

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

PEVNOSTNÍ ANALÝZA V PARAMETRICKÝCH FEM PROGRAMECH

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

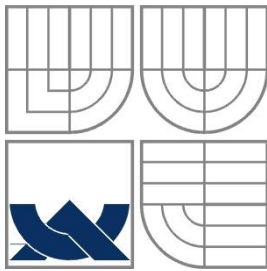
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

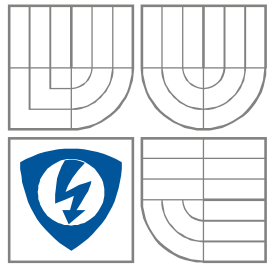
Roman Martinec

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

PEVNOSTNÍ ANALÝZA V PARAMETRICKÝCH FEM PROGRAMECH

STRESS ANALYSIS IN PARAMETRIC FEM PROGRAMS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

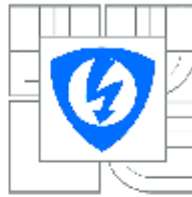
Roman Martinec

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Krejčí, Ph.D.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Roman Martinec
Ročník: 3

ID: 115226
Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Pevnostní analýza v parametrických FEM programech

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Zhodnoňte možnost propojení programu Autodesk Inventor s Ansys WorkBench.
2. Proveďte zhodnocení možných způsobů převodu modelu a analýzy do MKP software .
3. Na ukázkové úloze dokumentujte proces přechodu z CAD software do MKP software.
4. Porovnejte výsledky pevnostní analýzy provedené v CAD i MKP programu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucího

Termín zadání: 17.9.2012

Termín odevzdání: 4.6.2013

Vedoucí práce: Ing. Petr Krejčí, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na seznámení s programy Autodesk Inventor Professional 2012 a ANSYS Workbench. Bylo nutné seznámit se s pracovním prostředím u těchto programů a jejich vzájemnou kooperací. Na názorném příkladu je popsáno propojení těchto dvou programů. Dalším bodem této práce bylo převedení modelu do MKP software, který byl detailně popsán u obou programů. V závěru této práce byly porovnány výsledky pevnostní analýzy u programu Autodesk Inventor Professional 2012 a také u programu ANSYS Workbench.

Abstract

The bachelor thesis focuses on familiarizing with Autodesk Inventor Professional 2012 program and ANSYS Workbench program. It was necessary to get familiarized with working environment of these programs and their mutual cooperation. The interconnection between the two programs is described on a demonstrative case. Next article of the thesis deals with a model conversion into MKP software which was described in detail within both programs. The final part of the thesis compares the results of a stress analysis within Autodesk Inventor Professional 2012 program and also within ANSYS Workbench.

Klíčová slova

Autodesk Inventor 2012; pevnostní analýza; metoda konečných prvků; hřídel; ANSYS Workbench; modální analýza; iLogic, simulace

Keywords

Autodesk Inventor 2012; stress analysis; finite element method; shaft; ANSYS Workbench; modalanalysis; iLogic; simulation

Bibliografická citace

MARTINEC, R. *Pevnostní analýza v parametrických FEM programech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 47 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Krejčí, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Pevnostní analýza v parametrických FEM programech jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

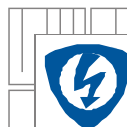
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Krejčímu, Ph.D za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

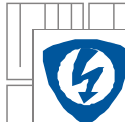
V Brně dne

Podpis autora



Obsah

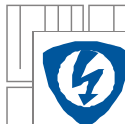
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	12
ÚVOD	13
1 NOVÉ FUNKCE V PROGRAMU AUTODESK INVENTOR 2012.....	13
1.1 AUTODESK INVENTOR OBECNĚ:	13
1.2 CO JE NOVÉHO:	13
1.2.1 SMĚROVÁ NABÍDKA	13
1.2.2 ROZŠÍŘENÉ MINIATURNÍ PANELE NÁSTROJŮ	14
1.3 SYSTÉMOVÉ POŽADAVKY:.....	15
1.4 MODUL ILOGIC	16
1.4.1 JAK FUNGUJE MODUL ILOGIC.....	16
1.4.2 AUTOMATIZOVANÉ FUNKCE.....	16
2 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ	18
2.1 HISTORIE	18
2.2 VYUŽITÍ MKP	18
2.3 PRINCIP METODY	19
2.4 SPLNĚNÍ PODMÍNEK PRO SPUŠTĚNÍ VÝPOČTOVÉ ANALÝZY	19
3 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ V PROGRAMU AIP 2012.....	20
3.1 PEVNOSTNÍ ANALÝZA	20
3.2 ROZHRAŇÍ PEVNOSTNÍ ANALÝZY V AIP 2012.....	21
3.3 PRACOVNÍ POSTUP PEVNOSTNÍ ANALÝZY V APLIKACI AIP 2012.....	22
3.4 NASTAVENÍ PEVNOSTNÍ ANALÝZY	23
3.5 KARTA PEVNOSTNÍ ANALÝZY.....	23
4 VYTVOŘENÍ PEVNOSTNÍ ANALÝZY HŘÍDELE	25
4.1 VYTVOŘENÍ MODELU HŘÍDELE	25
4.2 NASTAVENÍ PEVNOSTNÍ ANALÝZY PRO MODEL HŘÍDELE.....	26
4.2.1 VYTVOŘENÍ NOVÉ SIMULACE	26
4.2.2 VAZBY	27
4.2.3 ZATÍŽENÍ.....	28
4.2.4 Síť	28
4.3 SIMULACE MODÁLNÍ ANALÝZY	29
5 ZÁKLADNÍ INFORMACE O ANSYS WORKBENCH.....	31
5.1 CO JE TO ANSYS WORKBENCH.....	31
5.2 SPOLUPRÁCE ANSYS WORKBENCH A AIP.....	31
5.3 UŽIVATELSKÉ PROSTŘEDÍ ANSYS WORKBENCH	31



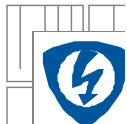
6 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ V ANSYS WORKBENCH	34
7 MKP V ANSYS WORKBENCH NA MODELU HŘÍDELE	35
7.1 PŘEVEDENÍ MODELU HŘÍDELE DO ANSYS WORKBENCH	35
7.2 NASTAVENÍ MODELU	35
7.3 SIMULACE MODÁLNÍ ANALÝZY	38
8 ZÁVĚR.....	40
LITERATURA	41
PŘÍLOHY	42

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 Směrová nabídka.....</i>	<i>14</i>
<i>Obrázek 2 Ovládání gestem</i>	<i>14</i>
<i>Obrázek 3 Miniaturní panel nástrojů [2].....</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 4 Pracovní postup při pevnostní analýze [1].....</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 5 Náčrt modelu hřídele</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 6 Model hřídele po orotování</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 7 Nabídka vytvoření nové simulace</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 8 Vazby v AIP 2012.....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 9 Plochy pro vazbu svorky.....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 10 Nastavení sítě.....</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 11 Zasiťovaná hřídel.....</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 12 Probíhající výpočet.....</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 13 ANSYS Classic</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 14 Prostředí ANSYS Workbench.....</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 15 Stromová struktura</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 16 Import do ANSYS Workbench</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 17 Funkce Engineering Data</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 18 Propojení modulů</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 19 ANSYS Mechanical - model hřídele.....</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 20 Zasiťovaný model.....</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 21 Vazby na modelu hřídele.....</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 22 Probíhající výpočet.....</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 23 Výsledky výpočtu.....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 24 Výsledek modální analýzy pro frekvenci 113,91 Hz</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 25 Deformace při frekvenci 113,91 Hz.....</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 26 Deformace při frekvenci 113,96 Hz.....</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 27 Deformace při frekvenci 335,65 Hz.....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 28 Deformace při frekvenci 335,82 Hz.....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 29 Deformace při frekvenci 650,63 Hz.....</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 30 Deformace při frekvenci 650,98 Hz.....</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 31 Deformace při frekvenci 113,74 Hz.....</i>	<i>45</i>

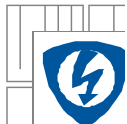


<i>Obrázek 32 Deformace při frekvenci 113,91 Hz</i>	45
<i>Obrázek 33 Deformace při frekvenci 335,18 Hz</i>	46
<i>Obrázek 34 Deformace při frekvenci 335,62 Hz</i>	46
<i>Obrázek 35 Deformace při frekvenci 651,37 Hz</i>	47



SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 Seznam funkcí [2].....</i>	<i>24</i>
<i>Tabulka 2 Funkce zatížení [10].....</i>	<i>28</i>



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

MKP.....Metoda konečných prvků

AIP.....Autodesk Inventor Professional

ÚVOD

V dnešní době počítačového modelování a navrhování, kdy je kladen stále větší důraz na nároky na hardwarový výkon, je možné využívání novějších a složitějších softwarových technologií v oblasti konstruování. Konstruktor již nemusí svoji myšlenku pracně navrhovat v 2D modelu a poté ji převádět do 3D modelu, ale díky parametrickému modelování se naskytuje možnost daný objekt navrhovat přímo v jeho budoucí reálné podobě. [1] [9]

V první části se tato bakalářská práce zabývá programem Autodesk Inventor Professional 2012, jeho novinkami oproti starším verzím a pracovním prostředím. Dále byla na modelu hřídele provedena pevnostní analýza.

V dalším bodě se tato práce zabývá programem ANSYS Workbench. Tento program byl obecně popsán. Dále bylo popsáno uživatelské prostředí v programu ANSYS Workbench a následně byla provedena modální analýza.

V závěru práce byly porovnány tyto dva programy a výsledky analýz.

1 NOVÉ FUNKCE V PROGRAMU AUTODESK INVENTOR 2012

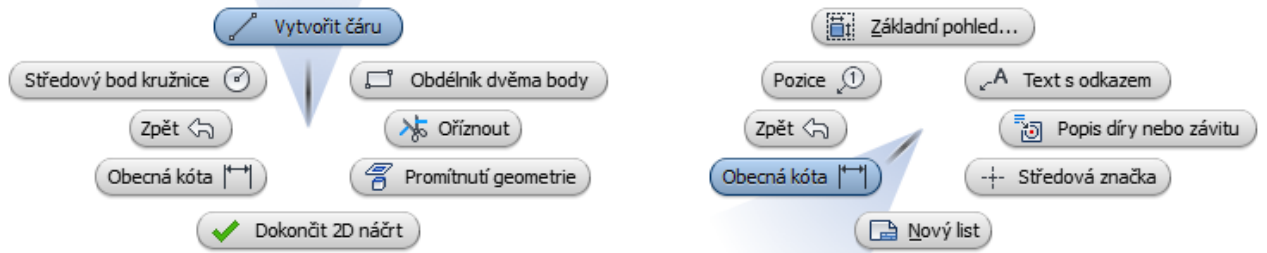
1.1 Autodesk Inventor obecně:

Aplikace Autodesk Inventor nabízí komplexní sadu softwarových nástrojů pro 3D strojírenské navrhování, simulaci výrobků, tvorbu nástrojů a komunikaci návrhů. Inventor umožní jít ve 3D navrhování ještě dál, k tvorbě digitálních prototypů. Umožňuje navrhovat, vizualizovat a simulovat výrobky na přesném 3D modelu ještě předtím, než dojde na jejich výrobu. Vytváření digitálních prototypů v aplikaci Autodesk Inventor pomáhá firmám navrhovat dokonalejší výrobky, snižovat náklady na vývoj a rychleji uvádět výrobky na trh.[3]

1.2 Co je nového:

1.2.1 Směrová nabídka

Podstatnou změnou prošla u nové verze Inventoru 2012 směrová nabídka. Směrová nabídka nahrazuje místní nabídku zobrazenou kliknutím pravým tlačítkem myši. Výběr ve směrové nabídce je možno provádět jak v režimu nabídky, tak v režimu značení.



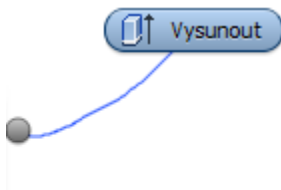
Obrázek 1 Směrová nabídka

Režim nabídky

Klikne se pravým tlačítkem do grafického okna. Položky nabídky obklopí kurzor a zobrazí se na výběr všechny položky, nebo se zobrazí název příkazu a odpovídající ikona příkazu. Je-li třeba směrovou nabídku zavřít, klikne se ještě jednou do středu zobrazené nabídky. Nedoporučuje se používat klávesu ESC - stisknutím této klávesy by se mohl zrušit probíhající příkaz.

Režim značení (také nazývaný „ovládání gestem“)

Je nakreslena značka. Má-li se do tohoto režimu přejít, stiskne se a podrží pravé tlačítko myši a ihned posune ukazatel myši ve směru požadované položky nabídky. Za ukazatelem se zobrazí jeho trajektorie. Uvolněním tlačítka se vybere a spustí příkaz, který odpovídá směru pohybu ukazatele.



Obrázek 2 Ovládání gestem

Směrová nabídka usnadňuje určení dalších kroků v procesu a určení dalších možností, které zjednoduší pracovní postup. Kromě toho také výrazně snižuje nutnost pohybu myši a lze ji snadno přizpůsobit potřebám uživatele. [4]

1.2.2 Rozšířené miniaturní panely nástrojů

Miniaturní panely nástrojů jsou větší, snáze interpretovatelné a disponují více funkcemi. Miniaturní panely nástrojů jsou dostupné pro následující příkazy:

- Vysunutí
- Rotace
- Zkosení
- Zaoblit

- Díra

- Zešíkmení plochy

Miniaturní panel nástrojů obsahuje dvě nové možnosti:

Připíchnout miniaturní panel nástrojů

Pomocí tlačítka uchopení v levé horní části miniaturního panelu je možné panel přesunout do jiného umístění na obrazovce. Miniaturní panel nástrojů se připíchne, aby v grafickém okně zůstal na místě.

Automatické zeslabení

Pokud je možnost povolena, miniaturní panel nástrojů se při přemístění kurzoru směrem od něj minimalizuje.

Pokud je deaktivován, zobrazí se miniaturní panel nástrojů bez ohledu na pozici kurzoru. [5]

Srovnání je patrné z následujícího obrázku:



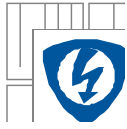
1.3 Systémové požadavky:

Procesory:

- Intel® Pentium® 4/ Xeon®/ Intel® Core™
- AMD Athlon™ 64
- AMD Opteron™ nebo novější

Operační systém:

- Windows 7 Home Premium
- Windows 7 Professional
- Windows 7 Ultimate nebo Enterpriseedition
- Windows Vista Home Basic
- Windows Vista Home Premium



- Windows Vista Business
- Windows Vista Enterprise nebo Ultimateedition (SP2)
- Windows XP Professional (SP3)
- Windows XP Professional x64 Edition (SP2)

Minimální systémové požadavky (pro méně než 1000částí):

- 2GB ram nebo více
- DVD-ROM mechanika
- Microsoft® Direct3D 10® nebo Direct3D 9® schopné grafické karty
- rozlišení obrazovky 1280 x 1024 nebo vyšší
- připojení k internetu
- Microsoft® Internet Explorer® 6.x, 8
- Microsoft® Excel 2003 až 2010 pro ikomponenty
- kompatibilní myš, nebo polohovací zařízení [6]

1.4 Modul iLogic

Tento modul umožňuje pravidly řízený návrh, který poskytuje jednoduchý způsob uložení a opakovaného použití práce. Modul iLogic je tedy používán ke standardizování a automatizování postupů v našich návrzích. [7]

1.4.1 Jak funguje modul iLogic

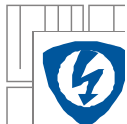
Modul iLogic vkládá pravidla jako objekty přímo do dokumentů součástí, sestav a výkresů. Pravidla určují a řídí hodnoty parametrů a atributů návrhu. Řízením těchto hodnot lze definovat chování atributů, prvků a komponent modelu. Znalost je uložena přímo v dokumentech stejně jak jsou uloženy geometrické prvky návrhu.

Pravidla modulu iLogic mohou využívat uživatelské typy parametrů, které jsou nyní dostupné v aplikaci Autodesk Inventor, například text, Ano/Ne a seznamy s více hodnotami. Tyto typy parametrů lze použít k zápisu pravidel, která zahrnují také jiné než pouze číselné vstupní hodnoty. [7]

1.4.2 Automatizované funkce

Automatizované funkce modulu iLogic mohou používat konstruktéři a technici s malou nebo žádnou zkušeností s programováním. Je vhodné používat automatizované funkce pro:

- hledání a automatickou změnu konfigurace iSoučástí nebo iSestav na základě podmíněných příkazů definovaných v pravidlech na úrovni sestavy
- aktivaci funkcí součástí a sestav nebo komponent a vazeb, sestav z pravidel pomocí podmíněných argumentů



-aktualizování a automatické řízení specifikací závitů, když dojde ke změně velikosti díry nebo tyče

-čtení, zápis a reakci na vlastnosti materiálu nebo barvy dokumentu návrhu, hmotnost nebo objem součástí a parametry návrhu

-aktualizování informací rozpisky, když změny modelu mají za následek novou konfiguraci

-omezení nebo automatické opravě hodnot zadání uživatelem k zajištění, aby výsledné konfigurace byly platné a souhlasily se specifikacemi a normami návrhu

-čtení a zápis do dokumentů tabulkového procesoru aplikace Excel

Když jsou pravidla spuštěna, funkce pro okna hlášení a zadání poskytují zpětnou vazbu, možnosti a informace. [7]

2 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ

Metoda konečných prvků (MKP) je numerická metoda sloužící k simulaci průběhů napětí, deformací, vlastních frekvencí, proudění tepla, jevů elektromagnetismu, proudění tekutin atd. na vytvořeném fyzikálním modelu. Její princip spočívá v diskretizaci spojitého kontinua do určitého (konečného) počtu prvků, přičemž zjišťované parametry jsou určovány v jednotlivých uzlových bodech. MKP je užívána především pro kontrolu již navržených zařízení, nebo pro stanovení kritického (nejnamáhavějšího) místa konstrukce. Ačkoliv jsou principy této metody známy již delší dobu, k jejímu masovému využití došlo teprve s nástupem moderní výpočetní techniky. [8]

2.1 Historie

Metoda konečných prvků vznikla díky potřebě řešit složité úlohy z pružnosti a strukturní analýzy v inženýrské praxi. Její počátky lze vysledovat v práci Alexandera Hrennikoffa (1941) a Richarda Couranta (1942). Ačkoliv byly přístupy použité těmito průkopníky v zásadě odlišné, měly jednu společnou charakteristiku: rozdělení spojitě oblasti do množiny samostatných podoblastí.

Hrennikoffova práce rozděluje oblast pomocí mřížky, zatímco Courantův přístup dělí oblast do konečného množství trojúhelníkových elementů. Následuje řešení eliptických parciálních diferenciálních rovnic druhého stupně, které byly sestaveny z úlohy zabývající se krutem válce.

Vývoj MKP začal v 50. letech 20. století na univerzitě ve Stuttgartu prací Johna Argyrise a pokračoval na univerzitě v Berkeley prací Raye W. Clougha v 60. letech. Na konci 60. let nechala NASA vyvinout software NASTRAN pracující na principu MKP.

V roce 1965 FengKang navrhl numerickou metodu nazvanou "metoda konečných diferencí založená na principu variace", což je ekvivalent MKP. Jeho práce zůstala západnímu světu dlouhá desetiletí skryta. [8]

2.2 Využití MKP

MKP nachází uplatnění v mnoha oborech při vývoji produktů, zpravidla v oblasti strojního inženýrství (např. letecký a automobilní průmysl, biomechanika). Některé moderní programy MKP obsahují specifické nástroje (tepelné, elektromagnetické, fluidní a strukturální simulace).

MKP umožňuje detailní zobrazení struktur při ohýbání nebo kroucení, kompletní návrh, testování a optimalizaci ještě před vyrobením prototypu.

Tento mocný nástroj pro navrhování výrazně zlepšil i úroveň technických výkresů a způsob konstruování v mnohých průmyslových aplikacích. Zavedením MKP se výrazně snížila doba od původního návrhu k hotovému výrobku. Stručně řečeno, k výhodám MKP patří především virtuální prototypování, méně fyzických prototypů, rychlejší a méně nákladný konstrukční cyklus, zvýšení produktivity a snížení nákladů. [8]

2.3 Princip metody

Geometrický objekt, který je předmětem výpočtu, je nutné rozdělit na konečný počet elementů tak, aby vzniklá síť co nejlépe vyplňovala jeho tvar s dostatečnou přesností. Vlastnosti každého elementu je možné popsat pomocí matematické funkce. Při řešení vlastností celého systému je pak zapotřebí řešit rozsáhlé soustavy diferenciálních rovnic, převedené na rovnice algebraické, jejichž neznámé představují parametry předmětného fyzikálního problému. Jednotlivé elementy jsou vzájemně spojeny v tzv. uzly. Uzel je možné definovat jako matematický bod o známých souřadnicích v prostoru. Pokud budou počítány hodnoty neznámých parametrů právě v těchto uzlech lze říci, že soustava rovnic, která analyzuje chování celého počítaného objektu, bude mít řádově tisíce, statisíce až miliony rovnic.

Pomocí metody konečných prvků je možné řešit

- strukturální analýzy
- popis teplotního pole
- mísení kapalin
- magnetická pole [9]

2.4 Splnění podmínek pro spuštění výpočtové analýzy

Proto, aby bylo možné provést výpočtovou analýzu součásti, je nutné znát následující informace:

Geometrie:

Geometrií se rozumí každý prvek založený na modelu vytvořeném v CAD parametrickém prostředí.

Materiál:

Materiál součásti je volen v prostředí FEM AIP ze standardizované databáze materiálu. Tato databáze se navíc vyznačuje svojí editovatelností, což znamená, že uživatel si může definovat vlastní materiály dle konkrétních požadavků na výpočet.

Okrajové podmínky:

Správné nastavení okrajových podmínek je patrně nejdůležitější a nejobtížnější disciplína při deformačně napjatostní analýze v programu AIP. Při určování okrajových podmínek je důležité si uvědomit, že každé tuhé těleso má v prostoru 6 stupňů volnosti. Je-li v některém směru těleso připevněno, znamená to, že v tomto směru je odebrán stupeň volnosti - v tomto směru je součásti zamezeno v pohybu. [9]

3 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ V PROGRAMU AIP 2012

Počítačový program AIP 2012 využívá MKP převážně v modulu pevnostní analýzy. V procesu pevnostní analýzy lze definovat materiál, hraniční podmínky (které se skládají ze zatížení vazeb), dají se určit kontaktní podmínky a volitelně i předvolby sítě. Jakmile jsou tato kritéria zadána, lze spustit simulaci a zobrazí chování vzhledem k definovaným podmínkám. Také lze zvolit, jaký typ pevnostní analýzy bude použit. Na výběr jsou dány dvě možnosti. Jako první je statická analýza a druhá je modální analýza.[1]

3.1 Pevnostní analýza

S nástrojem **Pevnostní analýza** aplikace Inventor se dají provádět různé simulace pomocí průlomové adaptivní technologie h/p. Na modelech se dají provádět parametrické rozměrové studie, aby se prozkoumaly vlivy geometrických změn na návrh. Simulace pomohou rozpoznat výkonové problémy a najít lepší alternativy návrhu. [1]

V pevnostní analýze jsou k dispozici následující klíčové funkce:

- Umožňují strukturální statickou a modální pevnostní analýzu jedné nebo více simulačních studií.
- Umožňují automatické adaptivní funkce pro kontrolu přesnosti výsledků.
- Nabízí široký výběr hraničních podmínek (**zatížení** a **vazby**).
- Zachycuje v modelech aplikace Inventor sestavu/součást/prvek/rozměr pro lepší vizualizaci modelu a parametrické analýzy potenciálních možností.
- Modeluje mezi různými součástmi sestavy různé druhy dotykových podmínek (včetně pružin).
- Vyhodnocuje a porovnává mnoho variant návrhu. Vystavuje vliv změn geometrie na funkční chování produktu.
- Používá optimalizaci několika kritérií a průběžné ověřování alternativ návrhu.
- Snadno definuje různé místní a globální vazby před nebo po simulaci.
- Umožňuje místní a globální ovládací prvky sítě.
- Styly materiálu aplikace Inventor, navíc lze definovat další materiály pomocí Správce knihovny stylů.
- Funkce rozsáhlého následného zpracování pro 3D zobrazení, zkoušení výsledků a publikování webových zpráv. [1]

3.2 Rozhraní pevnostní analýzy v AIP 2012

Rozhraní pevnostní analýzy je rozděleno do třech hlavních oblastí: prohlížeč simulace, grafická oblast a parametrická tabulka. Tři oblasti zobrazují obsah asociovaný s aktivní simulací. Neaktivní simulace mají šedé pozadí.

Prohlížeč simulace

Zobrazuje simulace se součástí nebo sestavou a parametry simulace v hierarchickém zobrazení s vnořenými úrovněmi informací o prvku a atributu. Lze provést následující úkony:

- Kopírovat celé simulace nebo jejich objekty mezi jednotlivými simulacemi.
- Klepnout pravým tlačítkem na položku pro zobrazení možnosti místní nabídky.
- Rozbalit složky, vybrat uzly a zobrazit výběr v grafické oblasti.

Grafická oblast

Zobrazuje geometrii modelu a výsledky simulace.

- Aktualizuje zobrazení aktuálního stavu simulace.
- Obsahuje nástroje k manipulaci se zobrazením.

Parametrická tabulka

Tato tabulka má dva režimy zobrazování kritérií vazeb návrhu včetně hodnot, omezení a rozsahů parametrů. V režimu zobrazení modelu jsou vypsány vazby návrhu. Barvy označují po simulaci oblasti uvnitř a vně určeného rozsahu. Zobrazené výsledky je možno změnit úpravou hodnot v tabulce.

- Zobrazuje parametrické hodnoty a vazby návrhu, když je zobrazen model.
- V zobrazení modelu i výsledků lze získat optimalizované hodnoty.

Ostatní společné aspekty rozhraní obsahují:

- dialog Modeless k pohodlnému vybírání geometrie,
- filtry výběru,
- náhled 3D animací zobrazující posunutí modelu. [1]

3.3 Pracovní postup pevnostní analýzy v aplikaci AIP 2012



Obrázek 4 Pracovní postup při pevnostní analýze [1]

Proces pevnostní analýzy je zahájen výběrem vhodného materiálu pro součást. Materiál musí vyhovovat požadavkům simulace, jako jsou nenulové kladné hodnoty pro Youngův modul, hustotu a mez průtažnosti. Poissonova konstanta se musí pohybovat v rozmezí 0,0 až 0,5. Aplikace Inventor nabízí velké množství různých materiálů. Další materiály se dají definovat pomocí editoru stylů a norem. [2]

Následuje příklad typického pracovního postupu pro analýzu komponentu, pomocí pevnostní analýzy aplikace Inventor. Tyto kroky nejsou vyčerpávající, ale nereprezentují jediné kroky, které se dají použít ve vaší analýze. [2]

1. Otevření komponentu, součásti nebo sestavy.
2. Přejít do prostředí pevnostní analýzy.
3. Klepnutí na položku Vytvořit simulaci.
4. Určení vlastností simulace.
5. Vyloučení komponentů, které nechceme zahrnout do simulace.
6. Určení materiálu pro všechny součásti, které se účastní analýzy.
7. Určení a použití vazeb. U modální analýzy tento krok není nutný.
8. Určení umístění a velikost zatížení. U modální analýzy tento krok není nutný.
9. Vyhodnocení dotyků a podle potřeby jejich určení.
10. Určení vhodné hrubosti nebo jemnosti sítě.
11. Zobrazením náhledu je ujištění, že síť vyhovuje vašemu návrhu.
12. Spusťte animaci.
13. Prohlédnutí výsledků.
14. Provedením potřebných změn, doladění součástí nebo sestav. Změny mohou obsahovat přidání prvků nebo potlačení problematických prvků.

15. Opětovným spuštěním simulace aktualizování výsledků.
16. Použití sbíhavosti výsledků a řešení k zajištění toho, že výsledky budou co nejpřesnější. Konvergence výsledků je blokována u výsledků s podporou vícečetných časových kroků a předpjatých modálních výsledků.
17. Opakováním procesu komponentu je optimalizován.
Nakonec je možno vytvořit zprávy o výsledcích.[2]

3.4 Nastavení pevnostní analýzy

Nastavení pevnostní analýzy je použitelné na základě dokumentu. Tato nastavení definují výchozí hodnoty pro všechny nové simulace. Změní-li se nastavení během práce na simulaci, nebude ovlivněna. Ovlivněny budou pouze simulace, které se vytvořily po změně nastavení.[1]




Definice materiálu

Když se začne novou součástí, materiál komponentu bude nastaven na jakýkoliv materiál, který používá šablona dokumentu. V aplikaci Inventor, tak je dodávána, používají šablony dokumentu pro součást i sestavu materiál s názvem Výchozí. Výchozí materiál není definovaný pro použití v prostředí simulace. V důsledku toho platí, že pokud je materiálu pro libovolný komponent přiřazen materiál Výchozí, simulace ho potlačí. Existuje několik způsobů, jak opravit přiřazení materiálu:

- Upravení součástí. Určí se v iVlastnostech materiál, který je správně definován pro simulaci. Toto je doporučené řešení.
- Změna nastavení pevnostní analýzy tak, aby odpovídala materiálu, který je potřebný pro použití místo výchozího materiálu.
- Přepsání výchozího materiálu aplikace Inventor jiným správně definovaným materiálem.
- Úprava výchozího materiálu, aby bylo možné ho použít v simulacích. Upravují-li se šablony, aby se predefinoval výchozí materiál, postupuje se obezřetně! Ostatní dokumenty mohou záviset na původní definici! [1]

3.5 Karta pevnostní analýza

Karta Pevnostní analýza je tvořena sadou panelů. Každý panel obsahuje jeden nebo více příkazů, které jsou k zjednodušení přístupu seskupeny. V následující tabulce jsou vysvětleny vybrané příkazy.[10]

	Zobrazí dialog Vytvořit novou simulaci, ve kterém je možné definovat novou simulaci.
	Zobrazí dialog Parametrická tabulka, ve kterém je možné definovat parametry tabulky.
	Zobrazí dialog Přiřadit materiály, ve kterém je možné definovat materiály, které přepíše původní definici materiálu.

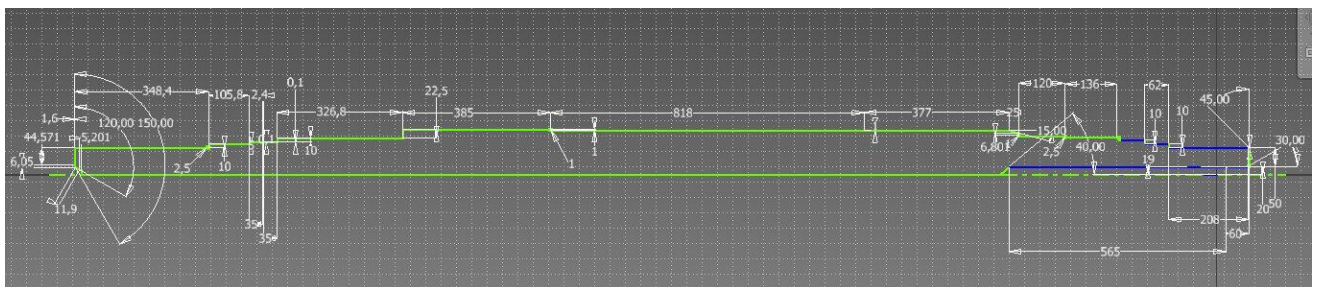
	Zobrazí dialog Pevná vazba, ve kterém je možné vybrat geometrii a dále definovat vazbu. Pevná vazba umožňuje přístup k vektorovým komponentám.
	Zobrazí dialog Vazba svorky, ze kterého je možné vybrat geometrii a definovat vazbu. Geometrii je možné připevnit do radiálního, axiálního nebo tečného směru.
	Zobrazí dialog Ideální vazba, ze kterého je možné vybrat geometrii a určit název vazby.
	Zobrazí dialog Síla, ze kterého je možné určit sílu.
	Zobrazí dialog Tlak, ze kterého je možné určit tlak.
	Zobrazí dialog Zatížení ložiska, ze kterého je možné určit zatížení ložiska.
	Zobrazí dialog Moment, ze kterého je možné určit moment.
	Zobrazí dialog Zatížení tělesa, ze kterého je možné určit zatížení tělesa.
	Zobrazí dialog Gravitace, ze kterého je možné určit gravitaci.
	Zobrazí dialog Vzdálená síla, ze kterého je možné určit vzdálenou sílu.
	Překryje aktuální pohled sítě.
	Zobrazí dialog s různými nastaveními sítě. Proved'te úpravu a klepněte na tlačítko OK.
	Zobrazí dialog Simulovat obsahující stručné informace o simulaci, procedurální upozornění a panel průběhu.
	Obnoví výsledky – zatížení, posunutí, tvary režimu atd. Je možné zaznamenat video animace.
	Aktivuje příkaz Sonda, který umožňuje vyhledat informace o výsledcích v určitém bodě modelu.
	Zobrazí dialog Zpráva, ve kterém se dá definovat obsah protokolu a potom protokol publikovat.

Tabulka 1 Seznam funkcí [2]

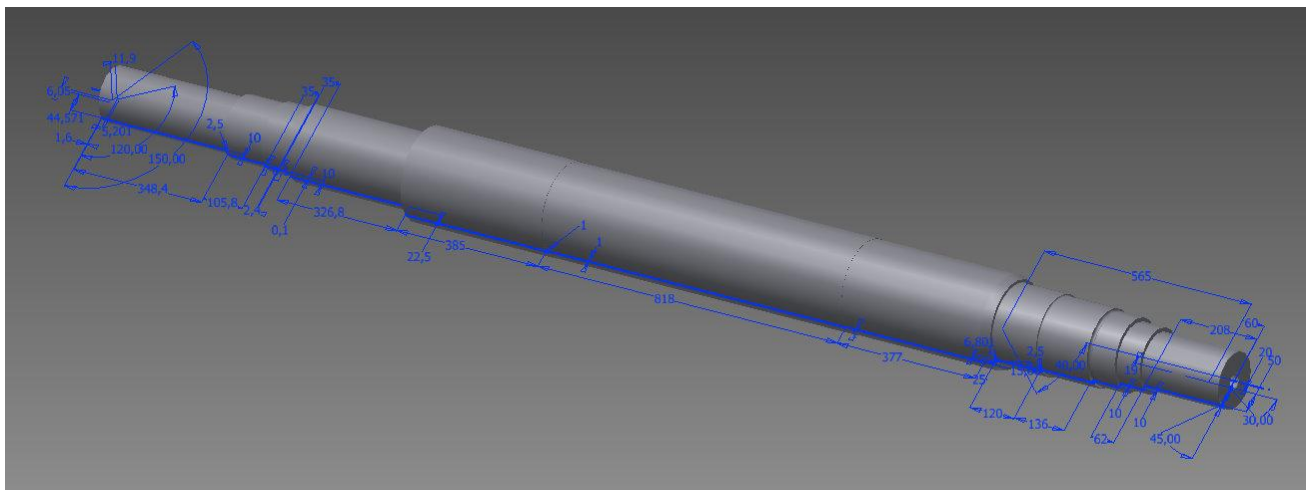
4 VYTVOŘENÍ PEVNOSTNÍ ANALÝZY HŘÍDELE

4.1 Vytvoření modelu hřídele

Jako model, na kterém bude pevnostní analýza demonstrována, byla vybrána hřídel synchronního motoru. Hřídel byla vymodelována jako náčrt, který byl orotován kolem své osy.[1]



Obrázek 5 Náčrt modelu hřídele



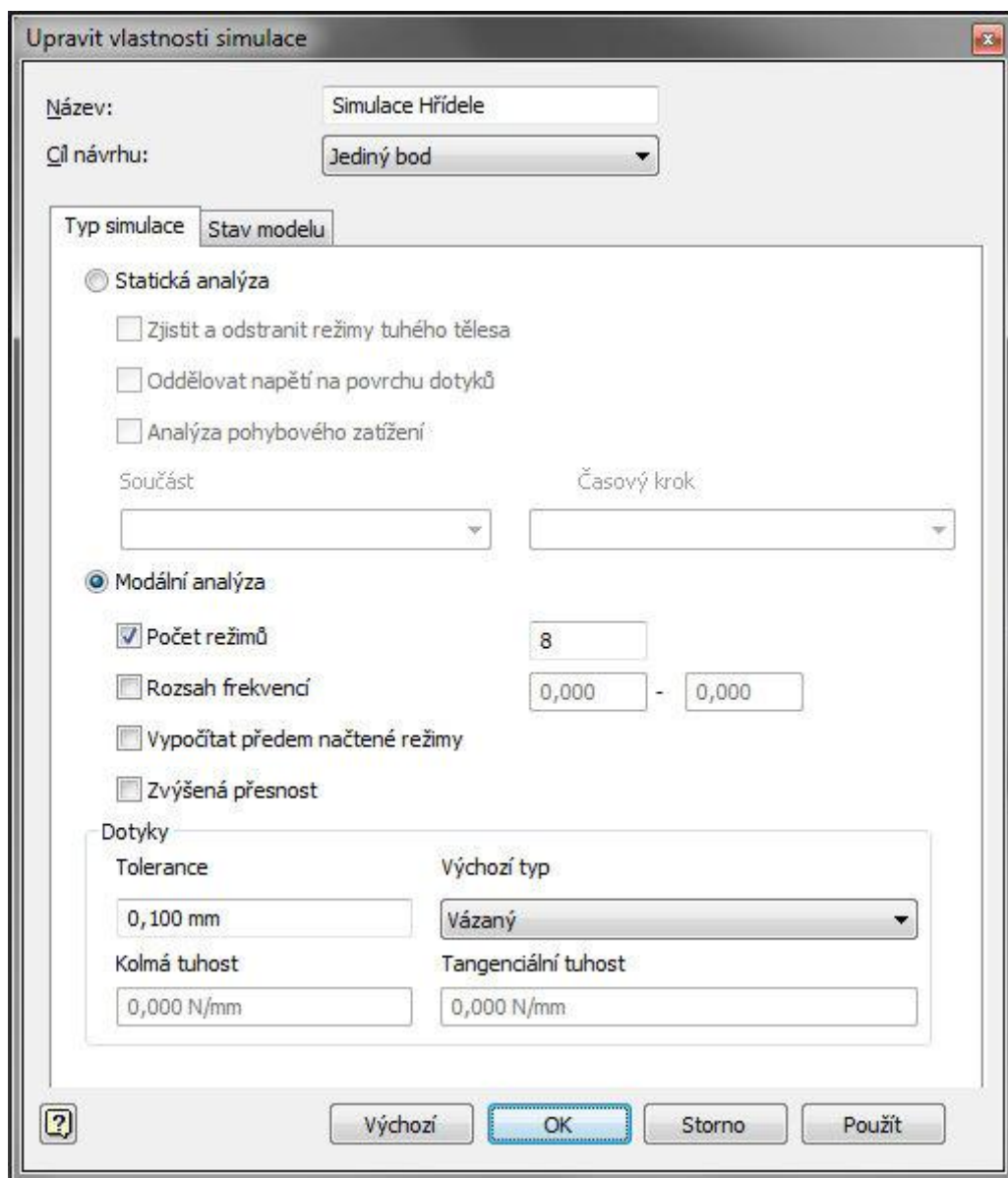
Obrázek 6 Model hřídele po orotování

Po orotování byl hřídeli přidělen materiál (přes iVlastnosti), ze kterého byla vyrobená tato ocel. Model poté změnil svoji barvu a vlastnosti. [1]

4.2 Nastavení pevnostní analýzy pro model hřídele

4.2.1 Vytvoření nové simulace

V záložce Správa se vybere položka Vytvořit simulaci. Zobrazí se nabídka, ze které je na výběr typ simulace a to buď statická nebo modální analýza. Pro tento případ je zvolena modální analýza, kde lze zvolit počet režimů, rozsah frekvencí, výpočet předem načtených režimů a zvýšenou přesnost. V možnosti dotyky se v rolovací nabídce zvolí typ vázaný. Vše je názorně ukázáno na obrázku 7.



Obrázek 7 Nabídka vytvoření nové simulace

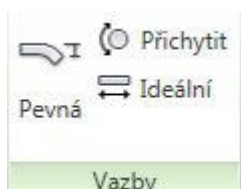
4.2.2 Vazby

Strukturální vazby omezují posunutí modelu. V prostředí pevnostní analýzy lze vybrat ze tří základních typů vazeb.

Pevná vazba odstraňuje všechny stupně volnosti.

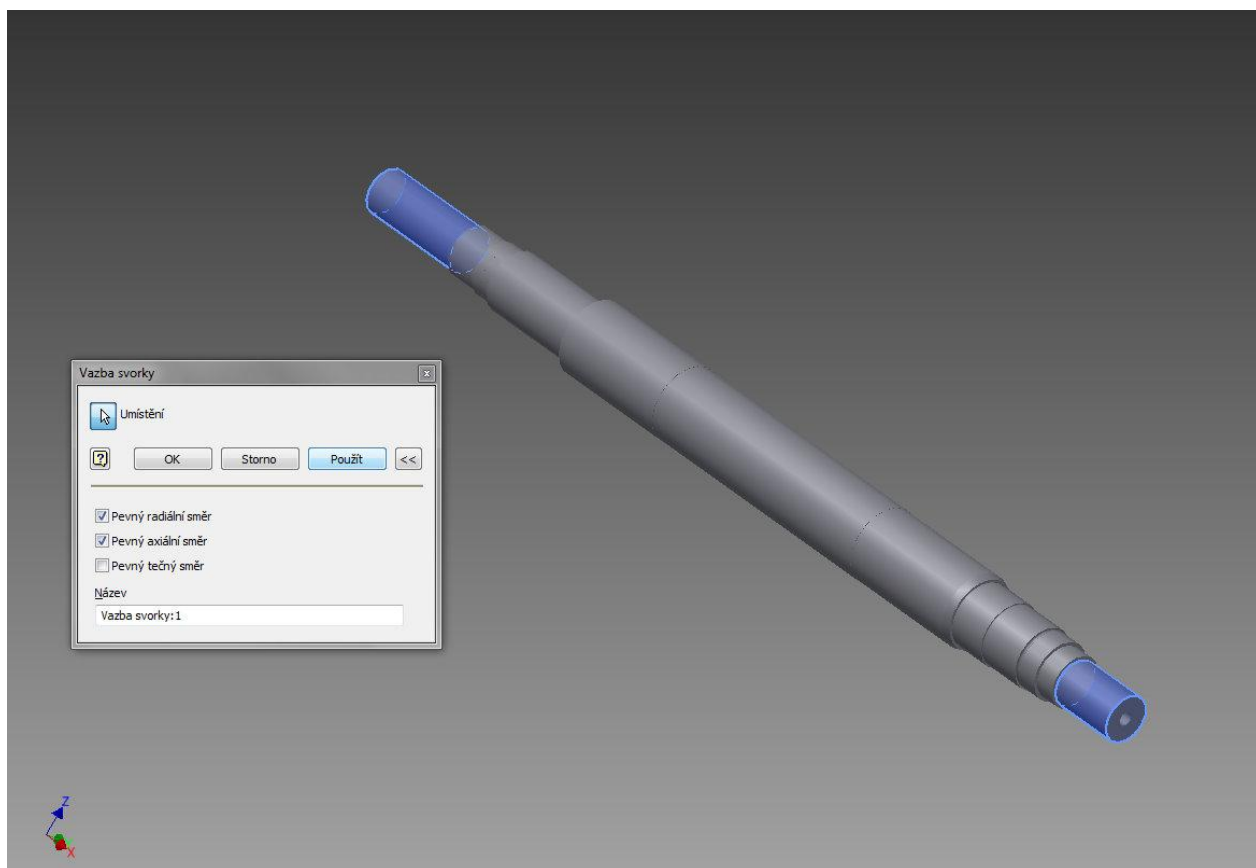
Ideální vazba brání v normálovém pohybu vzhledem k povrchu.

Vazba Svorky izoluje stupně volnosti na radiální, axiální nebo tečné.[10]



Obrázek 8 Vazby v AIP 2012








Pro tento model byla vybrána vazba svorky kvůli tomu, že modelovaná součást je válcová. Jako omezení byl vybrán pevný a axiální směr. Tečný směr byl povolen. Na níže uvedeném obrázku jsou zobrazeny plochy na které byla vazba svorky použita.



Obrázek 9 Plochy pro vazbu svorky

4.2.3 Zatížení

Zatížení jsou součástí hraničních podmínek, které jsou definovány pro simulaci. Existují různé typy zatížení.

Přístup	Typ zatížení	Používaný pro
	Síla	Používána pro vybrané plochy, hrany nebo vrcholy, síly zadané velikosti.
	Tlak	Používán pro vybrané plochy, tlak zadané velikosti.
	Gravitace	Používána gravitace určené velikosti kolmo na vybranou plochu nebo rovnoběžně s vybranou hranou.
	Moment	Používané zatížení zadané velikosti okolo osy a kolmo na plochu.
	Ložiska	Používán na vybranou plochu zatížení určené velikosti.
	Tělesa	Používán na model lineárního zrychlení nebo úhlové rychlosti a zrychlení zadané velikosti.
	Vzdálená síla	Používán na vybranou plochu, sílu určené velikosti.

Tabulka 2 Funkce zatížení [10]

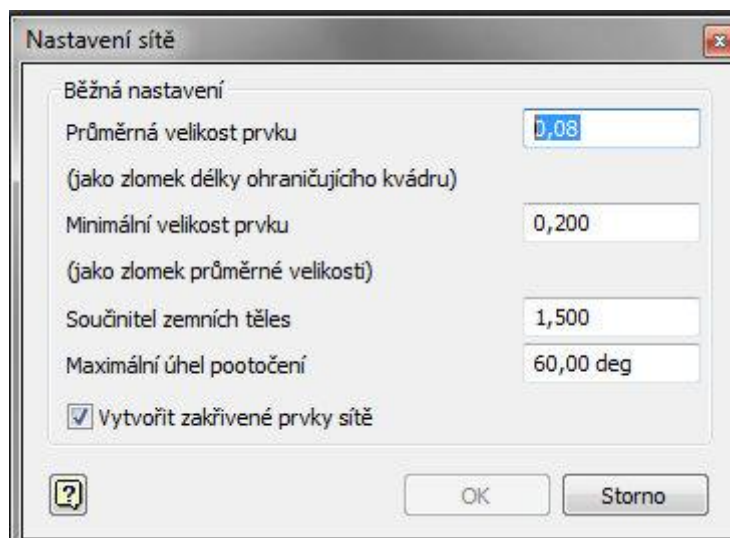
Pro tento model hřídele nebyly použity žádné typy zatížení. Z počátku bylo uvažováno o síle, jakožto hmotnosti rotorového svazku na hřídeli. Síla byla ovšem tak zanedbatelná, že nebyla do výpočtu pevnostní analýzy zahrnuta.

4.2.4 Síť

Pohled sítě podloží geometrii modelu sítě sestavenou podle nastavení sítě. Je možné potom zobrazit síť ve vztahu ke geometrickým prvkům modelu. Pohled sítě lze také použít k podložení výsledků simulace sítě. Tímto způsobem lze vidět, kde je soustředěno napětí ve vztahu k prvkům sítě. Potom je možné podle potřeby použít nastavení sítě k jejímu upřesnění.[10]

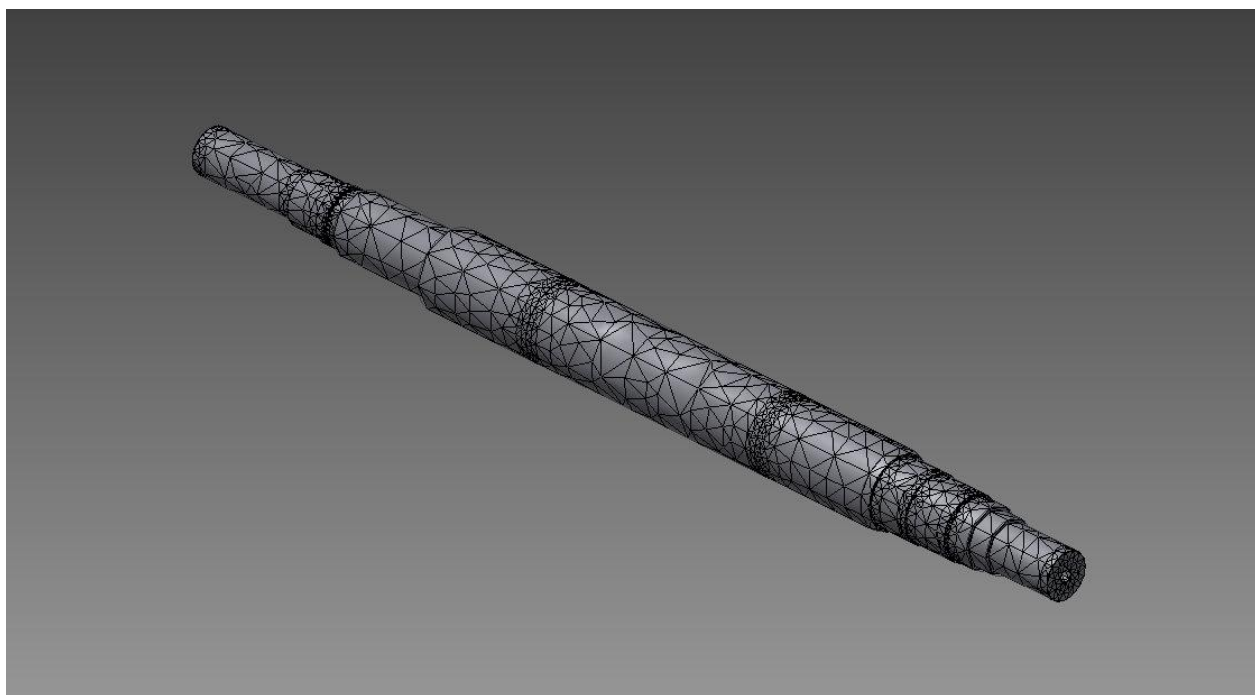
Nastavení sítě definuje nastavení rozměrů a parametrů hrubosti sítě. Čím hustší je síť tím déle bude trvat výpočet analýzy.[10]

Nastavení sítě je provedeno podle obrázku 10



Obrázek 10 Nastavení sítě

Zasíťovaná hřídel podle parametrů z Obrázku 10 je vidět na Obrázku 11.



Obrázek 11 Zasíťovaná hřídel

4.3 Simulace modální analýzy

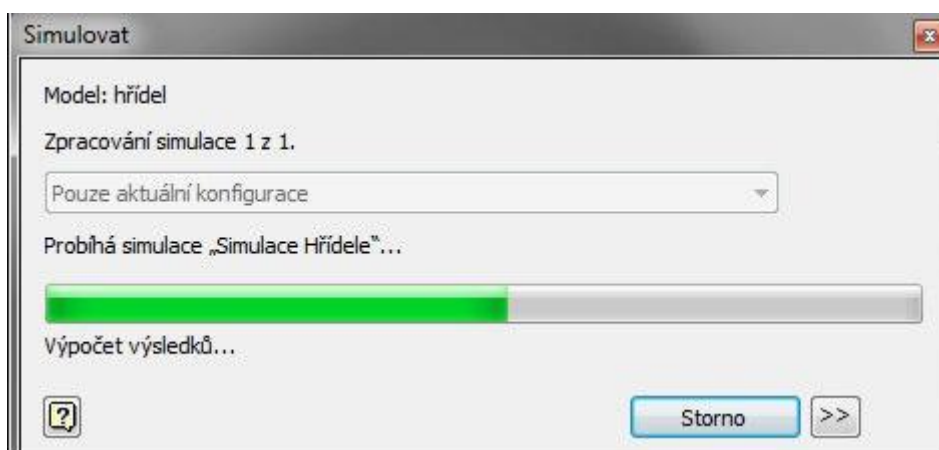
Vytváření modální analýzy poskytuje prostředky k výpočtu přirozených frekvencí vibrací pro určený počet frekvencí. Obsahuje frekvence, které odpovídají pohybům tuhého tělesa.

Například v simulaci bez vazeb prvních šest režimů se vyskytne při 0 Hz, což odpovídá šesti pohybům tuhého tělesa. Vazby návrhu lze založit na geometrii nebo frekvenci.

Je možno animovat deformovaný tvar, aby se zobrazil modální tvar asociovaný s konkrétní frekvencí. Kontury představují relativní posunutí součásti při vibraci. Obrazy tvaru režimu jsou užitečné při pochopení jak součást nebo sestava vibruje, ale nereprezentují skutečné posunutí. Pro nalezení všech tvarů režimu pod zadanou frekvencí se stanovují další dva nebo tři tvary režimu.

Možnost Vypočítat předem načtené režimy spustí nejdříve strukturální statickou simulaci a stanoví napětí a potom vypočítá režimy dané předpjaté podmínky. Není-li tato možnost zaškrtnutá, program ignoruje jakékoliv strukturální zatížení definovaná pro frekvenční simulaci.[1] [11]

Simulace se spustí kliknutím na ikonu Simulovat. Po stisknutí vyskočí informační okno, které oznámí, že je pro spuštění simulace vše připraveno a také by zde mohl být seznam eventuálních chyb. Poté proběhne výpočet, jak je patrné na Obrázku 12.



Obrázek 12 Probíhající výpočet

Po dokončení výpočtu se zobrazí výsledky simulace. Výsledky jsou grafické diagramy na kterých je zobrazeno chování hřídele při různých frekvenčních zatíženích. Nejdůležitější diagramy jsou ty, které ukazují vlastní kritické otáčky. Frekvence 113,91Hz tedy odpovídá otáčkám 6834,6 ot./min. [1]

5 ZÁKLADNÍ INFORMACE O ANSYS WORKBENCH

5.1 Co je to ANSYS Workbench

ANSYS Workbench prostředí, neboli Workbench technology je původní, unikátní řešení firmy ANSYS Inc., založené na obousměrné (tzv. bi-directional) asociativitě geometrie a sítě při zachování parametrické vazby a dalších algoritmech.

ANSYS Workbench prostředí může nabídnout uživateli propojení s kvalitnější CAD integrací, automatické tvoření sítě a přístup k parametrům modelu stejně tak, jako k funkcím umístěným uvnitř produktů ANSYS Mechanical.

Mechanická simulace s ANSYS Workbench je založena na jádru ANSYS řešitelské technologie v průmyslu, rozpoznávající a nabízející užitek v moderní analýze.[11]

5.2 Spolupráce ANSYS Workbench a AIP

Podstatnou část práce v programu ANSYS zabere tvorba modelu, přiřazení okrajových podmínek plochám a materiálových vlastností tělesům. Vytvoření modelu přímo v programu ANSYS nemusí být tak uživatelsky výhodné, jako v jiném programu pro 3D modelování, například v programu Autodesk Inventor, ale lze i v ANSYSu modely vytvářet. Pokud je model vytvořen v jiném programu, je do Workbench pouze importován a modelu jsou přiřazeny okrajové podmínky a materiálové vlastnosti tělesům.

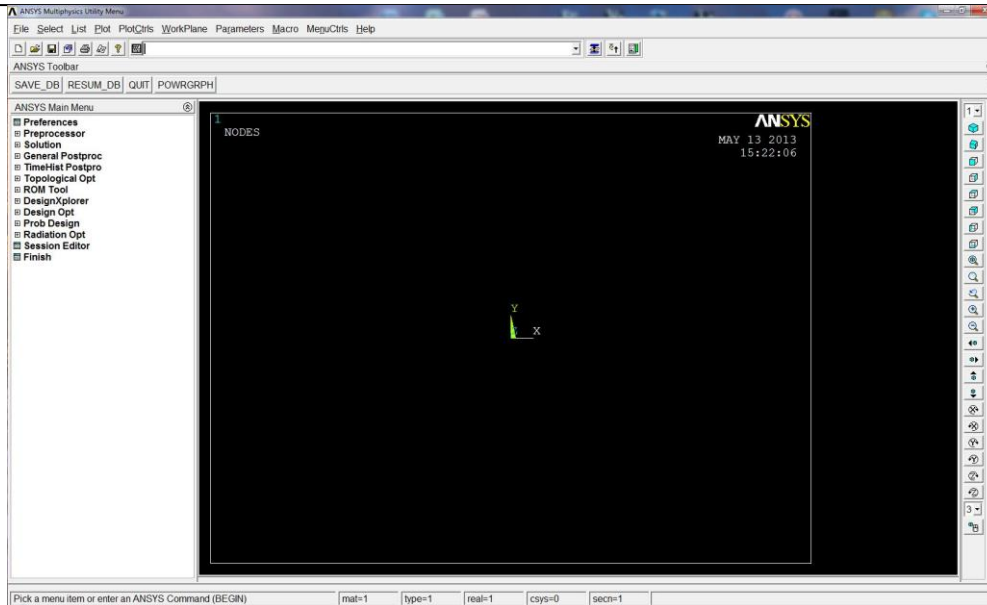
Protože se okrajové podmínky v ANSYSu přiřazují např. plochám nebo objemům, je nutné již při modelování kontrolovat nepřekrývání objemů jednotlivých prvků soustavy.

Pro importování modelu vytvořeného v programu Autodesk Inventor do Workbench je nutné tento model uložit do jednoho z podporovaných formátů. např. .sat, .iam, .iges.[12]

5.3 Uživatelské prostředí ANSYS Workbench

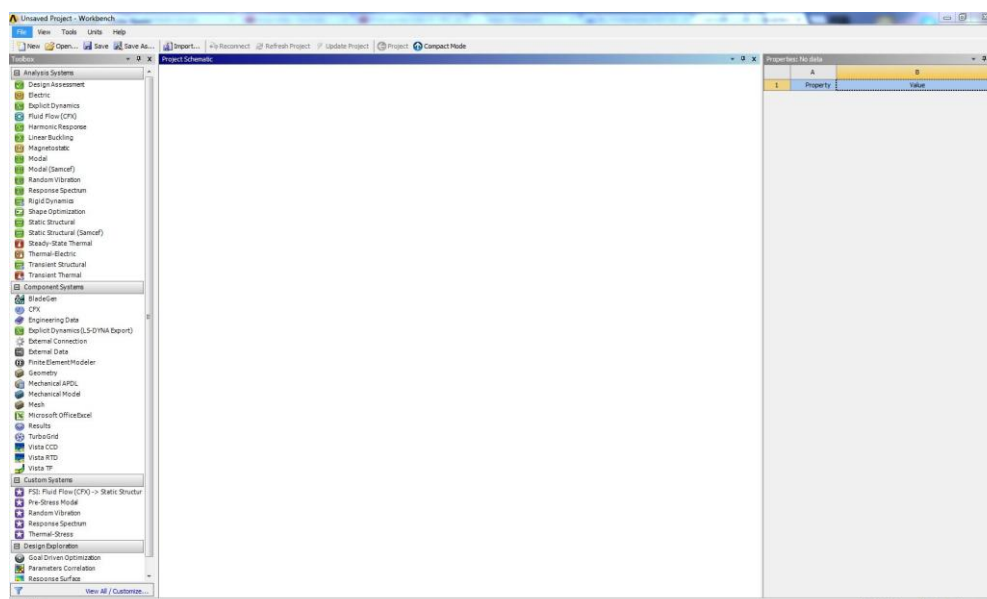
ANSYS Workbench je jedním z nejvýznamnějších softwarových balíků pro řešení inženýrských problémů metodou konečných prvků, vyvíjený stejnojmennou společností ANSYS jako její nejznámější produkt. ANSYS obsahuje dvě rozdílná grafická prostředí a to prostředí ANSYS Classic a ANSYS Workbench. Obě prostředí mají společné výpočetní jádro, značně se ovšem liší v nabízených možnostech a systematice práce.

ANSYS Classic je původní grafické rozhraní nabízené od počátku vývoje ANSYSu, nabízí maximální kontrolu nad průběhem simulace a dostupnost všech potřebných funkcí. Uživatelské rozhraní je ovšem složité na ovládání a jeho zvládnutí trvá podstatně delší dobu. ANSYS Classic je zaměřen především na výpočtáře specialisty.



Obrázek 13 ANSYS Classic

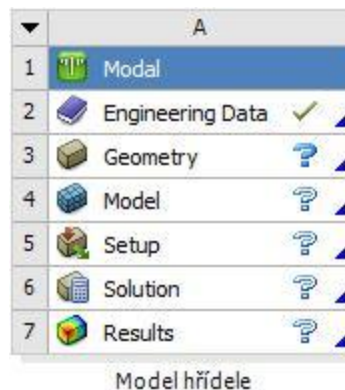
ANSYS Workbench je moderní grafická nadstavba klasického ANSYSu vyvíjená v posledních letech, především pro potřebu konstruktérů, znalých práce v prostředí parametrických CAD systémů. Grafické rozhraní je uzpůsobeno pro snadnou orientaci a efektivitu práce právě těchto uživatelů. Značnou výhodou je plná integrace s celou řadou moderních CAD systémů (jako je například i Autodesk Inventor), kdy z prostředí pro modelování lze jedním stisknutím tlačítka přenést celý model do prostředí výpočtu a okamžitě začít pracovat na vlastní simulaci. Kromě importu externí geometrie obsahuje Workbench také jednoduchý parametrický modelář, díky kterému je možné pohodlně vytvořit požadovanou geometrii. Řada nezbytných kroků a postupů při vlastním výpočtu je plně nebo částečně automatizovaných, ovšem s možností plné kontroly - to významně usnadňuje práci začátečníkům, ale neomezuje pokročilé uživatele.



Obrázek 14 Prostředí ANSYS Workbench

Po spuštění programu se nabízí volba započetí nového projektu. Každý projekt v ANSYS Workbench sestává z modelu, sítě (mesh) a simulace. Všechny tyto kroky jsou reprezentovány v prostředí vlastním nezávislým modulem, všechny ale využívají podobné grafické rozhraní, takže základní popis rozhraní bude proveden na náhledu z prostředí simulace. Rozhraní sestává z těchto částí:

- 1. Náhled modelu** – Poskytuje pohled na simulovaný model. Jde zde dále uveden orientační kříž souřadného systému a informace o jednotkách, případně barevná škála a podobně.
- 2. Stromová struktura postupu simulace** – Jde o nejdůležitější část rozhraní, kde je v přehledné struktuře rozepsán celý postup práce na simulaci. Správně nastavené prvky jsou označeny zeleným zatržením, chybné červeným křížkem a žlutým bleskem dosud neprovedené.
- 3. Podrobnosti jednotlivých prvků** – Při označení prvku ve stromové struktuře lze zde měnit jednotlivé parametry.
- 4. Oblast oznámení** – Zde se zobrazují varovná oznámení, případně další doplňující informace o průběhu výpočtu.



Obrázek 15 Stromová struktura

Postup práce po vytvoření nového projektu je takový, že uživatel nejdříve vytvoří požadovanou geometrii v modulu **Design Modeler** (v tomto modulu lze provést i import požadované geometrie z externího CAD systému), následuje vytvoření konečnoprvkové sítě, což lze udělat jednak v prostředí pro tvorbu sítě a jednak v modulu pro simulaci a následně se v prostředí simulace zadají jednotlivé zatížení, podmínky a výpočet je spuštěn pomocí tlačítka **Solve**. Pro zjednodušení práce si lze otevřít okno **Simulation Wizard**, což je textový pomocník, který uživatele provede postupně jednotlivými kroky zvolené simulace a automaticky barevně označí případné chyby a nezadané parametry. Zároveň jednoduše a srozumitelně popisuje metodiku práce v programu. [13]

6 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ V ANSYS WORKBENCH

Metoda konečných prvků je v současné době jednou z nejvyužívanějších metod pro numerické řešení inženýrských problémů popsaných diferenciálními rovnicemi v oblasti mechanických a elektromagnetických výpočtů, obecně v případech, kdy exaktní řešení není možné nebo efektivní. Značné rozšíření a praktické nasazení dosáhla tato metoda především díky prudkému rozvoji výpočetní techniky v posledních desetiletích. Metoda konečných prvků je založena na diskretizaci spojitého kontinua, což znamená, že spojitá úloha je rozdělena na konečný počet prvků (elementů), jednotlivé elementy se spolu stýkají v uzlech a dohromady tvoří takzvanou konečnoprvkovou síť. Řešení dané úlohy je následně vypočteno v jednotlivých uzlech sítě.

Metoda poskytuje přibližné řešení problému. Přesnost metody přímo závisí na počtu elementů. Čas potřebný k výpočtu se zvyšuje s rostoucím počtem elementů, takže základem správného řešení je optimální volba počtu elementů a jejich rozložení v rámci modelu. Síť je vhodné zhustit v místech, kde je nutné dostat přesnější výsledky, naopak v místech mimo oblast zájmu může být elementů méně. Hodnoty mimo uzly sítě jsou získány interpolací mezi hodnotami jednotlivých uzlů. Řešení úlohy metodou konečných prvků pomocí počítače lze obecně rozdělit do několika kroků:

- **Preprocessing** (příprava modelu) – V tomto kroku se tvoří model, definují vlastnosti elementů a síť, zadávají okrajové podmínky a jednotlivé zatížení. Model může být vytvořen přímo v prostředí příslušné aplikace pro výpočet nebo importován z externího CAD systému. Při vlastním modelování je nutné přemýšlet nad tím, jak zredukovat čas nutný pro výpočet a přitom dosáhnout požadované přesnosti. Toho lze docílit například využitím symetrií. Tvorba modelu přímo souvisí také s dimenzionalitou dané úlohy. Spoustu trojrozměrných úloh lze řešit také jako dvojrozměrné, což výrazně redukuje počet elementů a zrychlí řešení. S dimenzionalitou úlohy také souvisí otázka volby elementu. U jednoduchých pravoúhlých tvarů lze použít krychle/čtverce, složitější tvary lze lépe vyplnit pomocí jehlanů a podobně. Během vytváření sítě je nutné předem zvážit, ve kterých oblastech je nutné více elementů a síť patřičně zhustit. Dále je pro jednotlivé části nutné zadat materiálové vlastnosti jako je měrná tepelná kapacita, Poissonova konstanta nebo relativní permeabilita. Všechny konstanty lze zadávat jako pevnou hodnotu nebo také pomocí naměřených křivek.

- **Solution** (řešení úlohy) – Ve chvíli, kdy je konečnoprvkový model hotov, lze přejít k vlastnímu řešení úlohy. Prvním krokem je nastavení vlastní analýzy, tedy definice typu, počátečních podmínek a podobně. Z hlediska typu lze provádět statické, transientní i harmonické analýzy s i bez vlivu nelinearit. Počáteční podmínky vycházejí z typu analýzy, například pro tepelnou to může být určitá teplota prostředí. Druhým krokem je definice zatížení a okrajových podmínek. Na jednotlivé objemy, plochy nebo i na samostatné elementy, popřípadě uzly, lze zadat zatížení dle typu prováděné analýzy. V případě, pevnostní analýzy lze zadat síly působící na různé části modelu, pevné ukotvení částí nebo třeba působení momentu. Po zadání všech okrajových podmínek a zatížení lze spustit vlastní výpočet úlohy.

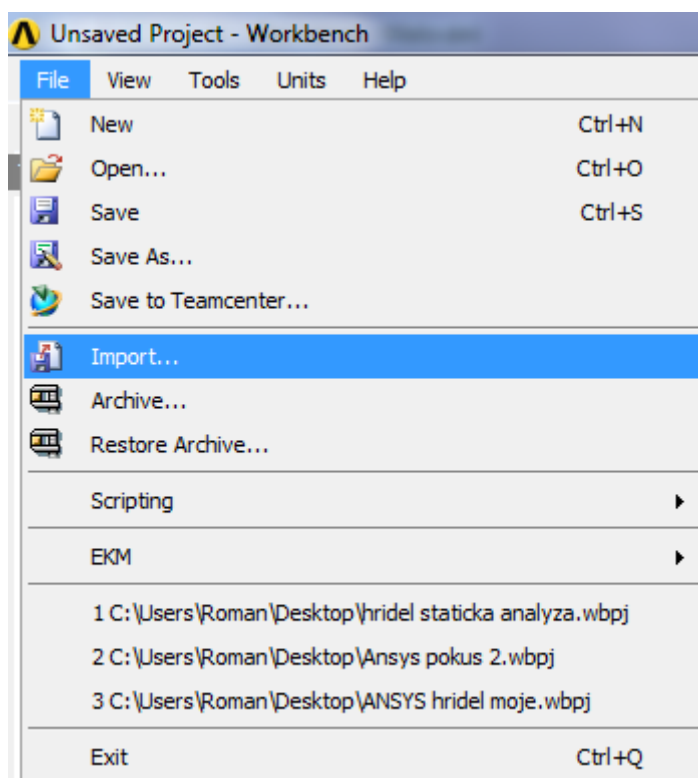
- **Postprocessing** (vyhodnocení úlohy) – Vyhodnocení úlohy je nejdůležitější částí řešení problému. Zobrazení výsledků se nejčastěji zobrazuje jako barevné kontury, přičemž různá barva

vyjadřuje různou amplitudu zobrazované veličiny. Těžiště této části ovšem neleží na použitém softwaru nebo metodě, ale na řešiteli. Správné vyhodnocení výsledků klade vysoké nároky na zkušenost a znalost dané problematiky. [13]

7 MKP v ANSYS WORKBENCH NA MODELU HŘÍDELE

7.1 Převedení modelu hřídele do ANSYS Workbench

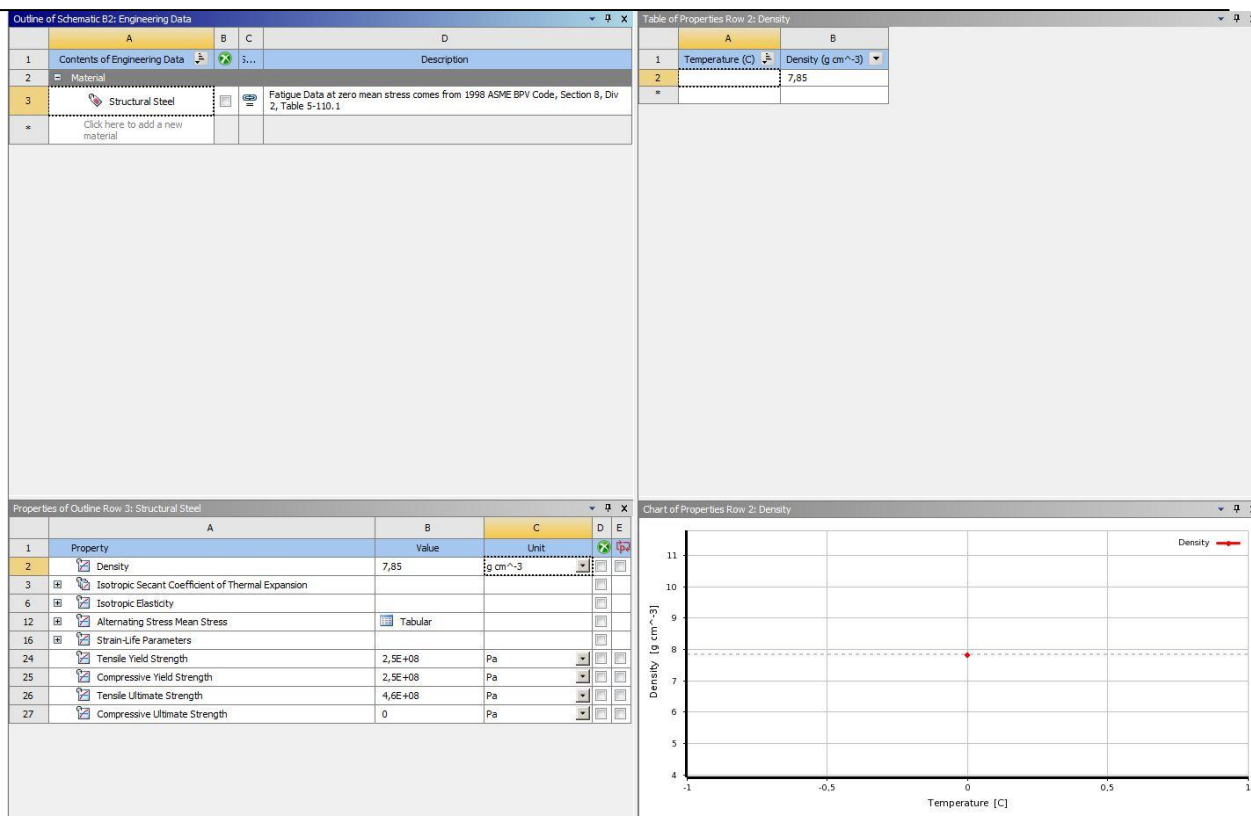
Jako model, na kterém bude MKP demonstrováno, byla vybrána hřídel synchronního motoru. Hřídel byla vymodelována v programu Autodesk Inventor Professional 2012. V programu AIP 2012 byla hřídel připravena na export do formátu .sat. Následně byl proveden import v programu ANSYS Workbench.



Obrázek 16 Import do ANSYS Workbench

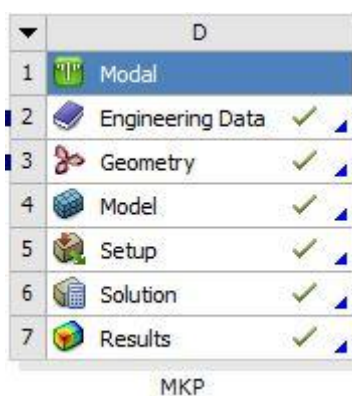
7.2 Nastavení modelu

Byla zvolena možnost modální analýzy, kde jako první byla určena data v modulu **Engineering Data**. Tato funkce má na starost knihovny materiálů. Byla zadána hustota materiálu ze kterého se model skládá, což je ocel - $\rho = 7,85 \text{ g/cm}^3$. Ostatní vlastnosti byly zanedbány, jelikož práce je pouze srovnávacího charakteru.



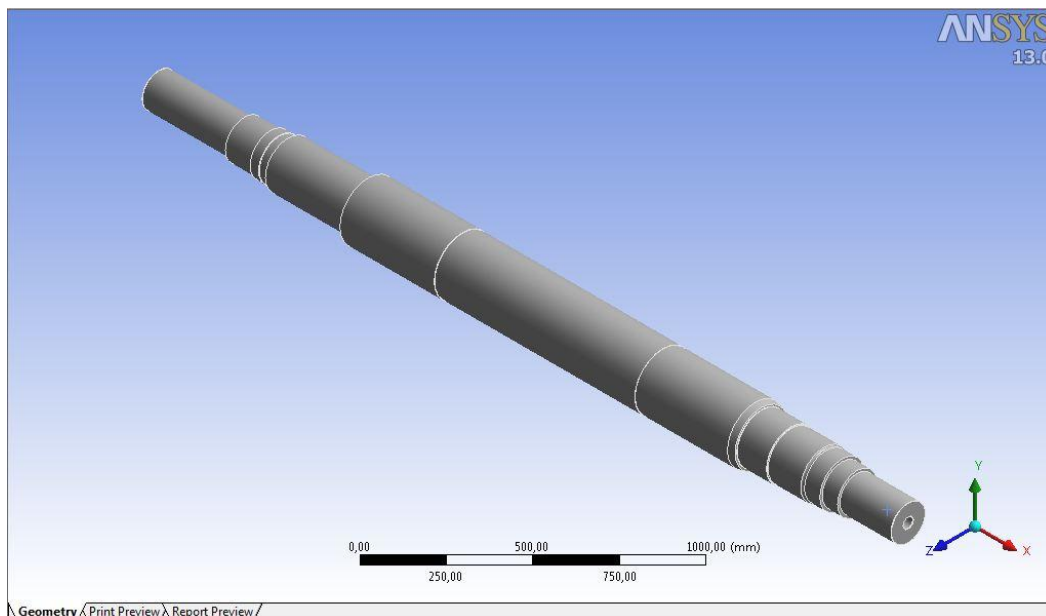
Obrázek 17 Funkce Engineering Data

Dále byl vybrán modul **Geometry**, který slouží k tvorbě a importu 3D modelu určeného pro analýzu. Modul geometry byl vytvořen při importu hřídele do programu ANSYS Workbench, tudíž bude propojen se stávajícím projektem. Poté bylo kliknuto na tlačítko Update a celá sestava byla vytvořena.



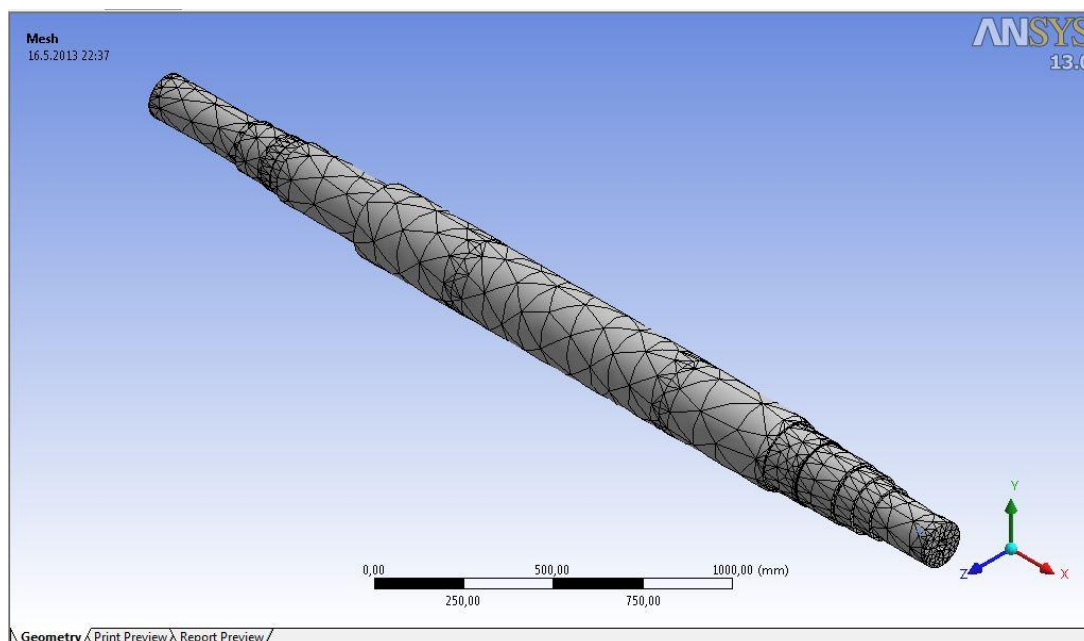
Obrázek 18 Propojení modulů

Dále byla vybrána funkce **Model**. Po spuštění této funkce byl otevřen **ANSYS Mechanical**. V tomto okně se uskutečňuje celá simulace. Otevřením záložky Geometry se zobrazí všechny části modelu včetně všech geometrií. Geometrie se nazývá Hřídel. Všechny části mají defaultně nastaven materiál Structuralsteel. V této záložce můžeme také zjistit délku osy X, osy Y, počet uzlů a elementů komponentu.



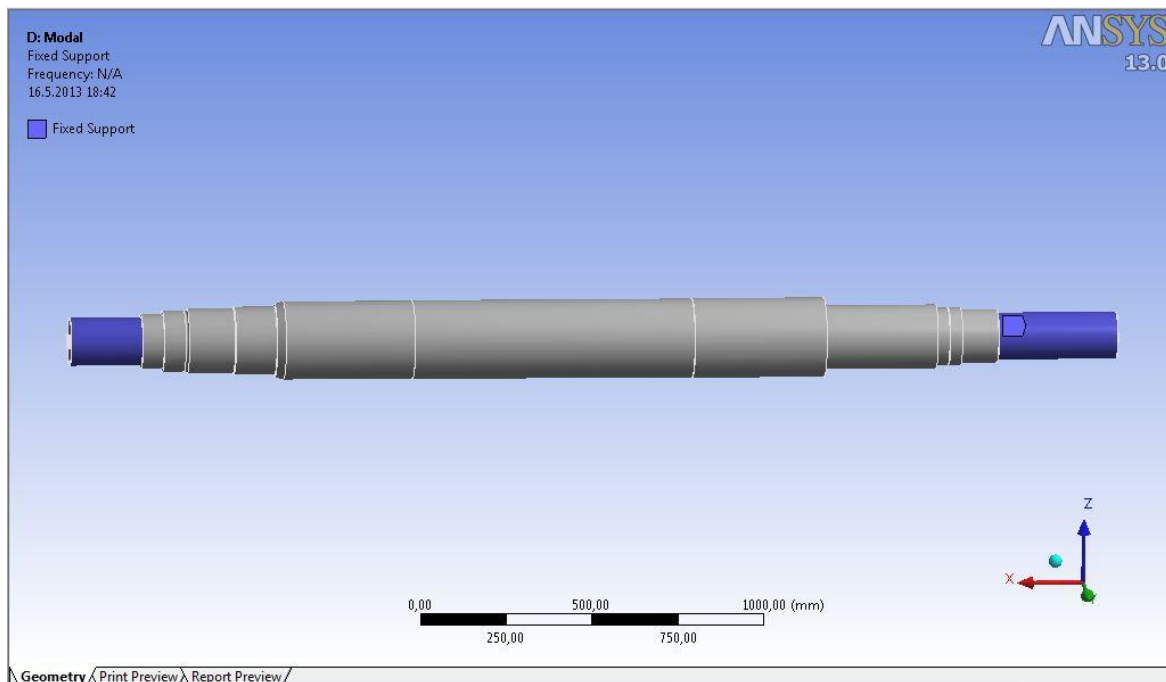
Obrázek 19 ANSYS Mechanical - model hřídele

V záložce Mesh se nastaví vytvoření sítě elementů a jejich počet. Čím více je elementů, tím je simulace přesnější, ale zároveň roste i čas za který je simulace provedena. Proto hledáme kompromis a nastavíme síť tak, aby v místech, kde požadujeme větší přesnost byla síť hustší a v místech, kde nepotřebujeme velkou přesnost, byla síť méně hustší. Síť byla vygenerována automatickým generátorem sítě, je vidět na obrázku 20.



Obrázek 20 Zasítovaný model

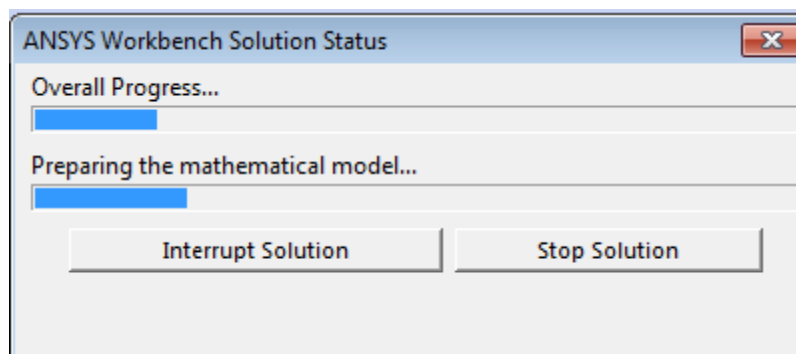
Následně bylo provedeno zavazbení modelu hřídele. Hřídel byla uchycena ve směru osy X. Na níže uvedeném obrázku jsou zobrazeny plochy, na které byly vazby použity.



Obrázek 21 Vazby na modelu hřídele

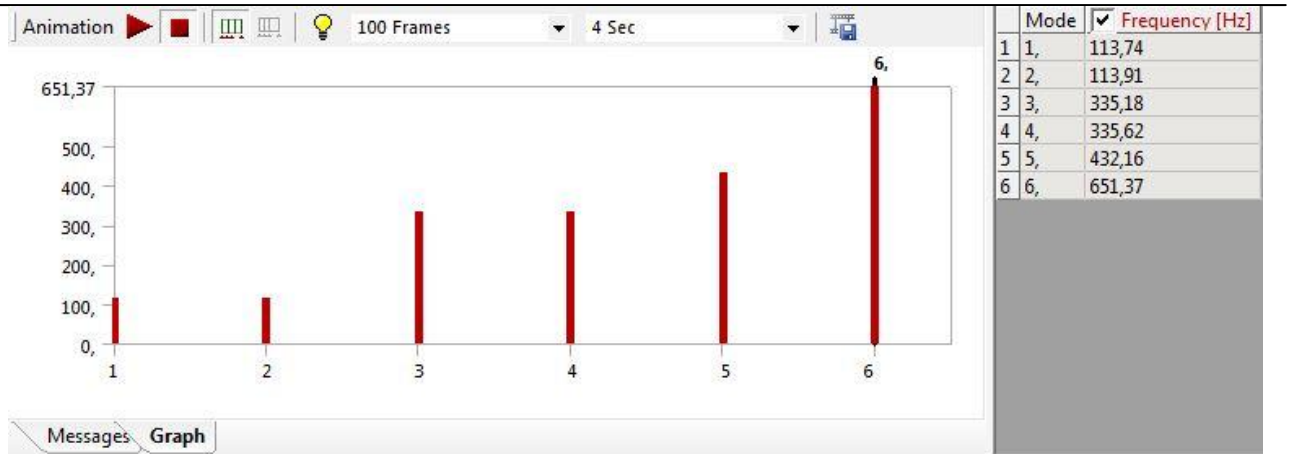
7.3 Simulace modální analýzy

Modální analýza je oblastí dynamiky, která má velký význam v technické diagnostice. Pomocí modální analýzy je možné získat úplný dynamický popis mechanické soustavy nebo konstrukce. Modální analýza zjišťuje vlastní frekvence soustavy. Je zde možno také animovat deformovaný tvar, aby se zobrazil modální tvar asociovaný s konkrétní frekvencí. Barevné spektrum udává, jak moc je hřídel deformována. [14]



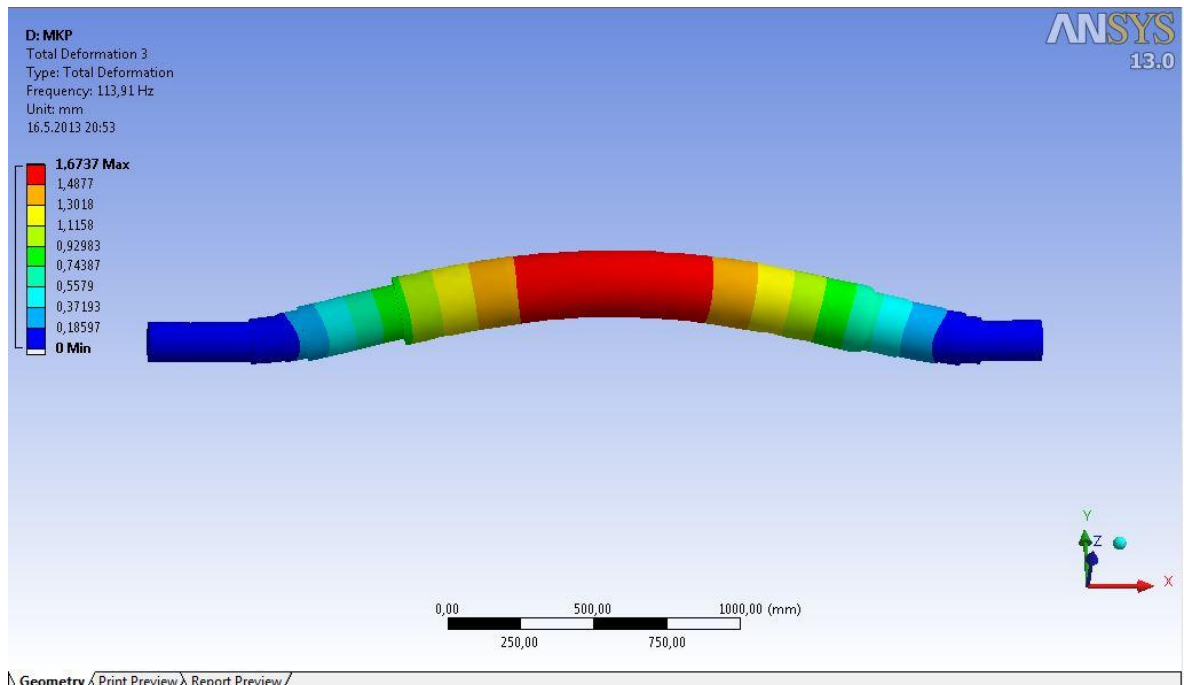
Obrázek 22 Probíhající výpočet

Po dokončení všech předcházejících úkonů se tlačítkem Solve spustí vlastní výpočet. Délka výpočtu je ovlivněna složitostí geometrie a hustotou sítě konečných prvků a pohybuje se od několika minut až po několik hodin u složitých sestav. Pokud výpočet proběhl bez problému, objeví se po označení položky **Solution** ve stromě událostí grafické a číselné zobrazení výsledků.



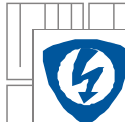
Obrázek 23 Výsledky výpočtu

Pro zobrazení jednotlivých tvarů vlastních kmitů je nutné kliknout pravým tlačítkem myši nad zobrazeným grafem a vybrat položku **SelectAll** a následně znovu kliknout pravým tlačítkem myši a vybrat položku **Create Mode ShapeResults**. Ve stromu událostí se nyní objevilo několik nových položek, které reprezentují vlastní tvary kmitů. Po opětovném stisknutí tlačítka **Solve** je možné zobrazit vybraný tvar kmitů v grafické podobě. Výsledkem jsou grafické výstupy na kterých je zobrazováno chování hřídele při různých frekvenčních zatíženích. Nejdůležitější je v tomto frekvence 113,91 Hz, která ukazuje vlastní kritické otáčky, což je 6834,6 ot/min.



Obrázek 24 Výsledek modální analýzy pro frekvenci 113,91 Hz

S pomocí výsledků modální analýzy (vlastních frekvencí), je možné stanovit nebezpečné provozní stavy, ve kterých se dané zařízení nesmí provozovat. [15]



V příloze jsou uvedeny výsledky pro další modální frekvence a to pro 113,74 Hz, 335,18 Hz, 335,62 Hz, 432,16 Hz, 651,37 Hz.

8 ZÁVĚR

V této práci byly zhodnoceny nové možnosti programu Autodesk Inventor 2012, kterých je ovšem takové množství, že byly vybrány pouze některé z nich. Dále byl popsán modul Pevnostní analýzy v programu Autodesk Inventor 2012, kde lze nastavit spousty proměnných počátečních podmínek. Tato nastavení jsou pro konečné výsledky velmi důležitá. Dále byla v programu Autodesk Inventor 2012 namodelován model hřídele synchronního stroje. Hřídel byla v tomto programu zavazbena na obou koncích. Zatížení nebyla uvažována, jelikož jejich vliv na samotnou pevnostní analýzu neměla vliv. Výsledky modální analýzy jsou pro různé frekvence, které jsou patrné na obrázcích a přílohách.

Dále byl v této práci představen program ANSYS Workbench. Tento program je plně kompatibilní s programem AIP 2012, tudíž nebylo nutné v programu ANSYS Workbench znovu modelovat hřídel, ta byla importována z programu AIP 2012 se všemi vlastnostmi. Následně bylo popsáno prostředí programu ANSYS, který byl rozdělen do dvou částí. ANSYS Classic, který se hodí spíše pro vědecké účely a ANSYS Workbench, který byl použit k výpočtu. Dále byl popsán modul MKP v programu ANSYS Workbench. V poslední kapitole bakalářské práce byla vytvořena modální analýza již zmiňované hřídele synchronního stroje. Po importaci modelu hřídele z AIP 2012 bylo provedeno veškeré nastavení modelu. Výsledky modální analýzy byly pro různé (vlastní) frekvence, které jsou uvedeny na obrázcích a v přílohách.

Zhodnocení programu ANSYS Workbench a AIP 2012. Program ANSYS Workbench nabízí stejné výpočetní jádro jako ANSYS Classic. Dále program obsahuje jednoduchý parametrický modelář pro tvorbu a úpravu geometrie, které je velmi podobné programu AIP 2012. Ovládání ANSYS Workbench, ale i programu AIP 2012 je velmi intuitivní a přehledné. V programu ANSYS Workbench je proces plně automatizován s možností uživatelského zásahu.

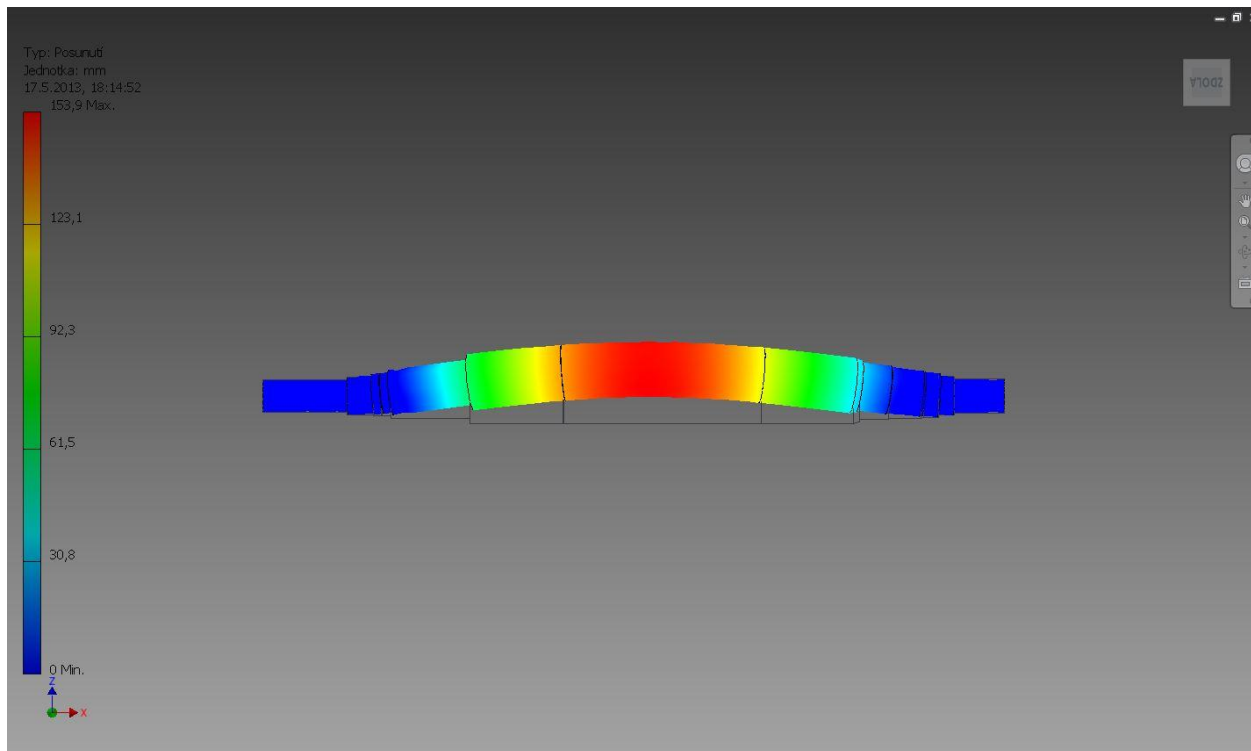
Cílem práce bylo zhodnotit výsledky pevnostní analýzy provedené v programech AIP 2012 a ANSYS Workbench. Analýza měla za úkol demonstrovat možnosti obou programů, vyzkoušet si jejich pracovní prostředí a posoudit reálnost výsledků. Hlavní cílem práce ovšem nebyla přesnost výsledků, ale ukázka možností těchto softwarů. Výsledné grafy nerepresentují skutečné posunutí, slouží pouze jako ukázky.

LITERATURA

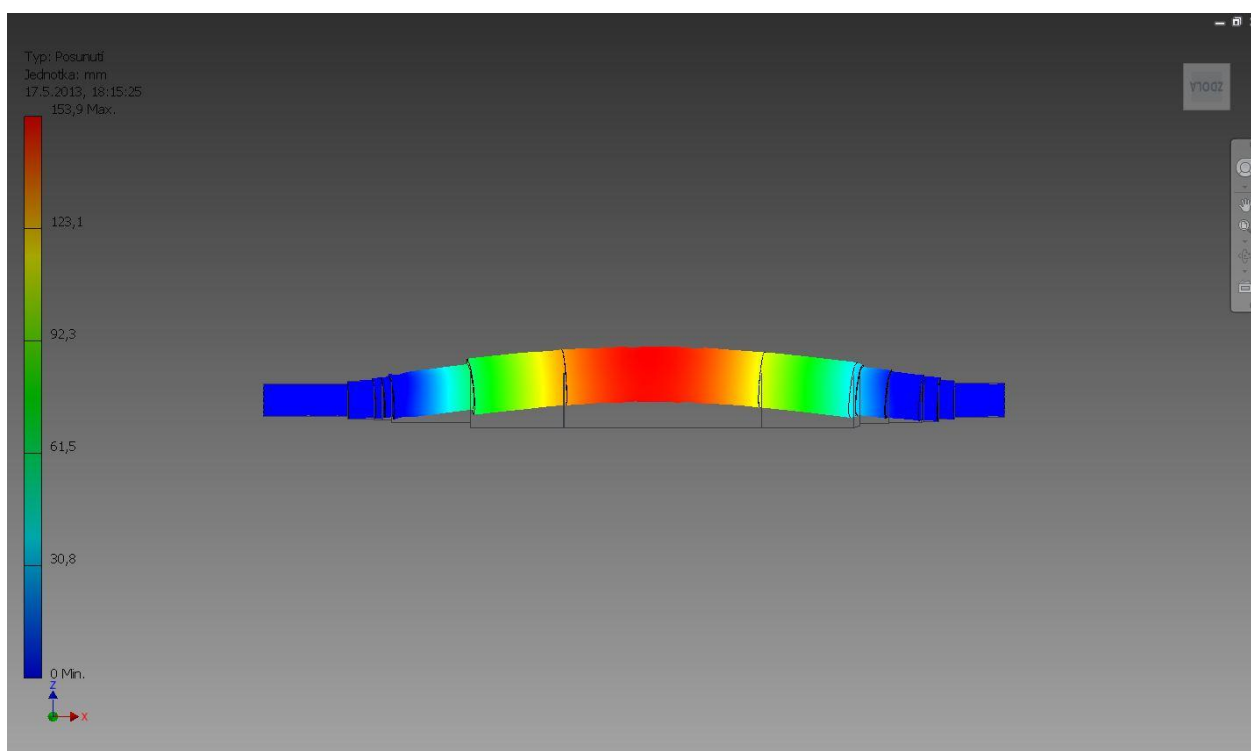
- [1] KUČERA, Petr. *PEVNOSTNÍ ANALÝZA V PROGRAMU AUTODESK INVENTOR*. Brno, 2011. 34 s. Semestrální práce. VUT Brno.
- [2] *Wikiphelp.autodesk.com* [online]. 2011 [cit. 2011-12-08]. Přehled pevnostní analýzy. Dostupné z WWW: <http://wikiphelp.autodesk.com/Inventor/csy/2012/Help/2021-Pevnostn2021/2088-N%C3%A1pov%C4%9Bda2088/2089-P%C5%99ehled_2089>.
- [3] *Autodesk.com* [online]. 2011 [cit. 2011-12-07]. Produkty Autodesk Inventor. Dostupné z WWW: <<http://www.autodesk.cz/adsk/servlet/pc/index?siteID=551663&id=14579603>>.
- [4] *Wikiphelp.autodesk.com* [online]. 2011 [cit. 2011-12-08]. Směrová nabídka. Dostupné z WWW: <http://wikiphelp.autodesk.com/Inventor/csy/2012/Help/0000-Co_je_no/0001-U%C5%BEivatel1/0004-Sm%C4%9Brov%C3%A1_4>.
- [5] *Wikiphelp.autodesk.com* [online]. 2011 [cit. 2011-12-08]. Rozšířené miniaturní panely nástrojů. Dostupné z WWW: <http://wikiphelp.autodesk.com/Inventor/csy/2012/Help/0000-Co_je_no/0001-U%C5%BEivatel1/0006-Roz%C5%A1%C3%AD%C5%99en6>.
- [6] *Autodesk.com* [online]. 2011 [cit. 2011-12-07]. SystemRequirements. Dostupné z WWW: <<http://usa.autodesk.com/autodesk-inventor/system-requirements/>>.
- [7] *Wikiphelp.autodesk.com* [online]. 2011 [cit. 2011-12-08]. ILogic. Dostupné z WWW: <<http://wikiphelp.autodesk.com/Inventor/csy/2012/Help/0073-Aplikace73/0673-iLogic673/0674-P%C5%99ehled674>>.
- [8] In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : WikipediaFoundation, 25. 3. 2007, last modified on 13. 11. 2011 [cit. 2011-12-07]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda_kone%C4%8Dn%C3%BDch_prvk>
- [9] SEDLÁČEK, Petr. *PEVNOSTNÍ ANALÝZA V PARAMETRICKÝCH CAD PROGRAMECH II* [online]. Brno : VUT, 2009. 35 s. Semestrální práce. VUT, FEKT.
- [10] *Wikiphelp.autodesk.com* [online]. 2011 [cit. 2011-12-08]. Příprava na pevnostní analýzu. Dostupné z WWW: <http://wikiphelp.autodesk.com/enu?adskContextId=REDIRECT_IDD_FIXED_CONSTRAINT_DLG_HOW_TO&language=CSY&release=2012&product=Inventor>.
- [11] FRÉMUND, Libor. *Výpočtové systémy na bázi MKP určené pro konstruktéry*. Brno, 2009. Bakalářská práce. VUT Brno.
- [12] PARTL, Tomáš. *VYUŽITÍ PROGRAMU ANSYS WORKBENCH V SILNOPROUDÉ ELEKTROTECHNICE*. Brno, 2009. Diplomová práce. VUT Brno.
- [13] CHMELÍČEK, Petr. *TVORBA A ANALÝZA PARAMETRICKÝCH MODELŮ ELEKTRICKÝCH STROJŮ*. Brno, 2008. Bakalářská práce. VUT Brno.
- [14] MÁNEK, Petr. *ANALÝZA DRÁŽNÍHO SOUSTROJÍ MOTOR - GENERÁTOR*. Brno, 2012. Diplomová práce. VUT Brno.

PŘÍLOHY

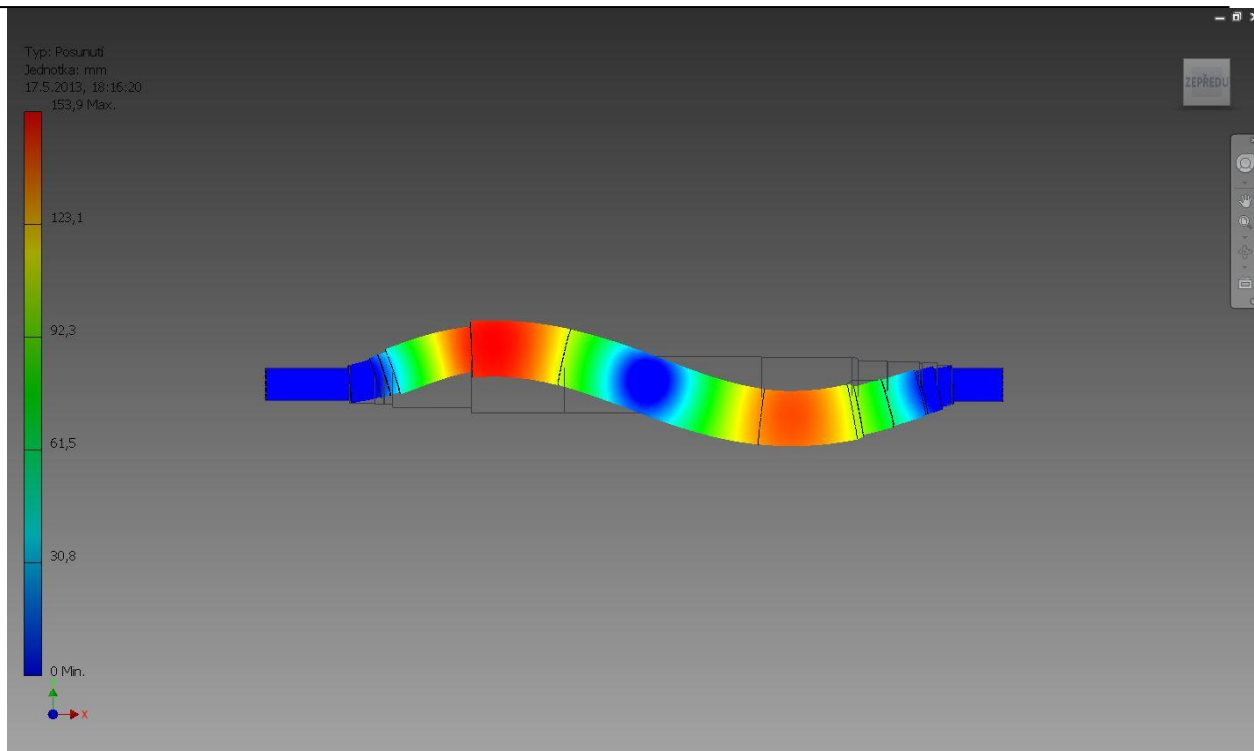
Výsledky simulace v programu Autodesk Inventor 2012:



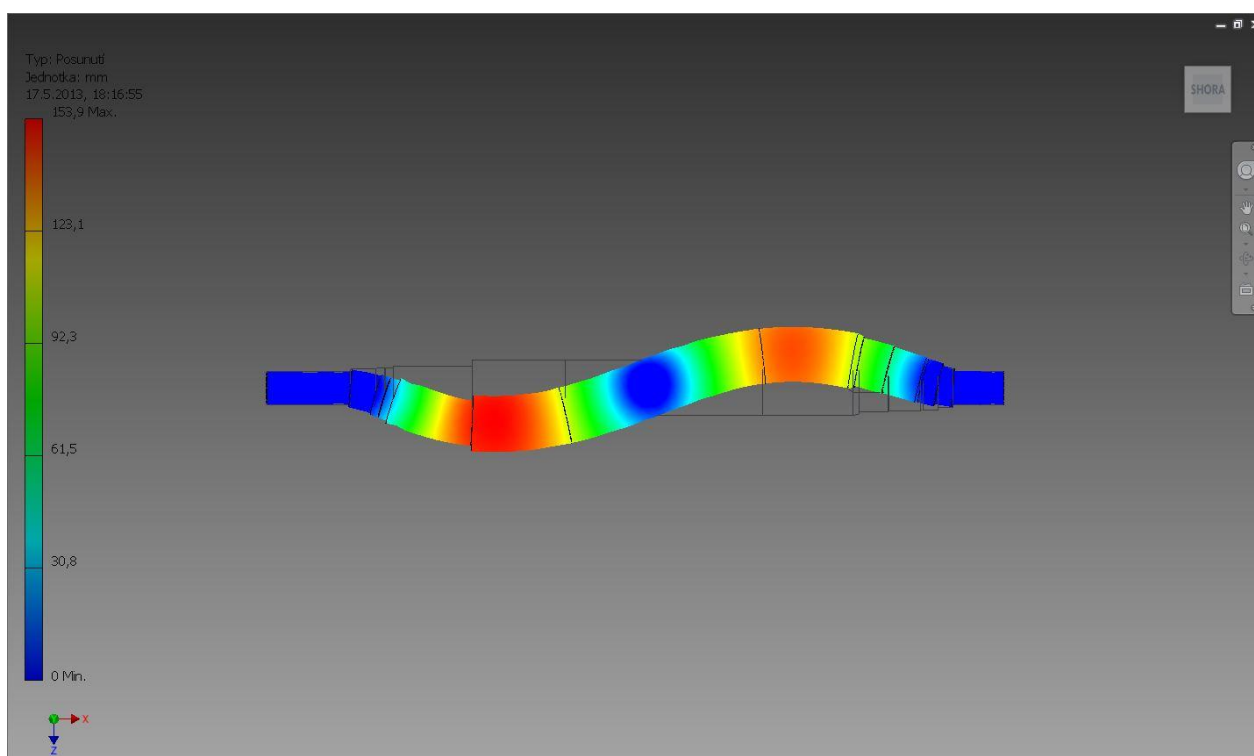
Obrázek 25 Deformace při frekvenci 113,91 Hz



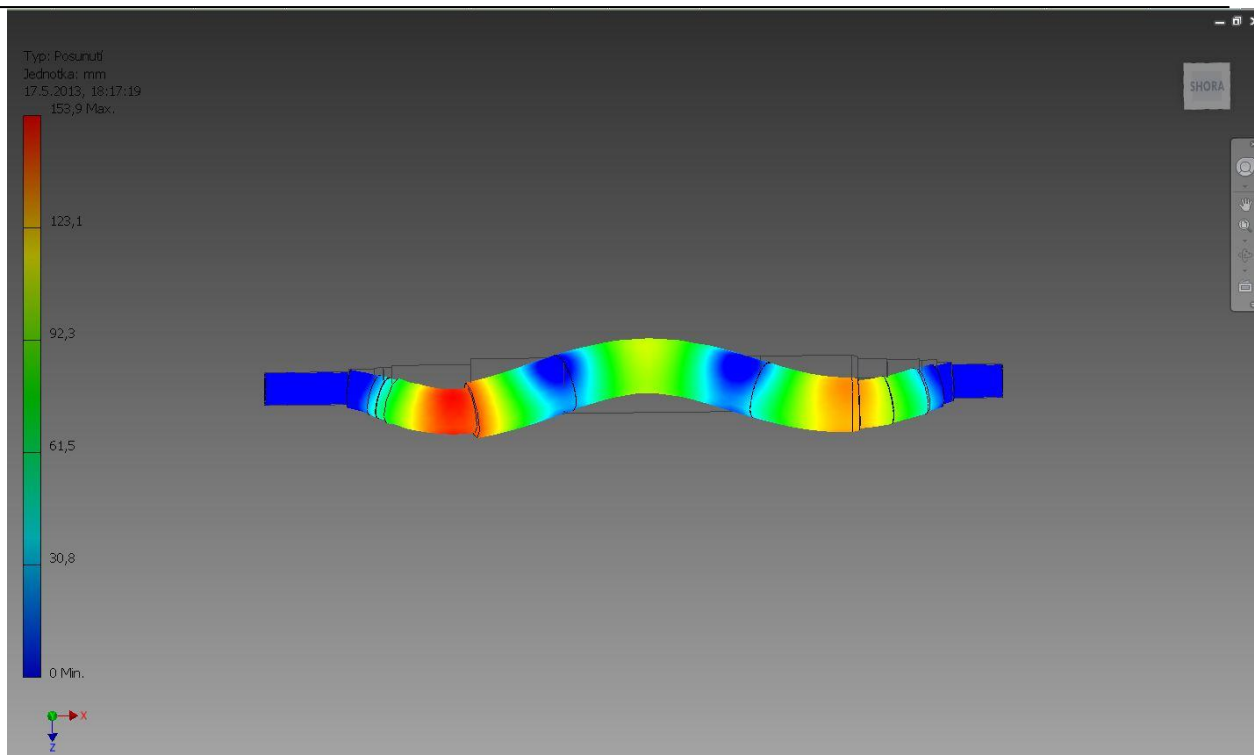
Obrázek 26 Deformace při frekvenci 113,96 Hz



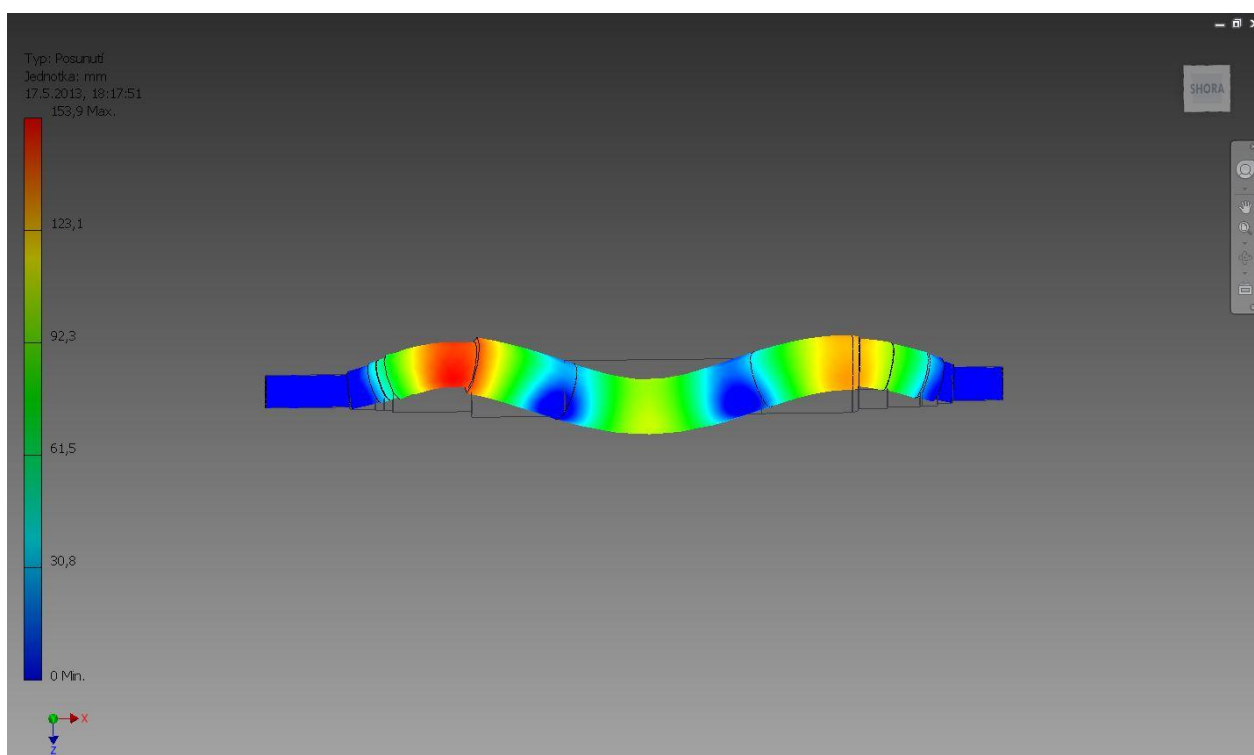
Obrázek 27 Deformace při frekvenci 335,65 Hz



Obrázek 28 Deformace při frekvenci 335,82 Hz

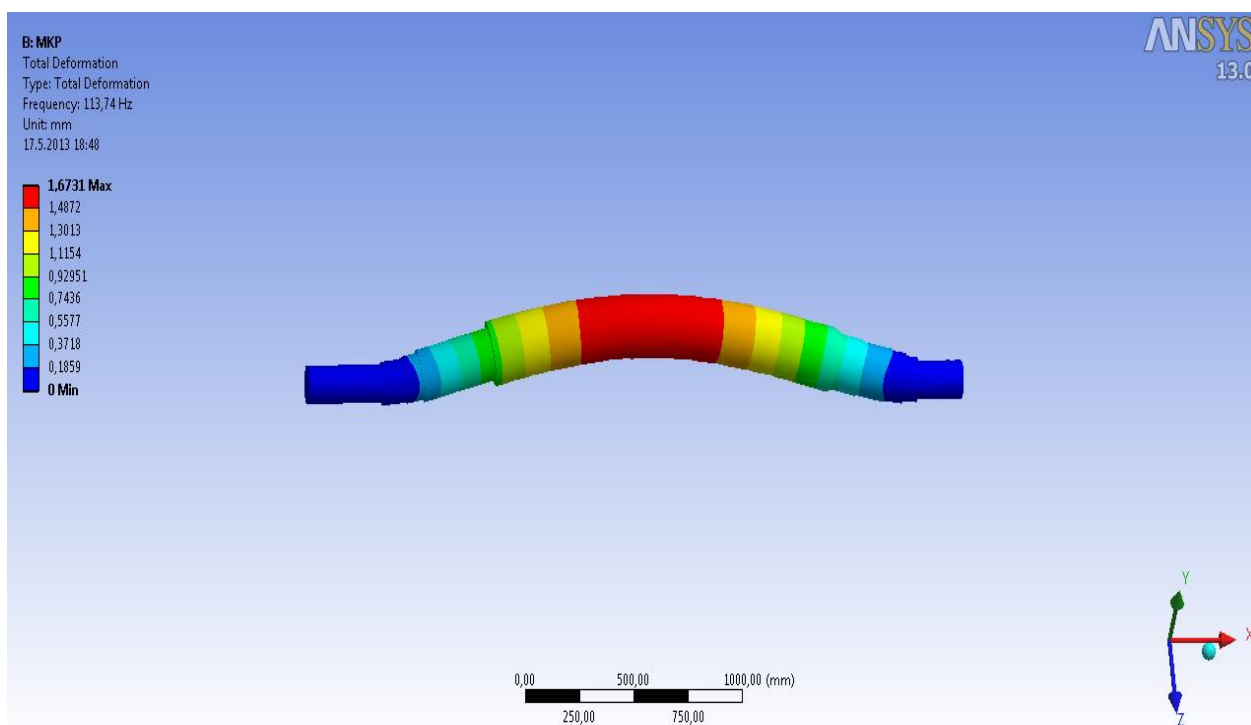


Obrázek 29 Deformace při frekvenci 650,63 Hz

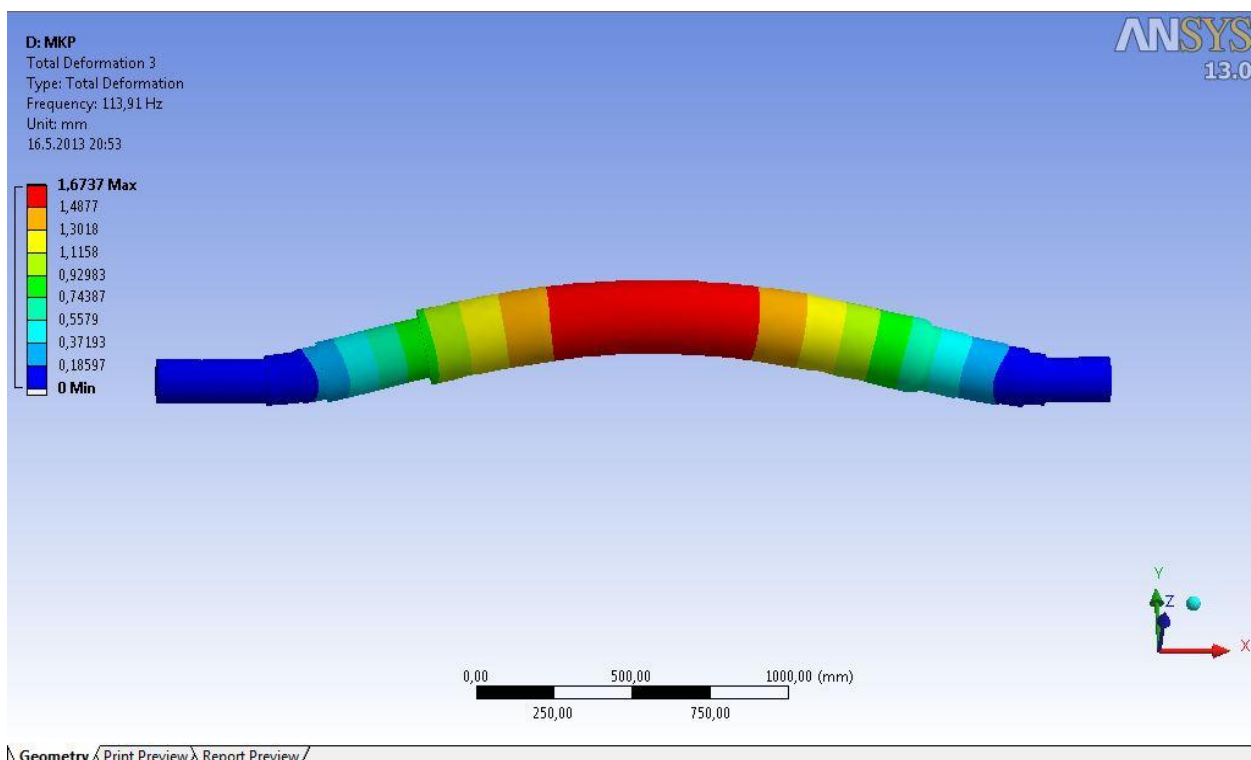


Obrázek 30 Deformace při frekvenci 650,98 Hz

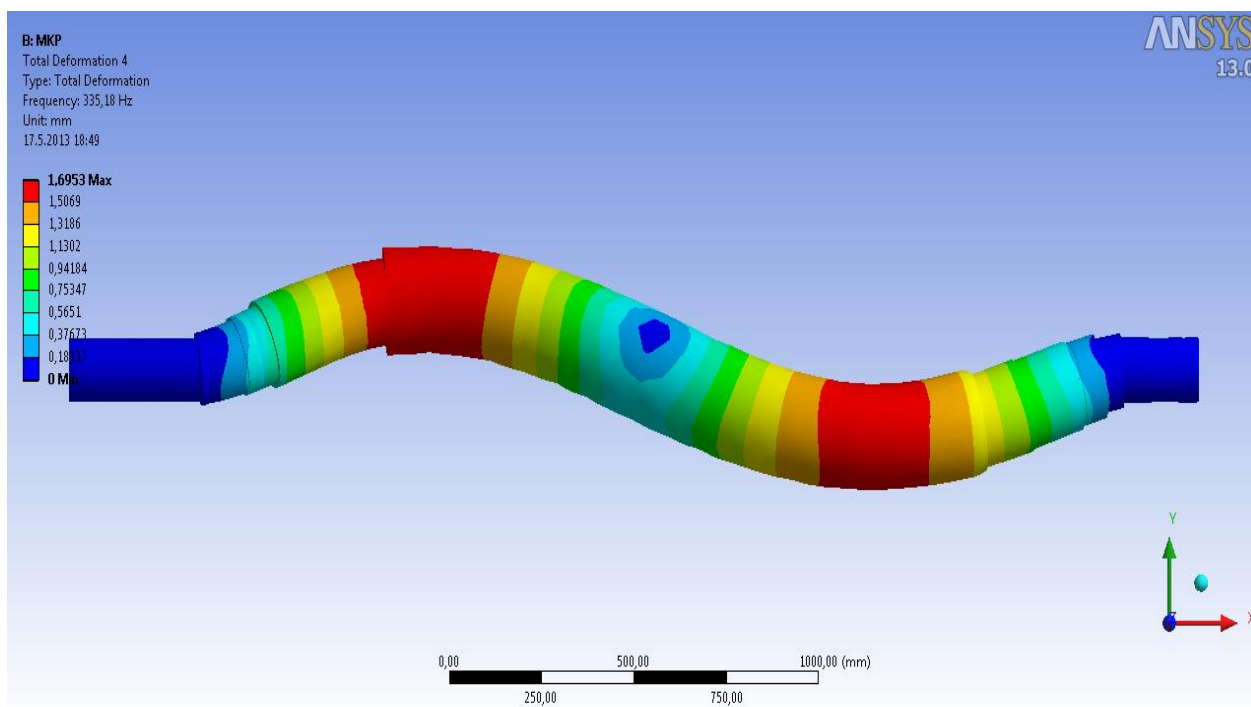
Výsledky simulace v programu ANSYS Workbench:



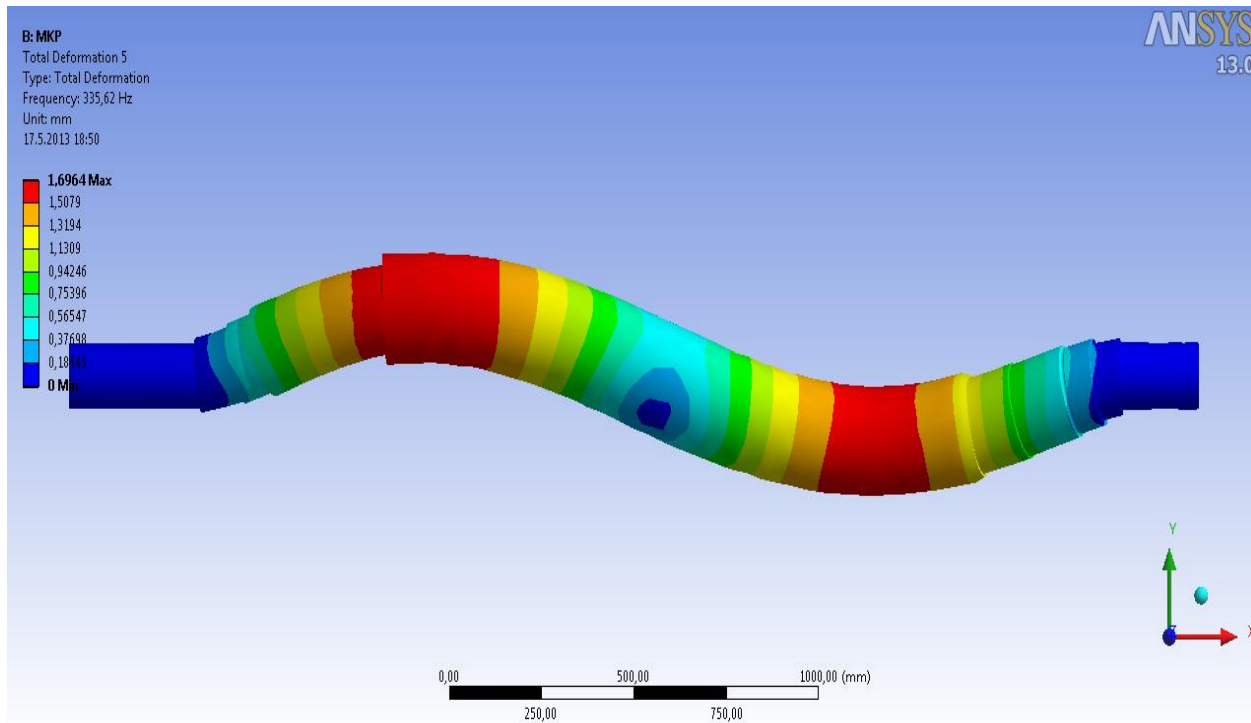
Obrázek 31 Deformace při frekvenci 113,74 Hz



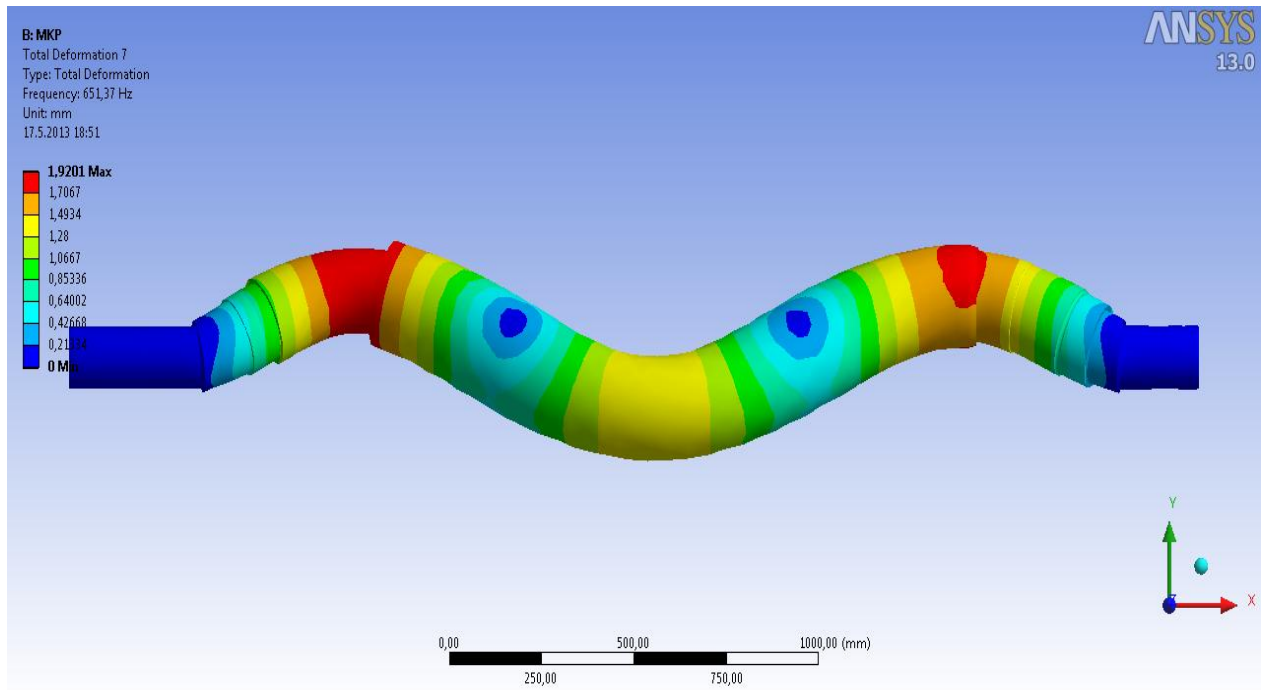
Obrázek 32 Deformace při frekvenci 113,91 Hz



Obrázek 33 Deformace při frekvenci 335,18 Hz



Obrázek 34 Deformace při frekvenci 335,62 Hz



Obrázek 35 Deformace při frekvenci 651,37 Hz