

Динамический анализ механизмов двухступенчатого воздушного компрессора

Исходные данные:

$V_{\text{ср}} := 4$	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$	средняя скорость поршня	$\frac{g}{\omega} := 9.81$	$\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$
$d_1 := 0.2$	м	диаметр цилиндра 1		
$d_2 := 0.12$	м	диаметр цилиндра 2		
$n_1 := 10$	$\frac{\text{об}}{\text{с}}$	число оборотов коленчатого вала		
$P_{\text{max1}} := 0.294$	МПа	максимальное давление в цилиндре 1 двигателя		
$P_{\text{max2}} := 0.882$	МПа	максимальное давление в цилиндре 2 двигателя		
$m_2 := 0.8$	кг	масса шатуна 2		
$m_4 := 0.8$	кг	масса шатуна 4		
$m_3 := 0.6$	кг	масса поршня 3		
$m_5 := 1$	кг	масса поршня 5		
$J_{2S} := 0.21$	$\text{кг} \cdot \text{м}^2$	момент инерции шатуна 2 относительно оси, проходящей через его центр тяжести		
$J_{4S} := 0.21$	$\text{кг} \cdot \text{м}^2$	момент инерции шатуна 4 относительно оси, проходящей через его центр тяжести		
$J_{\text{ред}} := 0.074$	$\text{кг} \cdot \text{м}^2$	приведенный к коленчатому валу момент инерции планетарного редуктора		
$J_{10} := 0.6$	$\text{кг} \cdot \text{м}^2$	момент инерции коленчатого вала		
$k := 4$		отношение длины шатуна к длине кривошипа		
$k_{S2} := 0.3$		отношение расстояния от точки А до центра тяжести шатуна 3 к длине шатуна		
$k_{S4} := 0.3$		отношение расстояния от точки А до центра тяжести шатуна 4 к длине шатуна		
$\delta_1 := 0.05$		коэффициент неравномерности вращения кривошипа 1		

1. Проектирование механизма

1.1. Определение длин звеньев механизма

$$\begin{aligned}l_1 &:= \frac{V_{\text{ср}}}{n_1 \cdot 4} & l_1 &= 0.1 & \text{длина коленчатого вала} \\l_2 &:= l_1 \cdot k & l_2 &= 0.4 & \text{длина шатуна 2} \\l_4 &:= l_1 \cdot k & l_4 &= 0.4 & \text{длина шатуна 4} \\l_{\text{AS2}} &:= l_2 \cdot k_{\text{S2}} & l_{\text{AS2}} &= 0.12 & \text{положение центра тяжести шатуна 2} \\l_{\text{AS4}} &:= l_4 \cdot k_{\text{S4}} & l_{\text{AS4}} &= 0.12 & \text{положение центра тяжести шатуна 4} \\ \omega_{1\text{ср}} &:= 2 \cdot \pi \cdot n_1 & \omega_{1\text{ср}} &= 62.832 & \text{средняя угловая скорость коленчатого вала}\end{aligned}$$

2. Вычисление передаточных функций механизма

2.1. Функции положения

$$f := 75\text{deg}$$

$$\varphi_1(\varphi) := \frac{\pi}{2} - \varphi$$

$$X_A(\varphi) := l_1 \cdot \cos(\varphi_1(\varphi))$$

$$Y_A(\varphi) := l_1 \cdot \sin(\varphi_1(\varphi))$$

$$\varphi_2(\varphi) := \text{asin}\left(\frac{X_A(\varphi)}{l_2}\right)$$

$$\varphi_4(\varphi) := -\text{asin}\left(\frac{Y_A(\varphi)}{l_4}\right)$$

$$X_B(\varphi) := X_A(\varphi) - l_2 \cdot \sin(\varphi_2(\varphi))$$

$$Y_B(\varphi) := Y_A(\varphi) + l_2 \cdot \cos(\varphi_2(\varphi))$$

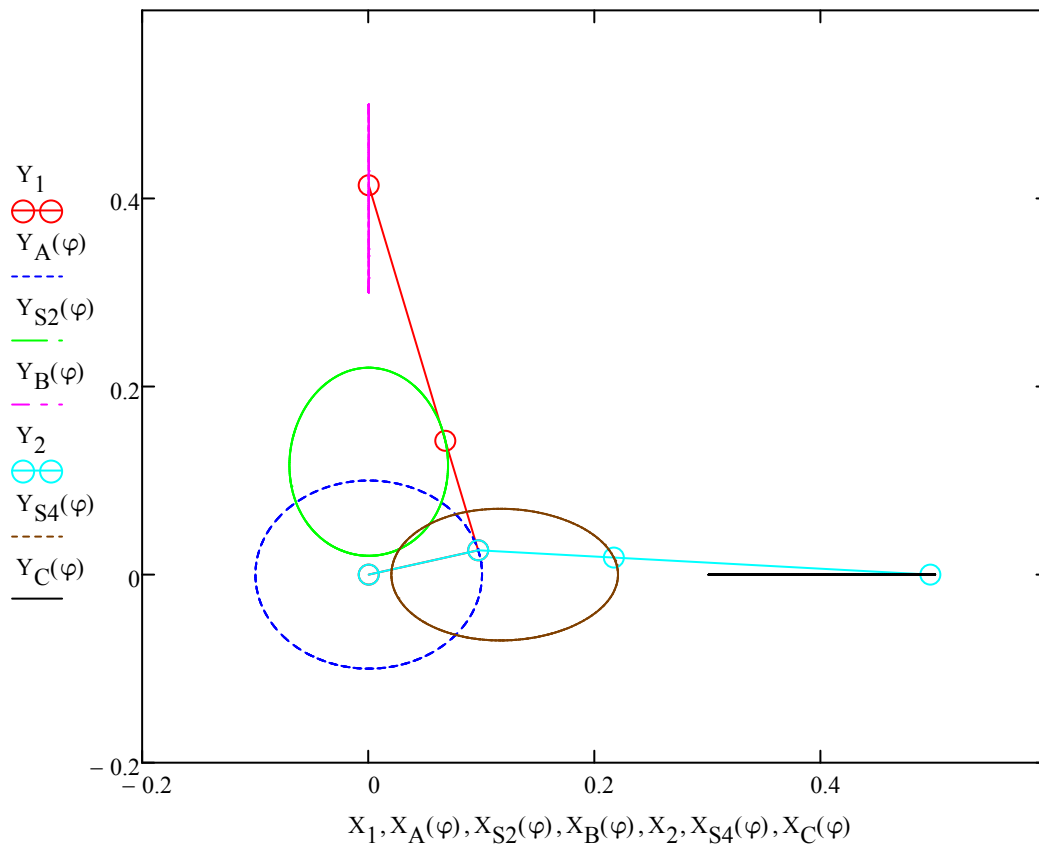
$$X_{\text{S2}}(\varphi) := X_A(\varphi) - l_{\text{AS2}} \cdot \sin(\varphi_2(\varphi))$$

$$Y_{\text{S2}}(\varphi) := Y_A(\varphi) + l_{\text{AS2}} \cdot \cos(\varphi_2(\varphi))$$

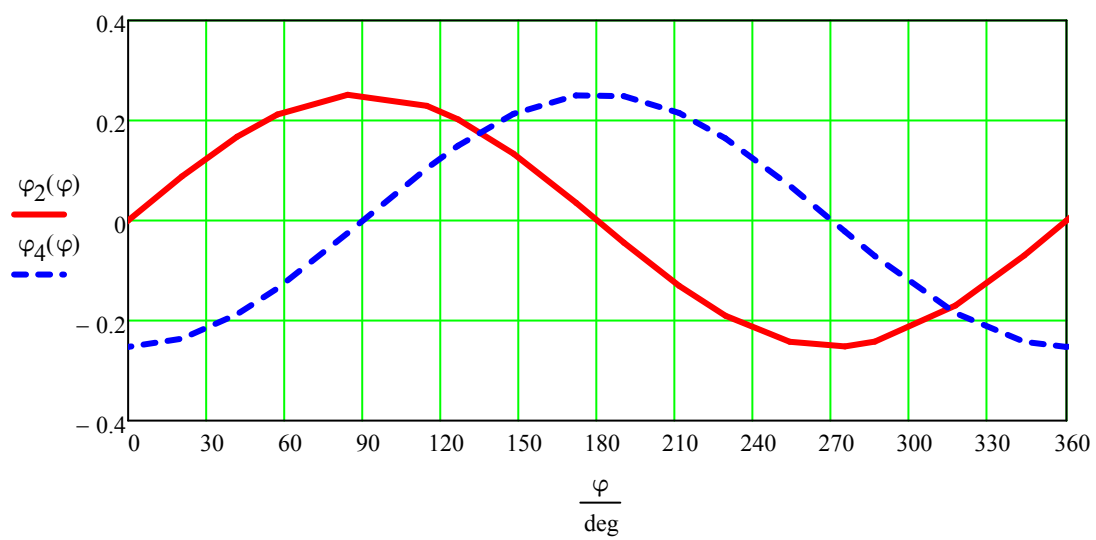
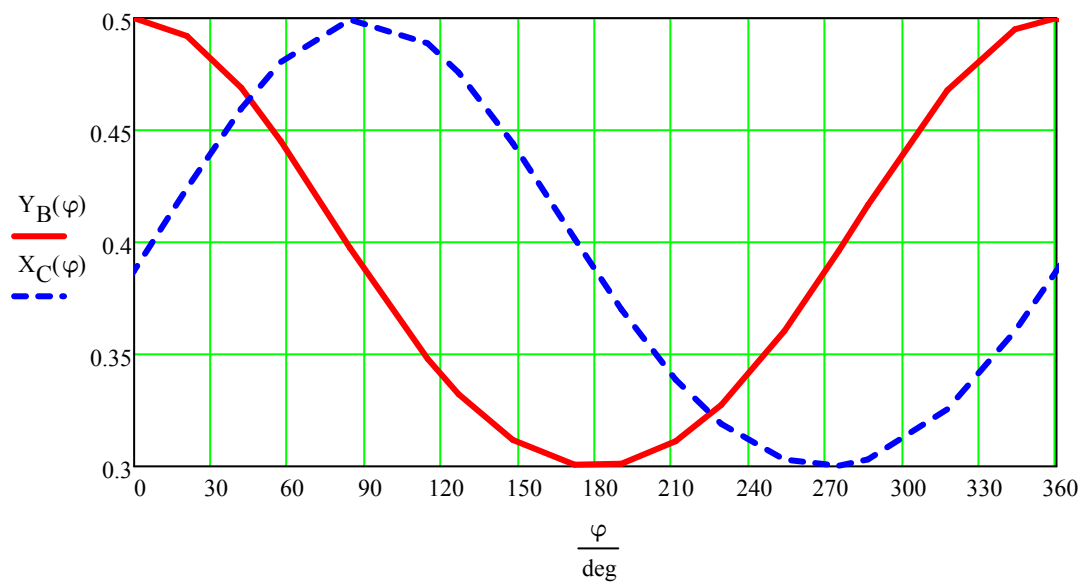
$$\begin{aligned}
X_C(\varphi) &:= X_A(\varphi) + l_4 \cdot \cos(\varphi_4(\varphi)) \\
Y_C(\varphi) &:= Y_A(\varphi) + l_4 \cdot \sin(\varphi_4(\varphi)) \\
X_{S4}(\varphi) &:= X_A(\varphi) + l_{AS2} \cdot \cos(\varphi_4(\varphi)) \\
Y_{S4}(\varphi) &:= Y_A(\varphi) + l_{AS2} \cdot \sin(\varphi_4(\varphi))
\end{aligned}$$

Построим кинематическую схему механизма в заданном положении и определим траектории точек:

$$X_1 := \begin{pmatrix} 0 \\ X_A(f) \\ X_{S2}(f) \\ X_B(f) \end{pmatrix} \quad Y_1 := \begin{pmatrix} 0 \\ Y_A(f) \\ Y_{S2}(f) \\ Y_B(f) \end{pmatrix} \quad X_2 := \begin{pmatrix} 0 \\ X_A(f) \\ X_{S4}(f) \\ X_C(f) \end{pmatrix} \quad Y_2 := \begin{pmatrix} 0 \\ Y_A(f) \\ Y_{S4}(f) \\ Y_C(f) \end{pmatrix}$$



Построим графики функций положения:



2.2. Кинематические передаточные функции скорости (аналоги скоростей):

$$V_{qAx}(\varphi) := \frac{d}{d\varphi} X_A(\varphi)$$

$$V_{qAy}(\varphi) := \frac{d}{d\varphi} Y_A(\varphi)$$

$$V_{qBx}(\varphi) := \frac{d}{d\varphi} X_B(\varphi) \quad V_{qS2x}(\varphi) := \frac{d}{d\varphi} X_{S2}(\varphi)$$

$$V_{qBy}(\varphi) := \frac{d}{d\varphi} Y_B(\varphi) \quad V_{qS2y}(\varphi) := \frac{d}{d\varphi} Y_{S2}(\varphi) \quad V_{qBx}(f) = 0$$

$$V_{qCx}(\varphi) := \frac{d}{d\varphi} X_C(\varphi) \quad V_{qS4x}(\varphi) := \frac{d}{d\varphi} X_{S4}(\varphi)$$

$$V_{qCy}(\varphi) := \frac{d}{d\varphi} Y_C(\varphi) \quad V_{qS4y}(\varphi) := \frac{d}{d\varphi} Y_{S4}(\varphi)$$

$$V_{qA}(\varphi) := \sqrt{V_{qAx}(\varphi)^2 + V_{qAy}(\varphi)^2} \quad V_{qA}(f) = 0.1$$

$$V_{qB}(\varphi) := \sqrt{V_{qBx}(\varphi)^2 + V_{qBy}(\varphi)^2} \quad V_{qB}(f) = 0.103$$

$$V_{qC}(\varphi) := \sqrt{V_{qCx}(\varphi)^2 + V_{qCy}(\varphi)^2} \quad V_{qC}(f) = 0.032$$

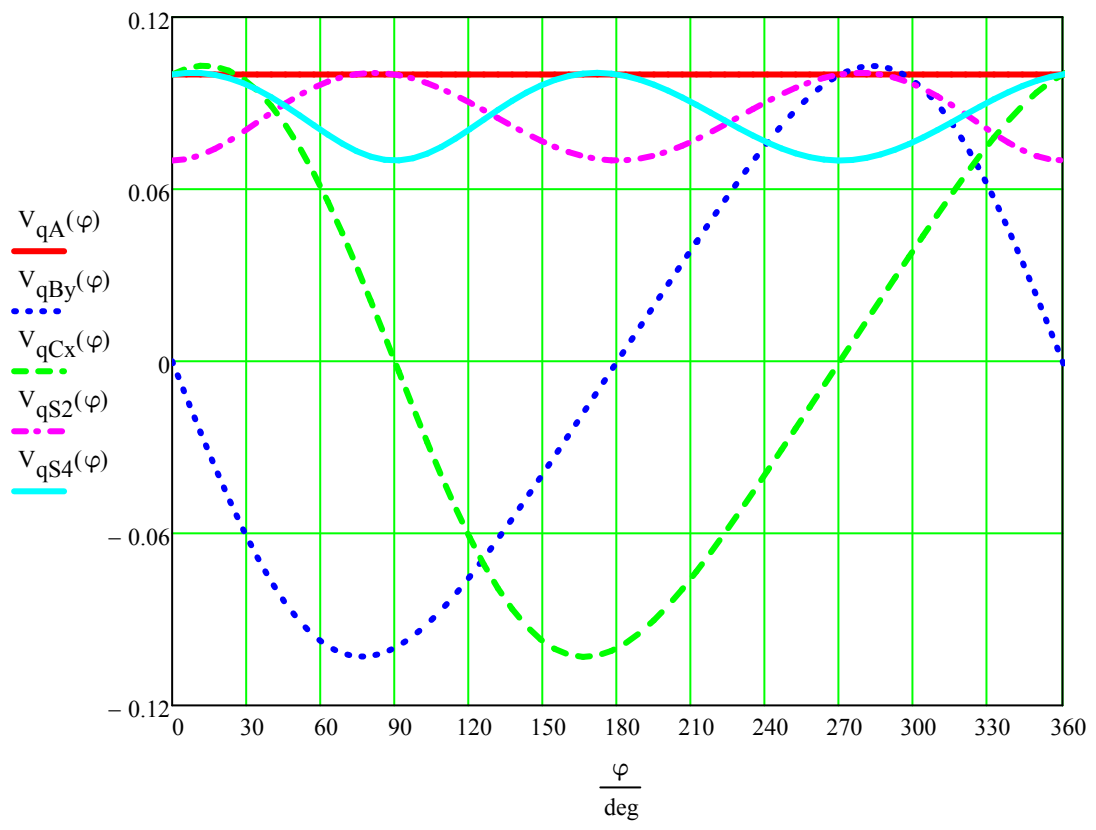
$$V_{qS2}(\varphi) := \sqrt{V_{qS2x}(\varphi)^2 + V_{qS2y}(\varphi)^2} \quad V_{qS2}(f) = 0.1$$

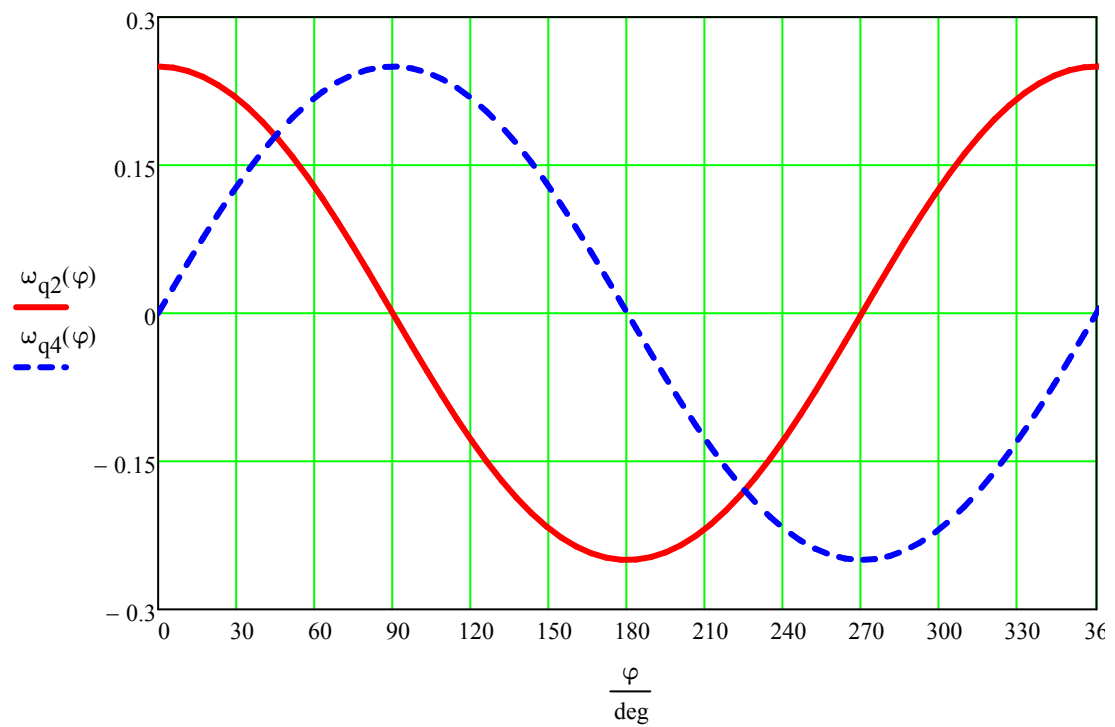
$$V_{qS4}(\varphi) := \sqrt{V_{qS4x}(\varphi)^2 + V_{qS4y}(\varphi)^2} \quad V_{qS4}(f) = 0.073$$

$$\omega_{q2}(\varphi) := \frac{d}{d\varphi} \varphi_2(\varphi) \quad \omega_{q2}(f) = 0.067$$

$$\omega_{q4}(\varphi) := \frac{d}{d\varphi} \varphi_4(\varphi) \quad \omega_{q4}(f) = 0.242$$

$$\varphi := 0, 0.1..2 \cdot \pi + 2$$





2.3. Кинематические передаточные функции ускорения(аналоги ускорений):

$$a_{qAx}(\varphi) := \frac{d^2}{d\varphi^2} X_A(\varphi)$$

$$a_{qAy}(\varphi) := \frac{d^2}{d\varphi^2} Y_A(\varphi)$$

$$a_{qBx}(\varphi) := \frac{d^2}{d\varphi^2} X_B(\varphi) \quad a_{qS2x}(\varphi) := \frac{d^2}{d\varphi^2} X_{S2}(\varphi)$$

$$a_{qBy}(\varphi) := \frac{d^2}{d\varphi^2} Y_B(\varphi) \quad a_{qS2y}(\varphi) := \frac{d^2}{d\varphi^2} Y_{S2}(\varphi)$$

$$a_{qC_x}(\varphi) := \frac{d^2}{d\varphi^2} X_C(\varphi) \quad a_{qS4_x}(\varphi) := \frac{d^2}{d\varphi^2} X_{S4}(\varphi)$$

$$a_{qC_y}(\varphi) := \frac{d^2}{d\varphi^2} Y_C(\varphi) \quad a_{qS4_y}(\varphi) := \frac{d^2}{d\varphi^2} Y_{S4}(\varphi)$$

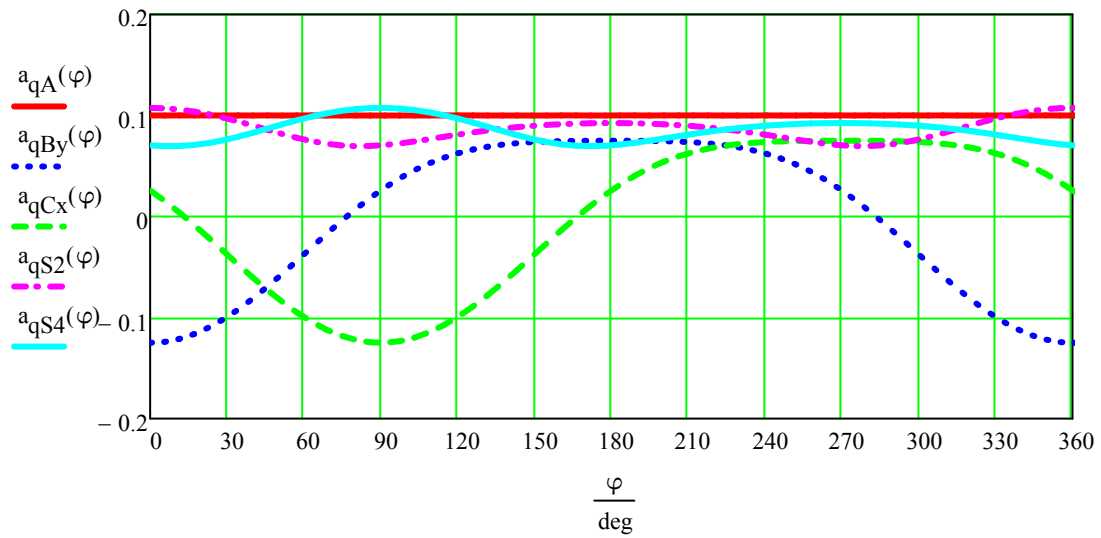
$$\varepsilon_{q2}(\varphi) := \frac{d}{d\varphi} \omega_{q2}(\varphi) \quad \varepsilon_{q2}(f) = -0.248$$

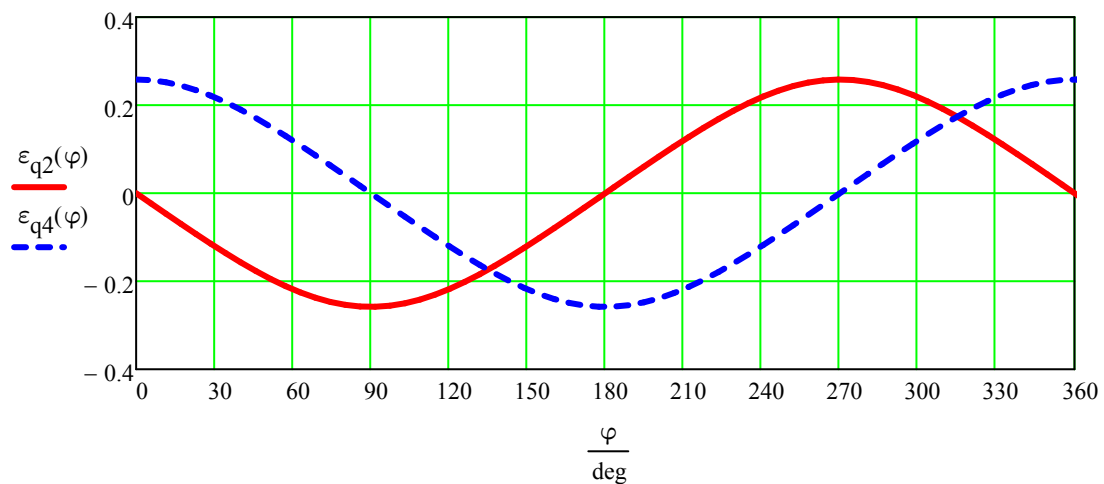
$$\varepsilon_{q4}(\varphi) := \frac{d}{d\varphi} \omega_{q4}(\varphi) \quad \varepsilon_{q4}(f) = 0.061$$

$$a_{qA}(\varphi) := \sqrt{a_{qA_x}(\varphi)^2 + a_{qA_y}(\varphi)^2}$$

$$a_{qS2}(\varphi) := \sqrt{a_{qS2_x}(\varphi)^2 + a_{qS2_y}(\varphi)^2}$$

$$a_{qS4}(\varphi) := \sqrt{a_{qS4_x}(\varphi)^2 + a_{qS4_y}(\varphi)^2}$$





3. Динамическая модель механизма

3.1. Приведение масс

3.1.1. Определим приведенные моменты инерции:

$$J_{PRJ2}(\varphi) := J_{2S} \cdot \omega_{q2}(\varphi)^2$$

$$J_{PRJ4}(\varphi) := J_{4S} \cdot \omega_{q4}(\varphi)^2$$

$$J_{PRm2}(\varphi) := m_2 \cdot \left(V_{qS2}(\varphi) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) \right)^2$$

$$J_{PRm4}(\varphi) := m_4 \cdot \left(V_{qS4}(\varphi) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) \right)^2$$

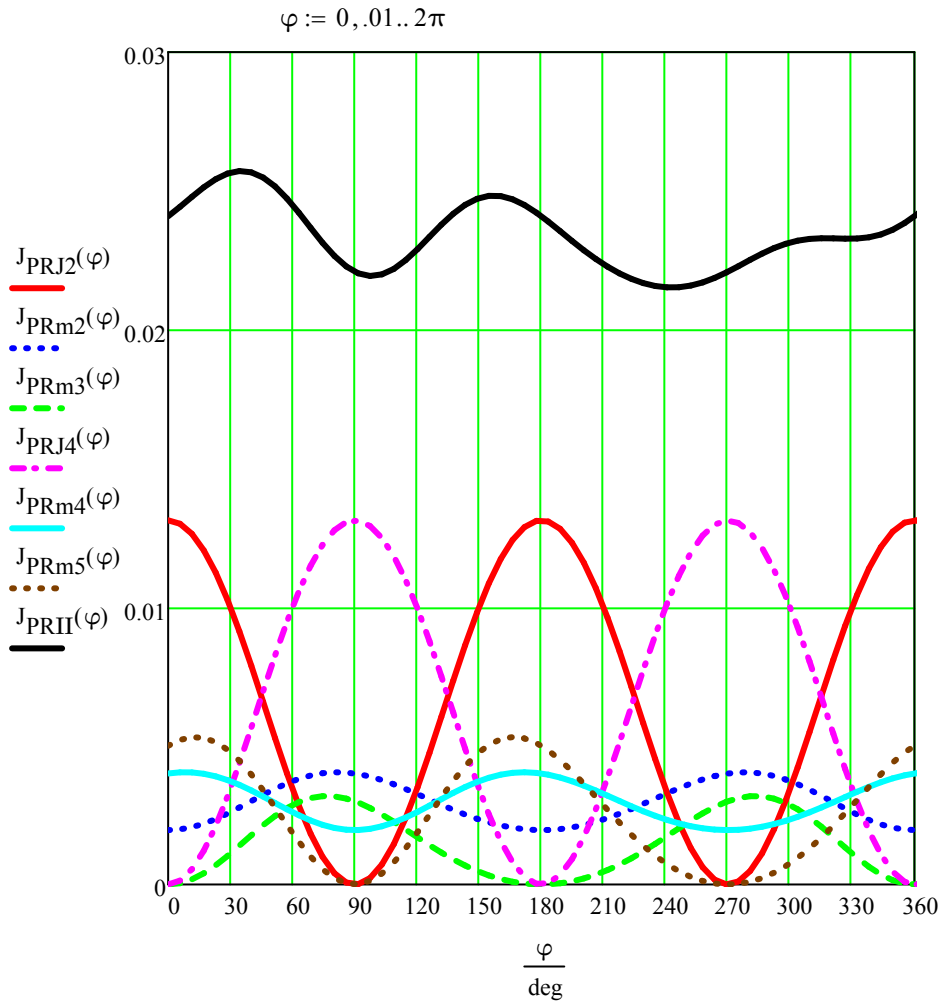
$$J_{PRm3}(\varphi) := m_3 \cdot \left(V_{qBy}(\varphi) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) \right)^2$$

$$J_{PRm5}(\varphi) := m_5 \cdot \left(V_{qCx}(\varphi) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) \right)^2$$

Приведенный момент второй группы звеньев:

$$J_{PRII}(\varphi) := J_{PRJ2}(\varphi) + J_{PRm2}(\varphi) + J_{PRm3}(\varphi) + J_{PRJ4}(\varphi) + J_{PRm4}(\varphi) + J_{PRm5}(\varphi) \quad J_{PRII}(f) = 0.0$$

$$J_{PRII}(f) = 0.023$$



3.1.2. Определим производные приведенных моментов инерции

$$dJ_{PRJ2}(\varphi) := 2 \cdot J_{2S} \cdot \omega_{q2}(\varphi) \cdot \varepsilon_{q2}(\varphi)$$

$$dJ_{PRm2}(\varphi) := 2 \cdot m_2 \cdot (V_{qS2x}(\varphi) \cdot a_{qS2x}(\varphi) + V_{qS2y}(\varphi) \cdot a_{qS2y}(\varphi))$$

$$dJ_{PRm3}(\varphi) := 2 \cdot m_3 \cdot V_{qBy}(\varphi) \cdot a_{qBy}(\varphi)$$

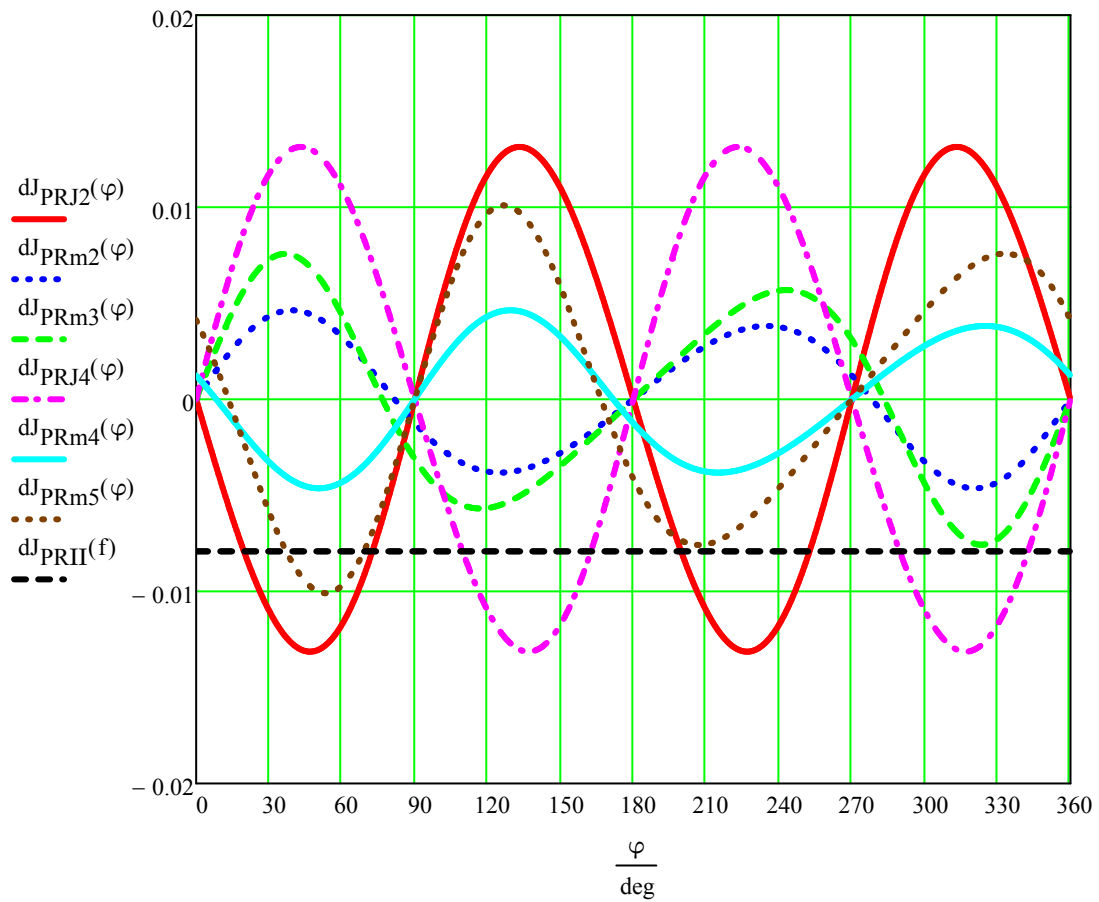
$$dJ_{PRJ4}(\varphi) := 2 \cdot J_{4S} \cdot \omega_{q4}(\varphi) \cdot \varepsilon_{q4}(\varphi)$$

$$dJ_{PRm4}(\varphi) := 2 \cdot m_4 \cdot (V_{qS4x}(\varphi) \cdot a_{qS4x}(\varphi) + V_{qS4y}(\varphi) \cdot a_{qS4y}(\varphi))$$

$$dJ_{PRm5}(\varphi) := 2 \cdot m_4 \cdot V_{qCx}(\varphi) \cdot a_{qCx}(\varphi)$$

$$dJ_{PRII}(\varphi) := dJ_{PRJ2}(\varphi) + dJ_{PRm2}(\varphi) + dJ_{PRm3}(\varphi) + dJ_{PRJ4}(\varphi) + dJ_{PRm4}(\varphi) + dJ_{PRm5}(\varphi)$$

$$dJ_{PRII}(f) = -7.919 \times 10^{-3}$$



3.2 Приведение сил

3.2.1. Рассчитаем силу давления сжимаемого газа на поршень дизель-воздуходувной установки

3.2.2. Построим индикаторные диаграммы

$$\begin{array}{l}
\text{sdn2} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0.1 \\ 0.2 \\ 0.3 \\ 0.4 \\ 0.5 \\ 0.6 \\ 0.7 \\ 0.8 \\ 0.9 \\ 1 \end{pmatrix} \\
\text{p}_{\text{ВНИЗ2}} := \begin{pmatrix} 1 \\ 0.52 \\ 0.3 \\ 0.3 \\ 0.3 \\ 0.3 \\ 0.3 \\ 0.3 \\ 0.3 \\ 0.3 \\ 0.3 \end{pmatrix} \\
\text{p}_{\text{ВВЕРХ2}} := \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0.75 \\ 0.67 \\ 0.58 \\ 0.52 \\ 0.47 \\ 0.41 \\ 0.35 \\ 0.3 \end{pmatrix} \\
\text{sdn1} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0.1 \\ 0.2 \\ 0.3 \\ 0.4 \\ 0.5 \\ 0.6 \\ 0.7 \\ 0.8 \\ 0.9 \\ 1 \end{pmatrix} \\
\text{p}_{\text{ВНИЗ1}} := \begin{pmatrix} 1 \\ 0.33 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\
\text{p}_{\text{ВВЕРХ1}} := \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0.58 \\ 0.46 \\ 0.28 \\ 0.26 \\ 0.16 \\ 0.08 \\ 0.04 \\ 0 \end{pmatrix}
\end{array}$$

$$V_{\text{pdn1}} := \text{lspline}(\text{sdn1}, \text{p}_{\text{ВНИЗ1}}) \quad V_{\text{pup1}} := \text{lspline}(\text{sdn1}, \text{p}_{\text{ВВЕРХ1}})$$

$$pu1(s1) := \begin{cases} 0 & \text{if } s1 > 1 \\ \text{interp}(V_{\text{pup1}}, \text{sdn1}, \text{p}_{\text{ВВЕРХ1}}, s1) & \text{if } s1 \leq 1 \end{cases}$$

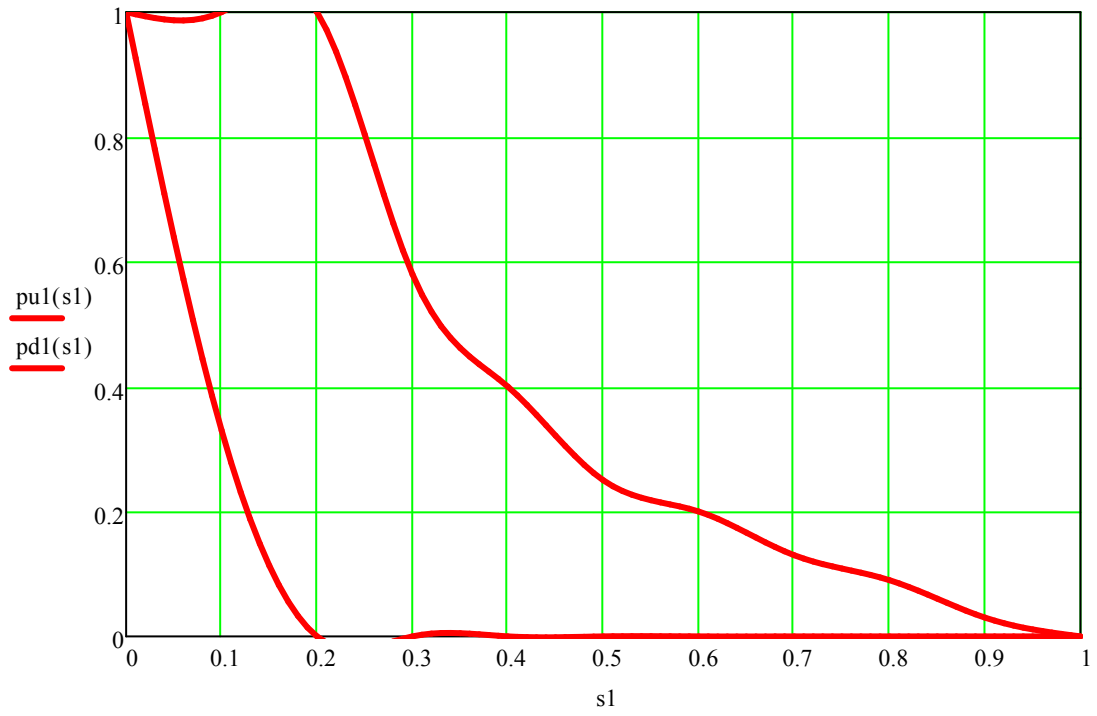
$$pd1(s1) := \text{interp}(V_{\text{pdn1}}, \text{sdn1}, \text{p}_{\text{ВНИЗ1}}, s1)$$

$$V_{\text{pdn2}} := \text{lspline}(\text{sdn2}, \text{p}_{\text{ВНИЗ2}}) \quad V_{\text{pup2}} := \text{lspline}(\text{sdn2}, \text{p}_{\text{ВВЕРХ2}})$$

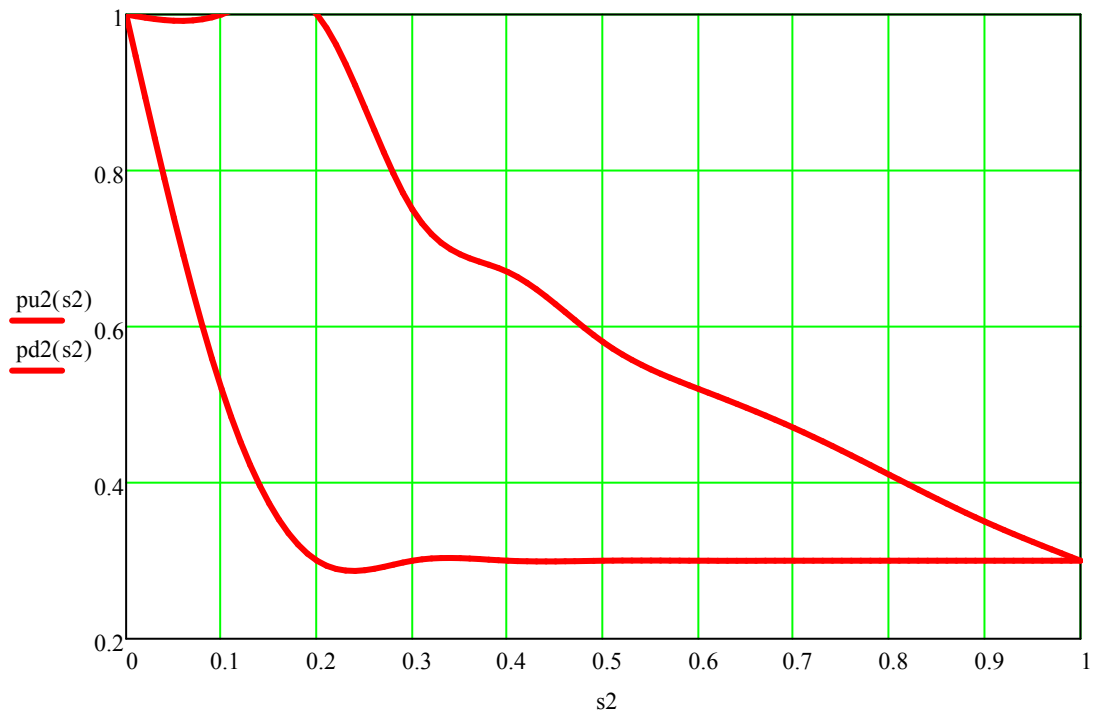
$$pu2(s2) := \begin{cases} 0 & \text{if } s2 > 1 \\ \text{interp}(V_{\text{pup2}}, \text{sdn2}, \text{p}_{\text{ВВЕРХ2}}, s2) & \text{if } s2 \leq 1 \end{cases}$$

$$pd2(s2) := \text{interp}(V_{\text{pdn2}}, \text{sdn2}, \text{p}_{\text{ВНИЗ2}}, s2)$$

$s1 := 0, .01.. 1$



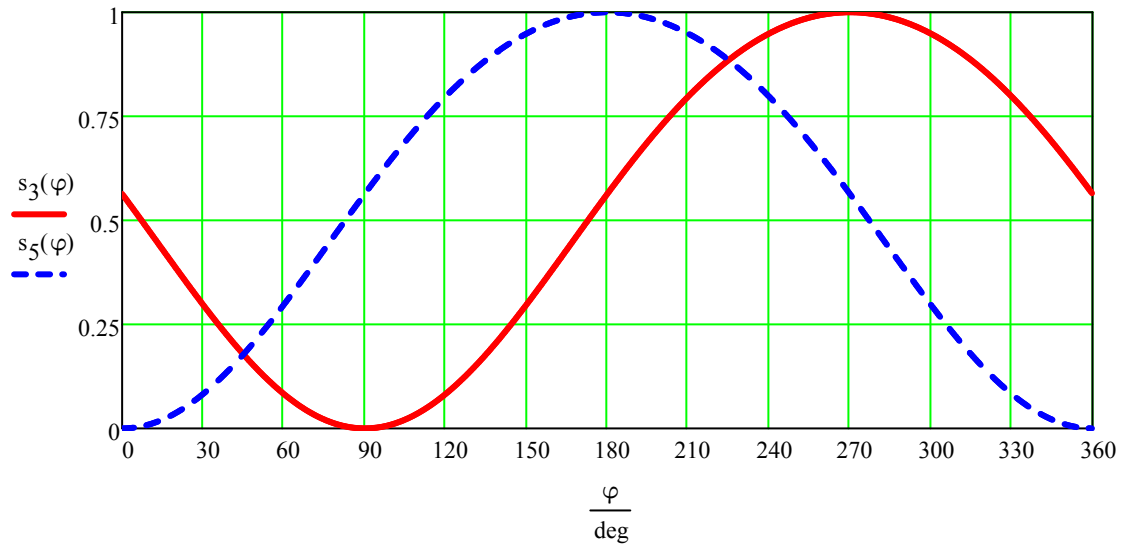
$s2 := 0, .01.. 1$



3.2.3. Построим зависимость относительного перемещения поршня от угла поворота коленчатого вала:

$$s_5(\varphi) := \frac{l_1 + l_2 - Y_B(\varphi)}{2 \cdot l_1}$$

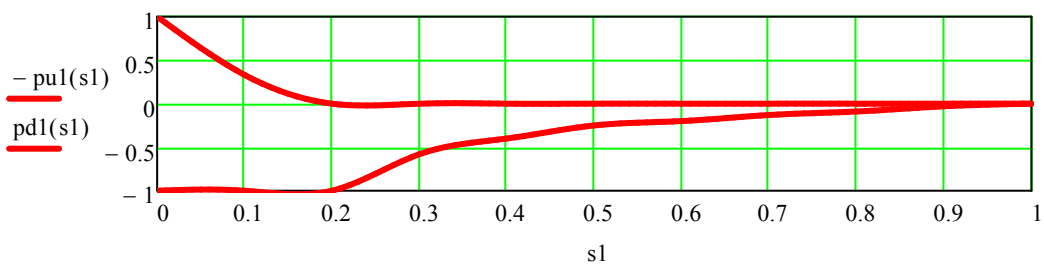
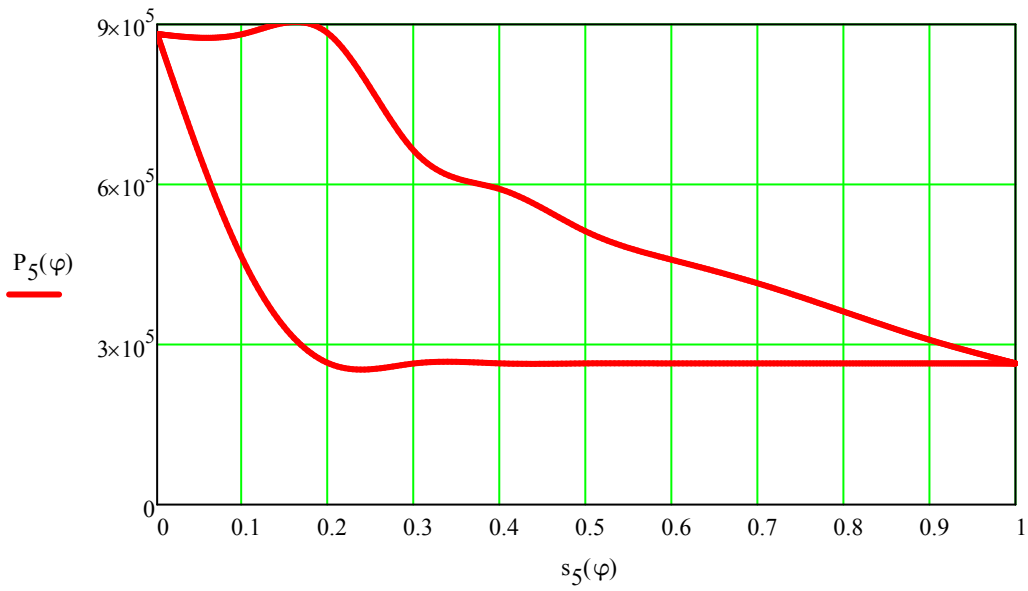
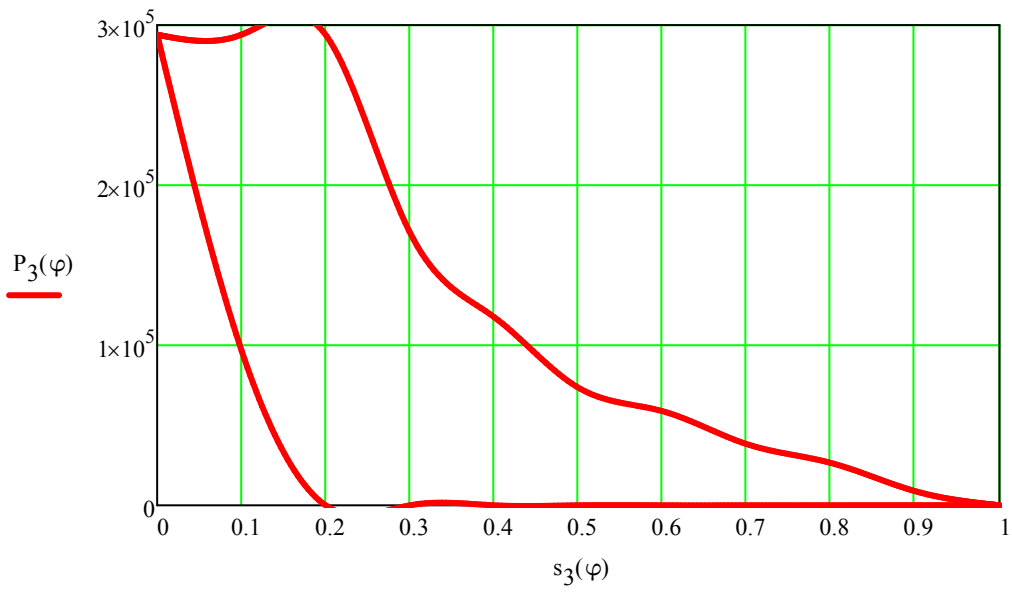
$$s_3(\varphi) := \frac{l_1 + l_4 - X_C(\varphi)}{2 \cdot l_1}$$

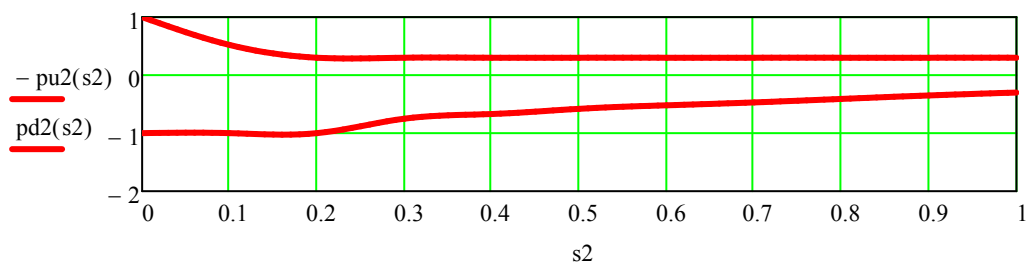


3.2.4. Построим зависимость давления в цилиндре двигателя от перемещения поршня:

$$P_3(\varphi) := \begin{cases} pu1(s_3(\varphi)) \cdot P_{\max 1} \cdot 10^6 & \text{if } V_{qC_x}(\varphi) > 0 \\ pd1(s_3(\varphi)) \cdot P_{\max 1} \cdot 10^6 & \text{otherwise} \end{cases}$$

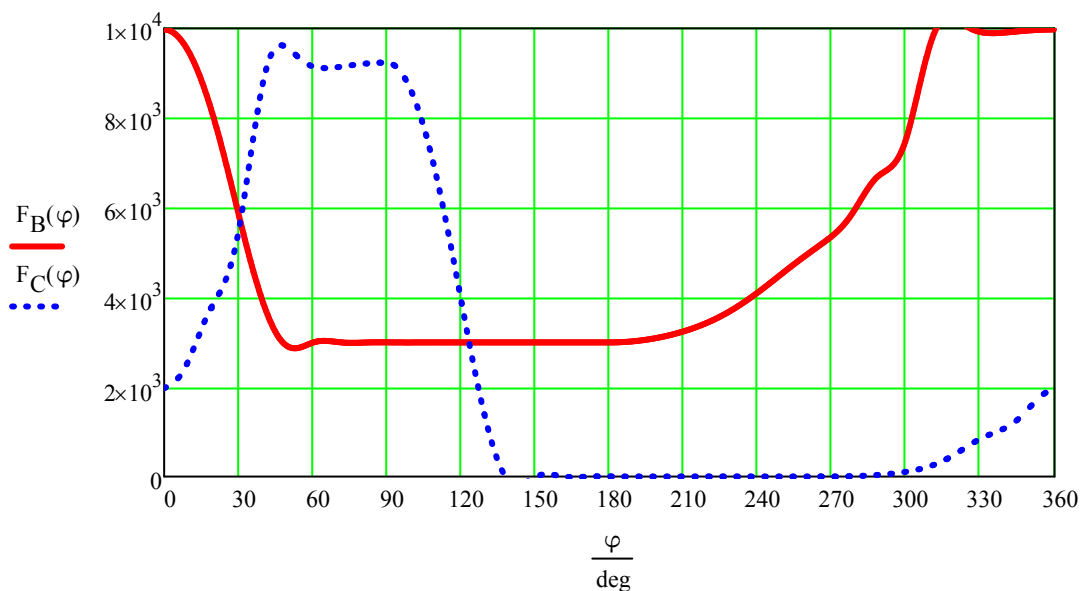
$$P_5(\varphi) := \begin{cases} pu2(s_5(\varphi)) \cdot P_{\max 2} \cdot 10^6 & \text{if } V_{qB_y}(\varphi) > 0 \\ pd2(s_5(\varphi)) \cdot P_{\max 2} \cdot 10^6 & \text{otherwise} \end{cases}$$





3.2.5. Построим зависимость силы действующей на поршень от угла поворота кривошипа:

$$F_B(\varphi) := P_5(\varphi) \cdot \pi \cdot \frac{d_2^2}{4} \quad F_C(\varphi) := P_3(\varphi) \cdot \pi \cdot \frac{d_1^2}{4}$$



3.2.6. Рассчитаем приведенные моменты сопротивления:

$$V_{qS2pr}(\varphi) := V_{qS2x}(\varphi) \cdot \sin(\varphi) + V_{qS2y}(\varphi) \cdot \cos(\varphi)$$

$$V_{qS4ypr}(\varphi) := V_{qS4x}(\varphi) \cdot \sin(\varphi) + V_{qS4y}(\varphi) \cdot \cos(\varphi)$$

$$V_{qCpr}(\varphi) := V_{qCx}(\varphi) \cdot \sin(\varphi) + V_{qCy}(\varphi) \cdot \cos(\varphi)$$

$$V_{qBpr}(\varphi) := V_{qBx}(\varphi) \cdot \sin(\varphi) + V_{qBy}(\varphi) \cdot \cos(\varphi)$$

$$f := 120\text{deg}$$

$$F_B(f) = 2.993 \times 10^3$$

$$F_C(f) = 3.957 \times 10^3$$

$$M_{\text{PRFB}}(\varphi) := -F_B(\varphi) \cdot V_{qBy}(\varphi)$$

$$M_{\text{PRFB}}(f) = 225.981$$

$$M_{\text{PRFC}}(\varphi) := -F_C(\varphi) \cdot V_{qCx}(\varphi)$$

$$M_{\text{PRFC}}(f) = 241.04$$

$$M_{\text{PRG2}}(\varphi) := m_2 \cdot g \cdot V_{qS2pr}(\varphi)$$

$$M_{\text{PRG2}}(f) = 0.089$$

$$M_{\text{PRG4}}(\varphi) := m_4 \cdot g \cdot V_{qS4ypr}(\varphi)$$

$$M_{\text{PRG4}}(f) = -0.124$$

$$M_{\text{PRG3}}(\varphi) := m_3 \cdot g \cdot V_{qBpr}(\varphi)$$

$$M_{\text{PRG3}}(f) = 0.222$$

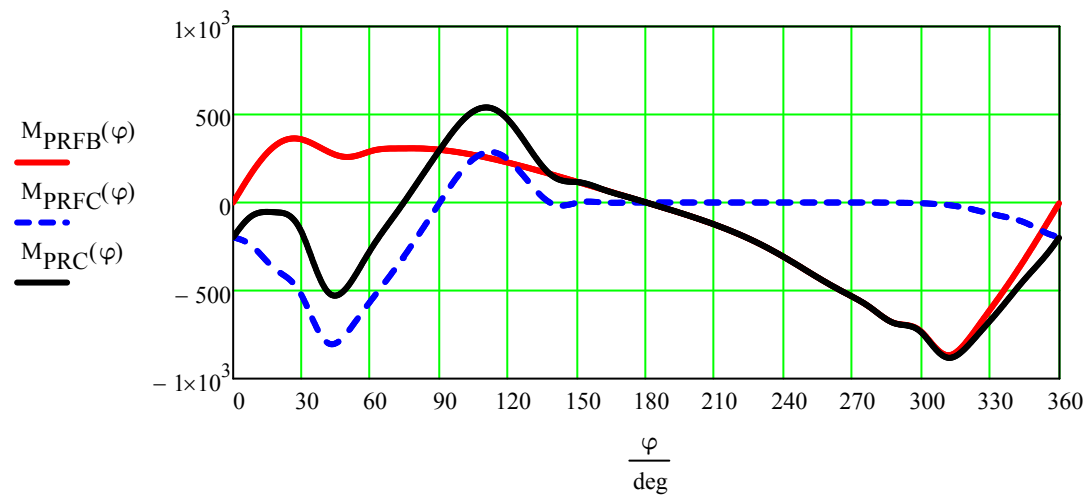
$$M_{\text{PRG5}}(\varphi) := m_5 \cdot g \cdot V_{qCpr}(\varphi)$$

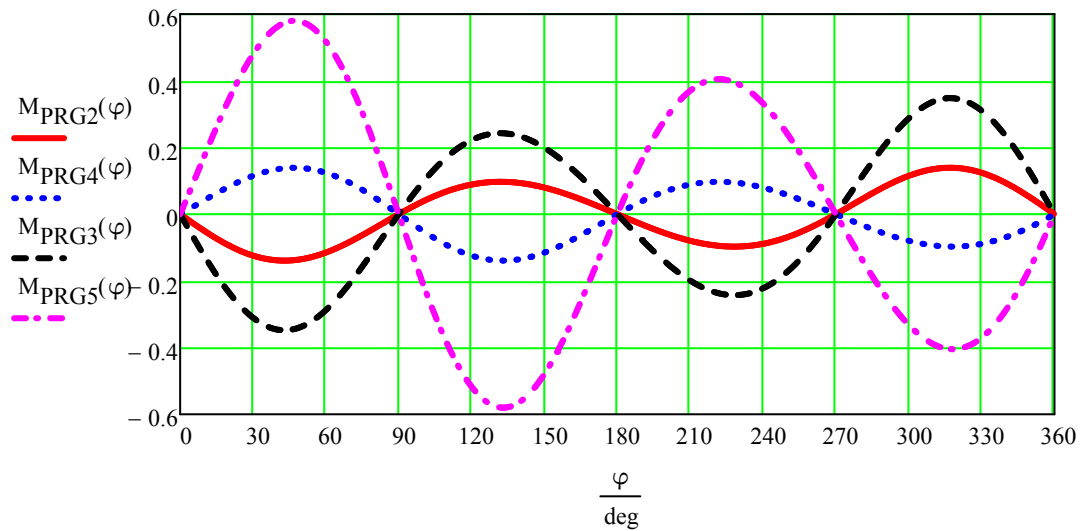
$$M_{\text{PRG5}}(f) = -0.517$$

$$M_{\text{PRC}}(\varphi) := M_{\text{PRFB}}(\varphi) + M_{\text{PRFC}}(\varphi) + M_{\text{PRG2}}(\varphi) + M_{\text{PRG4}}(\varphi) + M_{\text{PRG3}}(\varphi) + M_{\text{PRG5}}(\varphi)$$

$$\varphi := 0, .01.. 2 \cdot \pi$$

$$M_{\text{PRC}}(f) = 466.69$$





3.2.7. Рассчитаем приведенный момент движущих сил:

Вычислим работу сил сопротивления за цикл:

$$A_C := \int_0^{2\pi} M_{PRC}(\varphi) d\varphi \quad A_C = -1.204 \times 10^3$$

Найдем приведенный движущий момент:

$$M_{PRD} := \frac{-A_C}{2 \cdot \pi} \quad M_{PRD} = 191.6$$

Вычислим приведенный сумарный момент:

$$M_{\Sigma PR}(\varphi) := M_{PRD} + M_{PRC}(\varphi)$$

Интерполяция:

$$n := 1000$$

$$i := 0..n$$

$$\delta\varphi := 2 \cdot \frac{\pi}{n - 2}$$

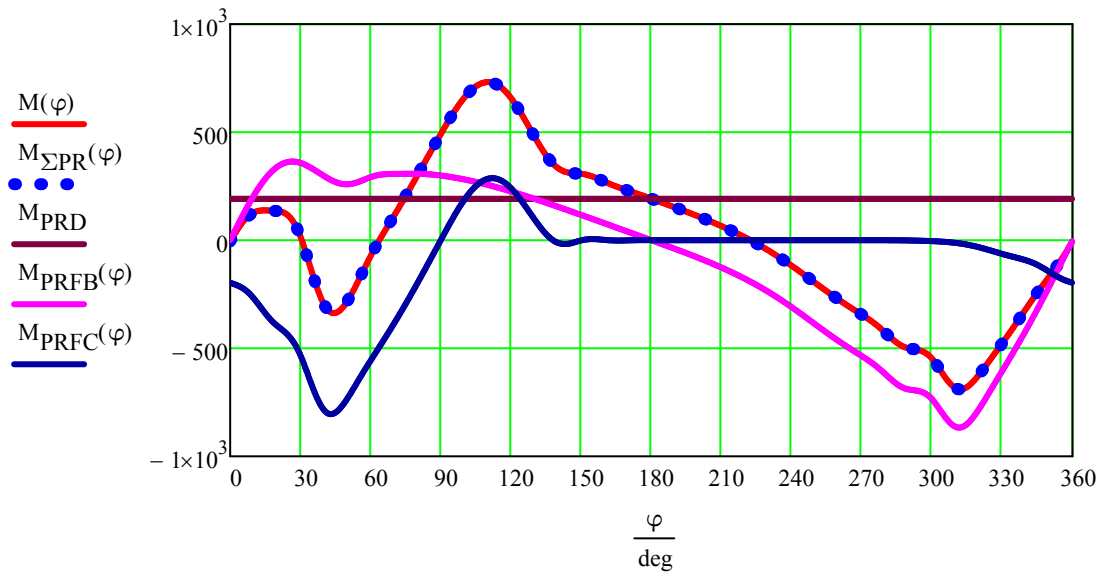
$$v\varphi_i := \delta\varphi \cdot (i - 1)$$

$$M1_i := M_{\Sigma PR}(v\varphi_i)$$

$$Ms := \text{Ispline}(v\varphi, M1)$$

$$M(\varphi) := \text{interp}(M_s, v\varphi, M1, \varphi)$$

$$\varphi := 0, .01..2\pi$$



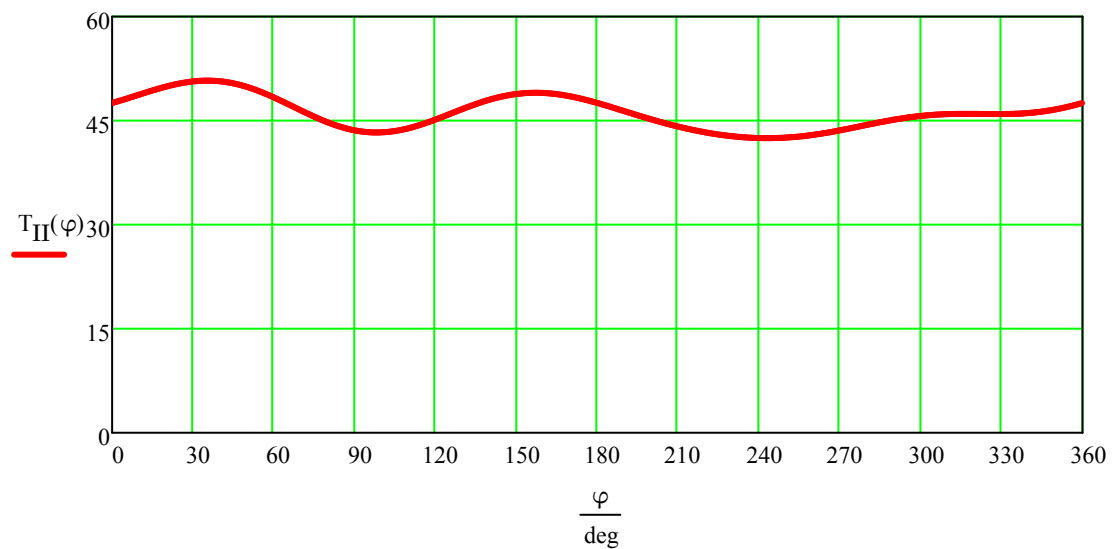
4. Рассчитаем момент инерции первой группы звеньев:

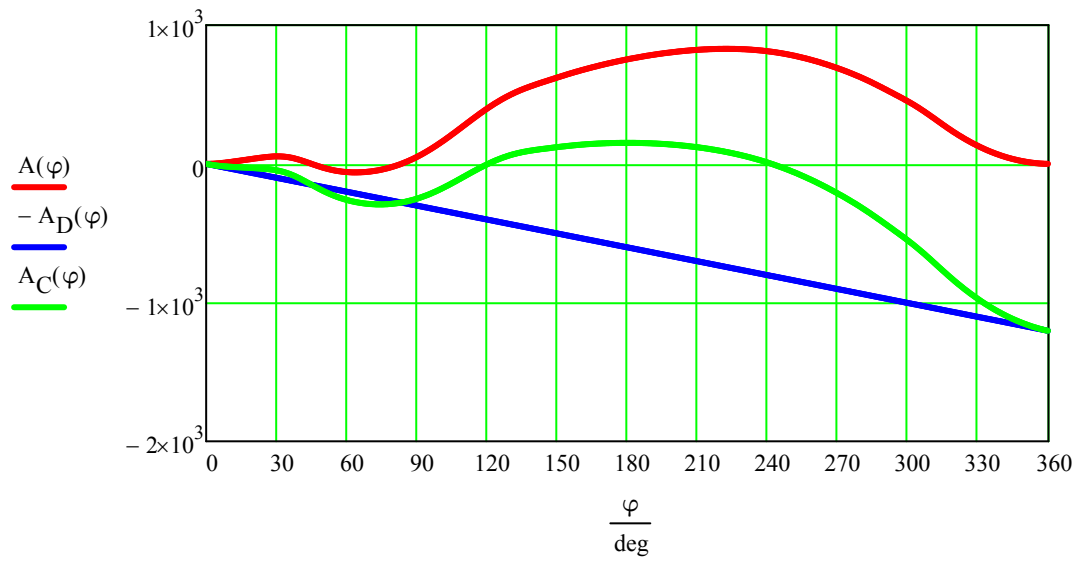
4.1.1. Вычислим работу суммарного момента:

$$A(\varphi) := \int_0^\varphi M(\varphi) d\varphi \quad A_G(\varphi) := \int_0^\varphi M_{PRC}(\varphi) d\varphi \quad A_D(\varphi) := \int_0^\varphi M_{PRD} d\varphi$$

Определим кинетическую энерги. второй группы звеньев:

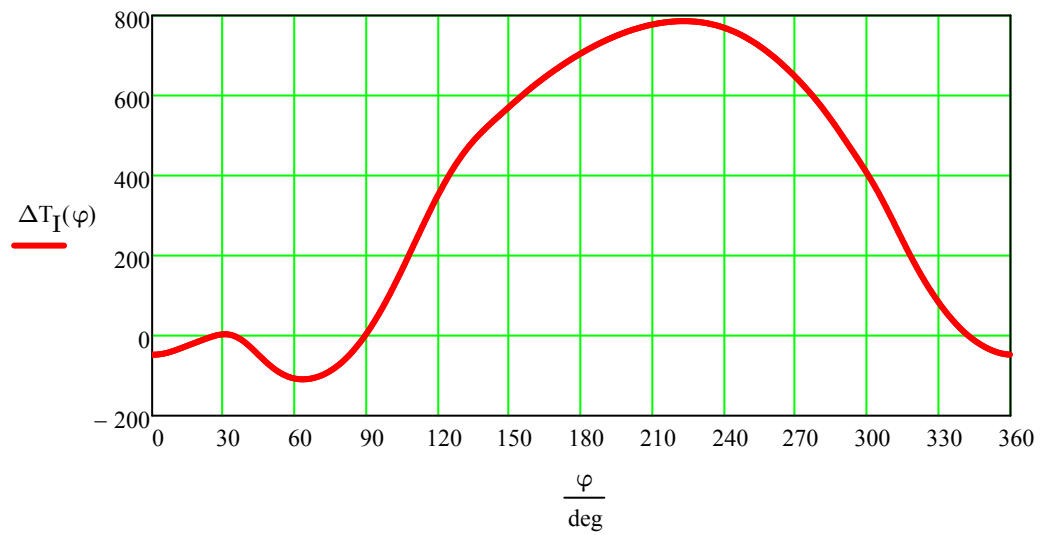
$$T_{II}(\varphi) := J_{PRII}(\varphi) \cdot \frac{\omega_{1cp}^2}{2} \quad \omega_{1cp} = 62.832$$





Определим изменения кинетической энергии первой группы звеньев:

$$\Delta T_I(\varphi) := A(\varphi) - T_{II}(\varphi)$$



Рассчитаем наибольшее изменение кинетической энергии первой группы звеньев:

$$ff := 30\text{deg}$$

Given

$$ffmin := \text{Minimize}(\Delta T_I, ff)$$

$$\frac{ffmin}{\text{deg}} = 0.66$$

$$T_{Imin} := \Delta T_I(ffmin)$$

$$T_{Imin} = -47.611$$

$$ff1 := 120\text{deg}$$

Given

$$ff1max := \text{Maximize}(\Delta T_I, ff1)$$

$$\frac{ff1max}{\text{deg}} = 222.98$$

$$T_{Imax} := \Delta T_I(ff1max)$$

$$T_{Imax} = 785.896$$

$$\Delta T_{нб} := T_{Imax} - T_{Imin}$$

$$\Delta T_{нб} = 833.507$$

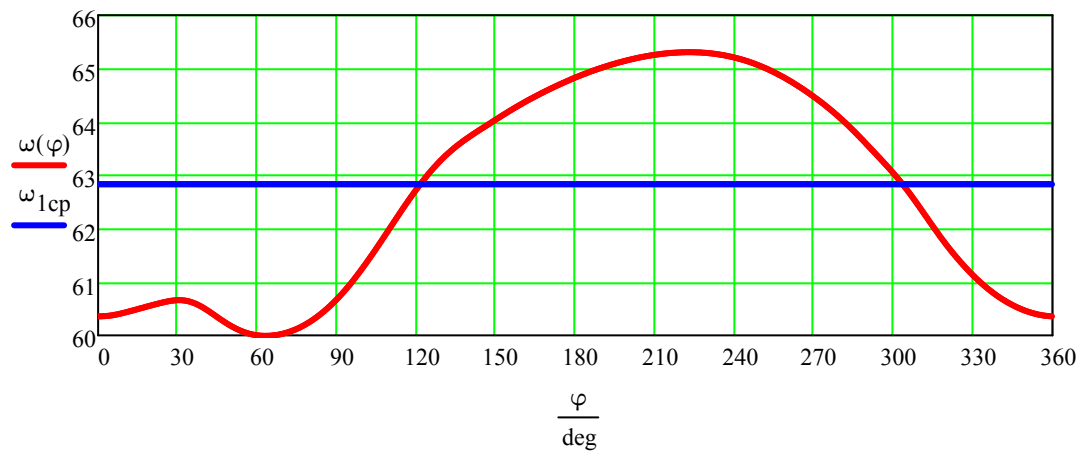
$$J_I := 2.68$$

$$\Delta\omega(\varphi) := \frac{\left[\Delta T_I(\varphi) - \frac{(T_{I\max} + T_{I\min})}{2} \right]}{\omega_{1cp} \cdot J_I}$$

$$\omega(\varphi) := \omega_{1cp} + \Delta\omega(\varphi)$$

$$\omega_{1cp} = 62.832$$

$$\varphi := 0, .01..2\pi$$



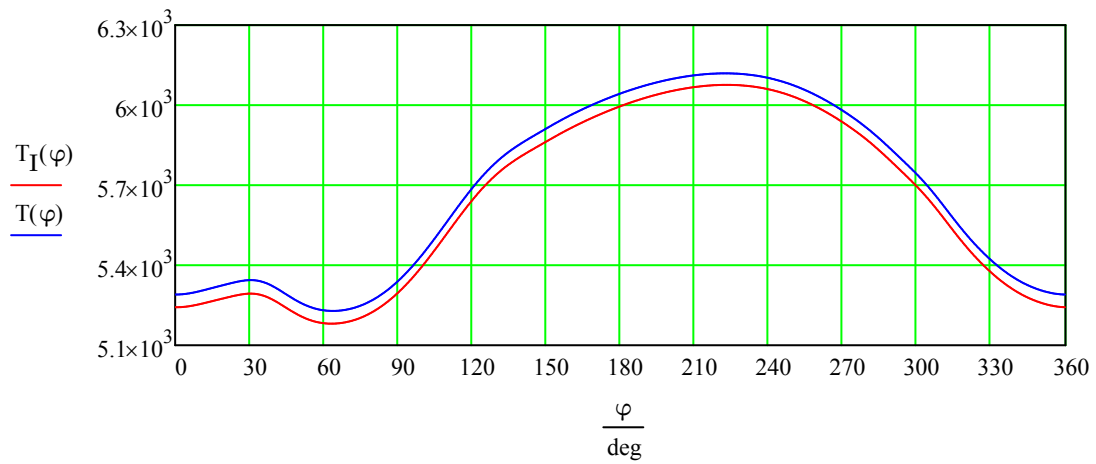
$$T_0 := J_I \cdot \frac{\omega_{1cp}^2}{2}$$

$$T_I(\varphi) := T_0 + \Delta T_I(\varphi)$$

$$\tilde{T}(\varphi) := T_I(\varphi) + T_{II}(\varphi)$$

$$\tilde{T}(\varphi) := T_0 + A(\varphi)$$

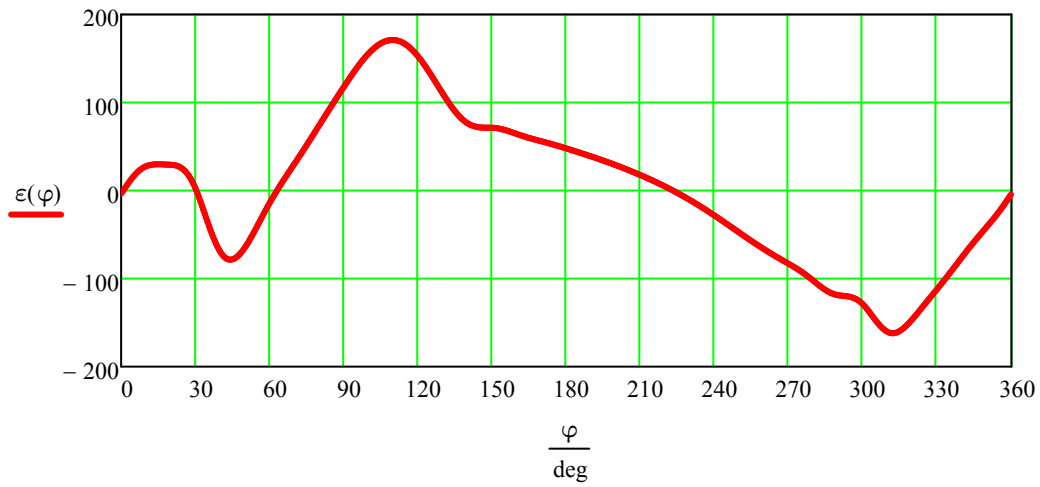
$$T_0 = 5.29 \times 10^3$$



$$J_{\text{PRI}} := \frac{\Delta T_{\text{H6}}}{\omega_{1\text{cp}}^2 \cdot \delta_1}$$

Построим график углового ускорения:

$$\varepsilon(\varphi) := \left(\frac{M_{\Sigma\text{PR}}(\varphi)}{J_{\text{PRII}}(\varphi) + J_{\text{PRI}}} \right) - \frac{\omega(\varphi)^2 \cdot dJ_{\text{PRII}}(\varphi)}{2 \cdot (J_{\text{PRII}}(\varphi) + J_{\text{PRI}})}$$



Определение истинных значений скоростей и ускорений:

$$f := 120 \text{deg}$$

$$\omega_1(\varphi) := \omega(\varphi) \cdot \left(\frac{d}{d\varphi} \varphi_1(\varphi) \right)$$

$$\omega_1(f) = -62.732$$

$$\omega_2(\varphi) := \omega_{q2}(\varphi) \cdot \omega(\varphi)$$

$$\omega_2(f) = -8.032$$

$$\omega_4(\varphi) := \omega_{q4}(\varphi) \cdot \omega(\varphi)$$

$$\omega_4(f) = 13.689$$

$$\varepsilon(f) = 152.592$$

$$\varepsilon_2(\varphi) := \varepsilon_{q2}(\varphi) \cdot \omega(\varphi)^2 + \omega_{q2}(\varphi) \cdot \varepsilon(\varphi)$$

$$\varepsilon_2(f) = -877.936$$

$$\varepsilon_4(\varphi) := \varepsilon_{q4}(\varphi) \cdot \omega(\varphi)^2 + \omega_{q4}(\varphi) \cdot \varepsilon(\varphi)$$

$$\varepsilon_4(f) = -438.887$$

$$V_A(\varphi) := l_1 \cdot \omega(\varphi)$$

$$V_A(f) = 6.273$$

$$V_B(\varphi) := V_{qB}(\varphi) \cdot \omega(\varphi)$$

$$V_B(f) = 4.737$$

$$V_{S2}(\varphi) := V_{qS2}(\varphi) \cdot \omega(\varphi)$$

$$V_{S2}(f) = 5.667$$

$$V_C(\varphi) := V_{qC}(\varphi) \cdot \omega(\varphi)$$

$$V_C(f) = 3.821$$

$$V_{S4}(\varphi) := V_{qS4}(\varphi) \cdot \omega(\varphi)$$

$$V_{S4}(f) = 5.063$$

$$a_{Ax}(\varphi) := a_{qAx}(\varphi) \cdot \omega(\varphi)^2 + V_{qAx}(\varphi) \cdot \varepsilon(\varphi)$$

$$a_{Ay}(\varphi) := a_{qAy}(\varphi) \cdot \omega(\varphi)^2 + V_{qAy}(\varphi) \cdot \varepsilon(\varphi)$$

$$a_A(\varphi) := \sqrt{a_{Ax}(\varphi)^2 + a_{Ay}(\varphi)^2}$$

$$a_A(f) = 393.82$$

$$a_{Bx}(\varphi) := a_{qBx}(\varphi) \cdot \omega(\varphi)^2 + V_{qBx}(\varphi) \cdot \varepsilon(\varphi)$$

$$a_{By}(\varphi) := a_{qBy}(\varphi) \cdot \omega(\varphi)^2 + V_{qBy}(\varphi) \cdot \varepsilon(\varphi)$$

$$a_B(\varphi) := \sqrt{a_{Bx}(\varphi)^2 + a_{By}(\varphi)^2}$$

$$a_B(f) = 234.386$$

$$a_{Cx}(\varphi) := a_{qCx}(\varphi) \cdot \omega(\varphi)^2 + V_{qCx}(\varphi) \cdot \varepsilon(\varphi)$$

$$a_{Cy}(\varphi) := a_{qCy}(\varphi) \cdot \omega(\varphi)^2 + V_{qCy}(\varphi) \cdot \varepsilon(\varphi)$$

$$a_C(\varphi) := \sqrt{a_{Cx}(\varphi)^2 + a_{Cy}(\varphi)^2}$$

$$a_C(f) = 400.857$$

$$a_{S2x}(\varphi) := a_{qS2x}(\varphi) \cdot \omega(\varphi)^2 + V_{qS2x}(\varphi) \cdot \varepsilon(\varphi)$$

$$a_{S2y}(\varphi) := a_{qS2y}(\varphi) \cdot \omega(\varphi)^2 + V_{qS2y}(\varphi) \cdot \varepsilon(\varphi)$$

$$a_{S2}(\varphi) := \sqrt{a_{S2x}(\varphi)^2 + a_{S2y}(\varphi)^2}$$

$$a_{S2}(f) = 314.658$$

$$a_{S4x}(\varphi) := a_{qS4x}(\varphi) \cdot \omega(\varphi)^2 + V_{qS4x}(\varphi) \cdot \varepsilon(\varphi)$$

$$a_{S4y}(\varphi) := a_{qS4y}(\varphi) \cdot \omega(\varphi)^2 + V_{qS4y}(\varphi) \cdot \varepsilon(\varphi)$$

$$a_{S4}(\varphi) := \sqrt{a_{S4x}(\varphi)^2 + a_{S4y}(\varphi)^2}$$

$$a_{S4}(f) = 386.161$$

$\varphi := 0,30..360$

$\varphi =$	$V_{qB}(\varphi) =$	$\omega_{q2}(\varphi) =$	$V_{qS2}(\varphi) = V_{qC}(\varphi) =$	$\omega_{q2}(\varphi) =$	$V_{qS2}(\varphi) =$
0	0	0.25	0.07	0.1	0.07
30	0.103	0.04	0.101	0.012	0.101
60	0.023	-0.239	0.072	0.088	0.072
90	0.079	-0.115	0.092	0.055	0.092
120	0.07	0.206	0.084	0.093	0.084
150	0.084	0.178	0.09	0.057	0.09
180	0.068	-0.153	0.087	0.048	0.087
210	0.036	-0.222	0.076	0.099	0.076
240	0.102	0.084	0.1	0.04	0.1
270	0.022	0.246	0.071	0.094	0.071
300	0.099	$-5.705 \cdot 10^{-3}$	0.1	$1.657 \cdot 10^{-3}$	0.1
330	$9.956 \cdot 10^{-3}$	-0.248	0.07	0.096	0.07
360	0.089	-0.073	0.096	0.035	0.096

Второй цилиндр:

$\varphi =$	$F_B(\varphi) =$	$V_{qB}(\varphi) =$	$M_{PRFB}(\varphi) =$
0	$9.975 \cdot 10^3$	0	0
30	$5.924 \cdot 10^3$	0.103	-608.632
60	$3.078 \cdot 10^3$	0.023	-71.414
90	$2.993 \cdot 10^3$	0.079	236.794
120	$4.696 \cdot 10^3$	0.07	328.719
150	$1.016 \cdot 10^4$	0.084	-855.582
180	$3.844 \cdot 10^3$	0.068	-260.906
210	$2.993 \cdot 10^3$	0.036	108.826
240	$2.996 \cdot 10^3$	0.102	307.031
270	$9.955 \cdot 10^3$	0.022	-218.417
300	$5.309 \cdot 10^3$	0.099	-527.699
330	$3.008 \cdot 10^3$	$9.956 \cdot 10^{-3}$	-29.95
360	$2.993 \cdot 10^3$	0.089	265.998

Первый цилиндр:

$\varphi =$	$F_C(\varphi) =$	$V_{qC}(\varphi) =$	$M_{PRFC}(\varphi) =$
0	$1.972 \cdot 10^3$	0.1	-197.218
30	8.183	0.012	-0.095
60	0.129	0.088	0.011
90	$4.945 \cdot 10^3$	0.055	271.392
120	$7.357 \cdot 10^3$	0.093	-687.83
150	335.742	0.057	-19.215
180	0.019	0.048	$8.968 \cdot 10^{-4}$
210	35.144	0.099	3.479
240	$9.14 \cdot 10^3$	0.04	-368.374
270	$1.538 \cdot 10^3$	0.094	-144.493
300	$5.477 \cdot 10^{-5}$	$1.657 \cdot 10^{-3}$	$9.078 \cdot 10^{-8}$
330	-0.936	0.096	-0.09
360	$7.505 \cdot 10^3$	0.035	264.065

$\varphi =$	$M_{\Sigma PR}(\varphi) =$	$A(\varphi) =$
0	-5.618	0
30	-417.136	$6.727 \cdot 10^8$
60	120.341	$1.771 \cdot 10^{10}$
90	699.481	$1.045 \cdot 10^{11}$
120	-167.321	$3.557 \cdot 10^{11}$
150	-683.211	$9.074 \cdot 10^{11}$
180	-69.175	$1.937 \cdot 10^{12}$
210	303.606	$3.664 \cdot 10^{12}$
240	130.445	$6.347 \cdot 10^{12}$
270	-171.334	$1.029 \cdot 10^{13}$
300	-336.097	$1.583 \cdot 10^{13}$
330	161.633	$2.336 \cdot 10^{13}$
360	721.459	$3.33 \cdot 10^{13}$

$\varphi =$	$J_{PRm2}(\varphi) =$	$J_{PRm3}(\varphi) =$	$J_{PRm4}(\varphi) =$	$J_{PRm5}(\varphi) =$	$J_{PRJ2}(\varphi) =$
0	$1.96 \cdot 10^{-3}$	0	$4 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	0.013
30	$4.045 \cdot 10^{-3}$	$3.166 \cdot 10^{-3}$	$1.995 \cdot 10^{-3}$	$6.742 \cdot 10^{-5}$	$3.326 \cdot 10^{-4}$
60	$2.098 \cdot 10^{-3}$	$1.615 \cdot 10^{-4}$	$3.642 \cdot 10^{-3}$	$3.852 \cdot 10^{-3}$	0.012
90	$3.374 \cdot 10^{-3}$	$1.878 \cdot 10^{-3}$	$2.482 \cdot 10^{-3}$	$1.506 \cdot 10^{-3}$	$2.774 \cdot 10^{-3}$
120	$2.819 \cdot 10^{-3}$	$1.47 \cdot 10^{-3}$	$3.553 \cdot 10^{-3}$	$4.37 \cdot 10^{-3}$	$8.888 \cdot 10^{-3}$
150	$3.226 \cdot 10^{-3}$	$2.126 \cdot 10^{-3}$	$2.75 \cdot 10^{-3}$	$1.638 \cdot 10^{-3}$	$6.629 \cdot 10^{-3}$
180	$3.04 \cdot 10^{-3}$	$1.382 \cdot 10^{-3}$	$2.522 \cdot 10^{-3}$	$1.139 \cdot 10^{-3}$	$4.897 \cdot 10^{-3}$
210	$2.293 \cdot 10^{-3}$	$3.967 \cdot 10^{-4}$	$3.783 \cdot 10^{-3}$	$4.899 \cdot 10^{-3}$	0.01
240	$3.966 \cdot 10^{-3}$	$3.15 \cdot 10^{-3}$	$2.239 \cdot 10^{-3}$	$8.122 \cdot 10^{-4}$	$1.475 \cdot 10^{-3}$
270	$2.042 \cdot 10^{-3}$	$1.444 \cdot 10^{-4}$	$3.832 \cdot 10^{-3}$	$4.415 \cdot 10^{-3}$	0.013
300	$3.985 \cdot 10^{-3}$	$2.964 \cdot 10^{-3}$	$1.961 \cdot 10^{-3}$	$1.373 \cdot 10^{-6}$	$6.835 \cdot 10^{-6}$
330	$1.986 \cdot 10^{-3}$	$2.974 \cdot 10^{-5}$	$3.884 \cdot 10^{-3}$	$4.582 \cdot 10^{-3}$	0.013
360	$3.676 \cdot 10^{-3}$	$2.37 \cdot 10^{-3}$	$2.172 \cdot 10^{-3}$	$6.191 \cdot 10^{-4}$	$1.121 \cdot 10^{-3}$

$J_{PRJ4}(\varphi) =$ $J_{PRII}(\varphi) =$

0	0.024
0.013	0.022
$1.293 \cdot 10^{-3}$	0.023
0.011	0.023
$4.616 \cdot 10^{-3}$	0.026
$6.919 \cdot 10^{-3}$	0.023
$8.617 \cdot 10^{-3}$	0.022
$3.019 \cdot 10^{-3}$	0.025
0.012	0.023
$4.33 \cdot 10^{-4}$	0.024
0.013	0.022
$2.451 \cdot 10^{-4}$	0.024
0.012	0.022

$\varphi =$	$T_{II}(\varphi) =$	$\omega(\varphi) =$
0	47.542	60.357
30	44.292	$3.995 \cdot 10^6$
60	45.441	$1.051 \cdot 10^8$
90	44.683	$6.204 \cdot 10^8$
120	50.762	$2.112 \cdot 10^9$
150	45.97	$5.389 \cdot 10^9$
180	42.63	$1.15 \cdot 10^{10}$
210	48.926	$2.176 \cdot 10^{10}$
240	46.294	$3.769 \cdot 10^{10}$
270	46.603	$6.11 \cdot 10^{10}$
300	43.501	$9.402 \cdot 10^{10}$
330	46.656	$1.387 \cdot 10^{11}$
360	43.601	$1.978 \cdot 10^{11}$

Найдем момент инерции маховика:

$$J_{\text{доп}} := J_{\text{PRI}} - J_{10} - J_{\text{ред}} \quad J_{\text{доп}} = 3.548 \quad J_{\text{PRI}} = 4.223$$

Определим размеры и массу маховика в виде сплошного диска:

$$D_{\text{MX}} := 0.366 \cdot \sqrt[5]{J_{\text{доп}}} \quad D_{\text{MX}} = 0.471$$
$$m_{\text{MX}} := \frac{8 \cdot J_{\text{доп}}}{(D_{\text{MX}})^2} \quad m_{\text{MX}} = 127.67$$
$$b := 0.2 \cdot D_{\text{MX}} \quad b = 0.094$$

Определим размеры и массу маховика в виде обода:

$$D_{\text{MXc}} := 0.406 \cdot \sqrt[5]{J_{\text{доп}}} \quad D_{\text{MXc}} = 0.523$$
$$b_{\text{MXc}} := 0.2 \cdot D_{\text{MXc}} \quad b_{\text{MXc}} = 0.105$$
$$D_{\text{MX1}} := 0.8 \cdot D_{\text{MXc}} \quad D_{\text{MX1}} = 0.418$$
$$m_{\text{MXc}} := 6123 \cdot [(D_{\text{MXc}})^2 - (D_{\text{MX1}})^2] \cdot b_{\text{MXc}} \quad m_{\text{MXc}} = 63.072$$

