

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV MECHANIKY, BIOMECHANIKY A MECHATRONIKY



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Kinematické a dynamické řešení vztlakové klapky křídla

Praha 2015

Michael Valášek

ZADANI

ABSTRAKT

Cílem této práce je na zadaném mechanismu vztlakové klapky vyřešit jeho kinematické a dynamické chování se zaměřením na výpočet potřebných hnacích sil. K dosažení předem stanoveného pohybu je nutné řešit inverzní dynamickou úlohu. Celé řešení je provedeno v programu MATLAB a využívá již existujících programů KRESIC a DRESIC, které byly vytvořeny na FS ČVUT v Praze. DRESIC řeší pouze přímou dynamickou úlohu. Inverzní dynamická úloha proto tedy musela být naprogramována autorem.

A KLÍČOVÁ SLOVA

Klapka křídla, Fowlerův mechanismus, rovinný mechanismus, kinematika, vektorová metoda, dynamika, metoda uvolňování, inverzní dynamika

ABSTRACT

The aim of this work is to solve kinematic and dynamic behaviors of given planar wing flap mechanism. Special focus was devoted to the calculation of the required input forces. To achieve these results it is necessary to solve inverse dynamic problem. Entire solution is made in MATLAB and uses existing functions KRESIC and DRESIC which have been developed at FME CTU in Prague. The function DRESIC has to be modified to solve inverse dynamic problem.

KEY WORDS

Wing flap, Fowler mechanism, planar mechanism, kinematics, vector method, dynamics, free body diagram, inverse dynamics.

Na tomto místě bych rád moc poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Václavu Baumovi, CSc. za velké množství času, trpělivost a osobní přístup, které mi vždy ukázaly cestu, kterou jsem mohl dále směřovat. Rád bych poděkoval panu Ing. Žateckému z firmy EVEKTOR s.r.o. za cenné poznatky o funkci vztlakové klapky křídla.

Také chci poděkovat svým rodičům za nesmírnou trpělivost a pomoc během studia, bez kterých bych jej asi jen těžko zvládnul.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma Kinematické a dynamické řešení vztlakové klapky křídla vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Václava Bauma, CSc. a podklady použité k této práci jsou uvedeny v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

Michael Valášek

.....

.....

Obsah

1. Úvod	6
2. Přehled mechanismů vztlakových klapek.....	7
3. Základní model klapky	13
4. Kinematický model Fowlerovy klapky	14
Vektorová metoda.....	15
Řešení soustavy nelineárních rovnic.....	18
Popis pohybu bodů pevně spojených s tělesy a natočení těles	20
Výstupní grafy z program KRESIC	21
5. Dynamický model Fowlerovy klapky pro přímou úlohu	24
6. Dynamický model Fowlerovy klapky pro inverzní úlohu.....	39
7. Spojení přímé a nepřímé dynamické metody pro ověření hnacího momentu	41
8. Závěr	46
9. Literatura	47
10. Příloha.....	48

1. Úvod

V dnešním světě se setkáváme s různými mechanismy, které slouží přímo v průmyslu nebo ve spotřebních zařízeních. Počínaje obyčejnými mechanismy v kuchyni, přes klikové mechanismy ve spalovacích motorech a paralelními obráběcími stroji ve výrobních závodech konče.

Jedním druhem jsou také mechanismy měnící aerodynamické charakteristiky křídla letadla, na něž jsou kladeny vysoké požadavky na spolehlivost, nízkou hmotnost a kompaktnost.

Jako u každého jiného mechanismu je třeba analyzovat kinematické a dynamické vlastnosti z hlediska požadavků na základní funkci mechanismu a tyto vlastnosti jsou pak základem pro následné dimenzování.

V dnešní době, kdy se hledí především na efektivitu a spotřebu energie strojů, se výrobci letadel snaží co nejvíce snížit jejich aerodynamický odpor, který jinak zvyšuje spotřebu paliva a také snižuje maximální možnou rychlost letu. Řešením je zmenšení velikosti křídla. To však vytváří problém v nižších rychlostech, kdy naopak je třeba dostatečný vztlak pro udržení letadla ve vzduchu. Tento problém byl vyřešen takzvanou vztlakovou klapkou.

Vztlaková klapka, je část odtokové hrany křídla, která se může vysouvat do různých předem určených poloh. Tím může měnit částečně profil křídla a jeho vztlakové charakteristiky.

Vztlakových klapek se využívá většinou při vzletu a přistání letadla. V těchto případech se stroj nachází v oblasti nižších rychlostí, než by byly možné pro udržení letounu ve vzduchu se standardní konfigurací jako při cestovní rychlosti. Proto se vztlaková klapka vysune a umožní zvýšení vztlaku. Při přistání se navíc klapka vysune ještě více z křídla než při startu. Tím je letadlo částečně brzděno a zkrátí se tak dráha potřebná pro přistání.

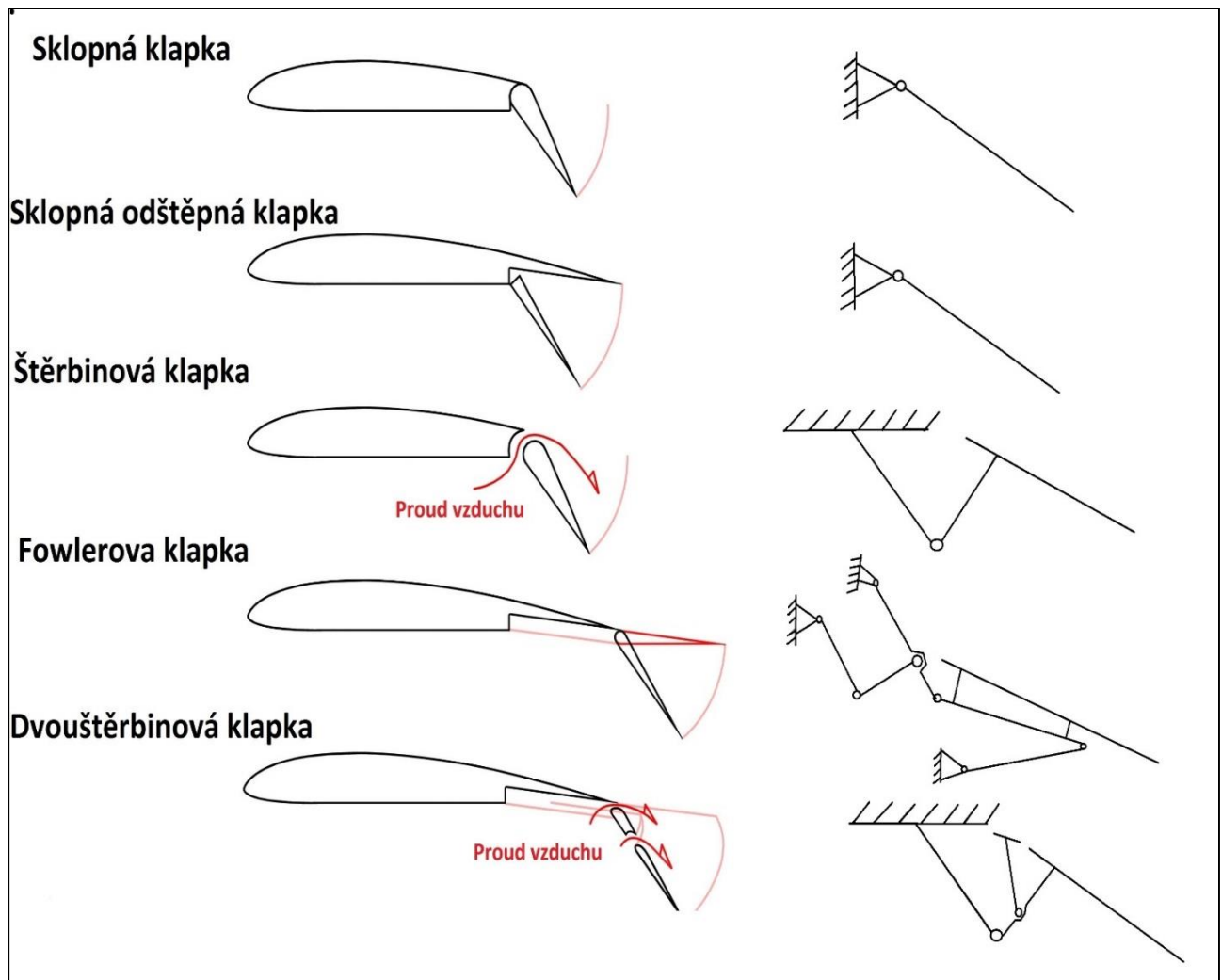
Cíle této práce je tedy shrnout přehled možných řešení mechanismů vztlakových klapek, pro vybraný mechanismus provést kinematické a dynamické řešení a navrhnout parametry příslušného pohonu.

2. Přehled mechanismů vztlakových klapek

V současné době se vyskytuje více druhů klapek, které více či méně splňují potřebné požadavky. Velmi důležité je také, o jaké letadlo se jedná. Větší stroje si mohou dovolit i složitější mechanismy klapek, které jsou většinou těžší a hůře se montují do křídla. Důležitým faktorem je také bezpečnost a životnost daného mechanismu.

Na obr. 1 je přehled základních druhů vztlakových klapek na odtokové hraně křídla. Jde o běžnější aerodynamický prvek, než jsou například sloty na náběžné hraně.

Mechanismy jsou schematicky vyobrazeny vedle obrázků profilů.



Obr. 1

Sklopná klapka

Tato klapka zvyšuje vztlakové charakteristiky sklopením odtokové části křídla, čímž dojde k prohnutí profilu. Jde o velmi jednoduché řešení, které používá pouze pantový mechanismus. Problém zde nastává při natočení klapky o větší úhel. Při tom se proudnice od klapky v místě závěsu odtrhnou a začíná se zvyšovat aerodynamický odpor. Tato klapka se v dnešní době již moc nepoužívá a je typická především pro letadla z druhé světové války. Příklad je vidět na obr. 2 s vyobrazeným křídlem letadla P 51 D Mustang [4].



Obr. 2

Sklopná odštěpná klapka

Jde o zvláštní modifikaci sklopné klapky, kdy je sklopná pouze spodní část odtokové hrany křídla. Pro ovládání je možno použít jednoduché mechanismy na principu torzního hřídele. K nebezpečné situaci u této klapky může dojít při přistání, kdy při větších úhlech sklonu, vzniká značný aerodynamický odpor a letadlo je brzděno. Zvláštní modifikací je klapka Zappova, která se vyklápí směrem ven z křídla.

Na obr. 3 je vidět odtoková část křídla stíhacího letadla Supermarine Spitfire právě s klapkou Zappovou [5].



Obr. 3

Štěrbínová klapka

Mezi touto klapkou a křídlem se při jejím otevření vytvoří mezera, která umožní zlepšení obtékání okolo klapky. To snižuje aerodynamický odpor, neboť nedochází k odtržení mezní vrstvy na vrchní straně klapky. Ve výsledku je možno tuto klapku použít při větších úhlech sklopení a dosáhnout většího vztlaku, aniž by byl negativně ovlivněn aerodynamický odpor letadla. Takto se chová i Fowlerova klapka při plném otevření. Oproti Fowlerově klapce jde o jednodušší řešení a je proto velmi časté na menších letadlech jako je Cessna 550B na obr. 4 [6].



Obr. 4

Fowlerova klapka

Tento druh výsuvné klapky je odvozený od Fowlerova pohybu. V první fázi pohybu se klapka posouvá směrem ven z křídla a mírně se sklápí. Ve druhé fázi se klapka už jen prakticky sklápí a výsuvný pohyb je nepatrný. První fáze se používá pro vzlet, kdy dochází k zakřivení profilu a zvětšení plochy, tudíž zvětšení vztlačových charakteristik. Výhodou je, že se při tomto pohybu téměř nezvětšuje aerodynamický odpor, který je při vzletu nevyhovující. Při přistání, kdy se klapka dostane do druhé fáze, se i při zvětšení vztlaku zvětší i aerodynamický odpor. To příznivě letadlo brzdí a pomáhá tak zkrátit přiblížovací vzdálenost pro přistání. Mechanismem této klapky se budeme dále zabývat v této práci.

Mechanismus bývá většinou kolejnicový, což je kompromis mezi konstrukcí a aerodynamickými požadavky. Velmi dobře je vidět na obr. 5 včetně kolejnicového mechanismu letadla Skyleader SL 600 [7].



Obr. 5

Klapka dvou šterbinová

Posledním typem je dvou šterbinová klapka. Dvě a i více šterbin napomáhá obnovení mezní vrstvy nad klapkou. Proto lze tuto klapku ještě více vyklopit. Neboť je klapka značně složitá, před-klapka bývá pevně spojena s hlavní částí klapky, i když jejich vzájemná pozice nemusí vytvořit optimální mezeru. Pro vzlet proto bývá klapka vysunuta tak, že se nevytvoří žádná šterbina.

Tento druh klapky bývá většinou poměrně složitý a těžký, proto se u menších letadel vůbec nevyskytuje. Na obr. 6 je příklad klapky letadla Boeing 777 [8].

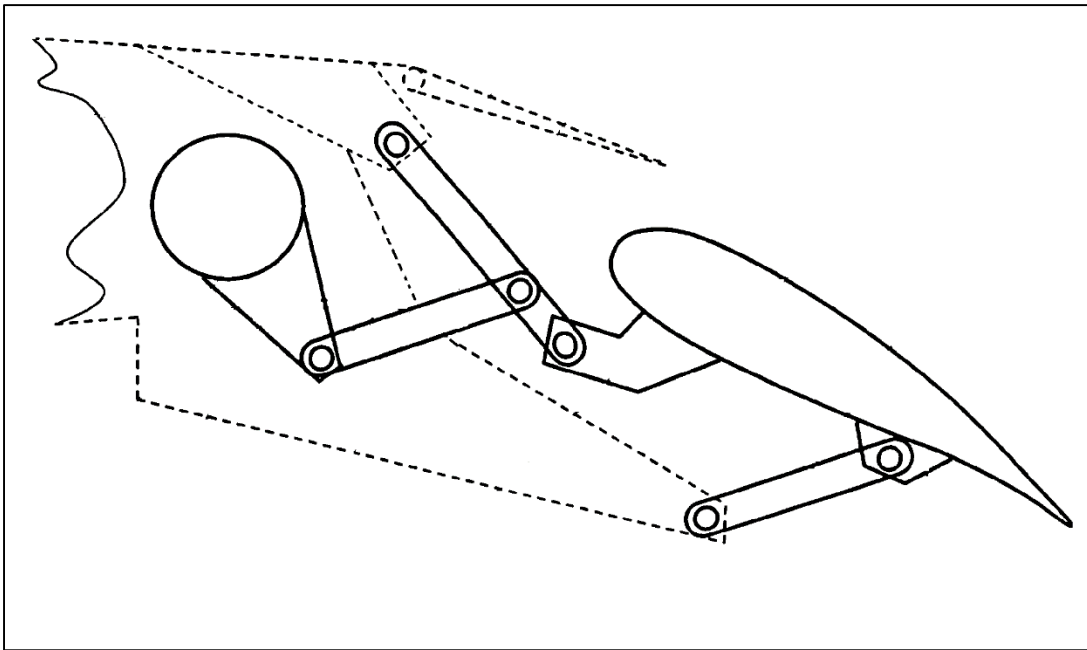


Obr. 6

3. Základní model klapky

Tato práce se bude zabývat řešením kinematického a dynamického modelu Fowlerovy vztlakové klapky. Fowlerova vztlaková klapka může být konstruována různými způsoby. Příkladem by mohl být kolejnicový nebo kloubový mechanismus. Pro náš případ jsme vybrali mechanismus kloubový, který je elegantnějším konstrukčním řešením.

Tento mechanismus jsme našli v patentové databázi, kde byl registrován pod číslem *US8844878B2* a *EP2178748B1* [2]. Tento mechanismus je brán jako etalon pro kinematický model. Dynamický model je ještě doplněn o data získaná ve firmě EVEKTOR a 3D model z programu Autodesk Inventor 2013. Jde především o hmotnost klapky a aerodynamickou sílu na klapku při přistání. Podrobná data zde neuvádím, ale jsou v příloze v souborech programu MATLAB. Jednoduché schéma patentu je vidět na obr. 7, kde je čerchovaně vyobrazen rám (křídlo) a plnou čarou samotný mechanismu včetně klapky [2].



Obr. 7

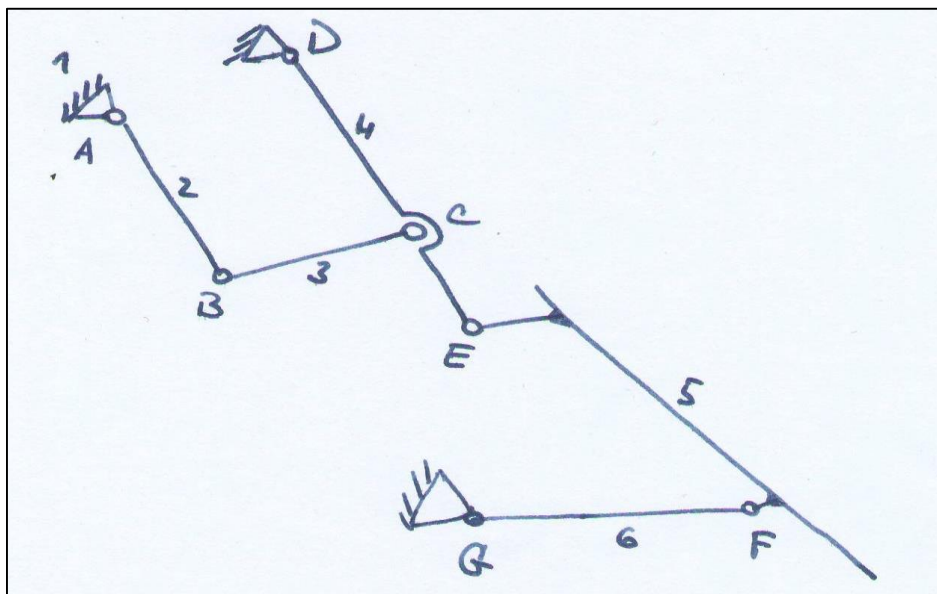
4. Kinematický model Fowlerovy klapky

Kinematika je oblast mechaniky, která se zabývá kinematickými veličinami, jako jsou poloha, rychlost a zrychlení, které se řeší většinou v závislosti na čase. Neberou se v úvahu vnější ani reakční síly, hmotnosti a momenty setrvačnosti.

Kinematika nám popisuje polohu tělesa, případně bodu, pomocí minimálního počtu rozměrů k tomu potřebných a dalších parametrů, které určují například závislost na čase.

Na začátku je třeba reálný mechanismus převést na kinematický model, což je jednoduché schéma, kde každá úsečka symbolizuje daný člen a kde v našem případě čep je vyobrazen jako rotační kloub. Všechny členy jsou očíslovány a to včetně rámu, na kterém je mechanismus uchycený. Důležité body jsou označeny velkými písmeny. Mezi členy jsou jasně vidět spojovací vazby. Pro náš případ je jednoduché schéma Fowlerovy klapky vidět na obr. 8.

Předpoklad je, že členy se chovají jako dokonale tuhá tělesa a vazby jsou ideální. V této úloze se řešení omezilo na rovinný mechanismus.



Obr. 8

Pro řešení kinematického modelu nejdříve musíme spočítat počet stupňů volnosti. To je důležité pro jednoznačné určení pohybu mechanismu. Počet stupňů volnosti pro rovinný mechanismus se určí podle vztahu

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

kde n je počet stupňů volnosti, u je počet těles mechanismu včetně rámu, w_j je počet vazeb j -té třídy a j je počet odebraných stupňů volnosti danou vazbou [3].

V našem případě je mechanismus složen čistě z vazeb rotačních, která každá odebírá dva stupně volnosti. Celkový počet stupňů volnosti je potom

$$n = 3 \cdot (6 - 1) - 7 \cdot 2 = 1^\circ \quad (2)$$

Tedy pro náš mechanismus má soustava jeden stupeň volnosti. Pokud za nezávislou souřadnici zvolíme úhel natočení členu 2, β_2 , bude jednoznačně určen pohyb ostatních členů.

Pokud chceme řešit kinematiku mechanismu, je třeba nejdříve zvolit právě tolik nezávislých souřadnic, kolik je stupňů volnosti. V našem případě volíme jako nezávislou (značíme q) souřadnici natočení členu 2, který je přímo napojený na hnací aktuátor. Zde známe jeho pohyb v závislosti na čase. Člen 2 může pouze rotovat okolo závěsu (bod A) na křídle, tedy jeho nezávislou souřadnicí je úhel natočení vůči rámu (křídlo). Všechny ostatní souřadnice, které nejsou nezávislé anebo nejsou konstantní, jsou souřadnicemi závislými (značíme z).

Vektorová metoda

Tato metoda se používá pro řešení mechanismů, kde je trigonometrická metoda již příliš složitá. Tato metoda nám také zjednoduší následné výpočty rychlosti a zrychlení, které se většinou taktéž počítají společně s polohou. Celý proces jde následně algoritmizovat, což výsledné výpočty ještě urychlí.

Jde však o řešení nelineárních rovnic, které nemá analytické řešení, proto musíme použít určité numerické metody [1]. Zde je vhodné užití modifikované metody Newtonovy iterační [1, 9].

Výsledkem je diskrétní funkce pro každou závislou vypočtenou z nezávislé souřadnice.

Než začne samotný výpočet, musíme spočítat počet smyček. Ten je určen rovnicí

$$l = d + m - u + 1, \quad (3)$$

kde l je počet smyček, d je počet vazeb, m je počet předepsaných pohybů a u je počet těles včetně rámu [1].

$$l = 7 + 0 - 6 + 1 = 2 \quad (4)$$

Tento mechanismus má dvě smyčky. Jsou schematicky zakresleny na obr. 9, který představuje přidružený graf daného mechanismu se dvěma nezávislými smyčkami [1].

Jelikož náš mechanismus má všechny členy propojeny pouze rotačními vazbami, jsou všechny závislé souřadnice úhly natočení daných členů vůči rámu. Tedy $\beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6$ a β_7 . Pro úhly β_4 a β_7 platí $\beta_4 = \beta_7$, neboť jsou oba vektory na stejném členu (stejná přímka) a jsou stejně orientované. Úhel β_2 je nezávislá souřadnice, u které známe pohyb v závislosti na čase a úhly β_1 a β_8 jsou konstantní. Tedy $q = [\beta_2]$, $z = [\beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6, \beta_7]$.

Nyní můžeme nakreslit kinematické schéma a popsat je pomocí uzavřených vektorových mnohoúhelníků. Pro ně musíme zavést jejich vektory $\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \mathbf{b}_3, \mathbf{b}_4, \mathbf{b}_5, \mathbf{b}_6, \mathbf{b}_7, \mathbf{b}_8$. Jsou znázorněny na obr. 10. Vektorové rovnice vazeb jsou pak [1]

$$\sum_i \mathbf{b}_i = \mathbf{0} \quad (5)$$

Tedy pro směr x

$$\sum_i b_i \cdot \cos(\beta_i) = 0 \quad (6)$$

a pro směr y

$$\sum_i b_i \cdot \sin(\beta_i) = 0 \quad (7)$$

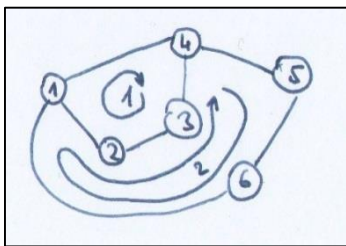
Rovnice vyjadřují, že pokud vektory vytvoří smyčku, která má počátek i konec ve stejném místě, je jejich součet nulový. Pro náš případ vytvoříme dvě smyčky.

První smyčka je

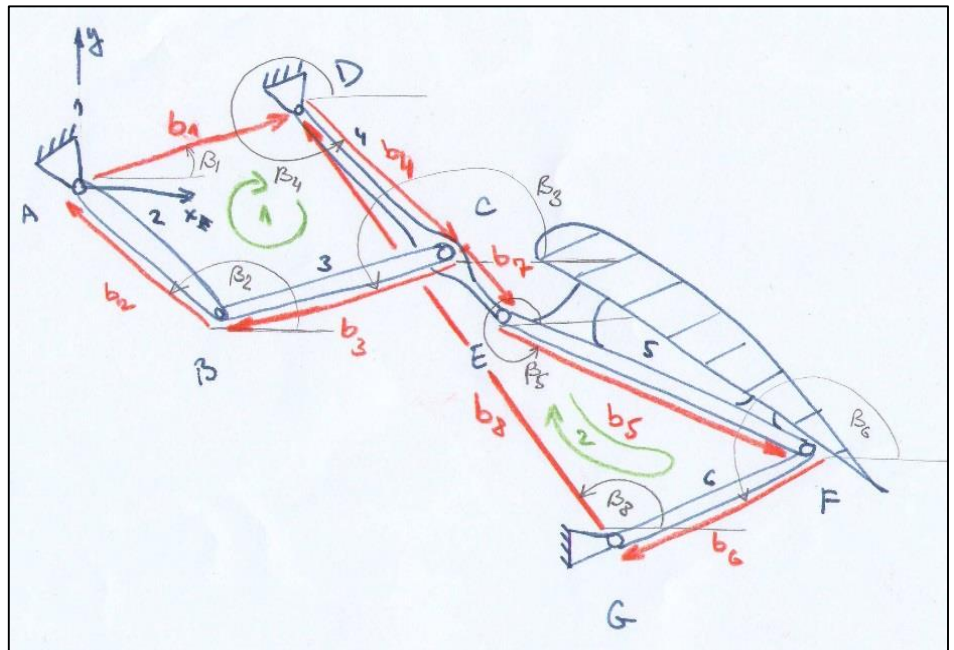
$$\mathbf{b}_1 + \mathbf{b}_2 + \mathbf{b}_3 + \mathbf{b}_4 = \mathbf{0} \quad (8)$$

a smyčka druhá

$$\mathbf{b}_4 + \mathbf{b}_5 + \mathbf{b}_6 + \mathbf{b}_7 + \mathbf{b}_8 = \mathbf{0} \quad (9)$$



Obr. 9



Obr. 10

Dále postupujeme rozepsáním vektorových rovnic polohy, rychlostí a zrychlení do složkových rovnic pro směr x a y [1].

Rovnice polohy

První smyčka poskytuje rovnice

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

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

(10)

a druhá smyčka

$$x: b_4 \cdot \cos(\beta_4) + b_5 \cdot \cos(\beta_5) + b_6 \cdot \cos(\beta_6) + b_7 \cdot \cos(\beta_7) + b_8 \cdot \cos(\beta_8) = 0$$

$$y: b_4 \cdot \sin(\beta_4) + b_5 \cdot \sin(\beta_5) + b_6 \cdot \sin(\beta_6) + b_7 \cdot \sin(\beta_4) + b_8 \cdot \sin(\beta_8) = 0 \quad (11)$$

Rovnice rychlostí

První smyčka vede na rovnice

$$\begin{aligned} x: -b_2 \cdot \sin(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2 - b_3 \cdot \sin(\beta_3) \cdot \dot{\beta}_3 - b_4 \cdot \sin(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4 &= 0 \\ y: +b_2 \cdot \cos(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2 + b_3 \cdot \cos(\beta_3) \cdot \dot{\beta}_3 + b_4 \cdot \cos(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4 &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

a druhá smyčka

$$\begin{aligned} x: -b_4 \cdot \sin(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4 - b_5 \cdot \sin(\beta_5) \cdot \dot{\beta}_5 - b_6 \cdot \sin(\beta_6) \cdot \dot{\beta}_6 - b_7 \cdot \sin(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4 &= 0 \\ y: b_4 \cdot \cos(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4 + b_5 \cdot \cos(\beta_5) \cdot \dot{\beta}_5 + b_6 \cdot \cos(\beta_6) \cdot \dot{\beta}_6 + b_7 \cdot \cos(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4 &= 0 \end{aligned} \quad (13)$$

Rovnice zrychlení

První smyčka vede na rovnice

$$\begin{aligned} x: -b_2 \cdot \cos(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2^2 - b_2 \cdot \sin(\beta_2) \cdot \ddot{\beta}_2 - b_3 \cdot \cos(\beta_3) \cdot \dot{\beta}_3^2 - b_3 \cdot \sin(\beta_3) \cdot \ddot{\beta}_3 - b_4 \cdot \\ \cdot \cos(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4^2 - b_4 \cdot \sin(\beta_4) \cdot \ddot{\beta}_4 &= 0 \\ y: -b_2 \cdot \sin(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2^2 + b_2 \cdot \cos(\beta_2) \cdot \ddot{\beta}_2 - b_3 \cdot \sin(\beta_3) \cdot \dot{\beta}_3^2 + b_3 \cdot \cos(\beta_3) \cdot \ddot{\beta}_3 - b_4 \cdot \\ \cdot \sin(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4^2 + b_4 \cdot \cos(\beta_4) \cdot \ddot{\beta}_4 &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

a druhá smyčka

$$\begin{aligned} x: -b_4 \cdot \cos(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4^2 - b_4 \cdot \sin(\beta_4) \cdot \ddot{\beta}_4 - b_5 \cdot \cos(\beta_5) \cdot \dot{\beta}_5^2 - b_5 \cdot \sin(\beta_5) \cdot \ddot{\beta}_5 - b_6 \cdot \\ \cdot \cos(\beta_6) \cdot \dot{\beta}_6^2 - b_6 \cdot \sin(\beta_6) \cdot \ddot{\beta}_6 - b_7 \cdot \cos(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4^2 - b_7 \cdot \sin(\beta_4) \cdot \ddot{\beta}_4 &= 0 \\ y: -b_4 \cdot \sin(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4^2 + b_4 \cdot \cos(\beta_4) \cdot \ddot{\beta}_4 - b_5 \cdot \sin(\beta_5) \cdot \dot{\beta}_5^2 + b_5 \cdot \cos(\beta_5) \cdot \ddot{\beta}_5 - b_6 \cdot \\ \cdot \sin(\beta_6) \cdot \dot{\beta}_6^2 + b_6 \cdot \cos(\beta_6) \cdot \ddot{\beta}_6 - b_7 \cdot \sin(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4^2 + b_7 \cdot \cos(\beta_4) \cdot \ddot{\beta}_4 &= 0 \end{aligned} \quad (15)$$

Řešení soustavy nelineárních rovnic

Úlohu polohy řešíme iteračním postupem pro rovnice (10) a (11), které zapíšeme do vektorového zápisu [1,9]

$$\mathbf{f}(\mathbf{z}, \mathbf{q}) = \mathbf{0} \quad (16)$$

Rovnici (16) řešíme modifikovanou Newtonovou iterační metodou pro iterace $k=0, 1, \dots$

$$\mathbf{J}_z \cdot \Delta \mathbf{z}^{(k)} + \mathbf{f}(\mathbf{z}^{(k)}, \mathbf{q}) = \mathbf{0} \quad (17)$$

kde \mathbf{J}_z je Jacobiho matice pro závislé proměnné.

Získané rovnice (12) a (13) přepíšeme do maticového zápisu rychlostí

$$\mathbf{J}_z \cdot \dot{\mathbf{z}} + \mathbf{J}_q \cdot \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0} \quad (18)$$

kde \mathbf{J}_q je Jacobiho matice pro nezávislé proměnné. Rovnice (18) má pro daný případ tvar

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} -b_3 \cdot \sin(\beta_3) & -b_4 \cdot \sin(\beta_4) & 0 & 0 \\ +b_3 \cdot \cos(\beta_3) & +b_4 \cdot \cos(\beta_4) & 0 & 0 \\ 0 & -b_4 \cdot \sin(\beta_4) - b_7 \cdot \sin(\beta_4) & -b_5 \cdot \sin(\beta_5) & -b_6 \cdot \sin(\beta_6) \\ 0 & +b_4 \cdot \cos(\beta_4) + b_7 \cdot \cos(\beta_4) & +b_5 \cdot \cos(\beta_5) & +b_6 \cdot \cos(\beta_6) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\beta}_3 \\ \dot{\beta}_4 \\ \dot{\beta}_5 \\ \dot{\beta}_6 \end{bmatrix} + \\ & + \begin{bmatrix} -b_2 \cdot \sin(\beta_2) \\ +b_2 \cdot \cos(\beta_2) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot [\dot{\beta}_2] = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (19)$$

Obdobně pro rovnice (14) a (15) přepíšeme do maticového zápisu zrychlení

$$\mathbf{J}_z \cdot \ddot{\mathbf{z}} + \mathbf{J}_q \cdot \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{j}_{qz} = \mathbf{0} \quad (20)$$

kde \mathbf{j}_{qz} je zbytek zrychlení [1]. Rovnice (20) má pro daný případ tvar

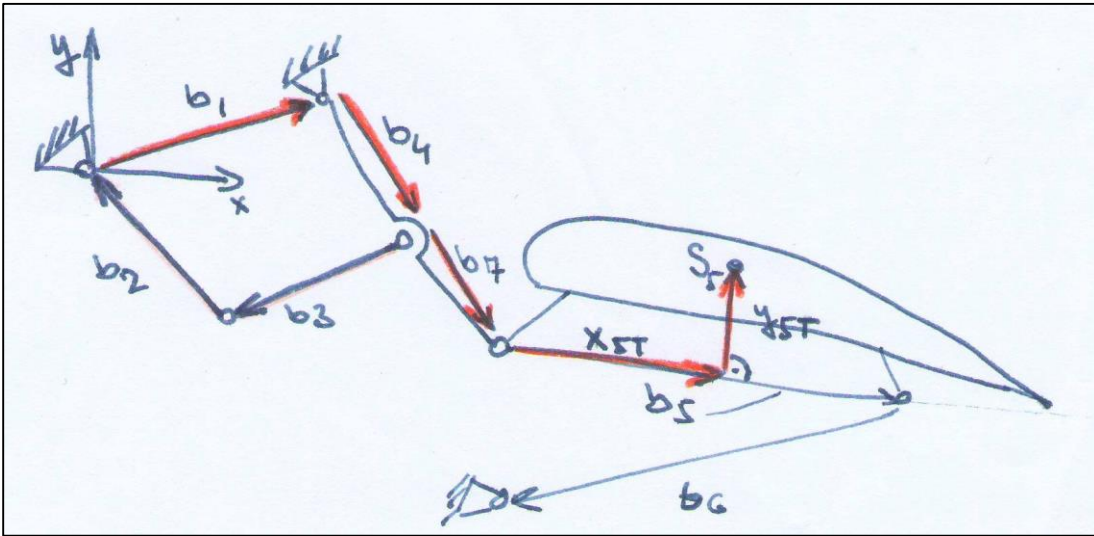
$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} -b_3 \cdot \sin(\beta_3) & -b_4 \cdot \sin(\beta_4) & 0 & 0 \\ +b_3 \cdot \cos(\beta_3) & +b_4 \cdot \cos(\beta_4) & 0 & 0 \\ 0 & -b_4 \cdot \sin(\beta_4) - b_7 \cdot \sin(\beta_4) & -b_5 \cdot \sin(\beta_5) & -b_6 \cdot \sin(\beta_6) \\ 0 & +b_4 \cdot \cos(\beta_4) + b_7 \cdot \cos(\beta_4) & +b_5 \cdot \cos(\beta_5) & +b_6 \cdot \cos(\beta_6) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{\beta}_3 \\ \ddot{\beta}_4 \\ \ddot{\beta}_5 \\ \ddot{\beta}_6 \end{bmatrix} + \\ & + \begin{bmatrix} -b_2 \cdot \sin(\beta_2) \\ +b_2 \cdot \cos(\beta_2) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot [\ddot{\beta}_2] + \end{aligned}$$

$$+ \begin{bmatrix} -b_2 \cdot \cos(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2^2 - b_3 \cdot \cos(\beta_3) \cdot \dot{\beta}_3^2 - b_4 \cdot \cos(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4^2 \\ -b_2 \cdot \sin(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2^2 - b_3 \cdot \sin(\beta_3) \cdot \dot{\beta}_3^2 - b_4 \cdot \sin(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4^2 \\ (-b_4 \cdot \cos(\beta_4) - b_7 \cdot \cos(\beta_4)) \cdot \dot{\beta}_4^2 - b_5 \cdot \cos(\beta_5) \cdot \dot{\beta}_5^2 - b_6 \cdot \cos(\beta_6) \cdot \dot{\beta}_6^2 \\ (-b_4 \cdot \sin(\beta_4) - b_7 \cdot \sin(\beta_4)) \cdot \dot{\beta}_4^2 - b_5 \cdot \sin(\beta_5) \cdot \dot{\beta}_5^2 - b_6 \cdot \sin(\beta_6) \cdot \dot{\beta}_6^2 \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (21)$$

Popis pohybu bodů pevně spojených s tělesy a natočení těles

Nakonec ještě určíme polohu, rychlost a zrychlení středu hmotnosti \mathbf{S}_5 vztlakové klapky. Použijeme k tomu součet posloupnosti vektorů \mathbf{b}_i [1]. Cestu ke středu hmotnosti z počátku popíšeme pomocí dříve zavedených vektorů \mathbf{b}_i a lokálních vektorů \mathbf{x}_{5T} a \mathbf{y}_{5T} v prostoru tělesa 5 (ve směru vektoru \mathbf{b}_5 a kolmo k němu). Cesta je červeně zakreslena pomocí vektorů na obr. 11.

$$\mathbf{r}_{S5} = \mathbf{b}_1 + \mathbf{b}_4 + \mathbf{b}_7 + \mathbf{x}_{5T} + \mathbf{y}_{5T} \quad (22)$$



Obr. 11

Sestavíme složkové rovnice polohy bodu \mathbf{S}_5

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

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

(23)

a jeho rychlosti

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

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

(24)

a zrychlení

$$a_{s_5x} = -b_4 \cdot \cos(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4^2 - b_4 \cdot \sin(\beta_4) \cdot \ddot{\beta}_4 - b_7 \cdot \cos(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4^2 - b_7 \cdot \sin(\beta_4) \cdot \ddot{\beta}_4 - x_{5T} \cdot \cos(\beta_5) \cdot \dot{\beta}_5^2 - x_{5T} \cdot \sin(\beta_5) \cdot \ddot{\beta}_5 + y_{5T} \cdot \sin(\beta_5) \cdot \dot{\beta}_5^2 - y_{5T} \cdot \cos(\beta_5) \cdot \ddot{\beta}_5$$

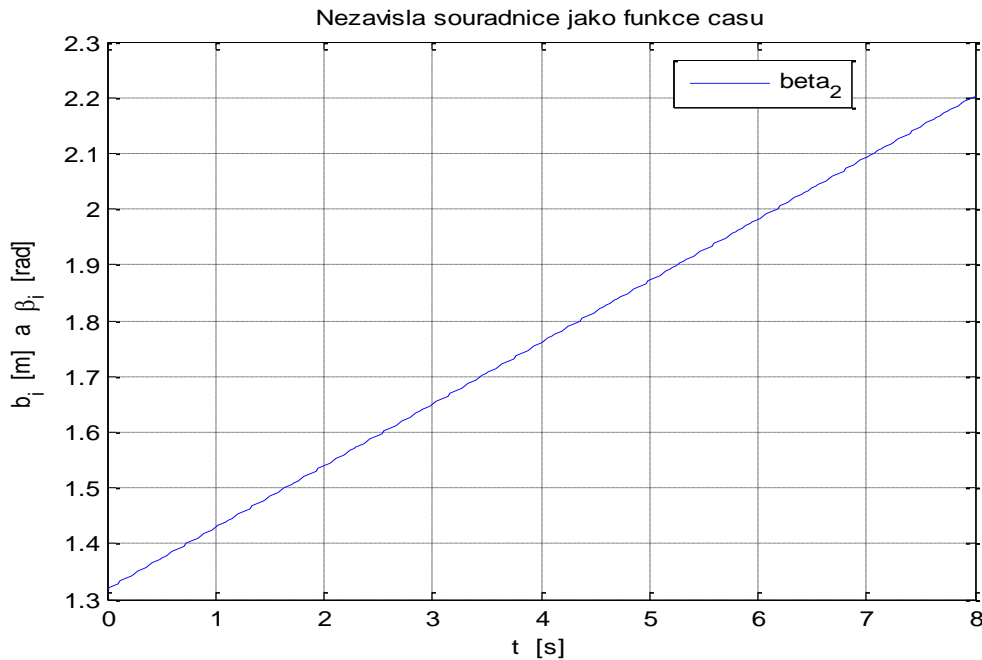
$$a_{s_5y} = -b_4 \cdot \sin(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4^2 + b_4 \cdot \cos(\beta_4) \cdot \ddot{\beta}_4 - b_7 \cdot \sin(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4^2 + b_7 \cdot \cos(\beta_4) \cdot \ddot{\beta}_4 - x_{5T} \cdot \sin(\beta_5) \cdot \dot{\beta}_5^2 + x_{5T} \cdot \cos(\beta_5) \cdot \ddot{\beta}_5 - y_{5T} \cdot \cos(\beta_5) \cdot \dot{\beta}_5^2 - y_{5T} \cdot \sin(\beta_5) \cdot \ddot{\beta}_5$$

(25)

Tyto rovnice se dále řeší v programu KRESIC. Tento program vypočte diskrétně polohy, rychlosti a zrychlení nezávislé souřadnice a pomocí vytvořených vazeb je schopen určit obdobné souřadnice závislých proměnných a bodů.

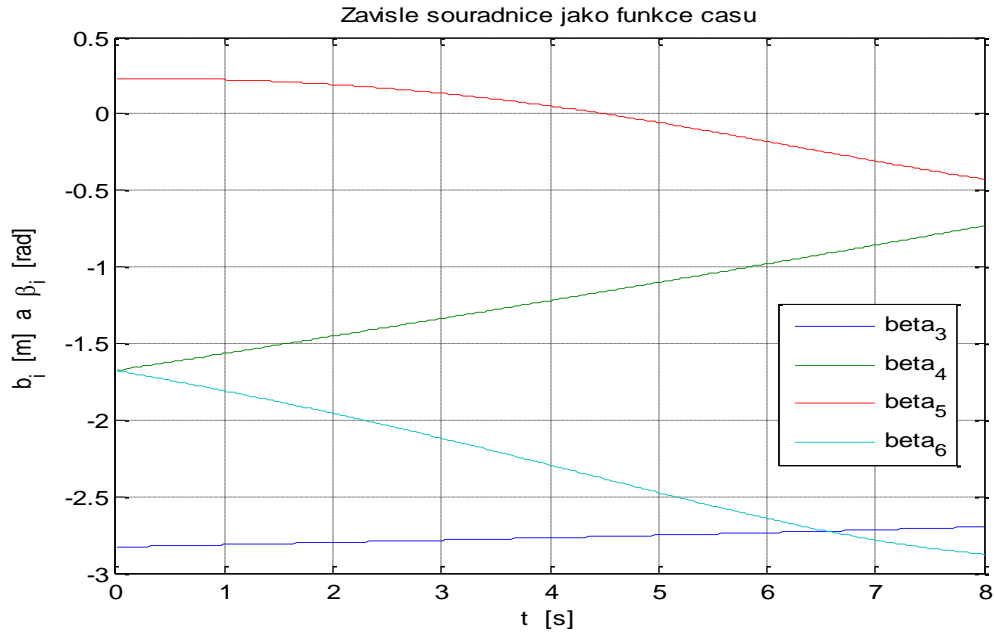
Výstupní grafy z program KRESIC

Pokud tyto rovnice řešíme pomocí programu KRESIC v Matlabu, dostaneme časové průběhy poloh, rychlostí a zrychlení. Program je v příloze této práce. Průběh nezávislé souřadnice β_2 je na obr. 12.

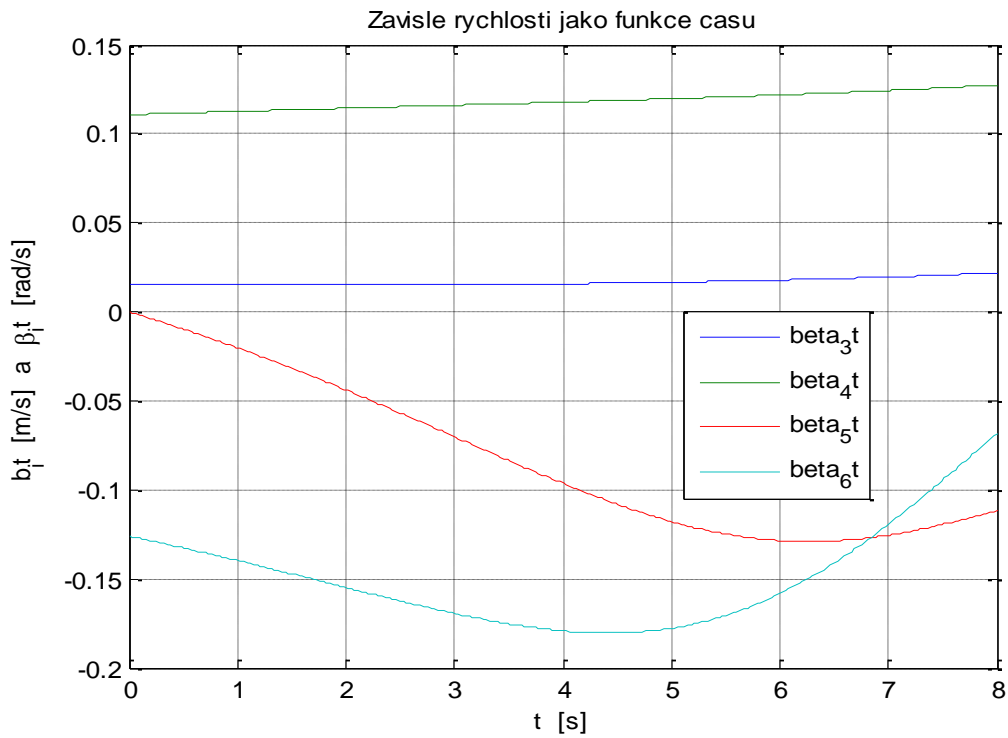


Obr. 12

Průběhy závislých souřadnic $\beta_3, \beta_4, \beta_5$ a β_6 jsou na obr. 13, které jsou vypočteny z polohy nezávislé souřadnice β_2 . Na obr. 14 je prokreslen průběh rychlosti závislých souřadnic.



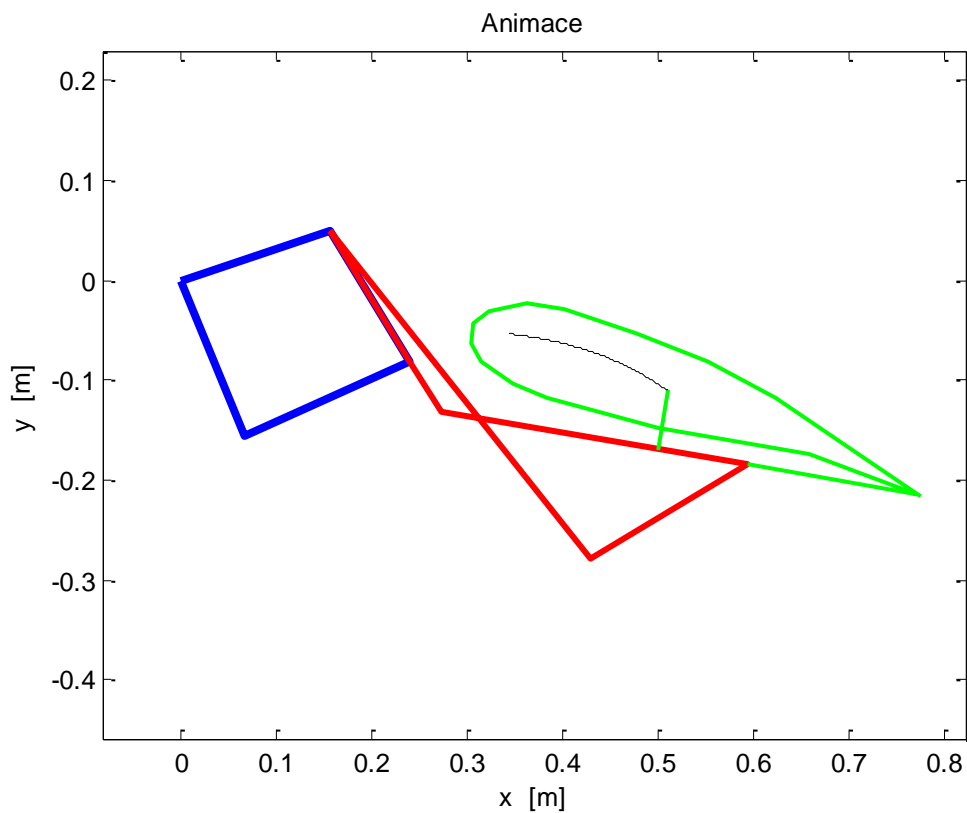
Obr. 13



Obr. 14

Výslednou animaci mechanismu klapky v obecné poloze je možno vidět na obr. 15. Modrý čtyřúhelník zobrazuje první smyčku, červený mnohoúhelník druhou smyčku a zeleně je

vykreslena klapka pevně spojena s tělesem 5. Ve středu klapky je vidět trajektorii pohybu středu hmotnosti S_5 klapky.



Obr. 15

V kinematickém modelu jsme vyřešili pohyb daných členů mechanismu a význačných bodů. Z dat od společnosti EVEKTOR je pro vysunutí vztlakové klapky zapotřebí čas 8 s. Za tento čas se klapka dostane z polohy s nulovým sklonem do polohy pro přistání, ve které je sklopena o úhel -38° vůči horizontální poloze a při konfiguraci pro vzlet je klapka sklopena pod úhlem -20° .

5. Dynamický model Fowlerovy klapky pro přímou úlohu

V předchozí části jsme řešili polohu a pohyb všech členů mechanismu kinematically. Nyní přidáme i síly a budeme řešit dynamické úlohy. Začneme přímou dynamickou úlohou.

Přímá metoda dynamiky vychází ze vztahu

$$\mathbf{M}\mathbf{a} = \mathbf{D}\mathbf{R} + \mathbf{Q}, \quad (26)$$

což je maticový zápis Newton-Eulerových pohybových rovnic. Zde značí \mathbf{M} globální matici hmotnosti, \mathbf{a} vektor zrychlení středů hmotnosti a úhlových zrychlení těles, \mathbf{D} distribuční matici účinků reakcí na tělesa sestavených dle Newton-Eulerových rovnic, \mathbf{R} vektor reakčních sil, \mathbf{Q} vektor akčních (zátěžných) sil [1].

Sestavíme maticový zápis všech dostupných rovnic [1]

$$\begin{aligned} \mathbf{M}\mathbf{a} &= \mathbf{D}\mathbf{R} + \mathbf{Q} \\ \mathbf{a} &= \mathbf{V}_z \cdot \dot{\mathbf{z}} + \mathbf{V}_q \cdot \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{a}_{qz} \\ \mathbf{J}_z \cdot \dot{\mathbf{z}} + \mathbf{J}_q \cdot \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{j}_{qz} &= \mathbf{0}, \end{aligned} \quad (27)$$

kde druhý řádek představuje vektor zrychlení jako funkci nezávislých a závislých souřadnic a jejich derivací vyjádřených pomocí Jacobiho matic \mathbf{V}_z , \mathbf{V}_q obdobných Jacobiho maticím \mathbf{J}_z , \mathbf{J}_q a zbytku zrychlení \mathbf{a}_{qz} obdobného zbytku zrychlení \mathbf{j}_{qz} . Třetí řádek, převzatý z kinematického řešení, vyjadřuje rovnice vazeb, které jsou dvakrát derivované podle času. Následně vše uspořádáme do jediné globální maticové rovnice [1]

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & -\mathbf{D} & \mathbf{0}_1 & \mathbf{0}_2 \\ \mathbf{I} & \mathbf{0}_3 & -\mathbf{V}_z & -\mathbf{V}_q \\ \mathbf{0}_4 & \mathbf{0}_5 & \mathbf{J}_z & \mathbf{J}_q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{a} \\ \mathbf{R} \\ \dot{\mathbf{z}} \\ \ddot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q} \\ \mathbf{a}_{qz} \\ -\mathbf{j}_{qz} \end{bmatrix}, \quad (28)$$

kde \mathbf{I} je jednotková matice a $\mathbf{0}_i$ jsou nulové matice příslušných dimenzí. Z této soustavy určíme neznámé \mathbf{a} , \mathbf{R} , $\ddot{\mathbf{q}}$, $\dot{\mathbf{z}}$, ale numericky integrujeme jen nezávislá zrychlení $\ddot{\mathbf{q}}$, dostaneme nezávislé rychlosti $\dot{\mathbf{q}}$ a nezávislé polohy \mathbf{q} pro daný časový okamžik a postup můžeme opakovat.

Pro sestavení konkrétních rovnic pro daný případ začneme popisem středů hmotností

$$\mathbf{r}_s = \sum_j \mathbf{b}_j + \mathbf{x}_s + \mathbf{y}_s \quad (29)$$

a jejich časových derivací až po zrychlení středů hmotnosti

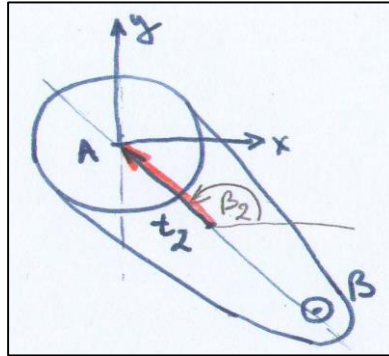
$$\mathbf{a}_S = \sum_j \ddot{\mathbf{b}}_j + \ddot{\mathbf{x}}_S + \ddot{\mathbf{y}}_S. \quad (30)$$

Rovnice pro popis středů hmotnosti

Pro jednotlivá tělesa postupně dostaneme.

Těleso 2

Obr. 16 nám ukazuje červeně vyznačenou cestu do středu hmotnosti tělesa 2.



Obr. 16

$$\mathbf{r}_{S_2} = -\mathbf{x}_{S_2} \quad (31)$$

Rovnice pro polohu, rychlost a zrychlení středu hmotnosti rozepsané ve složkách x a y a rovnice pro úhel, úhlovou rychlost a úhlové zrychlení tělesa 2

$$x_{S_2} = -t_2 \cdot \cos(\beta_2)$$

$$y_{S_2} = -t_2 \cdot \sin(\beta_2)$$

$$\alpha_2 = \beta_2 \quad (32)$$

$$v_{S_2x} = +t_2 \cdot \sin(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2$$

$$v_{S_2y} = -t_2 \cdot \cos(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2$$

$$\dot{\alpha}_2 = \dot{\beta}_2 \quad (33)$$

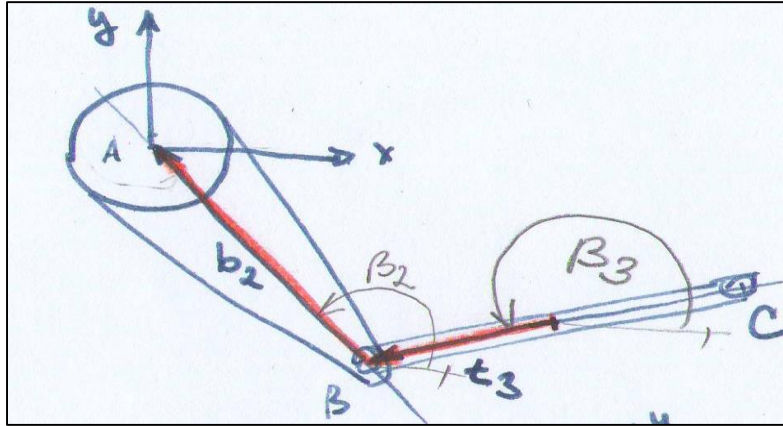
$$a_{S_2x} = +t_2 \cdot \cos(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2^2 + t_2 \cdot \sin(\beta_2) \cdot \ddot{\beta}_2$$

$$a_{S_2y} = +t_2 \cdot \sin(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2^2 - t_2 \cdot \cos(\beta_2) \cdot \ddot{\beta}_2$$

$$\ddot{\alpha}_2 = \ddot{\beta}_2 \quad (34)$$

Těleso 3

Obr. 17 ukazuje červeně vyznačenou cestu do středu hmotnosti tělesa 3 přes těleso 2.



Obr. 17

$$\mathbf{r}_{S_3} = -\mathbf{b}_2 - \mathbf{x}_{S_3} \quad (35)$$

Rovnice pro polohu, rychlost a zrychlení středu hmotnosti rozepsané ve složkách x a y a rovnice pro úhel, úhlovou rychlost a úhlové zrychlení tělesa 3

$$x_{S_3} = -b_2 \cdot \cos(\beta_2) - t_3 \cdot \cos(\beta_3)$$

$$y_{S_3} = -b_2 \cdot \sin(\beta_2) - t_3 \cdot \sin(\beta_3)$$

$$\alpha_3 = \beta_3 \quad (36)$$

$$v_{S_3x} = +b_2 \cdot \sin(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2 + t_3 \cdot \sin(\beta_3) \cdot \dot{\beta}_3$$

$$v_{S_3y} = -b_2 \cdot \cos(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2 - t_3 \cdot \cos(\beta_3) \cdot \dot{\beta}_3$$

$$\dot{\alpha}_3 = \dot{\beta}_3 \quad (37)$$

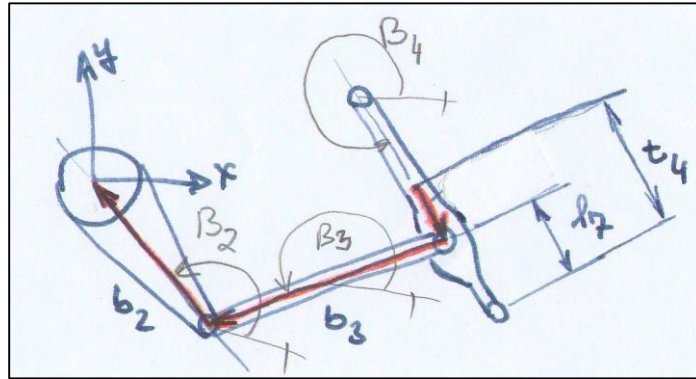
$$a_{S_3x} = +b_2 \cdot \cos(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2^2 + b_2 \cdot \sin(\beta_2) \cdot \ddot{\beta}_2 + t_3 \cdot \cos(\beta_3) \cdot \dot{\beta}_3^2 + t_3 \cdot \sin(\beta_3) \cdot \ddot{\beta}_3$$

$$a_{S_3y} = +b_2 \cdot \sin(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2^2 - b_2 \cdot \cos(\beta_2) \cdot \ddot{\beta}_2 + t_3 \cdot \sin(\beta_3) \cdot \dot{\beta}_3^2 - t_3 \cdot \cos(\beta_3) \cdot \ddot{\beta}_3$$

$$\ddot{\alpha}_3 = \ddot{\beta}_3 \quad (38)$$

Těleso 4

Na obr. 18 je zachycena červeně vyznačená cesta do středu hmotnosti tělesa 4.



Obr. 18

$$\mathbf{r}_{S_4} = -\mathbf{b}_2 - \mathbf{b}_3 - \mathbf{x}_{S_4} \quad (39)$$

Rovnice pro polohu, rychlost a zrychlení středu hmotnosti rozepsané ve složkách x a y a rovnice pro úhel, úhlovou rychlost a úhlové zrychlení tělesa 4

$$x_{S_4} = -b_2 \cdot \cos(\beta_2) - b_3 \cdot \cos(\beta_3) - (t_4 - l_7) \cdot \cos(\beta_4)$$

$$y_{S_4} = -b_2 \cdot \sin(\beta_2) - b_3 \cdot \sin(\beta_3) - (t_4 - l_7) \cdot \sin(\beta_4)$$

$$\alpha_4 = \beta_4 \quad (40)$$

$$v_{S_4x} = +b_2 \cdot \sin(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2 + b_3 \cdot \sin(\beta_3) \cdot \dot{\beta}_3 + (t_4 - l_7) \cdot \sin(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4$$

$$v_{S_4y} = -b_2 \cdot \cos(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2 - b_3 \cdot \cos(\beta_3) \cdot \dot{\beta}_3 - (t_4 - l_7) \cdot \cos(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4$$

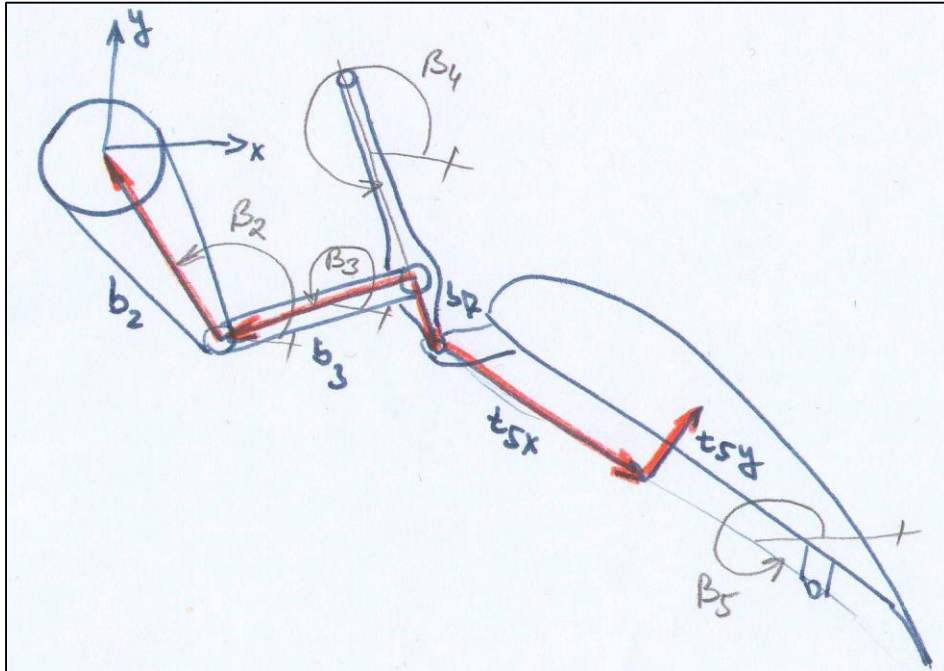
$$\dot{\alpha}_4 = \dot{\beta}_4 \quad (41)$$

$$a_{S_4x} = +b_2 \cdot \cos(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2^2 + b_2 \cdot \sin(\beta_2) \cdot \ddot{\beta}_2 + b_3 \cdot \cos(\beta_3) \cdot \dot{\beta}_3^2 + b_3 \cdot \sin(\beta_3) \cdot \ddot{\beta}_3 + (t_4 - l_7) \cdot \cos(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4^2 + (t_4 - l_7) \cdot \sin(\beta_4) \cdot \ddot{\beta}_4$$

$$\begin{aligned}
 a_{s_4y} = & +b_2 \cdot \sin(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2^2 - b_2 \cdot \cos(\beta_2) \cdot \ddot{\beta}_2 + b_3 \cdot \sin(\beta_3) \cdot \dot{\beta}_3^2 - b_3 \cdot \\
 & \cdot \cos(\beta_3) \cdot \ddot{\beta}_3 + (t_4 - l_7) \cdot \sin(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4^2 - (t_4 - l_7) \cdot \cos(\beta_4) \cdot \ddot{\beta}_4 \\
 \ddot{\alpha}_4 = & \ddot{\beta}_4
 \end{aligned} \tag{42}$$

Těleso 5

Pro střed hmotnosti tělesa 5 je cesta vyznačena červeně na schématu na obr. 19.



Obr. 19

$$\mathbf{r}_{S_5} = -\mathbf{b}_2 - \mathbf{b}_3 + \mathbf{b}_7 + \mathbf{x}_{S_5} + \mathbf{y}_{S_5} \tag{43}$$

Rovnice pro polohu, rychlost a zrychlení středu hmotnosti a rovnice pro úhel, úhlovou rychlost a úhlové zrychlení tělesa 5

$$\begin{aligned}
 x_{S_5} = & -b_2 \cdot \cos(\beta_2) - b_3 \cdot \cos(\beta_3) + b_7 \cdot \cos(\beta_4) + t_{5x} \cdot \cos(\beta_5) - t_{5y} \cdot \sin(\beta_5) \\
 y_{S_5} = & -b_2 \cdot \sin(\beta_2) - b_3 \cdot \sin(\beta_3) + b_7 \cdot \sin(\beta_4) + t_{5x} \cdot \sin(\beta_5) + t_{5y} \cdot \cos(\beta_5) \\
 \alpha_5 = & \beta_5
 \end{aligned} \tag{44}$$

$$v_{S_5x} = +b_2 \cdot \sin(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2 + b_3 \cdot \sin(\beta_3) \cdot \dot{\beta}_3 - b_7 \cdot \sin(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4 - t_{5x} \cdot \sin(\beta_5) \cdot \dot{\beta}_5 - t_{5y} \cdot \cos(\beta_5) \cdot \dot{\beta}_5$$

$$v_{S_5y} = -b_2 \cdot \cos(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2 - b_3 \cdot \cos(\beta_3) \cdot \dot{\beta}_3 + b_7 \cdot \cos(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4 + t_{5x} \cdot \cos(\beta_5) \cdot \dot{\beta}_5 - t_{5y} \cdot \sin(\beta_5) \cdot \dot{\beta}_5$$

$$\dot{\alpha}_5 = \dot{\beta}_5 \quad (45)$$

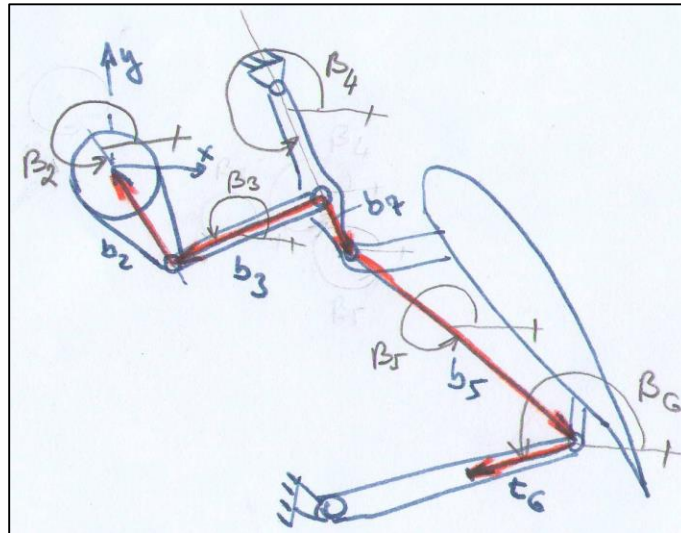
$$a_{S_5x} = +b_2 \cdot \cos(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2^2 + b_2 \cdot \sin(\beta_2) \cdot \ddot{\beta}_2 + b_3 \cdot \cos(\beta_3) \cdot \dot{\beta}_3^2 + b_3 \cdot \sin(\beta_3) \cdot \ddot{\beta}_3 - b_7 \cdot \cos(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4^2 - b_7 \cdot \sin(\beta_4) \cdot \ddot{\beta}_4 - t_{5x} \cdot \cos(\beta_5) \cdot \dot{\beta}_5^2 - t_{5x} \cdot \sin(\beta_5) \cdot \ddot{\beta}_5 + t_{5y} \cdot \sin(\beta_5) \cdot \dot{\beta}_5^2 - t_{5y} \cdot \cos(\beta_5) \cdot \ddot{\beta}_5$$

$$a_{S_5y} = +b_2 \cdot \sin(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2^2 - b_2 \cdot \cos(\beta_2) \cdot \ddot{\beta}_2 + b_3 \cdot \sin(\beta_3) \cdot \dot{\beta}_3^2 - b_3 \cdot \cos(\beta_3) \cdot \ddot{\beta}_3 - b_7 \cdot \sin(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4^2 + b_7 \cdot \cos(\beta_4) \cdot \ddot{\beta}_4 - t_{5x} \cdot \sin(\beta_5) \cdot \dot{\beta}_5^2 + t_{5x} \cdot \cos(\beta_5) \cdot \ddot{\beta}_5 - t_{5y} \cdot \cos(\beta_5) \cdot \dot{\beta}_5^2 - t_{5y} \cdot \sin(\beta_5) \cdot \ddot{\beta}_5$$

$$\ddot{\alpha}_5 = \ddot{\beta}_5 \quad (46)$$

Těleso 6

Cesta ke středu hmotnosti tělesa 6 je na obr. 20 vyznačena červeně.



Obr. 20

$$\mathbf{r}_{S_6} = -\mathbf{b}_2 - \mathbf{b}_3 + \mathbf{b}_7 + \mathbf{b}_5 + \mathbf{x}_{S_6} \quad (47)$$

Rovnice pro polohu, rychlost a zrychlení středu hmotnosti a rovnice pro úhel, úhlovou rychlost a úhlové zrychlení tělesa 6

$$\begin{aligned}
 x_{S_6} &= -b_2 \cdot \cos(\beta_2) - b_3 \cdot \cos(\beta_3) + b_5 \cdot \cos(\beta_5) + b_7 \cdot \cos(\beta_4) + t_6 \cdot \cos(\beta_6) \\
 y_{S_6} &= -b_2 \cdot \sin(\beta_2) - b_3 \cdot \sin(\beta_3) + b_5 \cdot \sin(\beta_5) + b_7 \cdot \sin(\beta_4) + t_6 \cdot \sin(\beta_6) \\
 \alpha_6 &= \beta_6
 \end{aligned} \tag{48}$$

$$\begin{aligned}
 v_{S_6x} &= +b_2 \cdot \sin(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2 + b_3 \cdot \sin(\beta_3) \cdot \dot{\beta}_3 - b_5 \cdot \sin(\beta_5) \cdot \dot{\beta}_5 - b_7 \cdot \sin(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4 - \\
 &\quad - t_6 \cdot \sin(\beta_6) \cdot \dot{\beta}_6 \\
 v_{S_6y} &= -b_2 \cdot \cos(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2 - b_3 \cdot \cos(\beta_3) \cdot \dot{\beta}_3 + b_5 \cdot \cos(\beta_5) \cdot \dot{\beta}_5 + b_7 \cdot \cos(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4 + \\
 &\quad + t_6 \cdot \cos(\beta_6) \cdot \dot{\beta}_6 \\
 \dot{\alpha}_6 &= \dot{\beta}_6
 \end{aligned} \tag{49}$$

$$\begin{aligned}
 a_{S_6x} &= +b_2 \cdot \cos(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2^2 + b_2 \cdot \sin(\beta_2) \cdot \ddot{\beta}_2 + b_3 \cdot \cos(\beta_3) \cdot \dot{\beta}_3^2 + b_3 \cdot \\
 &\quad \cdot \sin(\beta_3) \cdot \ddot{\beta}_3 - b_5 \cdot \cos(\beta_5) \cdot \dot{\beta}_5^2 - b_5 \cdot \sin(\beta_5) \cdot \ddot{\beta}_5 - b_7 \cdot \\
 &\quad \cdot \cos(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4^2 - b_7 \cdot \sin(\beta_4) \cdot \ddot{\beta}_4 - t_6 \cdot \cos(\beta_6) \cdot \dot{\beta}_6^2 - t_6 \cdot \sin(\beta_6) \cdot \ddot{\beta}_6 \\
 a_{S_6y} &= +b_2 \cdot \sin(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2^2 - b_2 \cdot \cos(\beta_2) \cdot \ddot{\beta}_2 + b_3 \cdot \sin(\beta_3) \cdot \dot{\beta}_3^2 - b_3 \cdot \\
 &\quad \cdot \cos(\beta_3) \cdot \ddot{\beta}_3 - b_5 \cdot \sin(\beta_5) \cdot \dot{\beta}_5^2 + b_5 \cdot \cos(\beta_5) \cdot \ddot{\beta}_5 - b_7 \cdot \\
 &\quad \cdot \sin(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4^2 + b_7 \cdot \cos(\beta_4) \cdot \ddot{\beta}_4 - t_6 \cdot \sin(\beta_6) \cdot \dot{\beta}_6^2 + t_6 \cdot \cos(\beta_6) \cdot \ddot{\beta}_6 \\
 \ddot{\alpha}_6 &= \ddot{\beta}_6
 \end{aligned} \tag{50}$$

Nyní můžeme zapsat rovnice zrychlení do vektoru zrychlení

$$\mathbf{a} = \mathbf{V}_z \cdot \dot{\mathbf{z}} + \mathbf{V}_q \cdot \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{a}_{qz} \tag{51}$$

Pro daný případ dostaneme

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +t_3 \cdot \sin(\beta_3) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -t_3 \cdot \cos(\beta_3) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +b_3 \cdot \sin(\beta_3) & +(t_4 - l_7) \cdot \sin(\beta_4) & 0 & 0 & 0 \\ -b_3 \cdot \cos(\beta_3) & -(t_4 - l_7) \cdot \cos(\beta_4) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ +b_3 \cdot \sin(\beta_3) & -b_7 \cdot \sin(\beta_4) & -t_{5y} \cdot \cos(\beta_5) - t_{5x} \cdot \sin(\beta_5) & 0 & 0 \\ -b_3 \cdot \cos(\beta_3) & +b_7 \cdot \cos(\beta_4) & +t_{5x} \cdot \cos(\beta_5) - t_{5y} \cdot \sin(\beta_5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ +b_3 \cdot \sin(\beta_3) & -b_7 \cdot \sin(\beta_4) & -b_5 \cdot \sin(\beta_5) & -t_6 \cdot \sin(\beta_6) & 0 \\ -b_3 \cdot \cos(\beta_3) & +b_7 \cdot \cos(\beta_4) & +b_5 \cdot \cos(\beta_5) & +t_6 \cdot \cos(\beta_6) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{\beta}_3 \\ \ddot{\beta}_4 \\ \ddot{\beta}_5 \\ \ddot{\beta}_6 \end{bmatrix} +$$

$$+ \begin{bmatrix} +t_2 \cdot \sin(\beta_2) \\ -t_2 \cdot \cos(\beta_2) \\ 1 \\ +b_2 \cdot \sin(\beta_2) \\ -b_2 \cdot \cos(\beta_2) \\ 0 \\ +b_2 \cdot \sin(\beta_2) \\ -b_2 \cdot \cos(\beta_2) \\ 0 \\ +b_2 \cdot \sin(\beta_2) \\ -b_2 \cdot \cos(\beta_2) \\ 0 \\ +b_2 \cdot \sin(\beta_2) \\ -b_2 \cdot \cos(\beta_2) \\ 0 \end{bmatrix} \cdot [\ddot{\beta}_2] +$$

$$\begin{aligned}
& +t_2 \cdot \cos(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2^2 \\
& +t_2 \cdot \sin(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2^2 \\
& 0 \\
& +b_2 \cdot \cos(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2^2 + t_3 \cdot \cos(\beta_3) \cdot \dot{\beta}_3^2 \\
& +b_2 \cdot \sin(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2^2 + t_3 \cdot \sin(\beta_3) \cdot \dot{\beta}_3^2 \\
& 0 \\
& +b_2 \cdot \cos(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2^2 + b_3 \cdot \cos(\beta_3) \cdot \dot{\beta}_3^2 + (t_4 - l_7) \cdot \cos(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4^2 \\
& +b_2 \cdot \sin(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2^2 + b_3 \cdot \sin(\beta_3) \cdot \dot{\beta}_3^2 + (t_4 - l_7) \cdot \sin(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4^2 \\
& 0 \\
& +b_2 \cdot \cos(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2^2 + b_3 \cdot \cos(\beta_3) \cdot \dot{\beta}_3^2 - b_7 \cdot \cos(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4^2 - [t_{5x} \cdot \cos(\beta_5) - t_{5y} \cdot \sin(\beta_5)] \cdot \dot{\beta}_5^2 \\
& +b_2 \cdot \sin(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2^2 + b_3 \cdot \sin(\beta_3) \cdot \dot{\beta}_3^2 - b_7 \cdot \sin(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4^2 - [t_{5x} \cdot \sin(\beta_5) + t_{5y} \cdot \cos(\beta_5)] \cdot \dot{\beta}_5^2 \\
& 0 \\
& +b_2 \cdot \cos(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2^2 + b_3 \cdot \cos(\beta_3) \cdot \dot{\beta}_3^2 - b_7 \cdot \cos(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4^2 - b_5 \cdot \cos(\beta_5) \cdot \dot{\beta}_5^2 - t_6 \cdot \cos(\beta_6) \cdot \dot{\beta}_6^2 \\
& +b_2 \cdot \sin(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2^2 + b_3 \cdot \sin(\beta_3) \cdot \dot{\beta}_3^2 - b_7 \cdot \sin(\beta_4) \cdot \dot{\beta}_4^2 - b_5 \cdot \sin(\beta_5) \cdot \dot{\beta}_5^2 - t_6 \cdot \sin(\beta_6) \cdot \dot{\beta}_6^2 \\
& 0
\end{aligned}
\tag{52}$$

Nyní musíme sestavit pohybové rovnice všech členů mechanismu. Rozměry, hmotnosti a momenty setrvačnosti jsme zjistili kombinací podkladů od společnosti EVEKTOR a výpočtů 3D designem v programu Autodesk Inventor 2013.

Dále pokračujeme uvolněním všech těles a sestavením Newton-Eulerových rovnic, které zapíšeme do složek x a y a do rovnice momentové.

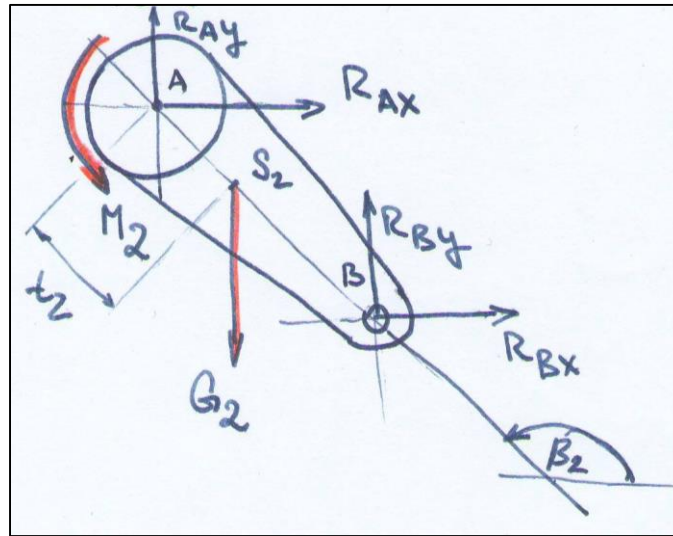
$$m_j a_{S_j x} = \sum_i F_{ix} + \sum_k R_{kx} \tag{52}$$

$$m_j a_{S_j y} = \sum_i F_{iy} + \sum_k R_{ky} \tag{53}$$

$$I_{j S_j} \alpha_j = \sum_i M_{iS} + \sum_k M_{kS}^R \tag{54}$$

Těleso 2

Uvolnění pro těleso 2 a zobrazení sil na něj působících je na obr. 21.



Obr. 21

Pohybové rovnice jsou

$$m_2 a_{2x} = R_{Ax} + R_{Bx} \quad (55)$$

$$m_2 a_{2y} = R_{Ay} + R_{By} - m_2 \cdot g \quad (56)$$

$$I_{2S2} \alpha_2 = M_2 - R_{Ax} \cdot t_2 \cdot \sin(\beta_2) + R_{Ay} \cdot t_2 \cdot \cos(\beta_2) + R_{Bx} \cdot (l_2 - t_2) \cdot \sin(\beta_2) - R_{By} \cdot (l_2 - t_2) \cdot \cos(\beta_2) \quad (57)$$

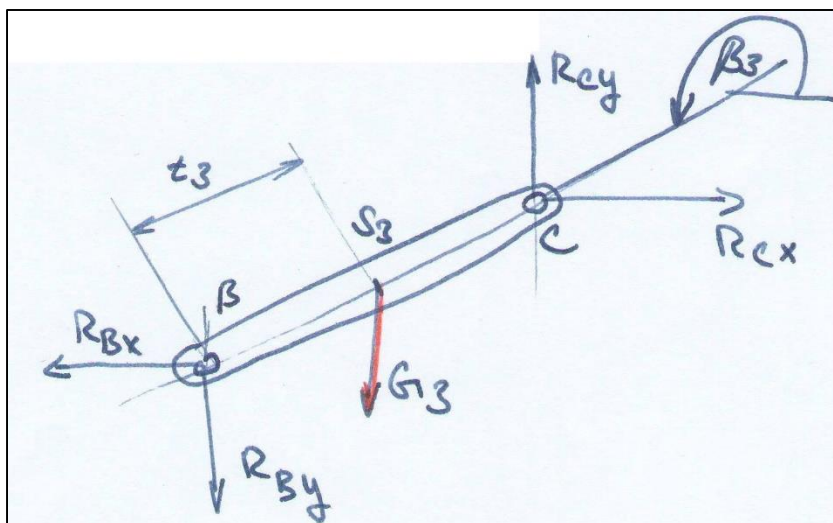
Těleso 3

Uvolnění pro těleso 3 a zobrazení sil na něj působících je na obr. 22. Pohybové rovnice jsou

$$m_3 a_{3x} = -R_{Bx} + R_{Cx} \quad (58)$$

$$m_3 a_{3y} = -R_{By} + R_{Cy} - m_3 \cdot g \quad (59)$$

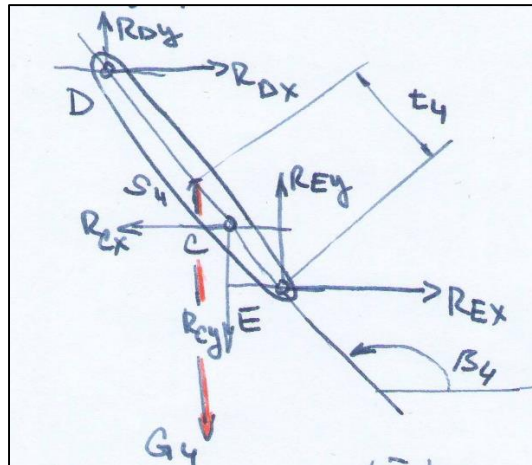
$$I_{3S3} \alpha_3 = +R_{Bx} \cdot t_3 \cdot \sin(\beta_3) - R_{By} \cdot t_3 \cdot \cos(\beta_3) + R_{Cx} \cdot (l_3 - t_3) \cdot \sin(\beta_3) - R_{Cy} \cdot (l_3 - t_3) \cdot \cos(\beta_3) \quad (60)$$



Obr. 22

Těleso 4

Uvolnění pro těleso 4 a zobrazení sil na něj působících je na obr. 23.



Obr. 23

Pohybové rovnice jsou

$$m_4 a_{4x} = -R_{Cx} + R_{Dx} + R_{Ex} \quad (61)$$

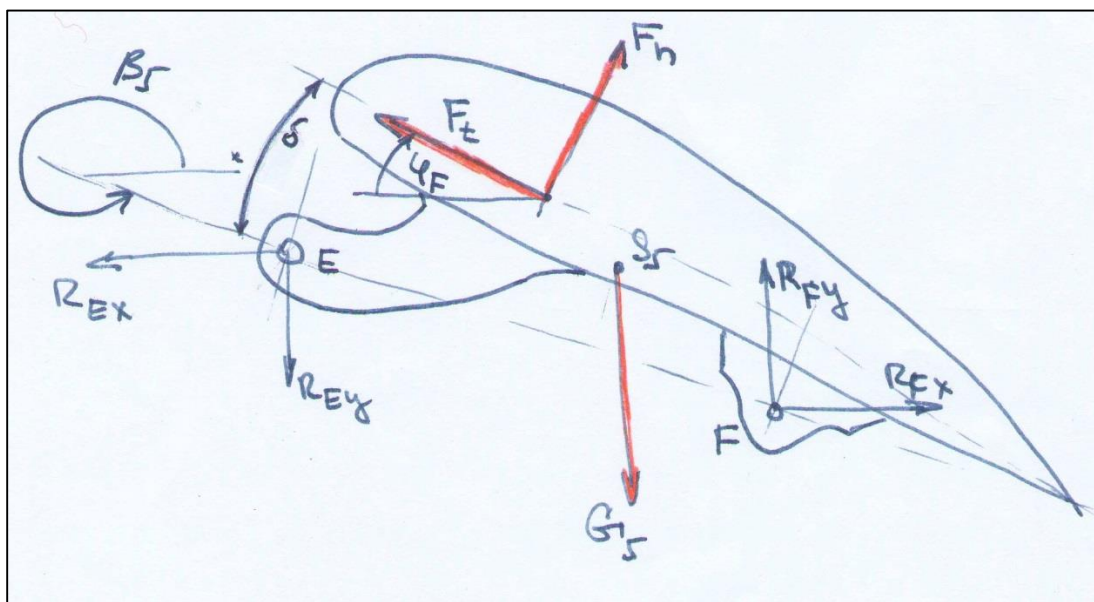
$$m_4 a_{4y} = -R_{Cy} + R_{Dy} + R_{Ey} - m_4 \cdot g \quad (62)$$

$$I_{4S4}\alpha_4 = +R_{Cx} \cdot (t_4 - l_4) \cdot \sin(\beta_7) - R_{Cy} \cdot (t_4 - l_4) \cdot \cos(\beta_4) + R_{Dx} \cdot (l_4 + l_7 - t_4) \cdot \sin(\beta_4) - R_{Dy} \cdot (l_4 + l_7 - t_4) \cdot \cos(\beta_4) - R_{Ex} \cdot t_4 \cdot \sin(\beta_4) + R_{Ey} \cdot t_4 \cdot \cos(\beta_4) \quad (63)$$

Těleso 5

Uvolnění pro těleso 5 a zobrazení sil na něj působících včetně aerodynamické síly rozložené do navzájem kolmých složek je na obr. 24.

Síly F_n a F_t jsme získali ze zprávy společnosti EVEKTOR, ve které byly změřeny síly na klapky během význačných rychlostí a poloh klapky. Šlo o polohy v plně zasunutém stavu, konfiguraci pro start a také pro přistání, respektive pro 0° , -20° a -38° . Jelikož šlo pouze o tři hodnoty pro každou složku, museli jsme přidat další podmínku na derivaci funkce a určit aproximaci polynomem třetího stupně. Celý výpočet je uveden v příloze této práce v souboru sila.m.



Obr. 24

Pohybové rovnice jsou

$$m_5 a_{5x} = -R_{Ex} + R_{Fx} - F_t \cdot \cos(\varphi_F) + F_n \cdot \sin(\varphi_F) \quad (64)$$

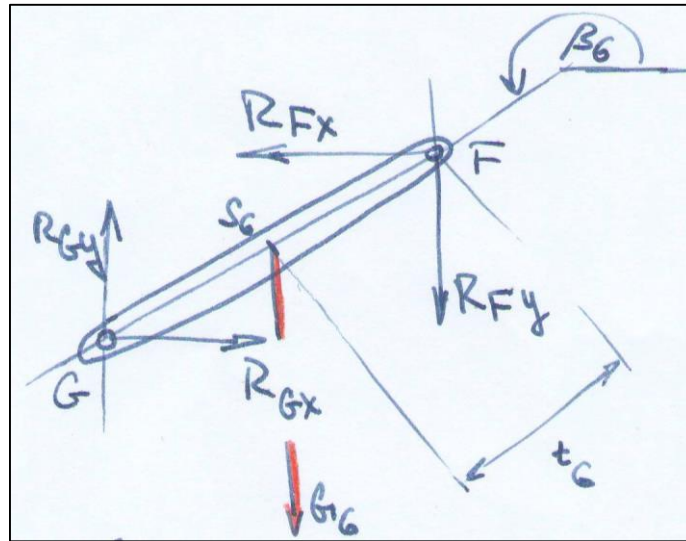
$$m_5 a_{5y} = -R_{Ey} + R_{Fy} + F_t \cdot \sin(\varphi_F) + F_n \cdot \cos(\varphi_F) - m_5 \cdot g \quad (65)$$

$$\begin{aligned}
I_{5S5}\alpha_5 = & -R_{Ex} \cdot t_{5x} \cdot \sin(\beta_5) + R_{Ey} \cdot t_{5x} \cdot \\
& \cdot \cos(\beta_5) - R_{Ex} \cdot t_{5y} \cdot \cos(\beta_5) - R_{Ey} \cdot t_{5y} \cdot \sin(\beta_5) - R_{Fx} \cdot (l_5 - t_{5x}) \cdot \\
& \cdot \sin(\beta_5) + R_{Fy} \cdot (l_5 - t_{5x}) \cdot \\
& \cdot \cos(\beta_5) + R_{Fx} \cdot t_{5y} \cdot \cos(\beta_5) + R_{Fy} \cdot t_{5y} \cdot \sin(\beta_5) + (F_t \cdot \cos(\delta) - F_n \cdot \\
& \cdot \sin(\delta)) \cdot (y_F - t_{5y}) - (F_t \cdot \sin(\delta) + F_n \cdot \cos(\delta)) \cdot (t_{5x} - x_F), \quad (66)
\end{aligned}$$

kde $\delta = 13,5^\circ$ je úhel odklonu klapky od osy vektoru b_5 a $\varphi_F = \delta - \beta_5$ je úhel sklonu klapky od osy x základního souřadnicového systému.

Těleso 6

Uvolnění pro těleso 6 a zobrazení sil na něj působících je na obr. 25.



Obr. 25

Pohybové rovnice jsou

$$m_6 a_{6x} = -R_{Fx} + R_{Gx} \quad (67)$$

$$m_6 a_{6y} = -R_{Fy} + R_{Gy} - m_6 \cdot g \quad (68)$$

$$\begin{aligned}
I_{6S6}\alpha_6 = & -R_{Fx} \cdot t_6 \cdot \sin(\beta_6) + R_{Fy} \cdot t_6 \cdot \cos(\beta_6) - R_{Gx} \cdot (l_6 - t_6) \cdot \sin(\beta_6) + R_{Gy} \cdot \\
& \cdot (l_6 - t_6) \cdot \cos(\beta_6) \quad (69)
\end{aligned}$$

Nyní rozepíšeme i dílčí členy matic. V daném případě dostaneme pro jednotlivé matice rovnice (27). Matice \mathbf{M} je globální matice hmotnosti

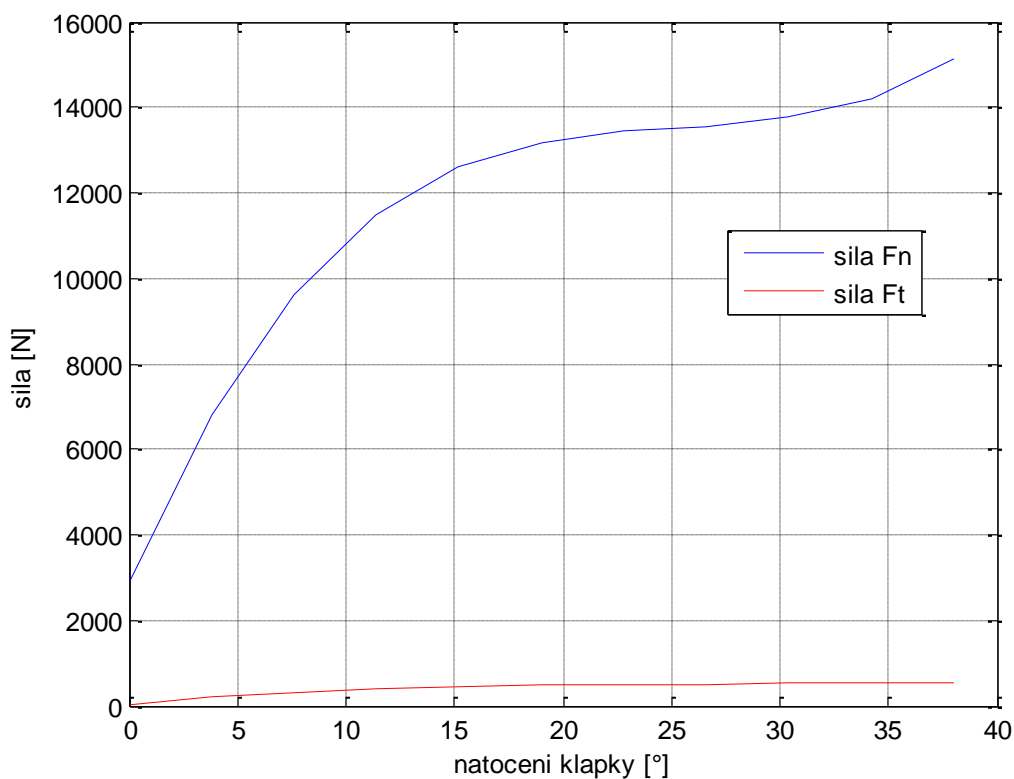
$$\mathbf{M} = \text{diag}([m_2, m_2, I_{2S_2}, m_3, m_3, I_{3S_3}, m_4, m_4, I_{4S_4}, m_5, m_5, I_{5S_5}, m_6, m_6, I_{6S_6}]), \quad (70)$$

\mathbf{a} je vektor zrychlení středů hmotnosti a úhlových zrychlení těles

$$\mathbf{a} = [a_{S_2x}, a_{S_2y}, \alpha_2, a_{S_3x}, a_{S_3y}, \alpha_3, a_{S_4x}, a_{S_4y}, \alpha_4, a_{S_5x}, a_{S_5y}, \alpha_5, a_{S_6x}, a_{S_6y}, \alpha_6]^T, \quad (71)$$

\mathbf{D} je distribuční matice účinků reakcí na tělesa sestavených dle Newton-Eulerových rovnic (viz program v příloze), \mathbf{R} je vektor reakčních sil

$$\mathbf{R} = [R_{Ax}, R_{Ay}, R_{Bx}, R_{By}, R_{Cx}, R_{Cy}, R_{Dx}, R_{Dy}, R_{Ex}, R_{Ey}, R_{Fx}, R_{Fy}, R_{Gx}, R_{Gy}]^T \quad (72)$$



Obr. 26

a konečně \mathbf{Q} je vektor akčních (zátěžných) sil

$$\mathbf{Q} = [0, -m_2g, M_2, 0, -m_3g, 0, 0, -m_4g, 0, F_x, F_y - m_5g, -F_x \cdot e_y - F_y \cdot e_x, 0, -m_6g, 0]^T, \quad (73)$$

kde

$$F_x = -F_t \cdot \cos(\varphi_F) + F_n \cdot \sin(\varphi_F) \quad (74)$$

$$F_y = +F_t \cdot \sin(\varphi_F) + F_n \cdot \cos(\varphi_F) \quad (75)$$

$$e_x = t_{5x} - x_F \quad (76)$$

$$e_y = y_F - t_{5y} \quad (77)$$

Sílu F_n a F_t jsme aproximovali polynomem třetího stupně. Jejich průběh je vykreslen na obr. 26 a představuje průběh aerodynamických sil podle sklopení klapky.

Z potřebných hnacích a působících sil neznáme již jen průběh hnacího momentu M_2 pohonu sklopení vztlakové klapky. Je proto nutné přistoupit k metodě inverzní dynamiky, ve které pro předepsaný pohyb klapky zjistíme potřebné silové účinky pohonu. Pak z rovnic (28) v programu DRESIC určíme zrychlení nezávislé souřadnice β_2 , které pak můžeme numericky integrovat na jeho rychlost a polohu.

6. Dynamický model Fowlerovy klapky pro inverzní úlohu

Nyní se budeme zabývat výpočtem hnací silové dvojice (hnacího momentu pohonu) pro mechanismus. Inverzní metoda vychází z metody přímé, kdy přidáme do vektoru neznámých \mathbf{R} také hnací silovou dvojici \mathbf{M}_2 . Avšak musíme připsat ještě jednu rovnici, aby soustava byla řešitelná.

Platí

$$\begin{aligned}\mathbf{M}\mathbf{a} - \mathbf{D}\mathbf{R} - \mathbf{k}\mathbf{M}_2 &= \mathbf{Q} \\ \mathbf{I}\mathbf{a} - \mathbf{V}_z \cdot \dot{\mathbf{z}} - \mathbf{V}_q \cdot \ddot{\mathbf{q}} &= \mathbf{a}_{qz} \\ \mathbf{J}_z \cdot \dot{\mathbf{z}} + \mathbf{J}_q \cdot \ddot{\mathbf{q}} &= -\mathbf{j}_{qz}\end{aligned}\tag{78}$$

kde \mathbf{k} je distribuční matice pro hnací silovou dvojici \mathbf{M}_2 získaná z matice \mathbf{D} . Do rovnice (78) musíme dosadit předepsaný průběh nezávislých \mathbf{q} a závislých souřadnice \mathbf{z} a rovnice (78) řešíme v každém předepsaném časovém okamžiku. Protože v daném případě je předepsaný pohyb rovnoměrný pohyb pohonu β_2 . Proto můžeme užít přímo program DRESIC s malou úpravou.

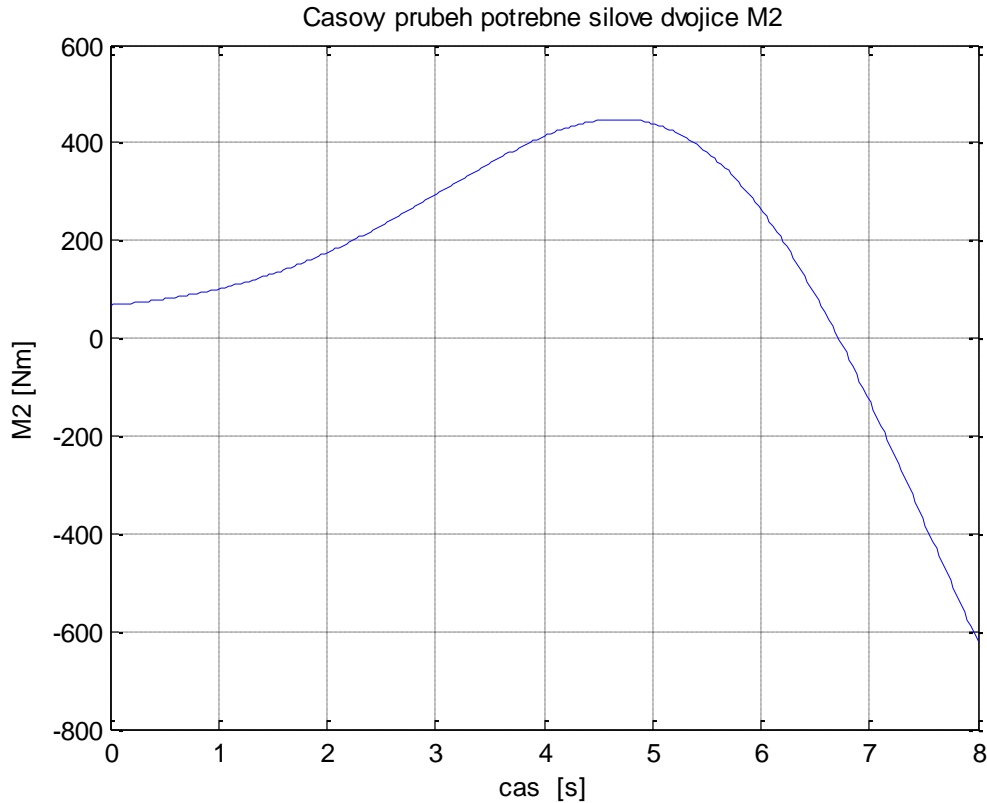
Aby mohl být proveden výpočet, doplníme 15. rovnici. Chceme, aby úhlová rychlost pohonu byla konstantní, tedy úhlové zrychlení nezávislé souřadnice ($\ddot{\beta}_2$) nulové.

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{0}\tag{79}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & -\mathbf{D} & -\mathbf{k} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\mathbf{V}_z & -\mathbf{V}_q \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{J}_z & \mathbf{J}_q \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{a} \\ \mathbf{R} \\ \mathbf{M}_2 \\ \dot{\mathbf{z}} \\ \ddot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q} \\ \mathbf{a}_{qz} \\ -\mathbf{j}_{qz} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}\tag{80}$$

Tyto rovnice se dále řeší a integrují užitím programu DRESIC.

Z inverzní úlohy jsme dostali výsledný průběh hnací silové dvojice \mathbf{M}_2 . Na obr. 27 je vykreslen průběh silové dvojice \mathbf{M}_2 v závislosti na čase. Hnací člen mechanismu se nyní pohybuje konstantní rychlostí, jak jsme si definovali přidáním dodatečné podmínky, tedy zrychlení nezávislé souřadnice β_2 je nulové. Klapka se vysune během 8 vteřin do požadované polohy pro přistání. Průběh hnací silové dvojice dále pomocí interpolace aproximujeme a zpětně dosadíme do přímé metody a ověříme její platnost.



Obr. 27

Vykreslený průběh silové dvojice M_2 je pro daný mechanismus a aerodynamické síly charakteristický. Je úzce spjat s rozměry členů mechanismu a aerodynamickými vlastnostmi profilu klapky a v neposlední řadě i s rychlostí proudícího vzduchu.

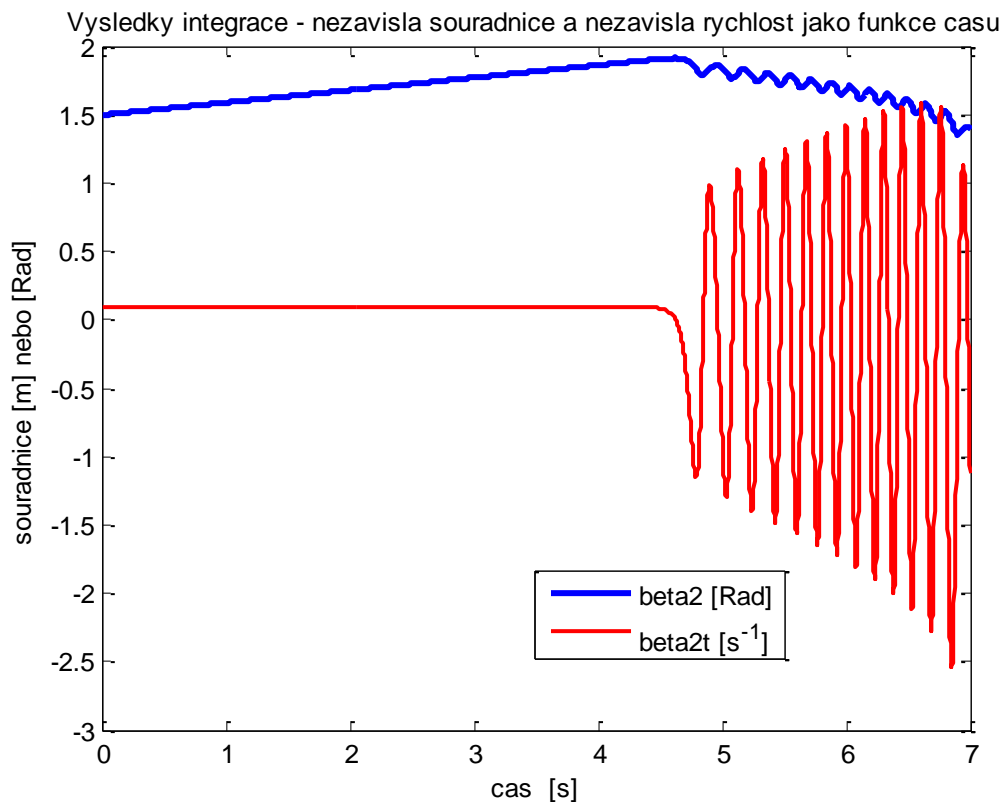
V první fázi je třeba vysouvání klapky pohánět. To je způsobeno větší odporovou silou na spodní straně klapky oproti aerodynamické na vrchní straně. V druhé fázi aerodynamická síla převládá nad odporovou a pohon naopak musí klapku brzdit. Ta je vytahována směrem ven z profilu křídla. V krajních pozicích je mechanismus opatřen dorazy pro ochranu mechanismu ale i pohonu.

Pro daný průběh bude nejvhodnější řízený hydraulický válec s převodem na torzní pohon. Druhou variantou je elektromotor s převodem. Oba tyto pohony by měly mít krouticí moment s převodem alespoň $1000Nm$. Ideálně však více pro případ vyšší přistávací rychlosti nebo krizových podmínek kupříkladu při nepříznivém počasí. Tím jsou navrženy základní parametry pohonu.

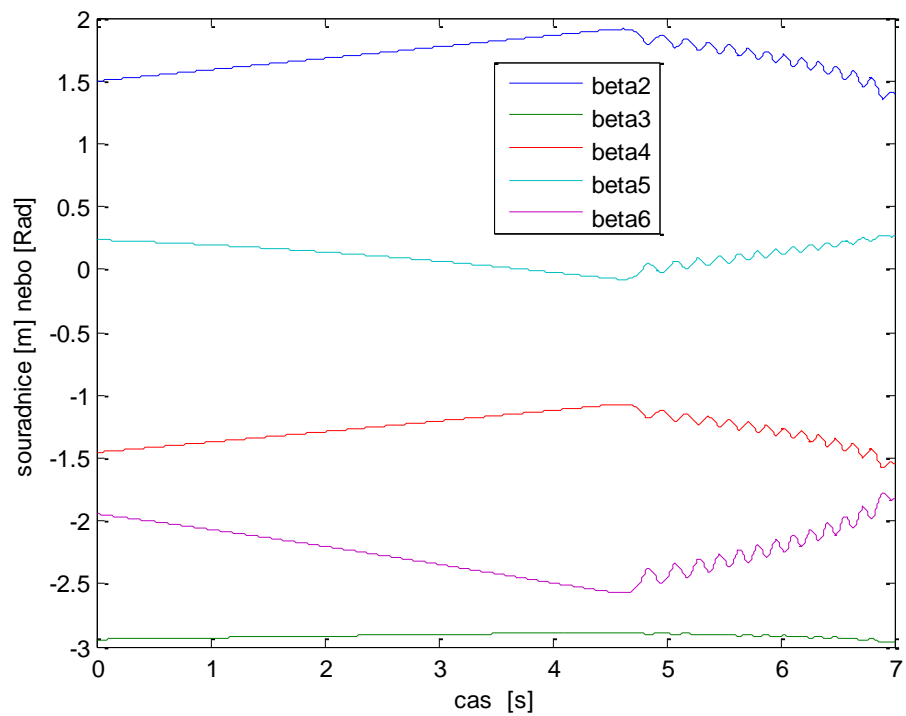
7. Spojení přímé a nepřímé dynamické metody pro ověření hnacího momentu

Nyní spojíme inverzní dynamickou úlohu s přímou dynamickou úlohou. Tedy vypočtený hnací moment vložíme zpátky do programu DRESIC a ověříme jeho reálnost spuštěním řešení přímé dynamické úlohy pro vypočtený průběh aproximovaného hnacího momentu z obr. 27.

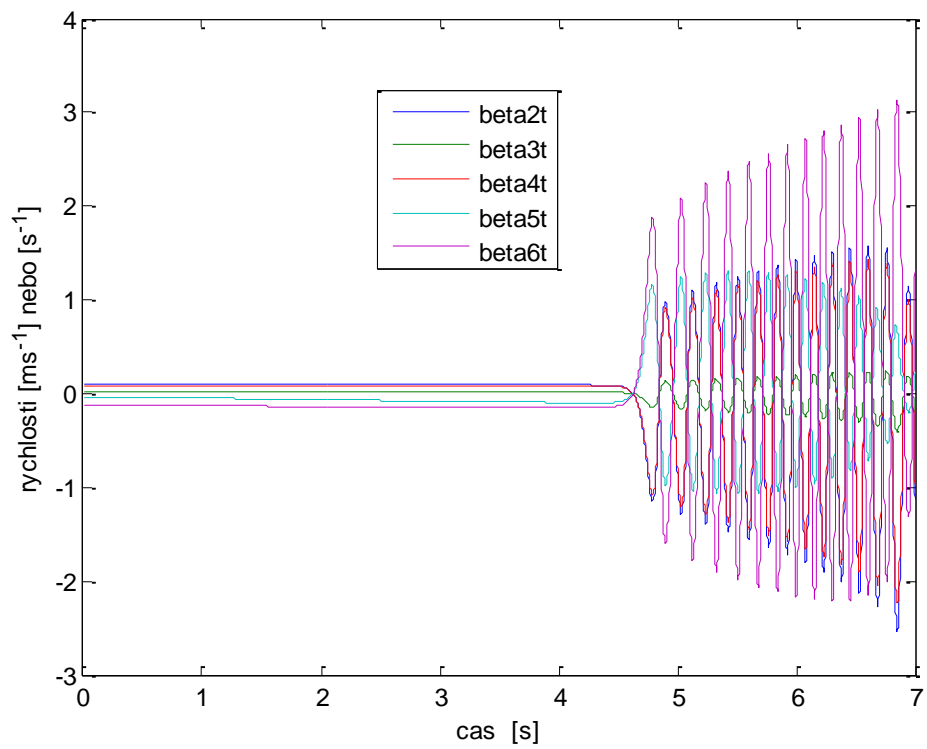
Řešení pohybu z programu DRESIC je na obr. 28-30. Je zřejmé, že požadovaný pohyb byl předepsaným průběhem pohonu realizován pro čas do 4,5s. Pak postupně nastaly oscilace, které se neustále zvětšovaly. To je známý problém nestability řešení přímé dynamické úlohy z řešení inverzní dynamické úlohy. Pro řešení na celém intervalu požadovaného času je třeba provést nějakou stabilizaci řešení. V praxi se to provádí zpětnovazebním řízením pohonu jako servomechanismu.



Obr. 26



Obr. 29

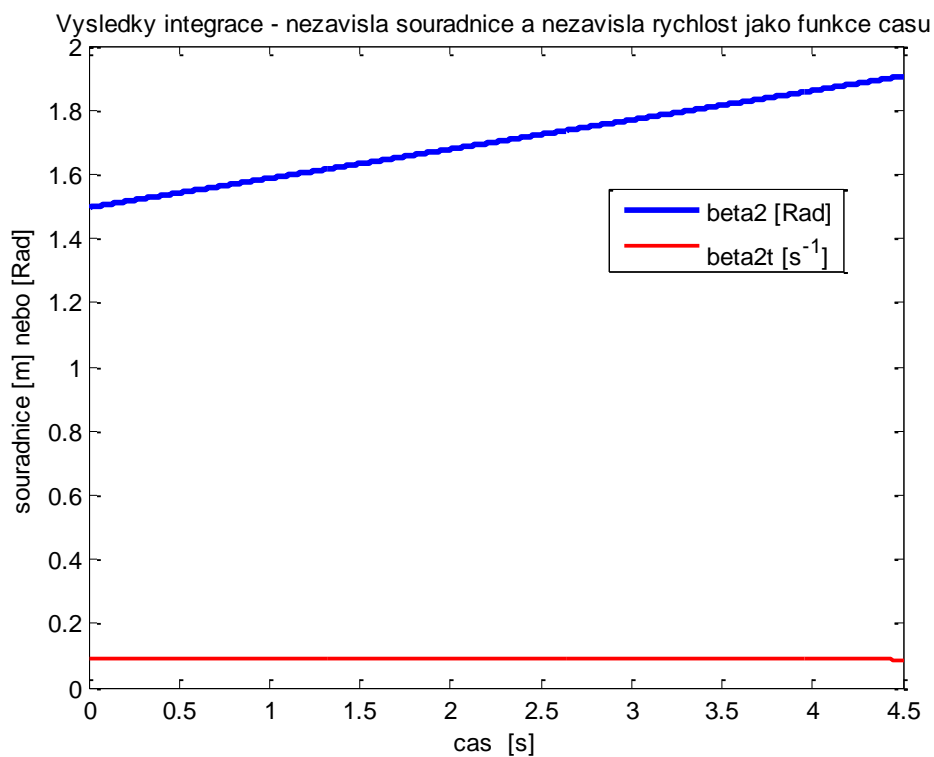


Obr. 30

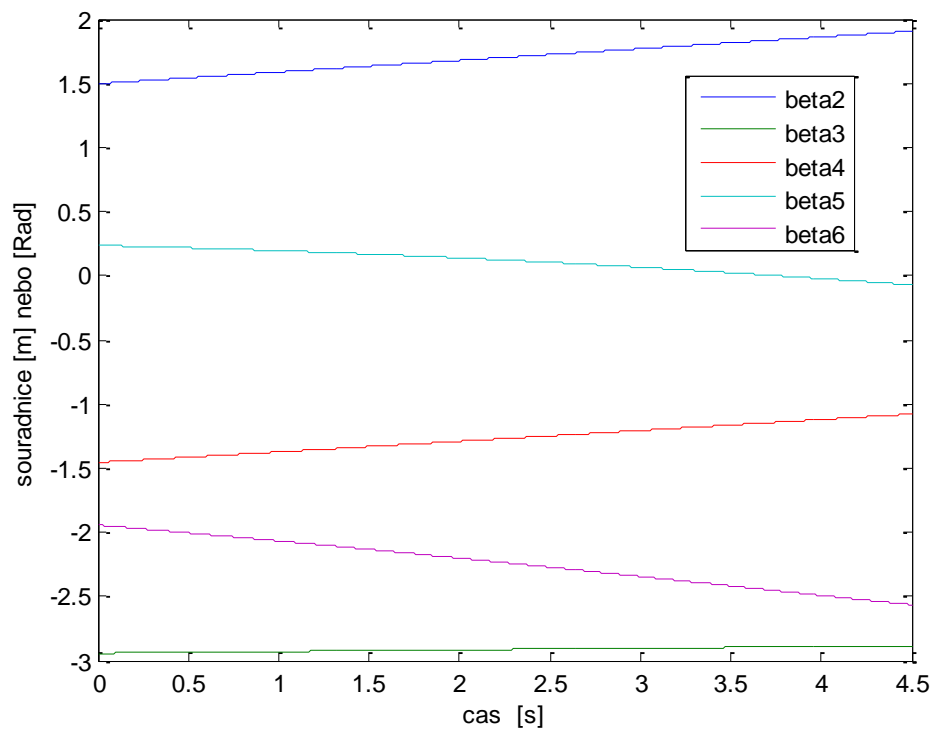
Pohyb mechanismu z vypočteného potřebného průběhu hnacího momentu můžeme provést v čase do 4,5s. Výsledky řešení přímé dynamické úlohy pro daný mechanismus jsou na obr. 31-35.

Na obr. 31 je průběh nezávislé proměnné a její rychlosti. Na obr. 32 a 33 jsou průběhy pohybu a rychlosti všech úhlových souřadnic vektorové metody užití pro popis pohybu daného mechanismu. Na obr. 34-35 je průběh reakčních sil v daném mechanismu. Vesměs jde o reakce v rotačních kloubech, které jsou potřebné pro dimenzování daného mechanismu.

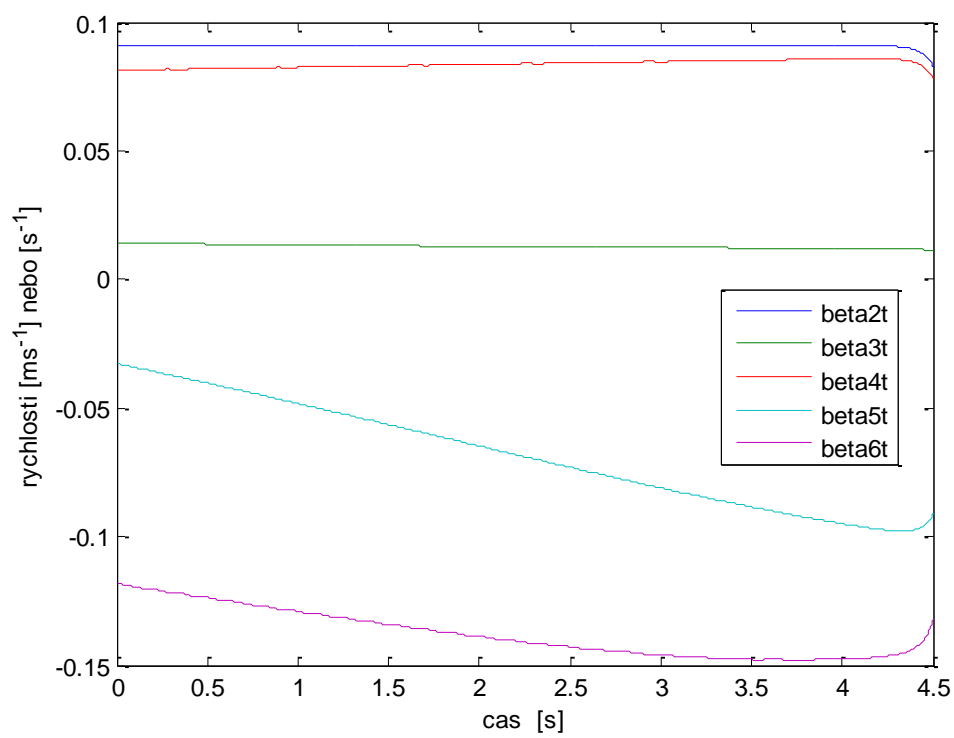
Všechny sestavené programy jsou v souborech programu MATLAB v příloze této práce.



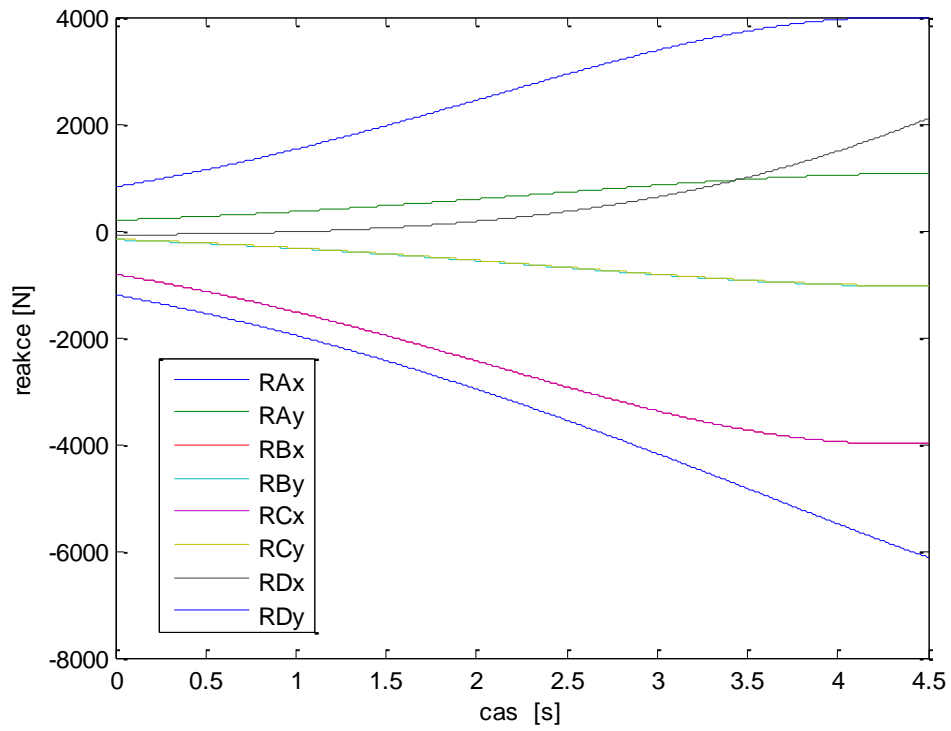
Obr. 31



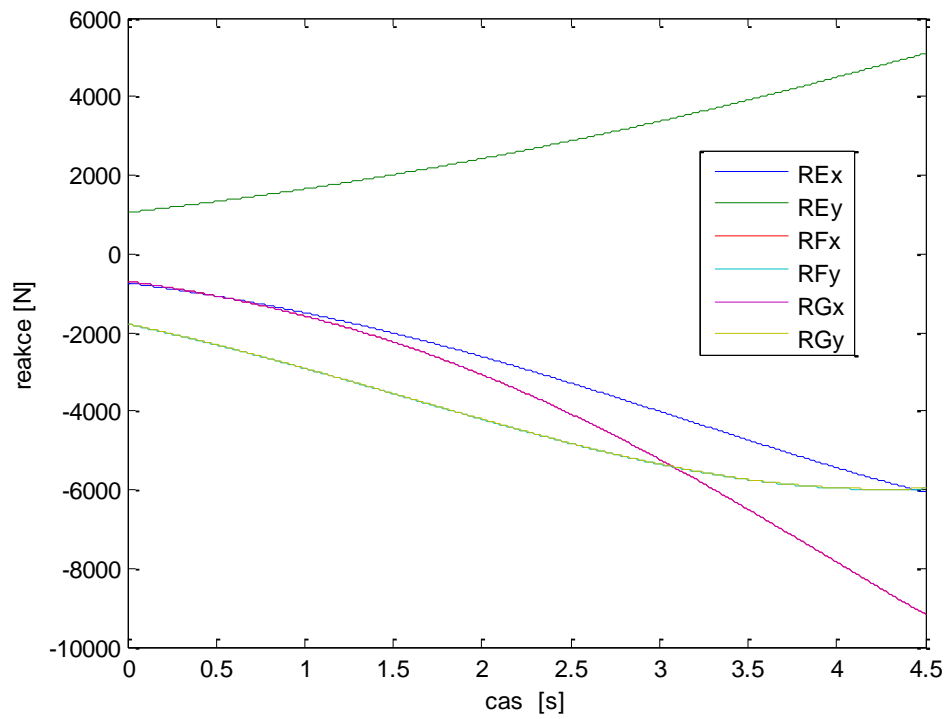
Obr. 32



Obr. 33



Obr. 34



Obr. 35

8. Závěr

V této práci byl popsán v kapitole 2 přehled základních druhů vztlakových klapek a jejich mechanismů. A to včetně těch klapek, které již nejsou v současnosti prakticky používány, ale měly v historii své opodstatnění.

Cílem této práce pak bylo pro vybraný mechanismus vztlakové klapky provést kinematické a dynamické řešení jejího mechanismu. Bylo vybráno řešení konkrétního Fowlerova mechanismu, který byl převzat z patentu [2].

Pro tento mechanismus byly v kapitole 3 sestaveny rovnice pro kinematické řešení vektorovou metodou a provedeno kinematické řešení mechanismu pro požadovaný pohyb sklopení klapky. Pak pro tento mechanismus byly v kapitole 4 sestaveny rovnice pro dynamické řešení přímé dynamické úlohy. Pro její dokončení chyběl průběh hnacího momentu pohonu. Proto byly v kapitole 5 sestaveny rovnice pro dynamické řešení inverzní dynamické úlohy na základě sestavených rovnic v kapitole 4. Z řešení inverzní dynamické úlohy byl určen časový průběh silové dvojice pohonu mechanismu. Konečně v kapitole 6 byla ověřena platnost řešení inverzní dynamické úlohy dosazením vypočteného hnacího momentu pohonu do přímé dynamické úlohy. Při tom se projevila nestabilita řešení, která je v praxi odstraňována užitím zpětnovazebního řízení pohonu jako servomechanismu. Řešení inverzní dynamické úlohy také umožnilo v kapitole 4 určit základní parametry pro návrh pohonu vztlakové klapky.

Tím byly naplněny všechny cíle dané práce.

9. Literatura

- [1] Valášek M., Bauma V., Šika Z.: *Mechanika B (skripta)*, Praha, ČVUT, 2004
- [2] European Patent Office. <http://www.epo.org/>. [online]. 8.4.2015 [cit. 2015-05-31]. Dostupné z: http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&II=0&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20090212&CC=WO&NR=2009019011A2&KC=A2
- [3] Stejskal V., Březina J., Kněžů J.: *Mechanika I*, Praha, ČVUT, 1998
- [4] cybermodelar. . [online]. [cit. 2015-06-01]. Dostupné z: <http://www.cybermodeler.com/special/flaps1.shtml>
- [5] RAF Cosford Ki-100-IB . www.j-aircraft.com. [online]. [cit. 2015-06-01]. Dostupné z: http://www.j-aircraft.com/walk/alan_kirby/cosford_raf_cosford_ki100ib.htm
- [6] Your Quick Guide To The 4 Types Of Flaps. *boldmethod*. [online]. [cit. 2015-06-01]. Dostupné z: <http://www.boldmethod.com/learn-to-fly/aircraft-systems/4-types-of-flaps/>
- [7] Light Sport Aircraft / Microlight – Skyleader Gallery. *skyfreedom AVIATION*. [online]. [cit. 2015-06-01]. Dostupné z: <http://www.skyfreedom.co.nz/gallery-videos.html>
- [8] Boeing 777 flaps vs Airbus 380 flaps . [homebuiltairplanes.com](http://www.homebuiltairplanes.com). [online]. [cit. 2015-06-01]. Dostupné z: <http://www.homebuiltairplanes.com/forums/aircraft-design-aerodynamics-new-technology/16521-boeing-777-flaps-vs-airbus-380-flaps-2.html>
- [9] Stejskal, V., Valášek, M.: *Kinematics and Dynamics of Machinery*, Marcel Dekker, New York 1996

10. Příloha

Na přiloženém CD je text této práce, všechny vytvořené programy pro kinematické řešení, pro přímou dynamickou úlohu, pro inverzní dynamickou úlohu, pro interpolaci sil, 3D modely členů mechanismu vytvořené v programu Autodesk Inventor 2013.