

Дано

$$H := 0.5 \quad \text{м}$$

$$n_1 := \frac{73}{60} \quad \frac{\text{об}}{\text{с}}$$

$$n_d := 23.54 \quad \frac{\text{об}}{\text{с}}$$

$$K_v := 1.6$$

$$l_{OC} := 0.36 \quad \text{м}$$

$$m_3 := 20 \quad \text{кг}$$

$$m_5 := 65 \quad \text{кг}$$

$$I_{3S} := 1.1 \quad \text{кг} \cdot \text{м}^2$$

$$\lambda_{S3} := 0.5 \quad l_s := 0.05 \cdot H$$

$$l_{S5} := 0.164 \quad \text{м}$$

$$\delta := 0.05$$

$$mD_d := 0.35 \quad \text{кг} \cdot \text{м}^2$$

$$mD_{zp} := 0.65 \quad \text{кг} \cdot \text{м}^2$$

$$\omega_{1cp} := n_1 \cdot 2 \cdot \pi = 7.645 \quad \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

$$l_p := 0.095$$

$$l_f := \sqrt{(l_{S5})^2 + (l_p)^2} = 0.19 \quad f_{ir} := \text{atan}\left(\frac{l_p}{l_{S5}}\right) \quad f_{ir} \cdot \text{deg}^{-1} = 30.082 \quad F_{tr} := 170$$

1. Определение недостающих длин звеньев

$$\beta := \pi \cdot \frac{K_v - 1}{K_v + 1} = 0.725$$

$$\beta \cdot \text{deg}^{-1} = 41.538$$

$$l_{CD} := \frac{H}{2 \cdot \sin(0.5 \cdot \beta)}$$

$$l_{CD} = 0.705$$

$$l_{OA} := l_{OC} \cdot \sin(0.5 \cdot \beta)$$

$$l_{OA} = 0.128$$

$$y_C := -l_{OC}$$

$$y_C = -0.36$$

$$y_F := l_{CD} + y_C - 0.5 \cdot l_{CD} \cdot (1 - \cos(0.5 \cdot \beta))$$

$$y_F = 0.322$$

$$x_C := 0$$

$$\varphi_0 := \pi + 0.5\beta$$

$$f := 210 \cdot \text{deg} - 270 \cdot \text{deg} + \varphi_0$$

$$\varphi_1(\varphi) := \varphi_0 - \varphi$$

$$x_A(\varphi) := l_{OA} \cdot \cos(\varphi_1(\varphi))$$

$$y_A(\varphi) := l_{OA} \cdot \sin(\varphi_1(\varphi))$$

$$\varphi_3(\varphi) := \frac{\pi}{2} - \text{atan}\left(\frac{x_A(\varphi)}{y_A(\varphi) - y_C}\right)$$

$$x_D(\varphi) := l_{CD} \cdot \cos(\varphi_3(\varphi))$$

$$y_D(\varphi) := l_{CD} \cdot \sin(\varphi_3(\varphi)) + y_C$$

$$x_{S3}(\varphi) := .5 \cdot (x_D(\varphi) + x_C)$$

$$y_{S3}(\varphi) := .5 \cdot (y_D(\varphi) + y_C)$$

$$X(\text{fi}) := \begin{pmatrix} 0 & x_A(\text{fi}) & x_C & x_{S3}(\text{fi}) & x_D(\text{fi}) \end{pmatrix}^T$$

$$Y(\text{fi}) := \begin{pmatrix} 0 & y_A(\text{fi}) & y_C & y_{S3}(\text{fi}) & y_D(\text{fi}) \end{pmatrix}^T$$

$$\text{fi} := 0 \quad \varphi := 0, 0.02 \dots 2\pi$$

$$\varphi_0 \cdot \text{deg}^{-1} = 200.769$$

$$f \cdot \text{deg}^{-1} = 140.769$$

$$\varphi_1(f) \cdot \text{deg}^{-1} = 60$$

$$x_A(f) = 0.064$$

$$y_A(f) = 0.111$$

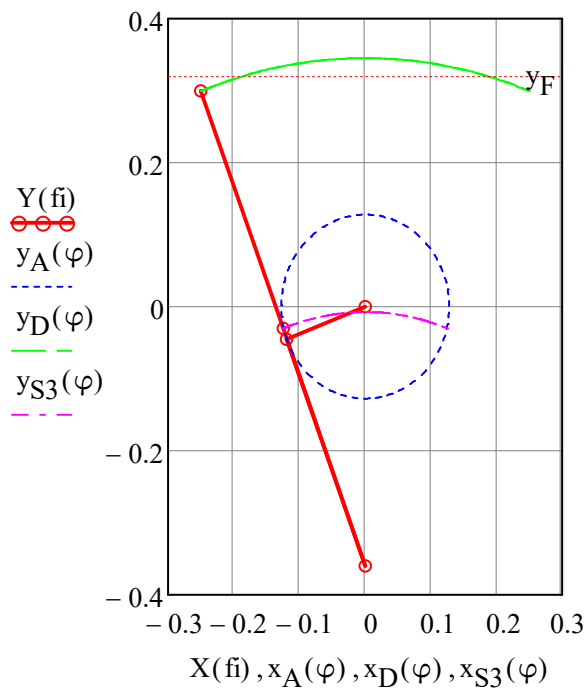
$$\varphi_3(f) \cdot \text{deg}^{-1} = 82.275$$

$$x_D(f) = 0.095$$

$$y_D(f) = 0.339$$

$$x_{S3}(f) = 0.047$$

$$y_{S3}(f) = -0.011$$



$$v_{qDx}(\varphi) := \frac{d}{d\varphi} x_D(\varphi)$$

$$v_{qDx}(f) = 0.174$$

$$v_{qS3x}(\varphi) := \frac{d}{d\varphi} x_{S3}(\varphi)$$

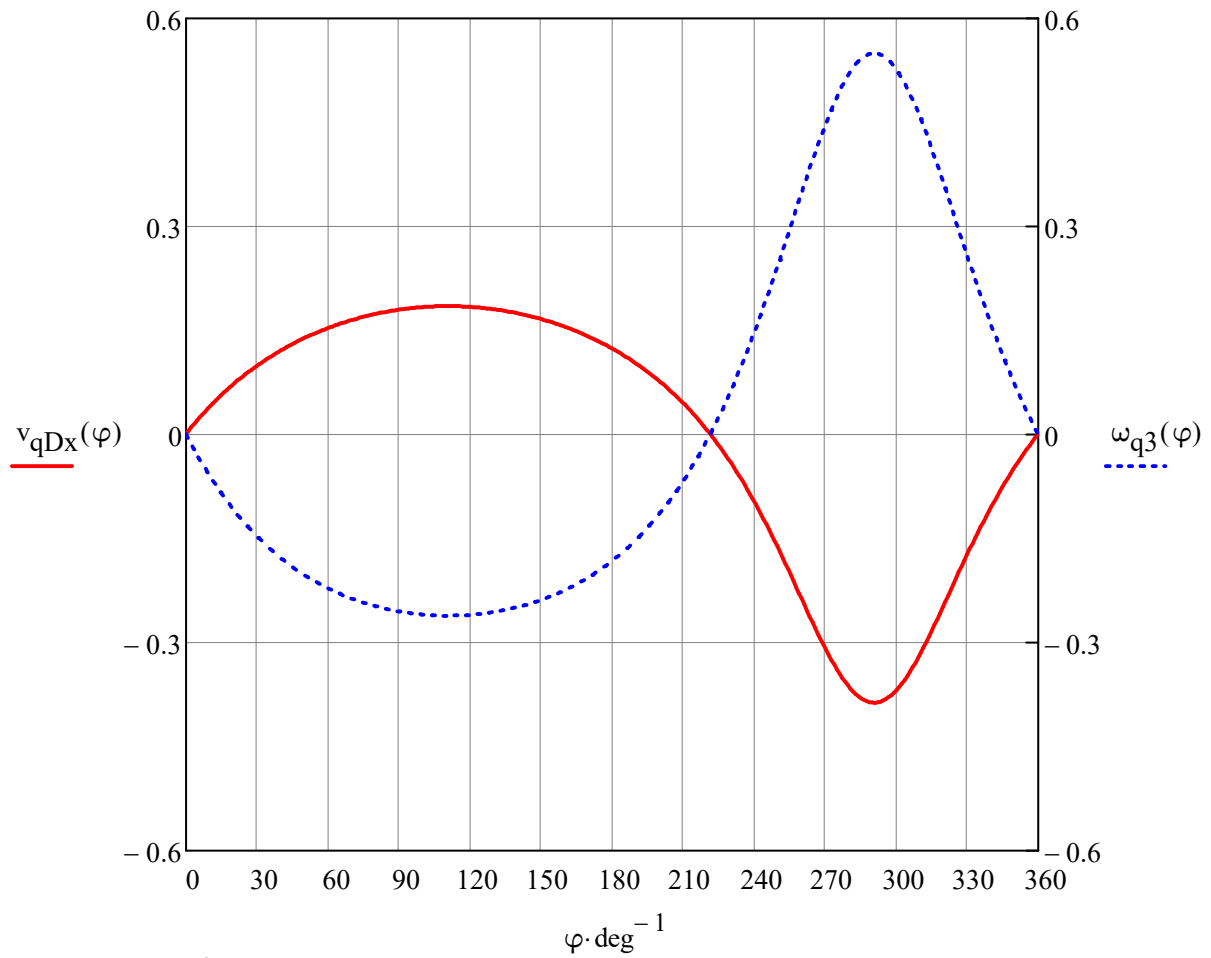
$$v_{qS3x}(f) = 0.087$$

$$v_{qS3y}(\varphi) := \frac{d}{d\varphi} y_{S3}(\varphi)$$

$$v_{qS3y}(f) = -0.012$$

$$\omega_{q3}(\varphi) := \frac{d}{d\varphi} \varphi_3(\varphi)$$

$$\omega_{q3}(f) = -0.249$$



$$a_{qDx}(\varphi) := \frac{d^2}{d\varphi^2} x_D(\varphi)$$

$$a_{qDx}(f) = -0.042$$

$$a_{qS3x}(\varphi) := \frac{d^2}{d\varphi^2} x_{S3}(\varphi)$$

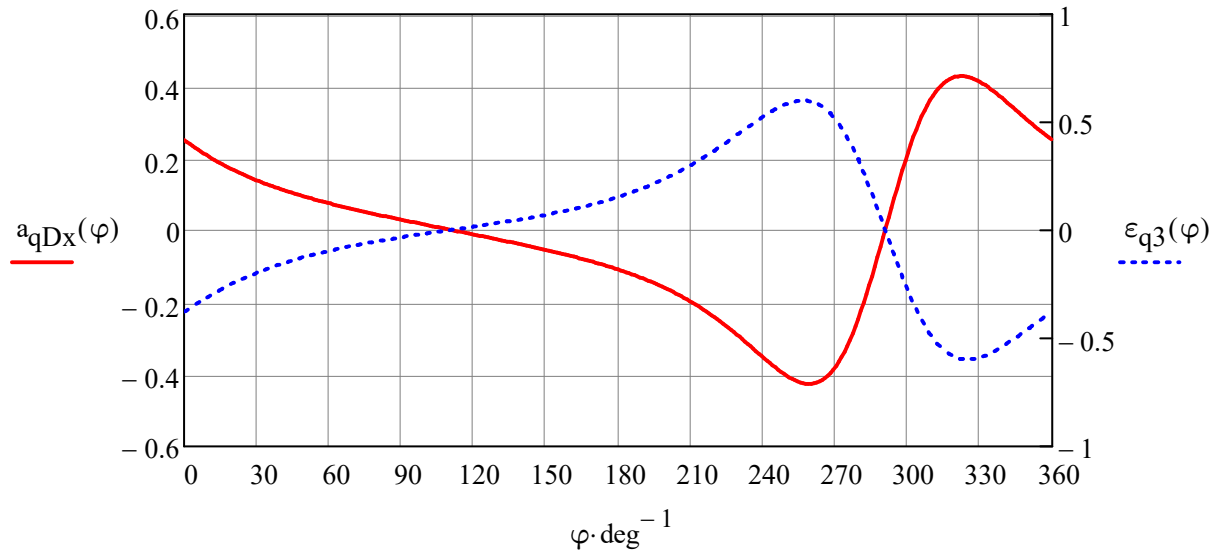
$$a_{qS3x}(f) = -0.021$$

$$a_{qS3y}(\varphi) := \frac{d^2}{d\varphi^2} y_{S3}(\varphi)$$

$$a_{qS3y}(f) = -0.019$$

$$\varepsilon_{q3}(\varphi) := \frac{d^2}{d\varphi^2} \varphi_3(\varphi)$$

$$\varepsilon_{q3}(f) = 0.051$$

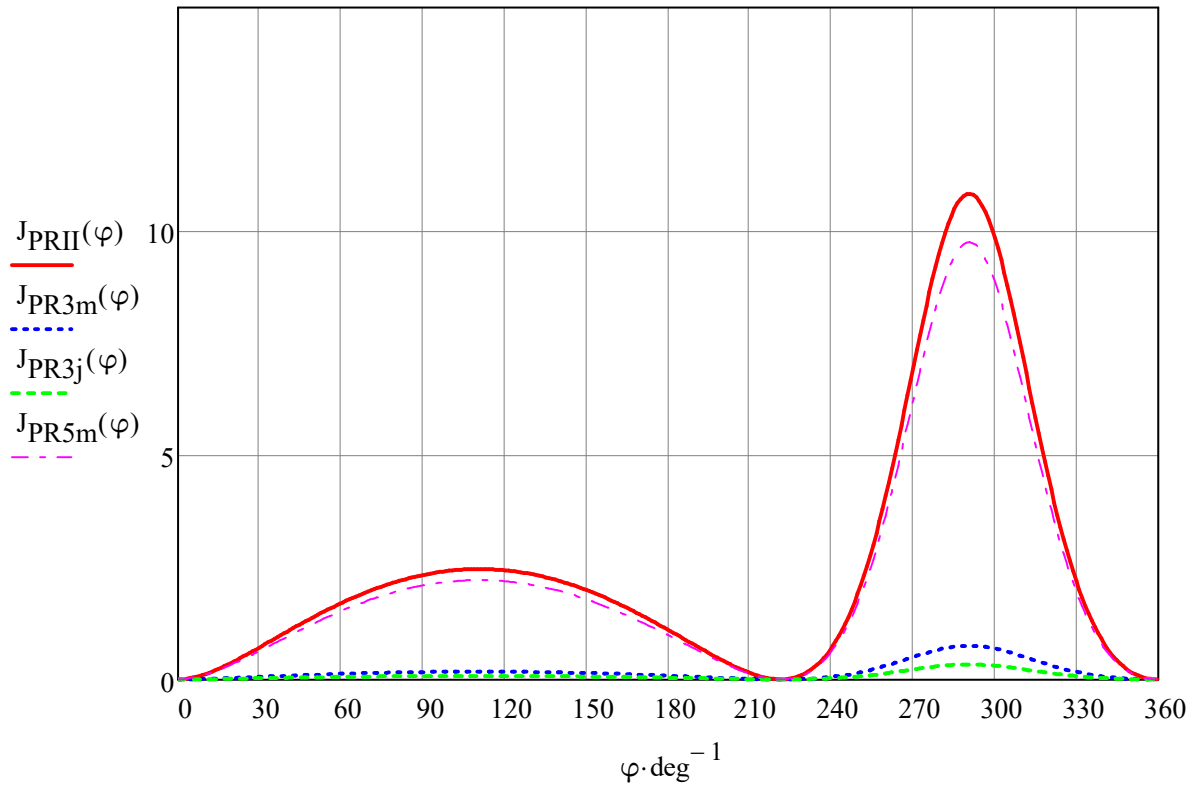


$$J_{PR3j}(\varphi) := I_3 S \cdot \omega_{q3}(\varphi)^2 \quad J_{PR3j}(f) = 0.068$$

$$J_{PR3m}(\varphi) := m_3 \cdot \left(v_{qS3x}(\varphi)^2 + v_{qS3y}(\varphi)^2 \right) \quad J_{PR3m}(f) = 0.154$$

$$J_{PR5m}(\varphi) := m_5 \cdot v_{qDx}(\varphi)^2 \quad J_{PR5m}(f) = 1.963$$

$$J_{PRII}(\varphi) := J_{PR3j}(\varphi) + J_{PR3m}(\varphi) + J_{PR5m}(\varphi) \quad J_{PRII}(f) = 2.185$$

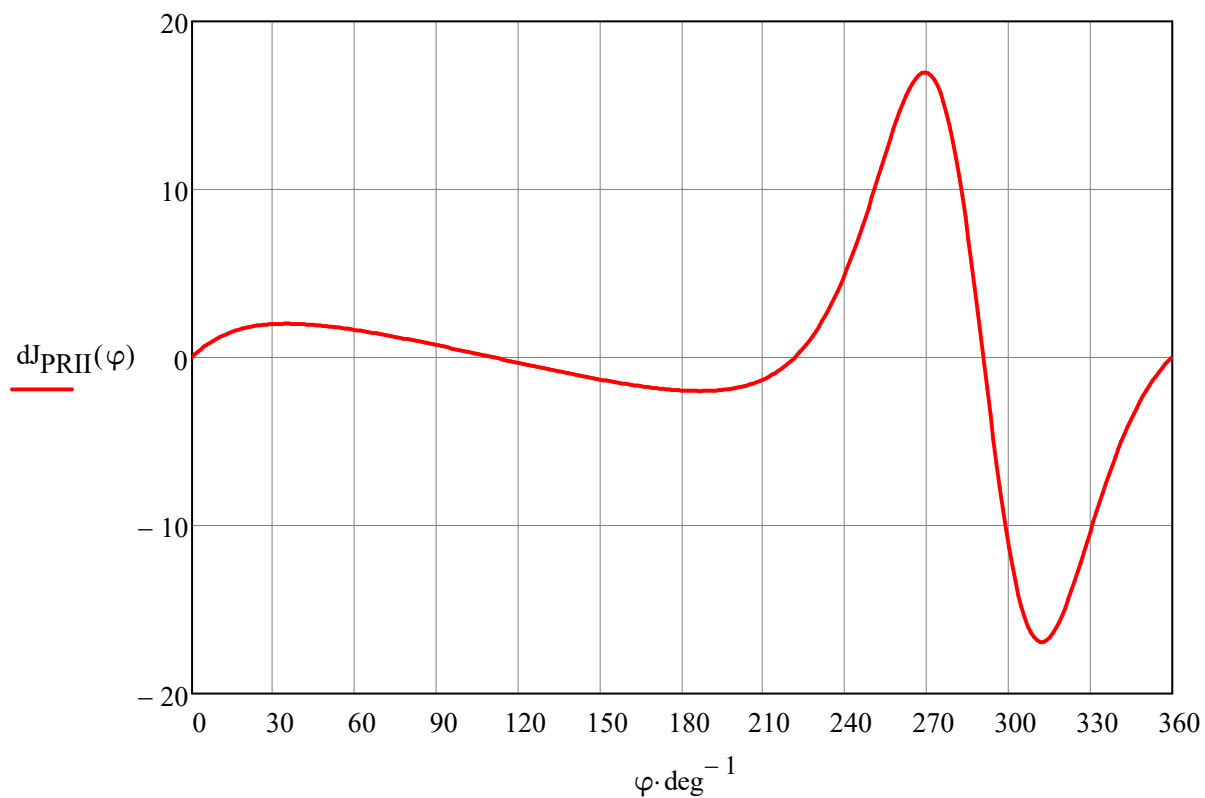


$$dJ_{PR3j}(\varphi) := 2I_{3S} \cdot \omega_{q3}(\varphi) \cdot \varepsilon_{q3}(\varphi) \qquad dJ_{PR3j}(f) = -0.028$$

$$dJ_{PR3m}(\varphi) := 2m_3 \cdot \left(v_{qS3x}(\varphi) \cdot a_{qS3x}(\varphi) + v_{qS3y}(\varphi) \cdot a_{qS3y}(\varphi) \right) \qquad dJ_{PR3m}(f) = -0.063$$

$$dJ_{PR5m}(\varphi) := 2m_5 \cdot v_{qDx}(\varphi) \cdot a_{qDx}(\varphi) \qquad dJ_{PR5m}(f) = -0.941$$

$$dJ_{PRII}(\varphi) := dJ_{PR3j}(\varphi) + dJ_{PR3m}(\varphi) + dJ_{PR5m}(\varphi) \qquad dJ_{PRII}(f) = -1.032$$

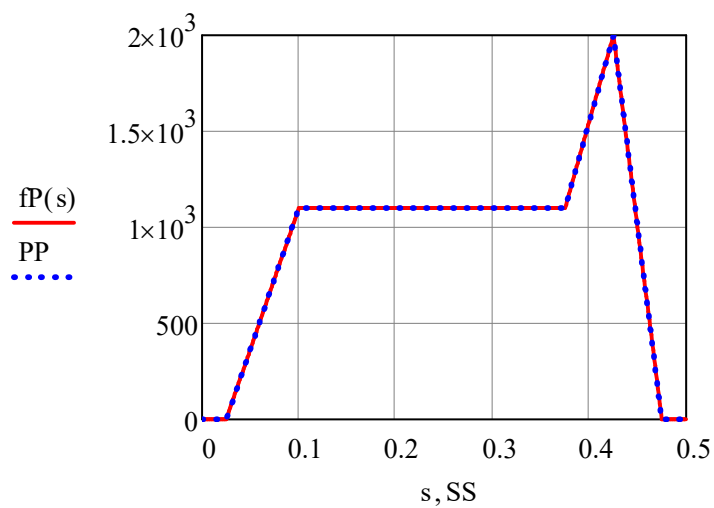


$$PP := (0 \ 0 \ 1100 \ 1100 \ 2000 \ 0 \ 0)^T$$

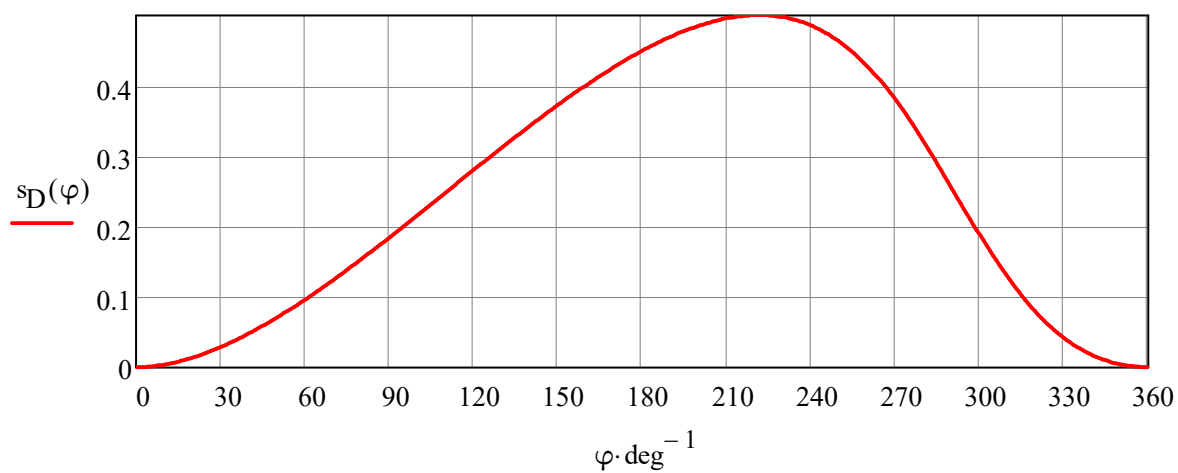
$$SS := (0 \ 0.05 \cdot H \ 0.2 \cdot H \ 0.75 \cdot H \ 0.85 \cdot H \ 0.95 \cdot H \ H)^T$$

$$fP(s) := \text{lininterp}(SS, PP, s)$$

$$s_{\text{min}} := 0, 0.001 \dots H$$

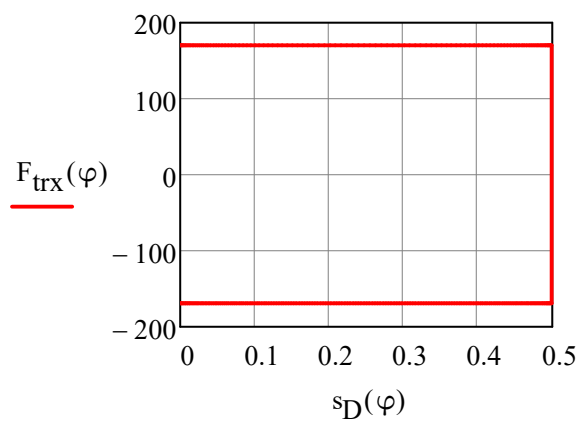
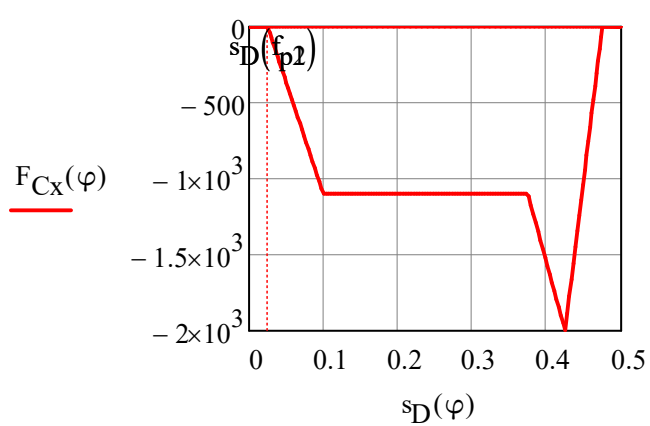


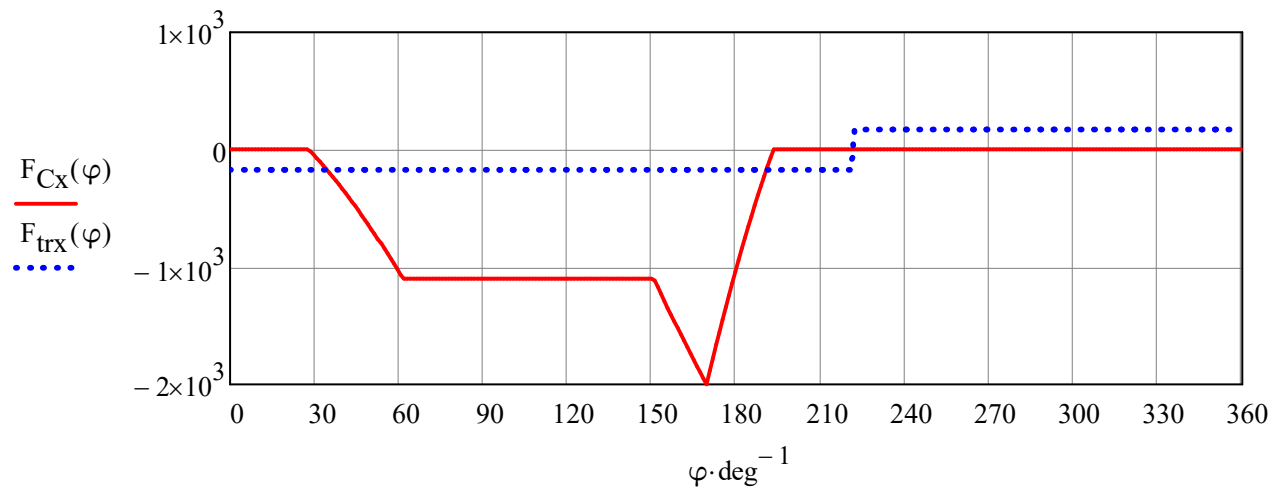
$$s_D(\varphi) := x_D(\varphi) - x_D(0)$$



$$F_{Cx}(\varphi) := \begin{cases} -fP(s_D(\varphi)) & \text{if } v_{qDx}(\varphi) > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \qquad F_{Cx}(f) = -1.1 \times 10^3$$

$$F_{trx}(\varphi) := -F_{tr} \cdot \text{sign}(v_{qDx}(\varphi))$$





$$M_{\text{PRFC}}(\varphi) := F_{Cx}(\varphi) \cdot v_{qDx}(\varphi)$$

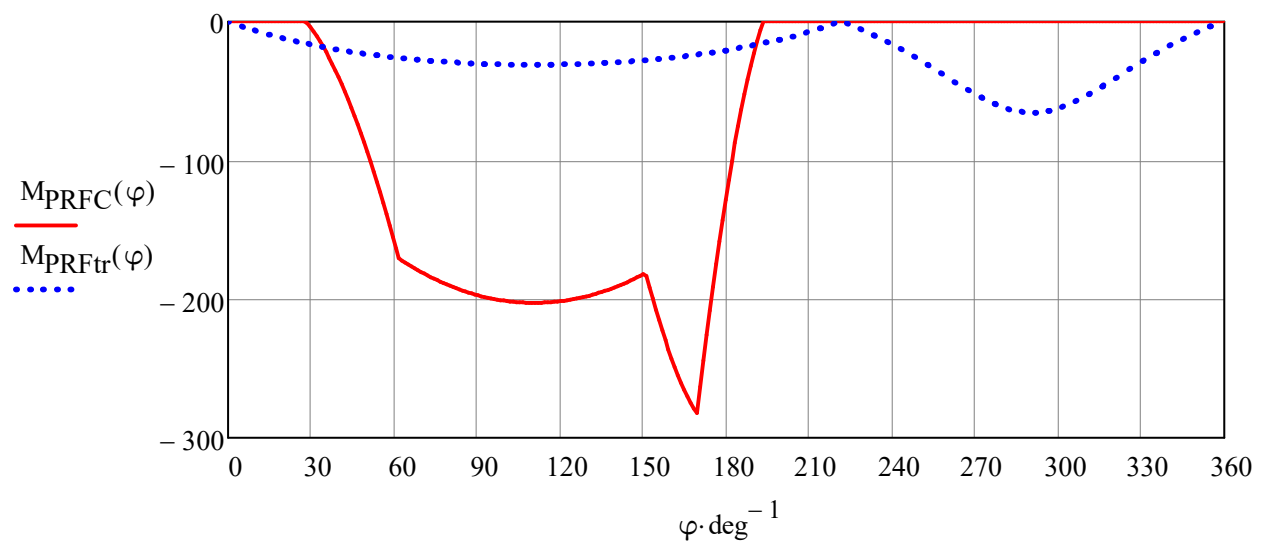
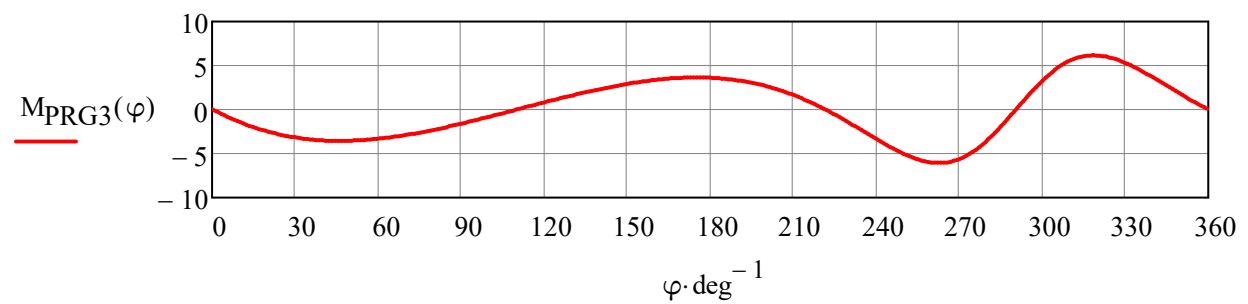
$$M_{\text{PRFC}}(f) = -191.172$$

$$M_{\text{PRFtr}}(\varphi) := F_{trx}(\varphi) \cdot v_{qDx}(\varphi)$$

$$M_{\text{PRFtr}}(f) = -29.545$$

$$M_{\text{PRG3}}(\varphi) := -9.81 \cdot m_3 \cdot v_{qS3y}(\varphi)$$

$$M_{\text{PRG3}}(f) = 2.313$$



$$M_{\text{PRC}\Sigma}(\varphi) := M_{\text{PRFC}}(\varphi) + M_{\text{PRFtr}}(\varphi) + M_{\text{PRG3}}(\varphi)$$

$$N_1 := 800$$

$$i := 0..N_1$$

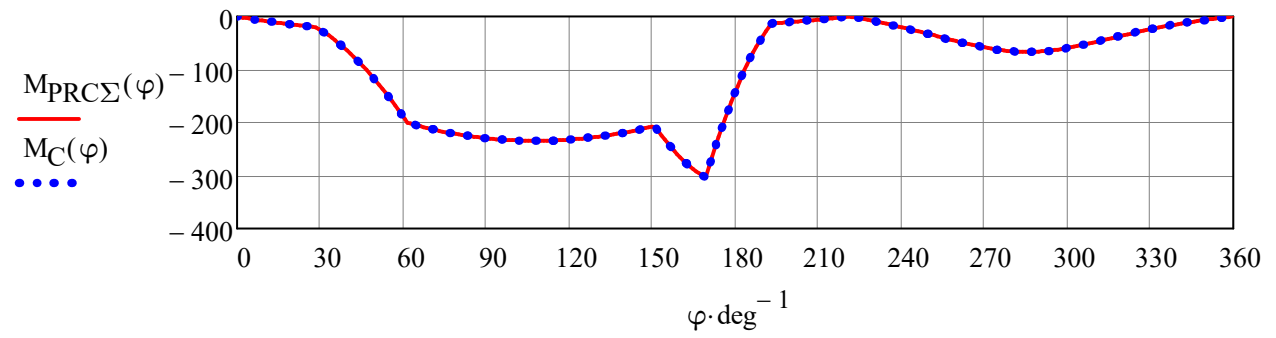
$$\Delta \varphi := \frac{2 \cdot \pi}{N_1 - 2}$$

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

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

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

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



$$A_C(\varphi) := \int_0^\varphi M_C(\varphi) \, d\varphi$$

$$A_C(f) = -372.943$$

$$A_C(2 \cdot \pi) = -641.14$$

$$M_{\text{PRDsr}} := \frac{-A_C(2 \cdot \pi)}{2 \cdot \pi}$$

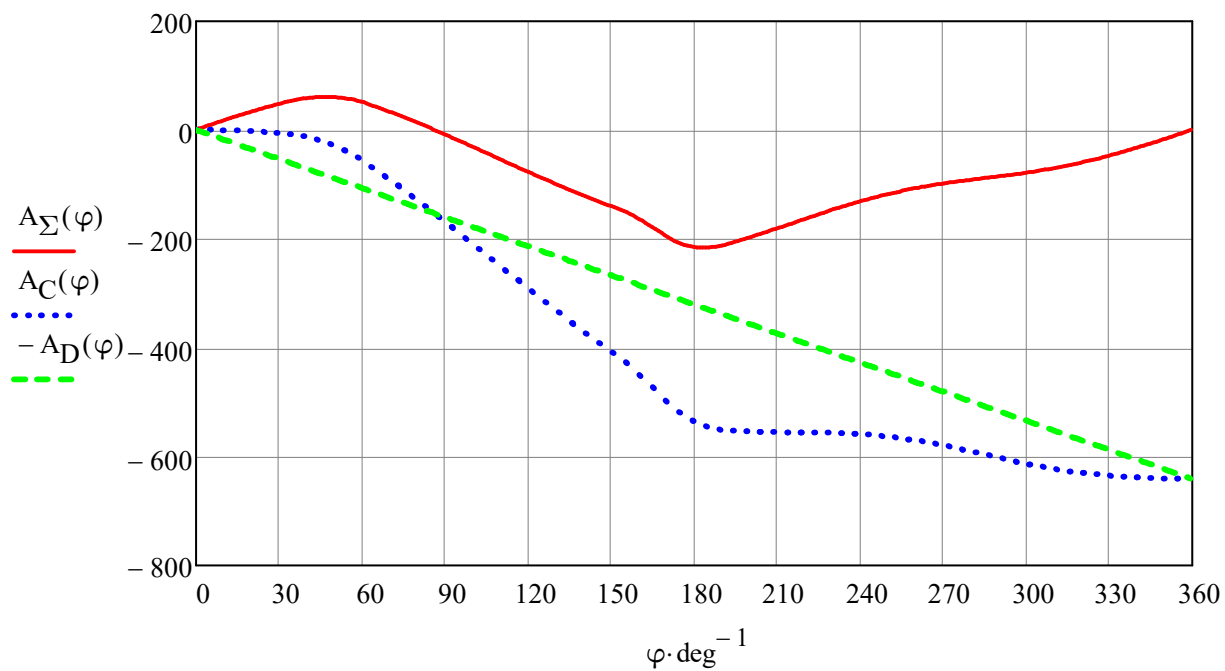
$$M_{\text{PRDsr}} = 102.041$$

$$A_D(\varphi) := M_{\text{PRDsr}} \cdot \varphi$$

$$A_D(f) = 250.702$$

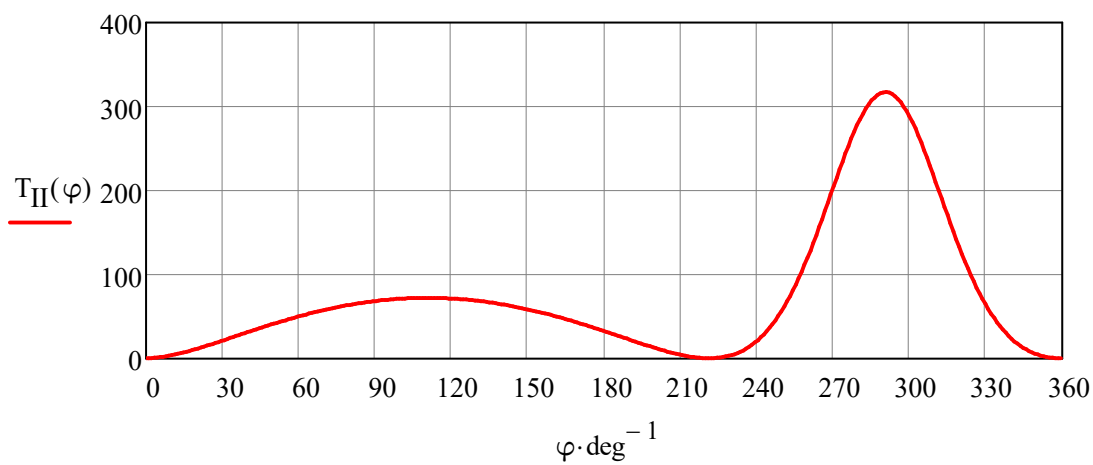
$$A_\Sigma(\varphi) := A_C(\varphi) + A_D(\varphi)$$

$$A_\Sigma(f) = -122.241$$



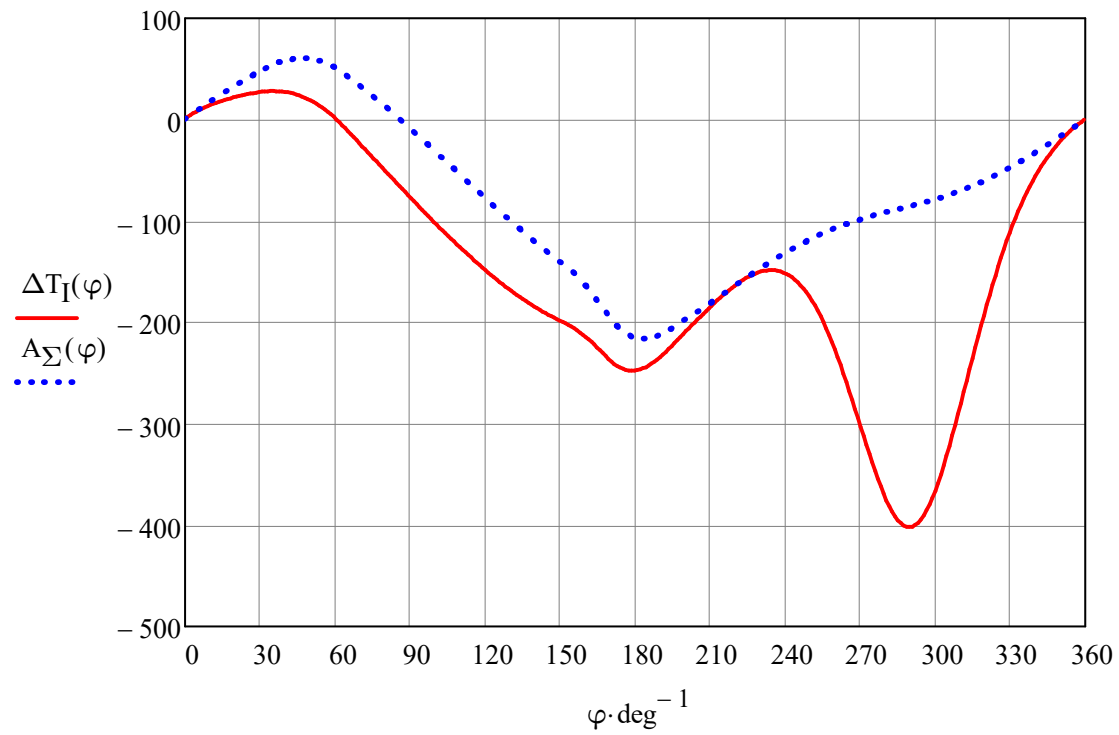
$$T_{\text{II}}(\varphi) := J_{\text{PRII}}(\varphi) \cdot \frac{\omega_{1\text{cp}}^2}{2}$$

$$T_{\text{II}}(f) = 63.848$$



$$\Delta T_{\text{I}}(\varphi) := A_{\Sigma}(\varphi) - T_{\text{II}}(\varphi)$$

$$\Delta T_{\text{I}}(f) = -186.089$$



$$f_{\min} := 5$$

Given

$$\varphi_{\min} := \text{Minimize}(\Delta T_I, f_{\min})$$

$$\varphi_{\min} = 5.059$$

$$\Delta T_{I\min} := \Delta T_I(\varphi_{\min})$$

$$\Delta T_{I\min} = -402.311$$

$$f_{\max} := 0$$

Given

$$\varphi_{\max} := \text{Maximize}(\Delta T_I, f_{\max})$$

$$\varphi_{\max} = 0.617$$

$$\Delta T_{I\max} := \Delta T_I(\varphi_{\max})$$

$$\Delta T_{I\max} = 27.722$$

$$\Delta T_{\text{Inb}} := \Delta T_{\text{Imax}} - \Delta T_{\text{Imin}}$$

$$\Delta T_{\text{Inb}} = 430.033$$

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

$$J_{\text{PRI}} = 147.173$$

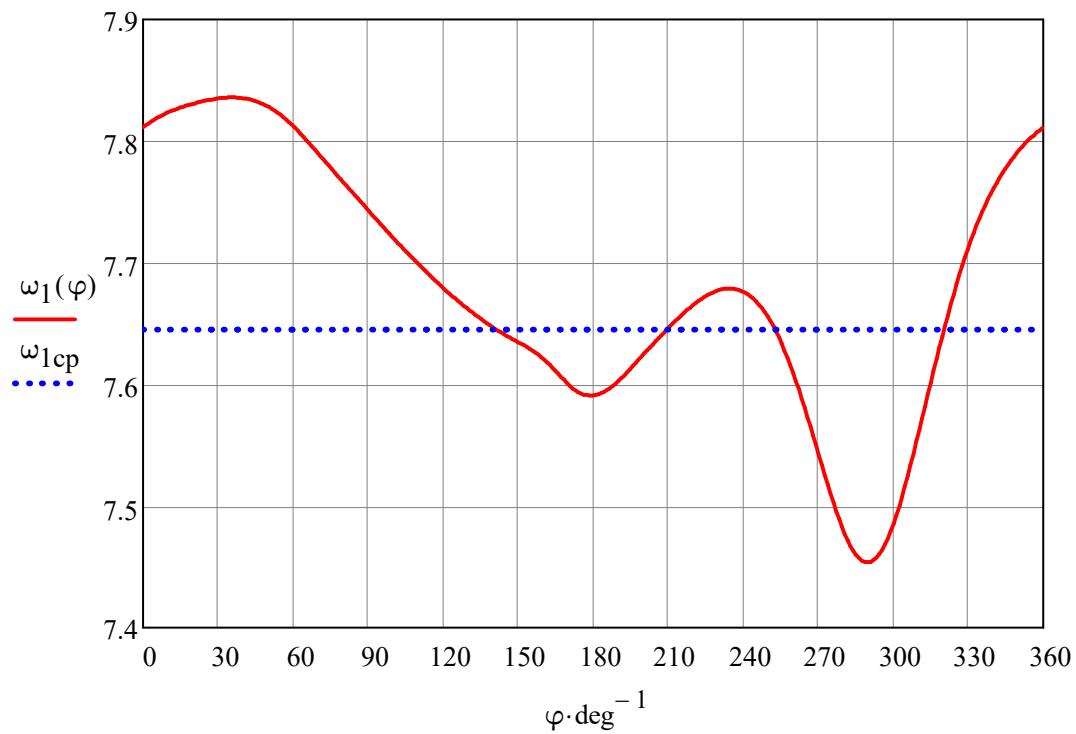
$$J_{\text{m}} := \frac{J_{\text{PRI}} - 0.25 \cdot mD_{\text{d}} \cdot \left(\frac{n_{\text{d}}}{n_1} \right)^2 - 0.25 \cdot mD_{\text{zp}}}{\left(\frac{n_{\text{d}}}{n_1} \right)^2}$$

$$J_{\text{m}} = 0.305$$

$$\Delta \omega(\varphi) := \frac{\Delta T_{\text{I}}(\varphi) - 0.5(\Delta T_{\text{Imax}} + \Delta T_{\text{Imin}})}{J_{\text{PRI}} \cdot \omega_{1\text{cp}}}$$

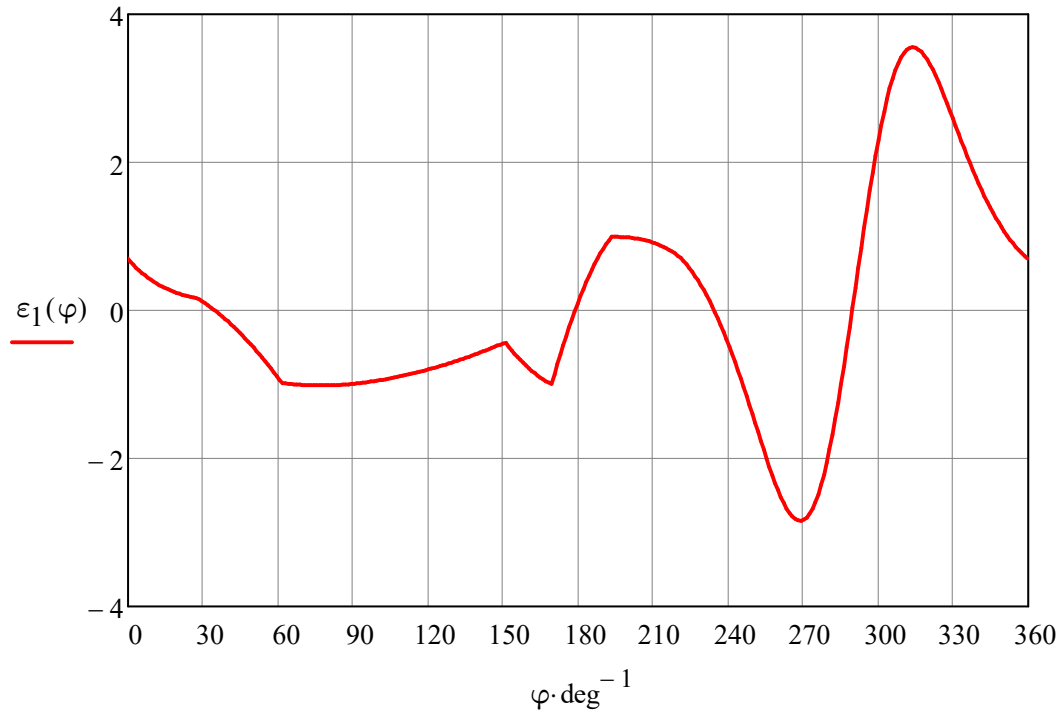
$$\omega_1(\varphi) := \omega_{1\text{cp}} + \Delta \omega(\varphi)$$

$$\omega_1(\text{f}) = 7.646$$



$$\varepsilon_1(\varphi) := \frac{M_{\text{C}}(\varphi) + M_{\text{PRDs}_{\text{sr}}}}{J_{\text{PRII}}(\varphi) + J_{\text{PRI}}} - \frac{\omega_1(\varphi)^2}{2 \cdot (J_{\text{PRII}}(\varphi) + J_{\text{PRI}})} \cdot dJ_{\text{PRII}}(\varphi)$$

$$\varepsilon_1(\text{f}) = -0.577$$



$$\omega_n := \omega_1(0)$$

$$\omega_n = 7.811$$

$$\varepsilon_n := \varepsilon_1(0)$$

$$\varepsilon_n = 0.693$$

$$f_{\min 1} := 5 \text{ Given} \quad \varphi_{\min 1} := \text{Minimize}(\omega_1, f_{\min 1})$$

$$\omega_{1\min} := \omega_1(\varphi_{\min 1})$$

$$\omega_{1\min} = 7.453$$

$$f_{\max 1} := 0.5 \text{ Given} \quad \varphi_{\max 1} := \text{Maximize}(\omega_1, f_{\max 1})$$

$$\omega_{1\max} := \omega_1(\varphi_{\max 1})$$

$$\omega_{1\max} = 7.836$$

$$f_{\min 2} := 5 \text{ Given} \quad \varphi_{\min 2} := \text{Minimize}(\varepsilon_1, f_{\min 2})$$

$$\varepsilon_{1\min} := \varepsilon_1(\varphi_{\min 2})$$

$$\varepsilon_{1\min} = -2.849$$

$$f_{\max 2} := 5.5 \text{ Given} \quad \varphi_{\max 2} := \text{Maximize}(\varepsilon_1, f_{\max 2})$$

$$\varepsilon_{1\max} := \varepsilon_1(\varphi_{\max 2})$$

$$\varepsilon_{1\max} = 3.547$$

$$M_{\text{PRDsr}} = 102.041$$

$$J_m = 0.305$$

$$F_{\text{Cx}}(f) = -1.1 \times 10^3$$

$$D_2 := 0.437 \cdot \sqrt[5]{J_m}$$

$$D_2 = 0.345$$

$$D_1 := 0.8 \cdot D_2$$

$$D_1 = 0.276$$

$$b := 0.2 \cdot D_2$$

$$b = 0.069$$

$$m_1 := 6123 \cdot (D_2^2 - D_1^2) \cdot b$$

$$m_1 = 18.051$$

2. Расчет ускорений

$$a_{S3x}(\varphi) := a_{qS3x}(\varphi) \cdot \omega_1(\varphi)^2 + v_{qS3x}(\varphi) \cdot \varepsilon_1(\varphi)$$

$$a_{S3x}(f) = -1.267$$

$$a_{S3y}(\varphi) := a_{qS3y}(\varphi) \cdot \omega_1(\varphi)^2 + v_{qS3y}(\varphi) \cdot \varepsilon_1(\varphi)$$

$$a_{S3y}(f) = -1.115$$

$$a_{Dx}(\varphi) := a_{qDx}(\varphi) \cdot \omega_1(\varphi)^2 + v_{qDx}(\varphi) \cdot \varepsilon_1(\varphi)$$

$$a_{Dx}(f) = -2.534$$

$$\varepsilon_3(\varphi) := \varepsilon_{q3}(\varphi) \cdot \omega_1(\varphi)^2 + \omega_{q3}(\varphi) \cdot \varepsilon_1(\varphi)$$

$$\varepsilon_3(f) = 3.137$$

$$g_g := 9.81$$

3. Инерционная нагрузка и силы тяжести

3.1. Звено 1

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

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

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

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

$$G_1 := 0$$

$$G_1 = 0$$

$$M_{\Phi 1}(\varphi) := J_{PRI} \cdot \varepsilon_1(\varphi)$$

$$M_{\Phi 1}(f) = -84.939$$

3.2. Звено 2

$$\Phi_{2x}(\varphi) := 0$$

$$\Phi_{2x}(f) = 0$$

$$\Phi_{2y}(\varphi) := 0$$

$$\Phi_{2y}(f) = 0$$

$$G_2 := 0$$

$$G_2 = 0$$

$$M_{\Phi 2}(\varphi) := 0$$

$$M_{\Phi 2}(f) = 0$$

3.3. Звено 3

$$\Phi_{3x}(\varphi) := -m_3 \cdot a_{S3x}(\varphi)$$

$$\Phi_{3x}(f) = 25.341$$

$$\Phi_{3y}(\varphi) := -m_3 \cdot a_{S3y}(\varphi)$$

$$\Phi_{3y}(f) = 22.3$$

$$G_3 := m_3 \cdot g_g$$

$$G_3 = 196.2$$

$$M_{\Phi 3}(\varphi) := -I_{3S} \cdot \varepsilon_3(\varphi)$$

$$M_{\Phi 3}(f) = -3.45$$

3.4. Звено 4

$$\Phi_{4x}(\varphi) := 0$$

$$\Phi_{4x}(f) = 0$$

$$\Phi_{4y}(\varphi) := 0$$

$$\Phi_{4y}(f) = 0$$

$$G_4 := 0$$

$$G_4 = 0$$

$$M_{\Phi 4}(\varphi) := 0$$

$$M_{\Phi 4}(f) = 0$$

3.5. Звено 5

$$\Phi_{5y} := 0$$

$$\Phi_{5y} = 0$$

$$\Phi_{5x}(\varphi) := -m_5 \cdot a_{Dx}(\varphi)$$

$$\Phi_{5x}(f) = 164.715$$

$$G_5 := m_5 \cdot g_g$$

$$G_5 = 637.65$$

$$M_{\Phi 5} := 0$$

$$M_{\Phi 5} = 0$$

$$F_{\text{tr}x}(f) = -170$$

$$F_{Cx}(f) = -1.1 \times 10^3$$

4. Расчет реакций

4.1. Матрица коэффициентов

Создается вспомогательная матрица. Заполняется в соответствие с таблицей кинематических пар

$$A11 := \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}$$

Создается нулевая матрица размерностью A11. Заполняется указанием последнего элемента

$$A12_{4,6} := 0$$

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

Создается нулевая матрица. Ее число строк как у A11, число столбцов на единицу больше числа поступательных кинематических пар. Заполняется указанием последнего элемента

$$A13_{4,3} := 0$$

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

Создается матрица, содержащая строки коэффициентов, соответствующие суммам проекций сил на ось абсцисс для каждого звена. Образуется объединением матриц A11, A12, A13.

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

A1 =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	-1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	...

Создается матрица, содержащая строки коэффициентов, соответствующие суммам проекций сил на ось ординат для каждого звена. Образуется объединением матриц A12, A11, A13.

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

$$A2 =$$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	1	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	-1	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	1	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	...

Формирование матриц, содержащих строки коэффициентов, соответствующих суммам моментов

Создается строка плеч для проекций сил на ось абсцисс. Ее элементами являются ординаты кинематических пар в соответствие с таблицей кинематических пар

$$Y(\varphi) := \begin{pmatrix} 0 & y_A(\varphi) & y_C & y_D(\varphi) & y_A(\varphi) & y_D(\varphi) & y_F \end{pmatrix}$$

Формируется матрица плеч. Ее размерность как A11

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

$$YY(f) = \begin{pmatrix} 0 & 0.111 & -0.36 & 0.339 & 0.111 & 0.339 & 0.322 \\ 0 & 0.111 & -0.36 & 0.339 & 0.111 & 0.339 & 0.322 \\ 0 & 0.111 & -0.36 & 0.339 & 0.111 & 0.339 & 0.322 \\ 0 & 0.111 & -0.36 & 0.339 & 0.111 & 0.339 & 0.322 \\ 0 & 0.111 & -0.36 & 0.339 & 0.111 & 0.339 & 0.322 \end{pmatrix}$$

Формируется матрица коэффициентов при проекциях сил на ось абсцисс. Получается путем поэлементного перемножения матриц A11 и YY. Знаки инвертируются.

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

$$A31(f) = \begin{pmatrix} 0 & -0.111 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.111 & 0 & 0 & -0.111 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.36 & -0.339 & 0.111 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.339 & 0 & -0.339 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.339 & -0.322 \end{pmatrix}$$

Создается строка плеч для проекций сил на ось ординат. Ее элементами являются абсциссы кинематических пар в соответствие с таблицей кинематических пар. Дальнейшие преобразования аналогичны описанным выше.

$$\underline{X}(\varphi) := \begin{pmatrix} 0 & x_A(\varphi) & 0 & x_D(\varphi) & x_A(\varphi) & x_D(\varphi) & x_D(\varphi) \end{pmatrix}$$

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

$$XX(f) = \begin{pmatrix} 0 & 0.064 & 0 & 0.095 & 0.064 & 0.095 & 0.095 \\ 0 & 0.064 & 0 & 0.095 & 0.064 & 0.095 & 0.095 \\ 0 & 0.064 & 0 & 0.095 & 0.064 & 0.095 & 0.095 \\ 0 & 0.064 & 0 & 0.095 & 0.064 & 0.095 & 0.095 \\ 0 & 0.064 & 0 & 0.095 & 0.064 & 0.095 & 0.095 \end{pmatrix}$$

$$A32(\varphi) := \xrightarrow{\quad} (A11 \cdot XX(\varphi))$$

$$A32(f) = \begin{pmatrix} 0 & 0.064 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.064 & 0 & 0 & 0.064 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.095 & -0.064 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.095 & 0 & 0.095 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.095 & 0.095 \end{pmatrix}$$

Создается матрица, содержащая 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 узла, к которому приложен неизвестный активный момент.

$$\mathbf{A}_{33} := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$A11 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}$$

Создается матрица, содержащая строки коэффициентов, соответствующие суммам моментов для каждого звена. Образуется объединением матриц A_{31} , A_{32} , A_{33} .

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

A3(f) =		0	1	2	3	4	5	6	7	8
	0	0	-0.111	0	0	0	0	0	0	0.064
	1	0	0.111	0	0	-0.111	0	0	0	-0.064
	2	0	0	0.36	-0.339	0.111	0	0	0	0
	3	0	0	0	0.339	0	-0.339	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0.339	-0.322	0	...

Создается строка, содержащая строки коэффициентов, соответствующие 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.

$$A_{41}(\varphi) := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \cos(\varphi_3(\varphi)) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$A_{42}(\varphi) := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \sin(\varphi_3(\varphi)) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$A_{43} := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

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

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
A4(f) =	0	0	0	0	0.134	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	1	0	...

Создается полная матрица коэффициентов путем объединения

$$A(f) =$$

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	1	1	0	0	0	0	0	0
1	0	-1	0	0	1	0	0	0
2	0	0	1	1	-1	0	0	0
3	0	0	0	-1	0	1	0	0
4	0	0	0	0	0	-1	1	0
5	0	0	0	0	0	0	0	1
6	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	-0.111	0	0	0	0	0	0
11	0	0.111	0	0	-0.111	0	0	0
12	0	0	0.36	-0.339	0.111	0	0	0
13	0	0	0	0.339	0	-0.339	0	0
14	0	0	0	0	0	0.339	-0.322	0
15	0	0	0	0	0.134	0	0	...

$$\text{rows}(A(f)) = 18 \quad \text{cols}(A(f)) = 18$$

$$B1(\varphi) := \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ (\Phi_{3x}(\varphi)) \cdot 1 \\ 0 \\ F_{\text{trx}}(\varphi) \cdot 1 + F_{\text{Cx}}(\varphi) \cdot 1 + \Phi_{5x}(\varphi) \cdot 1 \end{bmatrix} \quad B1(f) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -25.341 \\ 0 \\ 1.105 \times 10^3 \end{pmatrix}$$

$$B2(\varphi) := \begin{pmatrix} -G_1 \cdot 1 \\ 0 \\ \Phi_{3y}(\varphi) \cdot 1 - G_3 \cdot 1 \\ 0 \\ -G_5 \cdot 1 \end{pmatrix} \quad B2(f) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 173.9 \\ 0 \\ 637.65 \end{pmatrix}$$

$$B3(\varphi) := \begin{bmatrix} M_{\Phi 1}(\varphi) \cdot 1 \\ 0 \\ -\Phi_{3x}(\varphi) \cdot y_{S3}(\varphi) \cdot 1 + \left(\Phi_{3y}(\varphi) \cdot 1 - G_3 \cdot 1\right) \cdot x_{S3}(\varphi) + M_{\Phi 3}(\varphi) \cdot 1 \\ 0 \\ -F_{Cx}(\varphi) \cdot 1 \cdot \left(y_F - l_p\right) - F_{trx}(\varphi) \cdot y_F \cdot 1 - G_5 \cdot \left(x_D(\varphi) + l_{S5}\right) \cdot 1 - \Phi_{5x}(\varphi) \cdot y_F \cdot 1 \end{bmatrix}$$

$$B3(f) = \begin{pmatrix} 84.939 \\ 0 \\ 11.419 \\ 0 \\ -86.515 \end{pmatrix}$$

$$B4 := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

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

B(f) =

	0
0	0
1	0
2	-25.341
3	0
4	1.105·10 ³
5	0
6	0
7	173.9
8	0
9	637.65
10	84.939
11	0
12	11.419
13	0
14	-86.515
15	0
16	0
17	0

6.3. Решение системы.

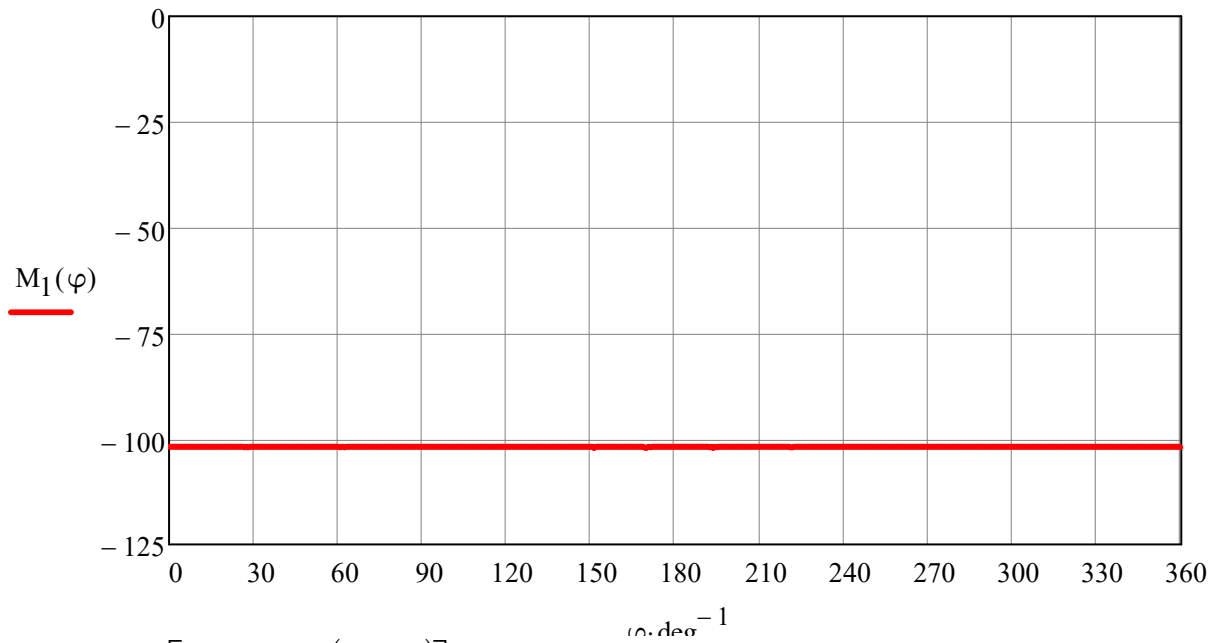
$$D(\varphi) := \text{Isolve}(A(\varphi), B(\varphi))$$

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.

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

$F_{10x}(f) := D(f)_0$	$F_{10x}(f) = 1.568 \times 10^3$
$F_{12x}(f) := D(f)_1$	$F_{12x}(f) = -1.568 \times 10^3$
$F_{30x}(f) := D(f)_2$	$F_{30x}(f) = -488.51$
$F_{34x}(f) := D(f)_3$	$F_{34x}(f) = -1.105 \times 10^3$
$F_{23x}(f) := D(f)_4$	$F_{23x}(f) = -1.568 \times 10^3$
$F_{45x}(f) := D(f)_5$	$F_{45x}(f) = -1.105 \times 10^3$
$F_{50x}(f) := D(f)_6$	$F_{50x}(f) = 0$
$F_{10y}(f) := D(f)_7$	$F_{10y}(f) = -212.755$
$F_{12y}(f) := D(f)_8$	$F_{12y}(f) = 212.755$
$F_{30y}(f) := D(f)_9$	$F_{30y}(f) = 386.654$
$F_{34y}(f) := D(f)_{10}$	$F_{34y}(f) = 0$
$F_{23y}(f) := D(f)_{11}$	$F_{23y}(f) = 212.755$
$F_{45y}(f) := D(f)_{12}$	$F_{45y}(f) = 0$
$F_{50y}(f) := D(f)_{13}$	$F_{50y}(f) = 637.65$
$M_{23}(f) := D(f)_{14}$	$M_{23}(f) = 0$
$M_{45}(f) := D(f)_{15}$	$M_{45}(f) = 0$
$M_{50}(f) := D(f)_{16}$	$M_{50}(f) = 227.322$
$M_1(f) := D(f)_{17}$	$M_1(f) = -102.041$

$$\varphi := 0, 0.01 \dots 2\pi$$



$$Pog := \frac{[M_{PRDs_r} + (M_1(f))]\cdot 100}{M_{PRDs_r}} = 1.958 \times 10^{-11} \quad \varphi \cdot \text{deg}^{-1}$$

$$F_{10}(\varphi) := \sqrt{F_{10x}(\varphi)^2 + F_{10y}(\varphi)^2}$$

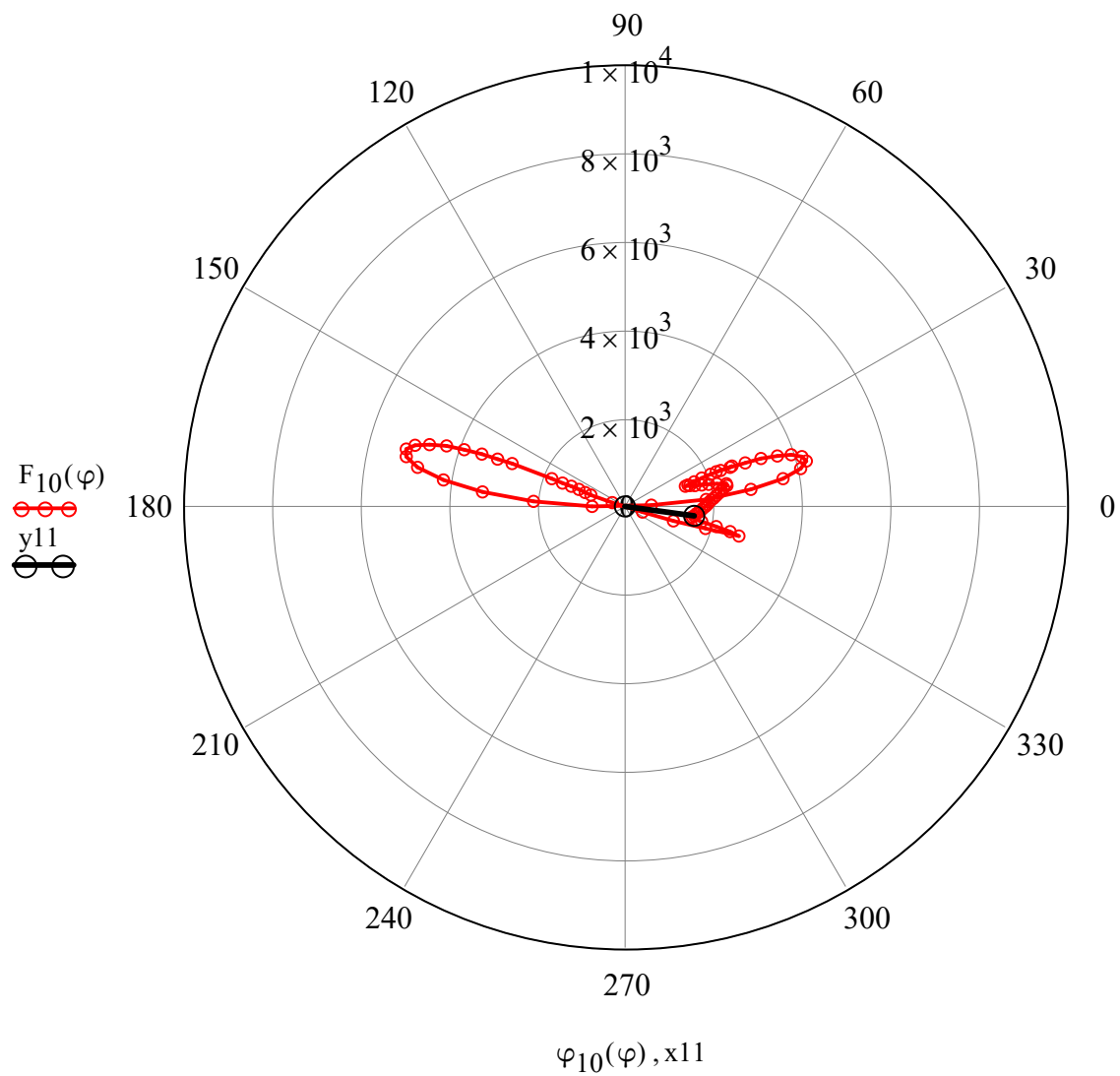
$$F_{10}(f) = 1.583 \times 10^3$$

$$\varphi_{10}(\varphi) := \text{angle}(F_{10x}(\varphi), F_{10y}(\varphi))$$

$$\varphi_{10}(f) \cdot \text{deg}^{-1} = 352.275$$

$$\varphi := 0, \frac{\pi}{36} \dots 2 \cdot \pi - \frac{\pi}{36}$$

$$x11_0 := 0 \quad y11_0 := 0 \quad x11_1 := \varphi_{10}(f) \quad y11_1 := F_{10}(f) \quad x2_0 := 0$$



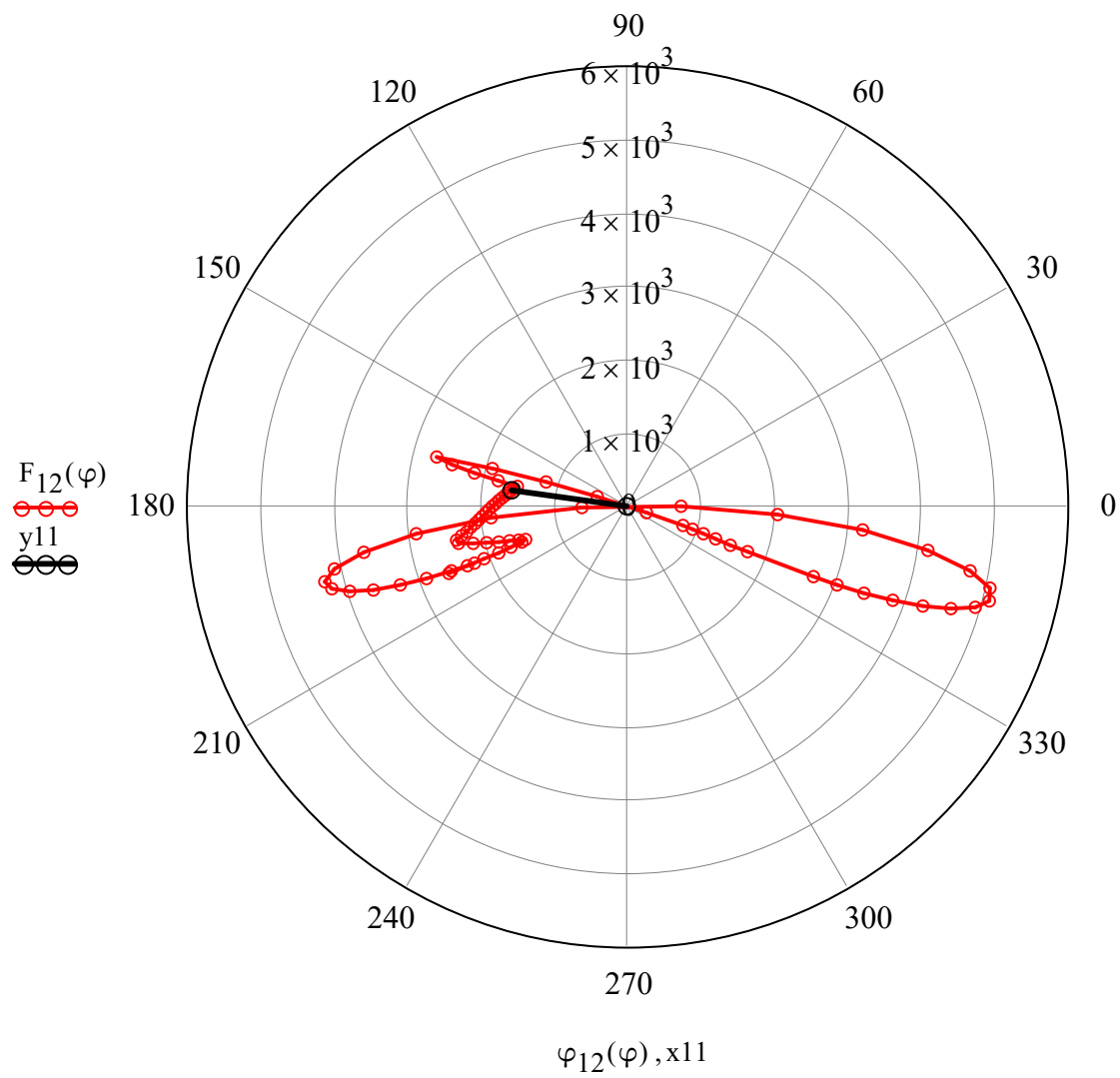
$$F_{12}(\varphi) := \sqrt{F_{12x}(\varphi)^2 + F_{12y}(\varphi)^2}$$

$$F_{12}(f) = 1.583 \times 10^3$$

$$\varphi_{12}(\varphi) := \text{angle}(F_{12x}(\varphi), F_{12y}(\varphi))$$

$$\varphi_{12}(f) \cdot \text{deg}^{-1} = 172.275$$

$$x_{11_0} := 0 \quad y_{11_0} := 0 \quad x_{11_1} := \varphi_{12}(f) \quad y_{11_1} := F_{12}(f) \quad x_{2_0} := 0$$



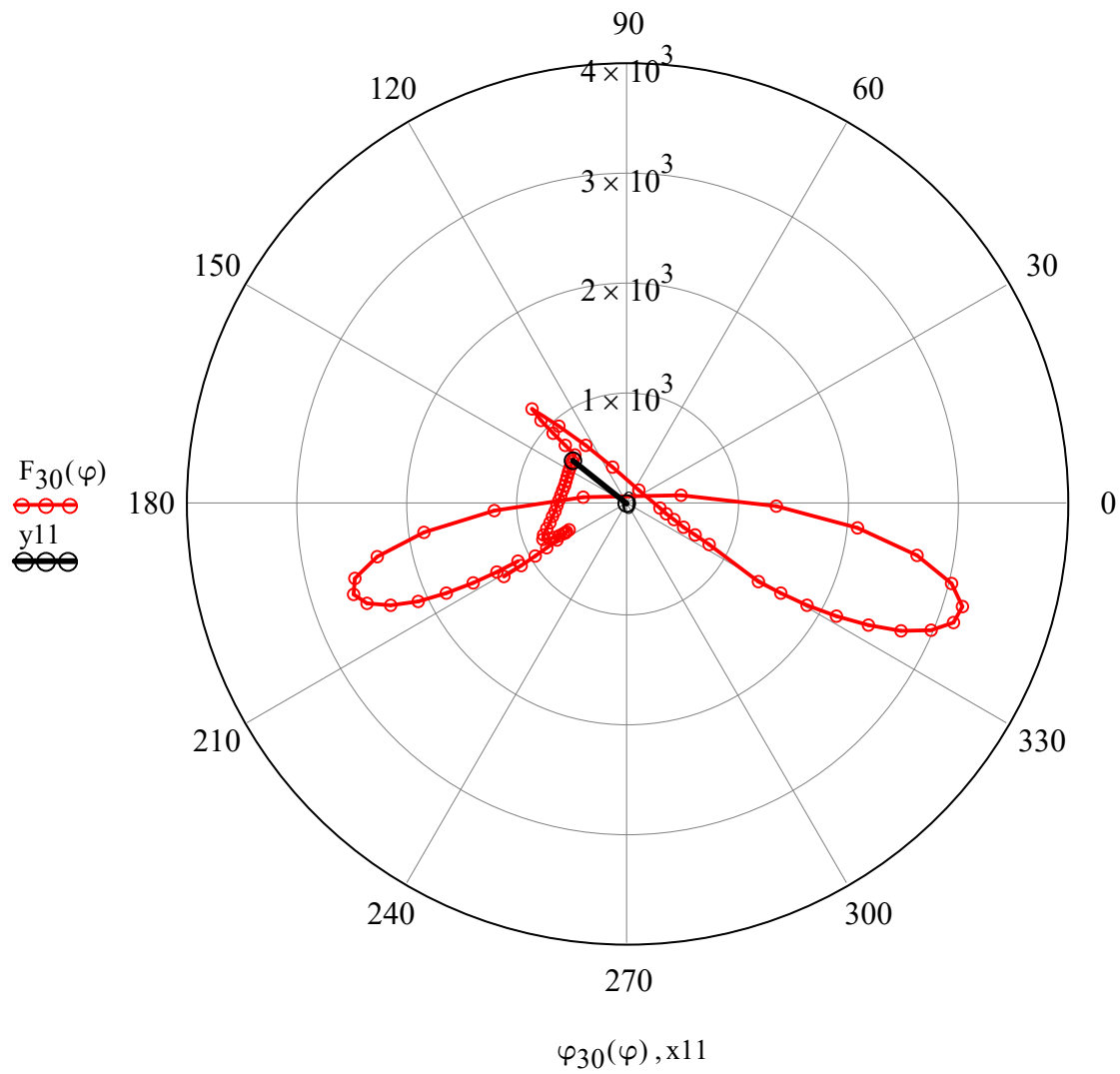
$$F_{30}(\varphi) := \sqrt{F_{30x}(\varphi)^2 + F_{30y}(\varphi)^2}$$

$$F_{30}(f) = 623.012$$

$$\varphi_{30}(\varphi) := \text{angle}(F_{30x}(\varphi), F_{30y}(\varphi))$$

$$\varphi_{30}(f) \cdot \text{deg}^{-1} = 141.639$$

$$x_{11_0} := 0 \quad y_{11_0} := 0 \quad x_{11_1} := \varphi_{30}(f) \quad y_{11_1} := F_{30}(f) \quad x_{2_0} := 0 \quad y_{2_0} := 0$$



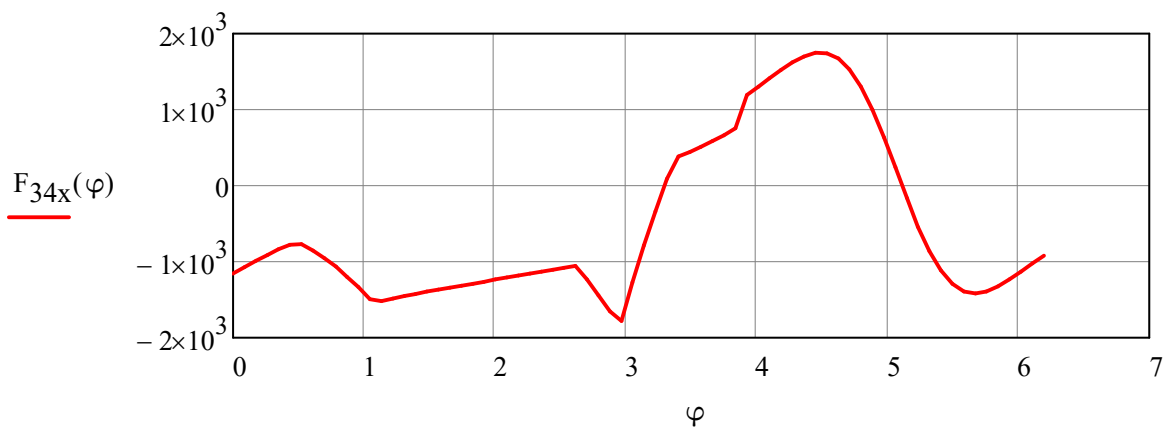
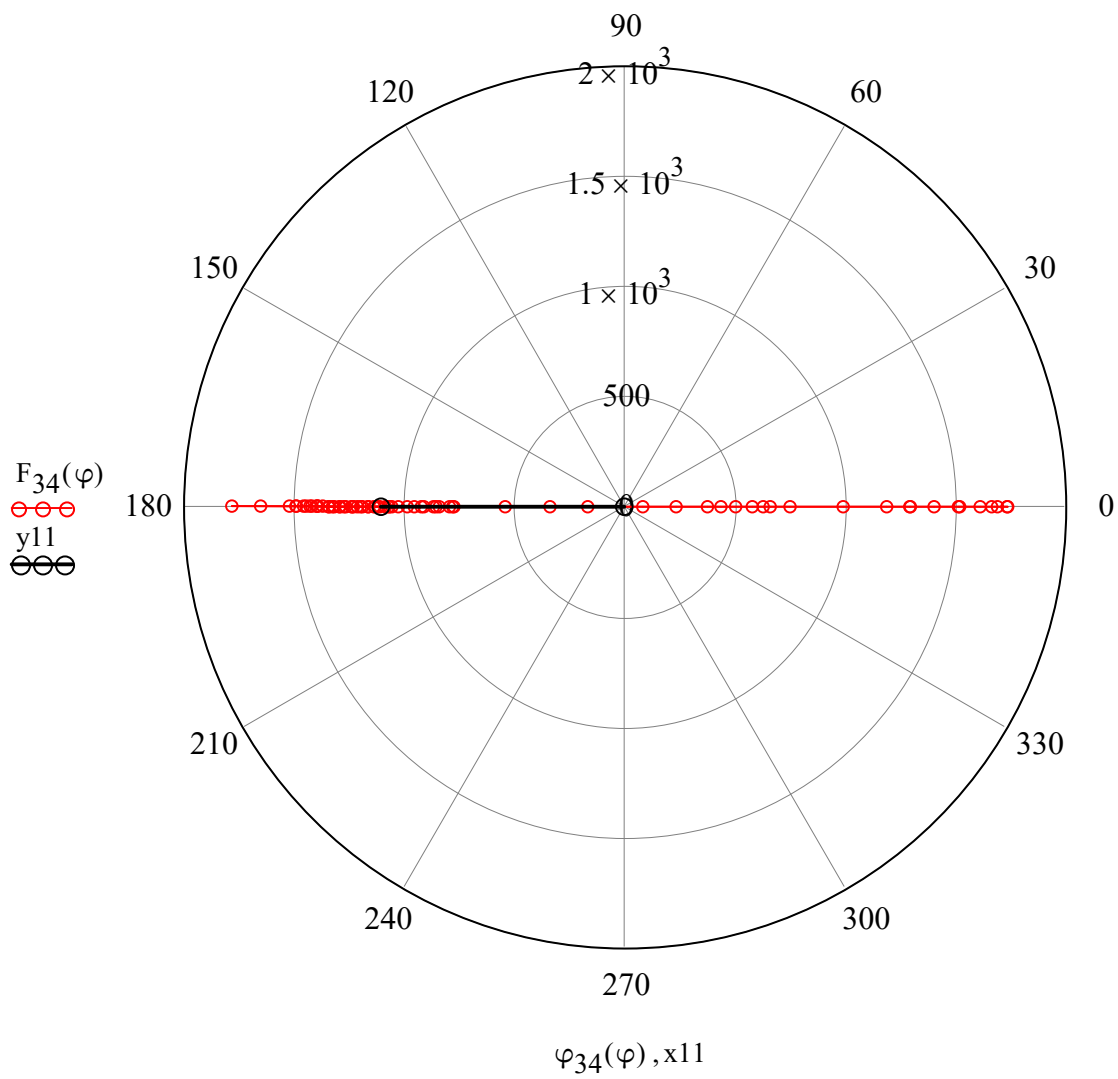
$$F_{34}(\varphi) := \sqrt{F_{34x}(\varphi)^2 + F_{34y}(\varphi)^2}$$

$$F_{34}(f) = 1.105 \times 10^3$$

$$\varphi_{34}(\varphi) := \text{angle}(F_{34x}(\varphi), F_{34y}(\varphi))$$

$$\varphi_{34}(f) \cdot \text{deg}^{-1} = 180$$

$$x_{11_0} := 0 \quad y_{11_0} := 0 \quad x_{11_1} := \varphi_{34}(f) \quad y_{11_1} := F_{34}(f) \quad x_{2_0} := 0 \quad y_{2_0} := 0$$



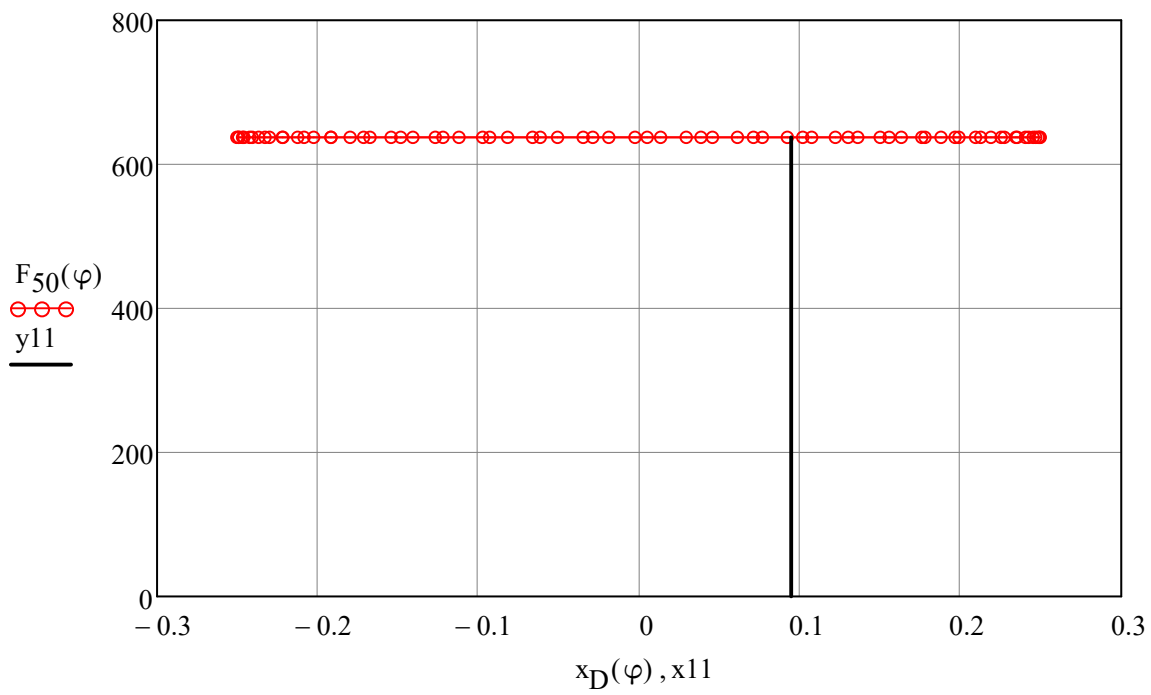
$$F_{50}(\varphi) := \sqrt{F_{50x}(\varphi)^2 + F_{50y}(\varphi)^2}$$

$$F_{50}(f) = 637.65$$

$$\varphi_{50}(\varphi) := \text{angle}(F_{50x}(\varphi), F_{50y}(\varphi))$$

$$\varphi_{50}(f) \cdot \text{deg}^{-1} = 90$$

$$x_{11_0} := x_D(f) \quad y_{11_0} := 0 \quad x_{11_1} := x_D(f) \quad y_{11_1} := F_{50}(f)$$



$$f_{p1} \cdot \text{deg}^{-1} = 28$$

$$f_{p2} \cdot \text{deg}^{-1} = -23.684$$

$$ff_{\text{rab}} \cdot \text{deg}^{-1} = 221.538$$

$$\varphi_y := \left| f_{p2} \right| + 0.5 \cdot f_{p1} - 10 \cdot \text{deg}$$

$$l_{\text{BN}} := 0.15$$

$$\varphi_y \cdot \text{deg}^{-1} = 27.684$$

$$\varphi_{\text{yy}} := 28 \cdot \text{deg}$$

$$\varphi_s := 0.5 \cdot ff_{rab} + 0.5 \cdot f_{p1} - 15 \cdot \text{deg}$$

$$\varphi_s \cdot \text{deg}^{-1} = 109.769$$

$$\varphi_{sw} := \varphi_y$$

$$\varphi_{ds} := 15 \cdot \text{deg}$$

$$\varphi_r := \varphi_y + \varphi_s + \varphi_{ds}$$

$$\varphi_r \cdot \text{deg}^{-1} = 71$$

$$h := 0.045 \quad \theta_m := 35 \cdot \text{deg}$$

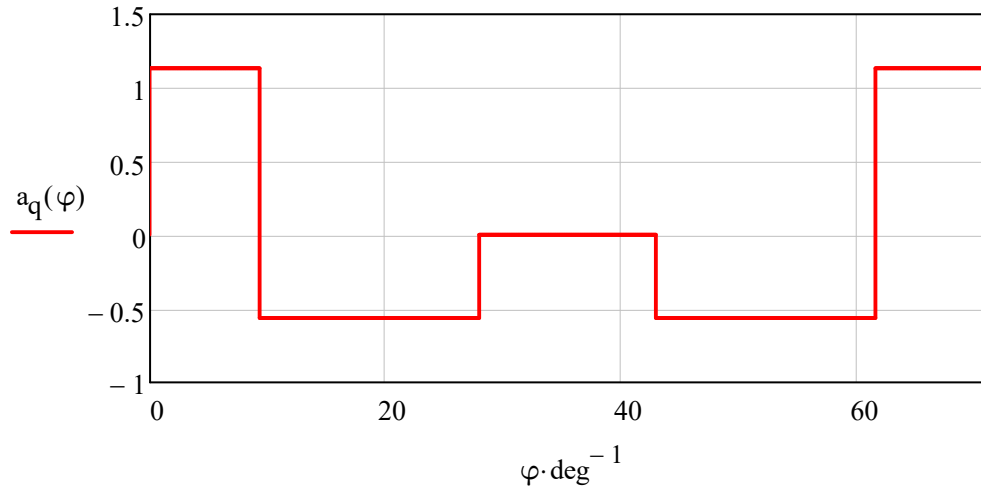
$$\frac{a_{q1}}{a_{q2}} = \frac{a_{q4}}{a_{q3}} = k = 2$$

$$k := 2$$

$$a_{q1} := \frac{2 \cdot (k+1) \cdot h}{\varphi_y^2} \quad a_{q2} := \frac{a_{q1}}{k} \quad a_{q4} := \frac{2 \cdot (k+1) \cdot h}{\varphi_s^2} \quad a_{q3} := \frac{a_{q4}}{k}$$

$$a_q(\varphi) := \begin{cases} 0 & \text{if } \varphi < 0 \\ a_{q1} & \text{if } 0 < \varphi < \frac{\varphi_y}{k+1} \\ -\frac{a_{q1}}{k} & \text{if } \frac{\varphi_y}{k+1} < \varphi < \varphi_y \\ 0 & \text{if } \varphi_y < \varphi < \varphi_y + \varphi_{ds} \\ -\frac{a_{q4}}{k} & \text{if } \varphi_y + \varphi_{ds} < \varphi < \varphi_r - \frac{\varphi_s}{k+1} \\ a_{q4} & \text{if } \varphi_r - \frac{\varphi_s}{k+1} < \varphi < \varphi_r \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

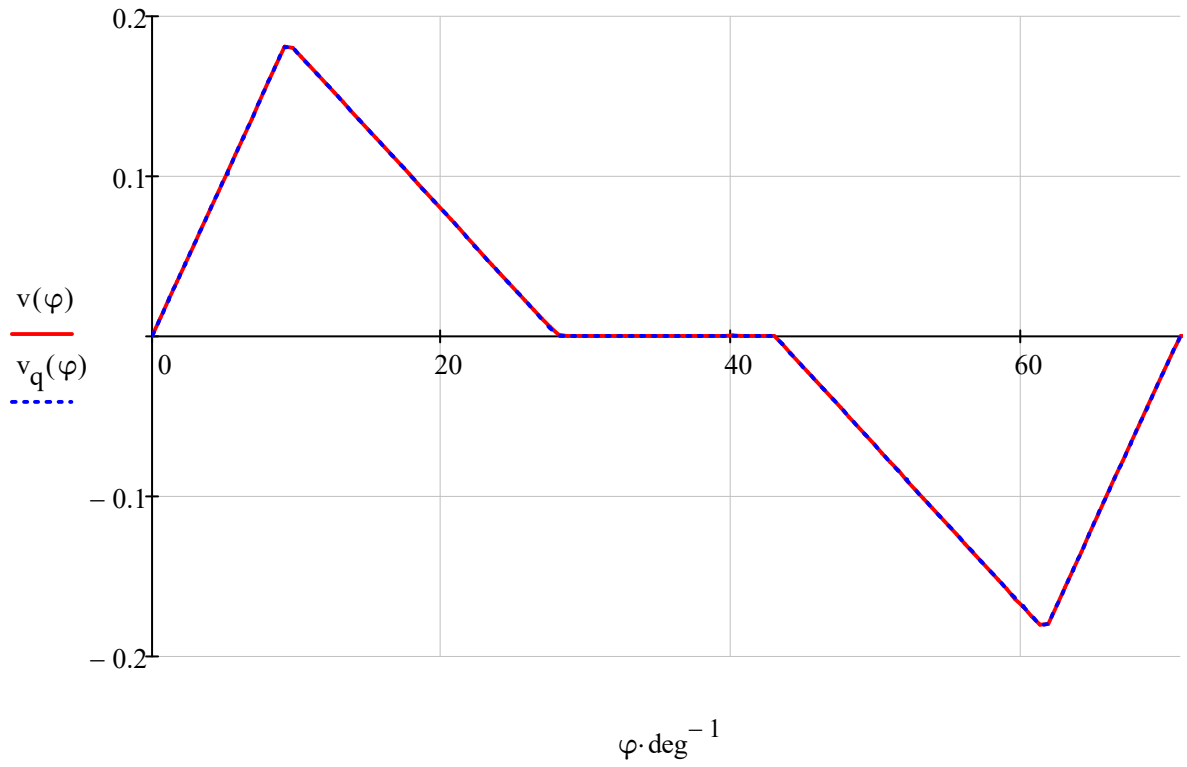
$$\varphi := 0, 0.0001 \dots \varphi_r + 1$$



$$v_q(\varphi) := \begin{cases} 0 & \text{if } \varphi < 0 \\ a_{q1} \cdot \varphi & \text{if } 0 \leq \varphi < \frac{\varphi_y}{k+1} \\ -\frac{a_{q1}}{k}(\varphi - \varphi_y) & \text{if } \frac{\varphi_y}{k+1} \leq \varphi < \varphi_y \\ 0 & \text{if } \varphi_y \leq \varphi \leq \varphi_y + \varphi_{ds} \\ -\frac{a_{q4}}{k}(\varphi - \varphi_y - \varphi_{ds}) & \text{if } \varphi_y + \varphi_{ds} < \varphi \leq \varphi_r - \frac{\varphi_s}{k+1} \\ a_{q4} \cdot (\varphi - \varphi_r) & \text{if } \varphi_r - \frac{\varphi_s}{k+1} < \varphi \leq \varphi_r \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$v(\varphi) := \int_0^\varphi a_q(\varphi) \, d\varphi$$

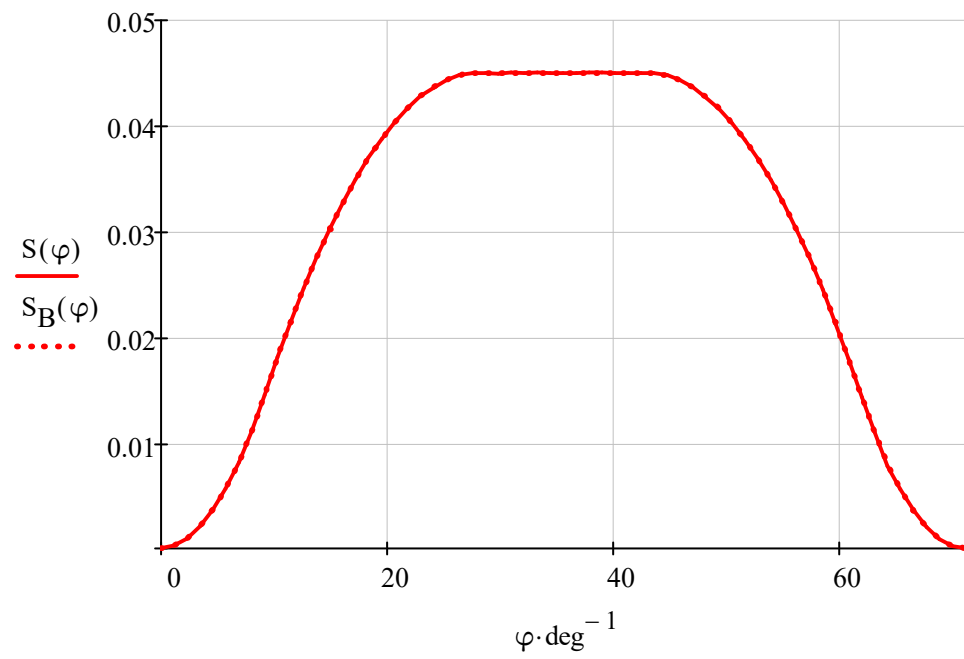
$$\varphi := 0, 0.01 \dots \pi + 0.1$$



$$S_B(\varphi) := \begin{cases} 0 & \text{if } \varphi < 0 \\ \frac{a_{q1}}{k} \cdot \varphi^2 & \text{if } 0 \leq \varphi < \frac{\varphi_y}{k+1} \\ h - \frac{a_{q1}}{2 \cdot k} (\varphi - \varphi_y)^2 & \text{if } \frac{\varphi_y}{k+1} \leq \varphi < \varphi_y \\ h & \text{if } \varphi_y \leq \varphi \leq \varphi_y + \varphi_{ds} \\ h - \frac{a_{q4}}{2 \cdot k} (\varphi - \varphi_y - \varphi_{ds})^2 & \text{if } \varphi_y + \varphi_{ds} < \varphi \leq \varphi_r - \frac{\varphi_s}{k+1} \\ \frac{a_{q4}}{2} \cdot (\varphi - \varphi_r)^2 & \text{if } \varphi_r - \frac{\varphi_s}{k+1} < \varphi \leq \varphi_r \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\textcolor{green}{S}(\varphi) := \int_0^\varphi v_q(\varphi) \, d\varphi$$

$$\varphi := 0, 0.02 \dots \pi + 0.1$$

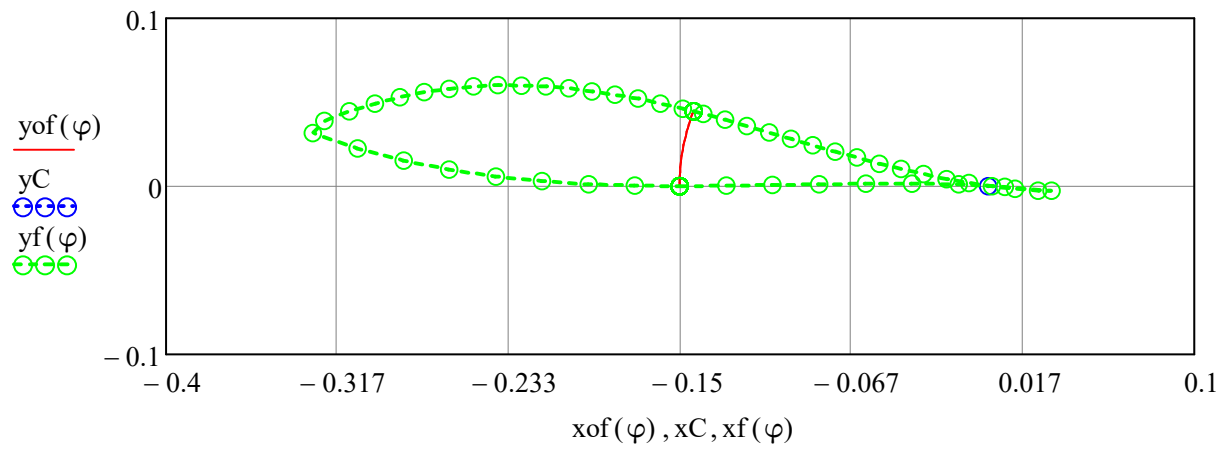


$$fL := \frac{\varphi_s}{2} \qquad fR := \varphi_r - \frac{\varphi_y}{2} \qquad df2(\varphi) := \frac{S_B(\varphi)}{l_{BN}}$$

$$xof(\varphi) := -l_{BN} \cdot \cos(df2(\varphi)) \qquad yof(\varphi) := l_{BN} \cdot \sin(df2(\varphi))$$

$$xC := 0 \qquad yC := 0$$

$$xf(\varphi) := -(l_{BN} - v_q(\varphi)) \cdot \cos(df2(\varphi)) \quad yf(\varphi) := (l_{BN} - v_q(\varphi)) \cdot \sin(df2(\varphi))$$



$$N := 100$$

$$i := 0..N$$

$$\varphi_{1,i} := i \cdot \frac{\varphi_r}{N}$$

$$x_i := x_f(\varphi_{1,i})$$

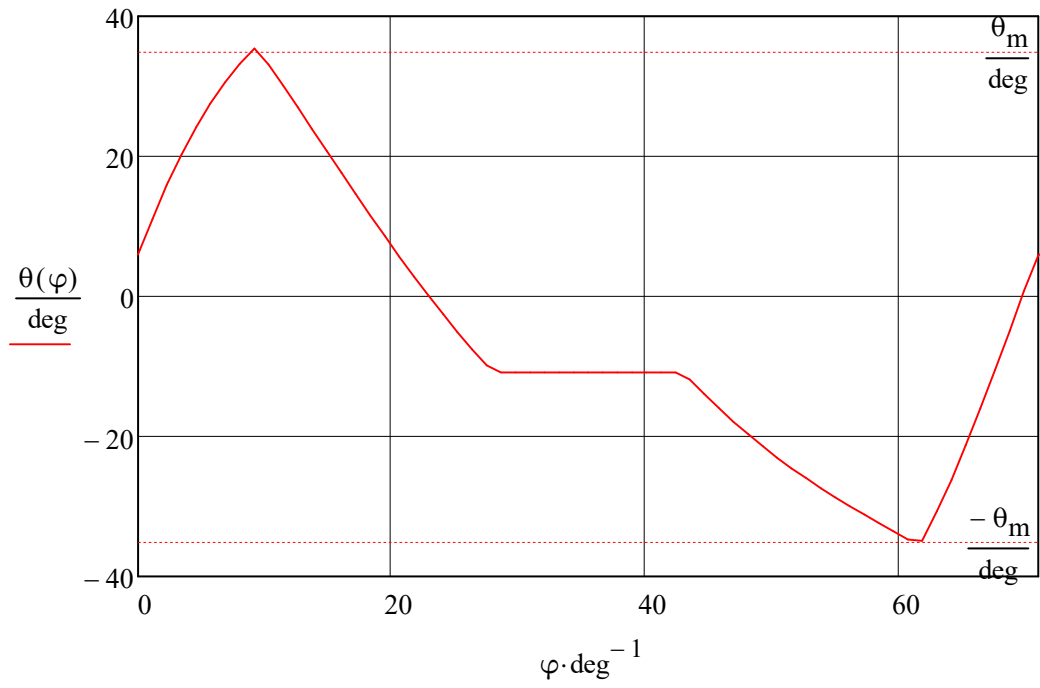
$$y_i := y_f(\varphi_{1,i})$$

$$\text{WRITEPRN}("x.txt") := x \cdot 1000$$

$$\text{WRITEPRN}("y.txt") := y \cdot 1000$$

$$a_w := 0.2973 \quad \varphi_{20} := 54 \cdot \text{deg}$$

$$\theta(f) := \text{atan}\left(\frac{v_q(f) + a_w \cdot \cos(\varphi_{20} + df_2(f)) - l_{BN}}{a_w \cdot \sin(\varphi_{20} + df_2(f))}\right)$$



$$\textcolor{green}{fi}(\varphi_1) := \frac{-\pi}{2} - \varphi_1$$

$$x_G(\varphi_1) := a_w \cdot \cos(\textcolor{green}{fi}(\varphi_1))$$

$$y_G(\varphi_1) := a_w \cdot \sin(\textcolor{green}{fi}(\varphi_1))$$

$$x_K(\varphi_1) := x_G(\varphi_1) + l_{BN} \cdot \cos(\pi + \textcolor{green}{fi}(\varphi_1) + \varphi_{20} + \textcolor{green}{df2}(\varphi_1))$$

$$y_K(\varphi_1) := y_G(\varphi_1) + l_{BN} \cdot \sin(\pi + \textcolor{green}{fi}(\varphi_1) + \varphi_{20} + \textcolor{green}{df2}(\varphi_1))$$

$$\textcolor{green}{df2}(\varphi) := \frac{S_B(\varphi)}{l_{BN}}$$

$$\textcolor{green}{ff} := 20\text{deg}$$

$$r_0 := 0.2413$$

$$r_0 \cdot 0.25 = 0.06$$

$$r_0 \cdot 0.4 = 0.097$$

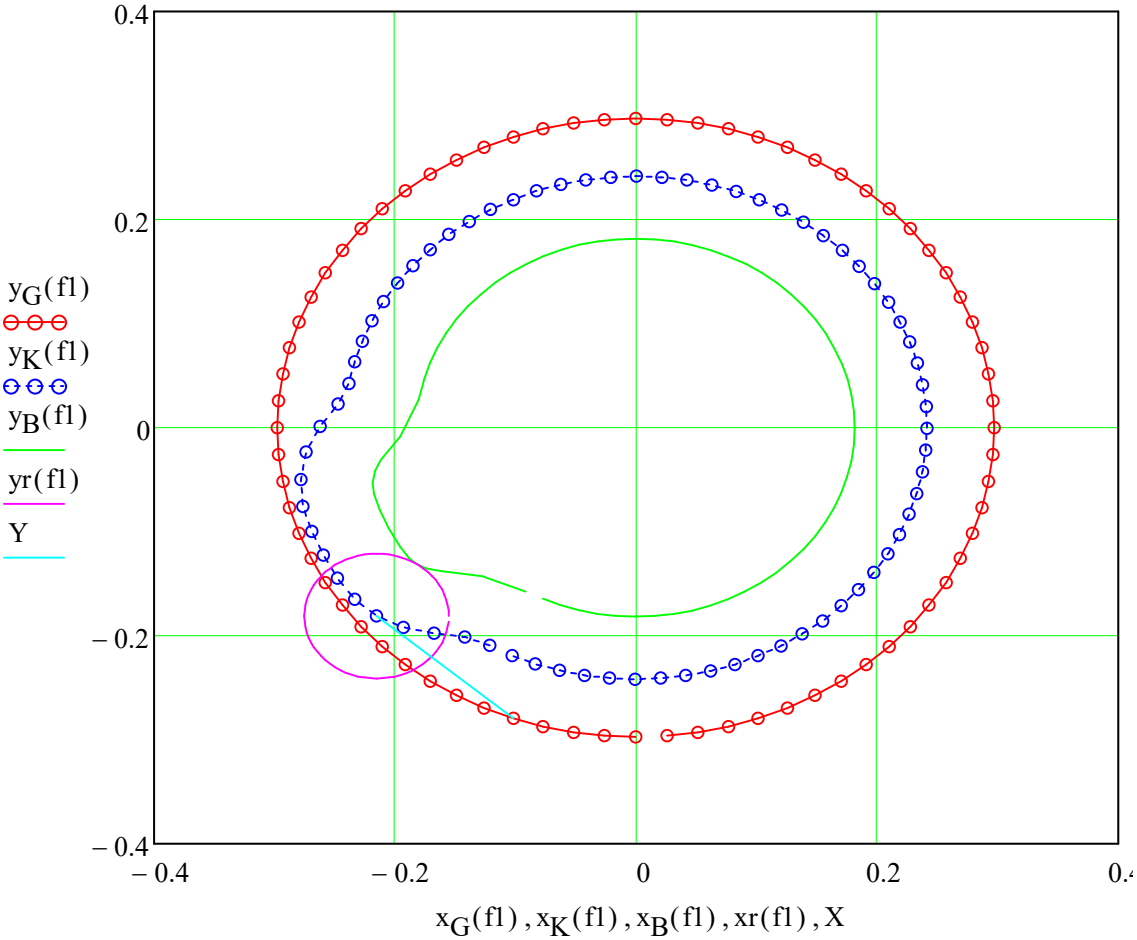
$$r_R := .06$$

$$\begin{aligned}x_{\text{B}}(\varphi_1) &:= x_{\text{K}}(\varphi_1) + r_{\text{R}} \cdot \cos\left[\left(\frac{\pi}{2} + \text{fi}(\varphi_1) + \varphi_{20} + \text{df2}(\varphi_1)\right) + \theta(\varphi_1)\right] \\ y_{\text{B}}(\varphi_1) &:= y_{\text{K}}(\varphi_1) + r_{\text{R}} \cdot \sin\left[\left(\frac{\pi}{2} + \text{fi}(\varphi_1) + \varphi_{20} + \text{df2}(\varphi_1)\right) + \theta(\varphi_1)\right]\end{aligned}$$

$$\text{xr}(f) \, := \, x_{\text{K}}(\text{ff}) + r_{\text{R}} \cdot \cos(f) \quad \text{yr}(f) \, := \, y_{\text{K}}(\text{ff}) + r_{\text{R}} \cdot \sin(f)$$

$$\text{X} \, := \, \begin{pmatrix} x_{\text{G}}(\text{ff}) \\ x_{\text{K}}(\text{ff}) \end{pmatrix} \qquad \text{Y} \, := \, \begin{pmatrix} y_{\text{G}}(\text{ff}) \\ y_{\text{K}}(\text{ff}) \end{pmatrix}$$

$$\text{fl} \, := \, 0, \frac{\pi}{36} .. 2 \cdot \pi - .02$$



$$\text{N} \, := \, 100$$

$$i := 0..N$$

$$\varphi l_i := i \cdot \frac{\varphi_r}{N}$$

$$x_i := x_K(\varphi l_i)$$

$$y_i := y_K(\varphi l_i)$$

$$\text{WRITEPRN}(\text{"x.txt"}) := x \cdot 1000$$

$$\text{WRITEPRN}(\text{"y.txt"}) := y \cdot 1000$$

$$\text{ff} := 0.5$$

$$\text{Given } s_D(\text{ff}) = 0.05 \cdot H$$

$$f_{p1} := \text{Find}(\text{ff})$$

$$f_{p1} \cdot \text{deg}^{-1} = 28$$

$$\text{fff} := -0.5$$

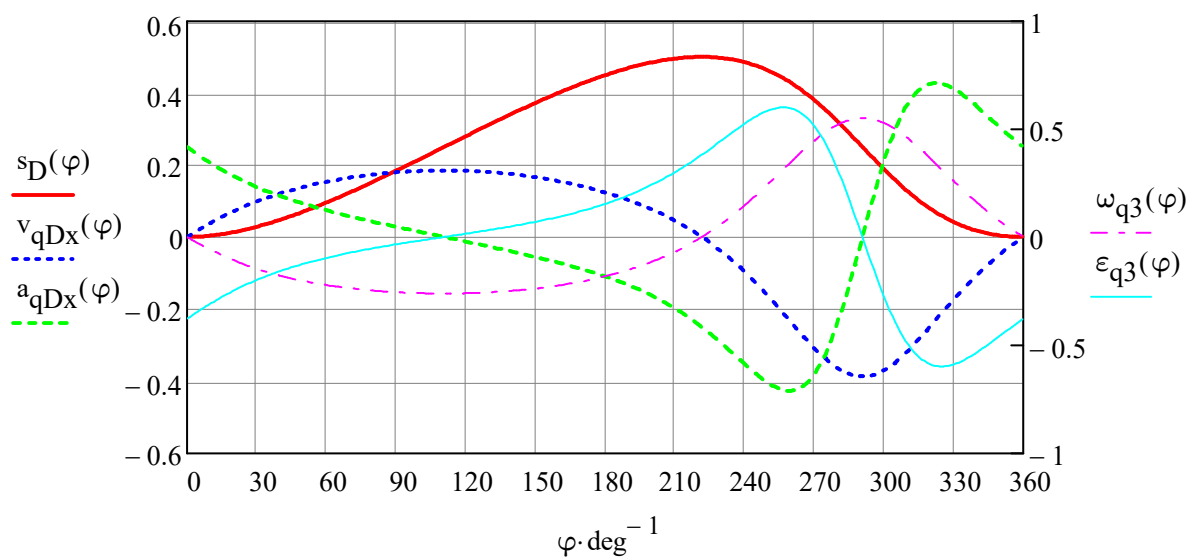
$$\text{Given } s_D(\text{fff}) = 0.05 \cdot H$$

$$f_{p2} := \text{Find}(\text{fff})$$

$$f_{p2} \cdot \text{deg}^{-1} = -23.684$$

$$\text{ff}_{\text{rab}} := \pi + \beta$$

$$\text{ff}_{\text{rab}} \cdot \text{deg}^{-1} = 221.538$$



$$mD_1 := 0.35$$

$$mD_p := 0.65$$

$$\varphi_1(f) \cdot \deg^{-1} = 60$$

yt

