Mechanismus vztlakové klapky křídla

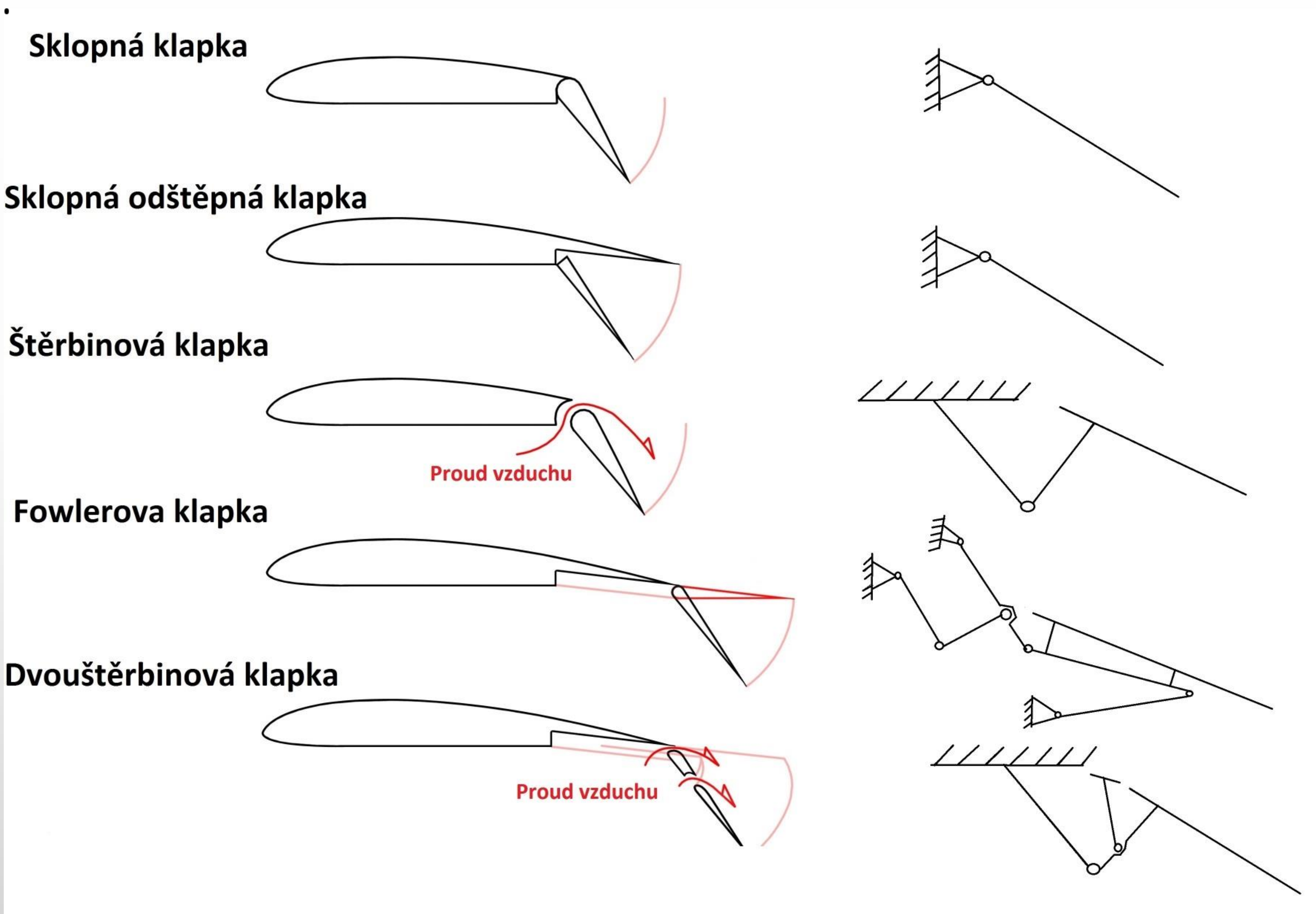
Michael Valášek
Vedoucí práce: doc. Ing. Václav Bauma, CSc.

Zadání bakalářské práce

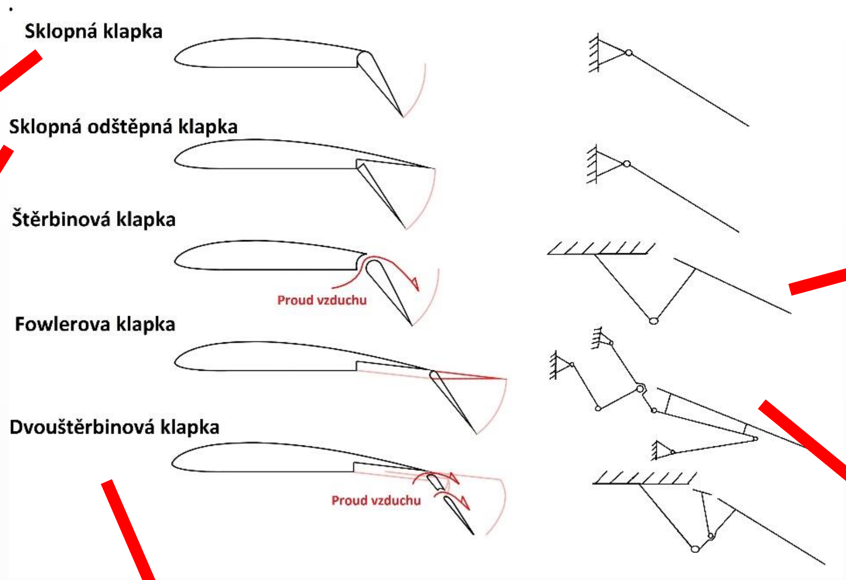
Mechanismus vztlakové klapky křídla

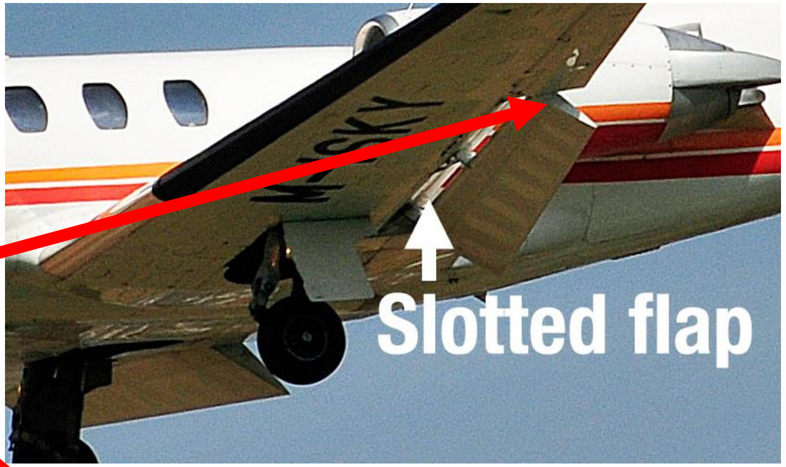
1. Proveďte rešerši možných konstrukčních řešení vztlakové klapky křídla
2. Seznamte se s metodami řešení kinematiky a dynamiky mechanismů
3. Sestavte matematický model pro jeden typ mechanismu
4. Programy KRESIC a DRESIC vyřešte pohyb mechanismu a navrhněte parametry pohonu

Přehled mechanismů vztlakových klapek




1944
SX


Sklopná klapka
Sklopná odštěpná klapka
Štěrbinová klapka
Proud vzduchu
Fowlerova klapka
Dvouštěrbinová klapka
Proud vzduchu


Slotted flap

Vybraný mechanismus – Fowlerova klapka

Patent *US8844878B2* a *EP2178748B1*

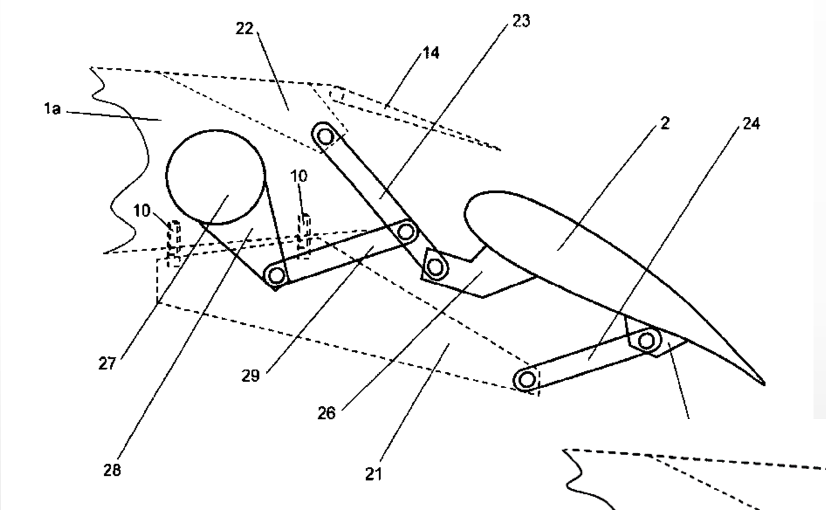
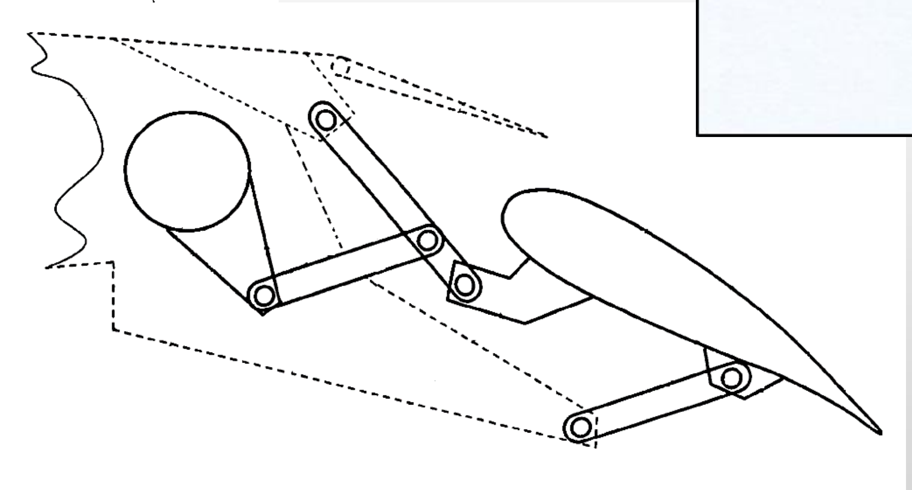
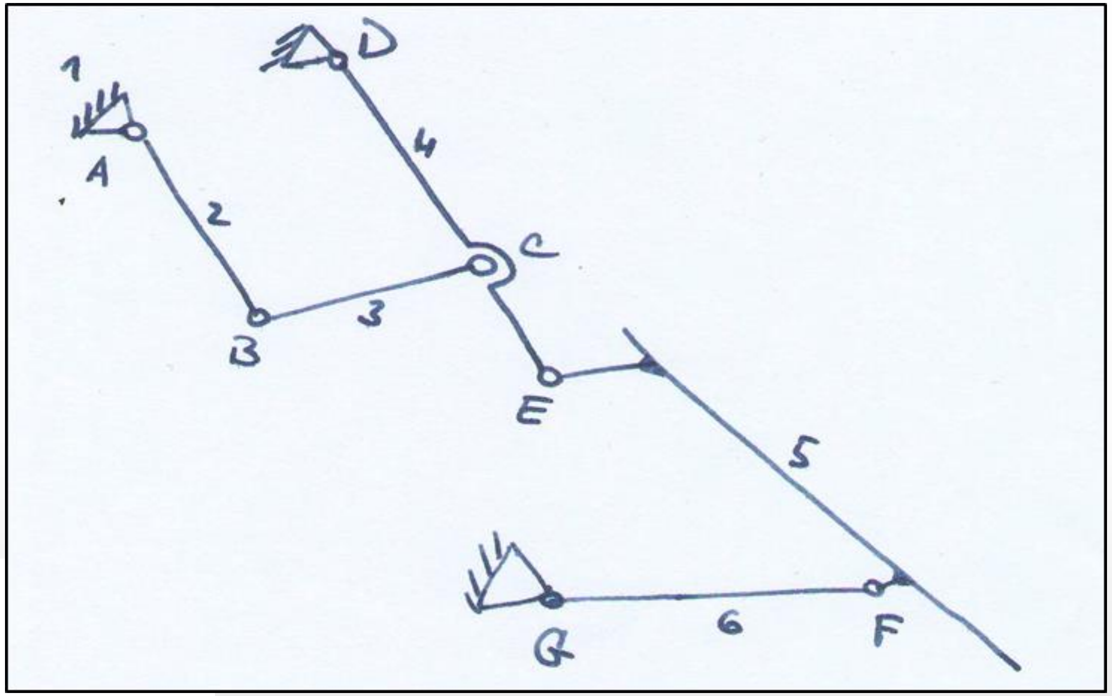
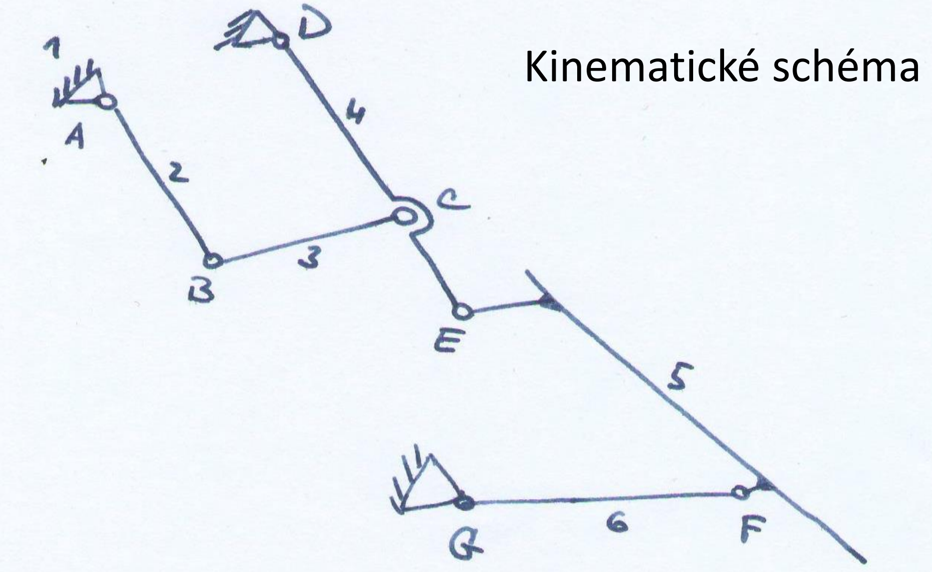


Fig. 3

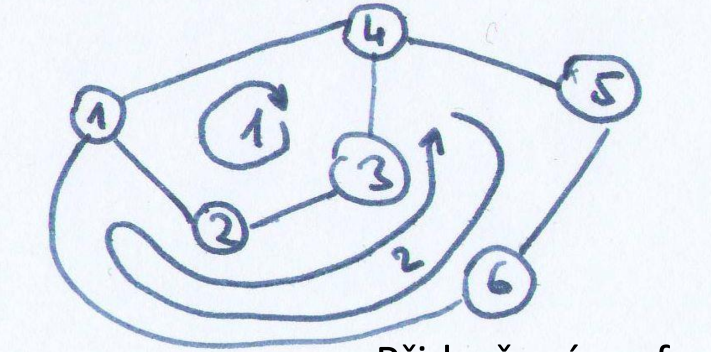




Kinematický model Fowlerovy klapky



Kinematické schéma



Přidružený graf

Počet stupňů volnosti

$$n = 3 \cdot (u - 1) - \sum_{j=1}^{3} (w_j \cdot j)$$

$$n = 3 \cdot (6 - 1) - 7 \cdot 2 = \ 1°$$

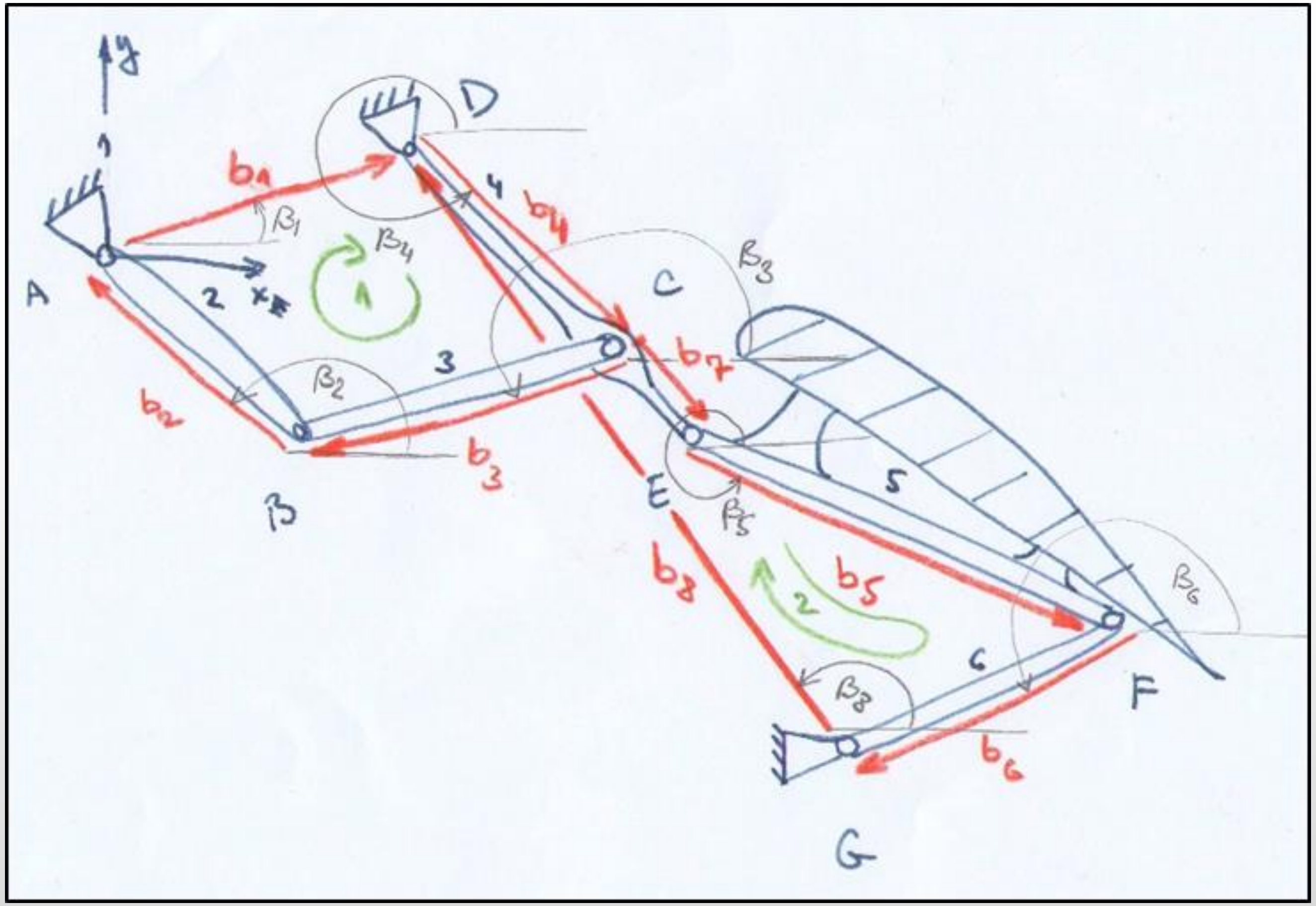
Počet nezávislých smyček

$$l = d + m - u + 1$$

$$l = 7 + 0 - 6 + 1 = 2$$

Vektorová metoda pro řešení kinematiky

Uzavřené vektorové mnohoúhelníky



Zvolené vektory pro dané smyčky

$$\boldsymbol{b}_1, \boldsymbol{b}_2, \boldsymbol{b}_3, \boldsymbol{b}_4, \boldsymbol{b}_5, \boldsymbol{b}_6, \boldsymbol{b}_7 \ a \ \boldsymbol{b}_8$$

Zvolená nezávislá souřadnice β_2

Zvolené závislé souřadnice

$$\beta_3, \beta_4, \beta_5 \ a \ \beta_6$$

Podmínky uzavřenosti vektorových mnohoúhelníků

$$\boldsymbol{b}_1 + \boldsymbol{b}_2 + \boldsymbol{b}_3 + \boldsymbol{b}_4 = \boldsymbol{0}$$

$$\boldsymbol{b}_4 + \boldsymbol{b}_5 + \boldsymbol{b}_6 + \boldsymbol{b}_7 + \boldsymbol{b}_8 = \boldsymbol{0}$$

Vazbové podmínky pro řešení kinematických úloh

Poloha

$$x\colon b_1 \cdot cos(\beta_1) + b_2 \cdot cos(\beta_2) + b_3 \cdot cos(\beta_3) + b_4 \cdot cos(\beta_4) = 0$$

$$y\colon\ b_1 \cdot sin(\beta_1) + b_2 \cdot sin(\beta_2) + b_3 \cdot sin(\beta_3) + b_4 \cdot sin(\beta_4) = 0$$

$$x\colon\ b_4 \cdot cos(\beta_4) + b_5 \cdot cos(\beta_5) + b_6 \cdot cos(\beta_6) + b_7 \cdot cos(\beta_4) + b_8 \cdot cos(\beta_8) = 0$$

$$y\colon\ b_4 \cdot sin(\beta_4) + b_5 \cdot sin(\beta_5) + b_6 \cdot sin(\beta_6) + b_7 \cdot sin(\beta_4) + b_8 \cdot sin(\beta_8) = 0$$

Rychlost

$$x\colon -b_2 \cdot sin(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2 - b_3 \cdot sin(\beta_3) \cdot \dot{\beta}_3 - b_4 \cdot sin(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4 = 0$$

$$y\colon\ +b_2 \cdot cos(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2 + b_3 \cdot cos(\beta_3) \cdot \dot{\beta}_3 + b_4 \cdot cos(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4 = 0$$

$$\mathrm{x}\colon -b_4 \cdot sin(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4 - b_5 \cdot sin(\beta_5) \cdot \dot{\beta}_5 - b_6 \cdot sin(\beta_6) \cdot \dot{\beta}_6 - b_7 \cdot sin(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4 = 0$$

$$y\colon\ b_4 \cdot cos(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4 + b_5 \cdot cos(\beta_5) \cdot \dot{\beta}_5 + b_6 \cdot cos(\beta_6) \cdot \dot{\beta}_6 + b_7 \cdot cos(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4 = 0$$

Vazbové podmínky pro řešení kinematických úloh

Zrychlení

$$x: -b_2 \cdot cos(\beta_2) \cdot \dot{\beta_2}^2 - b_2 \cdot sin(\beta_2) \cdot \ddot{\beta_2} \quad -b_3 \cdot cos(\beta_3) \cdot \dot{\beta_3}^2 - b_3 \cdot sin(\beta_3) \cdot \ddot{\beta_3} - b_4 \cdot cos(\beta_4) \cdot \dot{\beta_4}^2 - b_4 \cdot sin(\beta_4) \cdot \ddot{\beta_4} = 0$$

$$y: \; -b_2 \cdot sin(\beta_2) \cdot \dot{\beta_2}^2 + b_2 \cdot cos(\beta_2) \cdot \ddot{\beta_2} \; -b_3 \cdot sin(\beta_3) \cdot \dot{\beta_3}^2 + b_3 \cdot cos(\beta_3) \cdot \ddot{\beta_3} \; -b_4 \cdot sin(\beta_4) \cdot \dot{\beta_4}^2 + b_4 \cdot cos(\beta_4) \cdot \ddot{\beta_4} = 0$$

$$x: -b_4 \cdot cos(\beta_4) \cdot \dot{\beta_4}^2 - b_4 \cdot sin(\beta_4) \cdot \ddot{\beta_4} - b_5 \cdot cos(\beta_5) \cdot \dot{\beta_5}^2 - b_5 \cdot sin(\beta_5) \cdot \ddot{\beta_5} - b_6 \cdot cos(\beta_6) \cdot \dot{\beta_6}^2 - b_6 \cdot sin(\beta_6) \cdot \ddot{\beta_6} - b_7 \cdot cos(\beta_4) \cdot \dot{\beta_4}^2 - b_7 \cdot sin(\beta_4) \cdot \ddot{\beta_4} = 0$$

$$y: -b_4 \cdot sin(\beta_4) \cdot \dot{\beta_4}^2 + b_4 \cdot cos(\beta_4) \cdot \ddot{\beta_4} - b_5 \cdot sin(\beta_5) \cdot \dot{\beta_5}^2 + b_5 \cdot cos(\beta_5) \cdot \ddot{\beta_5} - b_6 \cdot sin(\beta_6) \cdot \dot{\beta_6}^2 + b_6 \cdot cos(\beta_6) \cdot \ddot{\beta_6} - b_7 \cdot sin(\beta_4) \cdot \dot{\beta_4}^2 + b_7 \cdot cos(\beta_4) \cdot \ddot{\beta_4} = 0$$

Řešení úlohy polohy

$$\mathbf{f}(\mathbf{z}, \mathbf{q}) = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{J_z} \cdot \Delta\mathbf{z}^{(\mathrm{k})} + \mathbf{f}\left(\mathbf{z}^{(\mathrm{k})}, \mathbf{q}\right) = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{z}^{(\mathrm{i+1})} = \mathbf{z}^{(\mathrm{i+1})} + \lambda^{(k)} \Delta\mathbf{z}^{(\mathrm{i})}$$

$$\mathbf{J_z} = \begin{bmatrix} -b_3 \cdot sin(\beta_3) & -b_4 \cdot sin(\beta_4) & 0 & 0 \\ +b_3 \cdot cos(\beta_3) & +b_4 \cdot cos(\beta_4) & 0 & 0 \\ 0 & -b_4 \cdot sin(\beta_4) - b_7 \cdot sin(\beta_4) & -b_5 \cdot sin(\beta_5) & -b_6 \cdot sin(\beta_6) \\ 0 & +b_4 \cdot cos(\beta_4) + b_7 \cdot cos(\beta_4) & +b_5 \cdot cos(\beta_5) & +b_6 \cdot cos(\beta_6) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_{\boldsymbol{q}} = \begin{bmatrix} -b_2 \cdot sin(\beta_2) \\ +b_2 \cdot cos(\beta_2) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Řešení úlohy rychlosti a zrychlení

Řešení rychlostí

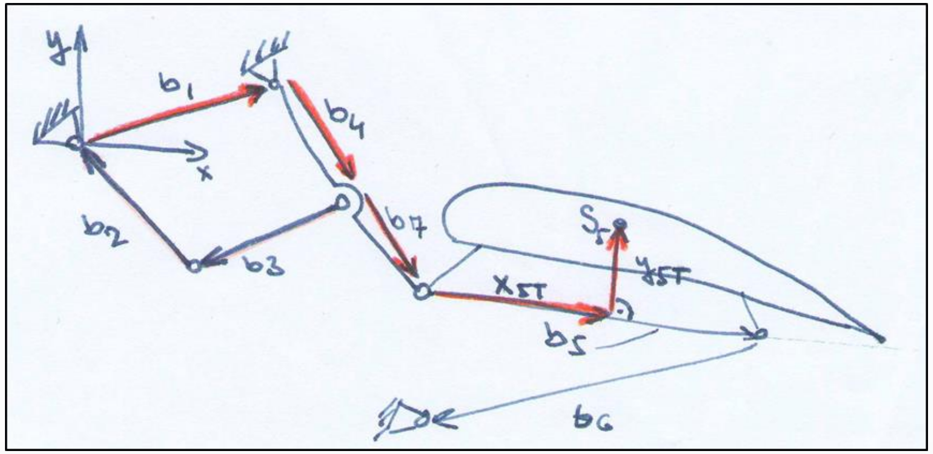
$$\mathbf{J_z} \cdot \dot{\mathbf{z}} + \mathbf{J_q} \cdot \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0}$$

Řešení zrychlení

$$\mathbf{J_z} \cdot \ddot{\mathbf{z}} + \mathbf{J_q} \cdot \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{j_{qz}} = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{j_{qz}} = \begin{bmatrix} -b_2 \cdot cos(\beta_2) \cdot \dot{\beta_2}^2 - b_3 \cdot cos(\beta_3) \cdot \dot{\beta_3}^2 - b_4 \cdot cos(\beta_4) \cdot \dot{\beta_4}^2 \\ -b_2 \cdot sin(\beta_2) \cdot \dot{\beta_2}^2 - b_3 \cdot sin(\beta_3) \cdot \dot{\beta_3}^2 - b_4 \cdot sin(\beta_4) \cdot \dot{\beta_4}^2 \\ \left(-b_4 \cdot cos(\beta_4) - b_7 \cdot cos(\beta_4)\right) \cdot \dot{\beta_4}^2 - b_5 \cdot cos(\beta_5) \cdot \dot{\beta_5}^2 - b_6 \cdot cos(\beta_6) \cdot \dot{\beta_6}^2 \\ \left(-b_4 \cdot sin(\beta_4) - b_7 \cdot sin(\beta_4)\right) \cdot \dot{\beta_4}^2 - b_5 \cdot sin(\beta_5) \cdot \dot{\beta_5}^2 - b_6 \cdot sin(\beta_6) \cdot \dot{\beta_6}^2 \end{bmatrix}$$

Řešení úlohy pohybu vybraného bodu



$$\mathbf{r_{S5}} = \mathbf{b}_1 + \mathbf{b}_4 + \mathbf{b}_7 + \mathbf{x_{5T}} + \mathbf{y_{5T}}$$

$$x_{S_5} = \ b_1 \cdot cos(\beta_1) + b_4\, cos(\beta_4) + b_7 \cdot cos(\beta_4) + x_{5T} \cdot cos(\beta_5) - y_{5T} \cdot sin(\beta_5)$$

$$y_{S_5} = b_1 \cdot sin(\beta_1) + b_4 \cdot sin(\beta_4) + b_7 \cdot sin(\beta_4) + x_{5T} \cdot sin(\beta_5) + y_{5T} \cdot cos(\beta_5)$$

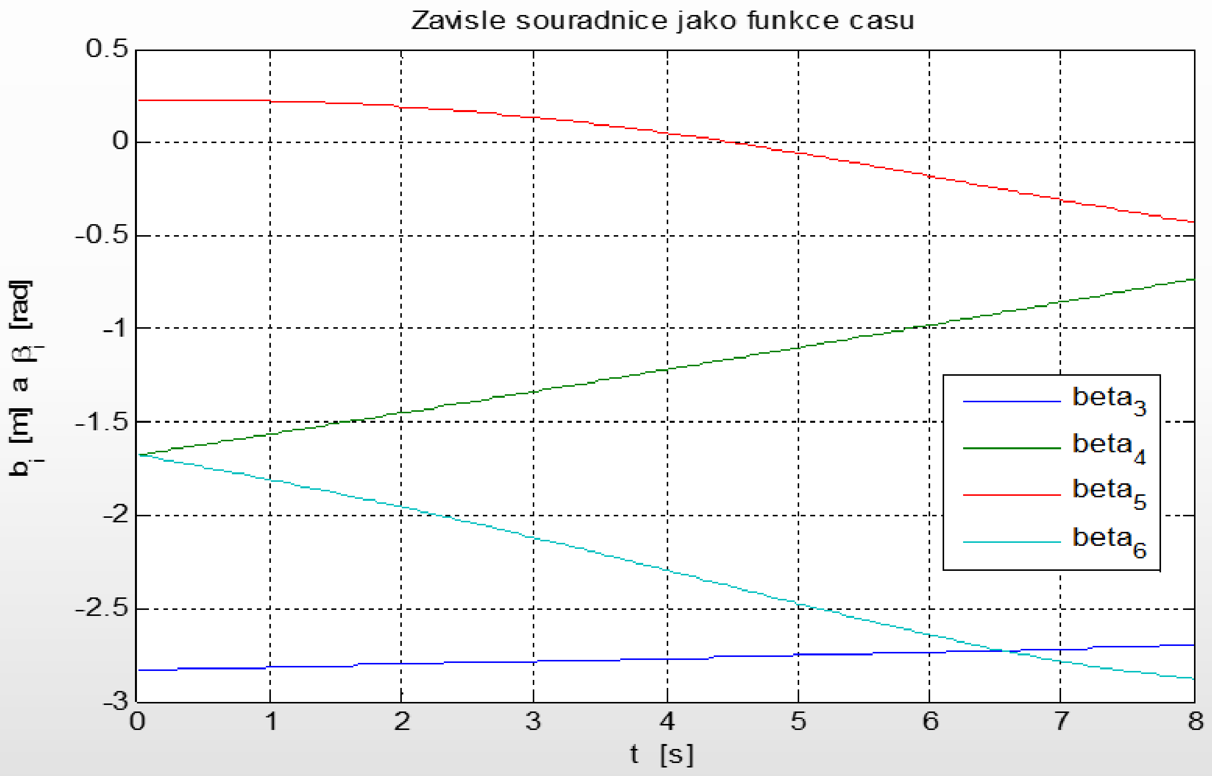
$$v_{S_5x} = -b_4 \cdot sin(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4 - b_7 \cdot sin(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4 - x_{5T} \cdot sin(\beta_5) \cdot \dot{\beta}_5 - y_{5T} \cdot cos(\beta_5) \cdot \dot{\beta}_5$$

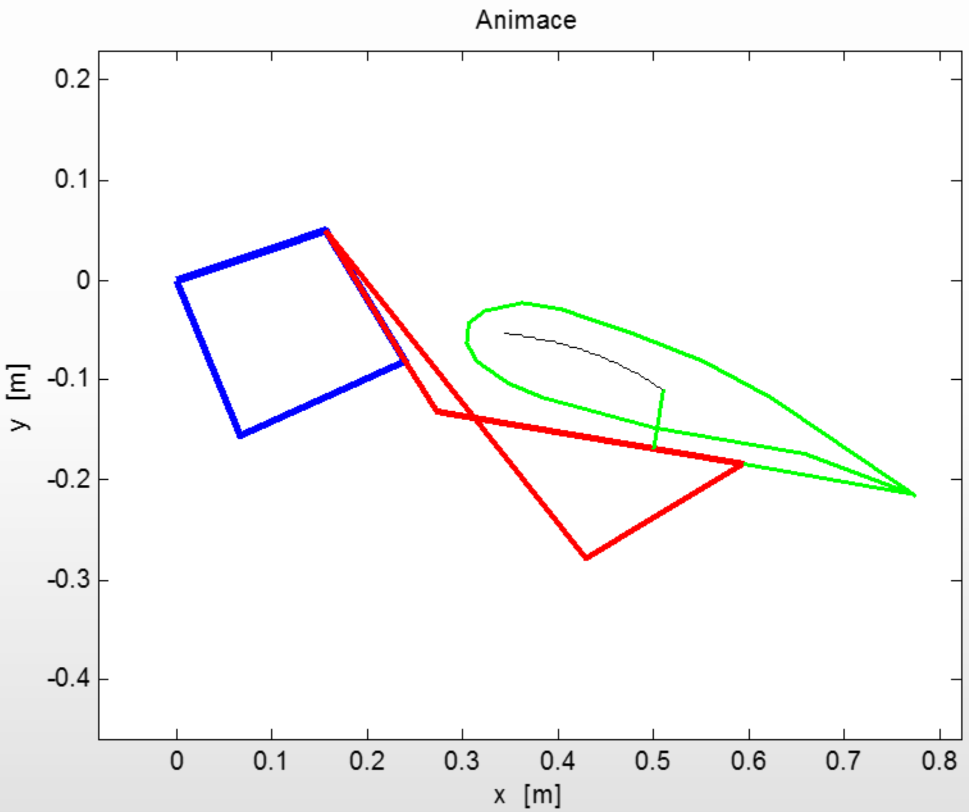
$$v_{S_5y} = +b_4 \cdot cos(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4 + b_7 \cdot cos(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4 + x_{5T} \cdot cos(\beta_5) \cdot \dot{\beta}_5 - y_{5T} \cdot sin(\beta_5) \cdot \dot{\beta}_5$$

$$a_{S_5x} = -b_4 \cdot cos(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4^{\,2} - b_4 \cdot sin(\beta_4) \cdot \ddot{\beta}_4 - b_7 \cdot cos(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4^{\,2} - b_7 \cdot \cdot sin(\beta_4) \cdot \ddot{\beta}_4 - x_{5T} \cdot cos(\beta_5) \cdot \dot{\beta}_5^{\,2} - x_{5T} \cdot sin(\beta_5) \cdot \ddot{\beta}_5 + y_{5T} \cdot sin(\beta_5) \cdot \dot{\beta}_5^{\,2} - y_{5T} \cdot cos(\beta_5) \cdot \ddot{\beta}_5$$

$$a_{S_5y} = -b_4 \cdot sin(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4^{\,2} + b_4 \cdot cos(\beta_4) \cdot \ddot{\beta}_4 - b_7 \cdot sin(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4^{\,2} + b_7 \cdot \cdot cos(\beta_4) \cdot \ddot{\beta}_4 - x_{5T} \cdot sin(\beta_5) \cdot \dot{\beta}_5^{\,2} + x_{5T} \cdot cos(\beta_5) \cdot \ddot{\beta}_5 - y_{5T} \cdot cos(\beta_5) \cdot \dot{\beta}_5^{\,2} - y_{5T} \cdot sin(\beta_5) \cdot \ddot{\beta}_5$$

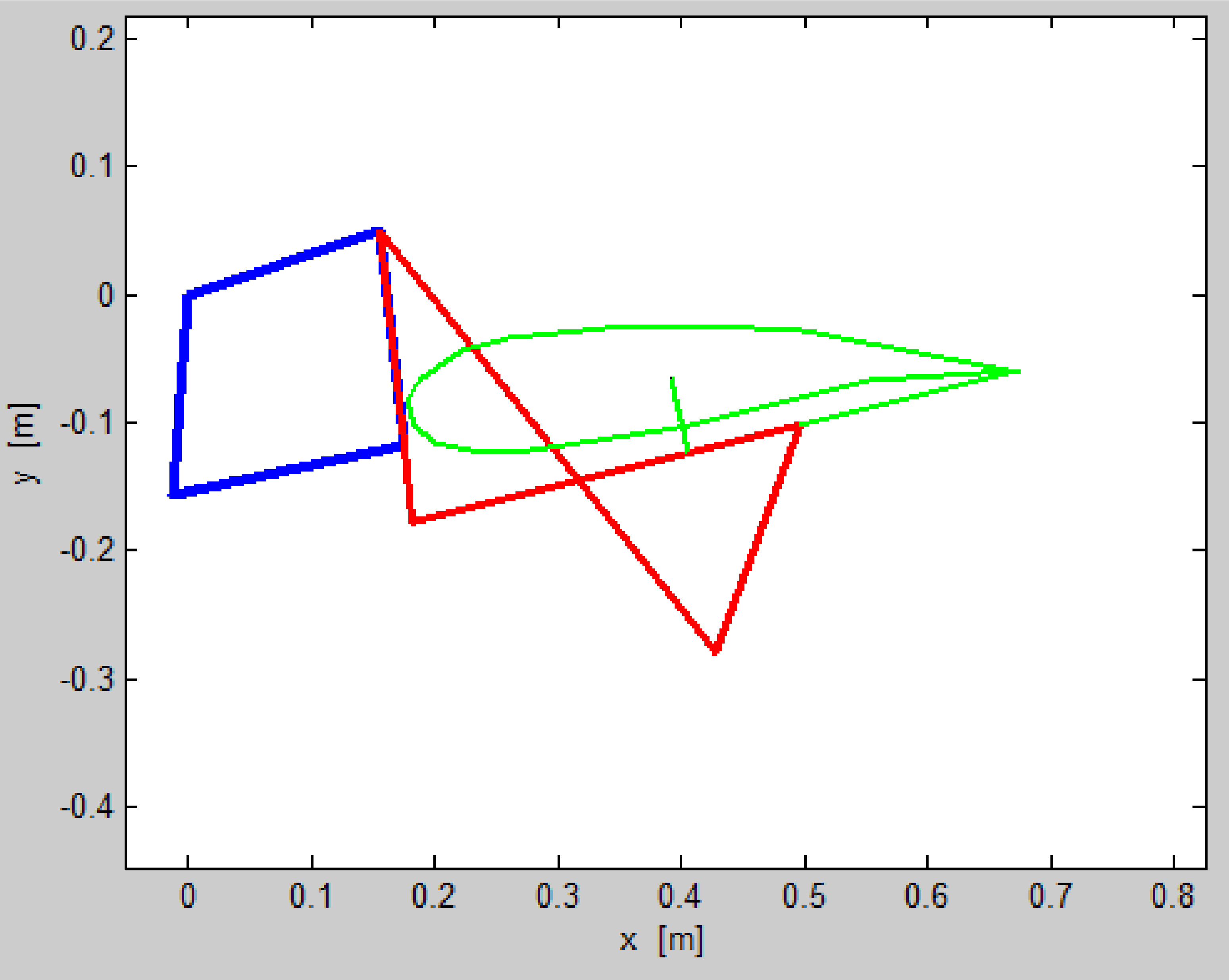
Výstupní grafy z program KRESIC





Vypočteno z rovnoměrného otáčivého pohybu tělesa 2 okolo bodu A

Animace pohybu mechanismu



Dynamický model Fowlerovy klapky – přímá úloha

Rovnice pro vypočet dynamické úlohy

Síla -> pohyb

$$\mathbf{Ma} = \mathbf{DR} + \mathbf{Q}$$

$$\mathbf{a} = \mathbf{V_z} \cdot \ddot{\mathbf{z}} + \mathbf{V_q} \cdot \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{a_{qz}}$$

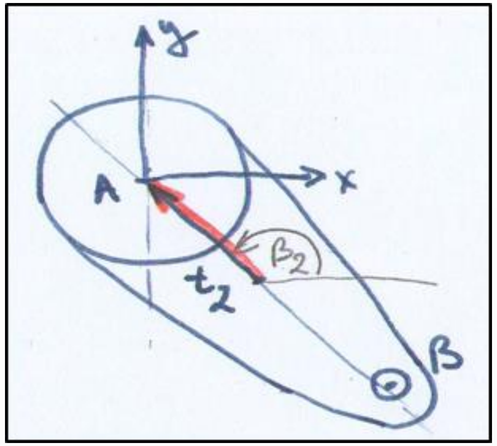
$$\mathbf{J_z} \cdot \ddot{\mathbf{z}} + \mathbf{J_q} \cdot \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{j_{qz}} = \mathbf{0}$$

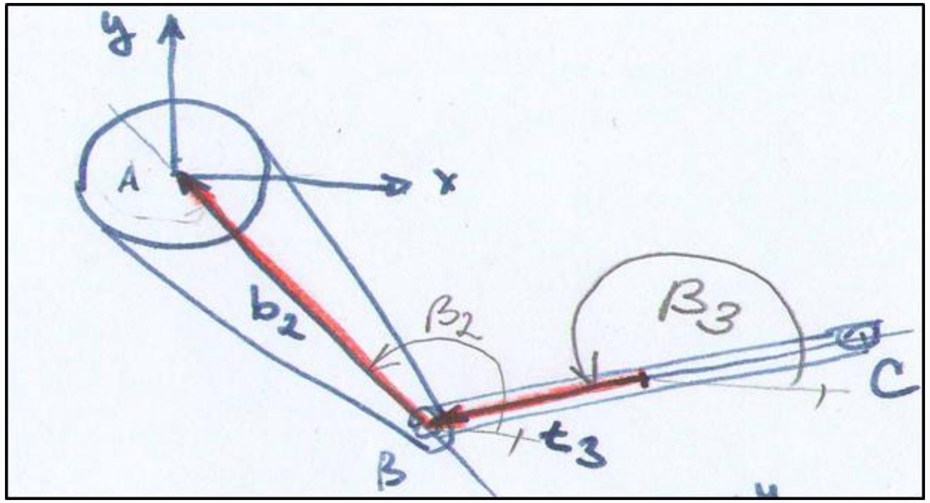
$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{M} & -\mathbf{D} & \mathbf{0_1} & \mathbf{0_2} \\ \mathbf{I} & \mathbf{0_3} & -\mathbf{V_z} & -\mathbf{V_q} \\ \mathbf{0_4} & \mathbf{0_5} & \mathbf{J_z} & \mathbf{J_q} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{a} \\ \mathbf{R} \\ \ddot{\mathbf{z}} \\ \ddot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q} \\ \mathbf{a_{qz}} \\ -\mathbf{j_{qz}} \end{bmatrix}$$

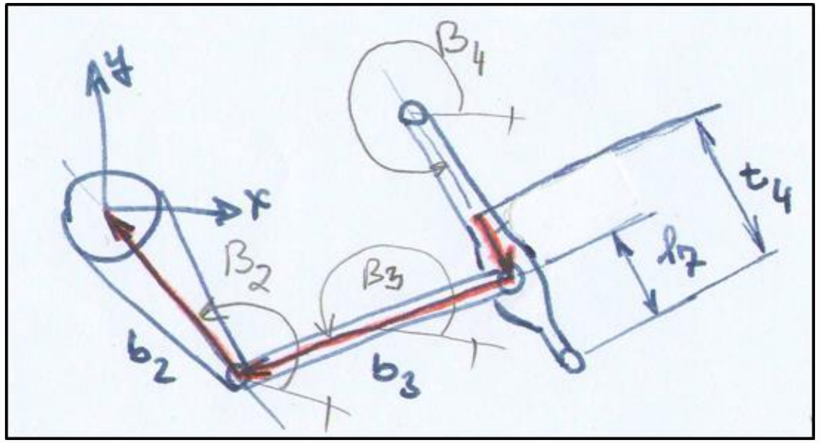
$$\mathbf{r_S} = \sum_{\mathbf{j}} \mathbf{b_j} + \mathbf{x_S} + \mathbf{y_S}$$

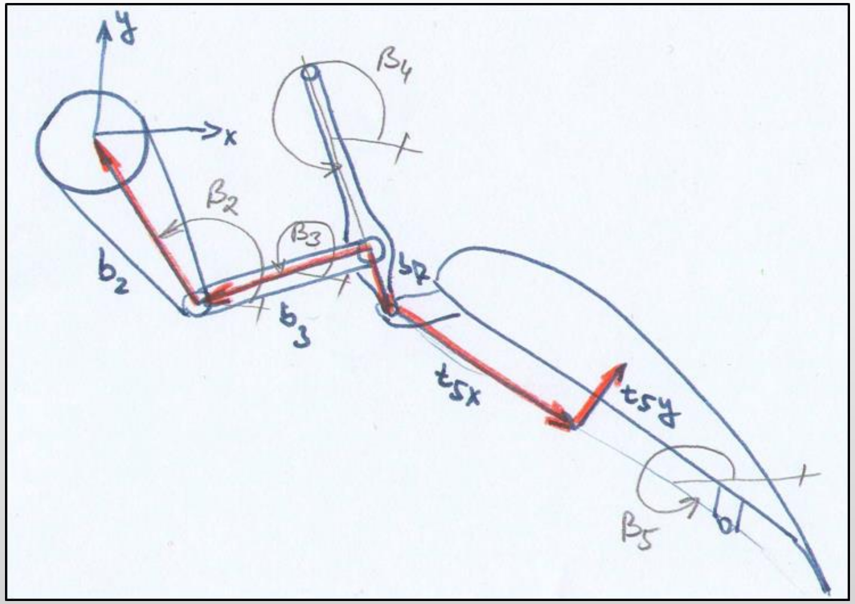
$$\mathbf{a_S} = \sum_{\mathbf{j}} \ddot{\mathbf{b}}_{\mathbf{j}} + \ddot{\mathbf{x}}_{\mathbf{S}} + \ddot{\mathbf{y}}_{\mathbf{S}}.$$

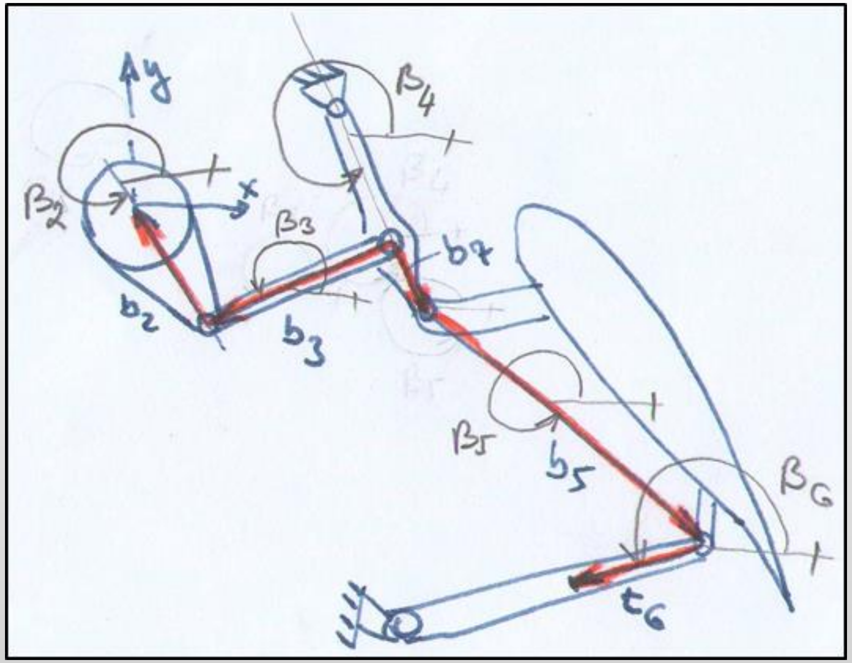
Schémata pro popis středů hmotnosti











Rovnice pro popis pohybu středu hmotnosti a úhlových veličin tělesa 6

$$x_{S_6} = -b_2 \cdot cos(\beta_2) - b_3 \cdot cos(\beta_3) + b_5 \cdot cos(\beta_5) + b_7 \cdot cos(\beta_4) + t_6 \cdot cos(\beta_6)$$

$$y_{S_6} = -b_2 \cdot sin(\beta_2) - b_3 \cdot sin(\beta_3) + b_5 \cdot sin(\beta_5) + b_7 \cdot sin(\beta_4) + t_6 \cdot sin(\beta_6)$$

$$\alpha_6 = \beta_6$$

$$v_{S_6x} = +b_2 \cdot sin(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2 + b_3 \cdot sin(\beta_3) \cdot \dot{\beta}_3 - b_5 \cdot sin(\beta_5) \cdot \dot{\beta}_5 - b_7 \cdot sin(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4 - t_6 \cdot sin(\beta_6) \cdot \dot{\beta}_6$$

$$v_{S_6y} = -b_2 \cdot cos(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2 - b_3 \cdot cos(\beta_3) \cdot \dot{\beta}_3 + b_5 \cdot cos(\beta_5) \cdot \dot{\beta}_5 + b_7 \cdot cos(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4 + t_6 \cdot cos(\beta_6) \cdot \dot{\beta}_6$$

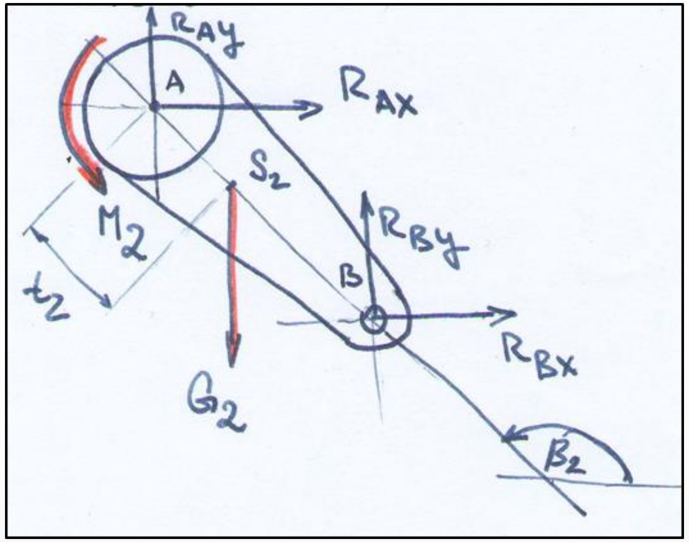
$$\dot{\alpha}_6 = \dot{\beta}_6$$

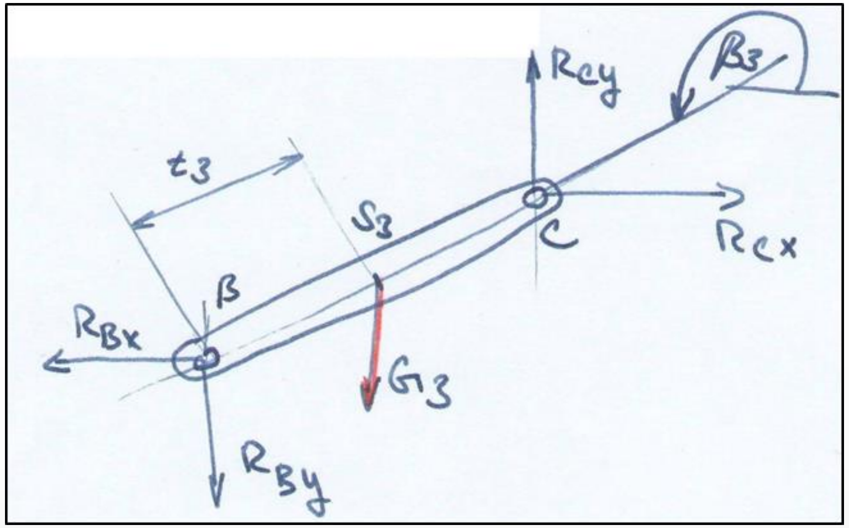
$$a_{S_6x} = +b_2 \cdot cos(\beta_2) \cdot \dot{\beta_2}^2 + b_2 \cdot sin(\beta_2) \cdot \ddot{\beta}_2 + b_3 \cdot cos(\beta_3) \cdot \dot{\beta_3}^2 + b_3 \cdot sin(\beta_3) \cdot \ddot{\beta}_3 - b_5 \cdot cos(\beta_5) \cdot \dot{\beta_5}^2 - b_5 \cdot sin(\beta_5) \cdot \ddot{\beta}_5 - b_7 \cdot cos(\beta_4) \cdot \dot{\beta_4}^2 - b_7 \cdot sin(\beta_4) \cdot \ddot{\beta}_4 - t_6 \cdot cos(\beta_6) \cdot \dot{\beta_6}^2 - t_6 \cdot sin(\beta_6) \cdot \ddot{\beta}_6$$

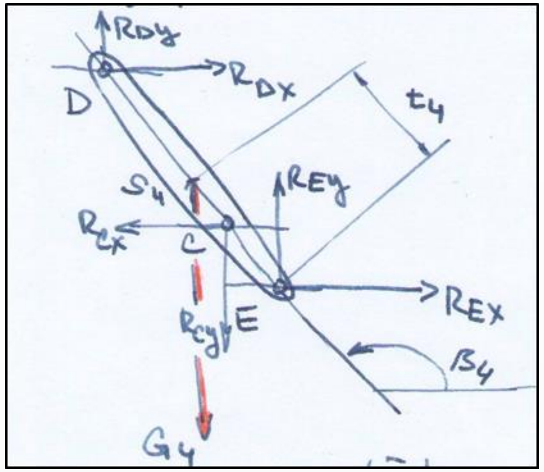
$$a_{S_6y} = +b_2 \cdot sin(\beta_2) \cdot \dot{\beta_2}^2 - b_2 \cdot cos(\beta_2) \cdot \ddot{\beta}_2 + b_3 \cdot sin(\beta_3) \cdot \dot{\beta_3}^2 - b_3 \cdot cos(\beta_3) \cdot \ddot{\beta}_3 - b_5 \cdot sin(\beta_5) \cdot \dot{\beta_5}^2 + b_5 \cdot cos(\beta_5) \cdot \ddot{\beta}_5 - b_7 \cdot sin(\beta_4) \cdot \dot{\beta_4}^2 + b_7 \cdot cos(\beta_4) \cdot \ddot{\beta}_4 - t_6 \cdot sin(\beta_6) \cdot \dot{\beta_6}^2 + t_6 \cdot cos(\beta_6) \cdot \ddot{\beta}_6$$

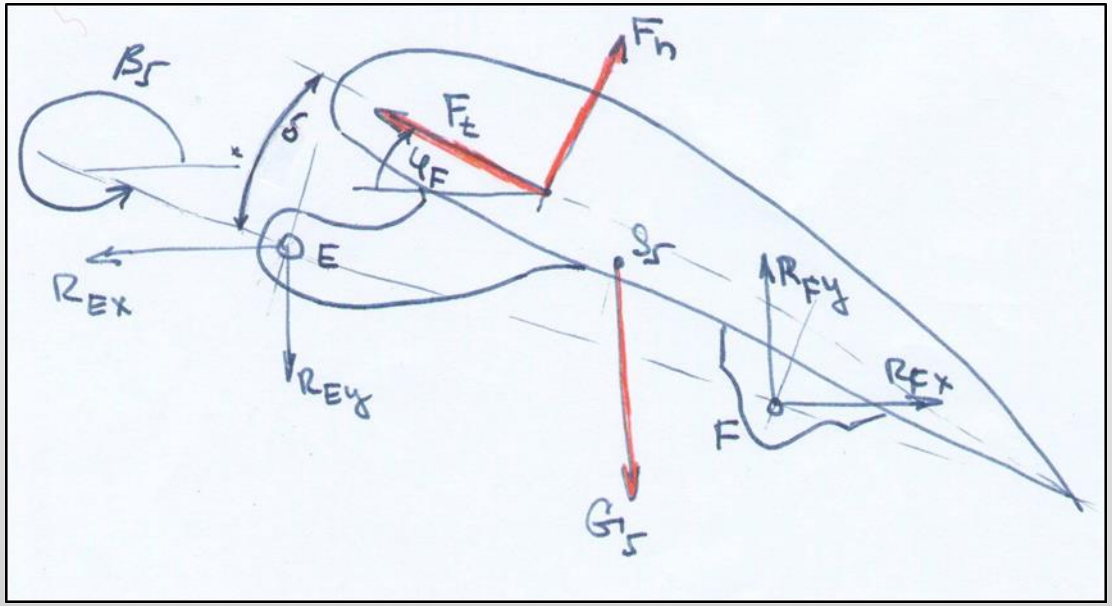
$$\ddot{\alpha}_6 = \ddot{\beta}_6$$

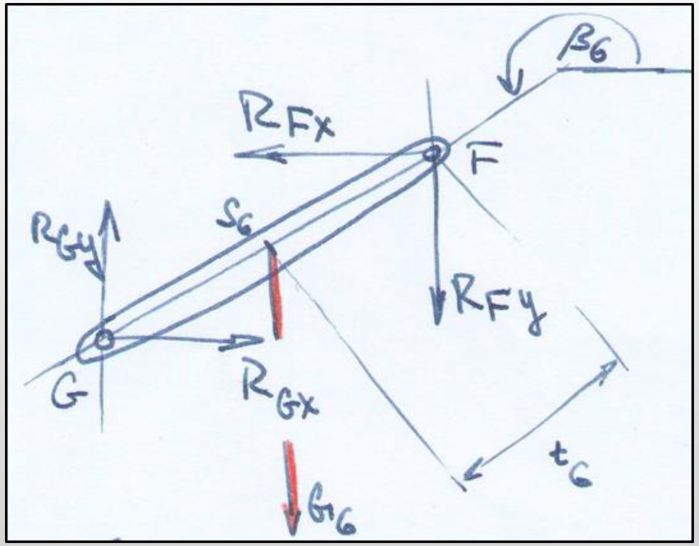
Schémata uvolněných těles pro sestavení Newton-Eulerových rovnic



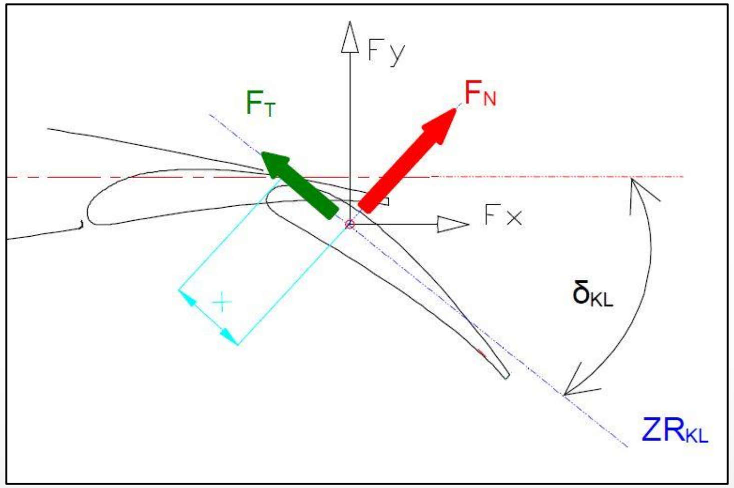


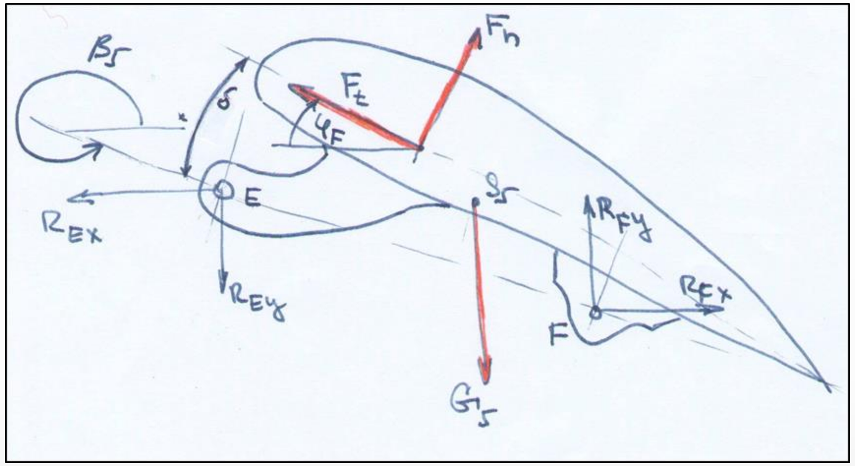






Uvolněním těles a sestavením Newton-Eulerových rovnic – příklad na tělese 5



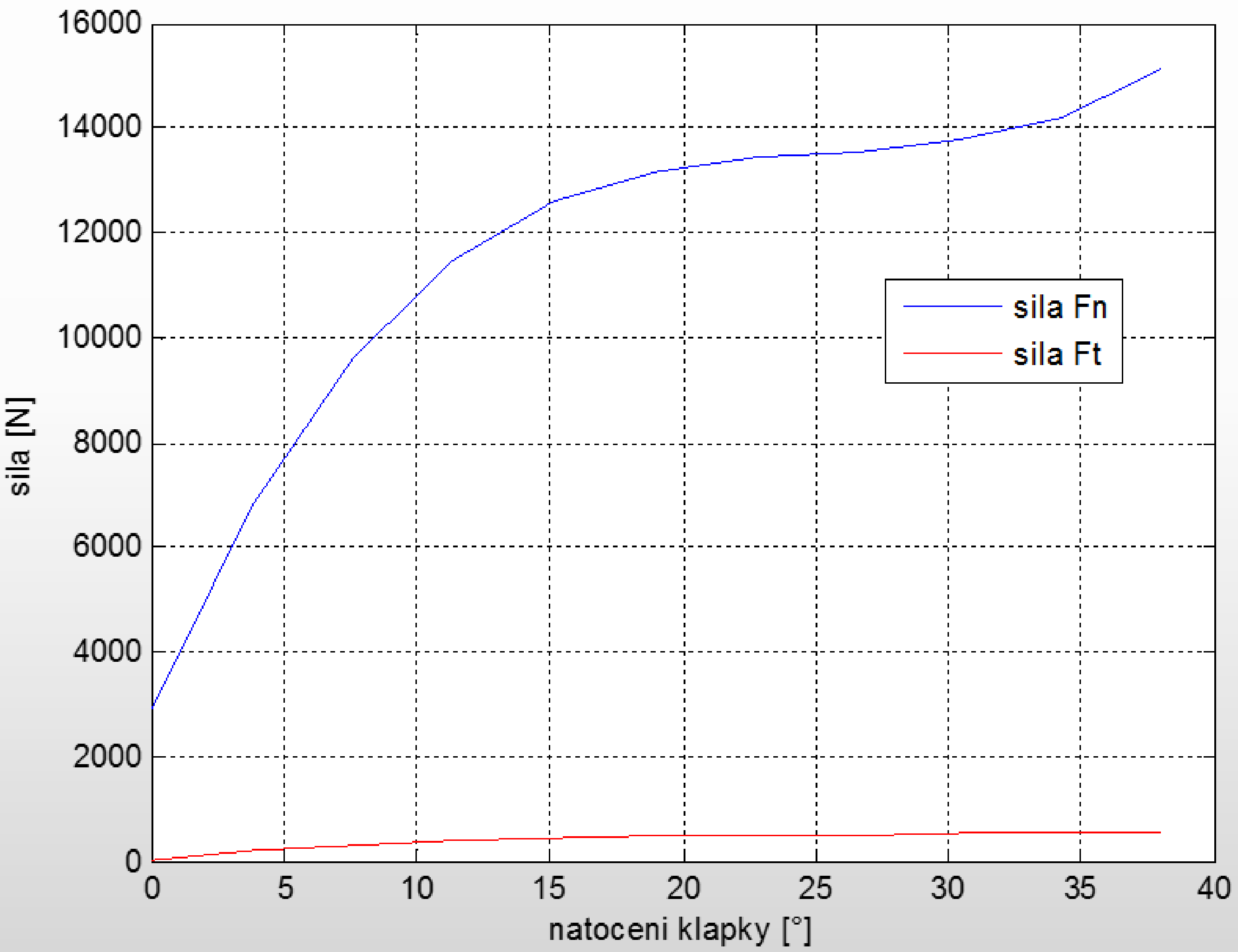


$$m_5 a_{5x} = -R_{Ex} + R_{Fx} - F_t \cdot cos\ (\varphi_F) + F_n \cdot sin(\varphi_F)$$

$$m_5 a_{5y} = -R_{Ey} + R_{Fy} + F_t \cdot sin\ (\varphi_F) + F_n \cdot cos\ (\varphi_F) - m_5 \cdot g$$

$$I_{5S5}\alpha_5$$
$$= -R_{Ex} \cdot t_{5x} \cdot sin(\beta_5) + R_{Ey} \cdot t_{5x} \cdot cos(\beta_5) - R_{Ex} \cdot t_{5y} \cdot cos(\beta_5) - R_{Ey} \cdot t_{5y} \cdot sin(\beta_5) - R_{Fx} \cdot (l_5 - t_{5x}) \cdot$$
$$\cdot sin(\beta_5) + R_{Fy} \cdot (l_5 - t_{5x}) \cdot cos(\beta_5) + R_{Fx} \cdot t_{5y} \cdot cos(\beta_5) + R_{Fy} \cdot t_{5y} \cdot sin(\beta_5) + (F_t \cdot cos\ (\delta) - F_n \cdot sin(\delta)) \cdot (y_F$$
$$- t_{5y}) - (F_t \cdot sin\ (\delta) + F_n \cdot cos\ (\delta)) \cdot (t_{5x} - x_F)$$

Průběh aerodynamických sil ve složkách



Dynamický model Fowlerovy klapky pro inverzní úlohu

$$\mathbf{J_z} \cdot \mathbf{\ddot{z}} + \mathbf{J_q} \cdot \mathbf{\ddot{q}} = -\mathbf{j_{qz}}$$

Pohyb -> síla

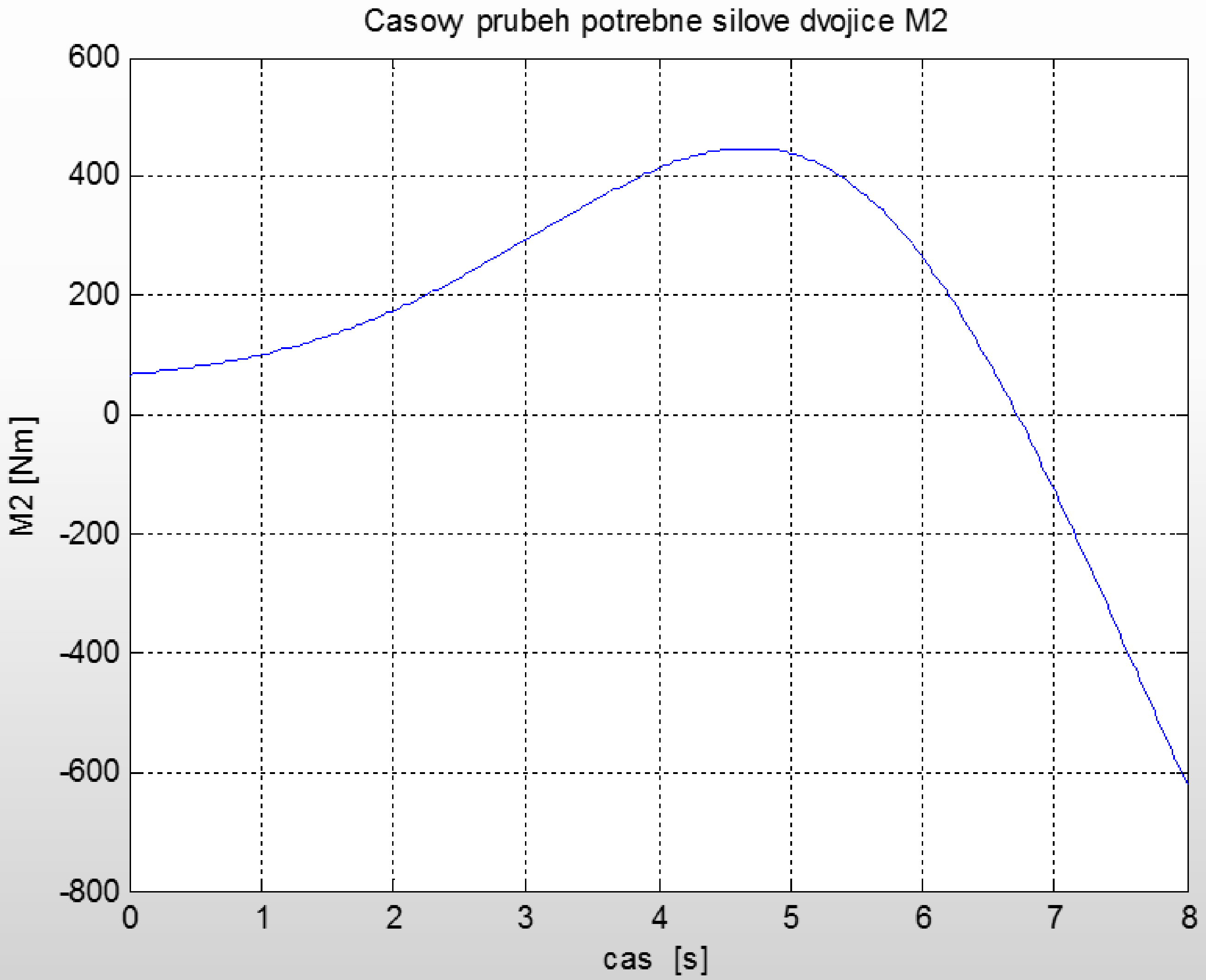
$$\mathbf{Ia} - \mathbf{V_z} \cdot \mathbf{\ddot{z}} - \mathbf{V_q} \cdot \mathbf{\ddot{q}} = \mathbf{a_{qz}}$$

$$\mathbf{Ma} - \mathbf{DR} - \mathbf{kM}_2 = \mathbf{Q}$$

$$\mathbf{\ddot{q}} = 0$$

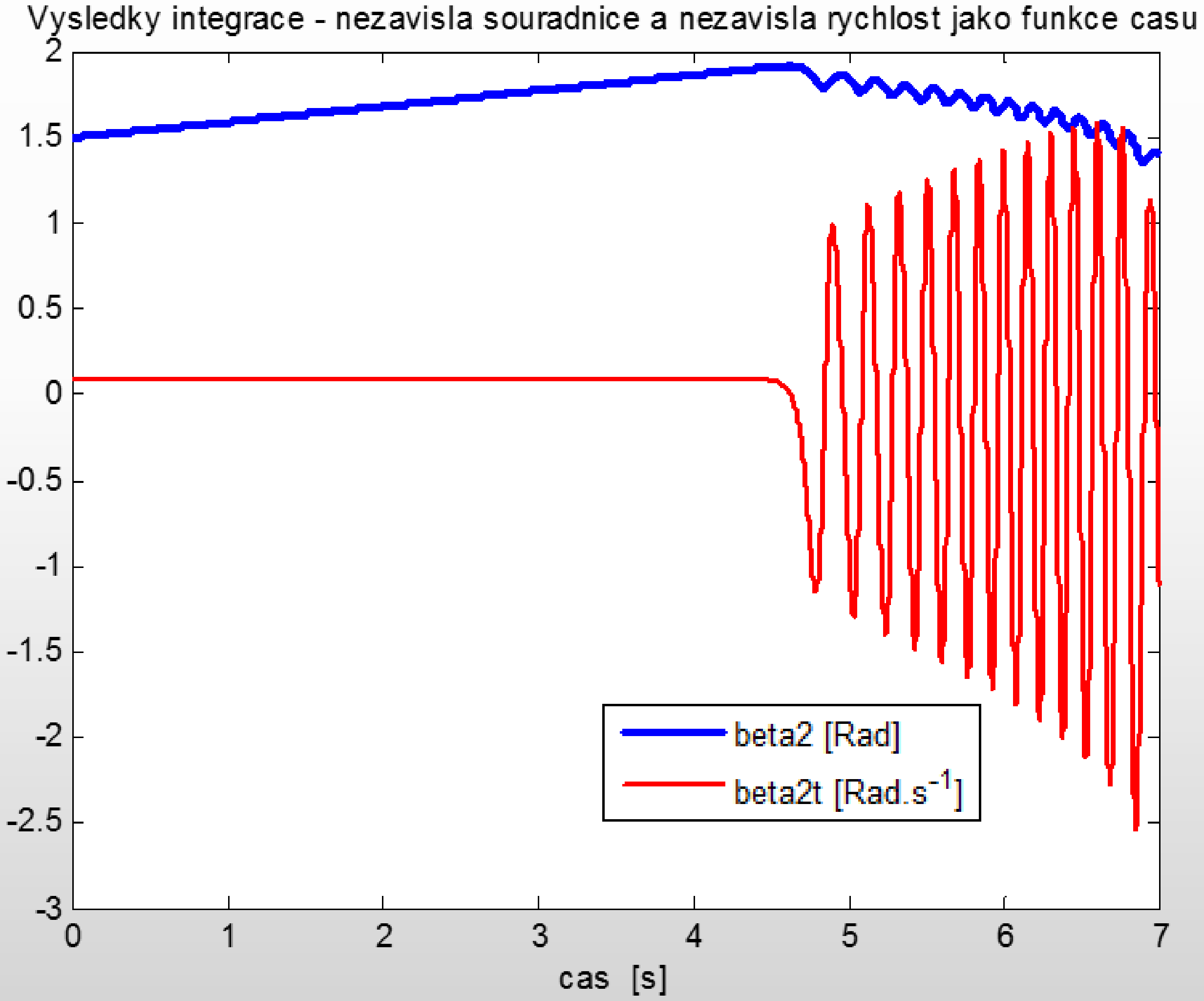
$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{M} & -\mathbf{D} & -\mathbf{k} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\mathbf{V_z} & -\mathbf{V_q} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{J_z} & \mathbf{J_q} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{a} \\ \mathbf{R} \\ \mathbf{M}_2 \\ \mathbf{\ddot{z}} \\ \mathbf{\ddot{q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q} \\ \mathbf{a_{qz}} \\ -\mathbf{j_{qz}} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Průběh výsledné silové dvojice vypočtené z inverzní dynamické úlohy



Základní parametr pohonu je kroutící moment potřebný pro vysunutí klapky. Pro náš případ musí být krouticí moment alespoň $1000Nm$.

Spojení přímé a nepřímé dynamické úlohy pro ověření hnací silové dvojice



Pro stabilní pohyb je třeba zpětnovazební řízení

Závěr

Postupně byly splněny všechny cíle bakalářské práce

1. Vypracoval jsem rešerši různých konstrukčních řešení vztlakové klapky křídla
2. Seznámil jsem se s metodami řešení kinematiky a dynamiky mechanismů
3. Sestavil jsem matematický model pro Fowlerův mechanismus
4. S pomocí programů KRESIC a DRESIC jsem vyřešil pohyb mechanismu a navrhnul parametry pohonu

Děkuji Vám za pozornost