VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

VYUŽITÍ INTERAKCE SIMULAČNÍCH NÁSTROJŮ K ŘEŠENÍ KOMPLEXNÍCH ÚLOH V DYNAMICE
UTILIZATION OF SIMULATION TOOLS INTERACTION FOR SOLVING OF COMPLEX PROBLEMS IN DYNAMICS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Ivan Kukučka
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. Lukáš Březina, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2017

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	**Ivan Kukučka**
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Mechatronika
Vedoucí práce:	**Ing. Lukáš Březina, Ph.D.**
Akademický rok:	2016/17

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:

Využití interakce simulačních nástrojů k řešení komplexních úloh v dynamice

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V současné době je pro řešení komplikovaných výpočetních problémů ze strojírenské praxe nepostradatelný aparát specializovaných simulačních nástrojů. Vzhledem k časté komplexnosti řešených zadání je zpravidla nutné použití více nástrojů k dosažení cíle. Cílem bakalářské práce bude zanalyzovat a popsat možnosti vzájemného provázání vybraných simulačních nástrojů (SolidWorks, MSC Adams, Matlab, Ansys,...) a demonstrovat popsané postupy na komplexní úloze (multi-body model s pružnými tělesy popisující dynamiku dané soustavy).

Cíle bakalářské práce:

1) Zanalyzovat a popsat možnosti importu soustav tuhých těles navržených v CAD prostředí do prostředí pro simulaci multi-body dynamiky.
2) Zanalyzovat a popsat postup pro sestavení modelu s pružnými tělesy v prostředí pro simulaci multi-body dynamiky.
3) Prezentovat postupy z 1) a 2) na vybraných příkladech.

Seznam literatury:

Vetiška, J. (2013): Analýza stability řezného procesu obráběcího stroje vzhledem k samobuzenému kmitání, VUT v Brně, Brno.

Hadaš, Z., et al. (2012): Simulation modelling of mechatronic system with flexible parts, 15th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2012 ECCE Europe, Novi Sad, Serbia.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

Abstrakt

Táto práca sa zaoberá popisom možností vzájomného previazania simulačných nástrojov a demonštruje popísané postupy na rôznych komplexných úlohách. Cieľom práce je ukázanie prepojenia medzi CAD softvérmi (Solidworks) a inými simulačnými nástrojmi (MATLAB, MSC Adams) pričom v prostredí pre simuláciu multi-body dynamiky sa pracuje ako s tuhými telesami, tak aj s flexibilnými.

Abstract

This thesis describes the possibilities of mutual interaction of simulation tools and it demonstrates the procedures described for the various complex tasks. Aim of this thesis is to show the links between CAD softwares (Solidworks) and other simulation tools (MATLAB, MSC Adams) while in the environment for the simulation of multi-body dynamics it is treated as rigid bodies, as well as flexible.

Kľúčové slová

Import, export , pohybová analýza, flexibilné teleso, SimMechanics, MSC Adams, interface uzol

Keywords

Import, export, motion analysis, flexible body, SimMechanics, MSC Adams, interface point

Bibliografická citácia

KUKUČKA, I. *Využití interakce simulačních nástrojů k řešení komplexních úloh v dynamice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 35 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Lukáš Březina, Ph.D..

Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému „Využitie interakcie simulačných nástrojov k riešeniu komplexných úloh v dynamike“ vypracoval samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov uvedených v zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

26.5.2017 .....

Ivan Kukučka

Poďakovanie

Ďakujem týmto Ing. Lukášovi Březinovi, Ph.D. za cenné pripomienky a rady pri vypracovaní bakalárskej práce.

Obsah

1 Úvod 7

2 Ciele práce 8

3 Export modelu zo Solidworks do SimMechanics 9

3.1 SimMechanics 9

3.2 Solidworks 9

3.3 Inštalácia SimMechanics linku 9

3.4 Podmienky správneho exportu 10

3.5 Podporované spoje a väzby 10

4 Export modelu zo Solidworks do MSC Adams 11

4.1 MSC Adams 11

4.2 Návod na export modelu 11

4.3 Podmienky správneho exportu 12

4.4 Pohybové prvky Motion Study 12

4.4.1 Motory 12

4.4.2 Prvky sily 12

4.5 Návod na import modelu do programu Adams 13

5 Export dielu z programu Ansys do MSC Adams 13

5.1 Ansys 13

5.2 Výhoda sústavy s flexibilným telesom 13

5.3 Rozhranie Ansys - MSC Adams 14

5.4 Tvorba modelu v Ansyse 14

5.5 Modelovanie interface uzlov 15

5.6 Export do Adamsu 15

5.6.1 Modul Adams Flex 15

5.6.2 Program Adams Flex 17

5.6.3 Modul Adams ViewFlex 18

5.6.4 Počítanie napätí pružných telies pomocou modulu Durability 19

6 Co - simuláčné prepojenie medzi MSC Adams a Matlab 21

6.1 Definovanie vstupných a výstupných premenných 21

6.2 Referencia vstupných premenných 21

6.3 Funkcia Plant Export 22

6.4 Spojenie blokov v Simulinku 23

7 Popis importov na vybraných príkladoch 24

7.1 Jednoduchý rotačný mechanizmus 24

7.2 Vysokozdvižný vozík 26

7.3 Mechanický zdvihák s tuhými a pružnými telesami v programe Adams 29

7.3.1 Tvorba flexibilného nosníka cez mnf súbor 30

7.3.2 Tvorba flexibilného nosníka v moduly ViewFlex 30

7.3.3 Napäťové porovnanie nosníkov vytvorených dvomi rôznymi spôsobmi 31

7.4 Mechanický zdvihák v co-simulácii programov Adams a Simulink 32

8 Záver 35

9 Zoznam použitej literatúry 36

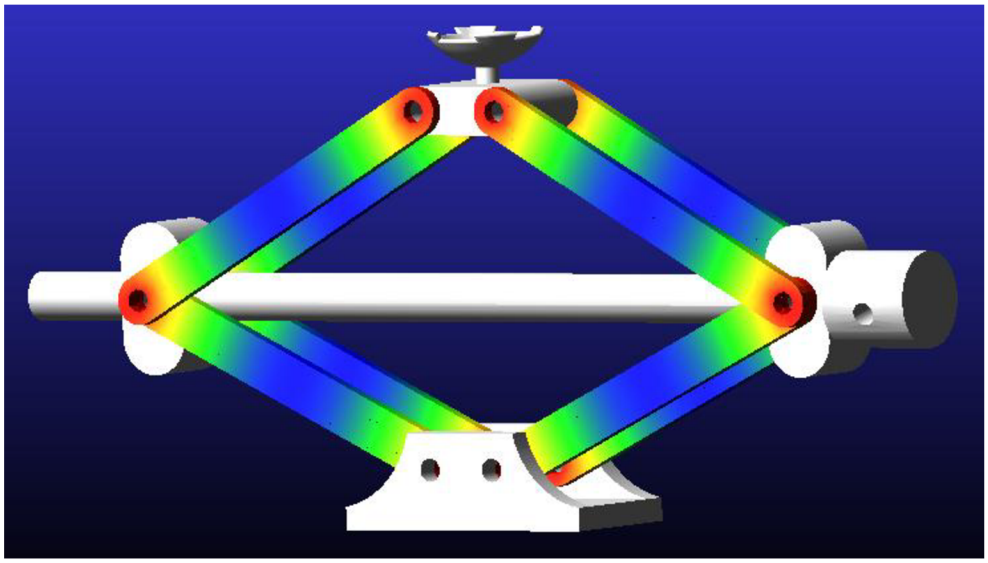
1 Úvod

V súčasnej dobe je využitie simulačných nástrojov pri riešení komplexných úloh v strojárenskej praxi nevyhnutné. Vzhľadom na zložitosť úloh a špecializáciu jednotlivých simulačných programov sa k dosiahnutiu presných výsledkov vyžaduje vzájomná interakcia medzi vybranými softvérmi.

Zmyslom simulácie je opakované testovanie funkčnosti systému bez použitia fyzického prototypu. Jednou z najväčších výhod je, že v prípade nutnosti zmeny návrhu nedochádza k finančným stratám ako je to pri fyzických skúškach. Simulácie sú menej časovo náročné a modely nie sú náchylné pri opakovaní skúšky.

Hodnovernosť simulácii môže narásť, ak sú v systéme modely tuhých telies správne nahradené pružnými telesami. Menia sa podmienky simulácie a vo výsledkoch sa tak počíta s vibrovaním telies i s prípadnými deformáciami telies.

V tejto práci sú popísané spôsoby prepojenia vybraných programov pre riešenie úloh v dynamike na troch rozličných príkladoch. V princípe je to o tom, že model vytvorený v CAD prostredí je následne importovaný do programov, ktoré simulujú multi-body dynamiku sústav. V ďalších kapitolách sa práca taktiež zameriava na využitie pružných telies vo výpočtoch, viz obr.1, a popisuje spôsob prepojenia pružného telesa v sústave tuhých telies.



Obr. 1: Pružné nosníky v sústave mechanického zdviháku

2 Ciele práce

Hlavným cieľom tejto práce je zanalyzovať a popísať možnosť importu tuhých sústav navrhnutých v CAD prostredí (Solidworks) do prostredia pre simuláciu multi-body dynamiky(MSC Adams a SimMechanics). Jednotlivé podciele, ktoré treba splniť sú:

- Import geometrie z CAD prostredia do programov MSC Adams a SimMechanics.
- Popis vzniku pružného telesa vytvoreného v programe Ansys a jeho importu do prostredia pre simuláciu dynamiky (MSC Adams).
- Porovnanie chovaní sústavy tuhých telies so sústavou pružných telies.
- Návrh riadenia pohonu sústavy v rámci co-simulácie medzi softvérmi MSC Adams a Simulink.
- Porovnanie pružných telies vytvorených v programe Ansys a MSC Adams.

3 Export modelu zo Solidworks do SimMechanics

3.1 SimMechanics

Program SimMechanics je rozšírenie programu Simulink zameriavajúce sa predovšetkým na modelovanie sústav tuhých telies. Telesá sú navzájom spojené väzbami a za pôsobenia síl a momentov sa simuluje dynamický pohyb sústavy, ale je možné simulovať i čisto kinematický pohyb. Model popisujúci reálny technický stav je vytvorený pomocou blokov, ktoré predstavujú priamo štandardné fyzické objekty zúčastnené v simulácii(napr. valec, kváder, guľa) alebo vzťahy medzi týmito komponentmi (napr. väzby, senzory, zdroje signálov). Na vytvorenie matematického modelu sústavy, ktorý si program sám formuluje, je ešte potrebné zadefinovať parametre jednotlivých blokov. Z dôvodu reálnejšieho vykreslenia sústavy a nižšej časovej náročnosti s prípravou modelu sa používa export sústavy telies z CAD prostredia, ak je CAD model k dispozícii . Okrem geometrie sú v rámci exportu zahrnuté všetky hmotnosti, momenty zotrvačností, spoje a iné obmedzenia telies [1].

3.2 Solidworks

Tento program patrí do skupiny najpoužívanejších strojárenských 3D CAD systémov. Vyznačuje sa prehľadným a intuitívnym ovládaním. Okrem modelovania štandardných modelov, ponúka tvorbu technických výkresov a spájanie jednotlivých dielov do zostáv [2]. Kreslenie je sprostredkované číselnými alebo geometrickými parametrami. Vytvorené komponenty sa taktiež môžu simulovať a analyzovať a pre animáciu je dostupná možnosť kvalitného renderovania.

3.3 Inštalácia SimMechanics linku

Export modelu z prostredia SolidWorks pozostáva z konvertovania CAD súboru do súboru xml. a následného importu do SimMechanics. Aby bol vôbec možný import CAD súboru zo Solidworks do SimMechanics, je nevyhnutné nainštalovať SimMechanics Link, ktorý prepojí dané programy. Z oficiálnej stránky Matlabu treba stiahnuť SimMechanics link, ktorý je kompatibilný s používanou verziou Matlabu a operačným systémom počítača. V tejto práci bola využitá verzia MATLAB R2014a a 64bit Windows. Pre nainštalovanie linku je potrebné stiahnuť 2 súbory, ktoré prináležia používanej verzii, a uložiť ich do spoločného priečinku. Tieto súbory sa nazývajú:

- install_addon.m
- smlink.r2014a.win64

Program MATLAB je spustený ako správca , zadá sa mu cesta k stiahnutým súborom a v nasledujúcom kroku v príkazovom riadku MATLABu sa zadá príkaz: `install_addon('smlink.r2014a.win64.zp')`. Použitím príkazu `matlabroot` sa obsah zip súboru extrahuje do adresára, v ktorom je MATLAB uložený. V ďalšom kroku treba zadať príkaz `smlink_linksw` , ktorý vytvorí register a umožní prepojenie programov pridaním doplnku (add-in)SimMechanics Link do panelu nástrojov v programe Solidworks. Po tomto kroku je v MATLABe už všetko potrebné nastavené . Po zapnutí programu Solidworks sa link medzi oboma programami najprv sprístupní: *Options- Add-Ins* a zakliknutím riadku *SimMechanicsLink* a jeho následným potvrdením sa odomkne možnosť exportu v paneli nástrojov. Po spustení ľubovoľnej sústavy telies

je export sprístupnený: *Tools - SimMechanicsLink -SimMechanics first generation* a príslušná zostava sa uloží s príponou .xml . V poslednom kroku treba do MATLABu zadať špecifický príkaz: `mech_import('nazov_zostavy.xml')`. Tento príkaz funguje len pre SimMechanics prvej generácie, pre druhú generáciu sa využíva príkaz `smimport`.Týmto príkazom MATLAB prevedie CAD súbor do modelu v SimMechanics [3].

3.4 Podmienky správneho exportu

Vyššie spomenutým návodom sa nemusí docieliť funkčnosť modelu. Počas exportu môže dôjsť ku chybe prekladu vyplývajúcej z nepodporovaných CAD prvkov. Ak CAD sústava obsahuje čo i len jednu nepodporovanú väzbu, SimscapeMultibodyLink vydá varovnú správu, v ktorej sa identifikuje nepodporované obmedzenie. Aby po importe program nehlásil chybu, nepodporovaná väzba sa nahrádza tuhým spojením telies. Spojenie poskytuje nula stupňov voľnosti medzi spojenými telesami. Na obnovenie pôvodných stupňov telies medzi telesami je nevyhnutné:

- v CAD programe nahradiť každú nepodporovanú väzbu s vyhovujúcim ekvivalentom a po dokončení znova vykonať export
- v importovanom SimscapeMultibody modeli môžem ručne zmeniť každé umelo zavedené pevné spojenie vhodným spojom

Výmena nepodporovanej väzby za správnu funguje v obmedzenom počte prípadov a v niektorých prípadoch žiadna adekvátna ekvivalentná väzba neexistuje. Preto je vhodné dopredu zvážiť význam práce v SimMechanics vzľadom na používanú sústavu. Medzi nepodporované väzby patria všetky strojné (mechanical) väzby v Solidworks. Sú to väzby kladky, prevodu, pántov, ozubenej tyče a pastorka, univerzálneho kĺbu alebo šróbová väzba [3].

3.5 Podporované spoje a väzby

SimscapeMultibody software vie úspešne naimportovať CAD sústavu s týmito väzbami:

- uhlová väzba (*angleoffset*)
- rovnoľahlá väzba (*coincident*)
- sústredná väzba (*concentric*)
- väzba vzdialenosti (*distance*)
- rovnobežné a kolmé väzby (*paralel and perpendicular*)
- dotyčnicová väzba (*tangent*)

Ekvivalenty CAD väzieb v SimMechanics predstavujú bločky *Joint* a *Constraint*. Medzi dve telesá aplikujú kinematickú väzbu, ktorá určuje pohyb. *Joint* bloky sú výber základných ale úplných spojov rozličných druhov, ktoré nemožno rozkladať ďalej. Existuje 5 jednoduchých spojov [3]:

- prizmatický - umožňuje transláciu pozdĺž jednej osi
- otočný - umožňuje otáčanie okolo jednej štandardnej osi
- sférický - umožňuje otáčanie okolo ktorejkoľvek osi
- šróbový - umožňuje spojenú rotáciu a transláciu okolo osi
- homokinetický - tzv. *constant velocity joint* umožňuje otáčanie konštantnou rýchlosťou a prenáša otáčky medzi hriadeľmi v rôznom uhle

4 Export modelu zo Solidworks do MSC Adams

4.1 MSC Adams

MSC Adams patrí do skupiny najpoužívanejších programov pre riešenie multi-body dynamiky a pohybovej analýzy. Adams pomáha inžinierom študovať dynamiku pohyblivých častí, sledovať ako sú sily a zaťaženia rozmiestnené po celej mechanickej sústave a zlepšovať optimalizovanie výsledkov svojich produktov. Na rozdiel od CAD nástrojov, Adams sa hlavne sústredí na riešienie rovníc kinematiky, statiky a dynamiky. Program umožňuje vytváranie virtuálnych prototypov čo predstavuje časovú a finančnú výhodu v porovnaní s fyzickým prototypom [4,6].

Základným zástupcom patriacim do sady produktov MSC SOFTWARE je simulačný program AdamsView. Tento systém sa všeobecne používa na modelovanie a simulovanie jednoduchých mechanických sústav. Tie môžu byť tvorené okrem tuhých telies aj flexibilnými a navzájom sú zviazané kinematickými väzbami. Adams je komplexný program ponúkajúci interakciu medzi CAD programami, aby bola fyzika systému čo najpresnejšia a najreálnejšia. Táto kapitola sa preto zaoberá exportom modelu z konkrétneho CAD softvéru Solidworks do programu MSC Adams.

4.2 Návod na export modelu

V prvom rade treba spomenúť, že okrem exportu geometrie je všeobecnou snahou aj export pohybovej štúdie. Po spustení sústavy v programe Solidworks sa v ponuke *SOLIDWORKS Add-Ins* vyhľadá ikona *SOLIDWORKS Motion*. Na spodnej lište sa prepne kolonka *Model* na *Motion Study*.V rámci typov štúdie (*Type of Study*) sa vyberie možnosť *Motion Analysis*. Ak sa pridajú sily alebo iné účinky, spustí sa simulácia kliknutím na *Calculate*. Keď prebehne krátka simulácia pohybovej sústavy, môže sa kliknúť pravým tlačítkom na zostavu najvyššej úrovne v strome *MotionManager* a zvolí sa možnosť *Export to ADAMS*. Objaví sa okno na uloženie, zadá sa názov súboru a potvrdí sa tlačidlom *Uložiť*. Vytvorí sa tým súbor datovej sady *ADAMS (.adm)* pohybovej štúdie typu Motion Analysis. Exportované data obsahujú súbory *.xmt_bin* pre geometriu dielov a prvky pre pohybové štúdie uvedené v strome *MotionManager* [5].

4.3 Podmienky správneho exportu

Aby bol export zo Solidworks vôbec možný, je nevyhnutné , aby bol pohyb sústavy predom nasimulovaný. Nie každá verzia Solidworks je schopná tejto realizácie, export však dokáže vykonať verzia Solidworks Premium s pridaným doplnkom *Motion Analysis*. Pomocou tohto modulu je možné nasimulovať a analyzovať pohyb zostavy, pričom *Motion Analysis* zahŕňa účinky prvkov *Motion Study* (sily, pružiny, tlmiče, trenia).

4.4 Pohybové prvky Motion Study

Pomocou prvkov Motion Study sa dá modelovať pohyb sústavy. Medzi dostupné prvky patria:

- Motory
- Gravitácia
- Pružiny
- Tlmiče
- Sily
- Kontakt

4.4.1 Motory

V pohybových štúdiach sa dá pomocou motorov aplikovať pohyb na telesá bez uváženia momentov zotrvačností telies. Motorom poháňaný pohyb nahradzuje pohyb spôsobený akýmkoľvek iným *Motion Study* prvkom. Ktorýkoľvek prvok, ktorý odporuje pohybu motoru, zvyšuje energetickú spotrebu motoru, ale jeho činnosť sa nespomaľuje. Avšak, ak nejaký prvok spôsobí zmenu otáčania motoru, v novom smere sa motor začne otáčať. Silu motoru neovplyvňuje ani veľkosť súčiastky, ani jej hmota. Typ motoru môže byť rotačný alebo lineárny. Najčastejšie je pohyb motoru definovaný konštantnými otáčkami alebo vzdialenosťou (nastavením posunutia a dobou trvania) [5].

4.4.2 Prvky sily

Sily môžu spôsobiť pohyb alebo odporovať pohybu. Prvky sily nepredpisujú pohyb ani mu nezabraňujú a preto neodstraňujú ani nepridávajú modelu stupne voľnosti. Existujú tieto typy prvkov síl [5]:

- Gravitácia. Ako predvolená hodnota je nastavené štandardné gravitačné zrýchlenie 9,81 $m.s^{-2}$, no dá sa aj nastaviť iná hodnota či iný smer.
- Tlmiče, pružiny, trenie a púzdra. Sily sú aplikované na translačné pružiny, torzné pružiny, translačné tlmiče, torzné tlmiče, statické trenie, dynamické trenie, trenie v kĺboch a púzdrach.
- Sily. Definujú zaťaženie a posunutie dielov tak, aby sa pohybovali v určitých smeroch. Musí sa vybrať typ funkcie sily(napr. konštanta, skoková funkcia, harmonická funkcia, segmenty atď.). Ako druh sily sa vyberie buď torzná sila(určuje krútiaci moment) alebo lineárna.

- Kontakt. Medzi dotýkajúcimi sa časťami sa generuje sila, alebo sú súčiastky obmedzené tak, aby sa stále dotýkali. Kontakt treba definovať tak, aby telesá počas pohybovej analýzy nenarážali do seba.

4.5 Návod na import modelu do programu Adams

Po spustení programu Adams View sa v ponuke *File* nájde kolonka *Import*. Po zakliknutí sa zobrazí tabuľka a hneď na prvom riadku sa dá z ponuky vybrať typ importovaného súboru. Nachádza sa tam aj možnosť importu typu súboru *AdamsSolverDataset,* ktorý súhlasí s typom súboru exportovaným zo Soliworks. Takto zvolená cesta importu sa hlavne používa pre samostatné telesá, ktoré neobsahujú pohybovú analýzu. Takýmto spôsobom sa pracuje s typmi súboru ako napríklad *IGES*, pričom sa bez problémov importuje kompletná informácia o telese vrátane hmotnosti či momentu zotrvačnosti. V prípade prevedenia modelu sústavy do programu Adams sa postupuje odlišne, za to jednoduchšie. Po spustení programu sa ukáže uvítacia tabuľka a zvolí sa možnosť *Existing model*. V priečinku *File Name* sa nájde adresa uloženia súboru *.adm* a uživateľ potvrdí akciu.

5 Export dielu z programu Ansys do MSC Adams

Doposiaľ spomenuté exporty riešili prevod tuhého telesa alebo sústavy medzi programami. Pri riešení dynamiky sústav však niekedy nestačí analýza tuhých telies a tak sa kritické diely nahrádzajú pružnými telesami. Kvalifikovaný program na tvorbu flexibilných telies sa nazýva Ansys.

5.1 Ansys

Ansys je univerzálny program založený na metóde konečných prvkov a používa sa na simuláciu interakcie všetkých kategórii fyziky ako sú štrukturálne, elektromagnetické, teplotné, vibračné atď. Program umožňuje testovanie produktov vo virtuálnom prostredí pred výrobou prototypov.

Metóda konečných prvkov je numerická metóda, pomocou ktorej sa počítajú posunutia a napätia v materiály za rôznych okrajových podmienok. Riešenú oblasť diskretizujeme vytvorením siete konečných prvkov, tj. konštrukcia je rozdelená na veľmi malé oblasti(prvky) a v jednotlivých uzloch sa zisťujú neznáme parametre [7].

V inžinierskych výpočtoch sa často používa integrácia ANSYSu s inými CAD softvérmi pre dôkladnejšiu a presnejšiu analýzu sústavy telies.

5.2 Výhoda sústavy s flexibilným telesom

V prípade návrhu zložitej komplexnej sústavy, v ktorej dochádza k rýchlym rotáciam telies alebo je niektorým telesám udelené veľké zrýchlenie, sa v simulácii odporúča testovať vybraný komponent ako pružné teleso. Nahradením tuhého telesa za pružné sa menia podmienky simulácie výrazným spôsobom. Napríklad pri pôsobení veľkých síl na teleso dochádza k deformáciam dielu, rotáciou telesa môže dôjsť k vibráciam alebo zahrnutím zrýchlenia sa môže zmeniť chovanie pracovného cyklu. Typickým príkladom je model pohybujúceho sa piestu v motore. Pohyb piestu značne závisí od flexibility kľukovej hriadele, ktorá je dynamicky výrazne namáhaná súčiastka. Pri vysokých rýchlostiach ojníc spôsobených tlakom plynov na piest a vplyvom teploty

sa môže hriadeľ deformovať a kmitať [8]. Simuláciou takejto sústavy s tuhými telesami vznikajú nepresnosti, ktoré sa korigujú nahradením tuhých telies za pružné. Použitie pružného telesa je zložitejšie, avšak jeho správnym zadefinovaním sa zvyšuje hodnovernosť simulácie.

5.3 Rozhranie Ansys - MSC Adams

Spojenie medzi týmito dvomi programami sa aplikuje v prípade, že uživateľ chce v simulácii do sústavy telies zakomponovať jedno alebo viac flexibilných telies. Pružné teleso sa vytvorí v programe Ansys v klasickom rozhraní Mechanical APDL alebo v rozhraní Workbench. Pokiaľ by boli parametre modelu súčiastky zložitejšie a používateľ má k dispozícii CAD model dielu, môže sa jeho geometria vyexportovať z CAD programu a ušetrí sa tým aj čas. Aby export z Ansysu fungoval, musí sa dodržať zoznam podmienok . Medzi najdôležitejšie zásady patrí napríklad zákaz definovania väzieb či zaťažení na teleso. Princíp správneho exportu však tkvie vo vytvorení tzv. *interface uzlov.* Sú to miesta na telese , v ktorých sa neskôr definujú väzby v programe Adams. Výstupom z programu Ansys je vznik súboru s príponou *mnf (modal neutral file).* Ten nesie v sebe informáciu o pružnosti riešeného telesa.

5.4 Tvorba modelu v Ansyse

Na vytvorenie konečno prvkového modelu je treba zvážiť niekoľko faktorov [8]:

- Väčšina typov prvkov je podporovaná, výnimkou sú axisymetrické prvky ako PLANE25 a explicitne dynamické ako SOLID164.
- Po zadaní nelineárneho prvku ho program zlinearizuje.
- Materiálové vlastnosti môžu byť lineárne, izotropné, ortotropné, konštantné alebo závislé na teplote. Musí sa definovať Youngov modul, teda modul pružnosti v ťahu, a hustota materiálu.
- Zanedbáva sa tlmenie pri výpočte *mnf* súboru. Ak je to potrebné, definuje sa v programe Adams po importne *mnf* .
- Program Adams vyžaduje, aby bola zapnutá funkcia LUMPM (diagonálna matica hmotnosti).
- Pri používaní rovinných prvkov, model musí ležať v rovine XY. Keďže Adams pracuje len s priestorovými modelmi, prenesený 2D komponent nebude mať žiadnu zložku v smere osi Z.
- Nesmú byť definované žiadne zaťaženia ani väzby.

5.5 Modelovanie interface uzlov

Anglicky *interface point* je uzol v modely, ktorý reprezentuje budúci spoj v Adamse. Najskôr sa musí rozhodnúť, na ktorých miestach sa budú predpisovať okrajové podmienky, teda kde bude teleso so sústavou zaväzbené a podľa toho sa určí poloha tohto uzlu. Interface uzol obvykle nepredstavuje náhradu za jeden uzol, ale reprezentuje vybranú plochu alebo hranu v modeli v jedinom bode. Pri vytváraní interface uzlov sa musia dodržiavať podmienky:

- Uzol má 6 stupňov volnosti (s výnimkou 2D telies).
- Sila by sa mala aplikovať na rozptýlenú plochu, skôr než na jediný bod.
- Ak sa v štruktúre nenachádza uzol, v ktorom má byť definovaný spoj, musí sa vytvoriť geometrická poloha bodu (napr. plocha valcovej diery je reprezentovaná bodom uprostred diery) [8].

Existujú 3 rozličné postupy, ako sa dá vytvoriť rozhranie medzi interface uzlom a štruktúrou v programovateľnom prostredí APDL Mechanical. Ďalej existuje ešte jeden spôsob v prostredí Workbench, ktorý je ľahší a intuitívnejší ,ale je potrebné vytvoriť príkazový riadok a napísať makro pre klasický APDL Ansys. Najpoužívanejšie postupy sú:

- Tuhé povrchové väzby spájajúce interface uzol so štruktúrou, pričom nie je potrebné definovať typ prvku *MASS21* pre interface uzol (typ prvku MASS21 sa vyznačuje zanedbateľným momentom zotrvačnosti). Sila sa rovnomerne rozdeľuje v okolí väzby.
- Tzv. pavúčia sieť prvkov, v ktorej je spájaný interface uzol s okolitými uzlami a sila je v tomto prípade taktiež rovnomerne rozložená do okolia.
- Povrch reprezentovaný jedným uzlom je spájaný s interface uzlom, avšak nerovnomerne rozložená sila aplikovaná len v jednom bode je nereálna a tak je tento spôsob tvorby uzlu najmenej používaný.
- V prostredí Workbench sa používa funkcia *Remote Point,* ktorá umožňuje reprezentovať plochu jedným uzlom, štandardne ťažiskom plochy.

V tejto práci bol kontakt medzi uzlom a plochou vykonaný kombinovanou metódou, pozostávajúcej z prvého a druhého postupu. Každému interface uzlu bol udelený typ prvku *MASS21* a pomocou príkazu *CERIG* došlo k spojeniu uzlov. Po zadefinovaní všetkých interface uzlov sa model vyexportoval príkazom *ADAMS*.

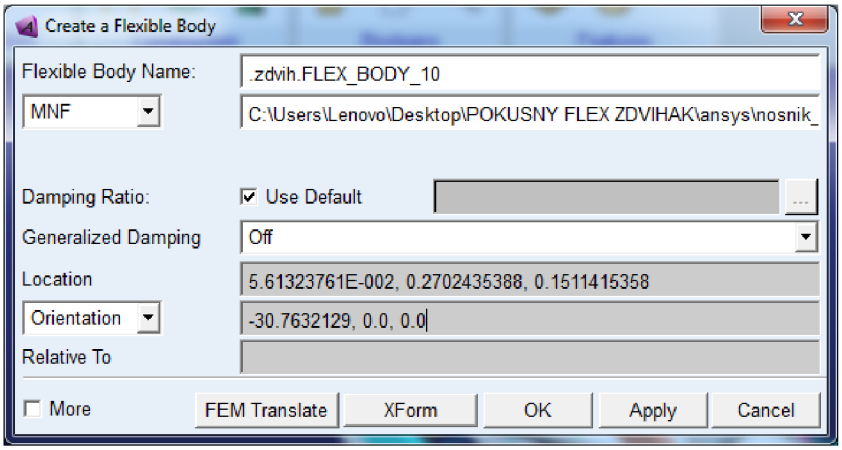
5.6 Export do Adamsu

Predom sa spustí sústava tuhých telies v programe Adams a pridanie *mnf.* súboru sa sprostredkuje modulom *Adams Flex*. Voliteľnú úpravu *mnf* súboru poskytuje program *Adams Flex*.

5.6.1 Modul Adams Flex

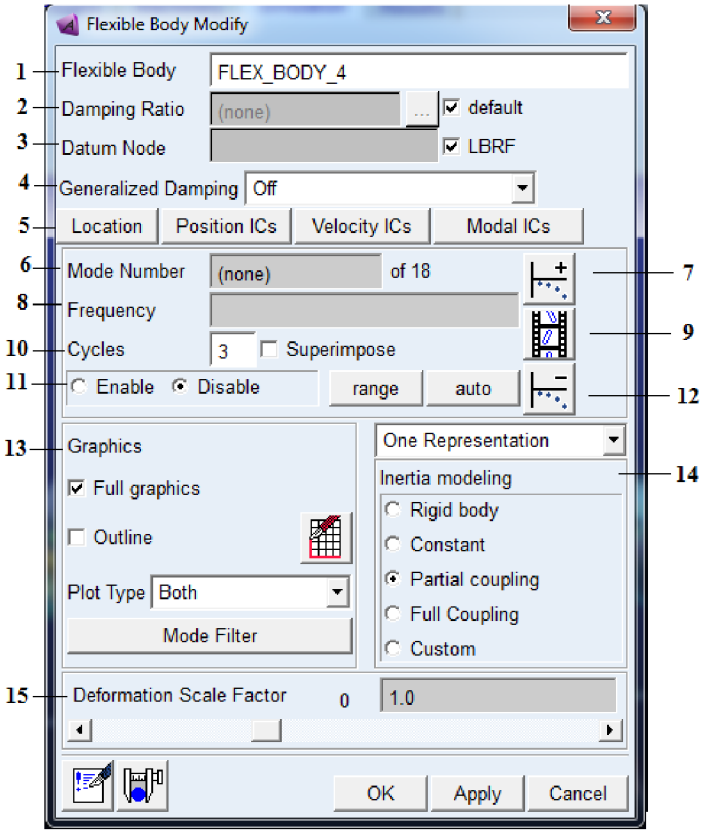
Tento modul má v ponuke možnosť náhrady tuhého telesa za pružné, prípadne možnosť náhrady pružného telesa za iné pružné teleso. Dôležité údaje, ktoré musia byť

zadefinované pri vykonávaní importu sú zobrazené na obr.2 a sú to informácie o polohe a orientácii telesa v položkách *Location*, resp. *Orientation*. Ortonormalizované vlastné tvary, prislúchajúce frekvencie a iné vlastnosti sa nastavujú pravým kliknutím na pružné teleso a výberom voľby *Modify*.



Obr. 2: Modul Adams Flex

Možnosť kontrolovania modálneho obsahu modelu pružného telesa sa nachádza v menu *Flexible Body Modify*, viz obr.3. Tento modul poskytuje zapínanie a vypínanie jednotlivých módov, ich animácie a grafické zobrazovanie.



Obr. 3: Obsah modelu pružného telesa

1. Názov pružného telesa.
2. Pomerné tlmenie - zadané konštantou alebo funkciou

   Default - 1% pre módy s frekvenciou <0, 100Hz>
   10% pre módy s frekvenciou <100Hz, 1000Hz>
   100% pre módy s frekvenciou <1000Hz, inf>
3. Vzťažný bod, podľa ktorého sa vykresľuje mapa deformácii. Možnosť LBRF znamená, že program považuje za vzťažný bod počiatok pružného telesa.
4. Zovšeobecnené tlmenie. Tvorba MNF súboru v programe Ansys zakazuje použitie tlmenia v telese. To sa dá však sprístupniť pomocou tohto riadku.
5. Poloha, počiatočné podmienky a modálne počiatočné podmienky.
6. Číslo módu. Prvých 6 módov je tuhých a sú vypnuté. V poradí až siedmy mód je ohybného charakteru a je aktivovaný.
7. Prepínanie módov smerom hore.
8. Vlastná frekvencia módu.
9. Animácia módu.
10. Počet animačných cyklov. Možnosť *Superimpose* znamená, že ukážky módov sú prezentované na nedeformovaných pružných telesách.
11. Aktivácia módov. Je vhodné zvážiť, či mód prispieva k deformácii; ak nie, odporúča sa jeho vypnutie. S rastom počtu vypnutých módov klesá čas animácie.
12. Prepínanie módov smerom dole.
13. Ovládanie vykresľovania módov počas animácie. *Plot type* slúži na zmenu farieb deformačných obrysov telesa.
14. Zotrvačné vlastnosti pružného telesa.
15. Mierka zobrazovania deformácie MNF modelu [11].

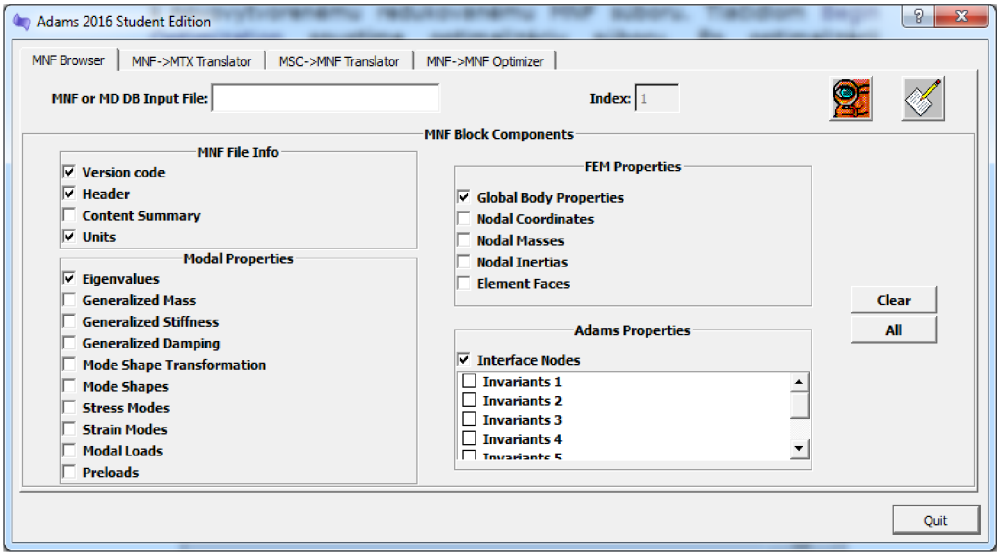
5.6.2 Program Adams Flex

Program slúži na transformovanie MNF súboru do iných formátov, poskytuje optimalizáciu súboru a prostredníctvom programu je možné aj prezeranie jeho vlastností, ako je možné vidieť na obr.4.

Prvá karta *MNF Browser* obsahuje najdôležitejšie informácie o danom súbore. V okne *MNF or MD DB Input File* sa načítava sledovaný MNF súbor. V tabuľke *MNF Block Components* sa volia vlastnosti telesa ,ktoré sa majú zobraziť po načítaní súboru. Tabuľka obsahuje možnosť výberu informácii o súbore, ako sú napríklad jednotky. Ďalší výber je možný z podskupiny modálnych vlastností, medzi ktoré patria vlastné tvary, vlastné hodnoty, módy napätí, módy pretvorení a iné. Do skupiny FEM vlastnosti patria súradnice uzlových bodov, hmotnosti a momenty zotrvačností uzlových bodov, hmotnosť či moment zotrvačnosti celého telesa. V poslednej podskupine s názvom Adams vlastnosti sa nachádza informácia o interface uzloch.

Druhá a tretia karta *MNF > MTX Translator* a *MSC > MNF Translator* slúžia uživateľovi na konvertovanie rôznych typov súborov. Súbor MTX taktiež obsahuje informácie o pružnom modely telesa.

Posledná karta *MNF > MNF Optimizer* poskytuje redukciu informácii v súbore pre jednoduchšiu manipuláciu v samotnom Adamse. Môže tak rýchlejšie prebiehať animácia sústavy vďaka úprave grafiky, avšak výpočtový čas sa nemení. Úprava grafiky spočíva hlavne v odstránení zobrazovania vnútorných uzlov alebo malých elementov. Optimalizácia taktiež poskytuje zásah do siete prvkov a pomocou možnosti *Apply Mesh Coarsening* je možná redukcia siete.

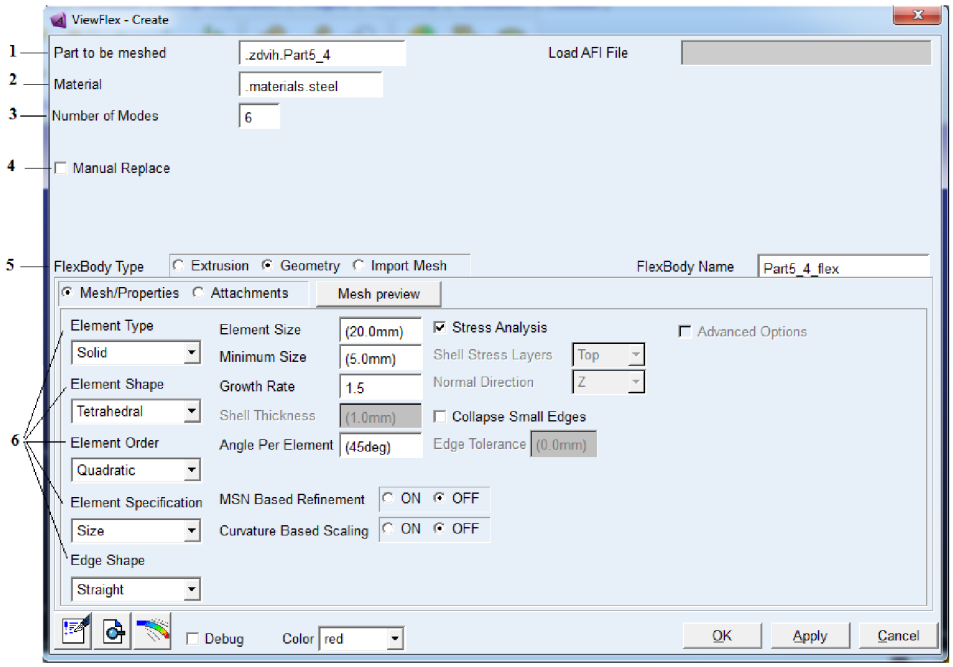


Obr. 4: Prostredie programu Adams Flex

5.6.3 Modul Adams ViewFlex

Je to modul umožňujúci pridávanie flexibilných telies alebo nahradenie tuhých telies za pružné v modeli sústavy telies. Na rozdiel od modulu *Adams Flex* ,vznik pružného telesa si nevyžaduje prácu v externom programe zaoberajúceho sa metódou konečných prvkov. Po vytvorení pružných telies v prostredí Adams sa diely môžu zanalyzovať v programe Adams Flex. Všeobecne je modul zameraný na tvorbu pružných komponentov, ktoré nevyhnutne nepotrebujú hustú sieť prvkov , vyznačujú sa jednoduchšiou geometriou a majú málo stupňov voľnosti. Pre väčší počet ako 100000 uzlov je modul nepostačujúci.

Modul sa spustí kliknutím na okno *ViewFlex* nachádzajúce sa v menu *Bodies* v podskupine *Flexible bodies*. Ďalšou možnosťou na spustenie je pravý klik na vybrané teleso na pracovnej ploche a potvrdenie príkazu *Make flexible*. Možnosti nastavenia pružného telesa sú vysvetlené na nasledujúcom obr.5.



Obr. 5: Nastavenia v okne ViewFlex

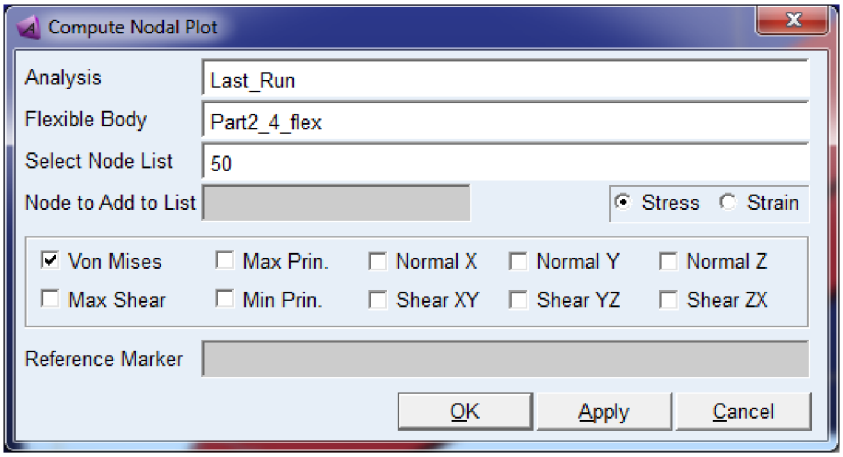
1. Názov riešeného dielu.
2. Typ materiálu - je poskytnutý výber bežných konštrukčných materiálov alebo si uživateľ sám zadefinuje parametre materiálu určením Youngovho modulu pružnosti v ťahu, Poissonovej konštanty a hustoty materiálu.
3. Počet módov.
4. Manuálna náhrada - ak je táto možnosť vypnutá, program za uživateľa automaticky nahradí pevné teleso za flexibilné, pôvodné väzby telesa zanechá a prenesie ich na novo vzniknuté pružné teleso a navyše deaktivuje tuhé teleso
5. Metódy na tvorbu pružného telesa, pričom *Extrusion method* vytvára nový geometrický model telesa, *Geometry method* sa používá, ak existuje geometria telesa a *Import mesh method* sa zameriava na import externej siete.
6. Prepínanie vlastností siete a pripojení a príkazom *Mesh preview* sa vytvorí sieť prvkov [12].
    a) V *Mesh/Properties* sa nastavujú dôležité vlastnosti siete: typ prvku, tvar prvku, veľkosť prvku či okrajové tvary.
    b) *Attachements* umožňuje tvorbu interface uzlov

5.6.4 Počítanie napätí pružných telies pomocou modulu Durability

Napäťová analýza pružných telies sa v programe MSC Adams vykonáva pomocou modulu Durability. Aby tento modul mohol počítať namáhania na pružnom telese, *mnf* súbor vytvorený v konečnoprvkovom prostredí musí obsahovať informáciu o napätiach. To sa docieli tým, že vo finálnej fáze exportu sa v programe Ansys zadá príkaz: *Adams,6,1*. Číslo 1 v príkaze znamená, že vytvorený *mnf.* súbor je rozšírený o možnosť počítania napätí. Modul *Durability* sa nachádza v hlavnom menu v skupine *Plugins.* Na počítanie napätí sa používa funkcia *Hot Spots Table.* Výstupom funkcie je

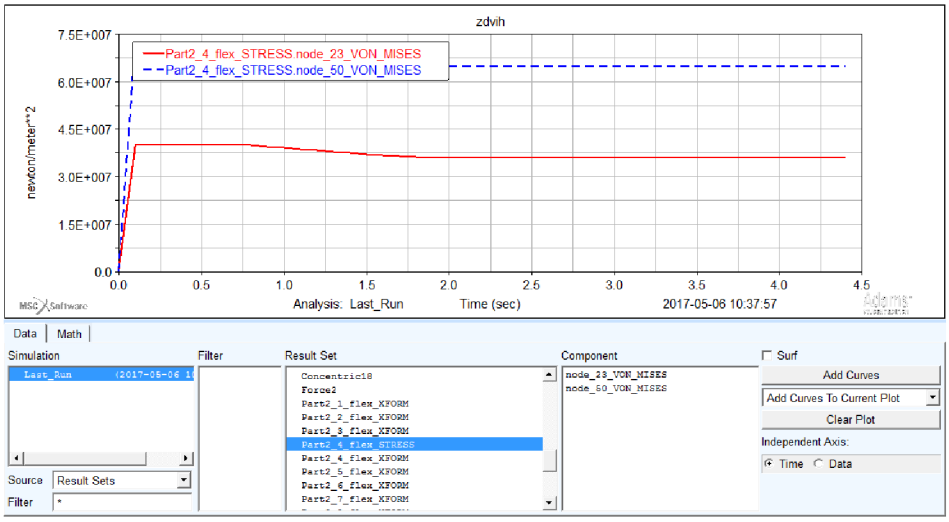
tabuľka, ktorá zobrazuje zoznam uzlov s najväčšou hodnotou napätia počas celej simulácie. V tabuľke sa dá zvoliť ľubovoľný počet meraných bodov, ku každému je priradená poloha v súradnom systéme a taktiež čas simulácie, v ktorom je napätie v uzle maximálne.

Ďalšia funkcia *Nodal Plot* slúži na počítanie napätia v konkrétnom uzle na telese, viz obr.6. V priečinku *Analysis* sa zvolí názov poslednej simulácie, ktorá má byť analyzovaná. Po vybratí názvu pružného telesa ostáva zadať identifikačné číslo uzlu v priečinku *Select Node List*. Riadok *Node to Add to List* poskytuje pridávanie jedného alebo viac uzlov pre napäťovú analýzu [13].



Obr. 6: Nodal Plot

Po potvrdení sú hodnoty napätí uložené vo výsledkoch analýzy. Na obr.7 sa nachádza funkcia *Adams Postprocessor,* ktorá slúži na vykreslenie časovej závislosti napätia. Ako zdroj výsledkov sa nastaví *Result Set* , zo zoznamu simulácii sa vyberie tá, ktorá počítala napätia. Z tabuľky *Component* sa potom volí uzol, na ktorom má byť vykreslený priebeh napätí.



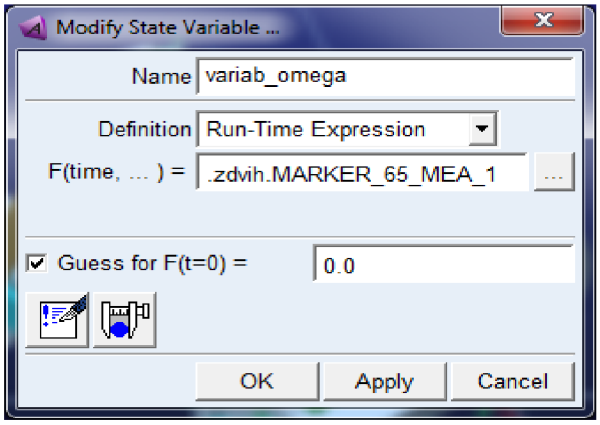
Obr. 7: Porovnanie priebehov napätí v dvoch rôznych uzloch na pružnom telese

6 Co - simuláčné prepojenie medzi MSC Adams a Matlab

Co-simulácia je proces simulácie systému, kde sa dva alebo viaceré simulačné programy simultánne používajú na modelovanie rôznych aspektov systému. Programy spolu komunikujú počas simulačného času a navzájom si ovplyvňujú výstupy. V tomto prípade je model zdviháku (viz kapitola 7.3) vytvorený v MSC Adams a v programe Simulink je namodelovaný pohon sústavy. Výstupné premenné definované v Adamse sú exportované do modelu v Simulinku. Pred exportom sa musí skontrolovať, či sú programy kompatibilné, tzn. rovnaká verzia Windowsu (32 alebo 64bit). Nastavenie co-simulácie prebieha v niekoľkých významných krokoch.

6.1 Definovanie vstupných a výstupných premenných

Všetky vstupné alebo výstupné premenné sú v Adamse definované príkazom *state variable*. Nové premenné sa definujú v menu *Elements - System Elements - Create a State Variable* a na výstupe sa zobrazí tabuľka ako je vidno na obr.8.

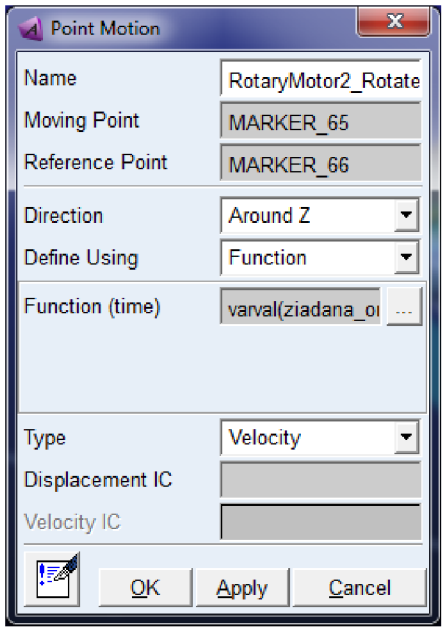


Obr. 8: Nastavenie premenej

Otvorí sa okno, v ktorom sa okrem názvu premennej zadáva funkcia, ktorá počíta výstupnú premennú. Vstupná premenná sa zadáva rovnako, ale do riadku funkcie sa vkladá nulová hodnota .

6.2 Referencia vstupných premenných

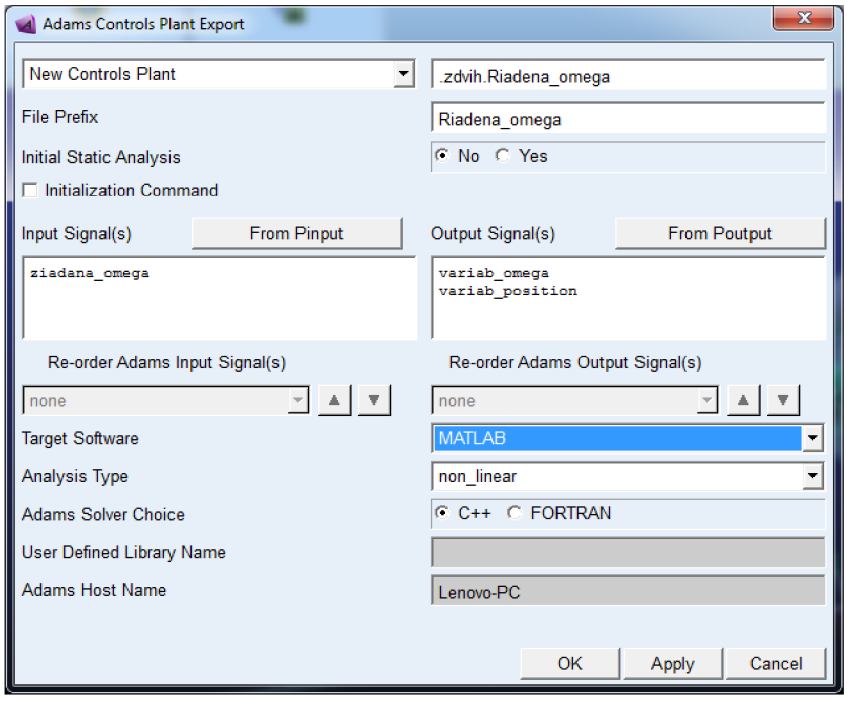
Po zadefinovaní premenných , hodnoty vstupných premenných získavaných zo Simulinku sa musia aplikovať na konkrétne miesto v modeli Adamsu. Riadené vstupné hodnoty sa predpisujú v miestach, v ktorých pôsobí nejaký pohyb alebo sila. Používateľ tak môže cez žiadanú vstupnú hodnotu ovládať otáčky, rýchlosti, natočenia alebo silové pôsobenia na telesách v sústave.



Obr. 9: Umiestnenie vstupnej premennej

Pri modifikácii predpísaného pohybu sa zmení pôvodne definovaný pohyb v riadku *Function (time)* s pomocou príkazu VARVAL, viz obr.9. Do zátvoriek tohto príkazu sa vkladá názov vstupnej premennej.

6.3 Funkcia Plant Export



Obr. 10: Funkcia Plant Export

V ďalšom kroku co-simulácie je model v Adamse pripravený na export do Simulinku. Export modelu sa nastavuje v okne *Plant Export,* ktorý je na obr.10. Zadá sa nasledovne: *Plugins - Controls - Plant Export.* Do tabuľky *Input Signals* sa zadávajú názvy vstupných premenných, naopak v tabuľke *Output Signals* sú uvedené názvy výstupných premenných. Ako *Target Software,* teda cieľový softvér, sa pochopiteľne volí program MATLAB. Poradie premenných je v zozname singálov rešpektované a po exporte z Adamsu súhlasí s poradím pinov v modely Simulinku. Po potvrdení exportu vzniknú tri nové súbory v pracovnom priečinku modelu s príponami *adm*., *cmd*. a *m*..

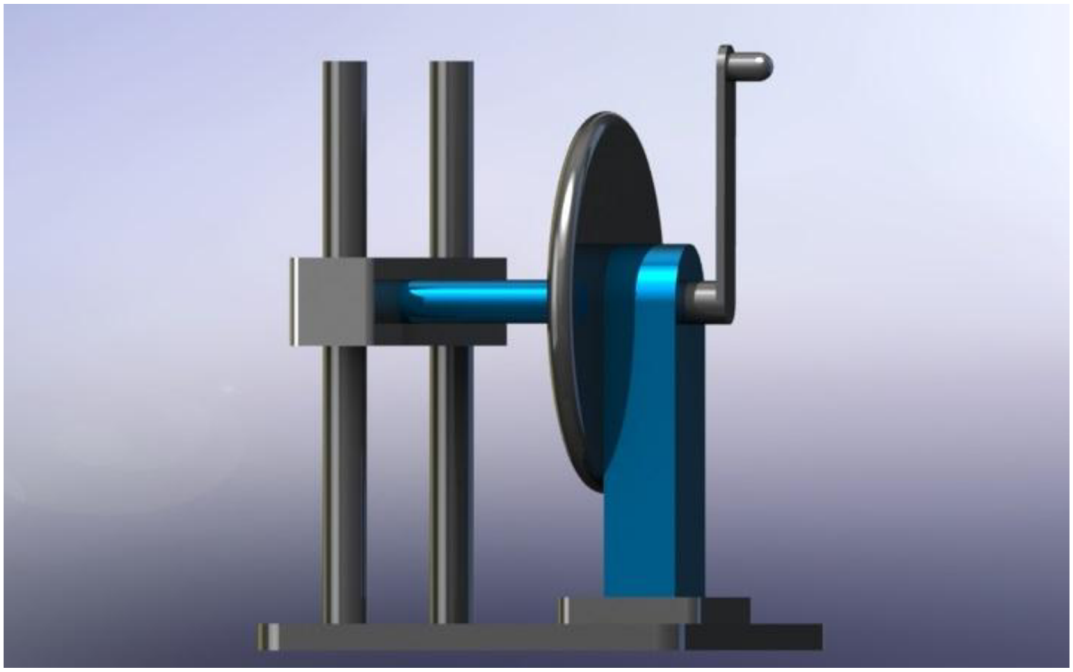
6.4 Spojenie blokov v Simulinku

Súbor s príponou *.m sa otvorí v Matlabe a spustí sa. Po vpísaní príkazu *adams_sys* sa vytvorí model sústavy v blokových schémach Simulinku. Následne sa otvorí blokový subsystém *Adams_sub* a dvojitým kliknutím na blok *MSC Software* sa v riadku *Animation mode* prepne *Batch* mód na *Interactive* a je tak uživatelovi umožnené sledovať animáciu počas počítania. Riadenie veličín (vstupných parametrov) je realizované prostredníctvom blokových schém v Simulinku, pričom do tohto modelu sa kopíruje novovytvorený subsystém *Adams_sub*. Po pripojení subsystému do riadiacej jednotky aj za pomoci regulátora, je model pripravený na spustenie a stlačením tlačidla *Run* sa docieli co-simulácia programov.

7 Popis importov na vybraných príkladoch

Keďže samotná práca sa nezaoberá návrhom konštrukcií vybraných modelov, tvorba CAD modelov v programe SolidWorks bola inšpirovaná z volne dostupných vzdelávacích materiálov [9,10].

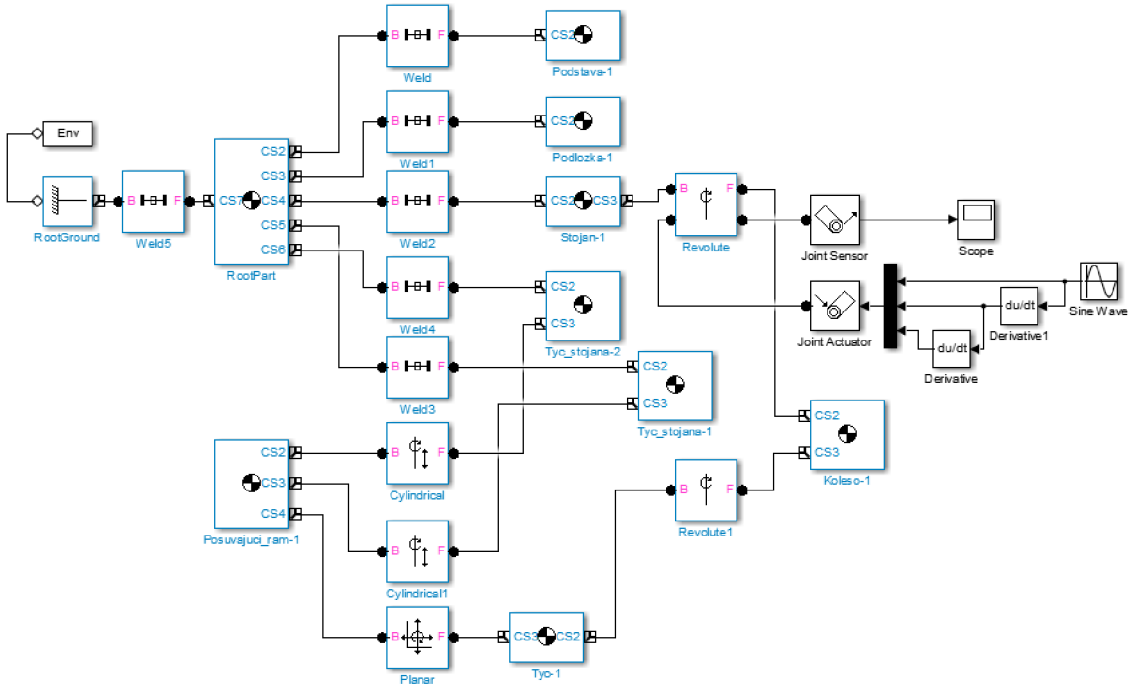
7.1 Jednoduchý rotačný mechanizmus



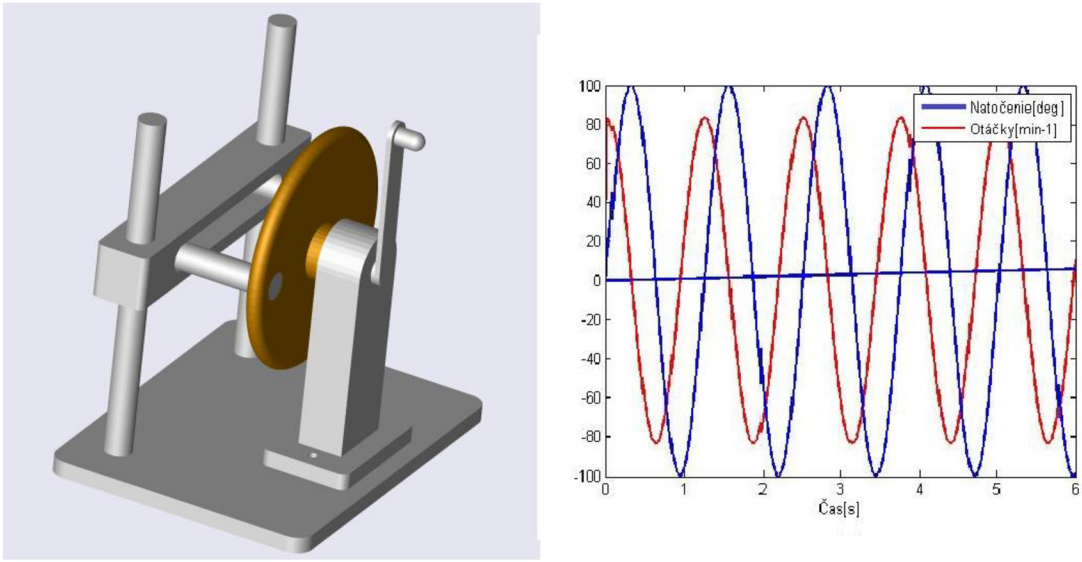
Obr. 11: Model mechanizmu v programe SolidWorks

Pri tvorbe modelu v Solidworks sa v priestore okrem podstavy upevnil aj stojan, podložka a obe základové tyče, aby tak v sústave nevznikli nadbytočné väzby. Inak sa medzi ostatnými telesami vytvorili väzby a hlavne rotačná väzba medzi stojanom a kolesom. Po importovaní sústavy do programu SimMechanics sa pohyb sústavy musel nastaviť pomocou blokových schém v Simulinku.

Pohyb bol predpísaný pomocou blokov *Joint Actuator* a *Joint Sensor,* viz obr.12. Senzor umožňuje snímanie veličín z bločku rotačnej väzby a naopak aktuátor predpisuje moment na rotačnú väzbu, ktorá sa nachádza medzi stojanom a kolesom. Ako zdroj signálu bol použitý blok *Sine wave*, ktorý generuje harmonický sínusový signál. Do aktuátoru namiesto momentu vstupovala informácia o pohybe. To sa vykoná prepnutím možnosti *Generalized Forces* na *Motion* v ponuke *Actuate with* v bloku aktuátora. Signál vedený z bloku *Sine* určuje natočenie kolesa a blok *derivative* slúži na získanie uhlovej rýchlosti deriváciou natočenia a deriváciou uhlovej rýchlosti sa získa uhlové zrýchlenie. Sínusová amplitúda 100 udáva natočenie kolesa v stupňoch a koleso má tým pádom otáčky 80 min^{-1}, viz obr.13.



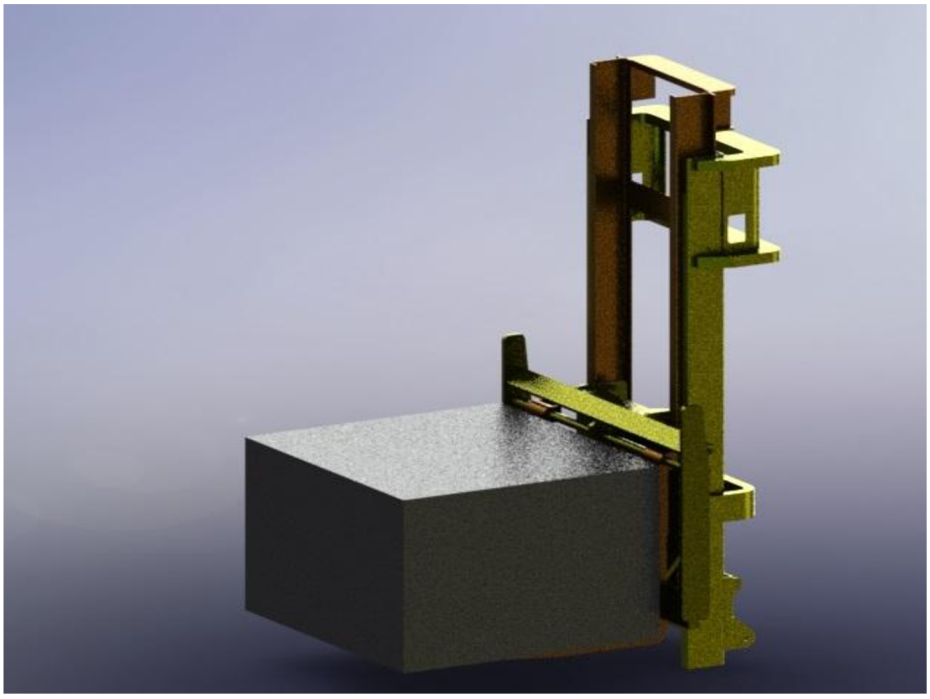
Obr. 12: Mechanizmus v programe Simulink



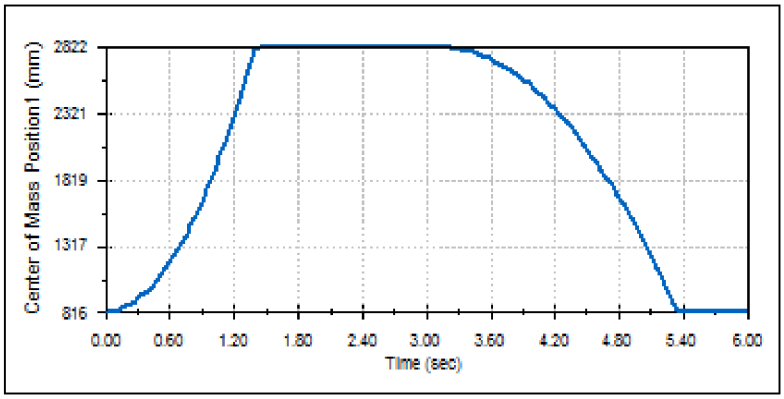
Obr. 13: Model mechanizmu v Simulinku a otáčky jeho kolesa v závislosti na čase

7.2 Vysokozdvižný vozík

Model vozíka v Solidworks sa skladá z troch rámových konštrukcii , dvoch lyžín a jedného závažia v tvare kocky. Model sa nachádza na obr.14. Jednotlivé diely boli zaväzbené tak, aby bol umožnený posuvný pohyb dielu s názvom *ram2* voči základovému telesu *ram1*. V rámci pohybovej analýzy bol posuvný pohyb rámu vykonávaný prostredníctvom pôsobenia sily *Force* , ktorá pôsobila na súčiastku *ram2* v zvislej osi . Sila bola zadefinovaná funkciou *Step(25000,2.75,19000,3.25)* tak, aby sa závažie dostalo do maximálnej povolenej výšky a naspäť, viz obr.15. V smere zvislej osi y taktiež pôsobí gravitácia.



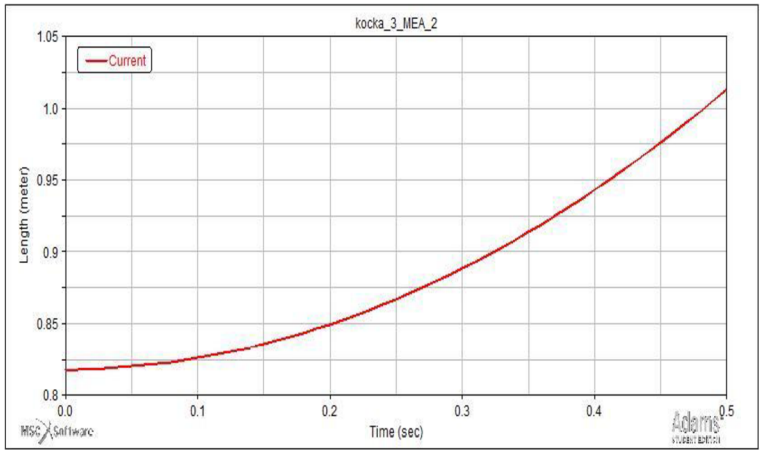
Obr. 14: Model vozíka v programe Solidworks



Obr. 15: Graf závislosti zvyslej polohy ťažiska kocky na čase

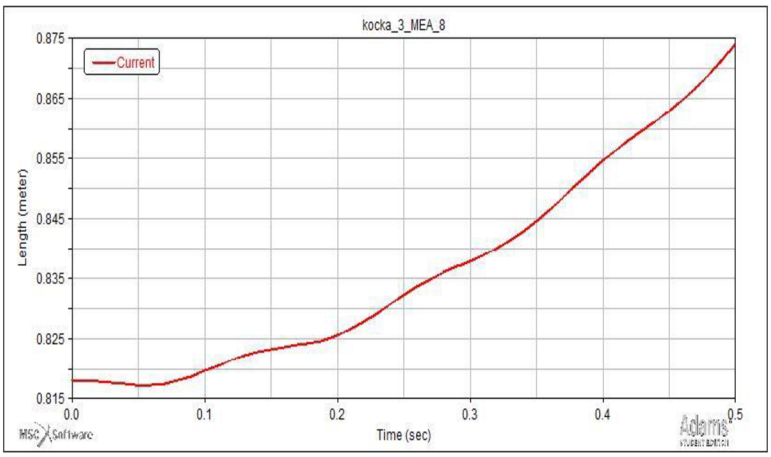
Po vyhotovení pohybovej analýzy bol model exportovaný do programu Adams. Všetky väzby a sily boli správne exportované . V informáciach o telesách softvér vypočítal hodnoty hmotností a zotrvačností, hmotnosť kocky bola 1995 kg , čiže hmotnosti ostatných telies boli voči tejto hodnote zanedbateľné. V programe bol potom

zadefinovaný kontakt medzi kockou a lyžinami nasledovne: *Forces - Special Forces - Create a Contact.* Následne došlo k simulácii sústavy tuhých telies. Z obr.16 je jasné, že po dobu pol sekundy sa merala zmena polohy ťažiska kocky. Na začiatku simulácie sa nachádzalo ťažisko vo výške $y_1 = 0{,}8173$ m . V čase $t = 0{,}5$ s ťažisko vystúpilo do výšky $y_2 = 1{,}013$ m.



Obr. 16: Graf závislosti polohy kocky na čase (tuhé lyžiny)

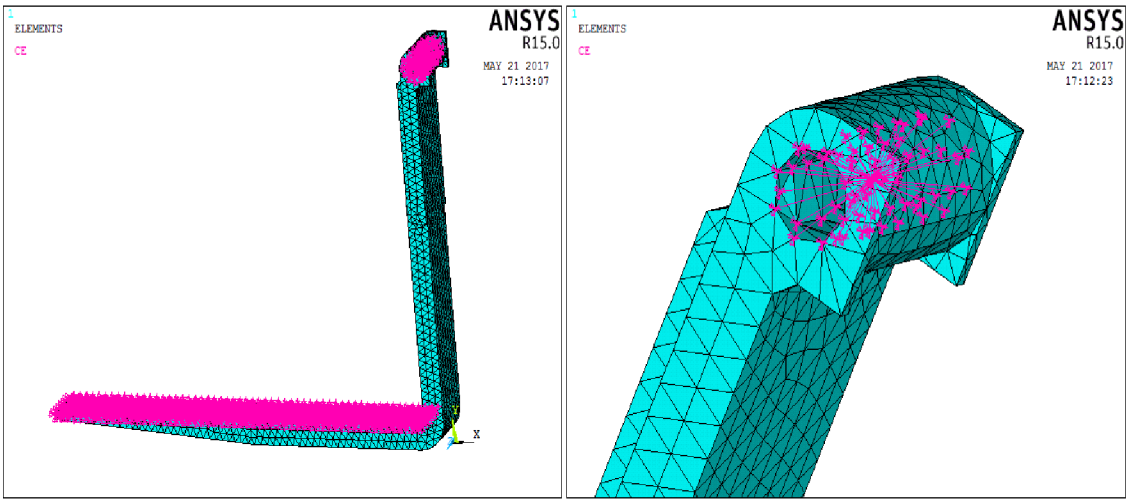
Z grafu je jasné , že vyhľadený priebeh polohy je spôsobený prítomnosťou tuhých telies v simulácii. Pre porovnanie závislosti polohy na čase sa v tom istom modely nahradili obe lyžiny za flexibilné lyžiny. Kód *mnf* súboru pružnej lyžiny vytvorenej v Ansyse sa nachádza v prílohe 2. Ďalej sa v Adamse staré diely zmazali, pričom zanikli aj ich väzby. Po importe *mnf* súboru (viz obr.18) sa v sústave zadefinovali rovnaké ekvivalentné väzby a nastala opätovná simulácia. Na začiatku simulácie bolo ťažisko kocky v polohe $y_1 = 0{,}8173$ m a po pol sekunde sa dostalo na hodnotu $y_2 = 0{,}8740$ m.



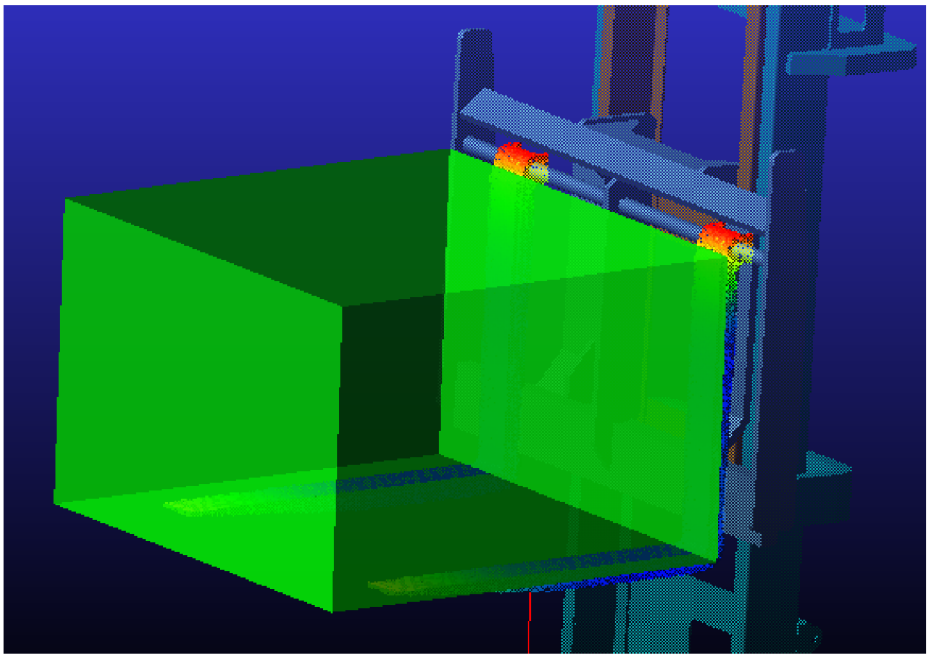
Obr. 17: Graf závislosti polohy kocky na čase (pružné lyžiny)

Z grafu je pozorovateľný kolísavý priebeh polohy, čo je zapríčinené pôsobením pružných lyžín. Z nelineárneho priebehu taktiež vyplýva, že za rovnaký čas dosiahne kocka nižšiu polohu ako je to v prípade tuhých telies. Rozdiel medzi týmito dvomi pokusmi bol badateľný aj z hľadiska trvania simulácie. Kvôli zložitejším výpočtom

bola animácia výrazne spomalená. Detail pôsobenia pružných vidlíc v programe MSC Adams sa nachádza na obr.19.

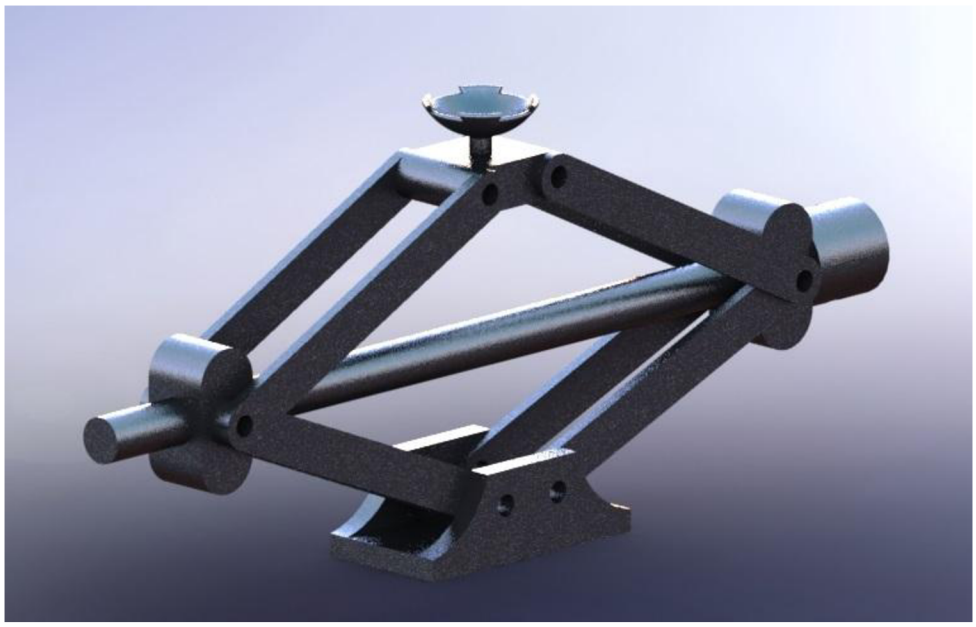


Obr. 18: Interface uzly na vidlici a detailný záber siete vo válcovej diere (Ansys)



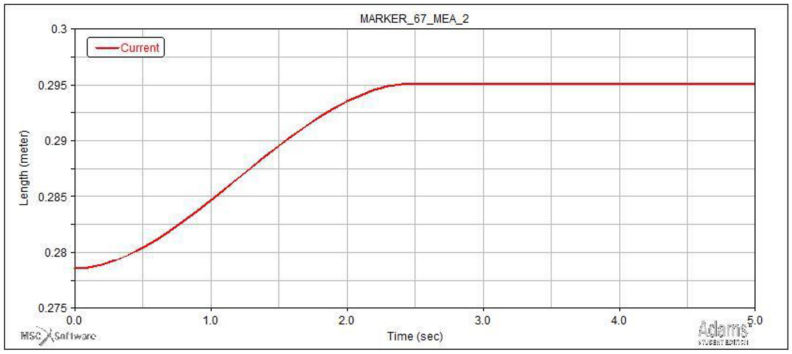
Obr. 19: Namáhanie pružných vidlíc pri zvyslom pohybe rámu (MSC Adams)

7.3 Mechanický zdvihák s tuhými a pružnými telesami v programe Adams



Obr. 20: Model mechanického zdviháku v programe SolidWorks

Rovnako ako vozík, aj CAD model zdviháku (viz obr.20) bol exportovaný do programu Adams. Pohon zdviháku bol definovaný na závitovej tyči funkciou *Point Motion*. Pohyb v nej bol definovaný funkciou *STEP(time , 0 , 0 , 2.5,50)*. Na vrchnú časť konštrukcie navyše pôsobila sila F = 10000 N. Po simulácii sústavy program nameral, že pri zadefinovanom pohone vystúpil vrchný bod zdviháku do výšky y = 29,5 cm, ktorú je vidno na obr.21. Ak by napríklad bolo snahou používateľa dostať najvyšší bod konštrukcie do nejakej konkrétnej polohy, naskytá sa pre neho možnosť použitia co-simulácie medzi programami MSC Adams a Simulink, ktorá umožňuje riadenie celej sústavy cez program Simulink. Touto témou sa neskôr zaoberá kapitola 7.4.

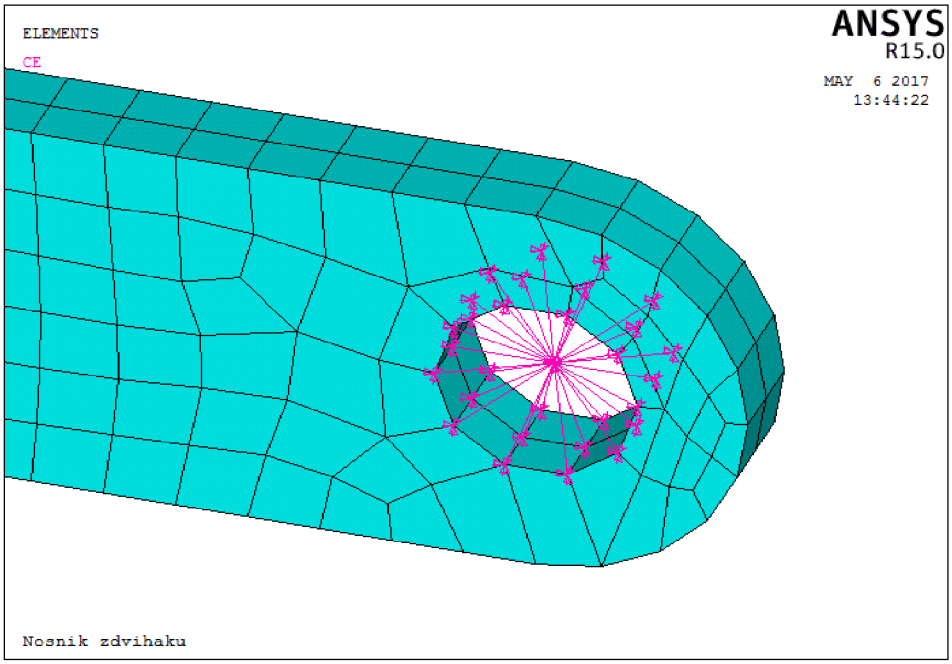


Obr. 21: Graf závislosti vrchného bodu zdviháku na čase

Dynamická analýza na tomto modeli bola vykonávaná s tuhými telesami ako aj s pružnými. Pružné nosníky boli vytvorené dvojakým spôsobom: externe vznikol *mnf* súbor v programe Ansys a na porovnanie boli vytvorené aj flexibilné nosníky priamo v rozhraní Adams pomocou modulu *ViewFlex*.

7.3.1 Tvorba flexibilného nosníka cez mnf súbor

Po exporte geometrie nosníka do programu ANSYS začal proces tvorby *mnf* súboru voľbou typu prvku. Prvok SOLID 185 sa používa na 3D modelovanie pevných štruktúr. U materiálových vlastností sa volil štruktúrny, lineárny, elastický a izotropný model materiálu. Za modul pružnosti v ťahu sa zadala hodnota 210 GPa , ktorá konkrétne predstavuje Youngov modul pre oceľ. Poissonova konštanta je 0,3. Hustota oceli je 7,85 g/cm^3. Následne sa musel cez príkaz *Meshing* vysieťovať celý objem telesa. Nastavila sa dĺžka hrany prvku taká, aby mriežka nebola príliš hustá. Študentská verzia Adamsu nie je schopná vyhodnotiť teleso s väčším počtom prvkov ako je 5000. Ďalej sa vytvorili interface uzly. Pre nich existuje typický prvok s názvom MASS21. V priestore sa určila poloha prvého interface uzlu, ktorý sa nachádzal v strede diery nosníka. V ďalšom kroku bolo treba vytvoriť sieť spojov v spoločnom bode , ktorý je totožný s prvým interface uzlom. Kvôli zložitosti práci v aktívnom priestore Ansysu bolo výhodnejšie pre ďalší postup zadávať príkazy do príkazového riadku.(viz príloha 1). Počiatok nového lokálneho súradného systému sa volil v interface uzle. Zapol sa valcový súradný systém a zadaním príkazu sa vyhľadali všetky uzly vzdialené 6 cm od počiatku súradného systému. Nakoniec sa tieto uzly spojili do jedného interface uzlu a vytvorili sieť,akú je vidieť na obr.22.



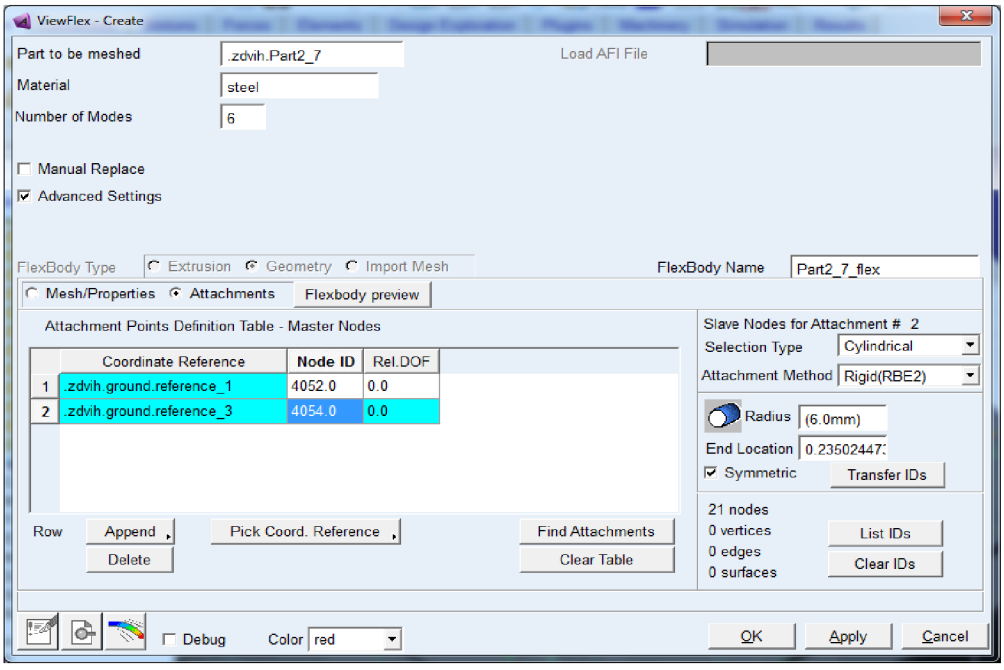
Obr. 22: Sústredenie siete v jednom interface uzle

7.3.2 Tvorba flexibilného nosníka v moduly ViewFlex

Na obr.23 sú popísané všetky funkcie modulu ViewFlex. Pri tvorbe pružného dielu bola použitá geometrická metóda, keďže existovala geometria nosníka. Každý z ôsmich dielov bol nastavený zvlášť ale s rovnakými vlastnosťami. Typ prvku bol zvolený *Solid* a pre tento typ bol jediný možný tvar tetrahedrický, teda štvorstenný. Poradie prvkov bolo kvadratické a namiesto automatického sieťovania bola zo zoznamu prvkovej špecifikácie vybraná možnosť nastavenia veľkosti prvku. Dĺžka jeho steny bola 5 mm. Ďalej sa príkazom *Straight* určilo , že všetky okrajové uzly prvku ležia na

rovných okrajoch. Napäťová analýza bola vypnutá a príkaz *MSN Based Refinement* by bol zapnutý len ak by sa riešili zakrivené okraje prvkov. Po zadaní podmienok siete príkaz *Mesh preview* vytvoril náhľad na vysieťovanú tuhú súčiastku. Cez *Find Attachements* program vyhľadal všetky uzly na nosníku, v ktorých boli zadefinované väzby . Okrem dvoch valcových väzieb v dierach nosníka boli ostatné body zo zoznamu zmazané. Pre dva zostávajúce uzly boli vytvorené tzv ,,pavúčie siete,, a všetky uzly do nich patriace boli spojené s týmito interface uzlami. V nasledujúcich riadkoch je popísaný postup vyhotovenia valcovej siete v diere nosníka.

Na začiatku bolo dôležité nájsť na pracovnej ploche stredový uzol, ktorý reprezentoval budúci interface uzol. Po jeho duplikovaní sa novému uzlu modifikovala z súradnica tak, aby sa nachádzala vo viditeľnej vzdialenosti od starého uzlu. V *Selection type* sa zvolila možnosť *Cylindrical*, teda valcový povrch. Polomer diery nosníka bol 6 mm. *End Location* určuje dĺžku valca. Pravým kliknutím na riešené teleso bol vybratý interface uzol ako začiatočný stredový bod valca a ďalej v okienku *End Location* cez príkaz *Pick location* sa na pracovnej ploche našiel duplikovaný uzol, ktorý predstavoval konečný stredový bod valca. Zapnutím príkazu *Symmetric* sa vytvoril valec aj na druhej strane interface uzlu. Pomocou *Transfer IDs* sa označili uzly, ktoré ležali ako na povrchu valca, tak aj na povrchu diery. Po zadaní príkazu *Apply* bol interface uzol hotový. Taký istý proces bol aplikovaný aj pri vzniku druhého interface uzlu.

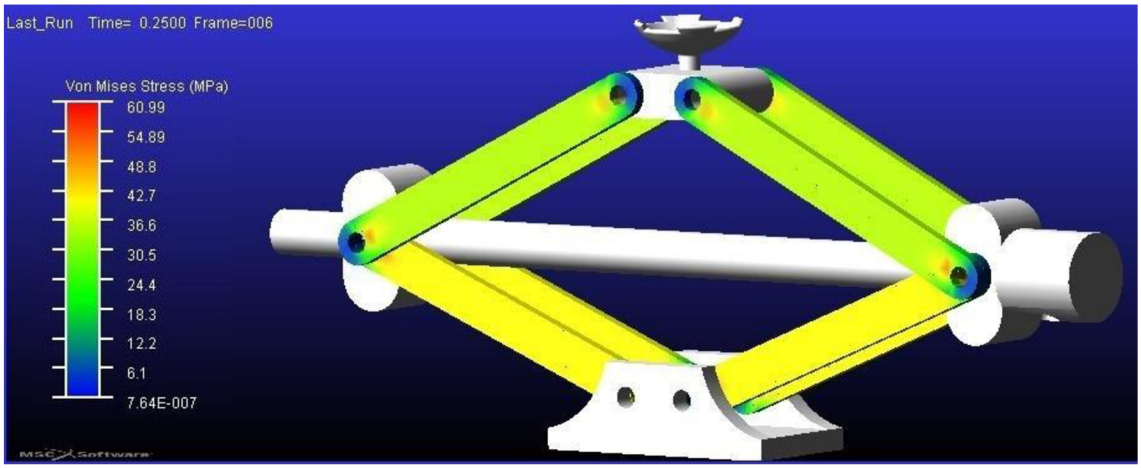


Obr. 23: ViewFlex - nastavenie interface uzlov

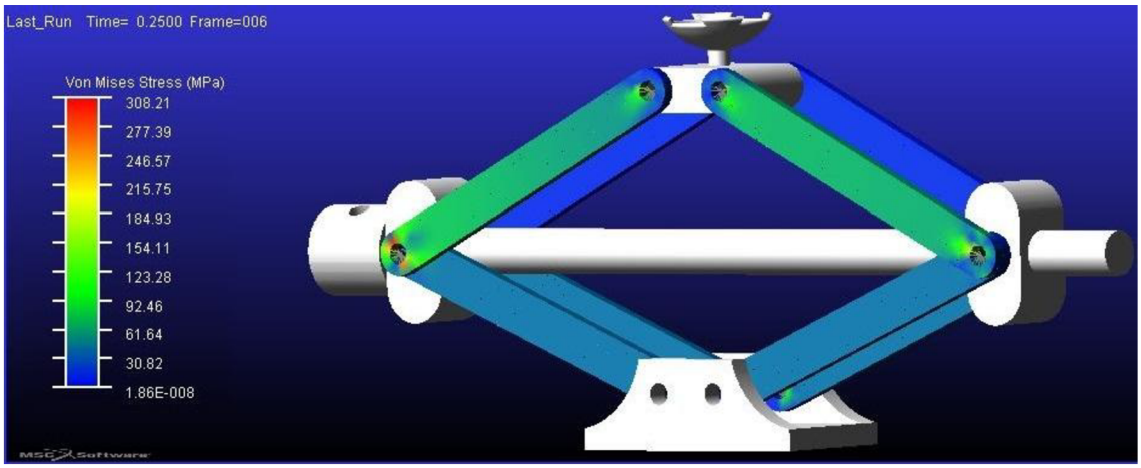
7.3.3 Napäťové porovnanie nosníkov vytvorených dvomi rôznymi spôsobmi

V prvom prípade, ak na zdvihák pôsobí sila 10 000 N, maximálne napätie na jednom z nosníkov je $\sigma_1 = 61$ MPa. Napätie je po celom diely približne konštantné a z obr.24 je vidieť, že najväčšie napätie sa nachádza pri okraji diery smerom do stredu telesa. V druhom prípade pri rovnakej záťaži bolo vypočítané maximálne napätia až $\sigma_2 = 308$ MPa. Je to hlavne spôsobené tým, že sieť v okolí diery je príliš riedka ,teda malý

počet uzlov je spájaných do spoločného interface uzla a tak spočítané rozloženie napätia v okolí diery sa výrazne líši od predošlého merania. Z obr.25 je jasné, že mimo dier sa drží napätie na nosníkoch približne konštantné a veľkosti napätí sú porovnateľné s hodnotami napätia z prvého merania.



Obr. 24: Napäťová analýza nosníkov vytvorených v Ansyse



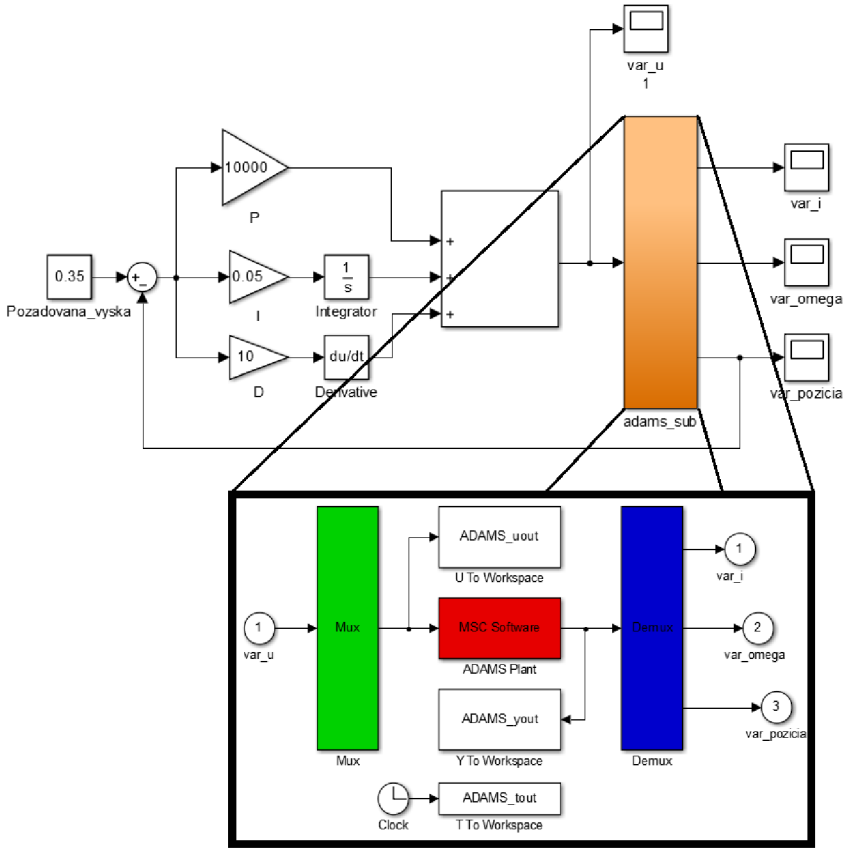
Obr. 25: Napäťová analýza nosníkov vytvorených v Adamse

7.4 Mechanický zdvihák v co-simulácii programov Adams a Simulink

Návrh riadenia bol založený na regulácii pohonu závitovej tyče zdviháka. Na pohon tyče bol použitý jednosmerný elektromotor. Model elektromotoru je definovaný dvomi rovnicami: elektrická rovnica odvodená z náhradnej schémy jednosmerného motoru a mechanická rovnica popisujúca moment na rotore. Pomocou funkcie *Create a Differential Equation* nachádzajúcej sa v priečinku *System Elements* sa definovala elektrická rovnica s názvom *i_dot*:
-(R/L)(DIF(i_dot))-(C/L)*.uhlova_rychlost_tyc+(varval(var_u)/L).* Pomocou funkcie *Design Variable* sa definovali veličiny motoru. Odpor vinutia rotoru R, indukčnosť motoru L, menovité napätie U, konštanta motora C . Funkcia *uhlova_rychlost_tyc* merala uhlovú rýchlosť na tyči počas celej simulácie a funkcia *pozicia_zdvihaku* merala výšku vrchného bodu konštrukcie. Ďalej boli v Adamse vytvorené potrebné výstupné premenné: *var_omega* ako uhlová rýchlosť tyče definovaná funkciou

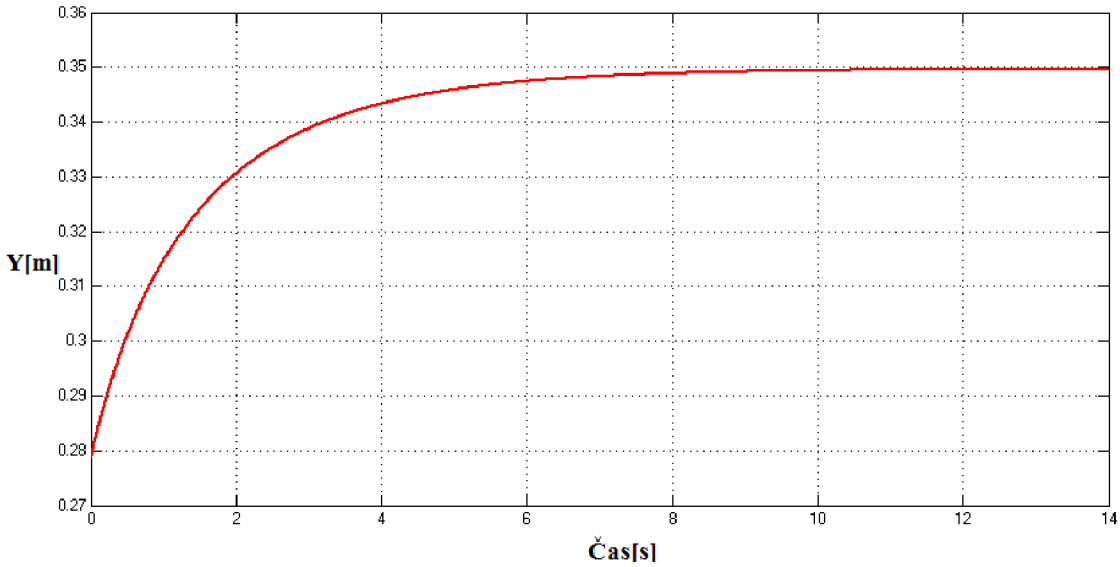
uhlova_rychlost_tyc ,*var_pozicia* ako poloha vrchného dielu zdviháku na osi y definovaná funkciou *pozicia_zdvihaku* a *var_i* ako prúd prechádzajúci kotvou motoru definovaný funkciou *DIF(i_dot)*. Riadenou vstupnou veličinou bolo napájacie napätie elektromotoru s názvom *var_u* . V nastavení pohybu tyče bolo zmenené prevedenie pohybu. Rotačný pohyb bol nahradený momentom kliknutím na funkciu *Create a Torque* v priečinku *Forces*. Moment bol definovaný rovnicou *C*(DIF(i_dot))*.

Po spustení funkcie *Plant Export* boli veličiny rozdelené do zoznamov vstupných a výstupných premenných a názov riadenia sa zmenil na *riadeny_zdvihak*. Po spustení tohto súboru v Matlabe a zadaní príkazu *adams_sys*, vytvoril sa model motoru v Simulinku s názvom *adams_sub*. Ten sa vložil do vyhotovenej blokovej schémy PID regulátoru,viz obr.26.



Obr. 26: Riadenie polohy zdviháka v Simulinku

Z predchádzajúceho obrázku je taktiež vidno, že program sa snaží riadiť výšku zdviháku, konkrétne jeho vrchného bodu. Na základe napätia vstupujúceho do motoru a požadovanej výšky zdviháku si motor určí také otáčky, aby nakoniec doreguloval do určenej polohy. Po doladení regulátoru sa docielilo, že zdvihák poháňaný elektromotorom sa dostal do požadovanej výšky 35 cm, viz obr.27.



Obr. 27: Graf závislosti polohy zdviháku na čase (Simulink)

8 Záver

Hlavnými cieľmi tejto práce sú analýza a popis exportovania CAD súborov do prostredí pre simuláciu multi-body dynamiky. Práca ďalej poskytuje návod na implementovanie pružného telesa do sústavy tuhých telies v prostredí MSC Adams.

Kapitola 3 je zameraná na popis postupu prepojenia programov SolidWorks a SimMechanics. Vysvetluje teoretický postup pri exportovaní CAD modelu z programu SolidWorks a následný import do programu SimMechanics. Prepojenie nie je možné bez inštalácie spojovacieho linku. CAD model ďalej nemôže obsahovať väzby, ktoré nie sú podporované programom SimMechanics.

Kapitola 4 sa zaoberá prepojením programov SolidWorks a MSC Adams.V tomto prípade sa okrem geometrie exportuje zo SolidWorks aj pohybová analýza. Je nevyhnutné pracovať s verziou SolidWorks Premium, ktorá ako jediná poskytuje funkciu pohybovej štúdie.

Nasledujúca kapitola sa koncentruje na popis tvorby pružného telesa v programe Ansys a následného zakomponovania do sústavy tuhých telies v programe MSC Adams. Vznik pružného telesa spočíva vo vytvorení *mnf* súboru, v ktorom treba definovať tzv. interface uzly, ktoré reprezentujú miesta spojov a väzieb. Avšak flexibilné teleso sa dá vytvoriť aj v programe MSC Adams a tak sú vysvetlené obe metódy importu.

Kapitola 6 sa upriamuje na popis co-simulačného prepojenia medzi programom MSC Adams a Simulink. Toto prepojenie sa používa na riadenie dynamického modelu z programu Simulink.

Posledná kapitola zhrňuje popis prepojení programov na konkretných príkladoch. Zameriava sa hlavne na výsledky simulácii a porovnáva pohyb sústavy pružných telies s pohybom sústavy tuhých telies. V úlohe vysokozdvižného vozíka je jasné, že pružné lyžiny sa deformujú a závažie sa na lyžinách húpa. Porovnávajú sa tiež metódy tvorieb pružných telies na výstupných napätiach. Z výsledkov plynie odporúčanie na používanie programu Ansys. Posledná časť kapitoly sa venuje co-simulácii programov MSC Adams a Simulink .Jej cieľom bol návrh riadenia zdviháku poháňaného elektromotorom tak, aby zdvihák vystúpal do konkrétnej výšky.

9 Zoznam použitej literatúry

[1] Simscape Multibody [online], [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/products/simmechanics.html>

[2] SolidWorks - 3D CAD modelovanie [online], [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://www.schiertechnik.sk/solidworks/>

[3] MathWorks Support [online], [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help>

[4] Adams [online], [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <http://www.mscsoftware.com/product/adams>

[5] Nápověda pro SOLIDWORKS [online], [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <http://help.solidworks.com/2016/Czech/SolidWorks/sldworks/c_introduction_toplevel_topic.htm>

[6] FORIŠKA, A. *Simulační modelování mechatronické soustavy manipulátoru v ADAMS.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 63 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D..

[7] EHRENBERGER, P. *Modální vlastnosti klikového ústrojí čtyřválcového traktorového motoru.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 114 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Radim Dundálek, Ph.D..

[8] ANSYS Mechanical APDL 15.0, Product help

[9] CAD CAM TUTORIAL <https://www.youtube.com/channel/UCjd_zIvYtQymk0dPx3vTJcA/videos>

[10] Motion mechanism <https://www.youtube.com/watch?v=jaxcPrE7i5w>

[11] Getting Started Using Adams/Flex - Adams 2014 [online], [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <https://simcompanion.mscsoftware.com/infocenter/index?page=content&id=DOC10628&actp=LIST>

[12] Adams ViewFlex Help (for Adams 2016) [online], [cit. 2017-05-03]. Dostupné z: <https://simcompanion.mscsoftware.com/infocenter/index?page=content&id=DOC11083&actp=RSS>

[13] Adams Durability Help (for Adams 2016) [online], [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <https://simcompanion.mscsoftware.com/infocenter/index?page=content&id=DOC11067&cat=2016_DOCS&actp=LIST>

Zoznam obrázkov

Obr. 1: Pružné nosníky v sústave mechanického zdviháku 7
Obr. 2: Modul Adams Flex 16
Obr. 3: Obsah modelu pružného telesa 16
Obr. 4: Prostredie programu Adams Flex 18
Obr. 5: Nastavenia v okne ViewFlex 19
Obr. 6: Nodal Plot 20
Obr. 7: Porovnanie priebehov napätí v dvoch rôznych uzloch na pružnom telese 20
Obr. 8: Nastavenie premenej 21
Obr. 9: Umiestnenie vstupnej premennej 22
Obr. 10: Funkcia Plant Export 22
Obr. 11: Model mechanizmu v programe SolidWorks 24
Obr. 12: Mechanizmus v programe Simulink 25
Obr. 13: Model mechanizmu v Simulinku a otáčky jeho kolesa v závislosti na čase 25
Obr. 14: Model vozíka v programe Solidworks 26
Obr. 15: Graf závislosti zvyslej polohy ťažiska kocky na čase 26
Obr. 16: Graf závislosti polohy kocky na čase (tuhé lyžiny) 27
Obr. 17: Graf závislosti polohy kocky na čase (pružné lyžiny) 27
Obr. 18: Interface uzly na vidlici a detailný záber siete vo válcovej diere (Ansys) 28
Obr. 19: Namáhanie pružných vidlíc pri zvyslom pohybe rámu (MSC Adams) 28
Obr. 20: Model mechanického zdviháku v programe SolidWorks 29
Obr. 21: Graf závislosti vrchného bodu zdviháku na čase 29
Obr. 22: Sústredenie siete v jednom interface uzle 30
Obr. 23: ViewFlex - nastavenie interface uzlov 31
Obr. 24: Napäťová analýza nosníkov vytvorených v Ansyse 32
Obr. 25: Napäťová analýza nosníkov vytvorených v Adamse 32
Obr. 26: Riadenie polohy zdviháka v Simulinku 33
Obr. 27: Graf závislosti polohy zdviháku na čase (Simulink) 34