VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

PROGRAM NA VÝPOČET PRŮHYBU HŘÍDELE ELEKTRICKÉHO STROJE ZAHRNUJÍCÍ VLIV MAGNETICKÉHO TAHU

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE LUKÁŠ BLAHÚT
AUTHOR

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Lukáš Blahút

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Mechatronika (3906R001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Program na výpočet průhybu hřídele elektrického stroje zahrnující vliv magnetického tahu

v anglickém jazyce:

Programme for calculation of electric machine shaft deflexion with respect magnetic traction

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem je navrhnout program pro výpočet průhybu odstupňované hřídele používané v elektrických strojích.

Cíle bakalářské práce:

-volba výpočtové metody
- metoda stanoveni magnetického tahu v elektrickém stroji
-vytvoření programu pro výpočet průhybu hřídele

Seznam odborné literatury:

[1] Walter D. Pilky : Formulas for stress, strain, and structural matrices, university of Virginia, 1976, ISBN 0-471-52746-7
[2] Puchmajer P., Řezníček J., Švehla V.: Pružnost a pevnost pro VS I,skriptum, ČVUT Praha,1993, ISBN-80-01-00993-9
[3] Pavlovský H.: Interaktivní mechanický výpočet uzlu hřídel-ložisko, výpočtová zpráva OZ3163, VÚES Brno,1986

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Radek Vlach, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 22.11.2010

L.S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc. Ředitel ústavu	prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc. Děkan fakulty

Abstrakt

Práca sa zaoberá vytvorením počítačového programu pre výpočet priehybu rotorov elektrických strojov. Úvodná časť popisuje prostý ohyb a možnosti jeho výpočtu. Ďalej je definovaný magnetický ťah a začlenenie jeho vplyvu do výpočtu ohybu. Teoretická časť je ukončená detailným popisom metódy prenosových matíc. Praktická časť sa zaoberá tvorbou a popisom programu vytvoreného v jazyku c++/cli. Jednotlivé časti sú popísané z hľadiska užívateľa i programátora. V závere práce je pomocou vytvoreného programu spočítaný vzorový príklad a zhodnotene výsledky výpočtu.

Kľúčové slová

Mechanika, ohyb, magnetický ťah, metóda prenosových matíc, programovanie v C++

Abstract

Primary aim of work is to develop a computer program for calculating the deflection of the rotors of electrical machines. Introductory section describes the simple deflection and possibilities of calculating it. Further, there is defined magnetic pull and his impact on the calculation of shaft deflection. The theoretical part is completed by a detailed description of the method of transfer matrices. The practical part deals with the creation and description of the program created in C + + / CLI. Each part is described in terms of user and programmer. In conclusion, prime example is evaluated by created program and given results of calculation are discussed.

Keywords

Mechanics, bend, magnetic pull, transfer matrix method, programming in C++

Poďakovanie

Týmto by som sa chcel poďakovať vštkým ľudom, ktoý mi pomohli pri vypracovaní tejto práce. Osobitné poďakovanie patrí vedúcemu práce ng. Radek Vlach, Ph.D. za jeho rady, mojim rodičom a priateľke za trpezlivosť.

Bibliografická citace dle ČSN ISO 690

BLAHÚT, L. Program na výpocet pruhybu hrídele elektrického stroje zahrnující vliv magnetického tahu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 38 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Radek Vlach, Ph.D.

Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že túto bakalársku prácu „Program na výpočet pruhybu hrídele elektrického stroje zahrňující vliv magnetického ťahu“ som vypracoval sám pod vedením Ing. Radek Vlach, Ph.D. a všetky použité zdroje z ktorých som čerpal informácie, som uviedol v zozname literatúry.

V Brne dňa …..... .....

Lukáš Blahút

Obsah

ÚVOD 12

1. OHYB A MOŽNOSTI JEHO VÝPOČTU 13

1.1. Prostý ohyb 13

1.2. Metódy výpočtu 13
1.2.1. Priama integrácia 14
1.2.2. Využitie Castiglianovej vety 14
1.2.3. Metóda momentových plôch 15
1.2.4. Metóda počiatočných parametrov 15
1.2.5. Metóda prenosových matíc 15

1.3. Okrajové podmienky 15

2. MAGNETICKÝ ŤAH 16

2.1. Definícia 16

2.2. Výpočet 16

3. METÓDA PRENOSOVÝCH MATÍC 17

3.1. Základne princípy 17

3.2. Modelovanie ložísk 19

3.3. Magnetický ťah 21

4. PROGRAMOVÉ PROSTREDIE A PROGRAMOVACÍ JAZYK 22

4.1. Embarcadero Delphi 22

4.2. Microsoft visual studio 22

4.3. Matlab 22

5. PROGRAM NA VÝPOČET OHYBU ODSTUPŇOVANÉHO HRIADEĽA 23

5.1. Zadávanie vstupných premenných 24

5.2. Vytvorenie hriadeľa 25
5.2.1. Definovanie prvku hriadeľa 26
5.2.2. Vlastnosti prvku hriadeľa 26

5.3. Kontrola zadaných hodnôt 27

5.4. Výpočet 28
5.4.1. Určenie prenosovej matice 28
5.4.2. Násobenie matíc (kaskádová schéma) 28
5.4.3. Parciálny výsledok 29
5.4.4. Výsledok 29

5.5. Výsledky 30
5.5.1. Grafické zobrazenie 30
5.5.2. Reakcie vo väzbách 30
5.5.3. Textová forma dát 30

5.6. Porovnanie výsledkov 31

5.7. Rýchlosť výpočtu 34

6. ZÁVER 35

7. ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV 36

8. ZOZNAM OBRÁZKOV 37

9. ZOZNAM TABULIEK 37

10. ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV 38

11. ZOZNAM PRÍLOH 38

Úvod

V dnešnej dobe je použitie softvéru pri riešení zložitejších matematických a fyzikálnych problémov samozrejmosťou. Nie je tomu inak ani pri riešení priehybu rotorov elektrických strojov. Programov pre výpočet ohybu nosníkov a prútov je veľké množstvo. Avšak zahrnutie vplyvu magnetické ťahu vo väčšine týchto programov chýba alebo je riešené len okrajovo. Práve tvorba softvéru, ktorý zahŕňa tento vplyv na ohyb rotora je cieľom tejto práce.

Práca je členená do 6 kapitol. Prvá kapitola sa zaoberá prostým ohybom, jeho definíciou, základnými vzťahmi a možnosťami jeho výpočtu. Druhá kapitola popisuje magnetický ťah, dôvod jeho vzniku a jeho analógiu s mechanickými pružinami. Tretia kapitola je venovaná metóde prenosových matíc, základným pojmom a vzťahom. Taktiež rozoberá možnosti modelovania ložísk a magnetického ťahu pomocou prenosových matíc. Kapitola číslo štyri v skratke poukazuje na programové prostredia a jazyky vhodné pre tvorbu počítačového programu. Praktická časť je popísaná v kapitole päť v niekoľkých podkapitolách. Je tu vysvetlený princíp tvorby programu, zadávanie globálnych premenných, postup pri tvorbe hriadeľa, algoritmus výpočtu a zobrazenie výsledkov. Posledná časť tejto kapitoly porovnáva výsledky medzi samotným programom a dátami získanými z matlabu.

1. OHYB A MOŽNOSTI JEHO VÝPOČTU

1.1.Prostý ohyb

Prostý ohyb je označenie pre namáhanie prizmatického prútu pokiaľ :

- Sú splnené prútové predpoklady
- Priečne prierezy sa vzájomné natáčajú okolo osi ležiacej v priečnom priereze a následne deformujú
- Nenulovými zložkami výsledných vnútorných účinkov sú iba ohybové momenty $\vec{M}_{oy}, \vec{M}_{oz}$
- Deformácie prútu sú pre riešenie statickej rovnováhy prvku nepodstatné

Keďže prostý ohyb má dve nenulové zložky VVÚ, čím je jeho výpočet zložitejší než ostatné typy namáhania. Pre zjednodušenie budeme počítať s prípadom keď je jedna z týchto zložiek nulová, teda ohybový moment pôsobí len v jednej rovine.

Tenzor pretvorenia pre ohyb má tvar :

$$T_\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_z \end{pmatrix} \tag{1.1}$$

Pričom

$$\varepsilon_x = \frac{du(z)}{dx} \tag{1.2}$$

$$\varepsilon_y = \varepsilon_z = -\mu * \varepsilon_x \tag{1.3}$$

Pre ohyb platí, že rozloženie deformácie po priereze je nehomogénne, dĺžkové pretvorenia sú rozložené v priečnom priereze lineárne a uhlové pretvorenia sú nulové.

Medzi najdôležitejšie výpočtové vzťahy vychádzajúce z týchto definícii patrí diferenciálna rovnica priehybovej čiary a celková energia napätosti. Matematické spôsoby riešenia ohybu následne definujú rôzne spôsoby výpočtu ohybu.

1.2.Metódy výpočtu

Možností riešenia ohybu existuje viacero. V zásade platí, že čím presnejšia, tým zložitejšia na výpočet. Metódy zložité na výpočet si žiadajú komplikovanejšie algoritmy a komplikované algoritmy spotrebujú vyše času. Preto treba voliť medzi presnosťou výpočtu a časovou a matematickou náročnosťou.

1.2.1. Priama integrácia

Táto metóda vychádza z diferenciálnej rovnice priehybovej čiary :

$$\frac{d^2w(x)}{dx^2} = -\frac{M_y(x)}{EI_y} \tag{1.4}$$

Jej integráciou sa dostane rovnica natočenia :

$$\frac{dw(x)}{dx} = \varphi(x) = -\int \frac{M_y(x)}{EI_y}\,dx \tag{1.5}$$

Ďalšou integráciou je možné dostať :

$$w(x) = \int \varphi(x)dx \tag{1.6}$$

Po druhej integrácii dostaneme rovnicu priehybu po celej dĺžke. Táto obsahuje v sebe ešte dve integračné konštanty. Ich hodnotu je možné vypočítať pomocou okrajových podmienok.

Výhodou je možnosť určenia veľkosti priehybu a natočenia v ktoromkoľvek mieste počítaného hriadeľa (priehyb a natočenie sú funkciou polohy). Tiež je možné určiť maximálne hodnoty priehybu a natočenia bez poznania ich polohy. Naopak nevýhodou metódy je často krát matematická a časová náročnosť. Metóda v sebe nezohľadňuje vplyv posúvajúcej sily na priehyb a natočenie.

1.2.2. Využitie Castiglianovej vety

Prvá Castiglianova veta vraví : Ak na lineárne pružné teleso pôsobí silová sústava, potom posuv w_i v pôsobisku sily F_i po jej nositelke je daný ako parciálna derivácia celkovej energie napätosti telesa podľa tejto sily. Zapísané do rovnice :

$$w_i = \frac{\partial W}{\partial F_i} \tag{1.7}$$

Celková energia napätosti má tvar :

$$W = \frac{1}{2E}\int_0^l \frac{M_{oy}^2(x)}{J_y(x)}\,dx + \frac{\beta}{2G}\int_0^l \frac{T^2(x)}{S(x)}\,dx \tag{1.8}$$

A dosadením (1.5) do (1.4) je možné získať vzťah pre výpočet priehybu v definovanom mieste *i*:

$$w = \frac{1}{E}\int_0^l \frac{M_{oy}(x)}{J_y(x)} \cdot \frac{\partial M_{oy}(x)}{\partial F_i}\,dx + \frac{\beta}{G}\int_0^l \frac{T(x)}{S(x)} \cdot \frac{\partial T(x)}{\partial F_i}\,dx \tag{1.9}$$

Výhodou riešenia je možnosť získania deformačných charakteristík v definovanom bode. Na jednej strane výhoda, na druhej nevýhoda. Nedovoľuje vypočítať priebeh týchto charakteristík po celej dĺžke prútu. Okrem toho zahŕňa v sebe vplyv posúvajúcej sily a riešenie je matematicky jednoduchšie ako v prípade priamej integrácie. Avšak metóda je použiteľná len v lineárnej pružnosti.

1.2.3. Metóda momentových plôch

Často krát tiež nazývaná Mohrova metóda momentových plôch.

Z výpočtového hľadiska ide o rovnakú metódu ako 1.2.1. Rozdiel prichádza v chápaní okrajových podmienok. Fiktívny nosník je taký nosník, ktorý svojimi fiktívnymi statickými okrajovými podmienkami simuluje geometrické okrajové podmienky skutočného nosníka [1].

1.2.4. Metóda počiatočných parametrov

Metóda vychádza z obecného riešenia diferenciálnych rovníc. Jej podstatou je transformácia okrajového problému na problém počiatočný. Integračné konštanty sa vyjadrujú pomocou stavových veličín v počiatku súradnicového systému – počiatočných parametrov [1].

1.2.5. Metóda prenosových matíc

Metóda prenosových matíc je maticovou formou metódy počiatočných parametrov. Je mimoriadne efektívnym prostriedkom pre riešenie úloh s čiastkovými prvkami radenými do série. Vo svojej podstate je metóda presná, ide ju však v mnohých prípadoch použiť ako veľmi efektívnu metódu približnú [1].

1.3.Okrajové podmienky

Väčšina metód nedefinuje dostatok rovníc pre množstvo neznámych s ktorými pracuje. Pre doplnenie týchto rovníc je potrebné stanoviť okrajové podmienky. Pre ohyb je možné definovať viaceré typy okrajových podmienok od votknutého konca, rôznych typov podpier a pružných uložení. Pre rotor je však typické zakončenie hriadeľa v podobe voľných koncov, teda okrajové podmienky budú v nasledovnom tvare :

$$M_z(0) = M_z(l) = 0 \tag{1.10}$$

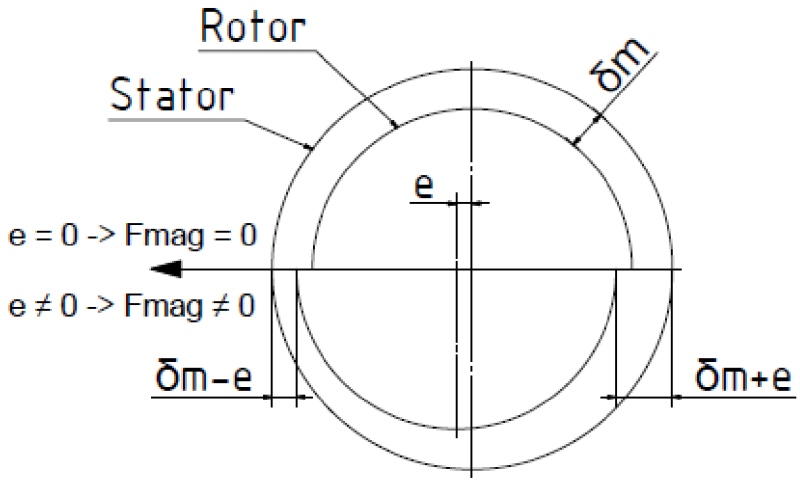
$$T_y(0) = T_y(l) = 0 \tag{1.11}$$

Pre programové spracovanie som zvolil metódu prenosových matíc. Ide o metódu veľmi vhodnú pre spracovanie výpočtovou technikou, keďže výpočet je založení na spracovaní veľkého množstvá matíc nízkeho rádu. Metóda bude bližšie popísaná v kapitole 3.

2. MAGNETICKÝ ŤAH

2.1.Definícia

Magnetická sila je výslednica radiálnych síl, ktoré vznikajú dôsledkom nerovnomerne veľkej vzduchovej medzery δ_m medzi rotorom a statorom pôsobením magnetického ťahu. Odchýlka medzi osou rotora a statora e je súčtom viacerých faktorov ako výrobné nepresnosti či ohyb rotora spôsobený vlastnou tiažou.



Obr. 1 : Vychýlenie osi rotora od osi statora

2.2.Výpočet

Magnetickú silu je možné definovať ako :

$$F_{mag} = C * \int_0^{2\pi} \frac{\cos\varphi \, d\varphi}{(1 + e * \cos\varphi)^2} \tag{2.1}$$

Na základe rovnice (2.1) je v publikácii [2] vyjadrená analógia s mechanickými pružinami.

$$F_{mag} = c_{mag} * e \tag{2.2}$$

$$F_{mech} = -k * x \tag{2.3}$$

Pri porovnaní matematického zápisu sily v pružine so zápisom magnetickej sily je jasná analógia medzi oboma typmi – veľkosť odchýlky je priamo úmerná pôsobiacej sile. Jediný rozdiel medzi oboma silami je ich výsledný smer, ktorý je opačnej orientácie.

3. METÓDA PRENOSOVÝCH MATÍC

3.1.Základne princípy

Základným stavebným prvkom MPM je prenosová matica. Ide o maticu, ktorá transformuje stavový vektor počítaných premenných (priamo závislých na type počítanej úlohy) z počiatku do obecného miesta. Prenosový vzťah je možné zapísať vo všeobecnom tvare zapísať nasledovne :

$$\{v\}_x = [C]_{x,0} * \{v\}_0 \tag{3.1}$$

Prenosovú maticu je možné odvodiť pre väčšinu systémov, ktoré sú popísatelné diferenciálnymi rovnicami. Takéto systémy sa vyskytujú v mechanike, optike, akustike či elektrotechnike.

Pre prípad mechaniky je možné definovať stavový vektor :

$$\{v\}^T = \{v, v', M_z, T_y, w, w', M_y, T_z, u, N, \varphi_k, M_k\} \tag{3.2}$$

Tento vektor popisuje ohyb v dvoch rovinách, ťah (tlak) a šmyk. Vhodným výberom premenných je možné definovať prosté typy namáhania alebo ich kombinácie. Stavový vektor pre prostý ohyb pozostáva z nasledovných premenných :

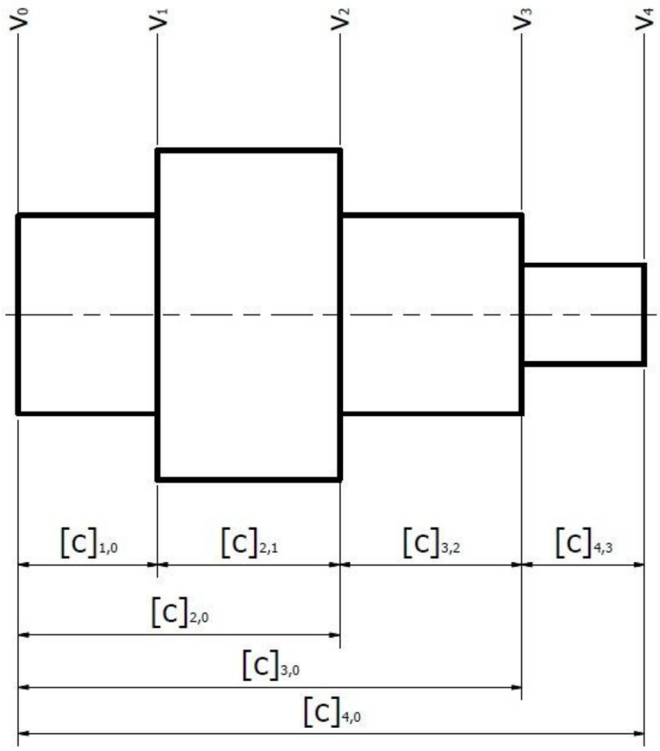
$$v_{ohyb}^T = \{v, v', M_z, T_y\} \tag{3.3}$$

Prenosová matica pre prostý ohyb má tvar :

$$C = \begin{bmatrix} 1 & x & x^2/2 & x^3/3 \\ 0 & 1 & x & x^2/2 \\ 0 & 0 & 1 & x \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.4}$$

Pre potreby výpočtu je matica (3.4) rozšírená na maticu vyššieho rádu. Pribudnuté stĺpce definujú pôsobiace silové zaťaženie.

Pre výpočet ohybu rotora je potrebné stanoviť prenosovú maticu medzi jeho ľavým a pravým koncom. Spôsob tvorby výslednej prenosovej matice je popísaný na tomto jednoduchom hriadeli.



Obr. 2 : Náčrt jednoduchého hriadeľa

Rozdelením hriadeľa na úseky so známymi prenosovými maticami je možné zapísať nesledujúce vzťahy :

$$\{v\}_1 = [C]_{1,0} * \{v\}_0 \tag{3.5a}$$

$$\{v\}_2 = [C]_{2,1} * \{v\}_1 \tag{3.5b}$$

$$\{v\}_3 = [C]_{3,2} * \{v\}_2 \tag{3.5c}$$

$$\{v\}_4 = [C]_{4,3} * \{v\}_3 \tag{3.5d}$$

Následne je možné dosadiť vzťah (3.5a) do (3.5b) a získať prenosovú maticu $[C]_{2,0}$

$$\{v\}_2 = [C]_{2,1} * [C]_{1,0} * \{v\}_0 = [C]_{2,0} * \{v\}_0 \tag{3.6}$$

Takýmto spôsobom sa postupne získa prenosový vzťah medzi ľavým a pravým koncom hriadeľa :

$$\{v\}_4 = [C]_{4,3} * [C]_{3,2} * [C]_{2,1} * [C]_{1,0} * \{v\}_0 = [C]_{4,0} * \{v\}_0 \quad (3.7)$$

Zobecnením tohto vzťahu je možné definovať výslednú prenosovú maticu $[C]_{n,0}$ pre systém s n-členmi :

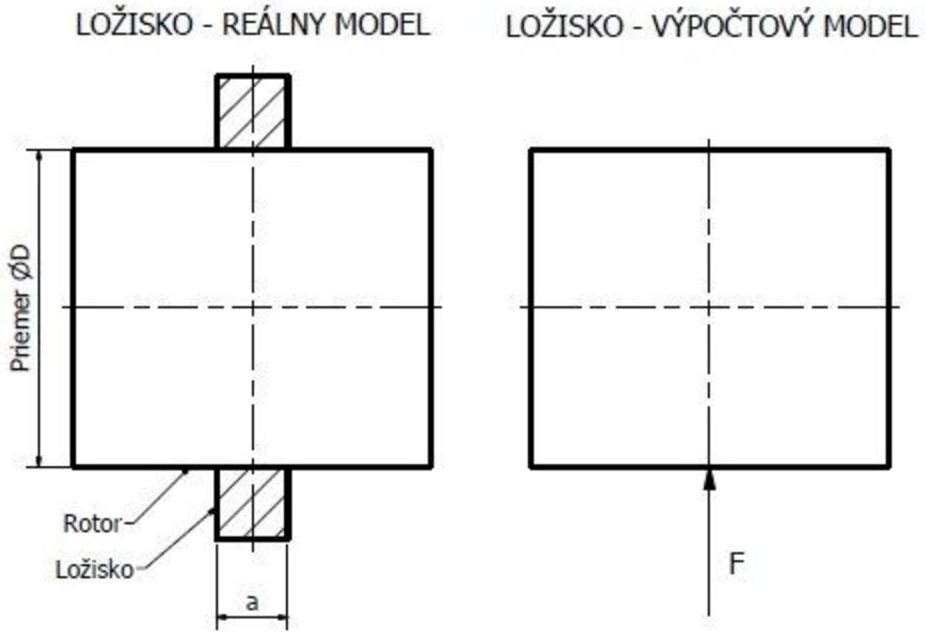
$$\{v\}_n = [C]_{n,n-1} * [C]_{n-1,n-2} * \dots * [C]_{2,1} * [C]_{1,0} * \{v\}_0 = [C]_{n,0} * \{v\}_0 \quad (3.8)$$

Pri známej prenosovej matici celého hriadeľa je už jednoduché za pomoci okrajových podmienok dopočítať $\{v\}_0$. Následne je možné tento stavový vektor transformovať cez prenosové matice jednotlivých úsekov po celej jeho dĺžke a určiť výsledné charakteristiky celého hriadeľa.

3.2.Modelovanie ložísk

Ložiská predstavujú pre každý hriadeľ špecifický typ podpory. Existuje veľké množstvo analytických modelov ložiska. Pre prípad ohybu rotora je potrebný taký typ, ktorý dostatočne opisuje správanie systému avšak zbytočne nezvyšuje výpočtovú zložitosť a presnosť celého systému.

Najjednoduchším spôsobom je náhrada ložiska pružnou podporou. Táto náhrada definuje ložisko ako pružinu pôsobiacu v osi ložiska na hriadeľ. I keď sa pôsobenie sily obmedzí na jediný bod oproti pôsobeniu na reálnej šírke ložiska *a*, pri väčšine prípadov je pomer šírky ložiska a hriadeľa zanedbateľný.

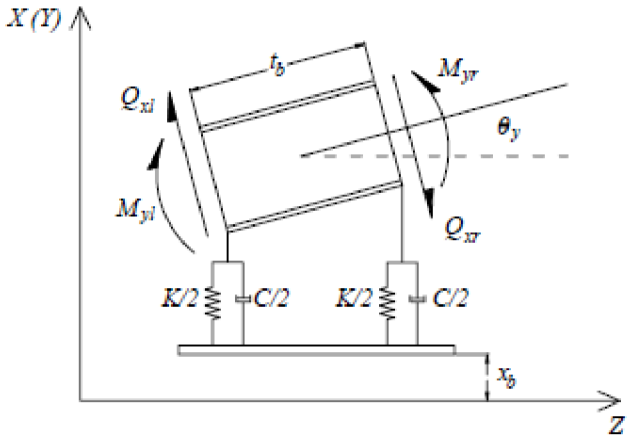


Obr. 3 : Výpočtový model ložiska

Náhrada je matematicky jednoduchá a relatívne presná. Pre prenosovú maticu platí vzťah :

$$[c] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ k & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.9}$$

Existujú aj ďalšie, zložitejšie metódy modelovania ložiska.



Obr. 4 : Komplexnejší model ložiska [3]

Z modelu je viditeľný rozdiel oproti jednoduchej pružnej podpore. Tento model počíta s reálnou šírkou ložiska ako i s jeho tlmením. Takéto modely sú potrebné pre úlohy s vysokou presnosťou akou je napríklad výpočet rotora hydrogenerátora.

Pre účely tejto práce však postačuje jednoduchý model ložiska (pružná podpora). Jedinou neznámou je tuhosť pružiny. Táto hodnota sa dá zistiť experimentálne. Pokiaľ chceme presnejšie výsledky je možné namiesto jednej pružnej podpory definovať 2 s odstupom šírky ložiska a polovičnou hodnotou tuhosti pružiny.

3.2.1.1.Určenie reakcie vo väzbách

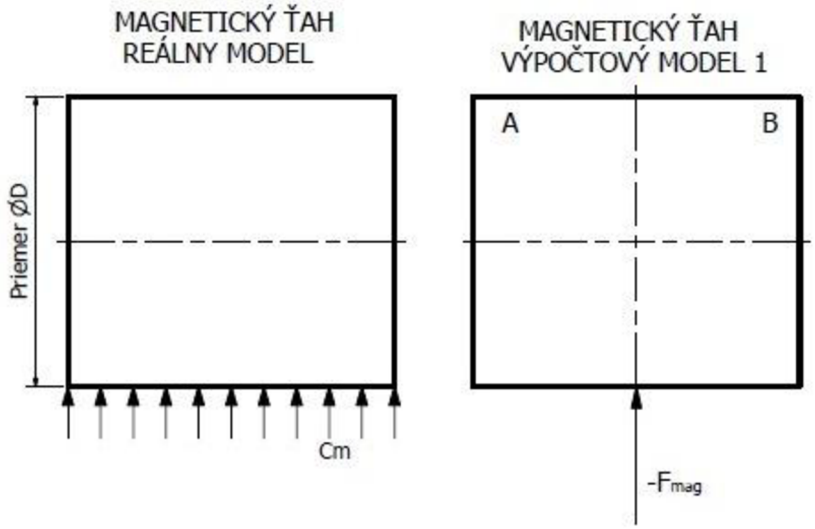
Pre rotory sa väzbami rozumejú práve ložiská. Reakcia v ložisku je rozdiel posúvajúcej sily medzi jeho ľavým a pravým koncom. To je možné definovať nasledovným vzťahom :

$$\{v\}_r = [C]_{x,x-1} * \{v\}_{x-1} - \{v\}_{x-1} \tag{3.10}$$

Reakcie je rovná veľkosti posúvajúcej sily v stavovom vektore $\{v\}_r$.

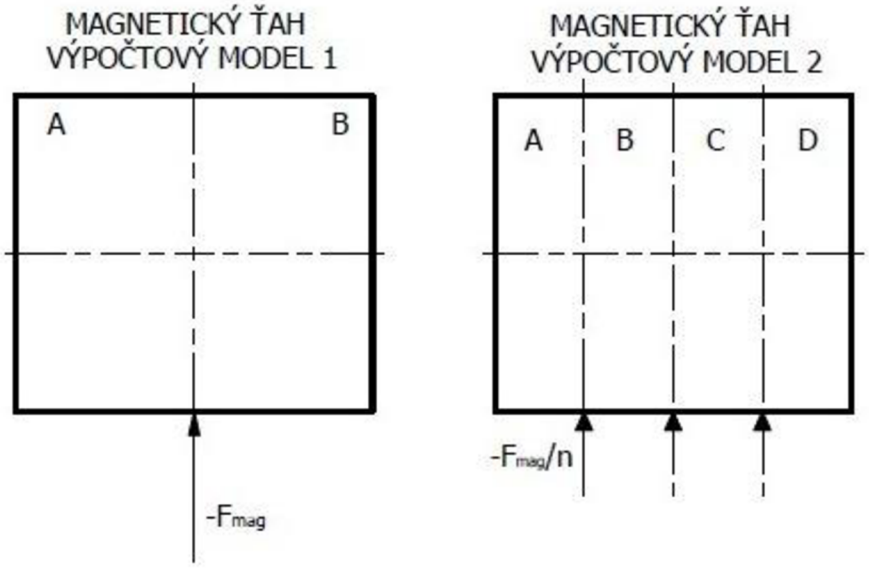
3.3.Magnetický ťah

Ako bolo spomenuté v predchádzajúcej kapitole, magnetický ťah je možné analogicky modelovať ako jednoduchú pružinu. Jediný rozdiel medzi oboma prípadmi je v smere pôsobiacej sily. Tento fakt sa dá ošetriť použitím zápornej hodnoty magnetického ťahu.



Obr. 5 : Výpočtový model mag. ťahu

Na rozdiel od ložiska, je oblasť pôsobenia magnetického ťahu nezanedbateľná vzhľadom k celkovej dĺžke hriadeľa. Pre zvýšenie presnosti výsledku je možné oblasť rozdeliť na viacero dielov a magnetický ťah rozdeliť rovnomerne medzi tieto diely.



Obr. 6 : Presnejší model mag. ťahu

4. PROGRAMOVÉ PROSTREDIE A PROGRAMOVACÍ JAZYK

Pred samotným vytvorením programu je potrebné zvoliť si vhodné programové prostredie a samotný programovací jazyk. Možností je v dnešnej dobe mnoho, v skratke sú uvedené základne možnosti, ktoré programátor v dnešnej dobe má.

4.1.Embarcadero Delphi

Pôvodne patriace firme Borland, Delphi patrí medzi vývojové prostredie, ktoré plne využíva a snaží sa zdokonaliť RAD (Rapid application development). Ide o systém uprednostňujúci priamu tvorbu a následnú úprava programu podľa potrieb pred jeho zdĺhavým návrhom a prípravou. K tomuto sú prispôsobené mnohé knižnice a predprogramované časti kódu.

4.2.Microsoft visual studio

Microsoft visual studio je vývojové prostredie (IDE) od Microsoftu, používané pre vývoj konzolových aplikácii s grafickým rozhraním spolu s aplikáciami Windows Forms, webovými stránkami, webovými aplikáciami a webovými službami ako v strojovom kóde, tak v riadenom kóde na platformách Microsoft Windows, Windows Mobile, .NET, .NET Compact Framework a Microsoft Silverlight. [1]

Medzi podporované jazyky patrí C/C++, VB.NET a C#. Okrem týchto vstavaných jazykov, je vďaka architektúre programu možné doinštalovať ďalšie jazyky ako F# alebo Python.

4.3.Matlab

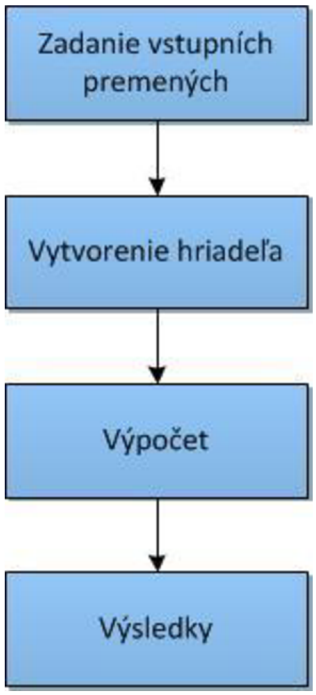
Matlab je programové prostredie a skriptovací jazyk pre vedecko - technické numerické výpočty, modelovanie, návrhy algoritmov, počítačovú simuláciu, analýzu a prezentáciu dát, meranie a spracovanie signálu, návrhy riadiacich a komunikačných systémov. [2]

Matlab nie je primárne určený pre tvorbu užívateľských aplikácii avšak oproti ostatným prostrediam vyniká práve v možnostiach výpočtu.

Pre túto prácu som zvolil Microsoft visual studio 2010 express s programovacím jazykom C++/Cli, čo je špeciálne upravená verzia jazyka C++ pre MVS zjednodušujúca jeho syntaxi.

5. PROGRAM NA VÝPOČET OHYBU ODSTUPŇOVANÉHO HRIADEĽA

Základnou myšlienkou bolo vytvorenie programu, ktorý interaktívnou formou umožní užívateľovi vytvoriť hriadeľ z typizovaných blokov. V ďalších kapitolách budú bližšie priblížené jednotlivé časti programu spolu s najvýznamnejšími postupmi a algoritmami.



Obr. 7 : Postupnosť programových blokov

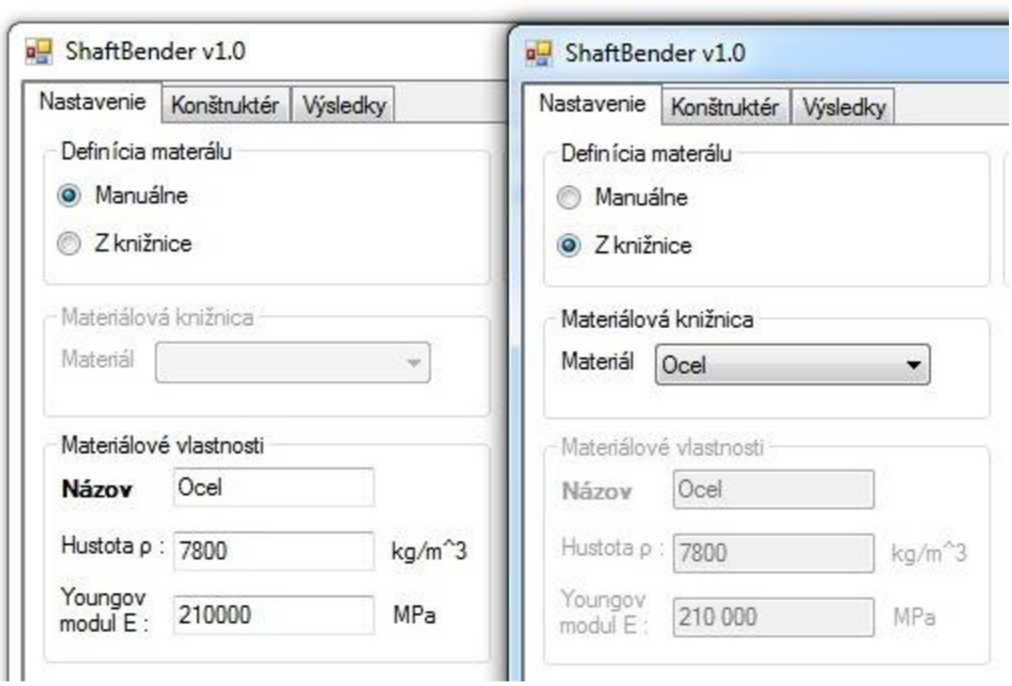
Snahou bolo aby vytvorený program bol variabilný a bola možnosť dopĺňať do neho časom ďalšie funkcie bez nutnosti jeho celkovej reštrukturalizácie.

Program bol nazvaný ShaftBender, čo v preklade znamená „ohýbač hriadelov“.

5.1.Zadávanie vstupných premenných

Všetky dielce hriadeľa sú špecifické. Majú rôzne dĺžky a priemery a ich ďalšie parametre závisia na charaktere dielca. Avšak niektoré vlastnosti sú spoločné pre celý hriadeľ. Medzi takéto vlastnosti patrí napr. materiál alebo uhlová rýchlosť pri rotujúcich hriadeľoch. Pre zadávanie a výber vlastností charakterizujúcich cely hriadeľ slúži záložka „Nastavenia“.

Základnou voľbou na tejto záložke je výber materiálu. Tento je možné zvoliť z ponuky, kde každý materiál má preddefinované vlastnosti ako hustota a youngov modul alebo zadať tieto hodnoty manuálne.

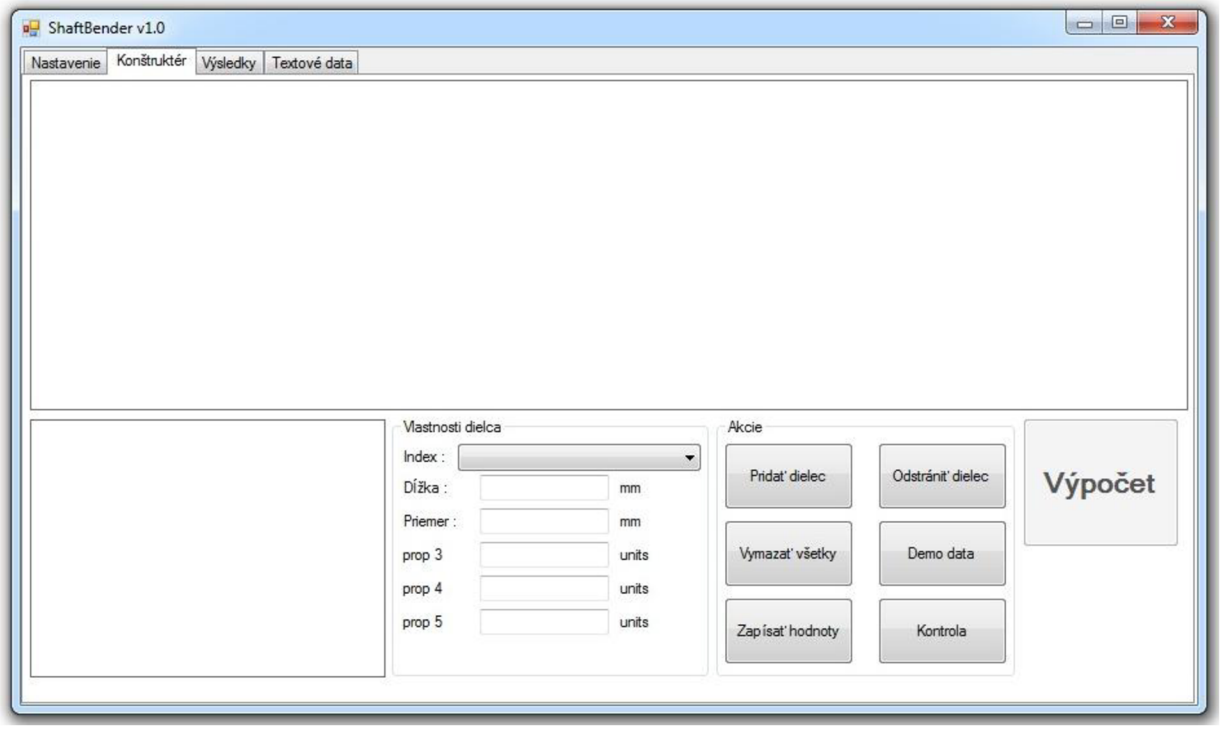


Obr. 8 : Zadávanie materiálových premenných

Ďalšou voľbou je výber medzi statickým a dynamickým charakterom hriadeľa. Pre dynamický, teda rotujúci je potrebné zadať hodnotu uhlovej rýchlosti Ω.

5.2. Vytvorenie hriadeľa

Vytvorením hriadeľa sa myslí jeho zloženie z jednotlivých blokov a zadanie ich parametrov. Tento postup prebieha interaktívne medzi užívateľom a intuitívnym užívateľským prostredím.



Obr. 9 : Užívateľské prostredie na záložke Konštruktér

Celý tento proces prebieha na záložke „Konštruktér“. Vrchnú časť plochy tejto záložky tvorí prvok Flowlayoutpanel. Tento prvok dynamicky ukladá prvky v horizontálnom alebo vertikálnom smere. To znamená, že nie je potrebné prepočítavať polohu jednotlivých prvkov alebo iným spôsobom zaisťovať rovnomerné rozloženie riadkov a stĺpcov. Prvok, ktorý je vložený do panelu sa nazýva child (dieťa). Jeho charakter a vlastnosti sú plne voliteľné samostatne ako aj globálne.

5.2.1. Definovanie prvku hriadeľa

Typizovaný dielec hriadeľa je definovaný pomocou prvku picturebox. Tieto sa dynamicky vkladajú do flowlayoutpanela cez tlačidlo „Pridať dielec“. Každé kliknutie vygeneruje nový dielec, ktorý sa zaradí na koniec aktuálne tvoreného hriadeľa.

Označený prvok je možné odstrániť pomocou tlačidlo „Odstrániť dielec“. Kliknutím na toto tlačidlo sa zavolá funkcia, ktorá nielen zmaže dielec, ale aj odstráni zadané dáta.

5.2.2. Vlastnosti prvku hriadeľa

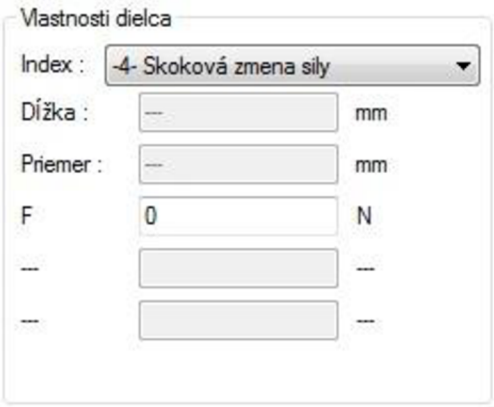
Vložený dielec hriadeľa je automaticky spojení s polom hodnôt (ďalej spomínaným ako matica premenných) o rozmere 24x7. Počet riadkov definuje množstvo dielcov hriadeľa. Tie boli obmedzené kvôli prehľadnosti na maximálny počet 24ks. Stĺpce sú naopak definované fixne podľa tab. 1

Stĺpec	Význam
0	Index dielca hriadeľa
1	Dĺžka dielca hriadeľa
2	Priemer dielca hriadeľa
3-5	Ďalšie parametre dielca hriadeľa
6	Pomocná premenná

Tab. 1 : Význam jednotlivých premenných v poli

Nultý stĺpec označuje typ dielca hriadeľa, teda určuje charakter prenosovej matice. Prvý a druhý stĺpec popisuje dĺžku a priemer dielca, tretí až piaty je rezervovaný pre ďalšie parametre akými sú tuhosť pružiny, hmotnosť prídavnej hmoty alebo moment zotrvačnosti hmotného disku. Posledný stĺpec slúži ako pomocná premenná pri tvorbe hriadeľa.

Po označení dielca hriadeľa je možné meniť jeho vlastnosti. Typ dielca sa volí pomocou rolovacej ponuku prvku combobox. Táto obsahuje celkovo 13 rôznych preddefinovaných typov hriadeľa. Po zvolení nami požadovanej hodnoty sa prispôsobia polia pod comboboxom tak, aby bolo možné zadať len potrebné parametre. Pokiaľ dielec v niektorom prípade nedefinuje premennú, je možnosť úpravy zadávacieho pola odobratá. Napr. pre prvok skokovej zmeny priečnej sily je jedinou premennou priečna sila. Polia pre ostatné prvky sa uzamknú.

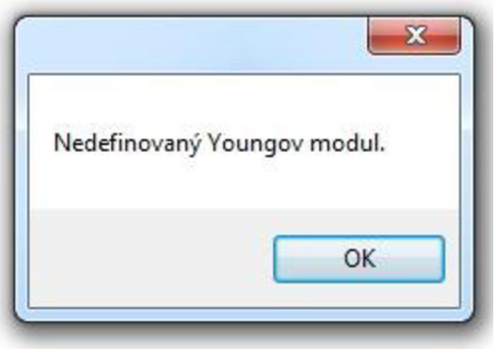


Obr. 10 : Obmedzenie možností zadávania premenných

Prenos hodnôt do matice premenných sa vykonáva stlačením tlačidla „Zapísať hodnoty“. V prípade, že užívateľ zadal hodnoty v nesprávnom formáte, program ho na to upozorní a dáta neuloží.

5.3. Kontrola zadaných hodnôt

Pred samotným výpočtom je potrené skontrolovať úplnosť zadaných dát. Často krát sa stane, že užívateľ zabudne vyplniť niektorú hodnotu. Pre tento prípad sa v záložke „Konštruktér“ nachádza ďalšie tlačidlo s názvom „Kontrola“. Po jeho stlačení sa pole zadaných hodnôt postupne skontroluje a pri narazení na nedefinovanú premennú je užívateľ upozornení na túto skutočnosť pomocou dialógového okna.

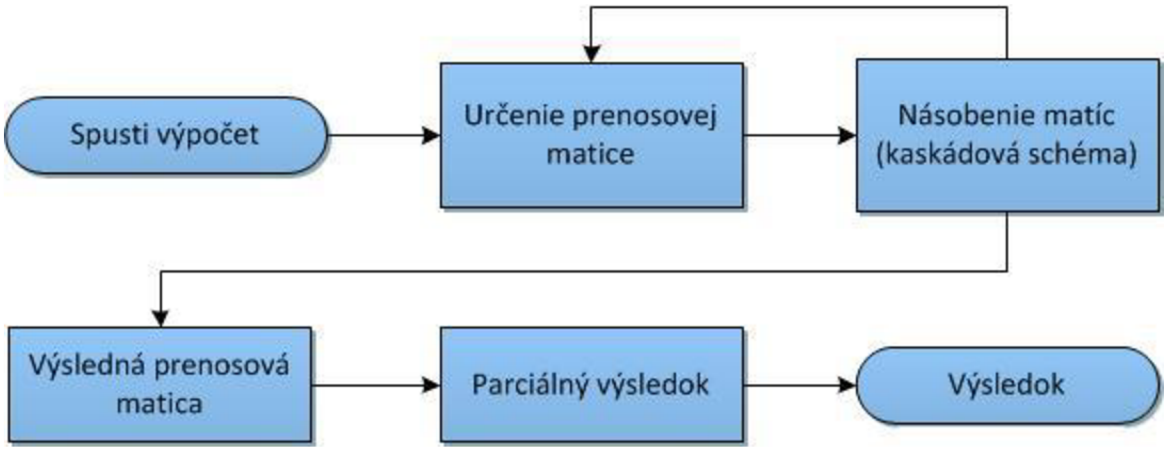


Obr. 11 : Upozornenia na nedefinovaný Youngov modul

Potvrdením dialógového okna sa sprístupni tlačidlo „Výpočet“ a umožní sa užívateľovi spustiť výpočet. V opačnom prípade má užívateľ možnosť chýbajúce hodnoty doplniť a opätovne spustiť kontrolu zadaných hodnôt.

5.4. Výpočet

Samotný výpočet je spustení po kliknutí na tlačidlo „Spusti výpočet“, ktoré sa stáva aktívnym po prevedení kontroly vstupných dát. Algoritmus následne začne spracovávať dáta zadané užívateľom. Ten pracuje podľa nasledovného diagramu :



Obr. 12 : Postup výpočtu

5.4.1. Určenie prenosovej matice

V tomto kroku sa spracováva matica premenných, ktorá je produktom užívateľom zadaných hodnôt. Pole hodnôt, ktoré prenáša prenosovú maticu aktuálne počítaného dielca nadobúda v prvom kroku podobu jednotkovej matice. Následne sa podľa indexu uloženom v nultom stĺpci matice premenných určí prototyp prenosovej matice dielca. Parametricky definované hodnoty v prototype prenosovej matice sa spočítajú pomocou hodnôt z matice premenných (stĺpce 1 až 5) a takto získane reálne hodnoty sa uložia na správnu pozíciu v prenosovej matici.

5.4.2. Násobenie matíc (kaskádová schéma)

Matica získaná v predchádzajúcom kroku je zľava vynásobená s celkovou prenosovou maticou hriadeľa. Tento postup sa opakuje dovtedy pokiaľ program nevyčerpá všetky zadané dielce hriadeľa v matici premenných. Výsledkom tohto cyklu je prenosová matica popisujúca transformáciu stavového vektora medzi ľavým a pravým koncom hriadeľa.

5.4.3. Parciálny výsledok

Pre výpočet priebehu stavových veličín po celej dĺžke hriadeľa je potrebné poznať tieto hodnoty na jednom okraji hriadeľa. S prenosovou maticou medzi oboma koncami hriadeľa je možné zapísať túto rovnicu :

$$\begin{bmatrix} w \\ \varphi \\ M \\ T \\ 1 \end{bmatrix}_i = \begin{bmatrix} c_{ww} & c_{w\varphi} & c_{wM} & c_{wT} & F_w \\ c_{\varphi w} & c_{\varphi\varphi} & c_{\varphi M} & c_{\varphi T} & F_\varphi \\ c_{Mw} & c_{M\varphi} & c_{MM} & c_{MT} & F_M \\ c_{Tw} & c_{T\varphi} & c_{TM} & c_{TT} & F_T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{i,0} * \begin{bmatrix} w \\ \varphi \\ M \\ T \\ 1 \end{bmatrix}_0 \tag{5.1}$$

Z tohto vzťahu je za pomoci okrajových podmienok možné extrahovať sústavu dvoch rovníc o 2 neznámych :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}_i = \begin{bmatrix} C_{Mw} & C_{M\varphi} \\ C_{Tw} & C_{T\varphi} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} w \\ \varphi \end{bmatrix}_0 + \begin{bmatrix} F_M \\ F_T \end{bmatrix} \tag{5.2}$$

Výpočet tejto sústavy je už triviálny. Výsledkom je stavový vektor v počiatku sústavy :

$$\{v\}_0^T = [w_0 \quad \varphi_0 \quad 0 \quad 0 \quad 1] \tag{5.3}$$

5.4.4. Výsledok

Pokiaľ poznáme stavový vektor na ľavom konci hriadeľa, je ho možné pomocou prenosových matíc jednotlivých dielcov transformovať do ktoréhokoľvek miesta na hriadeli.

Program teda prepočíta všetky stavové vektory na rozhraní medzi dvoma typmi dielcov hriadeľa a tie uloží do výsledkovej matice.

O dokončení výpočtu informuje program užívateľa pomocou správy. Pre prehľad výsledkov je potrebné sa prepnúť do záložky „Výsledky“.

5.5. Výsledky

Po úspešnom dokončení výpočtu program spracuje získané dáta. Pomocou nich vykreslí priehybovú čiaru, spočíta veľkosť reakcií vo väzbách a v textovej podobe vypíše veľkosti priehybu pre jednotlivé uzlové body.

5.5.1. Grafické zobrazenie

Hlavným výstupom programu je grafické zobrazenie priehybovej čiary. Toto je realizované cez prvok Chart, ktorý dokáže vykresliť grafy rôznych typov a tvarov. Pre vykreslenie priebehu priehybovej čiary po dĺžke hriadeľa je zvolený graf bodový so spojnicami medzi susednými bodmi.

5.5.2. Reakcie vo väzbách

V katalógu prenosových matíc je definovaný jediný typ väzby a tým je pružná podpora. Reakcia v tejto väzbe je rozdiel v hodnote posúvajúcej sily medzi ľavou a pravou stranou podpory. Keďže program výpočtom určil všetky stavové vektory, nie je potrebné riešit reakcie pomocou rovnice 3.9 ale stačí určiť rozdiel medzi hodnotami posúvajúcej sily.

$$R_i = T_{i+1} - T_i \tag{5.4}$$

Program pomocou cyklu prejde ešte raz cez maticu premenných a pre každú zadanú pružnú podporu stanoví veľkosť reakcie. Tieto hodnoty sú nasledovne zapísane na poslednej záložke „Textové dáta“ vo formáte R(i) = x N.

Obr. 13 : Vypísanie hodnoty reakcie vo väzbe

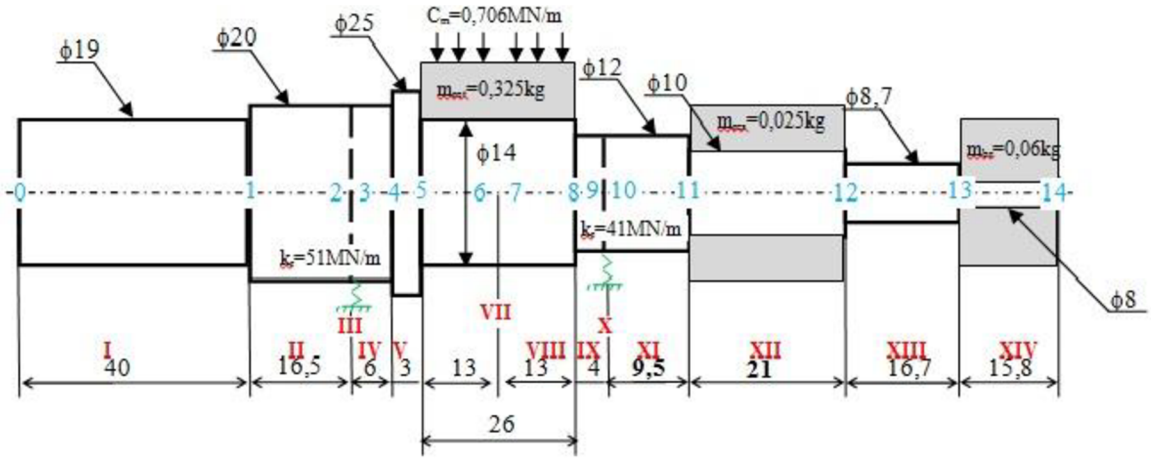
V prípade, že užívateľ zadefinoval tuhosť pružiny pružnej podpory ako zápornú hodnotu, je hodnota rozdielu podľa rovnice (5.4) veľkosť magnetickej sily a nie reakcia vo väzbe. Tieto prípady sa vo výsledkoch nezobrazujú.

5.5.3. Textová forma dát

V závere sa vypíšu hodnoty vzdialenosti L od počiatku (dĺžka hriadeľa od ľavej strany po počítané miesto) a hodnoty priehybu v týchto miestach. Hodnoty sú formátované tak, aby ich bolo možné kopírovať a ďalej spracovávať. (Napr. excel rozpozná dáta a uloží ich do jednotlivých riadkov)

5.6. Porovnanie výsledkov

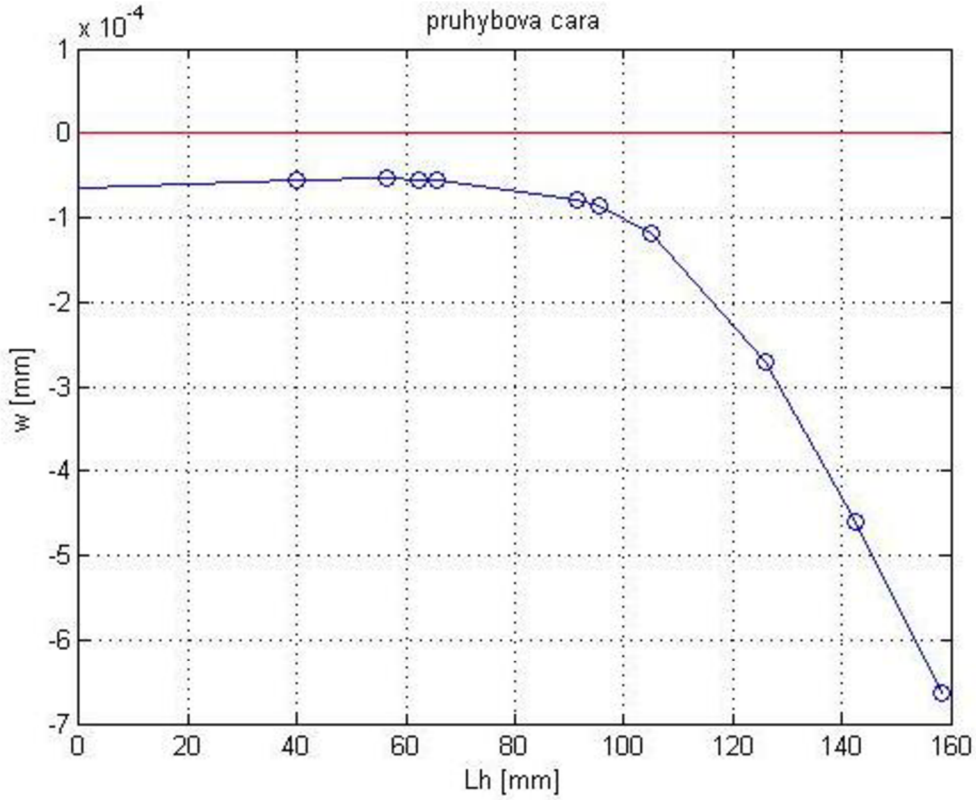
Pre porovnanie správnosti výsledkov bol v programe spracovaný rotor servomotora AF502-B. Výsledky sú následne porovnané s výpočtom tohto hriadeľa v program Matlab (Výpočet v programe matlab a náčrt hriadeľa spracoval Ing. Radek Vlach, Ph.D.)



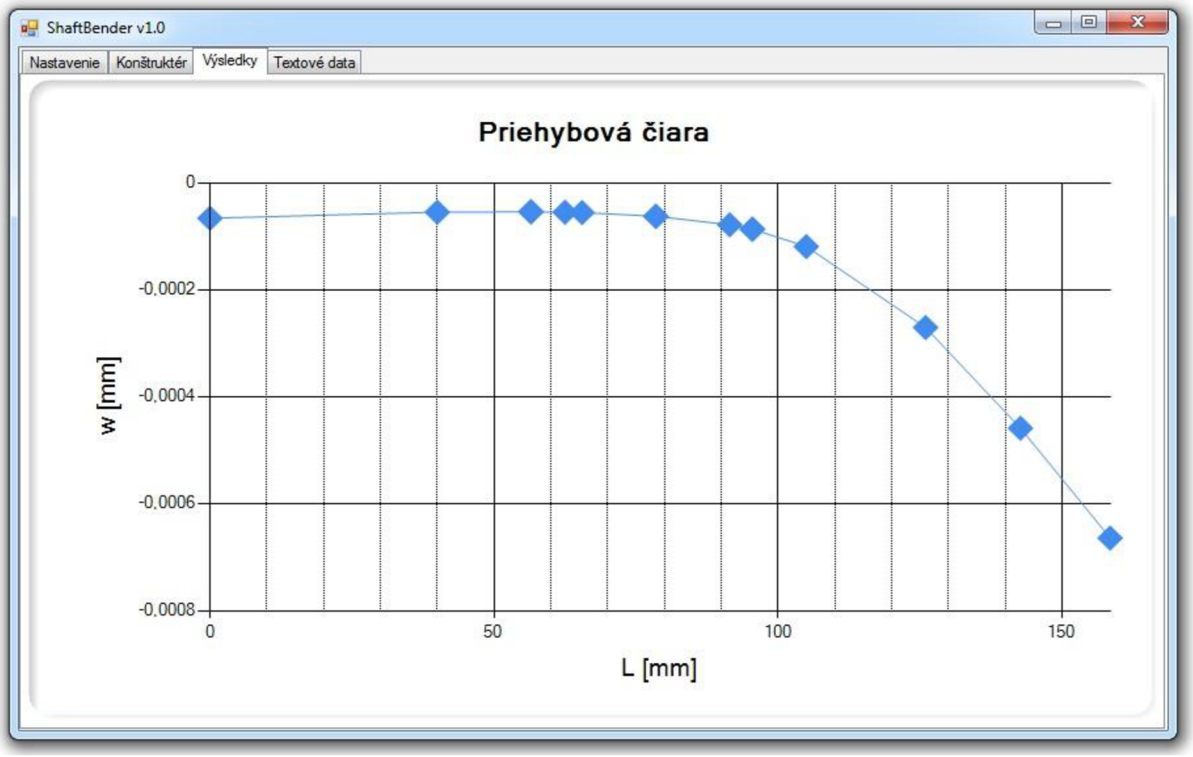
Obr. 14 : Náčrt rotora AF502-B

Pre zjednodušenie možnosti náhľadu na výsledky, je po stlačení tlačidla Demo Data nahratá kompletná matica premenných aj s potrebnými údajmi o materiále. Po spustení výpočtu sa prevedie výpočet práve rotora z obr. 12.

Výpočet prebieha v oboch prípadoch rovnakým spôsobom. Rotor sa rozdelí na typizované úseky, pre ktoré sa určí prenosová matica. Tieto matice sú následne násobené medzi sebou čím vznikne výsledná prenosová matica. Za použitia okrajových podmienok sa určí stavový vektor na počiatku rotora a pomocou prenosových matíc sa prepočíta po celej dĺžke. Základný rozdiel medzi výpočtom v matlabe a bakalárskom programe je v spôsobe definície hriadeľa. Zatiaľ čo pre matlab je potrebné tieto dáta vložiť na začiatok skriptu, Shaftbender ich automaticky naplní podľa užívateľského zadania.



Obr. 15 : Priebeh priehybovej čiary podľa výpočtu v Matlabe



Obr. 16 : Priebeh priehybovej čiary podľa výpočtu v programe ShaftBender

Nasledujúca tabuľka obsahuje porovnanie veľkosti priehybu vypočítaných pomocou matlabu (w1) a Shaftbenderu (w2).

L [m]	0	0,04	0,0565	0,0625	0,0655	0,0915
w1 [m]	6,60E-08	5,44E-08	5,36E-08	5,46E-08	5,52E-08	7,81E-08
w2 [m]	6,59E-08	5,44E-08	5,36E-08	5,46E-08	5,52E-08	7,80E-08

L [m]	0,105	0,126	0,1427	0,1585	0,1585
w1 [m]	8,63E-08	1,19E-07	2,71E-07	4,59E-07	6,65E-07
w2 [m]	8,63E-08	1,19E-07	2,70E-07	4,59E-07	6,65E-07

Tab. 2 : Porovnanie hodnôt priehybu vypočítaných dvoma programami

Ako vidieť z tabuľky, priehyby podľa oboch programov vyšli rovnaké.

Kontrolu správnosti výpočtu je možné overiť ešte ďalším spôsobom. Okrajové podmienky definovali na voľnom konci nulovú hodnotu pre ohybový moment aj posúvajúcu silu. Pre ľavý koniec rotora boli tieto hodnoty priamo zadané do výsledku. Pre pravú stranu však boli prepočítane pomocou prenosových matíc. Ich hodnota pre vzorový príklad je $M = -3.6 * 10^{-16} Nm \; a \; T = -3.55 * 10^{-15} N$. Tieto hodnoty sú tak malé, že ich možno považovať za nulové.

Ďalej bolo za úlohu určiť veľkosť reakcií. V nasledujúcej tabuľke je porovnanie vypočítaných hodnôt podľa oboch programov.

Reakcia vo väzbe	Matlab	ShaftBender
Úsek 2	2.7348 N	2,735 N
Úsek 9	3.5396 N	3,538 N

Tab. 3 : Porovnanie reakčných síl

Hodnoty sa líšia len minimálne, rozdiel medzi oboma hodnotami je spôsobený rozdielnym zaokrúhľovaním a rôznou definíciou konštanty π.

5.7. Rýchlosť výpočtu

Program bol vytvorený a testovaný na počítačovej zostave o takýchto parametroch :

Procesor : Intel (R) Core(TM) i7 930 @ 2.8GHz

Ram : 6 GB DDR3 1600MHz

Grafická karta : NVIDIA GeForce GTX 460 1GB DDR5

Základová doska : GigaByte X58A-UD3R

Pevný disk : Western digital Caviar Green 2TB, 64MB cache

Operačný systém : Windows 7 64bit

Výpočet na tomto systéme bol okamžitý. Zadávanie dát a práca s programom je plynulá, netreba medzi operáciami čakať. Pre správnu funkciu je potrebné doinštalovať do počítača niektoré voľne dostupné knižnice. V prípade, že knižnica v počítači chýba, program sa nespustí a operačný systém sám nahlási chýbajúcu knižnicu.

6. ZÁVER

Cieľom tejto bakalárskej práce bolo vytvorenie počítačového programu pre výpočet priehybu hriadeľa elektrického stroja. Samotný výpočet je založený na metóde prenosových matíc. Táto metóda umožňuje spracovávať veľké množstvo sériovo radených prvkov ako je tomu práve pri rotoroch. Výpočet je založený na vzájomnom násobení veľkého počtu matíc nízkeho rádu. Práve tento fakt predurčuje metódu ako veľmi vhodnú pre počítačové spracovanie.

Program bol vytvorený v prostredí Microsoft Visual Studio 2010 Express. Prostredie nám ponúka veľké množstvo možností ako vytvoriť samotný program. Tvorba pozostáva z dvoch základných krokov. V prvom kroku sa jednotlivé objekty umiestňujú do pracovného prostredia, nastavujú sa ich základné vlastnosti ako veľkosť a umiestnenie, a vytvárajú sa ich vzájomné väzby. Následne v druhom kroku sa pristupuje k vlastnému programovaniu. Tento krok obnáša tvorbu udalostí pre jednotlivé prvky ako je napr. stlačenie tlačidla - Výpočet. Zdrojový kód prvého kroku je automaticky generovaný prostredím. Krok dva je potrebné manuálne zapísať do zdrojového kódu. Práve tento zápis je podstatou tejto práce.

Program je schopný počítať hriadele o rozsahu 24 dielcov. Tieto je možné zadávať interaktívne pomocou tlačidiel na záložke – Konštruktér. Program po spustení výpočtu automaticky spracuje zadané dáta a výsledky zobrazí na nasledujúcich záložkách.

Pre porovnanie správnosti výsledkov je v program spracovaní vzorový príklad. Oba programy vo výsledku dospeli k rovnakému záveru.

Ďalším zistením bolo, že vplyv magnetického ťahu sa prejavuje až pri veľkých rotoroch akými sú napr. rotory hydrogenerátorov. Pre malé rotory preto nie je potrebné používať komplexnejšie modely pre magnetický ťah a bez problémov stačí náhrada magnetického ťahu za jednu pružinu s negatívnou tuhosťou.

Nakoľko vývoj programu nikdy nekončí, bol program vytvorený v duchu budúceho doplnenia o ďalšie funkcie. Týmito funkciami môže byť výpočet kritických otáčok elektrických hriadeľov alebo aj drobné funkcie ako možnosť pridania vlastného typu prenosovej matice či úprava už existujúcej. Keďže metóda prenosových matíc je univerzálna, je možné program rozšíriť z výpočtu ohybu na výpočet iného typu namáhania. Proces doplnenia jednotlivých funkcií programu by som videl ako možnú tému diplomovej práce.

7. ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

[1] Puchmajer P., Reznícek J., Švehla V.: Pružnost a pevnosť pro VS I,skriptum, ČVUT Praha,1993, ISBN-80-01-00993-9

[2] SPRYSL, H; VOGELE, H; EBI, G. The influence of magnetic forces on the stability behavior of large electrical machines. VDI Berichte Nr. 1285, 1996

[3] GHASEMALIZADEH, Omid, et al. Rotor bearing system analysis using the transfer matrix method with thickness assumption of disk and bearing. *International journal of aerospace and mechanical engineering*. 2008, 2:4, s. 206-213.

[4] Microsoft visual studio [online]. [cit. 2011-04-24]. Dostupné z www:

< http://en.wikipedia.org/wiki/Microsoft_Visual_Studio>

[5] Matlab [online]. [cit. 2011-04-24]. Dostupné z www: <http://cs.wikipedia.org/wiki/MATLAB>

8. ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1 : Vychýlenie osi rotora od osi statora 16

Obr. 2 : Náčrt jednoduchého hriadeľa 18

Obr. 3 : Výpočtový model ložiska 19

Obr. 4 : Komplexnejší model ložiska [3] 20

Obr. 5 : Výpočtový model mag. ťahu 21

Obr. 6 : Presnejší model mag. ťahu 21

Obr. 7 : Postupnosť programových blokov 23

Obr. 8 : Zadávanie materiálových premenných 24

Obr. 9 : Užívateľské prostredie na záložke Konštruktér 25

Obr. 10 : Obmedzenie možností zadávania premenných 27

Obr. 11 : Upozornenia na nedefinovaný Youngov modul 27

Obr. 12 : Postup výpočtu 28

Obr. 13 : Vypísanie hodnoty reakcie vo väzbe 30

Obr. 14 : Náčrt rotora AF502-B 31

Obr. 15 : Priebeh priehybovej čiary podľa výpočtu v Matlabe 32

Obr. 16 : Priebeh priehybovej čiary podľa výpočtu v programe ShaftBender 32

9. ZOZNAM TABULIEK

Tab. 1 : Význam jednotlivých premenných v poli 26

Tab. 2 : Porovnanie hodnôt priehybu vypočítaných dvoma programami 33

Tab. 3 : Porovnanie reakčných síl 33

10. ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

$v, w\ [mm]$	Priehyb
$\dot{v}\ , \varphi\ [rad]$	Natočenie
$M_z, M_y\ [Nm]$	Ohybový moment
$T_y\ [N]$	Posúvajúca sila
$R_i\ [N]$	Reakcia vo väzbe
$e\ [mm]$	excentricita
$\{v\}$	Stavový vektor
$[C]_{i,i-1}$	Prenosová matica
$k\ [N.m^{-1}]$	Tuhosť pružiny
$m\ [kg]$	Hmotnosť

11. ZOZNAM PRÍLOH

Prílohy sú priložené na CD disku a obsahujú nasledujúce súbory :

Bakalárska_práca.pdf (Vlastný súbor vypracovanej práce)

ShaftBender.exe (Program na výpočet priehybu hriadeľa)

ShaftBender.rar (Zdrojový kód s príslušnými dátami programu ShaftBender.exe)