

Определение законов движения

Исходные данные

Ускорение свободного падения	$g := 9.81$	$\frac{м}{с^2}$
Средняя скорость поршня	$v_{cp} := 0.14$	$\frac{м}{с}$
Число оборотов коленчатого вала	$n_1 := \frac{32}{60} = 0.533$	$с^{-1}$
	$\omega_1 := 2 \cdot \pi \cdot n_1 = 3.351$	$\frac{рад}{с}$
Отношение длины шатуна к длине кривошипа	$\lambda := 5.8$	
Положение центра тяжести шатуна 2	$\lambda_{S2} := 0.275$	$с^{-1}$
Сила сопротивления	$P_{C1max} := 490.5$	Н
	$P_{C2max} := 686.7$	Н
	$F_{Mmax} := 490.5$	Н
	$F_D := 245.25$	Н
Вес шатуна	$G_1 := 120$	Н
	$m_2 := \frac{120}{g} = 12.232$	кг
Вес плунжера	$G_2 := 400$	Н
	$m_3 := \frac{400}{g} = 40.775$	кг
Положение центра тяжести звена 3	$L_{bs3} := 0.12$	м
Момент инерции шатуна	$J_{S2} := 0.069$	$кг \cdot м^2$
Коэффициент неравномерности вращения вала 1	$\delta := \frac{1}{18}$	
Маховой момент коленчатого вала (без маховика)	$J_{01} := 0.029$	$кг \cdot м^2$
Маховой момент коленчатого вала (без маховика)	$J_p := 0.05 \cdot g = 0.491$	$кг \cdot м^2$

Момент инерции редуктора и зубчатых колес 9, 10, приведенных к валу электродвигателя	$J_{\text{red}} := 0.03 \cdot g = 0.294$	$\text{кг} \cdot \text{м}^2$
Углоавая координата кривошипа для силового расчета	$f := 120 \cdot \text{deg} = 2.094$	рад
Число зубьев колес	$Z_9 := 10$ $Z_{10} := 25$	
Ход плунжера 13 масляного насоса	$h := 0.01$	м
Угол давления в кулачковом механизме	$v := 16 \cdot \text{deg} = 0.279$	рад
Угол рабочего профиля кулачка	$\varphi_{\text{раб}} := 330 \cdot \text{deg} = 5.76$	рад
Отношение между величинами ускорений толкателей	$\nu := 2$	

Приложение А

1. Проектирование механизма

1.1 Определение размеров механизма

$$l_{AO} := \frac{v_{cp}}{4 \cdot n_1} = 0.066 \quad l_{AB} := \lambda \cdot l_{AO} = 0.381 \quad l_{AS2} := l_{AB} \cdot 0.275 = 0.105$$

2. Вычисление передаточных функций механизма

2.1. Функции положения.

$$X_A(\varphi) := -l_{AO} \cdot \cos(\varphi) \quad X_A(f) = 0.033$$

$$Y_A(\varphi) := l_{AO} \cdot \sin(\varphi) \quad Y_A(f) = 0.057$$

$$\varphi_2(\varphi) := \arcsin\left(\frac{Y_A(\varphi)}{l_{AB}}\right) \quad \varphi_2(f) = 0.15$$

$$X_B(\varphi) := l_{AB} \cdot \cos(\varphi_2(\varphi)) + X_A(\varphi) \quad X_B(f) = 0.409$$

$$Y_B(\varphi) := 0 \quad Y_B(f) = 0$$

$$X_{S2}(\varphi) := X_A(\varphi) + (l_{AS2}) \cdot \cos(\varphi_2(\varphi)) \quad X_{S2}(f) = 0.136$$

$$Y_{S2}(\varphi) := Y_A(\varphi) - (l_{AS2}) \cdot \sin(\varphi_2(\varphi)) \quad Y_{S2}(f) = 0.041$$

2.2. Кинематические передаточные функции скорости (аналоги скоростей):

$$V_{qS2X}(\varphi) := \frac{d}{d\varphi} X_{S2}(\varphi) \quad V_{qS2X}(f) = 0.058$$

$$V_{qS2Y}(\varphi) := \frac{d}{d\varphi} Y_{S2}(\varphi) \quad V_{qS2Y}(f) = -0.024$$

$$V_{qS2}(\varphi) := \sqrt{V_{qS2X}(\varphi)^2 + V_{qS2Y}(\varphi)^2} \quad V_{qS2}(f) = 0.063$$

$$V_{qAX}(\varphi) := \frac{d}{d\varphi} (X_A(\varphi)) \quad V_{qAX}(f) = 0.057$$

$$V_{qAY}(\varphi) := \frac{d}{d\varphi} (Y_A(\varphi)) \quad V_{qAY}(f) = -0.033$$

$$V_{qA}(\varphi) := \sqrt{V_{qAX}(\varphi)^2 + V_{qAY}(\varphi)^2} \quad V_{qA}(f) = 0.066$$

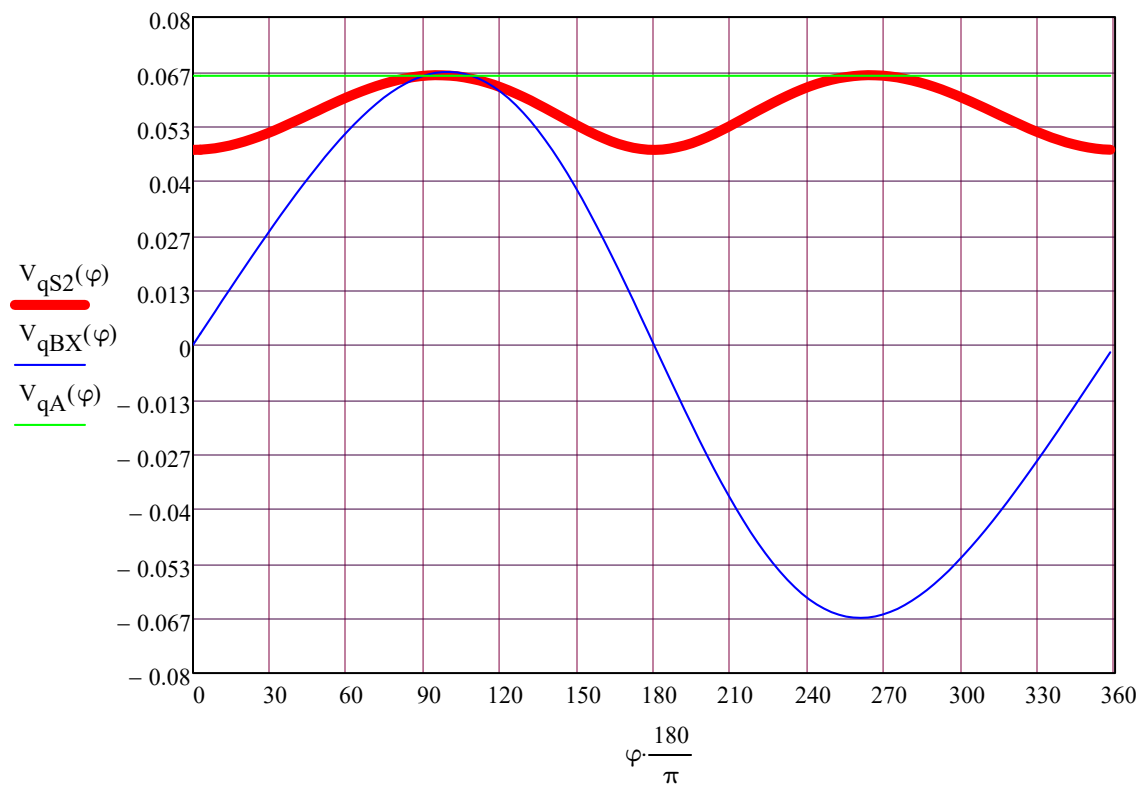
$$V_{qBX}(\varphi) := \frac{d}{d\varphi} (X_B(\varphi)) \quad V_{qBX}(f) = 0.062$$

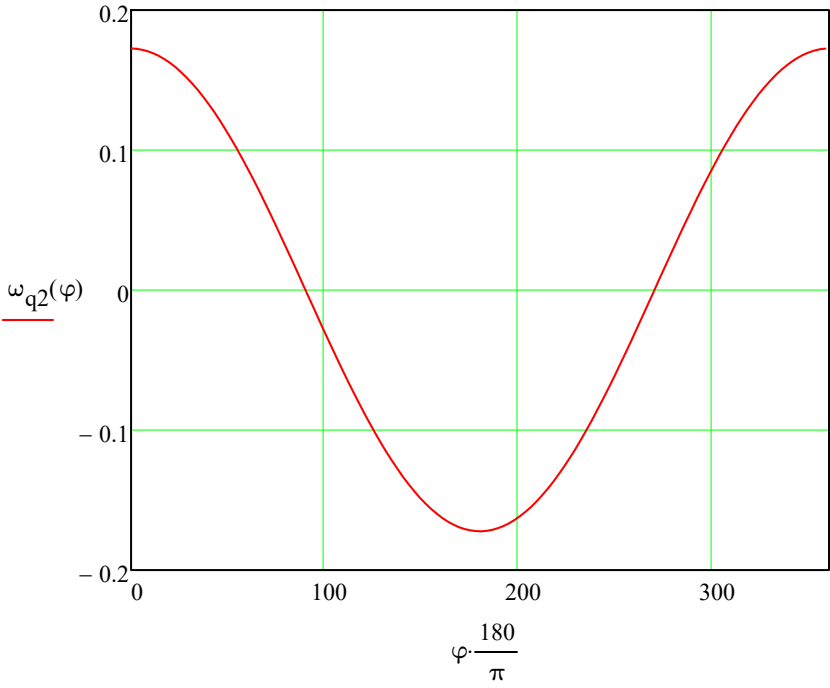
$$V_{qB}(\varphi) := |V_{qBX}(\varphi)| \quad V_{qB}(f) = 0.062$$

$$\omega_{q2}(\varphi) := \left(\frac{d}{d\varphi} \varphi_2(\varphi) \right)$$

$$\omega_{q2}(f) = -0.087$$

$$\omega_2(\varphi) := \omega_{q2}(\varphi) \quad \varphi := 0, 0.05 \dots 2 \cdot \pi$$

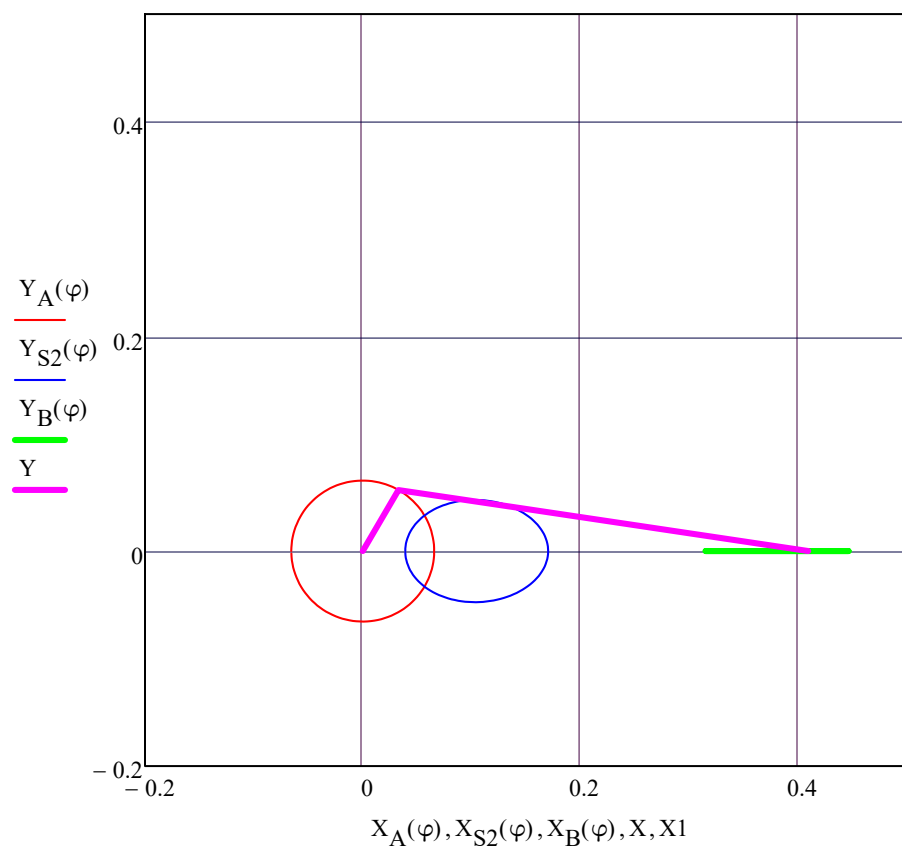




$$\mathbf{X} := \begin{pmatrix} X_B(f) \\ X_{S2}(f) \\ X_A(f) \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{Y} := \begin{pmatrix} Y_B(f) \\ Y_{S2}(f) \\ Y_A(f) \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{X1} := \begin{pmatrix} X_B(0f) \\ X_{S2}(0f) \\ X_A(0f) \\ 0 \end{pmatrix}$$

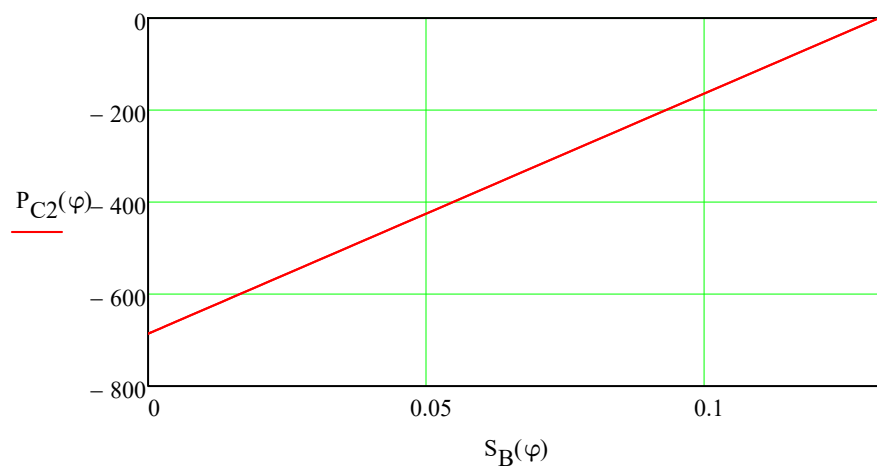


1.3 Построение графика силы P_c

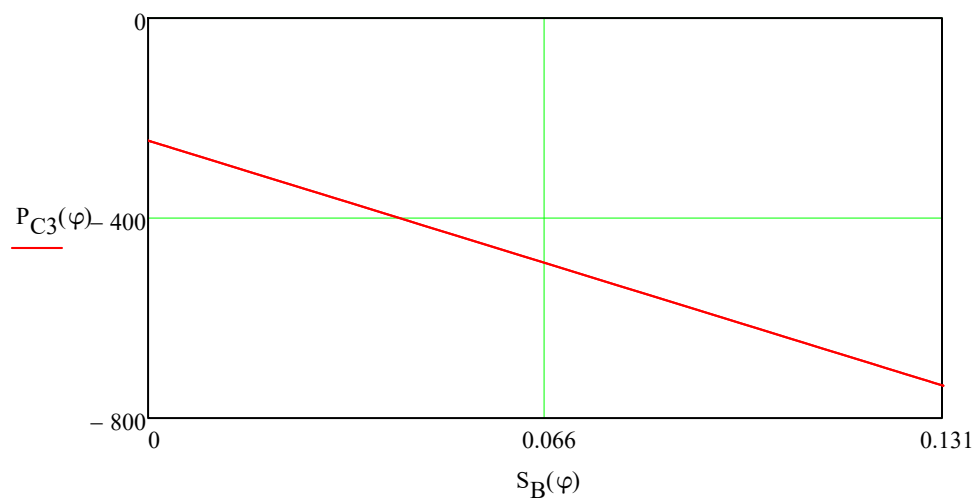
$$\underline{H} := 2 \cdot l_{AO} = 0.131$$

$$S_B(\varphi) := X_B(\varphi) - X_B(0)$$

$$P_{C2}(\varphi) := \frac{H - S_B(\varphi)}{H} \cdot P_{C2\max}$$

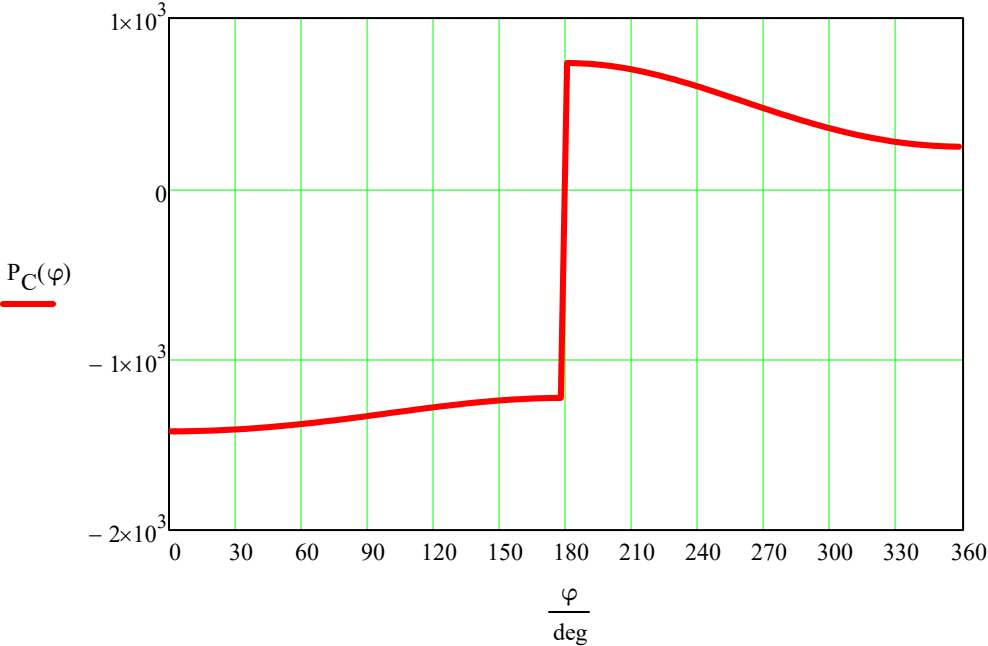


$$P_{C3}(\varphi) := -\left(F_{\mathcal{A}} + \frac{S_B(\varphi)}{H} \cdot F_{Mmax}\right)$$



$$P_C(\varphi) := \begin{cases} (-P_{C1max} + P_{C2}(\varphi) + P_{C3}(\varphi)) & \text{if } 0 \leq \varphi \leq \pi \\ -P_{C3}(\varphi) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\varphi := 0, .05 .. 2 \cdot \pi$$



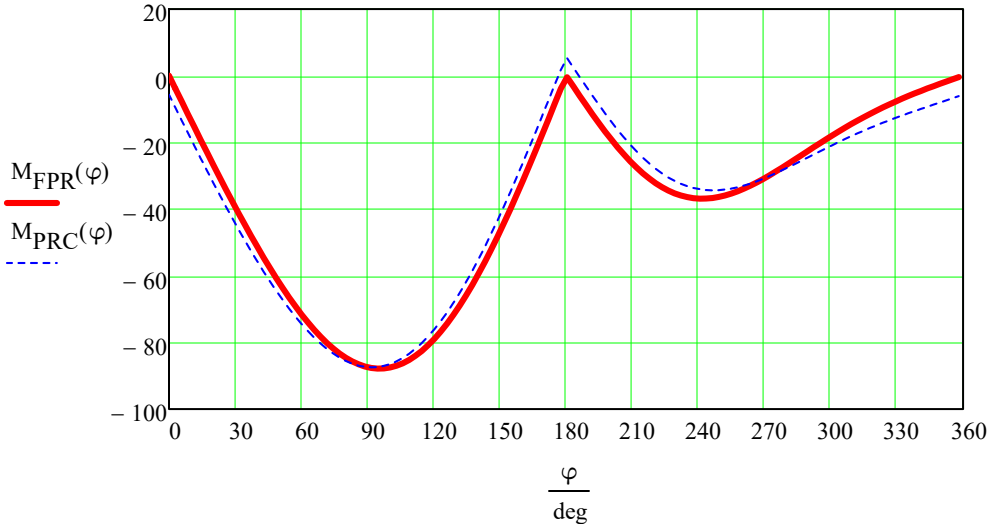
$$M_{\text{G2PR}}(\varphi) := -m_2 \cdot g \cdot V_{\text{qS2Y}}(\varphi)$$

$$M_{\text{FPR}}(\varphi) := P_C(\varphi) \cdot V_{\text{qBX}}(\varphi)$$

$$M_{\text{FPR}}(f) = -79.192$$

$$M_{\text{PRC}}(\varphi) := M_{\text{FPR}}(\varphi) + M_{\text{G2PR}}(\varphi)$$

$$M_{\text{PRC}}(0) = -5.709$$

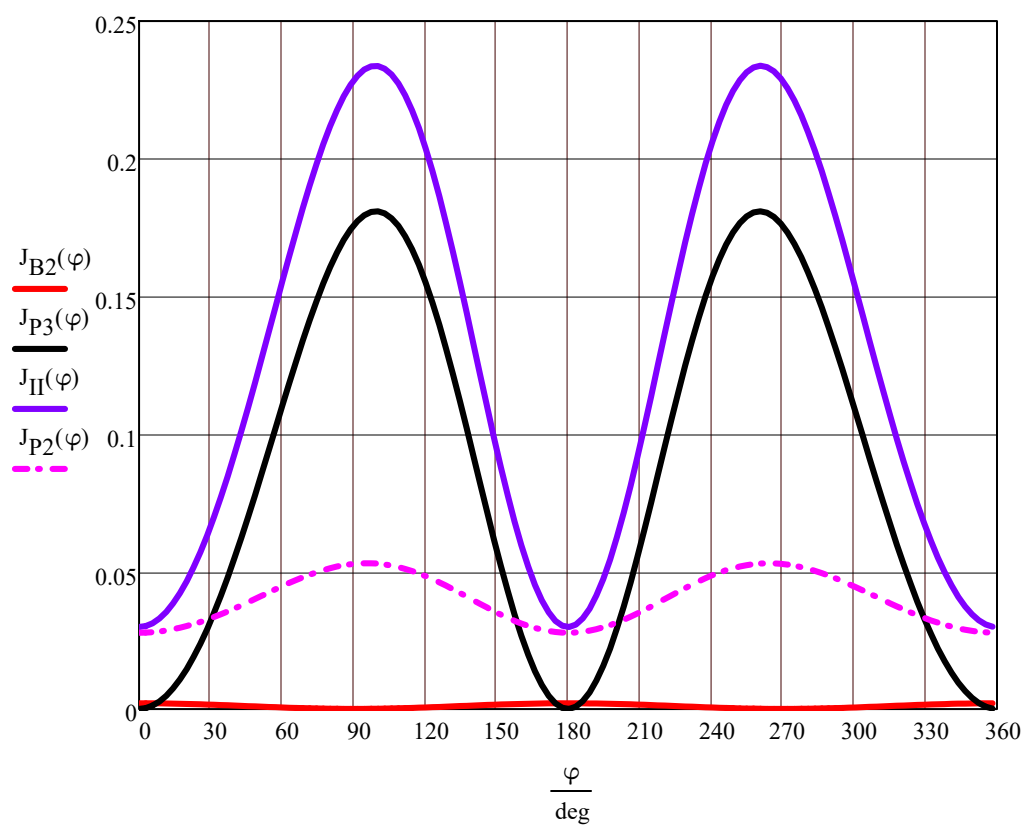


$$J_{B2}(\varphi) := J_{S2} \cdot \left(\omega_{q2}(\varphi) \right)^2$$

$$J_{P2}(\varphi) := m_2 \cdot \left(V_{qS2X}(\varphi)^2 + V_{qS2Y}(\varphi)^2 \right)$$

$$J_{P3}(\varphi) := m_3 \cdot V_{qBX}(\varphi)^2$$

$$J_{II}(\varphi) := J_{B2}(\varphi) + J_{P2}(\varphi) + J_{P3}(\varphi)$$



$$M_{\text{DPR}} := \frac{\int_0^{2\pi} M_{\text{PRC}}(\varphi) \, \mathrm{d}\varphi}{-2\pi} = 37.911$$

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

$$\textcolor{green}{N} := 1200 \qquad i := 0 \ldots N$$

$$\Delta\varphi := \frac{2\pi}{N}$$

$$A_{\varphi_i} := \Delta\varphi \cdot i$$

$$A_{\text{M}_i} := M_{\Sigma\text{PR}}\bigl(A_{\varphi_i}\bigr)$$

$$\text{cM} := \text{lspline}\bigl(A_{\varphi}, A_{\text{M}}\bigr)$$

$$\textcolor{green}{M}_{\Sigma\text{PR}}(\varphi) := \text{interp}\bigl(\text{cM}, A_{\varphi}, A_{\text{M}}, \varphi\bigr)$$

$$\textcolor{green}{N} := 1200 \qquad i := 0 \ldots N$$

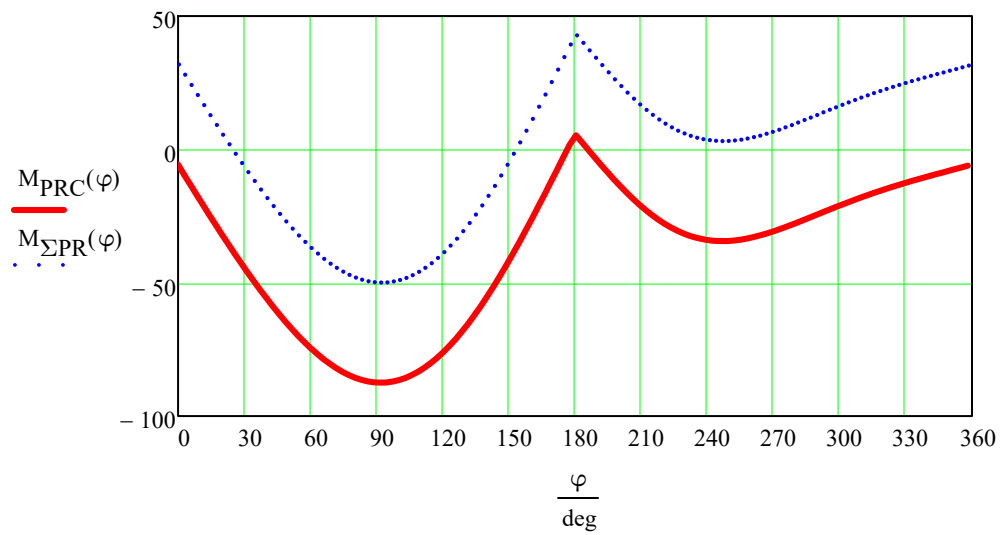
$$\textcolor{green}{\Delta}\varphi := \frac{2\pi}{N}$$

$$A_{\varphi_i} := \Delta\varphi \cdot i$$

$$A_{\text{M}_i} := M_{\Sigma\text{PR}}\bigl(A_{\varphi_i}\bigr)$$

$$\textcolor{green}{\text{cM}} := \text{lspline}\bigl(A_{\varphi}, A_{\text{M}}\bigr)$$

$$\textcolor{green}{M}_{\Sigma\text{PR}}(\varphi) := \text{interp}\bigl(\text{cM}, A_{\varphi}, A_{\text{M}}, \varphi\bigr)$$



Работа суммарного момента:

$$A_{\Sigma PR}(\varphi) := \int_0^{\varphi} M_{\Sigma PR}(\varphi) d\varphi$$

Работа внешних сил

$$A_{FPR}(\varphi) := \int_0^{\varphi} M_{FPR}(\varphi) d\varphi$$

Работа движущего момента:

$$A_{DPR}(\varphi) := \int_0^{\varphi} M_{DPR} d\varphi$$

Средняя угловая скорость:

$$\omega_{cp} := 2\pi n_1 = 3.351$$

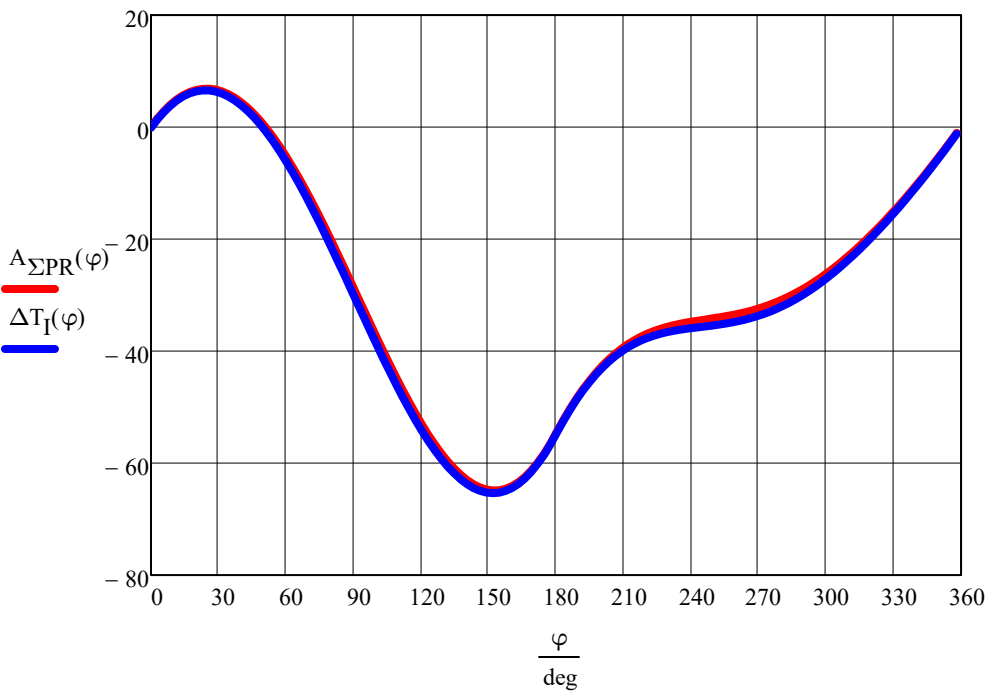
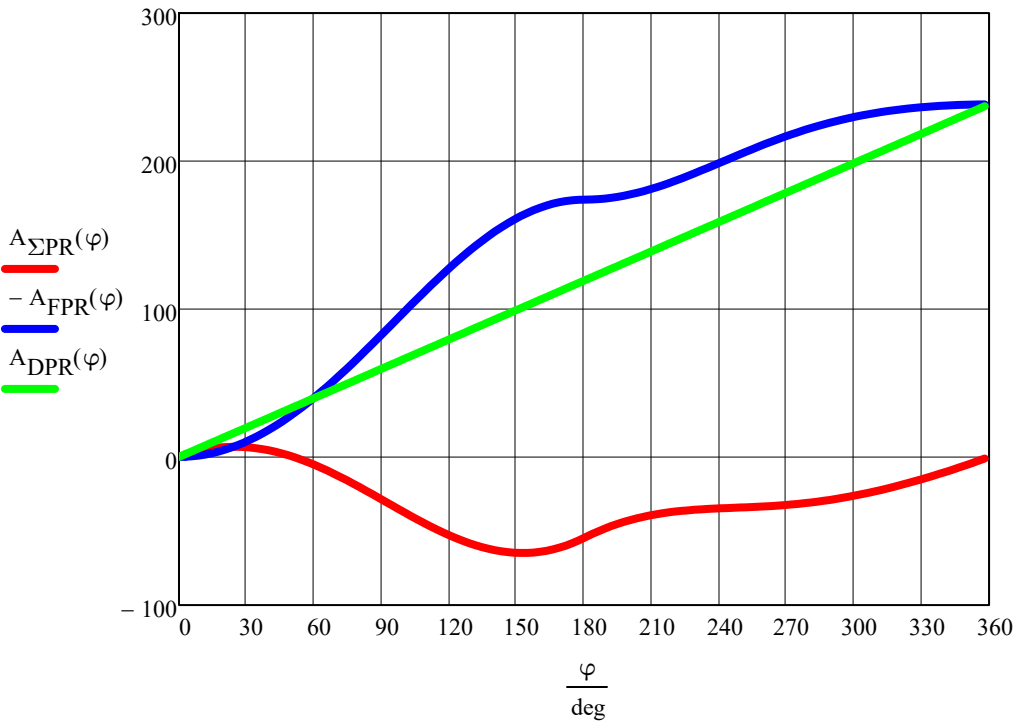
Кинетическая энергия второй группы звеньев:

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

Изменение кинетической энергии первой группы звеньев:

$$\Delta T_I(\varphi) := A_{\Sigma PR}(\varphi) - T_{II}(\varphi)$$

$$\Delta T_I(f) = -54.018$$



Наибольшее изменение кинетической энергии первой группы звеньев за цикл:

$$t := 300 \cdot \text{deg}$$

Given

$$0 \leq t \leq 2\pi$$

$$t_{\min} := \text{Minimize}(\Delta T_I, t) \quad \frac{t_{\min}}{\text{deg}} = 151.932 \quad \Delta T_I(t_{\min}) = -65.408$$

$$t := 30 \cdot \text{deg}$$

Given

$$0 \leq t \leq 2\pi$$

$$t_{\max} := \text{Maximize}(\Delta T_I, t) \quad \frac{t_{\max}}{\text{deg}} = 24.209 \quad \Delta T_I(t_{\max}) = 6.538$$

Максимальное значение:

$$T_{I\max} := (\Delta T_I(t_{\max})) = 6.538 \quad \text{Дж}$$

Минимальное значение:

$$T_{I\min} := (\Delta T_I(t_{\min})) = -65.408$$

Тогда, наибольшее изменение кинетической энергии:

$$\Delta T_{H6} := T_{I\max} - T_{I\min} = 71.945$$

$$J_{PRI} := \frac{\Delta T_{H6}}{\omega_{cp}^2 \cdot \delta} = 115.323$$

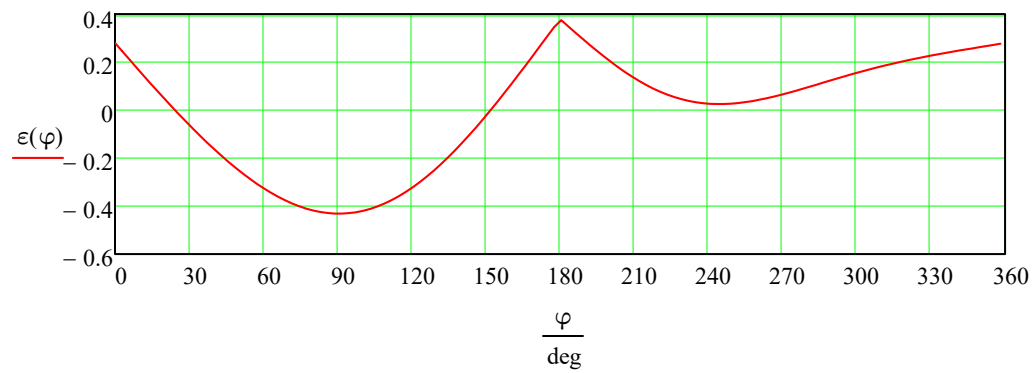
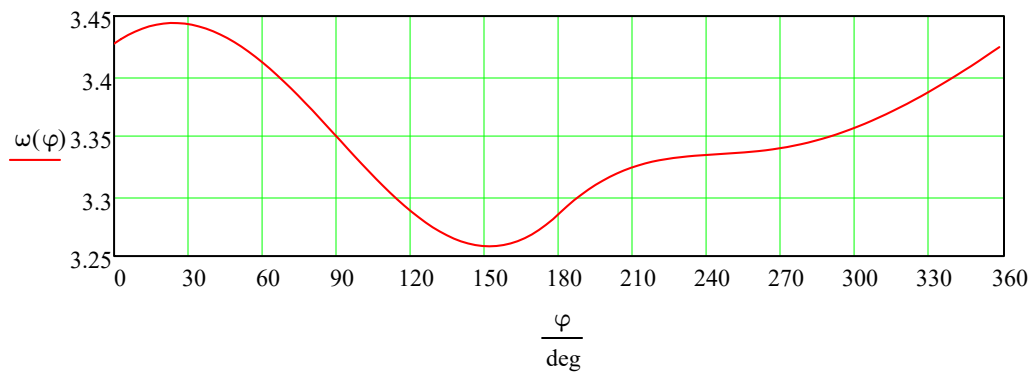
$$\Delta \omega(\varphi) := \frac{\Delta T_I(\varphi) - \left(\frac{T_{I\max} + T_{I\min}}{2} \right)}{\omega_{cp} \cdot J_{PRI}}$$

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

$$\omega_{cp} = 3.351 \quad \omega(f) = 3.287$$

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

$$\varepsilon(f) = -0.325$$



8. Расчет маховика

$$J_{\text{dop}} := J_{\text{PRI}} - J_{01}$$

$$J_{\text{dop}} = 115.294$$

8.1 Спл диск

$$D_{\text{MX}} := 0.366 \cdot \sqrt[5]{J_{\text{dop}}}$$

$$D_{\text{MX}} = 0.946$$

$$m_{\text{MX}} := \frac{8 \cdot J_{\text{dop}}}{D_{\text{MX}}^2}$$

$$m_{\text{MX}} = 1.031 \times 10^3$$

$$b_{\text{MX}} := 0.2 \cdot D_{\text{MX}}$$

$$b_{\text{MX}} = 0.189$$

9.3 Обод

$$D_{\text{MXc}} := 0.437 \cdot \sqrt[5]{J_{\text{dop}}}$$

$$D_{\text{MXc}} = 1.129$$

$$b_{\text{MXc}} := 0.2 \cdot D_{\text{MXc}}$$

$$b_{\text{MXc}} = 0.226$$

$$D_{MX1} := 0.8 D_{MXc}$$

$$D_{MX1} = 0.904$$

$$m_{MXc} := 6123 \cdot (D_{MXc}^2 - D_{MX1}^2) \cdot b_{MXc}$$

$$m_{MXc} = 635.076$$

$$G_1 := m_{MXc} \cdot g = 6.23 \times 10^3$$

Силовой расчёт

$$f_{\omega} := 120 \cdot \text{deg}$$

Вторые передаточные функции

$$a_{qS2X}(\varphi) := \frac{d}{d\varphi} V_{qS2X}(\varphi)$$

$$a_{qS2Y}(\varphi) := \frac{d}{d\varphi} V_{qS2Y}(\varphi)$$

$$a_{qAX}(\varphi) := \frac{d}{d\varphi} V_{qAX}(\varphi)$$

$$a_{qAY}(\varphi) := \frac{d}{d\varphi} V_{qAY}(\varphi)$$

$$a_{qBX}(\varphi) := \frac{d}{d\varphi} V_{qBX}(\varphi)$$

$$\varepsilon_{q2}(\varphi) := \frac{d}{d\varphi} \omega_{q2}(\varphi)$$

Ускорения

$$a_{S2X}(\varphi) := a_{qS2X}(\varphi) \cdot \omega(\varphi)^2 + V_{qS2X}(\varphi) \cdot \varepsilon(\varphi)$$

$$a_{S2X}(f) = -0.357$$

$$a_{S2Y}(\varphi) := a_{qS2Y}(\varphi) \cdot \omega(\varphi)^2 + V_{qS2Y}(\varphi) \cdot \varepsilon(\varphi)$$

$$a_{S2Y}(f) = -0.438$$

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

$$a_{AX}(f) = -0.373$$

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

$$a_{AY}(f) = -0.604$$

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

$$a_{BX}(f) = -0.314$$

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

$$\varepsilon_2(f) = -1.591$$

2. Инерционная нагрузка и силы тяжести

2.1. Звено 1:

$$\Phi_{1x} := 0$$

$$\varepsilon(f) = -0.325$$

$$\Phi_{1y} := 0$$

$$G_1 := 0$$

$$M_{\Phi 1}(\varphi) := J_{PRI} \cdot \varepsilon(\varphi)$$

$$M_{\Phi 1}(f) = -37.52$$

$$J_{PRI} = 115.323$$

2.2. Звено 2:

$$\Phi_{2x}(\varphi) := -m_2 \cdot a_{S2X}(\varphi)$$

$$\Phi_{2x}(f) = 4.364$$

$$\Phi_{2y}(\varphi) := -m_2 \cdot a_{S2Y}(\varphi)$$

$$\Phi_{2y}(f) = 5.352$$

$$G_2 = 120$$

$$M_{\Phi 2}(\varphi) := J_{S2} \cdot \varepsilon_2(\varphi)$$

$$M_{\Phi 2}(f) = -0.11$$

$$\varepsilon_2(f) = -1.591$$

2.3. Звено 3:

$$\Phi_{3y} := 0$$

$$\Phi_{3x}(\varphi) := -m_3 \cdot a_{BX}(\varphi)$$

$$\Phi_{3x}(f) = 12.786$$

$$G_3 = 400$$

$$M_{\Phi 3}(\varphi) := 0$$

3. Расчёт реакций:

Создадим вспомогательную матрицу. Заполним её в соответствии с таблицей кинематических пар

$$A_{11} := \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}$$

Создадим нулевую матрицу размерностью A11.

Заполним указанием последнего элемента.

$$A12_{2,3} := 0$$

$$A12 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Создадим нулевую матрицу. Её число строк, как у A11, число столбцов на единицу больше числа поступательных кинематических пар. Заполним указанием последнего элемента.

$$A13_{2,1} := 0$$

$$A13 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Создадим матрицу, содержащую строки коэффициентов, соответствующих суммам проекций сил на ось абсцисс для каждого звена. Она образуется объединением матриц A11, A12, A13.

$$A1 := \text{augment}(A11, A12, A13)$$

$$A1 =$$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0

Создадим матрицу, содержащую строки коэффициентов, соответствующих сумма проекций сил на ось ординат для каждого звена. Она образуется объединением матриц A12, A11, A13.

$$A2 := \text{augment}(A12, A11, A13)$$

$$A2 =$$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0

Сформируем матрицы, содержащие строки коэффициентов, соответствующих суммам моментов. Создадим строку плеч для проекций сил на ось абсцисс. Её элементами являются ординаты кинематических пар в соответствии с таблицей кинематических пар.

$$Y(f) := \begin{pmatrix} 0 & Y_A(f) & Y_B(f) & Y_B(f) \end{pmatrix}$$

Сформируем матрицу плеч. Её размерность, как у A11

$$YY(f) := \text{stack}(Y(f), Y(f), Y(f))$$

$$YY(f) = \begin{pmatrix} 0 & 0.057 & 0 & 0 \\ 0 & 0.057 & 0 & 0 \\ 0 & 0.057 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Сформируем матрицу коэффициентов при проекциях сил на ось абсцисс. Она получается путем поэлементного перемножения матриц A11 и YY. Знаки инвертируются.

$$A31(f) := \overrightarrow{(-A11 \cdot YY(f))}$$

$$A31(f) = \begin{pmatrix} 0 & -0.057 & 0 & 0 \\ 0 & 0.057 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Создадим строку плеч для проекций сил на ось ординат. Её элементами являются абсциссы кинематических пар в соответствии с таблицей кинематических пар.

$$X(f) := \begin{pmatrix} 0 & X_A(f) & X_B(f) & X_B(f) - 0.12 \end{pmatrix}$$

$$XX(f) := \text{stack}(X(f), X(f), X(f))$$

$$XX(f) = \begin{pmatrix} 0 & 0.033 & 0.409 & 0.289 \\ 0 & 0.033 & 0.409 & 0.289 \\ 0 & 0.033 & 0.409 & 0.289 \end{pmatrix}$$

$$A32(f) := \overrightarrow{(A11 \cdot XX(f))}$$

$$A32(f) = \begin{pmatrix} 0 & 0.033 & 0 & 0 \\ 0 & -0.033 & 0.409 & 0 \\ 0 & 0 & -0.409 & 0.289 \end{pmatrix}$$

Создадим матрицу, содержащую коэффициенты при моментах в поступательных кинематических парах и неизвестных активных моментах. Первые столбцы соответствуют части таблицы кинематических пар, соответствующих поступательным парам. Последний столбец содержит единицу у звена, к которому приложен неизвестный активный момент.

$$A33 := \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 0 & 0 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$$

Создадим матрицу, содержащую строки коэффициентов, соответствующих суммам моментов для каждого звена. Она образуется объединением матриц A31, A32, A33.

$$A3(f) := \text{augment}(A31(f), A32(f), A33)$$

$$A3(f) =$$

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	0	-0.057	0	0	0	0.033	0	0
1	0	0.057	0	0	0	-0.033	0.409	0
2	0	0	0	0	0	0	-0.409	...

Создадим матрицу, содержащую строки коэффициентов, соответствующих суммам проекций сил в поступательных кинематических парах на направляющие этих пар. Число строк равно числу поступательных кинематических пар. В столбцах, соответствующих поступательным парам, задаются косинусы углов наклона направляющих (для A41) или синусы (для A42). Матрица A43 нулевая.

$$A41 := (0 \ 0 \ 0 \ 1)$$

$$A42 := (0 \ 0 \ 0 \ 0)$$

$$A43 := (0 \ 0)$$

$$A4 := \text{augment}(A41, A42, A43)$$

$$A4 =$$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0

Создадим полную матрицу коэффициентов путём объединения строк матриц A1, A2, A3 и A4.

$A(f) := \text{stack}(A1, A2, A3(f), A4)$

$A(f) =$

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	1	1	0	0	0	0	0	0
1	0	-1	1	0	0	0	0	0
2	0	0	-1	1	0	0	0	0
3	0	0	0	0	1	1	0	0
4	0	0	0	0	0	-1	1	0
5	0	0	0	0	0	0	-1	1
6	0	-0.057	0	0	0	0.033	0	0
7	0	0.057	0	0	0	-0.033	0.409	0
8	0	0	0	0	0	0	-0.409	0.289
9	0	0	0	1	0	0	0	...

Проконтролируем число строк и столбцов полученной матрицы.

$\text{rows}(A(f)) = 10$

$\text{cols}(A(f)) = 10$

3.2. Вектор свободных членов

Создадим строки, содержащие проекции известных сил на ось абсцисс для каждого звена.

$$B1(f) := - \begin{pmatrix} 0 \\ \Phi 2x(f) \\ \Phi 3x(f) + P_C(f) \end{pmatrix}$$

$$B1(f) = \begin{pmatrix} 0 \\ -4.364 \\ 1.269 \times 10^3 \end{pmatrix}$$

$$\Phi 3x(f) = 12.786$$

Создадим строки, содержащие проекции известных сил на ось ординат для каждого звена

$$P_C(f) = -1.282 \times 10^3$$

$$B2(f) := - \begin{pmatrix} 0 \\ \Phi 2y(f) - G_2 \\ -G_3 \end{pmatrix}$$

$$B2(f) = \begin{pmatrix} 0 \\ 114.648 \\ 400 \end{pmatrix}$$

Создадим строки, содержащие моменты сил, приведённых в столбцах B1 и B2, и известные моменты, действующие на каждое звено

$$B3(f) := \begin{bmatrix} M_{\Phi 1}(f) \\ M_{\Phi 2}(f) + -\Phi 2x(f) \cdot Y_{S2}(f) + (\Phi 2y(f) - G_2) \cdot X_{S2}(f) \\ -G_3 \cdot (X_B(f) - 0.12) \end{bmatrix} \quad B3(f) = \begin{pmatrix} 37.52 \\ 15.917 \\ 115.668 \end{pmatrix}$$

$$B4 := (0) \quad M_{\Phi 2}(f) = -0.11$$

$$B(f) := \text{stack}(B1(f), B2(f), B3(f), B4)$$

$$B(f) =$$

	0
0	0
1	-4.364
2	$1.269 \cdot 10^3$
3	0
4	114.648
5	400
6	37.52
7	15.917
8	115.668
9	0

3.3. Решение системы

$$D(\varphi) := \text{Isolve}(A(\varphi), B(\varphi))$$

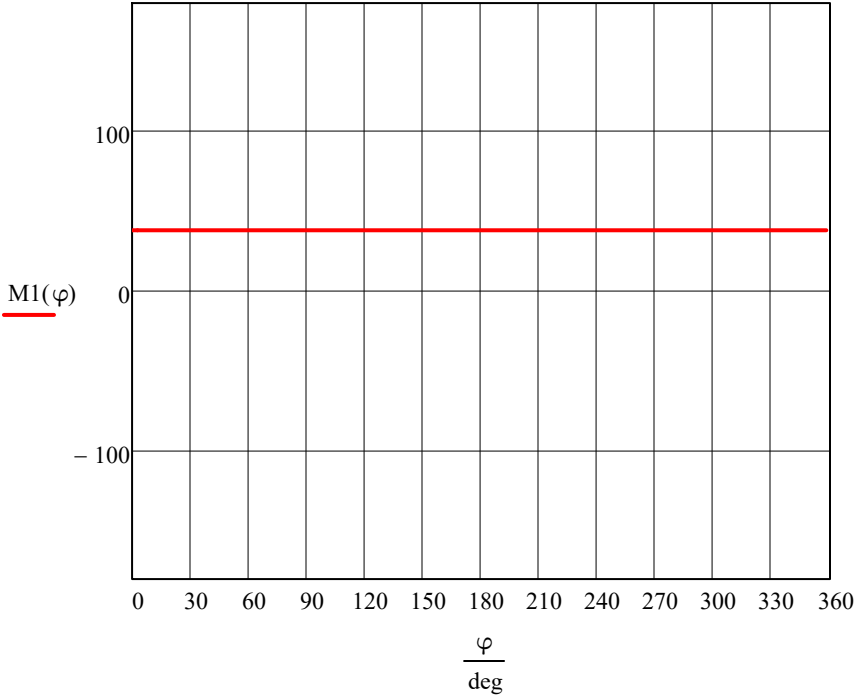
Вектор D содержит реакции, располагаемые в соответствии с таблицей кинематических пар. Вначале идут проекции на ось абсцисс, затем проекции на ось ординат, затем моменты в поступательных кинематических парах и неизвестный активный момент.

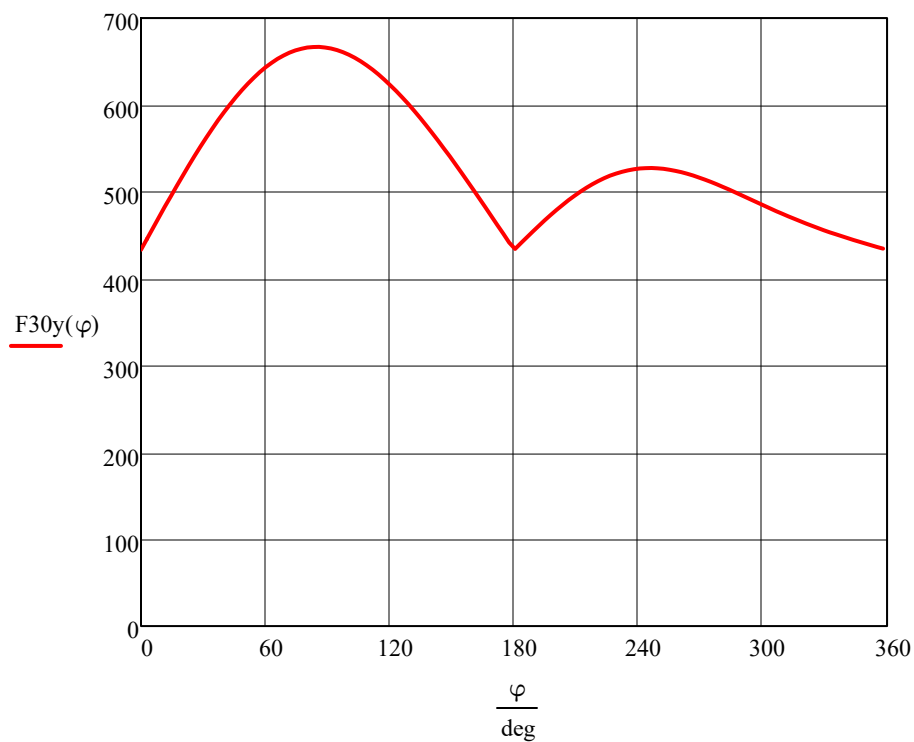
$$D(f) := \text{Isolve}(A(f), B(f))$$

$$\begin{aligned} F10x(f) &:= D(f)_0 & F10x(f) &= 1.265 \times 10^3 \\ F12x(f) &:= D(f)_1 & F12x(f) &= -1.2645 \times 10^3 \\ F23x(f) &:= D(f)_2 & F23x(f) &= -1.269 \times 10^3 \\ F30x(f) &:= D(f)_3 & F30x(f) &= 0 \\ F10y(f) &:= D(f)_4 & F10y(f) &= -108.603 \\ F12y(f) &:= D(f)_5 & F12y(f) &= 108.603 \\ F23y(f) &:= D(f)_6 & F23y(f) &= 223.251 \\ F30y(f) &:= D(f)_7 & F30y(f) &= 623.251 \end{aligned}$$

$M_{30}(f) := D(f)_8$
 $M_{30}(f) = -26.79$
 $M_{DPR} = 37.911$

$M_1(f) := D(f)_9$
 $M_1(f) = 37.911$





Проверка 1

$$dJ_{prm2}(\phi) := 2m_2 \cdot (V_{qS2X}(\phi) \cdot a_{qS2X}(\phi) + V_{qS2Y}(\phi) \cdot a_{qS2Y}(\phi))$$

$$dJ_{prm2}(f) = -0.021$$

$$dJ_{prm3}(\phi) := 2m_3 \cdot V_{qBX}(\phi) \cdot a_{qBX}(\phi)$$

$$dJ_{prm3}(f) = -0.137$$

$$dJ_{prj2}(\phi) := 2J_{S2} \cdot \omega_{q2}(\phi) \cdot \varepsilon_{q2}(\phi)$$

$$dJ_{prj2}(f) = 1.803 \times 10^{-3}$$

$$\varepsilon(f) = -0.325$$

$$J_{P2}(\varphi)$$

$$\omega(f) = 3.287$$

$$M_{PRm2}(\phi) := - \left(J_{P2}(\phi) \cdot \varepsilon(\phi) + \frac{\omega(\phi)^2}{2} \cdot dJ_{prm2}(\phi) \right)$$

$$M_{PRm2}(f) = 0.127$$

$$M_{PRm3}(\phi) := - \left(J_{P3}(\phi) \cdot \varepsilon(\phi) + \frac{\omega(\phi)^2}{2} \cdot dJ_{prm3}(\phi) \right)$$

$$M_{PRm3}(f) = 0.79$$

$$M_{PRJ1}(\phi) := -\left(J_{PRI} \cdot \varepsilon(\phi)\right)$$

$$M_{PRJ1}(f) = 37.52$$

$$M_{PRJ2}(\phi) := -\left(J_{B2}(\phi) \cdot \varepsilon(\phi) + \frac{\omega(\phi)^2}{2} \cdot dJ_{prj2}(\phi)\right)$$

$$M_{PRJ2}(f) = -9.572 \times 10^{-3}$$

$$M_{FPR}(f) = -79.192$$

$$M_{G2PR}(f) = 2.855$$

$$\begin{aligned} M_{PR\Sigma1}(\phi) := & M_{PRm2}(\phi) + M_{PRm3}(\phi) \dots \\ & + M_{PRJ2}(\phi) + M_{PRJ1}(\phi) \dots \\ & + M_{FPR}(\phi) \dots \\ & + M_{G2PR}(\phi) \end{aligned}$$

Эта сумма должна равняться M_{PRD}
с противоположным знаком если $\omega_1 > 0$

$$M_{DPR} = 37.911$$

$$M_{PR\Sigma1}(f) = -37.911$$

