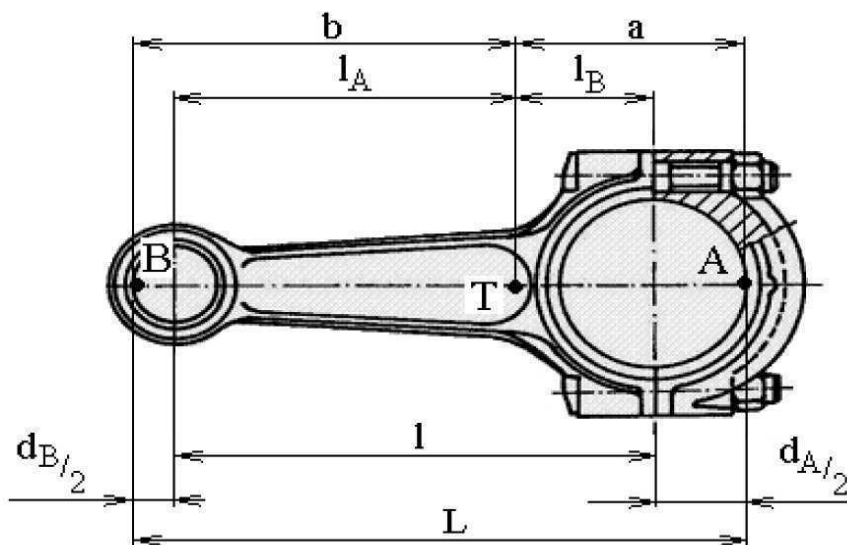
BRNO 2010

Obsah

1) Redukce ojnice	1
1.1) Výpočet tříbodové redukce ojnice.....	1
1.2) Přepočet tříbodové redukce ojnice na dvoubodovou	2
2) Výpočet parametrů náhradní torzní soustavy pro čtyřválcový řadový motor	3
2.1) Redukce hmot.....	3
2.1.1) Redukce hmot zalomení klikového hřídele.....	4
2.1.2) Redukce hmot na straně setrvačnicku.....	4
2.1.3) Redukce hmot na straně řemenice	5
2.2) Redukce délek klikového hřídele	5
2.2.1) Výpočet redukované délky zalomení klikového hřídele	6
2.2.2) Výpočet redukované délky konce klikového hřídele na straně setrvačnicku	6
2.2.3) Výpočet redukované délky konce klikového hřídele na straně řemenice	6
2.3) Výpočet torzní tuhosti	6
2.3.1) Výpočet polárního kvadratického momentu	7
2.3.2) Výpočet torzní tuhosti konce klikového hřídele na straně setrvačnicku.....	7
2.3.3) Výpočet torzní tuhosti zalomení klikového hřídele	7
2.3.4) Výpočet torzní tuhosti konce klikového hřídele na straně řemenice.....	7
2.4) Výsledky pro čtyřválcový řadový motor.....	8
3) Výpočet parametrů náhradní torzní soustavy pro vidlicové motory	9
3.1) Redukce hmot.....	9
3.1.1) Redukce hmot zalomení klikového hřídele.....	10
3.1.2) Redukce hmot na straně setrvačnicku.....	11
3.1.3) Redukce hmot na straně řemenice	11
3.2) Redukce délek klikového hřídele	11
3.2.1) Výpočet redukované délky zalomení klikového hřídele	12
3.2.2) Výpočet redukované délky konce klikového hřídele na straně setrvačnicku	12
3.2.3) Výpočet redukované délky konce klikového hřídele na straně řemenice	12
3.3) Výpočet torzní tuhosti	12
3.3.1) Výpočet polárního kvadratického momentu	13
3.3.2) Výpočet torzní tuhosti konce klikového hřídele na straně setrvačnicku.....	13
3.3.3) Výpočet torzní tuhosti zalomení klikového hřídele	13
3.3.4) Výpočet torzní tuhosti konce klikového hřídele na straně řemenice.....	13

3.4) Výsledky pro šestiválcový vidlicový motor.....	14
3.5) Výsledky pro osmiválcový vidlicový motor	15
4) Kinematika, průběhy sil a momentů v klikovém ústrojí.....	16
4.1) Dráha pístu	16
4.1.1) Dráha pístu	16
4.1.2) 1. harmonická složka dráhy pístu.....	16
4.1.3) 2. harmonická složka dráhy pístu.....	16
4.2) Rychlost pístu.....	17
4.2.1) Rychlost pístu	17
4.2.2) 1. harmonická složka rychlosti pístu	17
4.2.3) 2. harmonická složka rychlosti pístu.....	17
4.3) Zrychlení pístu	18
4.3.1) Zrychlení pístu	18
4.3.2) 1. harmonická složka zrychlení pístu.....	18
4.3.3) 2. harmonická složka zrychlení pístu.....	18
4.4) P-alfa digram, p-V diagram.....	19
4.4.1) P-alfa diagram	19
4.4.2) P-V diagram.....	19
4.5) Průběhy sil v klikovém ústrojí	21
4.5.1) Síly působící na pístní čep v ose válce.....	21
4.5.2) Síly přenášené ojnicí.....	22
4.5.3) Síly v ojničném čepu	25
4.6) Krouticí moment na jedno zalomení klikového hřídele	27
Seznam použitých označení	29

1) Redukce ojnice



Parametry ojnice:

Hmotnost ojnice (Pro Engineer):

$$m_o := 0.441 \cdot \text{kg}$$

Délka ojnice:

$$l := 110 \cdot \text{mm}$$

Moment setrvačnosti (Pro enginer):

$$J_T := 1.0760 \cdot 1000 \text{kg} \cdot \text{mm}^2 = 1.076 \times 10^{-3} \text{m}^2 \cdot \text{kg}$$

$$I_B := 27 \text{mm (Pro Engineer)}$$

$$l_A := l - l_B$$

$$l_A = 83 \cdot \text{mm}$$

$$L := l + \frac{D_{H1}}{2} + \frac{D_{D11}}{2}$$

$$L = 136 \cdot \text{mm}$$

1.1) Výpočet třibodové redukce ojnice

$$m = m_A + m_B + m_T$$

$$m_A \cdot l_A = m_B \cdot l_B$$

$$m_A = m_B \cdot \frac{l_B}{l_A}$$

$$J_T = m_A \cdot l_A^2 + m_B \cdot l_B^2$$

První rovnici dosadím do rovnice druhé a vyjádřím jedinou neznámou:

$$m_B = \frac{J_T - m_B \cdot l_A \cdot l_B}{l_B^2}$$

$$m_B := \frac{J_T}{l_B^2 + l_A \cdot l_B} \quad m_B = 0.362 \text{ kg}$$

Poté dopočítám zbylé neznámé:

$$m_A := m_B \cdot \frac{l_B}{l_A} \quad m_A = 0.118 \text{ kg}$$

$$m_T := m_0 - m_A - m_B \quad m_T = -0.039 \text{ kg}$$

1.2) Přepočítání třibodové redukce ojnice na redukci dvoubodovou:

$$m_{A2} := m_A + m_T \cdot \frac{l_B}{L} \quad m_{A2} = 0.11 \text{ kg}$$

$$m_{B2} := m_B + m_T \cdot \frac{l_A}{L} \quad m_{B2} = 0.338 \text{ kg}$$

2) Výpočet parametrů náhradní torzní soustavy čtyřválcového řadového motoru

2.1) Redukce hmot

Hodnoty pro výpočty redukce hmotnostních momentů setrvačnosti:

Hmotnost rotační části ojnice:	$m_{\text{rot_ojnice}} := 0.338 \cdot \text{kg}$
Hmotnost posuvné části ojnice:	$m_{\text{posuv_ojnice}} := 0.11 \cdot \text{kg}$
Poloměr zalomení klikového hřídele:	$r := 0.033 \cdot \text{m}$
Moment setrvačnosti zalomení klikového hřídele:	$I_{i_zalomeni} := 0.00418 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2$
Hmotnost pístní skupiny:	$m_{\text{pist_skup}} := 0.55 \cdot \text{kg}$
Moment setrvačnosti setrvačnicku:	$I_{\text{setrvac}} := 0.09983 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2$
Moment setrvačnosti konce klikového hřídele pro upevnění setrvačnicku:	$I_{\text{upev_setrvac}} := 0.00199 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2$
Moment setrvačnosti řemenice:	$I_{\text{remen}} := 0.00271 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2$
Moment setrvačnosti konce klikového hřídele na straně řemenice:	$I_{\text{upev_remen}} := 0.000172 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2$
Ojniční poměr:	$\lambda := 0.3$

2.1.1) Redukce hmot zalomení klikového hřídele

a) Momenty setrvačnosti rotačních částí:

Výpočet momentu setrvačnosti rotační části ojnice:

$$I_{\text{rot_ojnice}} := m_{\text{rot_ojnice}} \cdot r^2$$

$$I_{\text{rot_ojnice}} = 3.681 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

Výpočet momentu setrvačnosti zalomení klikového hřídele:

$$I_{\text{i_zalomeni}} = 4.18 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

b) Moment setrvačnosti posuvných částí:

Výpočet momentu setrvačnosti posuvných částí

$$I_{\text{posuv}} := \left[(m_{\text{pist_skup}} + m_{\text{posuv_ojnice}}) \cdot \left(\frac{\lambda}{16} \right) \right] \cdot r^2$$

$$I_{\text{posuv}} = 1.348 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

c) Moment setrvačnosti i-tého klikového mechanismu

$$I_{\text{i_klik_mech}} := I_{\text{i_zalomeni}} + I_{\text{rot_ojnice}} + I_{\text{posuv}}$$

$$I_{\text{i_klik_mech}} = 4.562 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

2.1.2) Redukce hmot na straně setrvačnicku

$$I_{\text{celk_setrvac}} := I_{\text{setrvac}} + I_{\text{upev_setrvac}}$$

$$I_{\text{celk_setrvac}} = 0.102 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

2.1.3) Redukce hmot na straně řemenice

$$I_{\text{celk_remen}} := I_{\text{remen}} + I_{\text{upev_remen}}$$

$$I_{\text{celk_remen}} = 2.882 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

2.2) Redukce délek klikového hřídele:

Hodnoty pro výpočet redukce délek klikového hřídele:

Průměr hlavního čepu:	$D_{\text{HC}} := 0.052 \cdot \text{m}$
Redukovaný průměr:	$D_{\text{red}} := 0.052 \cdot \text{m}$
Průměr ojničního čepu:	$D_{\text{KC}} := 0.039 \cdot \text{m}$
Šířka hlavního čepu:	$b_{\text{HC}} := 0.026 \cdot \text{m}$
Šířka ojničního čepu:	$b_{\text{KC}} := 0.026 \cdot \text{m}$
Šířka ramene zalomení:	$h := 0.013 \cdot \text{m}$
Tloušťka ramene zalomení:	$b := 0.06318 \cdot \text{m}$
Šířka příruby pro setrvačnick:	$b_{\text{pr}} := 0.018 \cdot \text{m}$
Roztečný průměr pro šrouby setrvačnicku:	$d_{\text{roztec}} := 0.075 \cdot \text{m}$
Šířka konce klikového hřídele na straně řemenice:	$b_{\text{rem}} := 0.108 \text{m}$

2.2.1) Výpočet redukované délky zalomení klikového hřídele:

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

$$l_{\text{red}} = 0.958 \text{ m}$$

2.2.2) Výpočet redukované délky konce klikového hřídele na straně setrvačníku

$$l_{\text{red_setrvac}} := \frac{b_{\text{HC}}}{2} + b_{\text{pr}} \cdot \frac{D_{\text{red}}^4}{d_{\text{roztec}}^4} + l_{\text{red}} \cdot \frac{1}{2}$$

$$l_{\text{red_setrvac}} = 0.496 \text{ m}$$

2.2.3) Výpočet redukované délky konce klikového hřídele na straně řemenice

$$l_{\text{red_remen}} := \frac{b_{\text{rem}}}{2} + \frac{1}{2} \cdot l_{\text{red}}$$

$$l_{\text{red_remen}} = 0.533 \text{ m}$$

2.3) Výpočet torzní tuhosti

Hodnoty pro výpočet torzní tuhosti:

Modul pružnosti ve smyku:

$$G := 0.83 \cdot 10^{11} \cdot \text{Pa}$$

2.3.1) Výpočet polárního kvadratického momentu:

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

$$I_p = 7.178 \times 10^{-7} \text{ m}^4$$

2.3.2) Výpočet torzní tuhosti konce klikového hřídele na straně setrvačníku

$$c_{\text{setrvac}} := \frac{G \cdot I_p}{l_{\text{red_setrvac}}}$$

$$c_{\text{setrvac}} = 1.201 \times 10^5 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$$

2.3.3) Výpočet torzní tuhosti zalomení klikového hřídele

$$c_{\text{zalomeni}} := \frac{G \cdot I_p}{l_{\text{red}}}$$

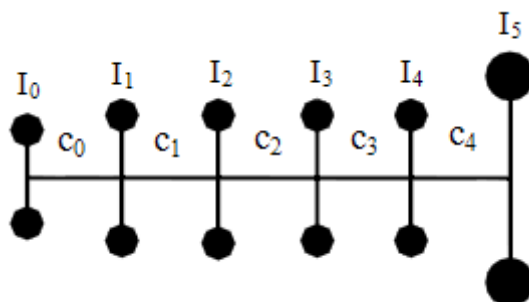
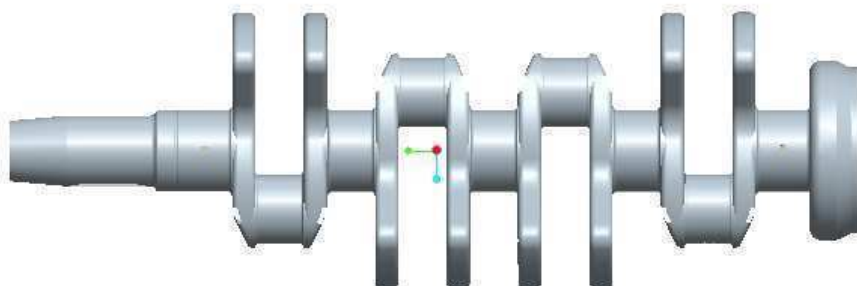
$$c_{\text{zalomeni}} = 6.219 \times 10^4 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$$

2.3.4) Výpočet torzní tuhosti konce klikového hřídele na straně řemenice

$$c_{\text{remen}} := \frac{G \cdot I_p}{l_{\text{red_remen}}}$$

$$c_{\text{remen}} = 1.118 \times 10^5 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$$

2.4) Výsledky pro čtyřválcový řadový motor:



I	0	1	2	3	4	5
[kg mm ²]	2882	4562	4562	4562	4562	102000

c	0	1	2	3	4
[Nm rad ⁻¹]	111800	62190	62190	62190	120100

3) Výpočet parametrů náhradní torzní soustavy vidlicových motorů

3.1) Redukce hmot

Hodnoty pro výpočty redukce hmotnostních momentů setrvačnosti:

Hmotnost rotační části ojnice:

$$m_{\text{rot_ojnice}} := 0.676 \cdot \text{kg}$$

Hmotnost posuvné části ojnice:

$$m_{\text{posuv_ojnice}} := 0.22 \cdot \text{kg}$$

Poloměr zalomení klikového hřídele:

$$r := 0.033 \cdot \text{m}$$

Moment setrvačnosti zalomení klikového hřídele:

$$I_{i_zalomeni} := 0.00687 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

Hmotnost pístní skupiny:

$$m_{\text{pist_skup}} := 1.1 \cdot \text{kg}$$

Moment setrvačnosti setrvačnicku:

$$I_{\text{setrvac}} := 0.09983 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

Moment setrvačnosti konce klikového hřídele pro upevnění setrvačnicku:

$$I_{\text{upev_setrvac}} := 0.00199 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

Moment setrvačnosti řemenice:

$$I_{\text{remen}} := 0.00271 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

Moment setrvačnosti konce klikového hřídele na straně řemenice:

$$I_{\text{upev_remen}} := 0.000172 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

Ojniční poměr:

$$\lambda := 0.3$$

3.1.1) Redukce hmot zalomení klikového hřídele

a) Momenty setrvačnosti rotačních částí:

Výpočet momentu setrvačnosti rotační části ojnice:

$$I_{\text{rot_ojnice}} := m_{\text{rot_ojnice}} \cdot r^2$$

$$I_{\text{rot_ojnice}} = 7.362 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

Výpočet momentu setrvačnosti zalomení klikového hřídele:

$$I_{\text{i_zalomeni}} = 6.87 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

b) Moment setrvačnosti posuvných částí:

Výpočet momentu setrvačnosti posuvných částí

$$I_{\text{posuv}} := \left[(m_{\text{pist_skup}} + m_{\text{posuv_ojnice}}) \cdot \left(\frac{\lambda}{16} \right) \right]^2 \cdot r^2$$

$$I_{\text{posuv}} = 2.695 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

c) Moment setrvačnosti i-tého klikového mechanismu

$$I_{\text{i_klik_mech}} := I_{\text{i_zalomeni}} + I_{\text{rot_ojnice}} + I_{\text{posuv}}$$

$$I_{\text{i_klik_mech}} = 7.633 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

3.1.2) Redukce hmot na straně setrvačníku

$$I_{\text{celk_setrvac}} := I_{\text{setrvac}} + I_{\text{upev_setrvac}}$$

$$I_{\text{celk_setrvac}} = 0.102 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

3.1.3) Redukce hmot na straně řemenice

$$I_{\text{celk_remen}} := I_{\text{remen}} + I_{\text{upev_remen}}$$

$$I_{\text{celk_remen}} = 2.882 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

3.2) Redukce délek klikového hřídele:

Hodnoty pro výpočet redukce délek klikového hřídele:

Průměr hlavního čepu:	$D_{\text{HC}} := 0.052 \cdot \text{m}$
Redukovaný průměr:	$D_{\text{red}} := 0.052 \cdot \text{m}$
Průměr ojničního čepu:	$D_{\text{KC}} := 0.039 \cdot \text{m}$
Šířka hlavního čepu:	$b_{\text{HC}} := 0.026 \cdot \text{m}$
Šířka ojničního čepu:	$b_{\text{KC}} := 0.052 \cdot \text{m}$
Šířka ramene zalomení:	$h := 0.014 \cdot \text{m}$
Tloušťka ramene zalomení:	$b := 0.07556 \cdot \text{m}$
Šířka příruby pro setrvačnick:	$b_{\text{pr}} := 0.018 \cdot \text{m}$
Roztečný průměr pro šrouby setrvačnicku:	$d_{\text{roztec}} := 0.075 \cdot \text{m}$
Šířka konce klikového hřídele na straně řemenice:	$b_{\text{rem}} := 0.108 \text{m}$

3.2.1) Výpočet redukované délky zalomení klikového hřídele:

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

$$l_{\text{red}} = 0.782 \text{ m}$$

3.2.2) Výpočet redukované délky konce klikového hřídele na straně setrvačníku

$$l_{\text{red_setrvac}} := \frac{b_{\text{HC}}}{2} + b_{\text{pr}} \cdot \frac{D_{\text{red}}^4}{d_{\text{roztec}}^4} + l_{\text{red}} \cdot \frac{1}{2}$$

$$l_{\text{red_setrvac}} = 0.408 \text{ m}$$

3.2.3) Výpočet redukované délky konce klikového hřídele na straně řemenice

$$l_{\text{red_remen}} := \frac{b_{\text{rem}}}{2} + \frac{1}{2} \cdot l_{\text{red}}$$

$$l_{\text{red_remen}} = 0.445 \text{ m}$$

3.3) Výpočet torzní tuhosti

Hodnoty pro výpočet torzní tuhosti:

Modul pružnosti ve smyku:

$$G := 0.83 \cdot 10^{11} \cdot \text{Pa}$$

3.3.1) Výpočet polárního kvadratického momentu:

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

$$I_p = 7.178 \times 10^{-7} \text{ m}^4$$

3.3.2) Výpočet torzní tuhosti konce klikového hřídele na straně setrvačníku

$$c_{\text{setrvac}} := \frac{G \cdot I_p}{l_{\text{red_setrvac}}}$$

$$c_{\text{setrvac}} = 1.46 \times 10^5 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$$

3.3.3) Výpočet torzní tuhosti zalomení klikového hřídele

$$c_{\text{zalomeni}} := \frac{G \cdot I_p}{l_{\text{red}}}$$

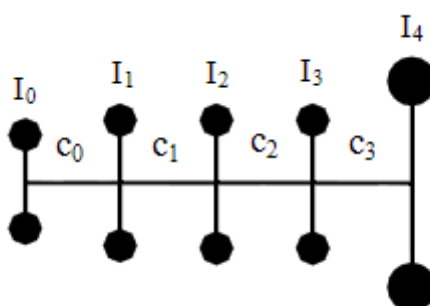
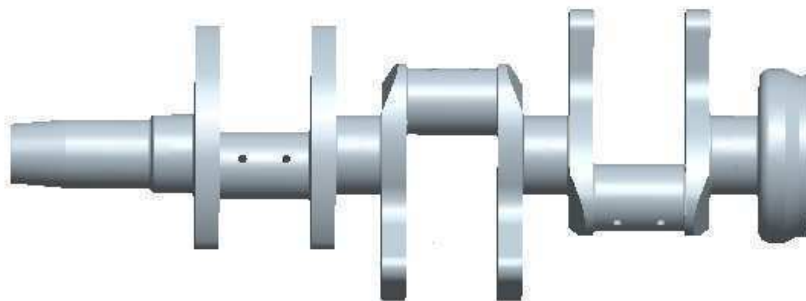
$$c_{\text{zalomeni}} = 7.619 \times 10^4 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$$

3.3.4) Výpočet torzní tuhosti konce klikového hřídele na straně řemenice

$$c_{\text{remen}} := \frac{G \cdot I_p}{l_{\text{red_remen}}}$$

$$c_{\text{remen}} = 1.339 \times 10^5 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$$

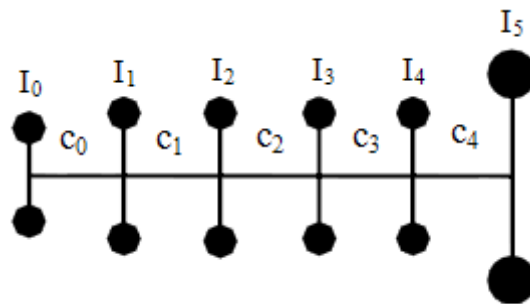
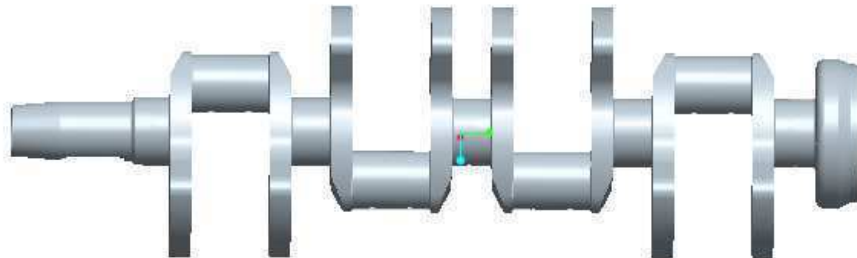
3.4) Výsledky pro šestiválcový vidlicový motor:



I	0	1	2	3	4
[kg mm ²]	2882	7633	7633	7633	102000

c	0	1	2	3
[Nm rad ⁻¹]	133900	76190	76190	146000

3.5) Výsledky pro osmiválcový vidlicový motor:



I	0	1	2	3	4	5
[kg mm ²]	2882	7633	7633	7633	7633	102000

c	0	1	2	3	4
[Nm rad ⁻¹]	133900	76190	76190	76190	146000

4) Kinematika, průběhy sil a momentů v klikovém ústrojí

PP := READPRN("motor.dat")

i := 0,1..719 $\alpha_i := i \text{ deg}$

4.1) Dráha pístu

4.1.1) Dráha pístu

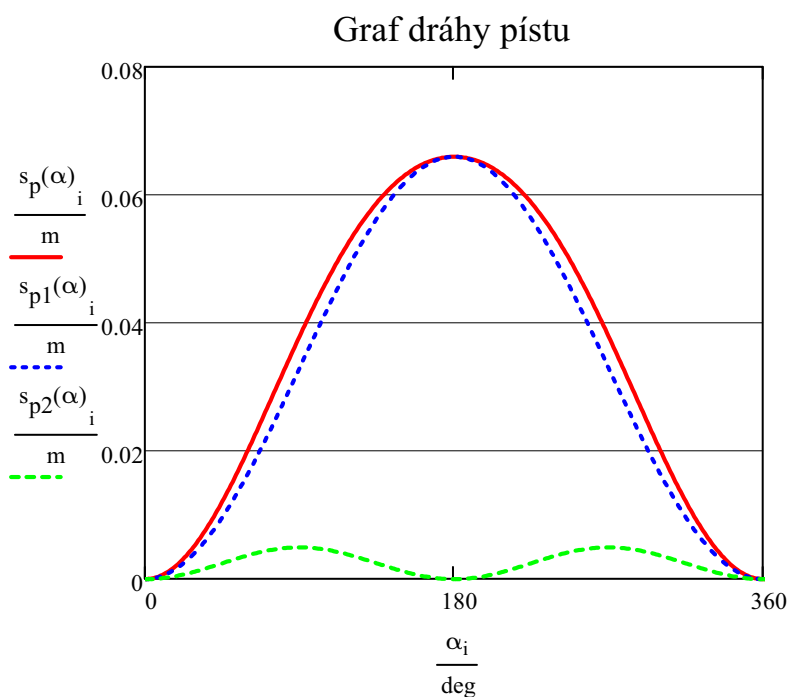
$$s_p(\alpha) := r \left[(1 - \cos(\alpha)) + \frac{\lambda}{4} \cdot (1 - \cos(2 \cdot \alpha)) \right]$$

4.1.2) 1. harmonická složka dráhy pístu

$$s_{p1}(\alpha) := r \cdot (1 - \cos(\alpha))$$

4.1.3) 2. harmonická složka dráhy pístu

$$s_{p2}(\alpha) := r \cdot \frac{\lambda}{4} \cdot (1 - \cos(2 \cdot \alpha))$$



4.2) Rychlost pístu

Úhlová rychlost otáčení klikového hřídele:

$$\omega := 333.34 \cdot \frac{1}{s}$$

4.2.1) Rychlost pístu závislá na úhlu pootočení klikového hřídele:

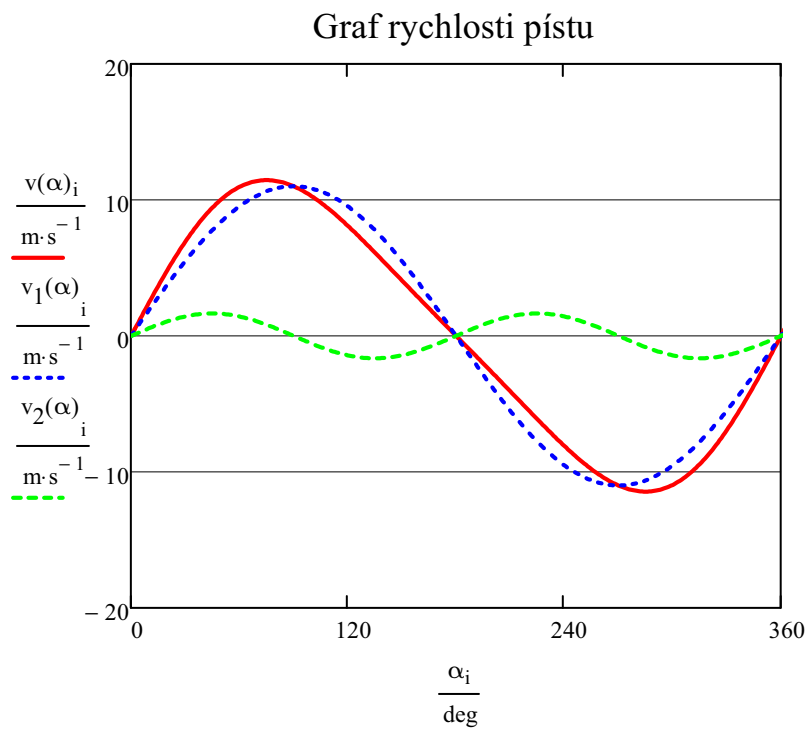
$$v(\alpha) := r \cdot \omega \cdot \left(\sin(\alpha) + \frac{\lambda}{2} \cdot \sin(2 \cdot \alpha) \right)$$

4.2.2) 1. harmonická složka rychlosti pístu:

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

4.2.3) 2. harmonická složka rychlosti pístu:

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



4.3) Zrychlení pístu

4.3.1) Zrychlení pístu závislé na úhlu pootočení klikového hřídele:

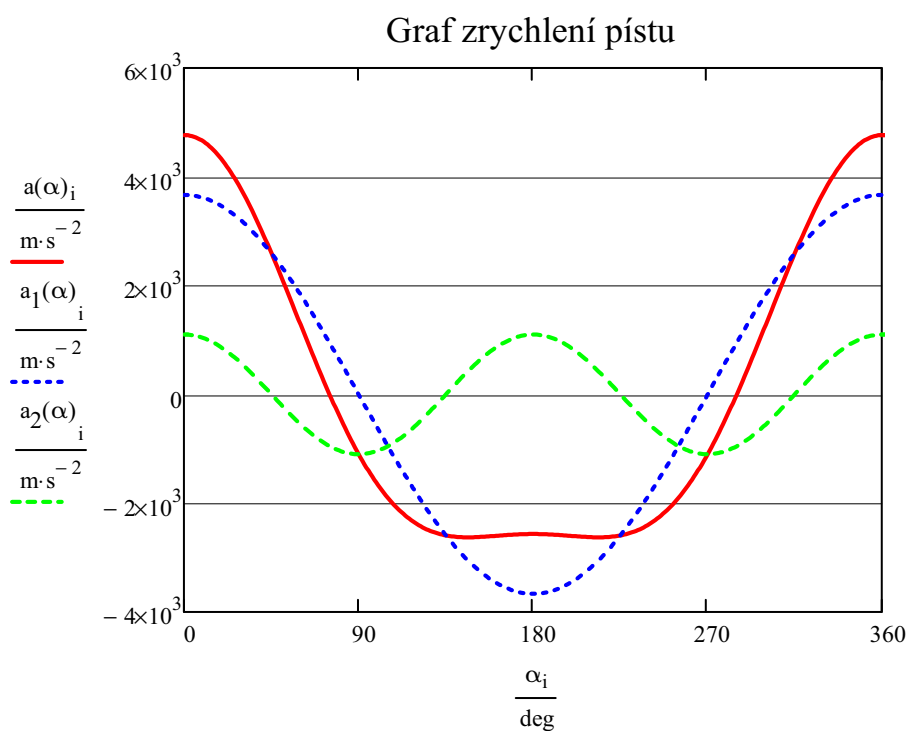
$$a(\alpha) := r \cdot \omega^2 \cdot (\cos(\alpha) + \lambda \cdot \cos(2 \cdot \alpha))$$

4.3.2) 1. harmonická složka zrychlení pístu:

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

4.3.3) 2. harmonická složka zrychlení pístu:

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



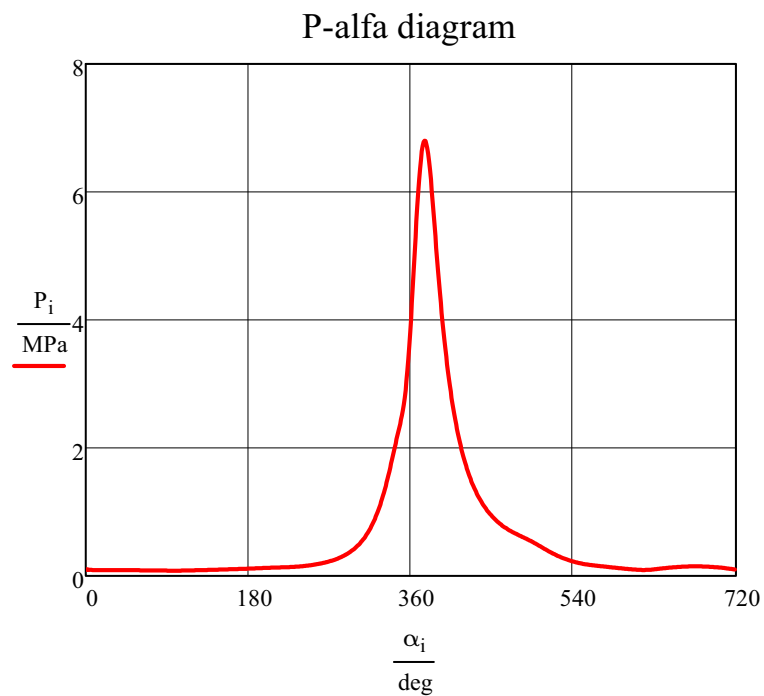
4.4) P- α diagram, p-V diagram

4.4.1) P- α diagram

$$P_i := PP_{i+1} \cdot \text{MPa}$$

$P_i =$

0.099	·MPa
0.098	
0.097	
0.096	
0.095	
0.094	
0.093	
0.092	
0.092	
0.091	
0.09	
0.09	
0.09	
0.09	
0.09	
...	



Maximální tlak: $\max(P) = 6.802 \cdot \text{MPa}$

4.4.2) P-V diagram

Průměr pístu:

$$D := 0.065 \cdot \text{m}$$

Kompresní poměr:

$$\epsilon := 11$$

Zdvihový objem jednoho válce:

$$V_Z := 0.000220 \cdot \text{m}^3$$

Plocha dna pístu:

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

$$S = 0.003 \text{ m}^2$$

Kompresní objem:

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

$$V_k = 2.2 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

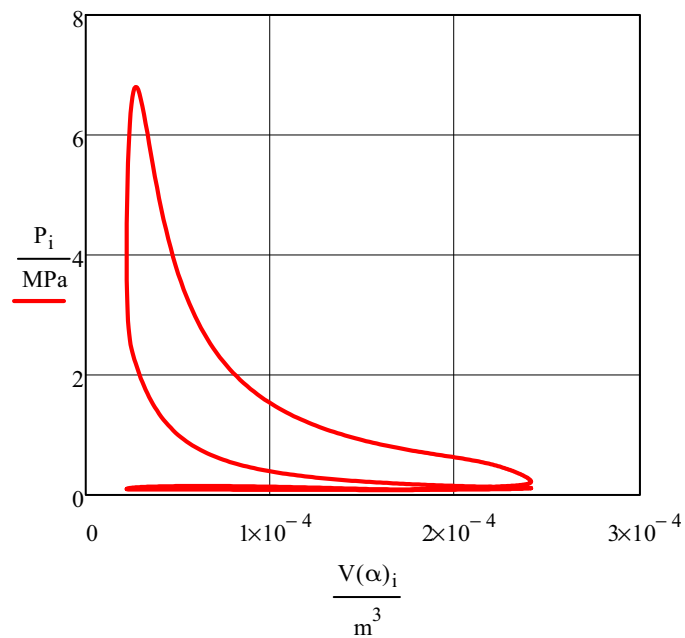
$$V(\alpha) := V_k + S \cdot \left[r \cdot \left[1 - \cos(\alpha) + \frac{\lambda}{4} \cdot (1 - \cos(2 \cdot \alpha)) \right] \right]$$

	0
0	0.022
1	0.022
2	0.022
3	0.022
4	0.022
5	0.023
6	0.023
7	0.023
8	0.023
9	0.024
10	0.024
11	0.025
12	0.025
13	0.026
14	0.026
15	...

$V(\alpha) =$

L

P-V diagram



4.5) Průběhy sil v klikovém ústrojí:

Hmotnost pístní skupiny:

$$m_{\text{pist}} := 0.55 \cdot \text{kg}$$

Atmosférický tlak:

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

Plocha dna pístu:

$$S := 33.18 \cdot \text{cm}^2$$

$$\text{kN} := 1000 \cdot \text{N}$$

4.5.1) Síly působící na pístní čep ve směru osy válce

a) Primární síly na píst od tlaku plynů:

$$F_{p_i} := \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot (P_i - P_{\text{atm}})$$

Extrémy:

$$\min(F_p) = -63.446 \text{ N}$$

$$\max(F_p) = 22240.822 \text{ N}$$

b) Sekundární síly na píst od sil setrvačných:

$$F_{sp_i} := -(m_{\text{pist}}) \cdot a(\alpha_i)$$

Extrémy.

$$\min(F_{sp}) = -2621.772 \text{ N}$$

$$\max(F_{sp}) = 1445.313 \text{ N}$$

c) Celkové síly působící na pístní čep:

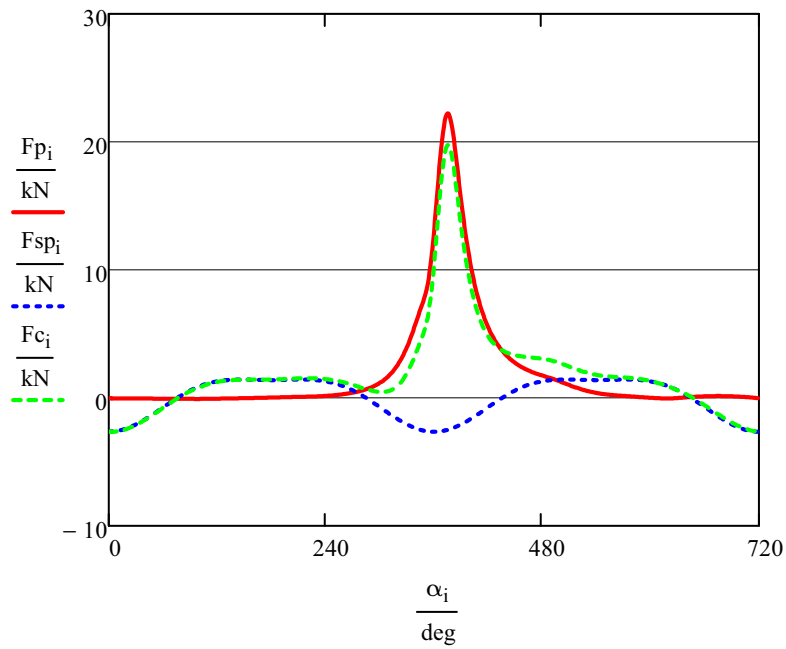
$$F_{c_i} := F_{p_i} + F_{sp_i}$$

Extrémy:

$$\min(F_c) = -2630.053 \text{ N}$$

$$\max(F_c) = 19768.827 \text{ N}$$

Síly na pístní čep

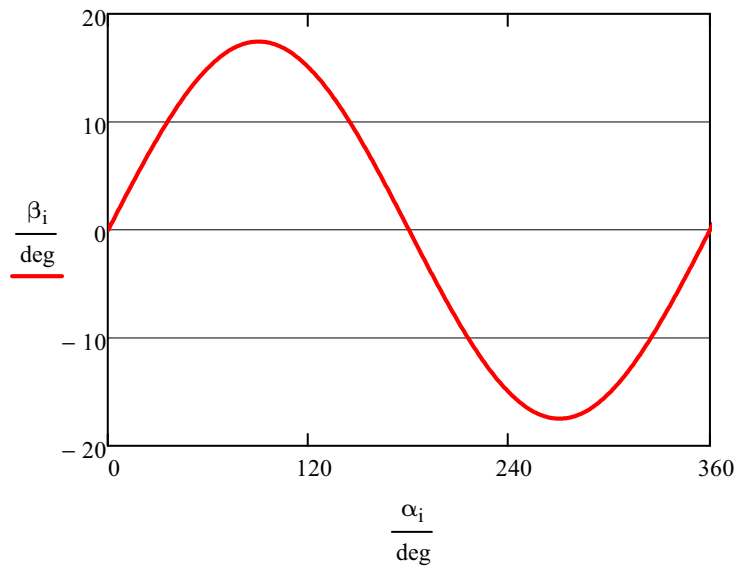


4.5.2) Síly přenášené ojnicí:

a) Úhel odklonu ojnice

$$\beta_i := \text{asin}[\lambda \cdot (\sin(\alpha_i))]$$

Graf úhlu odklonu ojnice od osy válce



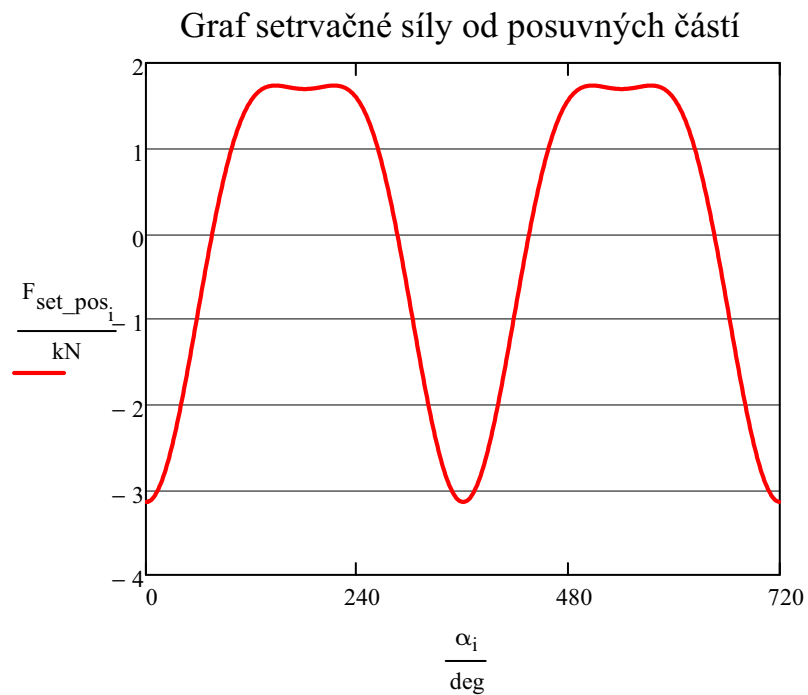
b) Setrvačná síla od posuvných částí:

$$F_{\text{set_pos}_i} := -(m_{\text{pist}} + m_{\text{posuv_ojnice}}) \cdot a(\alpha)_i$$

Extrémy:

$$\max(F_{\text{set_pos}}) = 1734.376 \text{ N}$$

$$\min(F_{\text{set_pos}}) = -3146.126 \text{ N}$$



c) Síla přenášená ojnicí:

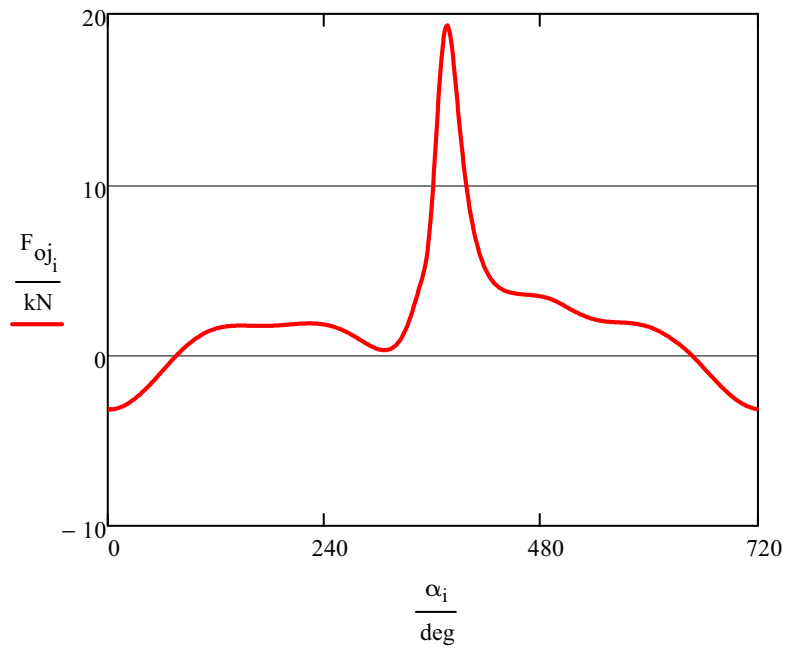
$$F_{\text{oj}_i} := \frac{(F_{p_i} + F_{\text{set_pos}_i})}{\cos(\beta_i)}$$

Extrémy:

$$\max(F_{\text{oj}}) = 19340.516 \text{ N}$$

$$\min(F_{\text{oj}}) = -3154.039 \text{ N}$$

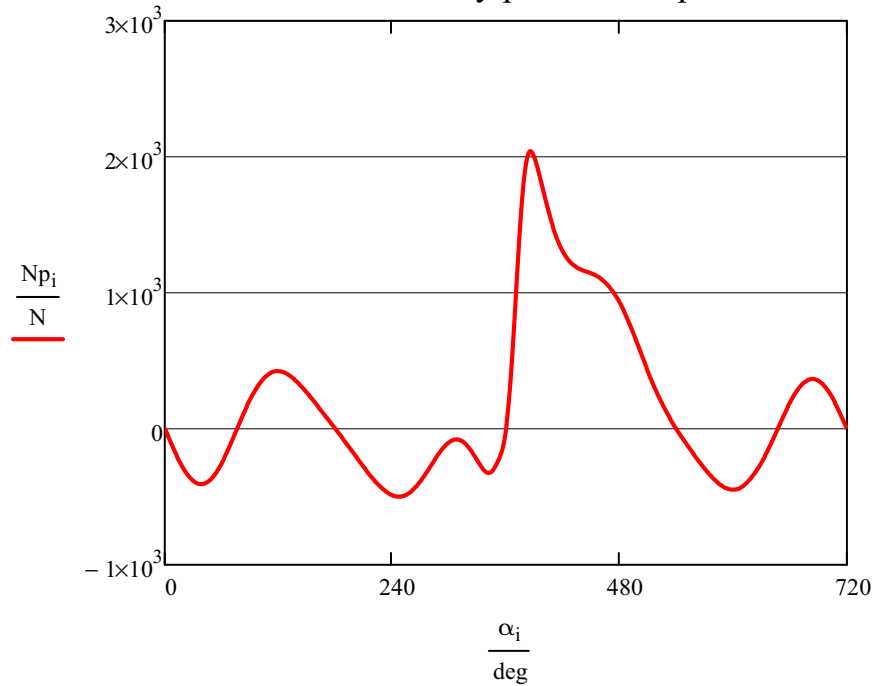
Graf síly přenášené ojnicí



d) Boční síla působící na píšť:

$$N_{p_i} := F_{oj_i} \cdot \tan(\beta_i)$$

Graf boční síly působící na píšť



Extrémy:

$$\max(N_p) = 2043.826 \text{ N}$$

$$\min(N_p) = -496.463 \text{ N}$$

4.5.3) Síly na ojnicím čepu

a) Radiální síly:Radiální síla:

$$F_{r_i} := F_{oj_i} \cdot \cos(\alpha_i + \beta_i)$$

Extrémy:

$$\min(F_r) = -3152.411 \text{ N}$$

$$\max(F_r) = 18263.603 \text{ N}$$

Odstředivá síla:

$$F_{od} := -m_{rot_ojnice} \cdot r \cdot \omega^2$$

$$F_{od} = -1239.383 \text{ N}$$

Celková radiální síla:

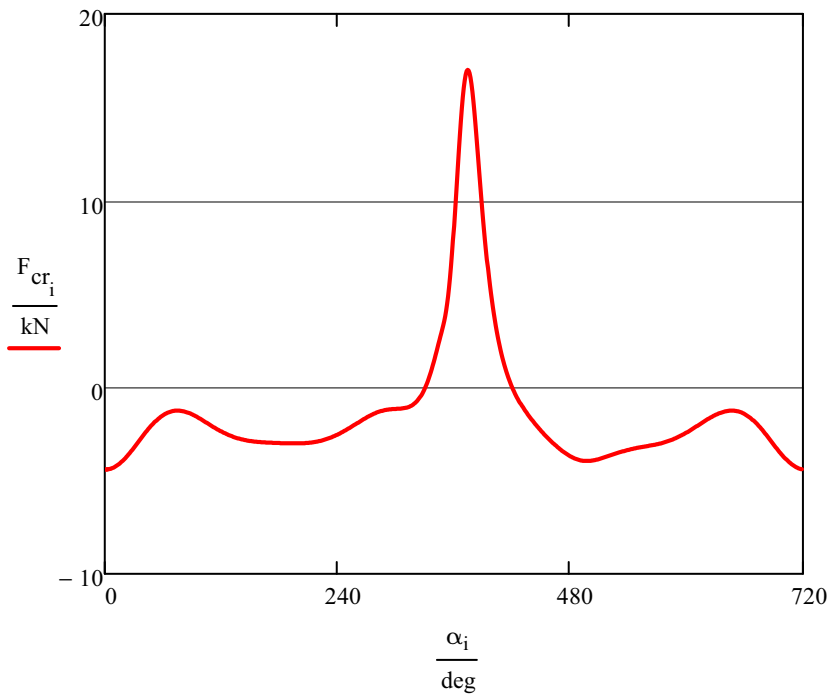
$$F_{cr_i} := F_{r_i} + F_{od}$$

Extrémy :

$$\min(F_{cr}) = -4391.794 \text{ N}$$

$$\max(F_{cr}) = 17024.22 \text{ N}$$

Graf celkové radiální síly



b) Tangenciální síly

Tangenciální síla na klikovém čepu:

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

Extrémy:

$$\min(F_t) = -1622.919 \text{ N}$$

$$\max(F_t) = 8531.003 \text{ N}$$

Tangenciální síla na ojnicím čepu:

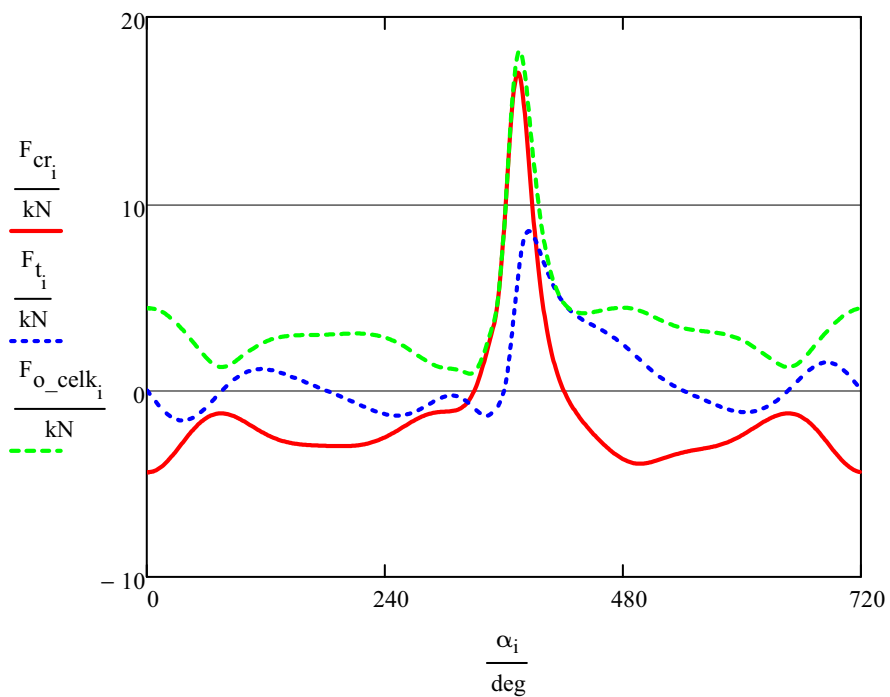
$$F_{O_celk_i} := \sqrt{(F_{cr_i})^2 + (F_{t_i})^2}$$

Extrémy:

$$\min(F_{O_celk}) = 882.659 \text{ N}$$

$$\max(F_{O_celk}) = 18186.772 \text{ N}$$

Graf radiální a tangenciální síly



4.6) Krouticí moment na jednom zalomení klikového hřídele:

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

$$M_{k_i} =$$

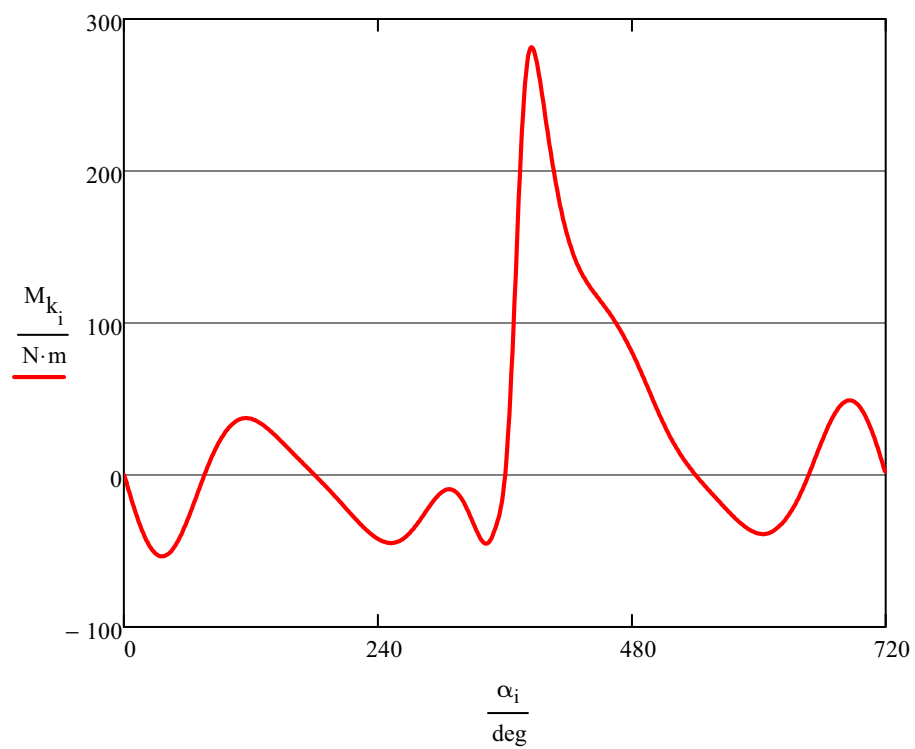
Extrémy:

$$\max(M_k) = 281.523 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

$$\min(M_k) = -53.556 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

0
-2.361
-4.721
-7.077
-9.424
-11.755
-14.065
-16.349
-18.599
-20.821
-22.999
-25.129
-27.206
-29.228
-31.189
...

Graf krouticího momentu



Seznam použitých označení

a	$[m \cdot s^{-2}]$	zrychlení pístu
a_1	$[m \cdot s^{-2}]$	1. harmonická složka zrychlení pístu
a_2	$[m \cdot s^{-2}]$	2. harmonická složka zrychlení pístu
b	$[m]$	tloušťka ramene zalomení
b_{HC}	$[m]$	tloušťka hlavního čepu
b_{KC}	$[m]$	tloušťka ojnicního čepu
b_{pr}	$[m]$	šířka příruby pro setrvačnick
b_{remen}	$[m]$	délka konce klikového hřídele na straně řemenice
c_{remen}	$[Nm \cdot rad^{-1}]$	torzní tuhost klikového hřídele na straně řemenice
$c_{setrvac}$	$[Nm \cdot rad^{-1}]$	torzní tuhost klikového hřídele na straně setrvačnicku
$c_{zalomeni}$	$[Nm \cdot rad^{-1}]$	torzní tuhost zalomení klikového hřídele
D	$[m]$	průměr pístu
D_{HC}	$[m]$	průměr hlavního čepu
D_{KC}	$[m]$	průměr ojnicního čepu
D_{red}	$[m]$	redukovaný průměr hřídele
d_{roztec}	$[m]$	roztečný průměr šroubů setrvačnicku
F_c	$[N]$	celková síla
F_{cr}	$[N]$	celková radiální síla
F_{od}	$[N]$	odstředivá síla
F_{oj}	$[N]$	síla přenášená ojnicí
F_{o_celk}	$[N]$	celková síla na ojnicním čepu
F_p	$[N]$	síla od tlaku plynů
F_r	$[N]$	radiální síla
F_{set_pos}	$[N]$	setrvačná síla posuvných částí
F_{sp}	$[N]$	sekundární setrvačná síla
G	$[MPa]$	modul pružnosti ve smyku
h	$[m]$	šířka ramene zalomení

J_T	$[kg \cdot m^2]$	moment setrvačnosti ojnice
i	$[-]$	imaginární jednotka
I_{celk_remen}	$[kg \cdot m^2]$	celkový moment setrvačnosti na straně řemenice
$I_{celk_setrvac}$	$[kg \cdot m^2]$	celkový moment setrvačnosti na straně setrvačnicku
$I_{i_klik_mech}$	$[kg \cdot m^2]$	moment setrvačnosti i-tého klikového mechanismu
$I_{i_zalomeni}$	$[kg \cdot m^2]$	moment setrvačnosti zalomení klikového hřídele
I_{posuv}	$[kg \cdot m^2]$	moment setrvačnosti posuvných součástí
I_p	$[m^4]$	polární kvadratický moment
I_{remen}	$[kg \cdot m^2]$	moment setrvačnosti řemenice
I_{rot_ojnice}	$[kg \cdot m^2]$	moment setrvačnosti rotující části ojnice
$I_{setrvac}$	$[kg \cdot m^2]$	moment setrvačnosti setrvačnicku
I_{upev_remen}	$[kg \cdot m^2]$	moment setrvačnosti konce klikového hřídele na straně řemenice
$I_{upev_setrvac}$	$[kg \cdot m^2]$	moment setrvačnosti konce klikového hřídele na straně řemenice
l	$[mm]$	délka ojnice
L	$[mm]$	vzdálenost bodu A a bodu B
l_A	$[mm]$	vzdálenost středu malého oka ojnice od těžiště ojnice
l_B	$[mm]$	vzdálenost středu velkého oka ojnice od těžiště ojnice
l_{red}	$[m]$	redukováná délka hřídele
l_{red_remen}	$[m]$	redukováná délka konce klikového hřídele na straně řemenice
$l_{red_setrvac}$	$[m]$	redukováná délka konce klikového hřídele na straně řemenice
M_k	$[N \cdot m]$	kroucí moment
m_o	$[kg]$	hmotnost ojnice
m_{pist_skup}	$[kg]$	hmotnost pístní skupiny
m_{posuv_ojnice}	$[kg]$	hmotnost posuvné částí ojnice

m_{rot_ojnice}	$[kg]$	hmotnost rotační části ojnice
n	$[\min^{-1}]$	otáčky motoru
N_p	$[N]$	boční síla působící na píst
P	$[MPa]$	tlak plynů
P_{atm}	$[MPa]$	atmosférický tlak
r	$[m]$	poloměr zalomení klikového hřídele
S	$[m^2]$	plocha dna pístu
s_p	$[m]$	dráha pístu
s_{p1}	$[m]$	1. harmonická složka dráhy pístu
s_{p2}	$[m]$	2. harmonická složka dráhy pístu
V	$[m^3]$	objem
v	$[m \cdot s^{-1}]$	rychlost pístu
v_1	$[m \cdot s^{-1}]$	1. harmonická složka rychlosti pístu
v_2	$[m \cdot s^{-1}]$	2. harmonická složka rychlosti pístu
V_k	$[m^3]$	kompresní objem
V_z	$[m^3]$	zdvihový objem jednoho válce motoru
α	$[^\circ]$	úhel odklonu klikového hřídele od osy válce
β	$[^\circ]$	úhel odklonu ojnice od osy válce
ε	$[-]$	kompresní poměr
λ	$[-]$	ojniční poměr
ω	$[rad \cdot s^{-1}]$	úhlová rychlost