

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY
A BIOMECHANIKY
INŽENÝRSKÁ MECHANIKA A BIOMECHANIKA



PRIEMYSLOVÝ PROJEKT
AUFEEER DESIGN



SEMESTRÁLNA PRÁCA

AUTOR PRÁCE
BRNO 2018

BC. ONDREJ ZVOZIL

1 Úvod

Táto práca vznikla v rámci predmetu *priemyslový projekt*. Obsahuje stručné predstavenie spoločnosti AUFEER DESIGN, s ktorou spolupracujem v rámci diplomovej práce, a niektoré úskalia tejto diplomovej práce. Väčšina informácií v nasledujúcej sekcii je prevzatá z oficiálnej stránky spoločnosti: <http://afd.cz>

2 Základné informácie o AUFEER DESIGN

AUFEER DESIGN je medzinárodná spoločnosť špecializovaná na poskytovanie dizajnerských, vývojových, konštrukčných a výpočtových produktov a služieb v oblasti automobilov, koľajových vozidiel a letectva.

Spoločnosť bola založená v roku 2000. Z počiatku poskytovala svojim klientom vývojové a konštrukčné práce v oblasti automobilového priemyslu, neskôr tiež koľajových vozidiel a ďalších produktov. V nasledujúcich rokoch sa poskytované služby rozrástli o dizajn, podporu dizajnu (A-class surfacing), konštrukciu prípravkov, vedenie projektov, vývoj a výrobu prototypových nástrojov a dielov.

V roku 2016 došlo k spojeniu so spoločnosťou Matador a boli otvorené ďalšie pobočky na Slovensku a v Mexiku. V súčasnosti má spoločnosť 360 zamestnancov. Svojich zamestnancov spoločnosť často vysiela priamo k zákazníkovi ako externých pracovníkov.

2.1 Členenie

Spoločnosť sa podľa svojho pôsobenia delí na 4 sekcie a tie na oddelenia. Nasleduje stručný výpis činností jednotlivých oddelení.

Dizajn

– ručné aj digitálne skicovanie, rendering a tvorba 3D modelov, hlavne interiéry a exteriéry dopravných prostriedkov, digitalizácia.

Automobilové inžinierstvo

- **Oddelenie vývoja a konštrukcie karosérií** – vývoj a výroba častí karosérií automobilov a mechanizmov s ňou spojených, analýzy zástavby dielov do karosérie, optimalizácia spojovania dielov, spracovanie výkresovej dokumentácie pre prototypovú aj sériovú výrobu.
- **Vývoj plastov** – vývojové práce pre interiérové aj exteriérové diely automobilového priemyslu, vývoj a simulácie vonkajšieho osvetlenia, spracovanie výkresovej dokumentácie, návrh technológie výroby, technologický dohľad pri zadávaní do výroby, výroba prototypov 3D tlačou alebo pomocou prototypových foriem.

- **CAE/FEA oddelenie** – výpočty a simulácie overujúce tuhosť, pevnosť, životnosť a dynamické chovanie zvolených konštrukčných riešení vo vývoji automobilov a kolajových vozidiel, statické, lineárne, nelineárne aj dynamické simulácie, crashtesty, chovanie posádky pri náraze a testy funkčnosti bezpečnostných systémov, návrhy konštrukčných zlepšení na základe výsledkov analýz.
- **Oddelenie vývoja káblových zväzkov a elektroniky** – riešenie zástavby elektrických káblových zväzkov a ďalších elektrických aj neelektrických súčastí pre automobilový aj letecký priemysel.

Preprava

- **Dizajn a podpora obchodu** – tvorba skíc, tvarových konceptov, modeling, statické vizualizácie v prostredí, tvorba 3D modelov z 2D skíc a scanov, concept modeling, A-class surfacing, rendering.
- **Konštrukcia a výpočty** – konštrukčné práce v 3D (sw PTC Creo, Catia), tvorba 2D dokumentácie, návrh a príprava káblových trás, vyšetrovacie štúdie v 3D, FEM simulácie (pevnostné, tuhostné, modálne analýzy – sw Abaqus), overovanie skrutkových spojov podľa DIN 25201, VDI 2230.

Industrializácia

- **Oddelenie konštrukcie lisovacieho náradia** – vývoj a konštrukcia lisovacích nástrojov plechových dielov pre výrobcov automobilov a ich dodávateľov, poradenstvo v oblasti lisovateľnosti dielov, tvorba metodiky lisovania.
- **Oddelenie priemyselnej automatizácie** – návrh, 3D konštrukcia zariadení, ich simulácie, programovanie robotov a ich rozpohybovanie na mieste, optimalizácia taktu linky, kontrola dosiahnuteľnosti robotov, blokácie proti možným kolíziám, stavba liniek a finálne odladenie.
- **Oddelenie kubingu** – výroba etalónovej karosérie náhradnou technológiou, napr. frézovaním.

Letectvo

– dizajn exteriérov, interiérov aj VIP interiérov, vývoj podvozkov, káblových zväzkov, vývoj a realizácia montážnych prípravkov, dynamická analýza a analýza únavovej životnosti prvkov, dizajn avioniky, spracovanie tech. dokumentácie, certifikačný a verifikačný engineering.

2.2 Sídlo a pobočky

- Sídlo
Bucharova 1314/8
158 00 Praha 5 – Stodůlky
Česká republika
- Kancelária oddelení FEM/CAE,
dizajn a surfacing
Koněvova 350
293 01 Mladá Boleslav – Čejetice
Česká republika
- Hlavná kancelária (obr. 1)
Ptácká 156
293 01 Mladá Boleslav
Česká republika
- Kancelária pre vývoj koľajových
vozidiel
Bucharova 1314/8
158 00 Praha 5 – Stodůlky
Česká republika
- Kancelária „DYTRON LINE“
Slovanská 928/8
741 01 Nový Jičín
Česká republika
- Kancelária
Werferova 1
040 11 Košice
Slovenská republika



Obr. 1: Hlavná kancelária

V súčasnosti je vo výstavbe nová budova v Mladej Boleslavi. Bude tu sídliť dizajnové štúdio pre tvorbu hlinených modelov v mierke 1:1 pre automobilový priemysel a CAE oddelenie.

2.3 Vybavenie

Spoločnosť disponuje nasledovným hardwarovým a softvérovým vybavením.

Software	Autodesk 3ds Max	Abortex Iso Draw
Catia V5	Autodesk Alias Design	Adobe Creative Suite
Creo	Microstation	Comsa LDarado
Pro/ENGINEER	Robcad	DS Abaqus
Icem Surf	Process Designer	Autoform
Autodesk Alias Surface	Ansa	PLM DS Enovia
Autodesk Showcase	MSC Nastran	Tebis
AutoCAD LT	Pam Crash	

Hardware

Lenovo System x Server
 DELL Precision
 FUJITSU CELSIUS W Series, M Series
 Mobile workstation HP
 Mobile workstation DELL Precision
 Mobile workstation Fujitsu
 Mobile workstation Lenovo

Výmena dát

SFTP
 IBM-Lotus Sametime
 Polycom
 KVS
 TeamViewer

3 Moja spolupráca s CAE/FEA oddelením

Oddelenie vedie Ing. Lumír Lacina, PhD. Pracuje tu v súčasnosti 18 ľudí. Priamo v kancelárii však pracujú len traja až piati zamestnanci. Ostatní totiž pôsobia ako externí pracovníci priamo u zákazníka. Jedná sa napríklad o prípravu sietí konečných prvkov pre *Porsche*, vývoji krídiel lietadla L-39NG pre *Aero Vodochody* či simulácie crashtestov v *Škoda Auto*.

S firmou, konkrétne s CAE/FEA oddelením, spolupracujem od začiatku roka 2017 v rámci diplomovej práce. Jedná sa o kinematickú a pevnostnú analýzu stieračového mechanizmu vo vývoji, od výrobcu *Pricol Wiping Systems*, skorej *PMP PAL*). V rámci pevnostnej analýzy sa bližšie skúma odozva mechanizmu na spustenie stieračov v prípade, že sú stierače zablokované (napr. primrznuté).

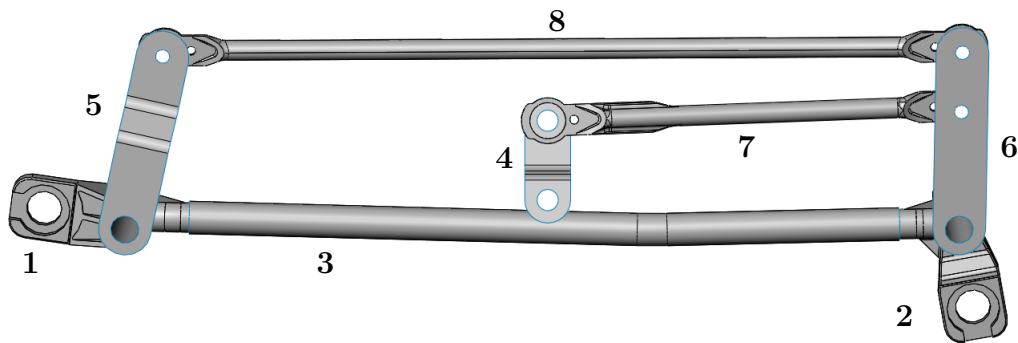
Od začiatku spolupráce som v kontakte s Ing. Vojtěchom Tomečkom z CAE/FEA oddelenia, ktorý mi je neustále k dispozícii a s ktorým svoju prácu konzultujem. Prostredníctvom neho a CAE/FEA oddelenia som bol zaškolený pre používanie softvéru Ansa a Abaqus, pričom mi bola zapožičaná licencia na ich používanie. Z počiatku sa jednalo o elementárne úlohy, ktoré mi boli na mieru pripravované tak, aby som si osvojil základy práce s Abaqusom. Dôraz bol venovaný hlavne na porozumenie textovým vstupom pre statickú a modálnu analýzu jednoduchých súčastí. Neskôr to boli jednoduché mechanizmy, v ktorých som si osvojoval základy modelovania kinematických väzieb. Väčšina z týchto úloh bola pripravovaná v Anse.

Ansa sa využíva na CAE oddelení ako pre-processor, teda na prípravu úloh pre výpočet. Vstupom do programu je CAD geometria, ktorá sa tu dá modifikovať a v prípade potreby opraviť. Prítomné sú pokročilé možnosti tvorby siete konečných prvkov a špecifické prostredia pre široké spektrum MKP systémov (Ansys, Abaqus, ...). Pomocou týchto prostredí sa zadávajú väzby, zaťaženie, kontakty, typ úlohy, atď. Výstupom z programu je kód, ktorý je vstupom pre analýzu v konkrétnom

výpočtovom programe (v našom prípade Abaqus).

3.1 Tvorba modelu

Moja práca doposiaľ bola vytvoriť geometrický model stieračového mechanizmu podľa zadaných koordinátov a rozmerov (CAD model je majetkom *Pricol Wiping Systems (PMP PAL)*, takže mi nemohol byť poskytnutý). Zostava pozostáva z housingov (1, 2) ktoré sú prepojené rúrkou (3). Na kľuku (4) je dodávaný krútiaci moment od motorčeka s prevodovkou. Rotačný pohyb kľuky je pomocou dutých tvarovaných profilov (7, 8) prenášaný na páky (5, 6) ako pohyb kývavý. Súčasťou zostavy sú ešte aj ramená stieračov, ktoré rotujú spolu s pákami, tie však na obr. 2 zobrazené nie sú. Čísla v zátvorkách odpovedajú číslam súčastí na tomto obrázku. Nasledoval import geometrie do Ansy a nutné úpravy geometrie, na čo nadväzovala tvorba konečno-prvkového modelu.

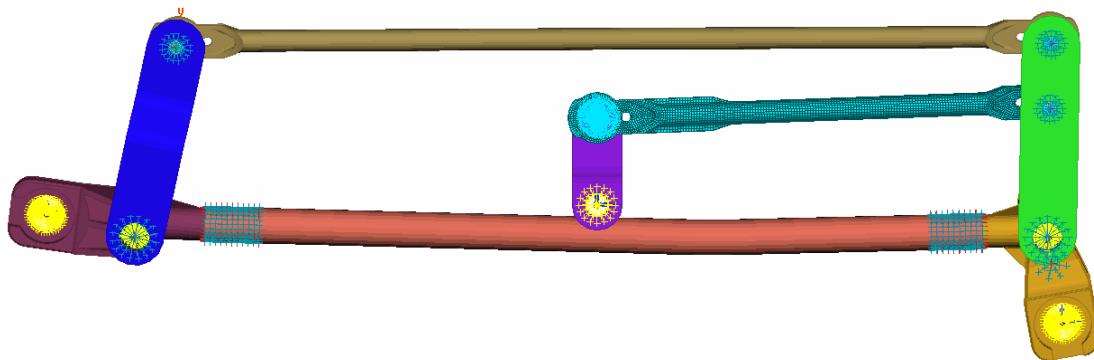


Obr. 2: CAD model mechanizmu

Duté profily, páky, kľuka a časti ramienok stieračov sú modelované ako tenkosenné telesá pomocou lineárnych membránových prvkov. Housingy sú ako jediné modelované pomocou objemových tetraedrických prvkov. Pri tvorbe siete som dbal na jej kvalitu najmä na miestach, ktoré budú pre vyhodnotenie analýzy kľúčové. Boli dodržané určité kritéria max. a min. vnútorných uhlov prvkov, max. pomer strán, a ďalšie.

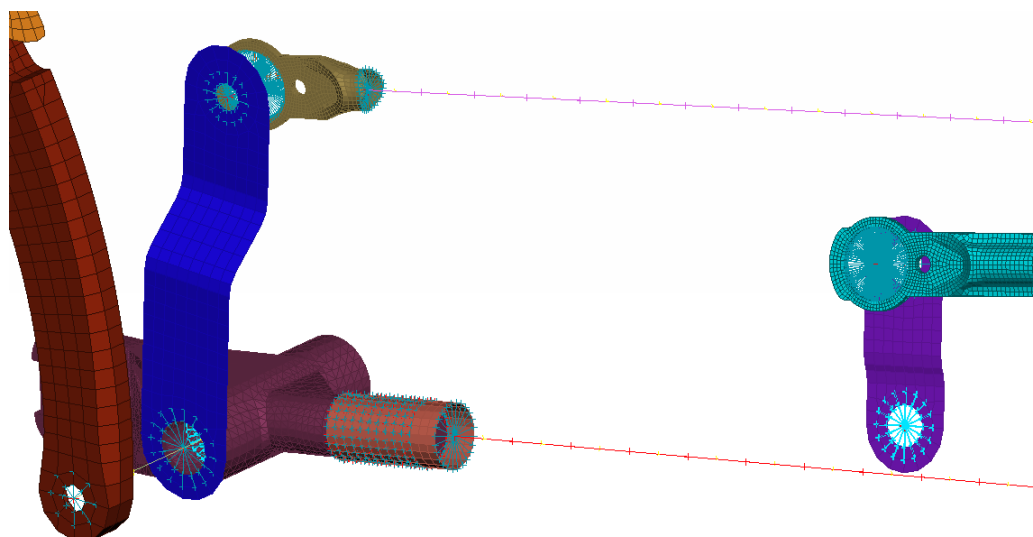
Po dokončení siete prvkov nasledovalo „poprepájanie“ mechanizmu pomocou prúťových prvkov a kinematických väzieb. Toto bol najnáročnejší krok, nakoľko bolo treba postupovať po malých krokoch, a po každom kroku bolo vhodné overiť funkčnosť časti mechanizmu. Pre tento účel je veľmi efektívny nástroj modálna analýza. Výsledný mechanizmus by mal mať len 1 stupeň voľnosti, teda požadovaný pohyb mechanizmu, čo sa v modálnej analýze prejaví nulovou 1. vlastnou frekvenciou. Dokončený MKP model mechanizmu je zobrazený na obr. 3, z dôvodu prehľadnosti opäť bez ramien stieračov.

Kompletný model (aj s ramenami stieračov) obsahuje cez 40000 membránových a takmer 35000 objemových prvkov. Jednoduchá statická úloha by na modernom počítači s takýmto počtom konečných prvkov trvala rádovo sekundy. V tomto prípade ide však o zložitejšiu analýzu – viac v nasledujúcej sekcii. Pre výrazné ušetre-



Obr. 3: MKP model

nie výpočtového času, najmä pre potreby prvotných testovacích analýz, bol model zjednodušený. Stredné časti dutých spojovacích profilov, pôvodne z membránových prvkov, boli nahradené prúťovými prvkami. Tým bolo ušetrených zhruba 12000 prvkov, čo je viac ako štvrtina z pôvodného počtu membránových prvkov. Detail na takto zjednodušený model je na obr. 4.



Obr. 4: Zjednodušený MKP model

Súčasťami mechanizmu sú priradené celkovo 3 modely materiálu. Jedná sa o elasto-plastické modely s izotropným spevnením, zadané pomocou bodov závislosti $\sigma - \epsilon$, modulom pružnosti v ťahu E , Poissonovým pomerom μ a hustotou ρ . Konkrétne hodnoty odpovedajú nasledujúcim materiálom:

- hliníková zliatina na odliatky housingov a spodnú súčasť každého z ramien stierača,
- oceľ *DC04* vhodná k tvárneniu za studena pre jednotlivé duté profily,
- konštrukčná oceľ *S355* pre ostatné súčasti.

3.2 Analýza

Úloha zablokovania stieračov je riešená v dvoch na seba nadväzujúcich kvázi-statických analýzách. V prvom kroku je to voľná rotácia mechanizmu do požadovanej polohy. Následne sú zafixované ramená stieračov na svojich koncoch a rotácia kľuky pokračuje, až po dosiahnutie kritického krútiaceho momentu. Ten je sledovaný ako reakcia vo väzbe. Konkrétna kritická hodnota závisí od použitého motorčeka a prevodovky, v našom prípade to je $41 \text{ N} \cdot \text{m}$

Ako požadovaná poloha blokácie nie je uvažovaná len dolná poloha stieračov, cieľom je nájsť kritickú polohu (z hľadiska namáhania) v celom rozsahu pohybu stieračov. Zaujímavým je najmä namáhanie tvarovaných profilov, ktoré sú v závislosti od polohy zablokovania namáhané ako na ťah, tak aj na tlak. Práve nájdenie polohy, kde bude dochádzať k max. tlakovému napätiu u týchto profilov je predmetom súčasných analýz. Jedným z cieľov práce je totiž posúdenie súčastí mechanizmu voči medznému stavu vzpernej stability.

Ako vzor bude predvedená analýza so zjednodušeným modelom. Mechanizmus je zaťažovaný deformačne – pomocou natočenia kľuky v protismere pohybu hodinových ručičiek, kde voľné natočenie kľuky voči pôvodnej polohe¹ je zhruba 74° . Následne sú konce ramien stieračov zablokované a rotácia kľuky pokračuje až po dosiahnutie kritického momentu, kedy sa analýza zastaví.

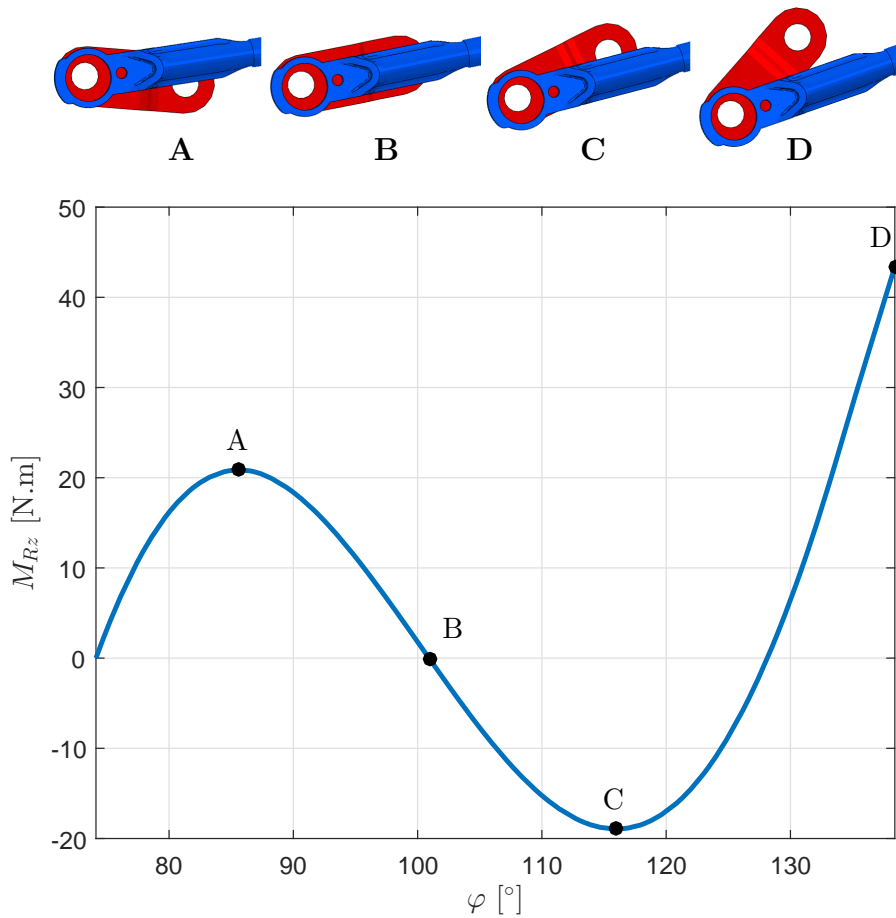
3.3 Výsledky vzorovej analýzy

Na obr. 5 je zobrazená závislosť reakčného momentu vo väzbe kľuky na natočenie kľuky po zablokovaní. Po počiatočnom náraste momentu dochádza k jeho poklesu až do záporných hodnôt. To odpovedá prechodu mechanizmu cez bod zvratu, za ktorým sa akumulovaná elastická energia v súčastiach môže uvoľniť. V tejto oblasti teda motor nemusí dodávať žiaden krútiaci moment, ale naopak, moment je na hriadeľ motora dodávaný formou elastickej energie, ktorá je akumulovaná v jednotlivých súčastiach. Nasleduje opätovný rast momentu, až po dosiahnutie kritickej hodnoty. Kľúčové okamihy tohto priebehu sú vyznačené na grafe písmenami A-D, ktorým prislúchajú obrázky vzájomnej polohy kľuky a kratšieho spojovacieho profilu. Ak mechanizmus neprekoná bod zvratu, závislosť reakčného momentu na natočení kľuky je len rastúca.

Na obr. 6 je farebne zobrazený konečný (deformovaný) stav a odtieňmi šedej nedeformovaný stav mechanizmu. Farebná mapa kvalitatívne znázorňuje celkové posuvy (vrátane voľnej rotácie).

Najvýraznejšie sa deformujú ramená stieračov, vďaka svojej štíhlosti. V blízkosti ich uchytania dochádza k lokálnej plastizácii. Realizácia väzieb dovoľuje, aby boli spojovacie profily namáhané čistým ťahom/tlakom. V okamihu dosiahnutia kritického momentu je kratší spojovací profil namáhaný tlakovým napätím $\sigma_3 = -45 \text{ MPa}$. Posúdenie voči medznému stavu vzpernej stability bude predmetom ďalších analýz. V prípade tohto mechanizmu je pravidlo, že ak je jeden zo spojovacích profilov v určitom momente namáhaný na tlak, druhý je namáhaný na ťah, a opačne. Dlhší z nich je v tomto prípade namáhaný ťahovým napätím $\sigma_1 = 13 \text{ MPa}$. Uvedené

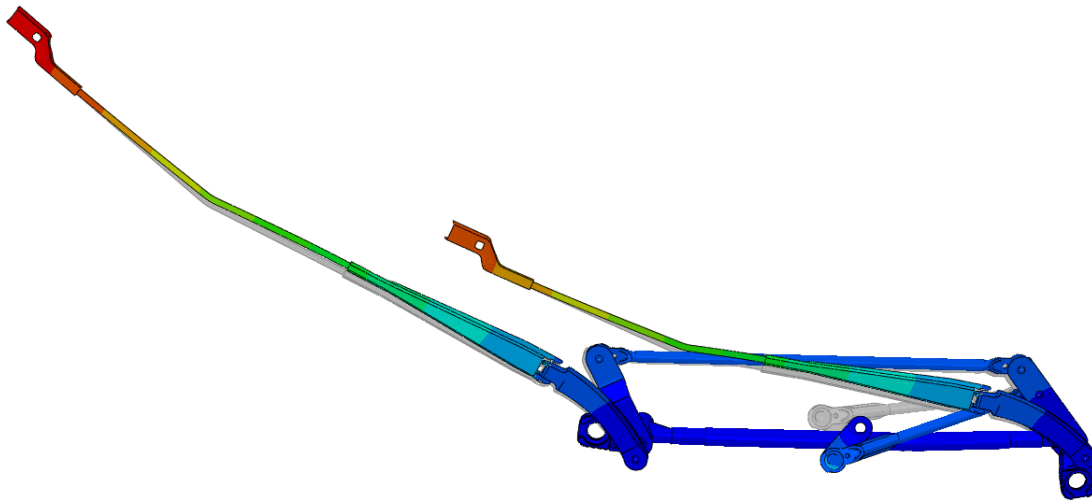
¹Pôvodnej polohe mechanizmu odpovedá kľuka v polohe zvislo na hor, napr. obr. 3.



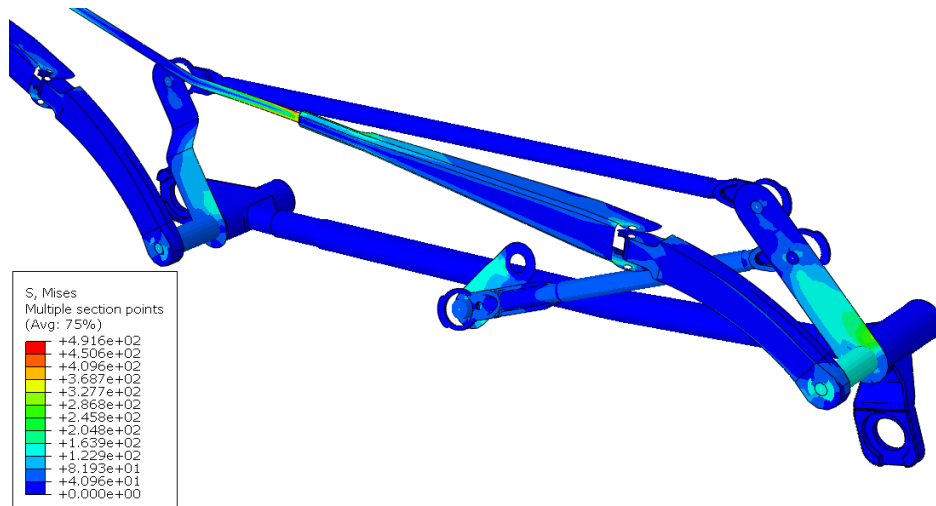
Obr. 5: Závislosť reakčného momentu na natočení kľuky

hodnoty sú skutočné napätia. Na obr. 7 je zobrazené redukované napätie HMM v okamihu dosiahnutia kritického krútiaceho momentu.

Z hľadiska rizika straty vzpernej stability by však bol horší prípad, keby bol kritický krútiaci moment dosiahnutý ešte pred bodom zvratu. To by znamenalo, že tlakovým napätím by bol namáhaný dlhší spojovací profil. Po nájdení najkritickejšej polohy z hľadiska namáhania spojovacích profilov, budú ďalšie analýzy realizované na „plnom“ modeli, teda s membránovými prvkami aj v strede dutých profilov.



Obr. 6: Deformovaný a nedeformovaný stav mechanizmu



Obr. 7: Redukované napätie HMM

4 Záver

Spoločnosť AUFEER DESIGN mi poskytuje zázemie pre spracovávanie diplomovej práce. Netrvá pritom na prísnom dodržiavaní ich interných postupov a metód, ale necháva mi priestor na vlastnú realizáciu. Oceňujem najmä prístup Ing. Tomečka, ktorý ma zaučil do používania programov využívaných CAE/FEA oddelením, a taktiež mi poskytuje nespočetné množstvo rád, nápadov a cenných informácií. Počas svojej práce som narazil na niekoľko technických problémov (najmä súvisiacich s používaním týchto programov), ktoré boli s jeho pomocou v krátkej dobe vyriešené.