

# 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

## **ANALÝZA DRÁŽNÍHO SOUSTROJÍ MOTOR - GENERÁTOR**

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

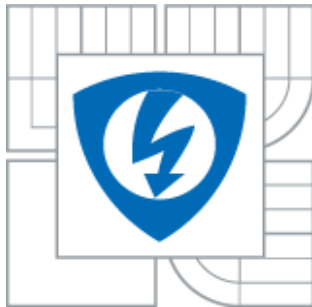
Bc. Petr Mánek

BRNO 2012



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLÓGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY  
A ELEKTRONIKY**

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

# **ANALÝZA DRÁŽNÍHO SOUSTROJÍ MOTOR - GENERÁTOR**

**ANALYSIS OF RAILWAY MOTOR – GENERATOR SET**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

DIPLOMA THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

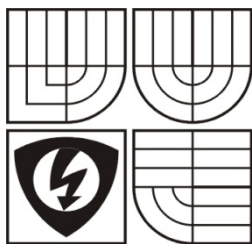
**Bc. Petr Mánek**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.**

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

# Diplomová práce

magisterský studijní obor  
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

**Student:** Mánek Petr

**Ročník:** 2

**ID:** 72931

**Akademický rok:** 2011/12

**NÁZEV TÉMATU:**

## Analýza drážního soustrojí motor - generator

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Vytvořte model soustavy drážního synchronního generátoru a diesel motoru na společném rámu.
2. Vytvořte v programu ANSYS Workbench simulační model soustavy pro výpočet modální analýzy.
3. Proveďte výpočet modální analýzy soustavy pro různé provozní stavy a výsledky porovnejte.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

**Termín zadání:** 21.9.2011

**Termín odevzdání:** 21.5.2012

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

**Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální 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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

## **Abstrakt**

Tato práce je zaměřena na možnost využití modální analýzy v silnoproudé elektrotechnice. První část práce vysvětluje pojem CAD systémy a uvádí jejich základní rozdělení. Další část práce se věnuje programu Autodesk Inventor 2012 a popisuje postup tvorby 3D modelu v tomto programu. Popsána je tvorba náčrtů, součástí, sestav a možnosti prezentace vytvořených modelů. Následující část práce se věnuje popisu metody konečných prvků a programu ANSYS Workbench. Další část práce popisuje výpočet modální analýzy na modelu drážního soustrojí motor – generátor v programu ANSYS Workbench. Je zde uveden popis modální analýzy, synchronních strojů, popis analyzovaného modelu soustrojí a vlastní výpočet modální analýzy včetně zhodnocení výsledků. V poslední části práce je uveden popis tvorby animace soustrojí drážního generátoru v programu Inventor Studio.

## **Abstract**

This work is focused on using of modal analysis in power electrical engineering. The first part of the work explains the term of CAD systems and provides their basic classification. The next section of this thesis describes procedure for creating models in Autodesk Inventor 2012. There is shown creation sketching, 3D components, assemblies and possibility of presenting the models. Next part of this thesis describes the finite element method and the program ANSYS Workbench. In the next part of this thesis is shown sample of calculation of modal analysis in the program ANSYS Workbench. There is a description of modal analysis, synchronous machines, the process of calculating of modal analysis and evaluation of the results. The last section of this thesis describes creation of animation of the railway generator set in the program Inventor Studio.

## **Klíčová slova**

CAD systémy; Autodesk Inventor; metoda konečných prků; ANSYS Workbench; modální analýza; Inventor Studio; animace; synchronní stroje

## **Keywords**

CAD systems, Autodesk Inventor; Finite element method; ANSYS Workbench; modal analysis; Inventor Studio; animation, synchronous machines

## **Bibliografická citace**

MÁNEK, P. *Analýza drážního soustrojí motor - generator*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 71 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc..

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Analýza drážního soustrojí motor - generátor jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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 diplomové práce doc. Ing. Čestmíru Ondruškovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Rovněž děkuji doc. Dr. Ing. Haně Kuchyňkové za veškerou odbornou pomoc a spolupráci. Dále děkuji Ing. Nahodilovi a Ing. Fučíkovi za možnost využít modelu soustrojí drážního generátoru k tvorbě této práce.

V Brně dne .....

Podpis autora .....

# OBSAH

ÚVOD .....	11
<b>1 CAD SYSTÉMY .....</b>	<b>12</b>
1.1 ROZDĚLENÍ CAD SYSTÉMŮ .....	13
1.2 AUTODESK INVENTOR.....	14
1.2.1 PRACOVNÍ PROSTŘEDÍ AUTODESK INVENTORU 2012.....	14
1.2.2 ZÁKLADY PRÁCE V PROGRAMU AUTODESK INVENTOR .....	17
1.2.3 TVORBA SOUČÁSTÍ.....	18
1.2.4 TVORBA SESTAV .....	19
1.2.5 MODUL PREZENTACE.....	21
1.2.6 INVENTOR STUDIO .....	22
<b>2 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ .....</b>	<b>27</b>
2.1 PRINCIP METODY KONEČNÝCH PRVKŮ .....	27
2.2 UŽIVATELSKÉ PROSTŘEDÍ ANSYS WORKBENCH .....	29
2.3 TYPY ANALÝZ V PROGRAMU ANSYS WORKBENCH.....	31
<b>3 MODÁLNÍ ANALÝZA MODELU DRÁŽNÍHO SOUSTROJÍ MOTOR - GENERÁTOR .....</b>	<b>33</b>
3.1 SYNCHRONNÍ STROJE.....	33
3.2 PRINCIP ČINNOSTI SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU .....	35
3.3 OVBODOVÝ MODEL SYNCHRONNÍHO STROJE.....	36
3.4 MOMENT SYNCHRONNÍHO STROJE .....	37
3.5 PARALELNÍ CHOD SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU SE SÍTÍ.....	40
3.6 SPOUŠTĚNÍ SYNCHRONNÍHO STROJE A ŘÍZENÍ OTÁČEK .....	40
3.7 FÁZOVÁNÍ .....	41
3.8 MODÁLNÍ ANALÝZA .....	42
3.9 PRAKTICKÉ PROVÁDĚNÍ MODÁLNÍ ANALÝZY.....	45
3.10 POSTUP TVORBY MODÁLNÍ ANALÝZY MODELU SOUSTROJÍ MOTOR - GENERÁTOR .....	47
3.11 VÝSLEDKY MODÁLNÍ ANALÝZY SOUSTROJÍ MOTOR – GENERÁTOR .....	52
3.11.1 ANALÝZA SOUSTROJÍ BEZ SILENTBLOKŮ.....	52
3.11.2 ANALÝZA SOUSTROJÍ VČETNĚ SILENTBLOKŮ .....	53
3.11.3 MODÁLNÍ ANALÝZA ROTOROVÝCH ČÁSTÍ.....	55
<b>4 ANIMACE SOUSTROJÍ DRÁŽNÍHO GENERÁTORU .....</b>	<b>57</b>
<b>5 ZÁVĚR .....</b>	<b>59</b>
<b>LITERATURA.....</b>	<b>60</b>
<b>PŘÍLOHY.....</b>	<b>61</b>
PŘÍLOHA 1 – VLASTNÍ TVARY KMITŮ SOUSTROJÍ MOTOR – GENERÁTOR BEZ SILENTBLOKŮ .....	61
PŘÍLOHA 2 – VLASTNÍ TVARY KMITŮ SOUSTROJÍ MOTOR – GENERÁTOR VČETNĚ SILENTBLOKŮ .....	64
PŘÍLOHA 3 – VÝSLEDKY MODÁLNÍ ANALÝZY ROTORU HLAVNÍHO GENERÁTORU.....	67
PŘÍLOHA 4 – VÝSLEDKY MODÁLNÍ ANALÝZY ROTORU TOPNÉHO GENERÁTORU .....	69
PŘÍLOHA 5 – UKÁZKA ANIMACE DRÁŽNÍHO SOUSTROJÍ .....	71

## Seznam obrázků

<i>Obrázek 1 – Zobrazení struktury CAx systémů .....</i>	<i>13</i>
<i>Obrázek 2 – Pracovní prostředí Autodesk Inventoru 2012 .....</i>	<i>14</i>
<i>Obrázek 3 – Dynamicky se měnící pás karet.....</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 4 – Uživatelské přizpůsobení pásu karet.....</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 5 – Dynamicky se měnící obsah prohlížeče součástí .....</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 6 – Dialogové okno Nový soubor.....</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 7 – Postup tvorby součástí .....</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 8 – Komponenty sestavy po načtení do prostředí pro tvorbu sestav .....</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 9 – Ukázka aplikace vazeb v sestavě .....</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 10 – Model po definici vazeb a užití materiálů.....</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 11 – Model v prostředí Presentace .....</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 12 – Průběh prezentace .....</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 13 – Uživatelské prostředí Inventor Studia.....</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 14 – Nastavení kamery.....</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 15 – Časová osa animace .....</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 16 – Animace s použitím funkce Animovat komponenty a Animovat útlum.....</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 17 – Dialogové okno renderovat animaci.....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 18 – Náhledové okno při renderování animace.....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 19 – Závislost přesnosti řešení na počtu prvků sítě .....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 20 – Síť prvků MKP .....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 21 – Pracovní prostředí programu Ansys Workbench.....</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 22 – Simulation Wizard.....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 23 – Analyzovaný model .....</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 24 – Rotor a vinutí stroje s hladkým rotorem .....</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 25 – Uspořádání synchronního stroje s vyniklými póly.....</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 26 – Princip činnosti synchronního stroje.....</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 27 – Poměry při zatížení ohmicko-induktivní zátěží .....</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 28 – Obvodový model synchronního stroje.....</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 29 – Fázorový diagram synchronního stroje .....</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 30 – Závislost momentu synchronního stroje na zátěžném úhlu.....</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 31 – Synchronní stroj s vyniklými póly .....</i>	<i>39</i>

---

<i>Obrázek 32 – Momentová charakteristika synchronního stroje .....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 33 – Fázování stroje na síť .....</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 34 – Praktické provádění modální analýzy pomocí rázového kladívka.....</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 35 – Praktické provádění modální analýzy pomocí dynamického budiče .....</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 36 – Pracovní prostředí po otevření programu a volba jednotek.....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 37 – Nástroje pro tvorbu geometrie.....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 38 – Postup importu geometrie.....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 39 – Definice materiálu pro projekt .....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 40 – Definice materiálu pro součást.....</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 41 – Definice pevné podpory .....</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 42 – Tvorba sítě konečných prvků .....</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 43 – Zobrazené výsledky výpočtu.....</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 44 – Vlastní tvar kmitu při frekvenci 58,816 Hz.....</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 45 – Vlastní tvar kmitu při frekvenci 108,28 Hz.....</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 46 – Vlastní tvar kmitu při frekvenci 4,1143 Hz.....</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 47 – Vlastní tvar kmitu při frekvenci 4,7235 Hz.....</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 48 – Umístění ložisek na hřídeli rotoru hlavního generátoru .....</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 49 – První ohybový tvar kmitů hlavního generátoru, frekvence 290,79 Hz .....</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 50 – První ohybový tvar kmitů topného generátoru, frekvence 317,88 Hz.....</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 51 – Model statoru a rotoru po aplikaci materiálů .....</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 52 – Ukázka časové osy vytvářené animace .....</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek P1 – Tvar vlastních kmitů při frekvenci 49,08 Hz .....</i>	<i>61</i>
<i>Obrázek P2 – Tvar vlastních kmitů při frekvenci 58,816 Hz .....</i>	<i>61</i>
<i>Obrázek P3 – Tvar vlastních kmitů při frekvenci 108,28 Hz .....</i>	<i>62</i>
<i>Obrázek P4 – Tvar vlastních kmitů při frekvenci 120,51Hz .....</i>	<i>62</i>
<i>Obrázek P5 – Tvar vlastních kmitů při frekvenci 131,9Hz .....</i>	<i>62</i>
<i>Obrázek P6 – Tvar vlastních kmitů při frekvenci 140,53 Hz .....</i>	<i>63</i>
<i>Obrázek P7 – Tvar vlastních kmitů při frekvenci 148,01 Hz .....</i>	<i>63</i>
<i>Obrázek P8 – Tvar vlastních kmitů při frekvenci 3,6551 Hz .....</i>	<i>64</i>
<i>Obrázek P9 – Tvar vlastních kmitů při frekvenci 4,1143 Hz .....</i>	<i>64</i>
<i>Obrázek P10 – Tvar vlastních kmitů při frekvenci 4,7235 Hz .....</i>	<i>65</i>
<i>Obrázek P11 – Tvar vlastních kmitů při frekvenci 5,981 Hz .....</i>	<i>65</i>
<i>Obrázek P12 – Tvar vlastních kmitů při frekvenci 7,2545 Hz .....</i>	<i>65</i>

---

<i>Obrázek P13 – Tvar vlastních kmitů při frekvenci 8,7463 Hz</i> .....	66
<i>Obrázek P14 – Tvar vlastních kmitů při frekvenci 9,5739 Hz</i> .....	66
<i>Obrázek P15 – Torzní tvar kmitů, frekvence 101,24 Hz</i> .....	67
<i>Obrázek P16 – První ohybový tvar kmitů, frekvence 290,79 Hz</i> .....	67
<i>Obrázek P17 – První ohybový tvar kmitů, frekvence 292,97 Hz</i> .....	67
<i>Obrázek P18 – Druhý ohybový tvar kmitů, frekvence 559,47 Hz</i> .....	68
<i>Obrázek P19 – Druhý ohybový tvar kmitů, frekvence 563,38 Hz</i> .....	68
<i>Obrázek P20 – Torzní tvar kmitů, frekvence 50,592 Hz</i> .....	69
<i>Obrázek P21 – První ohybový tvar kmitů, frekvence 317,88 Hz</i> .....	69
<i>Obrázek P22 – První ohybový tvar kmitů, frekvence 318,89 Hz</i> .....	69
<i>Obrázek P23 – Druhý ohybový tvar kmitů, frekvence 565,88Hz</i> .....	70
<i>Obrázek P24 – Druhý ohybový tvar kmitů, frekvence 566,33 Hz</i> .....	70
<i>Obrázek P25 – Ukázka vytvořené animace</i> .....	71

---

## Úvod

V souvislosti s rozvozem vědy a techniky se zvyšují nároky na vývoj nových výrobků a technologií. Zejména je kladen velký důraz na zkrácení času potřebného k jejich vývoji. Podstatné zkrácení této doby umožnilo nasazení výpočetní techniky do vývojového procesu, díky čemuž je možné využívat nové a efektivní možnosti při návrhu a přípravě nového výrobku. Dnešní modelovací programy tak umožňují vytvářet přímo 3D model výrobku a z něj pak jednoduše odvodit 2D výkresovou dokumentaci pro konstruktéry. Pomocí vytvořeného 3D modelu je možné navíc provést kontrolu virtuálního prototypu (oteplení, proudění, silové namáhání...) a vytvářet efektivní animace výroby.

Tato diplomová práce se zabývá využitím modální analýzy v silnoproudé elektrotechnice, programem Autodesk Inventor 2012 a programem ANSYS Workbench. První část práce se věnuje programu Autodesk Inventor 2012. Je zde uvedeno seznámení s pracovním prostředím a na jednoduchých příkladech předvedena metodika práce v tomto programu. Popsána je tvorba součástí, sestav a možnost prezentace vytvořených modelů v prostředí Prezentace a v prostředí Inventor Studio.

Druhá část práce popisuje metodu konečných prvků a program ANSYS Workbench. ANSYS je obecně nelineární, multifyzikální program zahrnující strukturální a termodynamickou analýzu, analýzu proudění, analýzu elektrostatických a elektromagnetických polí a akustické analýzy. Veškeré tyto analýzy lze provádět samostatně, nebo je lze zahrnout do jediné, společné analýzy. ANSYS umožňuje kontrolní výpočty, citlivostní a optimalizační analýzy a také výpočty spolehlivosti.

V další části práce je provedena modální analýza modelu drážního soustrojí motor - generátor. V této části je uveden popis modální analýzy, synchronních strojů, popis vlastního analyzovaného modelu a postup tvorby modální analýzy včetně vyhodnocení výsledků.

Poslední část této práce popisuje tvorbu animace soustrojí drážního generátoru, která byla vytvářena jako projekt pro firmu Siemens Electric Machines s.r.o. Drásov pro účely prezentace a školení zaměstnanců.

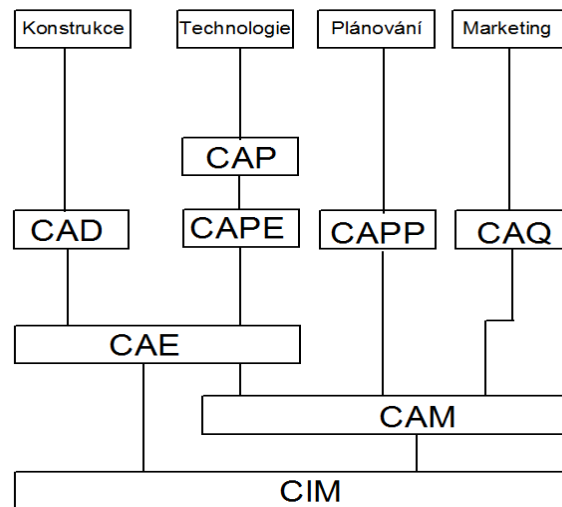
---

# 1 CAD SYSTÉMY

CAD neboli Computer Aided Design, v překladu počítačová podpora konstruování jsou softwarové aplikace, které slouží v úvodních etapách výrobního procesu k tvorbě geometrie výrobků a jejich následné editaci. CAD systémy jsou pouze jednou z oblastí nasazení výpočetní techniky v průmyslu. Souhrnně je nasazení výpočetní techniky v průmyslu označováno jako CA technologie. CAx technologie znamenají účelné a maximální využití prostředků výpočetní techniky (technického i programového vybavení), které podporuje tvůrčí přístup uživatele (konstruktéra, technologa, výpočtáře a dalších profesí) při řešení úloh souvisejících s výrobním procesem. CAD systémy prošly vývojovými etapami, které byly dány především vývojem výpočetní techniky:

- První sálové počítače umožňovaly vytvářet pouze dvourozměrnou výkresovou dokumentaci. Tyto počítače byly méně rozšířené pro svoji rozměrnost a vysokou cenu.
- S nástupem PC se zpřístupnila širší odborné veřejnosti možnost vytvářet výkresovou dokumentaci.
- Postupné navyšování výkonu PC umožnilo nástup trojrozměrného modelování.
- Zavedení animace a vizualizace.

Tvorba v CAD programech probíhá jako klasické 2D kreslení (výkresová dokumentace) nebo jako 3D modelování (3D model definovaný pomocí objemů a ploch). V minulosti se CAD systémy využívaly pouze pro tvorbu výkresové dokumentace. Uživatel vytvářel výkresy součástí v jednotlivých pohledech na základě pravidel technického kreslení. V moderních CAD systémech již uživatel ve většině případů nevytváří výkresovou dokumentaci, ale přímo objemový model dané součásti, ze kterého je výkresová dokumentace následně odvozena. Takto vytvořená výkresová dokumentace součásti je plně asociativně svázána s modelem a při jakékoliv dodatečné editaci modelu se tato změna automaticky promítne do výkresové dokumentace. Byla vytvořena řada specializovaných systémů pro různá odvětví (strojírenství, elektrotechnika, stavebnictví, apod.). Moderní CAD systémy nabízí uživateli řadu nových funkcí, jako jsou analýzy vymodelovaných součástí (pevnostní, teplotní atd.), možnost generování normalizovaných dílů, základní mechanické výpočty a možnost animace vymodelovaných součástí a sestav.



Obrázek 1 – Zobrazení struktury CAx systémů

## 1.1 Rozdělení CAD systémů

**CAD systémy lze podle množství funkcí rozdělit do tří kategorií:**

- **Malé CAD systémy** – podporují tvorbu dvojrozměrných objektů a umožňují generování výkresové dokumentace. Zástupci této skupiny jsou např. AutoCAD LT, TurboCAD Delux.
- **Střední CAD systémy** – podporují 2D a 3D parametrické konstruování a vizualizaci. Výhodou těchto programů je, že umožňují integraci speciálních programů tzv. nástaveb. Mezi tyto systémy patří např. AutoCAD.
- **Velké CAD systémy** – jde o systémy, které umožňují 2D a 3D parametrické konstruování, umožňují odvodit 2D výkresovou dokumentaci z 3D modelu, tvorbu sestav a zahrnují nástroje pro analýzu modelovaných součástí a sestav. Mezi tyto systémy patří např. Autodesk Inventor, SolidWorks, NX aj.

**Podle možností přizpůsobení lze CAD systémy rozdělit:**

- **Systémy specializované** – jsou přizpůsobeny pro určitou oblast (stavebnictví, elektrotechnika,...). Mezi tyto systémy patří např. ArchiCAD, ORCAD, atd.
- **Otevřené** – umožňují flexibilní použití CAD systému pro různé oblasti pomocí přizpůsobení prostředí a vytváření nástaveb.

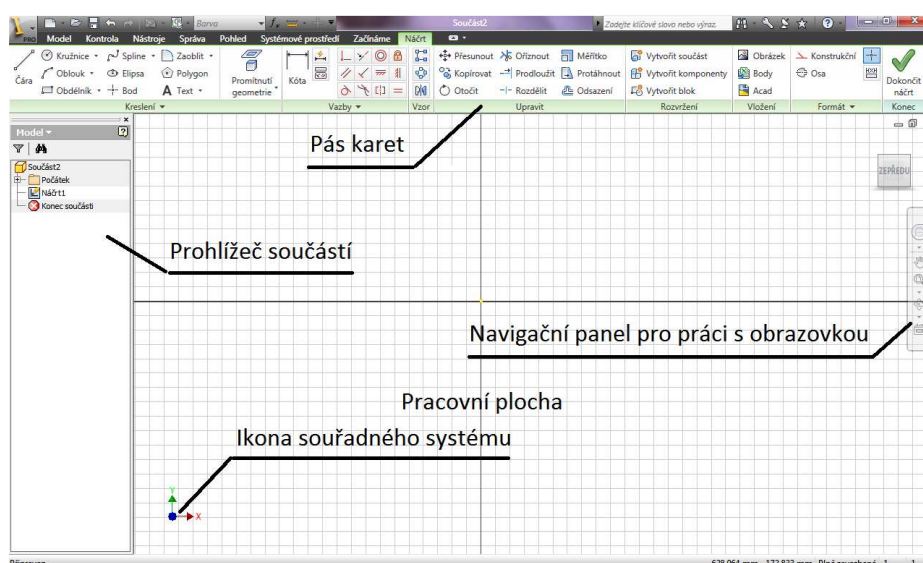
## 1.2 Autodesk Inventor

Program Autodesk Inventor je jeden ze světově nejrozšířenějších CAD systémů. Největší využití nalézá ve strojírenství, v automobilovém průmyslu, při výrobě nábytku, ve stavebnictví a v elektrotechnice. Je to parametrický CAD systém, ve kterém je geometrie součásti definována sadou rozměrových a geometrických parametrů. Lze v něm vytvářet jednoduché 3D modely součástí, složité 3D modely sestav, 2D výkresovou dokumentaci odvozenou z vymodelované součásti a animovanou prezentaci vytvořené sestavy. Nabízí také možnost tvorby MKP/FEM analýzy součástí a od verze 2010 i sestav. Program Autodesk Inventor navíc podporuje formát souborů dwg, čímž je dána možnost provázání tvorby s programem AutoCAD, který patří mezi nejpoužívanější neparametrické modelovací programy. Program podporuje techniku adaptivního modelování, při kterém jsou součásti vytvářeny jako částečně parametrické nebo úplně parametrické a jejich výsledný tvar se definuje pomocí vazeb na okolní součásti v sestavě.

[1][2][3]

### 1.2.1 Pracovní prostředí Autodesk Inventoru 2012

Pracovní prostředí programu Autodesk Inventor je navrženo tak, aby poskytovalo uživateli co nejvyšší komfort obsluhy jednotlivých funkcí (Obrázek 2). Je jednoduché, přehledné s velmi intuitivním ovládáním modelovacích nástrojů. Rozhraní je navrženo jako dynamické. To znamená, že při práci v různých módech programu (náčrt, sestava...) je umístění prohlížeče součástí a pásu karet neměnné, ale mění se jejich obsah (Obrázek 3). Ovládací prvky jsou do značné míry podobné ovládacím prvkům z jiných modelovacích CAD systémů. Tyto vlastnosti spolu s možností uživatelského přizpůsobení programu zaručují vysokou produktivitu práce a snadný přechod konstruktérů mezi jednotlivými CAD programy.

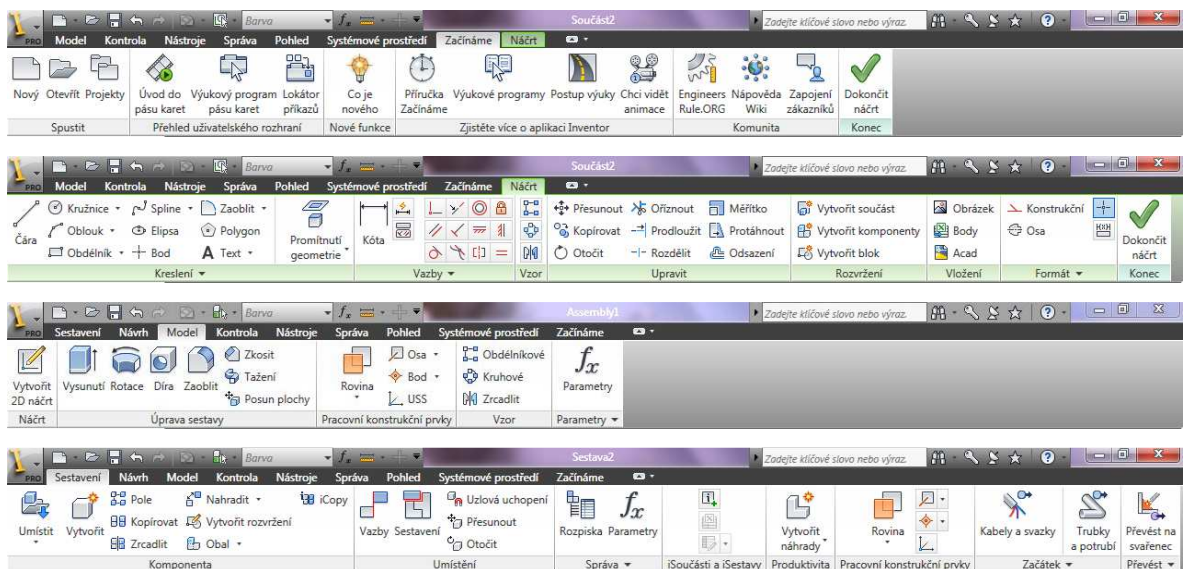


Obrázek 2 – Pracovní prostředí Autodesk Inventoru 2012

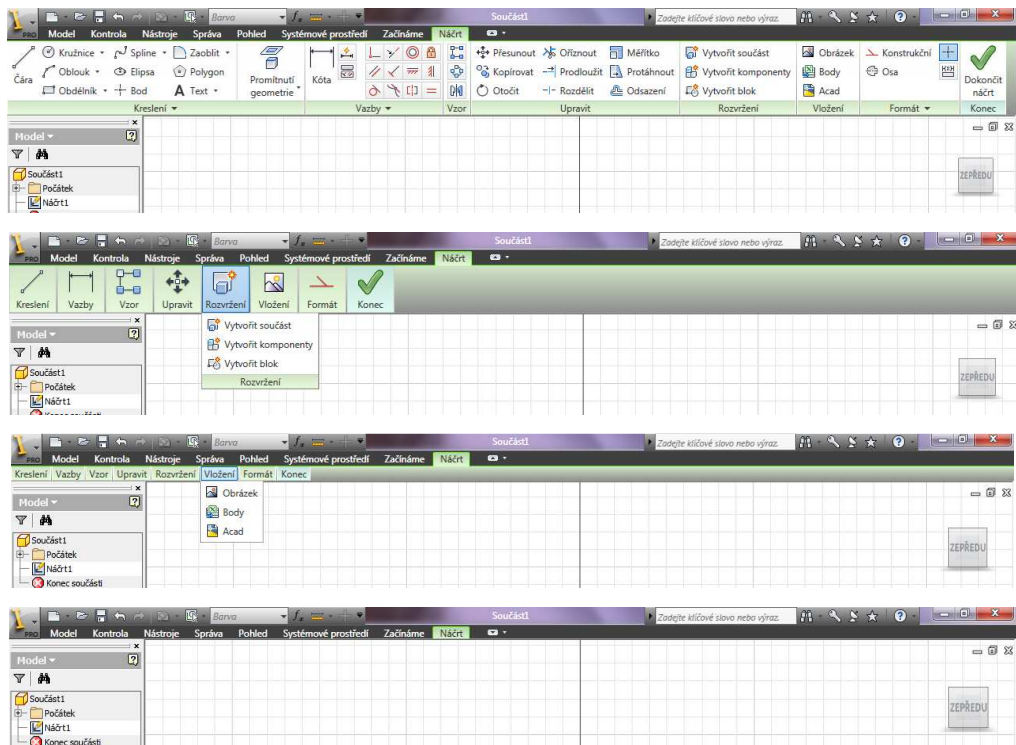
Pracovní prostředí programu Autodesk Inventor 2012 se skládá z těchto částí:

- **Pracovní plocha** – je náhledem na vytvářený náčrt nebo modelovaný objekt.
- **Pás karet** – obsahuje veškeré funkce pro modelování. Jeho obsah se dynamicky přizpůsobuje právě vykonávané činnosti (Obrázek 3). Pás karet lze uživatelsky přizpůsobit tak, že se v něm zobrazují ikony, ikony s textem, lze ho změnit na roletové menu nebo ho lze skrýt (Obrázek 4).
- **Prohlížeč součástí** – je navržen jako stromová struktura, do které se zaznamenávají jednotlivé kroky tvorby modelu. Kterýkoliv krok lze zpětně prohlížet a jeho parametry editovat. Prohlížeč součástí lze nalézt v různé podobě u všech CAD systémů (Obrázek 5).
- **Navigační panel pro práci s obrazovkou** – obsahuje nástroje pro práci s pohledy a funkce přiblížení.
- **Ikona souřadného systému** – Dává uživateli informaci o aktuální pracovní ploše.

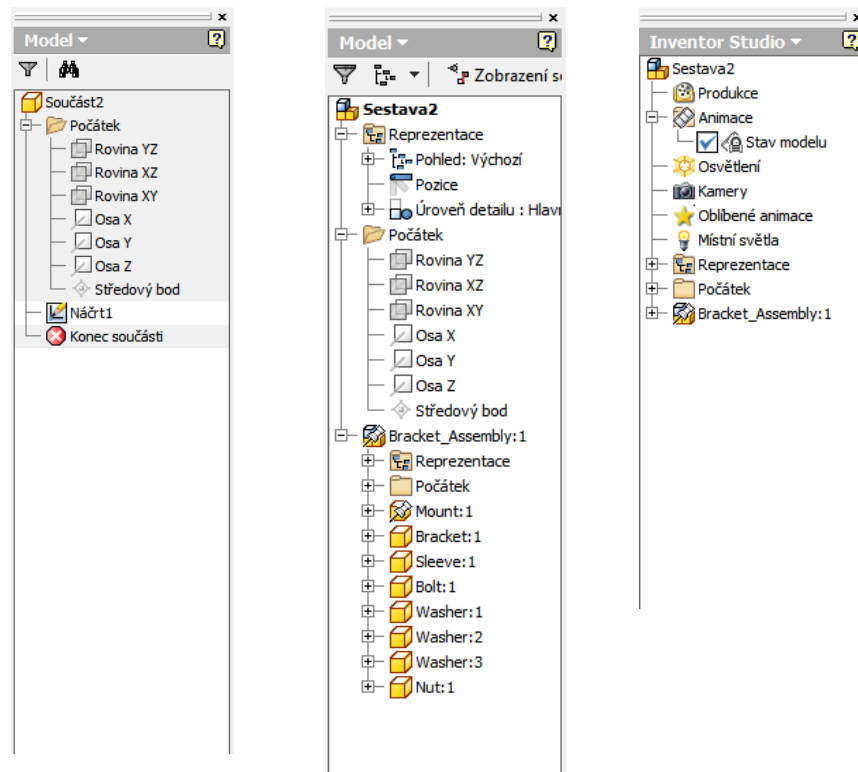
[2]



Obrázek 3 – Dynamicky se měnící pás karet



Obrázek 4 – Uživatelské přizpůsobení pásu karet

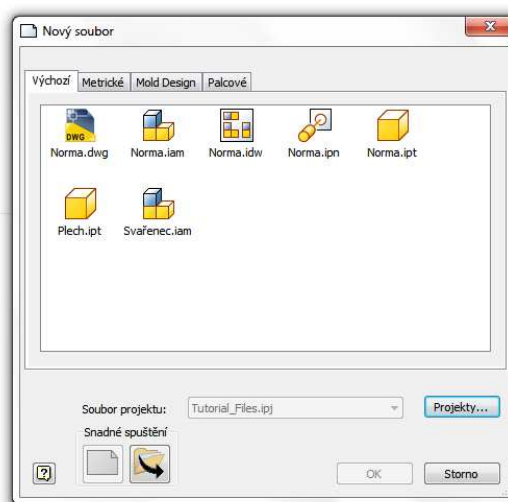


Obrázek 5 – Dynamicky se měnící obsah prohlížeče součástí

## 1.2.2 Základy práce v programu Autodesk Inventor

Pracovní prostředí programu je navrženo s ohledem na jednoduchost a přívětivost pro uživatele. Také vlastní práce v tomto programu je jednoduchá a velmi intuitivní. Při modelování se postupuje jako při vývoji nového výrobku. Nejprve jsou vytvářeny jednotlivé komponenty s pomocí základních 2D náčrtů a 3D modelování. Vytvořené součásti jsou poté pomocí vazeb sestaveny do sestav a hotové sestavy jsou podrobovány různým analýzám a zkouškám, nebo je využito animačních funkcí pro prezentaci hotových modelů.

Před začátkem práce v programu musí uživatel zvolit, zda bude vytvářet součást, sestavu, 2D výkresovou dokumentaci nebo prezentaci. Výběr lze provést v dialogovém okně *Nový soubor* (Obrázek 6).



Obrázek 6 – Dialogové okno *Nový soubor*

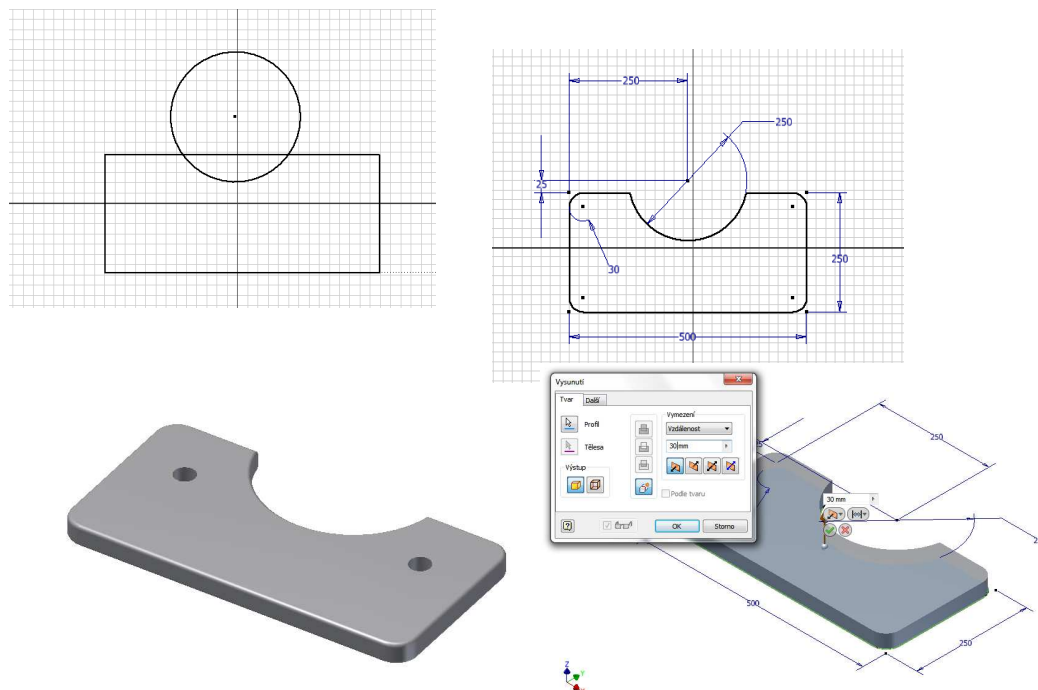
Základní formáty souborů pro práci v Autodesk Inventoru jsou:

- **.ipt** – pro vytváření součástí
- **.iam** – pro tvorbu sestav
- **.ipn** – pro tvorbu prezentací modelu
- **.idw, .dwg** – pro 2D výkresovou dokumentaci

### 1.2.3 Tvorba součástí

Podle stupně parametrizace geometrie se rozeznávají součásti neparametrické, částečně parametrické, plně parametrické a součásti adaptivní. V případě neparametrické součásti jí není přiřazen žádný geometrický parametr. Geometrie součástí částečně parametrických je určena geometrickými parametry, jejichž počet je však nižší než počet potřebný k přesnému určení geometrie tělesa. U takto modelovaného tělesa může dojít při jeho modifikaci k nežádoucí změně jeho geometrie. U součásti plně parametrické je její geometrie přesně určena rozměrovými parametry a geometrickými vazbami. Při následné modifikaci takto modelovaných těles nemůže dojít k jejich nežádoucí deformaci. Moderním a velmi efektivním způsobem tvorby součástí je tzv. adaptivní modelování v sestavách. Součásti jsou v tomto případě jen částečně geometricky určeny a jejich finální tvar se odvozuje pomocí adaptivních vazeb na okolní součásti v sestavě.

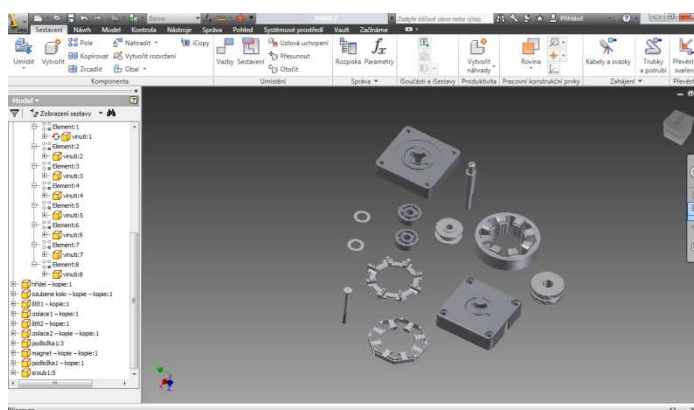
Při vytváření nové součásti postupuje konstruktér v několika krocích. Prvním krokem je tvorba základního náčrtu součásti s pomocí kreslicích nástrojů jako *kružnice, čára, obdélník, křivka*, atd. Druhým krokem je jeho parametrické určení. Pomocí geometrických vazeb (*rovnoběžnost, kolmost, tečnost, kolineárnost...*) a rozměrových parametrů (kót) se určí konečný tvar základního náčrtu. Tyto rozměrové parametry lze kdykoliv upravovat jejich přepsáním. Pokud je konstruktér s konečným vzhledem náčrtu spokojen, přejde pomocí funkce *Dokončit náčrt* do prostředí pro 3D modelování, kde za pomocí modelovacích funkcí (*vysunutí, rotace, šablonování...*) vytvoří z 2D náčrtu 3D objemové těleso. Použitím dalších nástrojů (*Zaoblení, Zkosení, Díra...*) lze geometrii tělesa dále upravovat, popřípadě lze na kterékoliv ploše tělesa vytvořit nový náčrt a pokračovat tak v tvorbě součásti.



Obrázek 7 – Postup tvorby součásti

## 1.2.4 Tvorba sestav

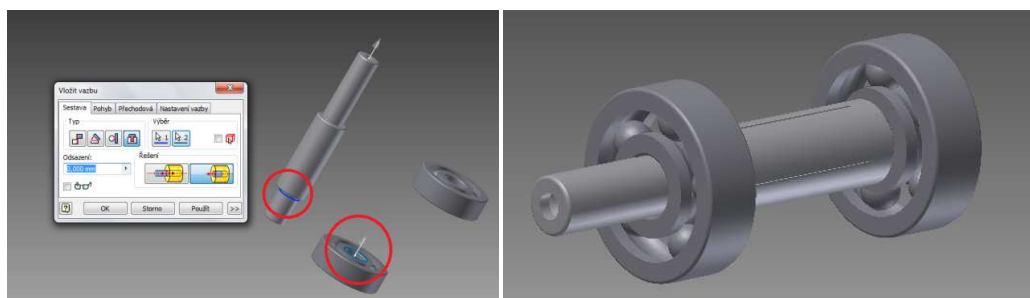
Při tvorbě sestav postupuje modelář opět v několika krocích. Prvním krokem je umístění všech potřebných součástí do pracovního prostředí pro tvorbu sestav. Uživatel má možnost vkládat předem vytvořené součásti, vkládat normalizované součásti z obsahového centra, nebo může vytvářet nové komponenty postupem popsáním v předešlé kapitole. S výhodou může také využít metodu adaptivního modelování v sestavách.



Obrázek 8 – Komponenty sestavy po načtení do prostředí pro tvorbu sestav

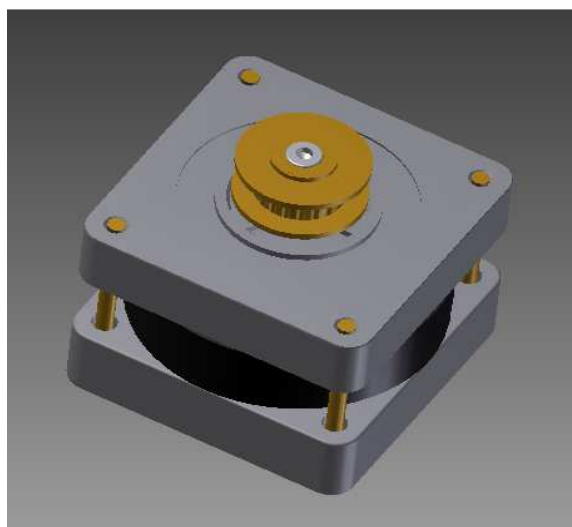
Dalším krokem je skládání vložených součástí do sestav. Tento krok je založen na použití vazeb mezi jednotlivými součástmi. Vazby definují vzájemnou polohu součástí v sestavě a fungují na principu omezování stupňů volnosti jednotlivých dílů, nebo jinými slovy omezení vzájemného pohybu komponent. Program nabízí tyto druhy vazeb:

- Vazba *Proti sobě* - umísťuje vybrané plochy rovnoběžně s totožnými plochami nebo zarovnává součásti vedle sebe s vybranými plochami ve stejném směru. Navíc lze definovat i vzájemné odsazení obou ploch.
- Vazba *Úhel* – umístí vybrané lineární rovinné nebo válcové plochy dvou komponent pod zadaným úhlem.
- Vazba *Tečně* – vybrané plochy, válce, koule, kužele se budou stýkat v bodě tečnosti.
- Vazba *Vložit* – umísťuje válcovité konstrukční prvky s rovinnými plochami kolmo na osu válce.
- Vazba *Rotace* – určuje otáčení jedné součásti vzhledem k druhé (v určitém poměru).
- Vazba *Natočení, posunutí* – určuje otáčení jedné součásti vzhledem k posunutí druhé součásti pomocí zadané vzdálenosti.
- Vazba *Přechodová* – určuje vztah mezi válcovou plochou a styčnou množinou ploch jiné součásti.



Obrázek 9 – Ukázka aplikace vazeb v sestavě

Posledním krokem při tvorbě sestav je volba materiálu jednotlivých komponent. Volba materiálových vlastností je výhodná zejména k lepšímu rozlišení komponent při modelování a následné prezentaci modelu. Přiřazené fyzikální vlastnosti komponent lze využít i při výpočtech v modulu MKP (Obrázek 10).



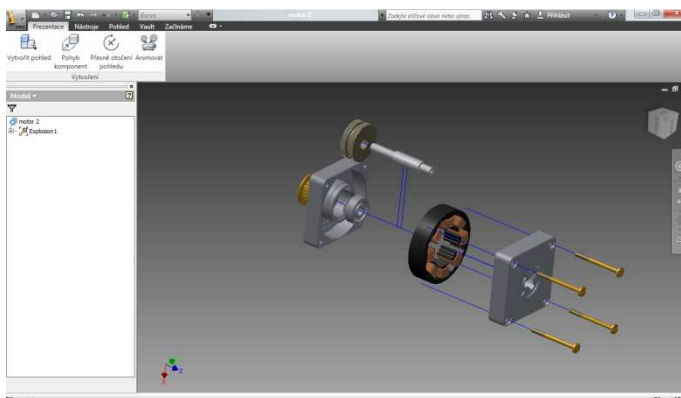
Obrázek 10 – Model po definici vazeb a užití materiálů

## 1.2.5 Modul Presentace

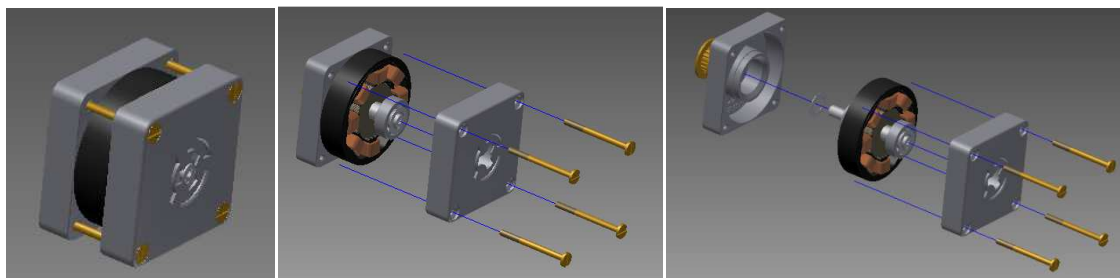
Tento integrovaný modul obsahuje základní nástroje pro vytváření animací 3D modelů. Práce v modulu prezentace je velmi jednoduchá. Výběrem souboru typu: *.ipn* v dialogu *Nový* se zobrazí pracovní prostředí modulu pro tvorbu prezentace, do něhož se vloží předem vytvořená sestava příkazem *Vytvořit pohled*. V dalším kroku uživatel definuje pohyb jednotlivých částí. Na výběr má dvě možnosti:

- **Manuální nastavení** – Použitím příkazu *Pohyb komponent* se zobrazí příslušný dialog a následně se provede volba umístění souřadného systému, komponenty, se kterou bude pohybováno a počátku trasy pohybu. Jednoduchým tažením se určí trasa, po které se komponenta bude pohybovat.
- **Automatický rozpad** – V prohlížeči součástí se kliknutím pravého tlačítka myši na název sestavy zvolí možnost *Automatický rozpad*. V příslušném dialogu se zadá vzdálenost, kterou komponenty urazí při rozpadu sestavy. Po potvrzení dialogu se jednotlivé části přesunou do nové polohy.

Pokud uživatel dokončil fázi rozmístění komponent, může začít s animací. Příkazem *Animovat* vyvolá dialog, ve kterém si vytvořenou animaci může kdykoliv přehrát. Pro záznam výsledné animace do videosouboru slouží tlačítko *Záznam* (červené tlačítko v dialogu *Animovat*). Objeví se dialog, ve kterém je nutno zadat umístění souboru v počítači a v dalším dialogovém okně pak nastavit parametry (kvalitu) vytvářeného videa. Po potvrzení dialogu, následném spuštění vytvořené prezentace a opětovném stisku tlačítka pro záznam se videozáznam uloží do vybraného umístění.



Obrázek 11 – Model v prostředí Presentace



Obrázek 12 – Průběh prezentace

---

## 1.2.6 Inventor Studio

Aplikace Inventor Studio je další možností pro tvorbu animace vytvořených modelů v programu Autodesk Inventor. První možností je využití modulu *Prezentace*, o které bylo pojednáno v jedné z předešlých kapitol. Inventor Studio poskytuje oproti modulu *Prezentace* celou řadu nástrojů pro pokročilejší animaci. Umožňuje vytvářet vizualizace modelů ve fotorealistické kvalitě. V Inventor Studiu je možné měnit styl povrchu součástí, pozadí scény, její osvětlení nebo animovat pohyb kamery a světel. Animovat lze rovněž rozpad (sestavení) sestavy, jednotlivé vazby a funkčnost celé sestavy. Práce s těmito nástroji je opět velmi jednoduchá a intuitivní, proto je jejich použití snadné i pro méně zkušené uživatele. Vytváření kvalitních a složitých animací však vyžaduje určitou dávku cviku a zkušeností.

Jelikož je program Inventor Studio plně zakomponován do programu Autodesk Inventor, obsahuje jeho pracovní prostředí (Obrázek 13) pět základních částí, jejichž umístění a funkce jsou stejné jako v případě samotného programu Autodesk Inventor.

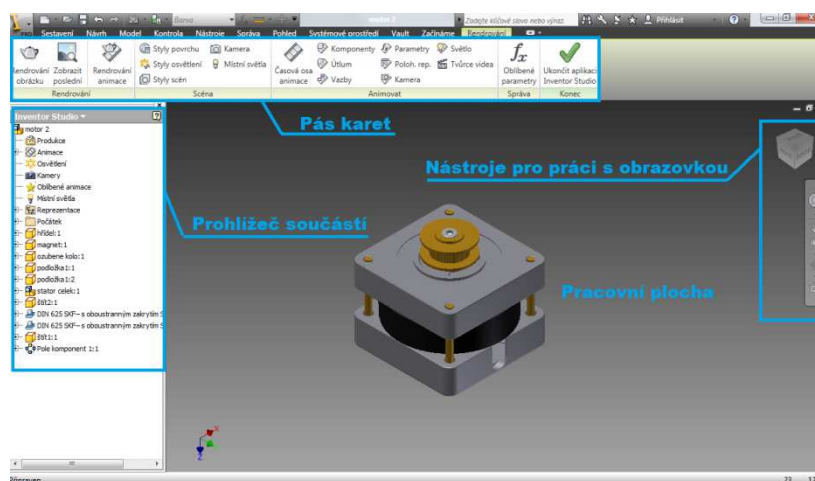
Základem pracovního prostředí je *Pracovní plocha*, ve které je umístěn model, který bude použit pro tvorbu animace. *Pracovní plocha* slouží zároveň jako náhled na námi vytvořenou animaci. Uživatel má možnost výběru bude-li v pracovní ploše zobrazen jím zvolený pohled na animovaný předmět nebo pohled kamerou. Tato možnost bude popsána dále.

Pracovní prostředí dále obsahuje *Prohlížeč součástí*, *Nástroje pro práci s obrazovkou* a *Ikonu souřadného systému*. Funkce těchto prvků jsou naprosto stejné jako v pracovním prostředí Autodesk Inventoru.

Nejdůležitější částí pracovního prostředí je pás karet se všemi potřebnými nástroji pro tvorbu animace. Tyto nástroje jsou rozděleny do pěti základních skupin a každá obsahuje několik nástrojů:

- **Renderování** – obsahuje základní nástroje pro renderování.
  - **Renderování obrázku** – výstupem je obrázek právě zobrazeného pohledu.
  - **Zobrazit poslední** – zobrazí naposledy vyrenderovaný obrázek.
  - **Renderování animace** – výstupem je videosoubor zvoleného formátu.
- **Scéna** – obsahuje nástroje pro práci se scénou a pohledem.
  - **Styl povrchu** – umožňuje nastavení materiálu povrchu součástí.
  - **Styl osvětlení** – umožňuje výběr z různých stylů osvětlení objektu.
  - **Styl scén** – možnost definovat barvu pozadí nebo ilustrace pro scénu.
  - **Kamery** – umožňuje definovat množství pohledů na animovaný objekt.
  - **Místní světla** – možnost definovat místní světlo a přidat ho do scény.

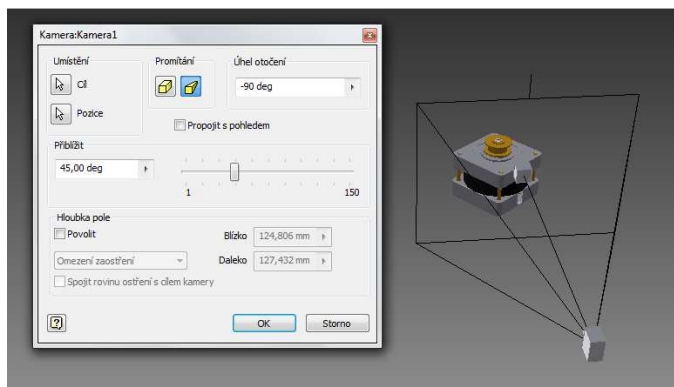
- **Animovat** – nástroje pro vytváření animace.
  - **Časová osa animace** – je v ní zobrazena každá položka animace.
  - **Animovat komponenty** – definování pohybu komponent zvoleným směrem a na zvolenou vzdálenost.
  - **Animovat útlum** – umožňuje animovat viditelnost tělesa.
  - **Animovat vazby** – umožňuje definovat pohyb komponent pomocí vazeb.
  - **Animovat parametry** – umožňuje animovat vybrané parametry součástí.
  - **Animovat polohovou reprezentaci** – umožňuje animovat pohyb komponenty mezi vybranými polohovými reprezentacemi.
  - **Animovat kameru** – umožňuje animovat pohyb kamery.
  - **Animovat světlo** – umožňuje animovat pohyb a funkčnost vybraného světla.
  - **Tvůrce videa** – umožňuje spojení více záběrů a snímků do jedné animace.
- **Správa**
  - **Oblíbené parametry** – nástroj pro zobrazení všech uživatelských parametrů.
- **Konec**
  - **Ukončit aplikaci Inventor Studio** – funkce pro návrat do prostředí pro tvorbu sestav.



Obrázek 13 – Uživatelské prostředí Inventor Studia

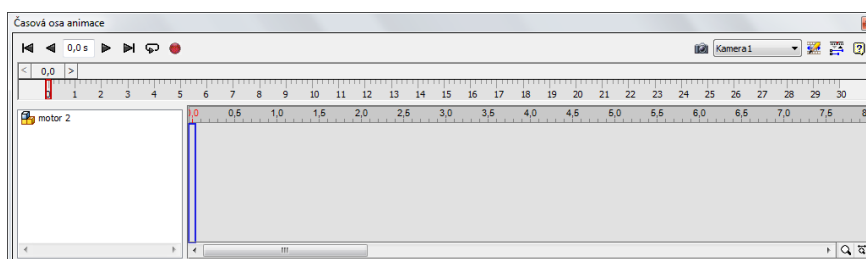
Postup práce v programu Inventor Studio je následující:

1. **Spuštění vlastního programu** – z prostředí pro tvorbu sestav (pás karet-záložka nástroje - Inventor Studio)
2. **Nastavení stylu povrchu** – Pro reálný vzhled je možné přiřadit modelu vhodný styl povrchu (materiál), k čemuž slouží funkce *Styl povrchu*. Toto nastavení nabízí výběr z nepřeberného množství barev a materiálů, jejichž parametry (barva, odlesk, Neprůhlednost, mapa rozptýlení, mapa hrbolu) lze dále upravovat, nebo lze definovat zcela nový styl povrchu. Přiřazení materiálu vybraným tělesům se provádí pomocí tlačítka *Přiřadit styl povrchu* v záhlaví dialogového okna.
3. **Nastavení stylu scény** – pomocí funkce *Styly scén* je možné přidat do animace pozadí (předdefinované nebo vlastní), vybrat základní rovinu a zapnout zobrazení stínů a odlesků.
4. **Nastavení osvětlení** – funkce *Styl osvětlení* slouží k definici osvětlení scény (předdefinované nebo vlastní) a k editaci parametrů osvětlení (intenzita, typ světla, umístění, typ stínů...).
5. **Nastavení kamery** - nastavení kamery je důležitým krokem při tvorbě animace. Uživatel pomocí kamery definuje pohledy na prezentovaný model. Mezi pohledy lze jednoduše přepínat a vytvořit tak animaci složenou z více záběrů. Pomocí příslušného dialogového okna (Obrázek 14) se nejprve zvolí pozice kamery a umístění cíle. Dále je možné upravovat parametr *přiblížení objektivu a cíle*, natočení kamery a systém promítání (ortografické, perspektivní).



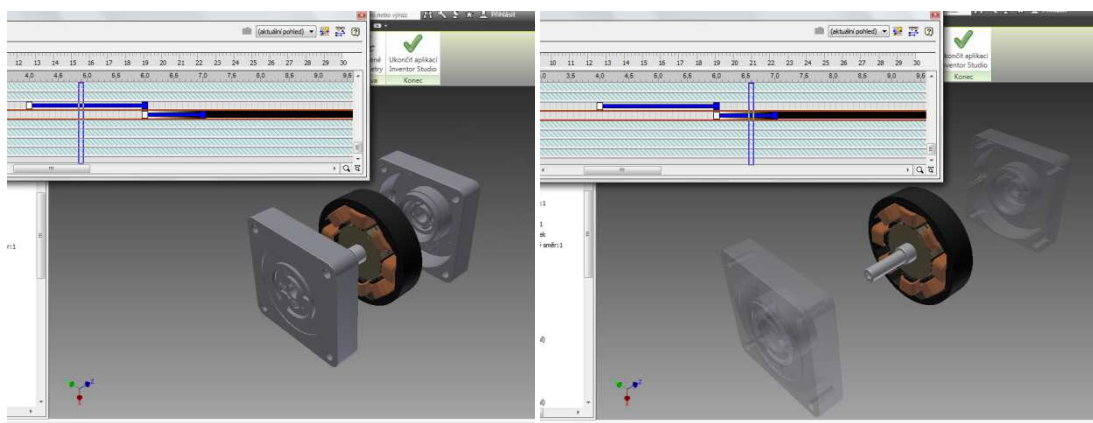
Obrázek 14 – Nastavení kamery

6. **Aktivace časové osy** – Při vytváření zcela nové animace je nutné nejprve aktivovat *Časovou osu animace* (Obrázek 15). Aktivaci je možné provést příslušným tlačítkem na pásu karet. Tento nástroj slouží k přehlednému zobrazení časové posloupnosti animovaných úkonů (*posun komponenty, rotace, zprůhlednění...*). Časová osa je při prvním spuštění zcela prázdná, protože v nově vytvářené animaci není definován žádný animační úkon. V záhlaví časové osy je zobrazeno několik tlačítek sloužících k nastavení důležitých parametrů (délka animace, zrychlení a zpomalení pohybu komponent a interval snímkování animace při přehrávání). Je zde umístěn jednoduchý přehrávač animace.



Obrázek 15 – Časová osa animace

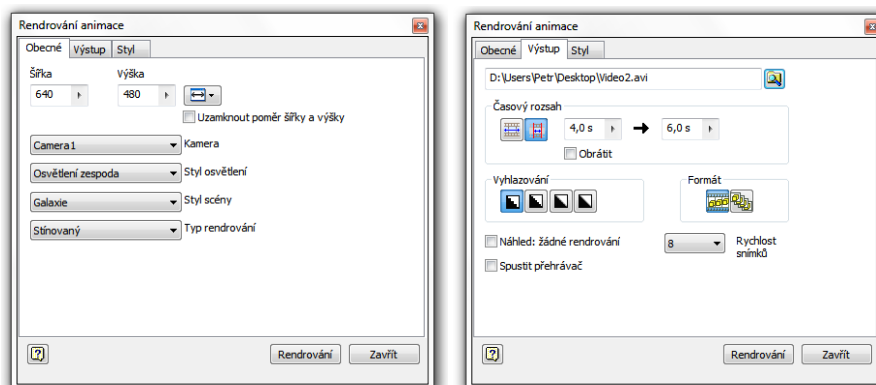
7. **Tvorba animace** – program Inventor Studio nabízí několik základních funkcí pro tvorbu dynamické animace. Pro animaci pohybu komponent jsou to funkce: *Animovat komponenty*, *Animovat vazby* a *Animovat polohovou reprezentaci*. Další funkce *Animovat útlum* nabízí možnost zprůhlednit kteroukoliv komponentu modelu, popřípadě ji nechat úplně zmizet. Nástroj *Animovat kameru* slouží k vytváření plynulého pohybu kamery. Funkce *Animovat osvětlení* zase slouží k pohybu světel během animace a jejich vypnutí. Velké využití nalézá také funkce *Animovat parametry*, která slouží k animaci změny vybraného parametru (*délka, průměr...*). Při tvorbě animace lze také využít nástroj *Tvůrce videa*, který umožňuje přepínání záběrů z více kamer.



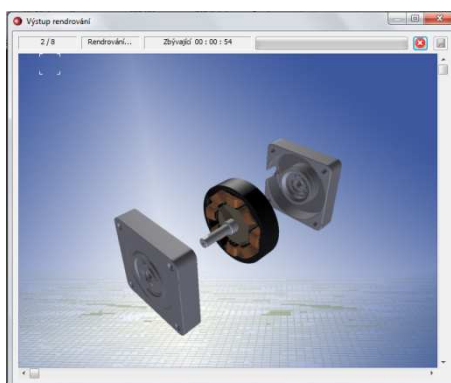
Obrázek 16 – Animace s použitím funkce *Animovat komponenty* a *Animovat útlum*

8. **Renderování animace** – je posledním krokem při tvorbě animace. Program Inventor Studio nabízí možnost renderování jednoho zvoleného snímku nebo vybraného úseku animace. V prvním případě se renderuje aktuální snímek, který je zobrazen v pracovní ploše. Výstupem je obrazový soubor zvoleného formátu (např. jpeg, png). Ve druhém případě se renderuje zvolený časový úsek vytvořené animace a výstupem je videosoubor vybraného formátu (avi, wmv). Parametry, které je možno nastavovat při renderování:

- **Rozlišení videa** – z kolika obrazových bodů (pixelů) se budou skládat jednotlivé snímky (čím vyšší hodnoty, tím lepší kvalita výsledného videa).
- **Pohled na model** – kamera, aktuální pohled.
- **Styl osvětlení** – výběr z nabídky různých stylů osvětlení.
- **Styl scény** – možnost výběru z předdefinovaných stylů (pozadí).
- **Typ renderování** – ilustrace nebo stínovaný (skutečný).
- **Umístění souboru** – výběr umístění výsledného videosouboru v počítači a jeho formátu.
- **Časový rozsah animace** – možnost nastavit vybraný úsek, celou animaci a také obrácení časové osy.
- **Vyhlazování** – určuje míru vyhlazení hran (nízká, střední, vysoká).
- **Formát** – nabízí výběr, zda výsledkem animace bude sekvence obrázků nebo videoformát.
- **Snímkovací frekvence** – určuje, z kolika snímků se bude skládat každá sekunda animace (pro plynulý pohyb komponent je nutno nastavit co nejvyšší hodnotu).
- **Styl animace** – realistický, Ilustrace



Obrázek 17 – Dialogové okno renderovat animaci



Obrázek 18 – Náhledové okno při renderování animace

---

## 2 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ

Aby bylo zajištěno dostatečné dimenzování všech částí nově navrhovaného zařízení a zabráněno jejich přílišnému předdimenzování je důležitým úkolem konstruktéra provádět výpočty chování zařízení v různých situacích. Většinu inženýrských problémů tvoří velmi složité případy, které jsou jen velmi obtížně analyticky řešitelné. Tyto případy je nutné řešit jen s podstatným zjednodušením. S postupným vývojem techniky se objevují úkoly, ve kterých je toto zjednodušení nepřijatelné. V těchto případech je možné využít aplikace založené na metodě konečných prvků, mezi které patří např. ANSYS, MSC/NASTRAN, KOSMOS...

Úplné počátky této metody lze vysledovat v pracích Alexandera Hrennikoffa (1941) a Richarda Couranta (1942). Oba autoři ve svých dílech použily pro řešení složité úlohy rozsívání spojité oblasti do množiny samostatných oblastí. Další vývoj pokračoval v 50. letech 20. Století na univerzitách v Berkeley a Stuttgartu. Své první velké využití našla ve výzkumném ústavu aeronautické a kosmické mechaniky v Ohio, USA v období kolem roku 1956. Výzkumný tým vedl prof. R. W. Clouge. Vývoj této metody byl podnícen kosmickým programem Apollo v oblasti vývoje a konstrukce nosných raket. Vyvinutá metoda se poté ve velké míře používala i na jiné vojenské projekty (letadla, rakety, ponorky...). Po dlouholetém utajení se metoda v letech 1965 – 1975 rozšířila i do soukromého sektoru. Popis metody spolu s jejím matematickým aparátem byl publikován roku 1973 autory Gilbertem Strancem a Georgem Fixem v práci s názvem „Analysis of The Finite Element Method“ (Analýza metody konečných prvků). U nás byl největším propagátorem MKP prof. V. Kolář, DrSc. z Brna. V současnosti je k dispozici celá řada programů využívající MKP, které se od sebe liší velikostí, cenou a funkcemi.

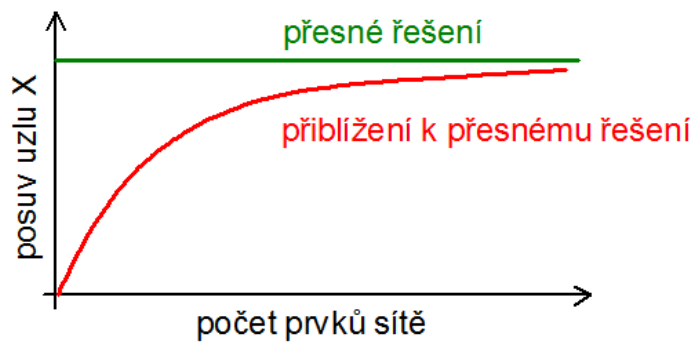
### 2.1 Princip metody konečných prvků

Metoda konečných prvků (angl. The Finite Element Method) je numerická metoda pro analýzu struktur a těles. Řeší soustavu rovnic popisující model (součást, sestavu), jeho vlastnosti a zatížení. Základem této metody je diskretizace spojité oblasti určitým počtem prvků. Vznikne síť elementů, která musí co nejlépe vyplňovat tvar tělesa. Počet prvků má vliv na přesnost výpočtu (Obrázek 19). Jemnější dělení znamená vyšší přesnost výsledku, ale značně prodlužuje čas potřebný k provádění analýzy a zvyšuje nároky na výpočetní hardware. Proto je vhodné používat tzv. místní nastavení sítě, kdy se v místech přechodů, vrubů,... nastaví jemnější síť. Naopak v místech, ve kterých není potřebná velká přesnost výpočtu, se nastaví síť hrubší (Obrázek 20). Jednotlivé prvky sítě se stýkají v tzv. uzlech a hledané parametry se zjišťují právě v těchto bodech. Řešení vlastností daného systému vede na řešení rozsáhlé soustavy diferenciálních rovnic, které se následně převedou na rovnice algebraické, jejichž neznámé jsou hledané parametry zkoumaného systému.

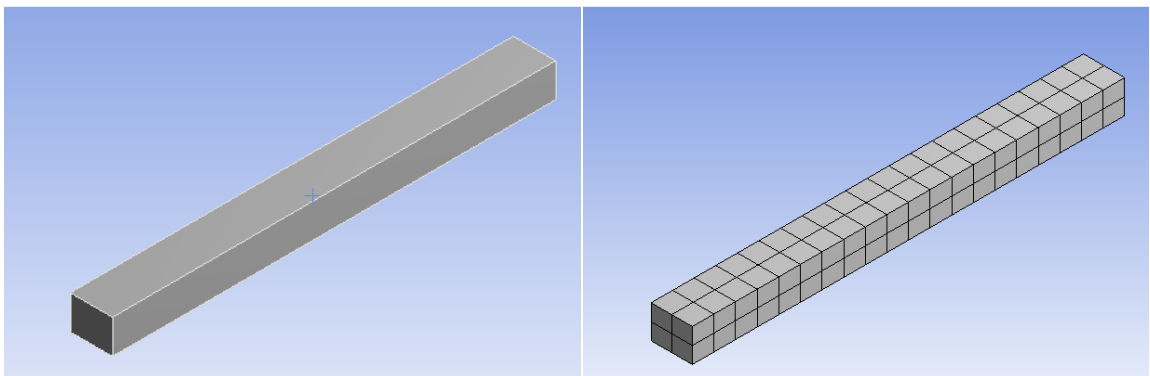
Vlastní řešení úloh MKP se dělí do tří fází:

- Preprocessing – definice geometrie modelu, jeho materiálových vlastností a okrajových podmínek pro výpočet.
- Solver – definice typu analýzy (statická, transientní, harmonická) a samotný výpočet.
- Postprocessing – zobrazení výsledků, tvorba protokolů.

V současné době se metoda konečných prvků používá k řešení problémů statiky, dynamiky, akustiky, elektromagnetických polí, elektrostatiky, piezoelektrických jevů, proudění a tepla.



Obrázek 19 – Závislost přesnosti řešení na počtu prvků sítě



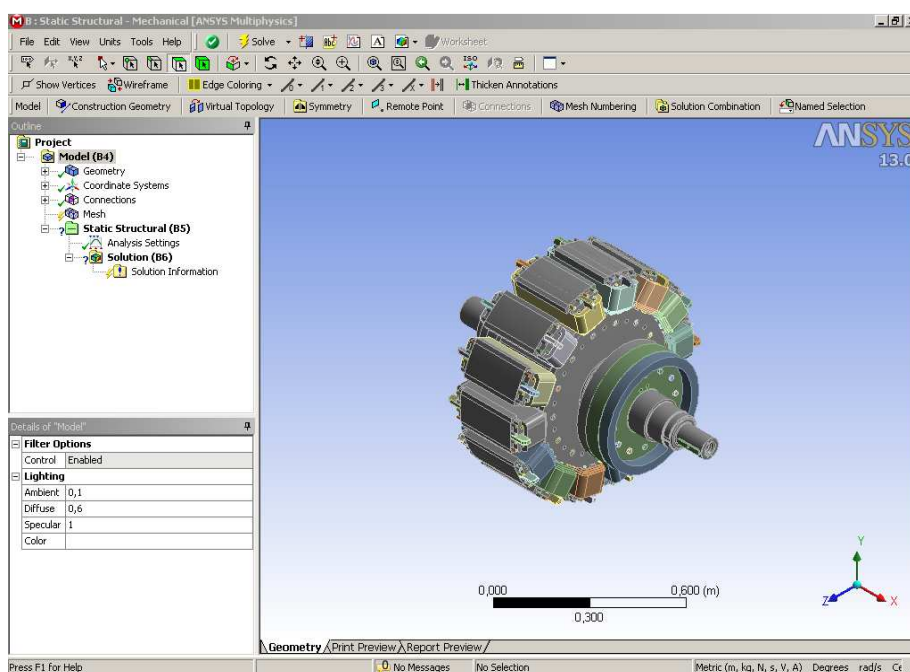
Obrázek 20 – Síť prvků MKP

## 2.2 Uživatelské prostředí Ansys Workbench

Program ANSYS patří v současné době k nejpoužívanějším systémům pro řešení problémů metodou konečných prvků. Tento softwarový balík obsahuje dvě grafická prostředí ANSYS Classic a ANSYS Workbench.

ANSYS Classic je určeno pro specialisty v oblasti výpočtů metodou konečných prvků. Uživatel má naprostou kontrolu nad všemi funkcemi a průběhem simulace. Pro méně zkušeného uživatele je práce v tomto prostředí velmi složitá.

ANSYS Workbench je grafická nadstavba prostředí ANSYS Classic určená pro práci konstruktérů, kteří jsou znalí práce v prostředí moderních CAD systémů. Grafické rozhraní nabízí snadnou orientaci a tím zvyšuje efektivitu práce. Program ANSYS Workbench obsahuje jednoduchý parametrický modelář, ve kterém je možné pohodlně vytvořit požadovanou geometrii. S výhodou je možné využít import modelů z celé řady CAD systémů (*Autodesk Inventor, Catia...*). Import geometrie probíhá nejčastěji pomocí některého z výměnných datových formátů (*.igs, .stp, .sat...*).



Obrázek 21 – Pracovní prostředí programu Ansys Workbench

---

Pracovní prostředí programu ANSYS Workbench je vytvořeno s důrazem na intuitivnost a přehlednost a v mnohém se podobá pracovním prostředím moderních CAD systémů. Rozhraní sestává z těchto částí:

- **Náhled modelu** – Je zde zobrazen řešený model, objekt zobrazující orientaci souřadného systému, informace o jednotkách, případně barevná škála (při zobrazených výsledcích simulace).
- **Stromová struktura postupu simulace** – 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.
- **Podrobnosti jednotlivých prvků** – Zobrazí se při označení prvku ve stromové struktuře. Lze zde měnit jednotlivé parametry.
- **Oblast oznámení** – Zobrazení varovných oznámení, případně dalších doplňujících informací o průběhu výpočtu.
- **Horní lišta** – Horní lišta kromě standardní práce se soubory a ovládání pohledu na model umožňuje také přepínání mezi jednotlivými moduly.

Každý projekt v ANSYS Workbench sestává z výběru typu analýzy, tvorby modelu, generování sítě a vlastní simulace. Tyto kroky probíhají ve třech nezávislých modulech, všechny tyto moduly využívají podobné grafické rozhraní.

Postup práce pro vytvoření nového projektu je následující:

- Uživatel nejdříve zvolí požadovaný typ analýzy.
- Vytvoří požadovanou geometrii v modulu *Design Modeler* (v tomto modulu lze provést i import požadované geometrie z externího CAD systému).
- Vygeneruje síť konečných prvků, což lze provést v prostředí pro tvorbu sítě a také v modulu pro simulaci.
- Zadá okrajové podmínky (jednotlivé zatížení a podmínky pro výpočet).
- Spustí vlastní výpočet pomocí tlačítka *Solve*.

Ke zjednodušení práce si lze spustit nástroj *Simulation Wizard*, což je textový pomocník, který uživatele provede jednotlivými kroky simulace a automaticky barevně označí případné chyby a nezadané parametry. Zároveň jednoduše a srozumitelně popisuje metodiku práce v programu.

Každý pracovní krok se ukládá do stromové struktury a v okně pod stromovou strukturou jsou zobrazeny bližší informace k jednotlivým pracovním krokům. Každý krok lze pomocí stromové struktury zpětně editovat a měnit.



Obrázek 22 – Simulation Wizard

## 2.3 Typy analýz v programu ANSYS Workbench

### Teplotní analýza

Teplotní analýza se používá ke stanovení ustáleného nebo v čase proměnného rozložení teploty ve zkoumaném modelu. Umožňuje stanovit tepelné ztráty, oteplení, tepelný tok a teplotní gradient. Tepelná analýza může být lineární i nelineární. Tepelné vlastnosti většiny materiálů se s teplotou mění, a proto jde obvykle o nelineární analýzu.

Statická teplotní analýza umožňuje spočítat vliv rovnoměrné tepelné zátěže na celý systém nebo na jakoukoliv jeho část. Používá se k určení teploty, tepelného toku a teplotního gradientu při časově neměnné tepelné zátěži. Výsledky statické teplotní analýzy jsou často vstupními daty pro přechodovou teplotní analýzu.

Teplotní přechodová analýza se používá pro výpočet teploty a množství tepla při tepelné zátěži, která se mění v čase. Výsledky přechodové teplotní analýzy jsou důležitými podklady pro návrh a kontrolu chlazení elektronických zařízení, elektrických motorů, tlakových lahví apod. Výsledky přechodové teplotní analýzy jsou často vstupními daty pro strukturální analýzu tepelného namáhání.

---

## Strukturální analýza

Strukturální analýza se používá ke stanovení deformací, mechanického namáhání a reakčních sil a zahrnuje následující typy analýz:

- Statická analýza – lze ji využít k řešení lineárních i nelineárních úloh. Např. ohyb, napětí v nosníku, velké průhyby, plastičnost, apod. Používá se při statickém zatížení.
- Harmonická analýza – používá se k výpočtu odezvy lineárního systému na harmonicky proměnnou zátěž.
- Modální analýza – stanovení vlastních frekvencí a tvar módů lineárního systému.
- Přejchodová dynamická analýza – využívá se pro výpočet odezvy systému při časově proměnné zátěži.
- Vzpěrné namáhání – pro výpočet únavy materiálu.

## Elektromagnetická analýza

Magnetická analýza se používá pro výpočet magnetických polí. Pomocí magnetické analýzy lze vypočítat intenzitu magnetického pole, magnetické síly a momenty, hustotu magnetického toku, impedance, indukčnosti, výkonové ztráty, vířivé proudy a rozptyl magnetického obvodu.

Typy magnetické analýzy:

- Statická magnetická analýza – slouží pro výpočet magnetických polí, která jsou vytvářena permanentními magnety nebo stejnosměrným proudem.
- Harmonická magnetická analýza – umožňuje výpočet magnetických polí generovaných střídavým proudem.
- Přejchodová magnetická analýza – pro výpočet magnetických polí, která jsou vytvářena časově proměnným elektrickým proudem.

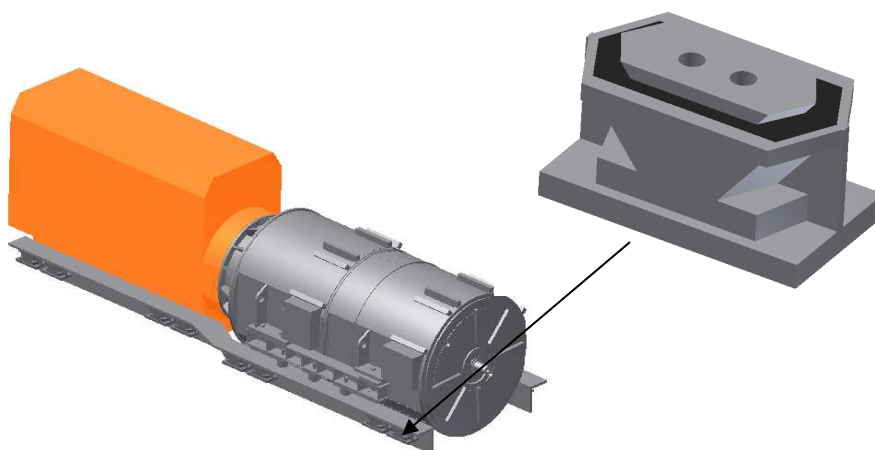
Elektrická analýza slouží pro výpočet veličin elektrického pole ve vodičích nebo kapacitních systémech a umožňuje stanovit hustotu náboje, intenzitu elektrického pole, Joulovo teplo a proudovou hustotu.

## Fluidní analýza

Fluidní analýza se používá pro výpočet toku a teplotních charakteristik proudících tekutin. Do fluidní analýzy lze zahrnout i akustickou analýzu (šíření zvukových vln).

### 3 MODÁLNÍ ANALÝZA MODELU DRÁŽNÍHO SOUSTROJÍ MOTOR - GENERÁTOR

V této kapitole bude provedena modální analýza drážního soustrojí motor - generátor. Jedná se o soustrojí, které se skládá z hlavního generátoru o výkonu 1350kVA, napětí 407V, z topného generátoru o výkonu 420kVA, napětí 2220V a z dieselmotoru. Rozsah otáček generátoru je 600 – 1800 rpm. Celé soustrojí je umístěno na společném rámu, na kterém jsou umístěny také silentbloky (Obrázek 23). Model byl pro potřeby analýzy upraven v programu Autodesk Inventor. Některé komponenty byly nově vymodelovány, odstraněna byla všechna malá zaoblení a zkosení, vyřešeny kolize mezi součástmi a některé součásti byly sloučeny do jedné (svařené součásti). Modální analýza byla prováděna na celém modelu soustrojí bez silentbloků, se silentbloky a na samostatných rotorech obou generátorů.



Obrázek 23 – Analyzovaný model

#### 3.1 Synchronní stroje

Jsou nejdůležitějšími elektrickými stroji pro výrobu elektrické energie. Jejich název je odvozen od toho, že se rotor otáčí stejnou (synchronní) rychlostí jako točivé magnetické pole statoru. Z velké části se využívají k výrobě elektrické energie v elektrárnách a jejich výkony dosahují hodnot až 1,5 GVA. Synchronní generátory (alternátory) jsou nejčastěji trojfázové, ale vyrábějí se i jako jednofázové. Hlavní výhodou synchronního stroje je buzení nezávislé na zatížení stroje. Díky tomu je možné řídit napětí nezávisle na zatížení. Další výhodou jsou menší rozměry oproti asynchronním strojům stejného výkonu. Synchronní motory jsou méně rozšířené, protože se samy z klidu nerozběhnou, což je jejich hlavní nevýhoda.

Z hlediska funkce se synchronní stroje dělí:

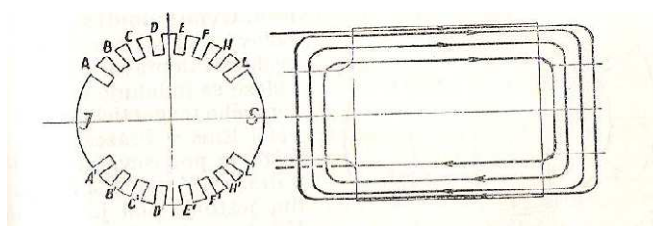
1. **Alternátory** – (synchronní generátory) mění mechanickou energii na elektrickou.

Alternátory se z hlediska provedení a použití dělí:

- a.) **Turboalternátory**
- b.) **Hydroalternátory**

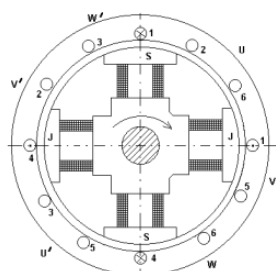
2. **Synchronní motory** – mění elektrickou energii na mechanickou.
3. **Synchronní kompenzátory** – slouží ke kompenzaci účinníku v elektrických sítích.
4. **Synchronní konvertory** – měniče střídavého proudu na stejnosměrný nebo naopak.

Synchronní stroj se skládá ze statoru a rotoru. Obvykle je trojfázové vinutí uloženo na statoru a budící vinutí, napájené stejnosměrným proudem, je uloženo na rotoru. Umístění trojfázového a budícího vinutí bývá u strojů menších výkonů opačné. Z konstrukčního hlediska existují dva základní typy synchronních strojů. Stroj s hladkým rotorem a stroj s vyniklými póly. Magnetická osa budícího vinutí se nazývá podélná (d) a osa na ni kolmá se nazývá příčná (q). Rotor stroje s vyniklými póly je tvořen magnetovým kolem z ocelolitiny s přišroubovanými póly. Na pólech jsou umístěny cívky budícího vinutí, které jsou spojeny do série a napájeny stejnosměrným proudem tak, aby se střídal severní a jižní pól. Rotor stroje s hladkým rotorem tvoří kovaný válec z chromniklové oceli, který má po obvodu vyfrézovány drážky, do kterých se ukládá budící vinutí.



Obrázek 24 – Rotor a vinutí stroje s hladkým rotorem

Synchronní generátory s vyniklými póly jsou většinou poháněny vodními, pomaluběžnými turbínami. Typickým znakem tohoto stroje je velký průměr a malá osová délka. Synchronní stroje s hladkým rotorem jsou poháněny rychloběžnými parními nebo plynovými turbínami. Vyznačují se menším průměrem a větší osovou délkou. Po obvodu rotoru, který má tvar plného ocelového válce, jsou vyfrézovány drážky, do kterých se vkládá budící vinutí. Vinutím kotvy prochází střídavý proud, takže magnetický obvod kotvy musí být složen z plechů a vinutí je uloženo v drážkách stejně jako u asynchronních strojů.



Obrázek 25 – Uspořádání synchronního stroje s vyniklými póly

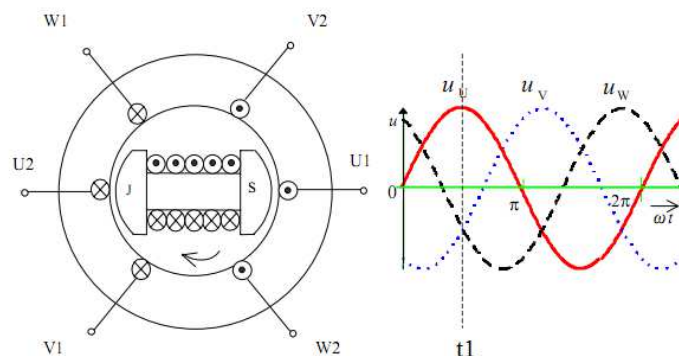
### 3.2 Princip činnosti synchronního generátoru

Na obrázku 26 je znázorněn synchronní alternátor se stejnosměrným budícím vinutím na rotoru a trojfázovým vinutím na statoru. Vinutí fází je znázorněno cívkami U, V, W, s jedním závitem. Vinutí je souměrné a jednotlivé cívky jsou navzájem posunuty o  $120^\circ$ . Vinutí je provedeno jako dvoupólové. Předpokládejme, že stejnosměrný proud  $I_2$ , procházející budicí cívkou, vytvoří ve vzduchové mezeře sinusově rozložené magnetické pole. Siločáry magnetického pole vystupují ze severního pólu rotoru, procházejí vzduchovou mezerou a magnetickým obvodem statoru směrem k jižnímu pólu, do kterého vstupují opět přes vzduchovou mezeru. Otáčí-li se rotorem otáčkami  $n_1$ , otáčí se stejnou rychlostí s ním spojené budicí magnetické pole a v cívkách statorového vinutí se indukují harmonické napětí, (viz. Obrázek 26). Při poloze rotoru podle obrázku 26 je v cívce U maximální napětí, v cívkách W a V, velikost napětí, odpovídající časovému okamžiku  $t_1$ . Otočením rotoru o  $120^\circ$  (časový okamžik  $t_2$ ) je maximální hodnota indukovaného napětí na cívce V. Efektivní hodnota indukovaného napětí je dána vztahem:

$$Un = 4,44 \Phi_m f_1 N_1 k_{v1} \quad [\text{Rovnice 1 Indukované napětí}]$$

Kde:  $f_1 = n \cdot p$ ; ( $n$  jsou mechanické otáčky rotoru a  $p$  je počet pólových dvojic vinutí statoru),  $N$  je počet závitů jedné fáze spojené v sérii,  $k_{v1}$  je činitel vinutí kotvy a  $\Phi_1$  je maximální hodnota magnetického toku prostupujícího vzduchovou mezerou stroje. Při chodu naprázdno neprotékají trojfázovým vinutím proudy, při zatížení alternátoru vytvoří proudy protékající trojfázovým vinutím kotvy točivé magnetické pole, jehož otáčky  $n_1$  jsou stejné jako otáčky rotoru  $n$ .

$$n = n_1 = \frac{f_1}{p} \quad [\text{Rovnice 2 Otáčky rotoru}]$$



Obrázek 26 – Princip činnosti synchronního stroje

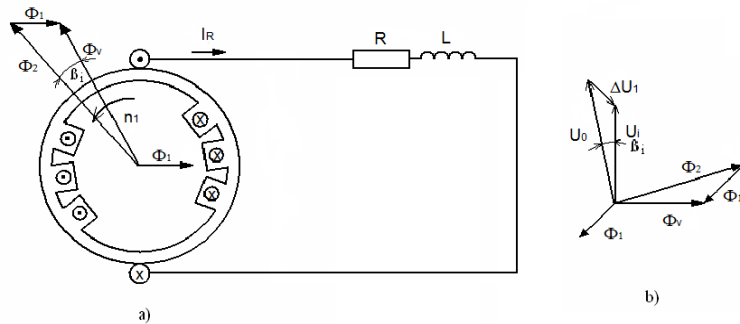
### 3.3 Obvodový model synchronního stroje

Chování synchronního stroje s hladkým rotorem v ustáleném stavu je možné popsat pomocí jednoduchého obvodového modelu. V případě stroje s trojfázovým souměrným vinutím, s hladkým rotorem a nenasyčeným magnetickým obvodem indukují magnetické toky  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_v$ , ve vinutí kotvy napětí podle obrázku 27. Výsledné vnitřní indukované napětí  $U_i$  je dáno součtem napětí  $U_0$  indukovaného budícím tokem  $\Phi_2$  a napětím  $U_1$  indukovaného reaktančním tokem  $\Phi_1$ . Magnetický tok  $\Phi_1$  je ve fázi s proudem kotvy  $I_1$ , takže  $U_1$  předbíhá proud  $I_1$  o  $90^\circ$ . Lze tedy psát:

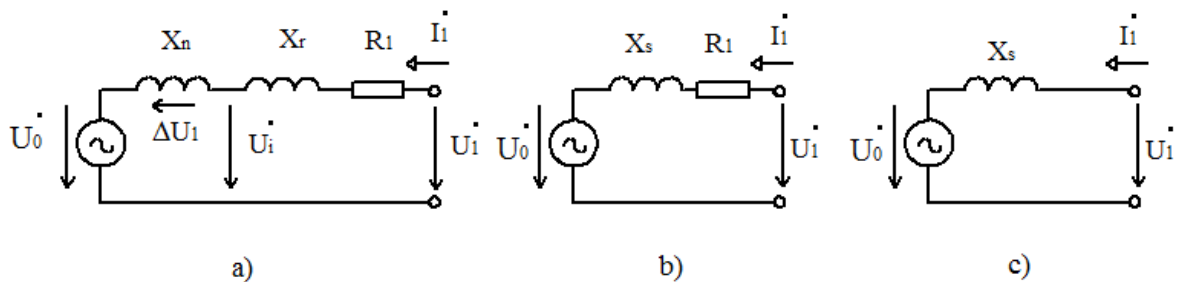
$$\bar{U}_i = \bar{U}_0 + \Delta\bar{U}_1 = \bar{U}_0 + jX_l\bar{I}_1 \quad [\text{Rovnice 3 Vnitřní indukované napětí}]$$

Kde:  $X_n$  je tzv. hlavní nebo magnetizační reaktance vinutí kotvy stroje.

Vnitřní indukované napětí  $U_i$  se liší od svorkového napětí  $U_1$  úbytkem na rozptylové reaktanci  $X_r$  vinutí kotvy a úbytkem na ohmickém odporu  $R_1$  vinutí kotvy. Obvodový model je zobrazen na obrázku 28a. Tento obvodový model lze upravit podle obrázku 28b, kde reaktance  $X_n$  a  $X_r$  byla nahrazena celkovou synchronní reaktancí stroje  $X_s$ . Úbytek napětí na ohmickém odporu  $R_1$  je mnohem menší než úbytek napětí na reaktanci  $X_s$  a lze jej tedy zanedbat. Obvodový model se pak zjednoduší podle obrázku 28c. Fázový posuv mezi svorkovým napětím  $U_1$  a napětím  $U_0$  se nazývá celkový zátěžný úhel  $\beta$  (viz. Obrázek 27b).



Obrázek 27 – Poměry při zatížení ohmicko-induktivní zátěží



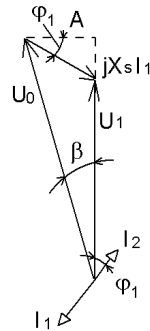
Obrázek 28 – Obvodový model synchronního stroje

### 3.4 Moment synchronního stroje

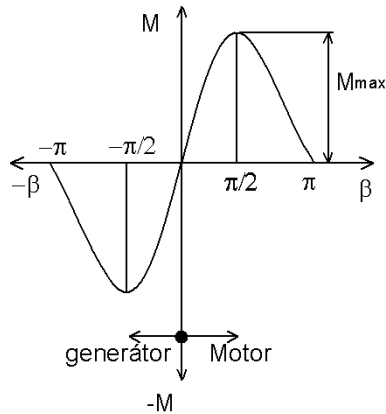
Pro odvození momentu synchronního stroje je možné využít zjednodušeného obvodového modelu (Obrázek 28c). Stroj pracuje jako generátor a mechanické i elektrické ztráty jsou zanedbány. Pak platí, že mechanický příkon na hřídeli se rovná elektrickému činnému výkonu na svorkách stroje:  $P_{\text{mech}}=P_1$ . Za těchto předpokladů platí pro moment synchronního stroje:

$$M = \frac{P_{\text{mech}}}{\omega_1} = \frac{P_1}{\omega_1} = \frac{m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1}{\omega_1} \quad [\text{Rovnice 4 Obecný vztah pro moment synchr. stroje}]$$

Kde:  $\omega_1$  je úhlová rychlost otáčení hřídele stroje,  $m_1$  je počet fází statorového vinutí,  $I_1$  je proud jedné fáze statoru,  $\varphi_1$  je fázový posuv mezi napětím a proudem  $U_1$  a  $I_1$ .



Obrázek 29 – Fázorový diagram synchronního stroje



Obrázek 30 – Závislost momentu synchronního stroje na zátěžném úhlu

Z fázorového diagramu (obrázek 29) je možné odvodit vztah pro moment jako funkci zátěžného úhlu  $\beta$ :

$$A = X_s \cdot I_1 \cdot \cos \varphi = U_0 \cdot \sin \beta \quad [\text{Rovnice 5 Moment jako funkce } \beta]$$

Vyjádřením  $I_1$  z rovnice 5 a dosazením do rovnice 4 lze psát:

$$M = \frac{m_1 \cdot U_1 \cdot U_0 \cdot \sin\beta_1}{\omega_1 \cdot X_s} \quad [\text{Rovnice 6 Moment jako funkce } \beta]$$

S uvážením konstantní rychlosti, konstantního svorkového napětí a konstantního budícího proudu se výraz pro moment synchronního stroje zjednoduší na tvar:

$$M = k \cdot \sin\beta \quad [\text{Rovnice 7 Moment jako funkce } \beta]$$

Kde:

$$k = \frac{m_1 \cdot U_1 \cdot U_0}{\omega_1 \cdot X_s} = \textit{konst.}$$

Grafické znázornění rovnice 6 je na obrázku 30. Jsou zde zobrazeny dva provozní stavy synchronního stroje. Při kladném momentu pracuje stroj jako motor a při záporném momentu jako generátor. Napětí  $U_0$  předbíhá u generátoru napětí  $U_1$ , což odpovídá kladnému zátěžnému úhlu a tudíž i kladnému momentu. U motoru je situace opačná. Napětí  $U_0$  je zpožděno za napětím  $U_1$  a tomu odpovídá záporný zátěžný úhel a tedy i záporný moment. Na obrázku 30 je vyznačen moment  $M_{\max}$ , který odpovídá momentu zvratu. Při překročení této hodnoty stroj přestane táhnout a zastaví se (vypadne ze synchronismu).

U stroje s vyniklými póly se mění vzduchová mezera stroje a tím i magnetický odpor. Magnetický odpor je nejmenší v podélné ose stroje a největší v příčné ose. Reakční pole se proto může vyvinout jen v oblasti pólu a mezi póly je nulové. Následkem je deformace výsledného magnetického pole ve vzduchové mezeře a vznik tzv. reakčního momentu stroje.

Na obrázku 31 je zobrazen synchronní stroj s vyniklými póly. Z obrázku je patrné, že vlastní indukčnost statorové cívky  $L_1$  a vzájemná indukčnost cívky statoru a rotoru  $L_{12}$  závisí na poloze rotoru vůči cívice statoru. Vlastní indukčnost cívky rotoru  $L_2$  nezávisí na poloze rotoru vůči statorové cívice a lze psát:  $L_2 = \textit{konst.}$  Dále lze pro jednoduchost předpokládat:

$$L_{12} = L_{12m} \cdot \cos\beta \quad [\text{Rovnice 8 Vzájemná indukčnost cívky statoru a rotoru}]$$

$$L_1 = L_{10} + L_{1m} \cdot \cos 2\beta \quad [\text{Rovnice 9 Vlastní indukčnost cívky statoru}]$$

Kde:  $L_{12m}$  a  $L_{1m}$  jsou maximální hodnoty proměnných složek indukčností  $L_{12}$  a  $L_1$ ,  $L_{10}$  je střední hodnota indukčnosti.

Pro energii soustavy na obrázku 31 platí:

$$W_{co} = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 + L_{12} i_1 i_2 \quad [\text{Rovnice 10 Koenergie soustavy}]$$

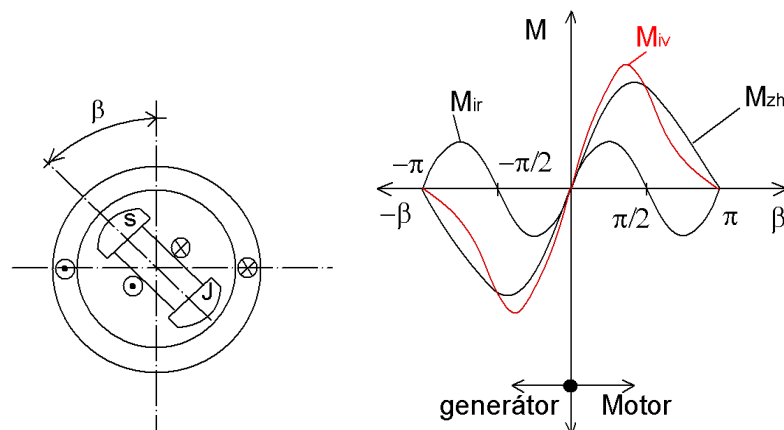
Pro okamžitou hodnotu momentu lze psát:

$$M_{iv} = \frac{\partial W_{co}(i_1, i_2, \theta_m)}{\partial \beta} \quad [\text{Rovnice 11 Okamžitá hodnota momentu}]$$

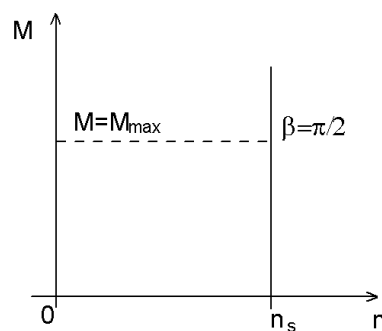
Dosazením rovnic pro vlastní a vzájemné indukčnosti do rovnice pro koenergie soustavy a její derivací je výraz pro moment synchronního stroje s vyniklými póly:

$$M_{iv} = -(i_1 L_{1m} \sin 2\beta + i_1 i_2 L_{12m} \sin \beta) = M_{ir} + M_{ih} \quad [\text{Rovnice 12 Výsledný moment}]$$

Okamžitá hodnota momentu synchronního stroje s vyniklými póly se skládá ze dvou složek: hlavní složky  $M_{ih}$  a z reakční složky  $M_{ir}$ . Výsledný moment synchronního stroje s vyniklými póly je zobrazen červeně na obrázku 31.



Obrázek 31 – Synchronní stroj s vyniklými póly



Obrázek 32 – Momentová charakteristika synchronního stroje

### 3.5 Paralelní chod synchronního generátoru se sítí

Synchronní stroje pracující jako alternátory pro výrobu elektrické energie v elektrárnách pracují do společné rozvodné sítě (paralelně). V rozvodné síti je požadováno stálé napětí a kmitočet (v mezích tolerancí danými příslušnými normami). Pro splnění těchto požadavků a požadavku hladkého připojení alternátoru bez mechanických a proudových rázů, je možné alternátor připojit k síti pouze při splnění následujících požadavků:

- Stejný sled fází
- Stejně efektivní hodnoty napětí alternátoru a sítě
- Stejný kmitočet alternátoru a sítě
- Stejně okamžité hodnoty napětí alternátoru a sítě v okamžiku připojení

Nesplnění některé z těchto podmínek vede k velkým proudovým a mechanickým rázům, což může vést až ke zničení alternátoru.

### 3.6 Spouštění synchronního stroje a řízení otáček

#### Spouštění synchronního stroje

- Asynchronní rozběh** – v tomto případě je na rotoru umístěno kromě budicího vinutí ještě tlumící (rozběhové) klecové vinutí. Stroj se rozbíhá stejně jako asynchronní motor nakrátko. Při rozběhu je budicí vinutí odpojeno. Když motor dosáhne otáček blízkých synchronním, budicí vinutí se připojí ke zdroji stejnosměrného napětí a rotor se vtáhne do synchronismu.
- Rozběh pomocným motorem** – Na hřídeli je umístěn budič (stejnosměrný generátor), nebo rozběhový asynchronní motor, který se používá pro rozběhy strojů vysokých výkonů.
- Řízený rozběh** – v tomto případě je stroj napájen z měniče kmitočtu, který umožňuje plynulé zvyšování kmitočtu

#### Řízení otáček synchronního motoru

Otáčky synchronního stroje se řídí plynule změnou kmitočtu napájecího napětí. Ke změně kmitočtu napájecího napětí lze využít výkonové polovodičové měniče. Pro regulované pohony se synchronními motory se používají nepřímé měniče kmitočtu (např. ventilový pohon), nebo přímé měniče kmitočtu tzv. cyklokonvertory. Možnost skokové změny synchronních otáček změnou počtu pólů se nevyužívá.

### 3.7 Fázování

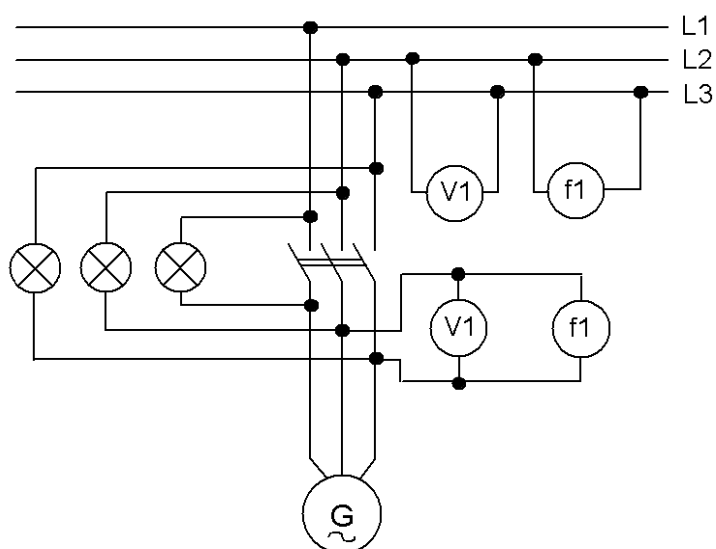
Při paralelní práci synchronního generátoru se sítí je nutné zajistit, aby při připojení generátoru k síti byl omezen proudový ráz a nevznikl vyrovnávací moment mezi sítí a strojem. Tato podmínka se zajišťuje tzv. fázováním stroje. Při fázování jsou spínány dvě nesynchronní části sítě v okamžiku, kdy jsou jejich napětí stejná (amplituda a frekvence). Připojit alternátor na síť je možné jen při splnění těchto podmínek:

Stejný sled fází

Stejná frekvence

Stejná napětí

Stejný fázový posun



Obrázek 33 – Fázování stroje na síť

### 3.8 Modální analýza

V současnosti se stále více projevuje požadavek na zvyšování rychlosti ve všech druzích dopravy a požadavek na správné hospodaření s palivem. Tyto požadavky vedou projektanty ke snižování hmotnosti struktur. Důsledkem toho je, že se struktury stávají přirozeně měkkými. Jejich rezonanční frekvence se tím posouvají do nižších oblastí frekvenčního spektra, kde se v mnoha případech nacházejí i budící frekvence. Tento problém vede k selhávání struktur vlivem dynamického zatížení. Jediným řešením je navrhnout soustavu tak, aby rezonanční frekvence nebyly v blízkosti budících frekvencí.

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. Problémy, které jsou spojeny s mechanickým chvěním nebo s nadměrným hlukem jsou v praxi způsobeny vlastnostmi systému, které nazýváme modálními. Tyto vlastnosti se zkoumají pomocí modální analýzy. Pomocí získaných výsledků je možné určit výsledné vlastnosti systému. Modální analýza zjišťuje:

- Vlastní frekvence soustavy
- Vlastní tvary kmitů
- Vlastní tlumení tvarů kmitů

Modální analýzu je možné provádět praktickým výpočtem, provedením experimentálního měření reálné struktury, nebo s využitím 3D modelu soustavy s použitím některého ze systémů pro řešení problémů metodou konečných prvků. Získané hodnoty jsou často porovnávány s hodnotami získanými měřením, ale v technické praxi se jen málokdy shodují. Při matematickém modelování kmitavého chování jsou sestaveny pohybové rovnice a výsledné vlastnosti modální analýzy vypočteny s využitím tzv. modální transformace. Tato transformace spočívá v náhradě soustavy vzájemně vázaných homogenních diferenciálních rovnic soustavou nezávislých, izolovaně řešitelných homogenních diferenciálních rovnic. Složité výpočty soustavy pohybových rovnic je nutné v mnohých případech zjednodušit. Přílišné zjednodušení však může vést k chybám. Při experimentální modální analýze se určují vlastní frekvence, vlastní tvary kmitu a modální útlum dané soustavy pomocí experimentálně naměřené vhodné množiny dat frekvenční odezvové funkce  $H(\omega)$ . Tato funkce bývá také často nazývána kmitočtovou charakteristikou. Jen korektně provedená experimentální modální analýza nejpřesněji určí skutečné modální vlastnosti.

Metodu modální analýzy lze využít pro řešení mnoha technických problémů vyskytujících se při výrobě a návrhu nových systémů:

- Porovnáním dat naměřených při experimentu a odpovídajících dat získaných pomocí výpočtové metody (např. metody konečných prvků), je možné analytický model optimalizovat tak, aby odpovídal skutečnosti a mohl sloužit k dalším teoretickým výpočtům, bez zatížení chybami způsobenými nedostatečným zahrnutím všech okrajových podmínek.

- 
- S pomocí výsledků modální analýzy (vlastních frekvencí), je možné stanovit nebezpečné provozní stavy, ve kterých se dané zařízení nesmí provozovat, aby nedošlo ke shodě vlastních frekvencí s frekvencemi budících sil. Shoda vlastních frekvencí a frekvencí budících sil by vedla k rezonanci systému a tedy k nadměrným amplitudám kmitání. Provoz zařízení v oblasti rezonancí několikanásobně snižuje spolehlivost, životnost a v mnoha případech dochází k poškození takového zařízení.
  - Modální analýzu je možno provádět za účelem získání matematického modelu součásti, u které je plánováno začlenění do složitější struktury a tím je možné se vyhnout případným kolizím výsledného systému.
  - S pomocí vypočtených výsledným vlastních tvarů kmitů zkoumaného systému je možné určit místa maximálních výchylek buzené soustavy a následně doporučit strukturální modifikace, např.: úprava geometrie, přidání přídavných prvků či změna vlastností, s cílem eliminovat nebezpečné chvění v různých částech takového systému.
  - Výsledky modální analýzy je možné využít při vibrodiagnostice pro identifikaci příčin problémů a k odhalení poruch a jejich místa výskytu.

Analyzovaný systém lze popsat třemi různými typy modelů. Každý tento model je dán systémovými maticemi.

- **Fyzikální model**
  - Matice tuhosti [K]
  - Matice hmotnosti [M]
  - Matice tlumení [B],[H]
- **Modální model**
  - Spektrální matice (na diagonále jsou vlastní čísla) [ $\lambda^2$ ]
  - Modální matice (sloupce tvoří vlastní vektory) [ $\Phi$ ]
- **Odezvový model**
  - Matice frekvenčních odezvových funkcí

Při provádění teoretické modální analýzy se postupuje od fyzikálního modelu k modelu odezvoému. Teoretická modální analýza sestává z těchto kroků:

- Sestavení fyzikálního modelu (pohybových rovnic)
- Sestavení modálního modelu (analýza volného kmitání)
- Sestavení odezvového modelu (analýza vynuceného kmitání)

---

Experimentální modální analýza se skládá z těchto kroků:

- Vytvoření odezvového modelu (změření vhodné množiny odezvoových funkcí)
- Sestavení modálního modelu (na základě analýzy naměřených dat)
- Sestavení fyzikálního modelu

Podstatou modální analýzy je frekvenční odezvová funkce. Frekvenční odezvová funkce se získá měřením časového průběhu dynamického buzení soustavy  $f(t)$  a měřením časového průběhu odezvy testované soustavy  $x(t)$  ve frekvenční oblasti. Přenosová funkce je definována jako poměr výstupu k vstupu do systému:

$$H(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)} \quad [\text{Rovnice 13 Frekvenční odezvová funkce}]$$

V případě experimentální modální analýzy je možné dynamiku systému popsat pomocí tří různých veličin: rychlost, zrychlení a výchylka. Frekvenční odezvové funkce k těmto veličinám se nazývají: pohyblivost, akcelerace a poddajnost. Všechny tyto veličiny jsou svázány algebraickými vztahy, takže je možné na základě změřené charakteristiky jedné veličiny určit veličiny zbývající.

Příklad:

Časový průběh výchylky v komplexním tvaru je:

$$x(t) = X e^{j\omega t}$$

Vztahy pro rychlost a zrychlení se získají derivací:

$$v(t) = x'(t) = i\omega X e^{j\omega t}$$

$$a(t) = x''(t) = -\omega^2 X e^{j\omega t}$$

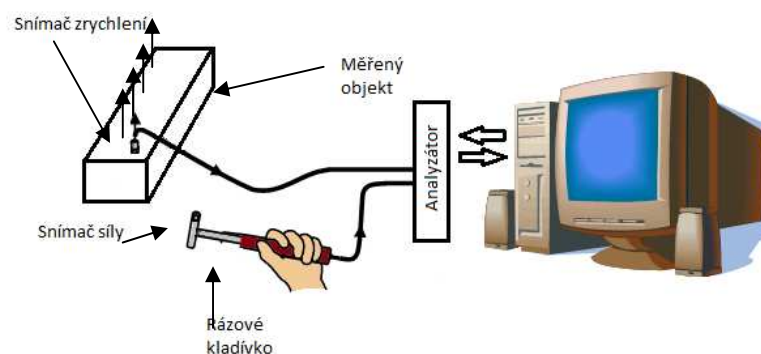
### 3.9 Praktické provádění modální analýzy

Při praktické modální analýze se měřená struktura řízeně vybudí určitou silou a tato budící síla se měří v určitém bodě struktury. Způsob buzení je dán třemi kritérii:

- účelem modální zkoušky
- požadavky na přesnost
- frekvenčním rozsahem, ve kterém se modální parametry zjišťují

Způsoby buzení struktury při modální analýze jsou:

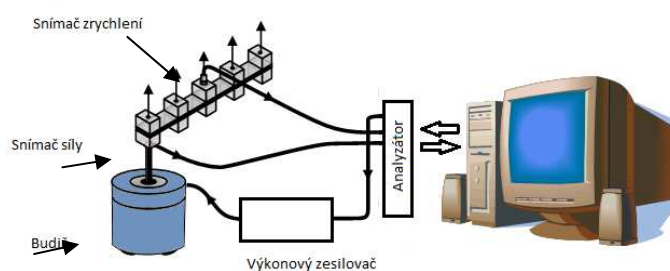
- rázovým kladívkem
- impulsní buzení
- harmonickým signálem
- náhlým uvolněním z deformované pozice
- náhodným signálem
- buzení dynamickým budičem vibrací



Obrázek 34 – Praktické provádění modální analýzy pomocí rázového kladívka

Na obrázku výše je zobrazeno uspořádání měřicí soustavy při buzení rázovým kladívkem. Akcelerometr je trvale umístěn v jednom zvoleném (referenčním) bodě. Měřený objekt budíme kladívkem ve všech bodech a tím se získá jeden řádek matice frekvenčních odezвовých funkcí. Při uspořádání měřicího systému s buzením pomocí dynamického budiče vibrací, je snímač síly umístěn trvale ve zvoleném referenčním bodě a odezva je postupně nebo najednou snímána ve všech bodech objektu. Tím získáme jeden sloupec matice frekvenčních odezвовých funkcí.

Nejjednodušším způsobem pro vybuzení kmitání struktury je použití rázového kladívka. Nejsou nutné v podstatě žádné náročné přípravné práce, a proto je tento způsob vhodný pro využití v provozních podmínkách. Snímačem síly se zjišťuje hodnota síly působící na kladívko. Tato síla je stejně velká, ale opačného směru než síla působící na strukturu. Na rozsah vybuzených frekvencí má výrazný vliv hmotnost kladívka a tuhost jeho hrotu. Čím bude kladívko hmotnější a jeho hrot měkčí, tím širší silový impuls vyrobí a rozsah vybuzených frekvencí bude menší. Rozsah vybuzených frekvencí se může pohybovat od cca 100 Hz (pro velké kladívko s pryžovým hrotem) do cca 12 kHz (miniaturní kladívko s kovovým hrotem). Nevýhodou použití kladívka je, že činitel výkmitu je vysoký, a proto je v důsledku velké špičkové hodnoty působící síly nebezpečí poškození měřeného objektu a vybuzení jeho nelineárního chování.



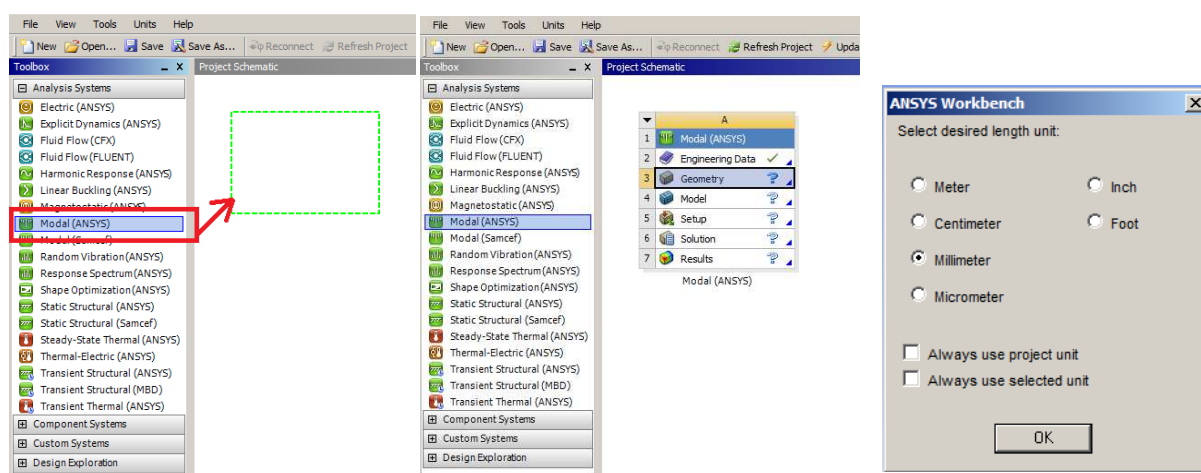
Obrázek 35 – Praktické provádění modální analýzy pomocí dynamického budiče

Buzení pomocí dynamického budiče vibrací je dalším možným způsobem provádění praktické modální analýzy. Nejpoužívanější je elektromagnetický (elektrodynamický budič) vibrátor. Vstupní signál je převeden na střídavé magnetické pole. V tomto poli je umístěna cívka, připojená k poháněcí části zařízení a k měřenému objektu. Snímačem síly měříme sílu působící na objekt. S velikostí budiče se zvyšuje hodnota síly, kterou lze vyvinout, na druhé straně se snižuje frekvenční rozsah. Budič je připojen k měřenému objektu pomocí budící tyčky. Tato musí být tuhá ve směru buzení a ohebná v ostatních směrech, aby nedošlo k přídavnému buzení struktury ve směru, ve kterém není síla snímačem síly měřena. Aby nedocházelo k vnášení vlastních rezonančních frekvencí tyčky do měření, nesmí být tyčka příliš dlouhá a pružná. Budič nebo měřená struktura musí být uloženy volně, jinak hrozí, že na objekt budou působit reakční síly od budiče. Výhodou použití budiče vibrací je možnost výběru velkého množství budících signálů, Nejčastěji používaným je signál náhodného šumu.

Pro správné měření frekvenčních odezvových funkcí, ze kterých následně získáme modální parametry, je důležité, aby snímač co nejméně ovlivňoval měřený objekt a aby byl správně uchycen. Jedině tak, je možné měřit skutečné chování struktury. Připevnění snímače na měřený objekt je velmi důležité, protože každý snímač má nějakou vlastní rezonanční frekvenci, která závisí na velikosti snímače, a která je ovlivněna připevněním snímače k měřenému objektu. Účinné frekvenční pásmo, ve kterém můžeme snímač použít, je cca do 1/3 hodnoty této frekvence. K upevnění snímače zrychlení se velmi často používá vosk, protože jeho použití je rychlé a podstatně nesnižuje použitelný frekvenční rozsah snímače. Při měření objektů s nerovným povrchem, se používá podložka s natáčecí základnou. Snímač síly bývá součástí rázového kladívka, nebo bývá připevněn pomocí šroubu k měřené struktuře (při buzení budičem).

### 3.10 Postup tvorby modální analýzy modelu soustrojí motor - generátor

Po otevření pracovního prostředí ANSYS Workbench se na levé straně pracovního okna objeví toolboxy různých typů analýz a přídavné programové komponenty. Vybranou analýzu lze přetáhnout do pracovní plochy (do zelených pozic). Prvním krokem pro tvorbu analýzy je tvorba nebo import modelu geometrie. Dvojklikem na položku *Geometry* se otevře modul pro práci s modelem (*Design modeler*). Na začátku je třeba zvolit jednotky. V případě importu geometrie z jiných CAD systémů je nutné zvolit jednotky, ve kterých byl model vytvářen.

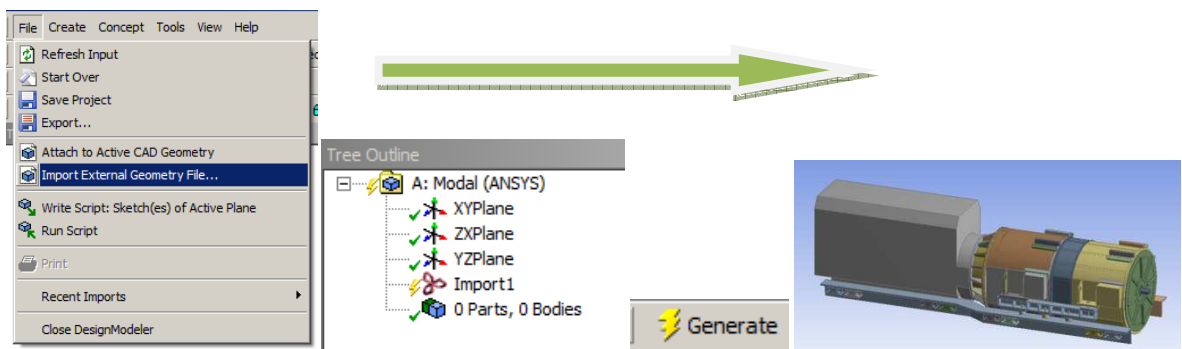


Obrázek 36 – Pracovní prostředí po otevření programu a volba jednotek

V prostředí *DesignModeler* je pro práci s modelem k dispozici velké množství nástrojů pro tvorbu náčrtů a pro práci s 3D geometrií (obrázek 37). Práce s těmito nástroji je podobná jako v jiných 3D CAD programech. Odlišnost spočívá v nutnosti použít tlačítka *Generate* pro aplikaci zvolené 3D operace (vysunutí, zaoblení,...). Geometrii je možné předem vytvořit v kterémkoliv CAD systému a využít funkci *Import External Geometry File*. Po načtení se ve stromu událostí objeví symbol importovaného souboru. Načtení je nutné potvrdit tlačítkem *Generate*. Postup importu geometrie modelu je na obrázku 38. Import modelu geometrie může trvat i několik minut a to v závislosti na typu souboru, jeho velikosti a složitosti modelu. V případě analyzovaného modelu byl použit pro tvorbu a úpravu částí modelu program Autodesk Inventor a pro import do programu ANSYS Workbench výměnný datový formát *.sat*

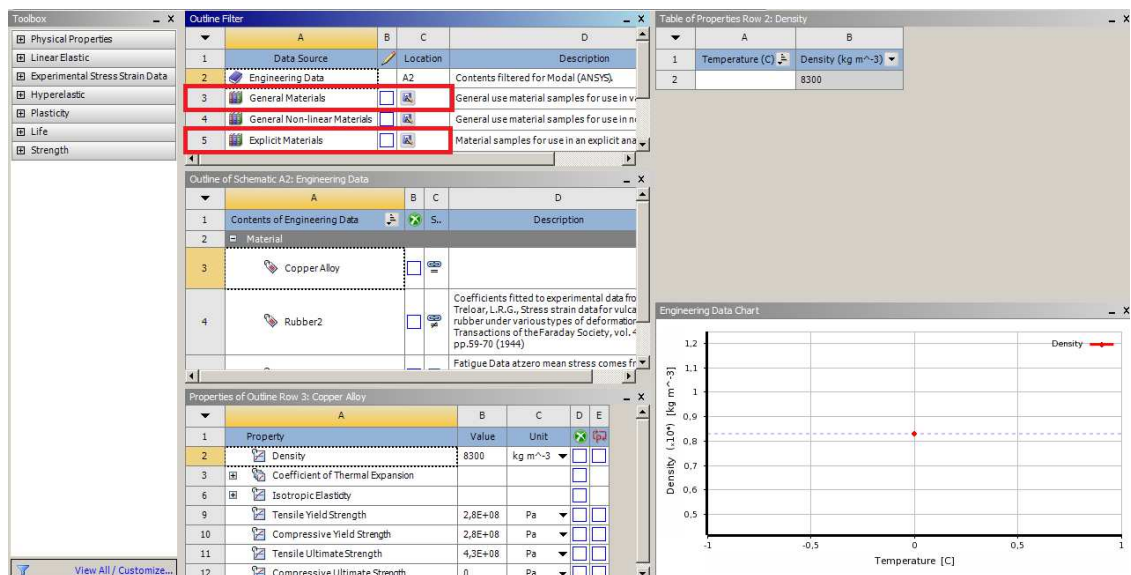


Obrázek 37 – Nástroje pro tvorbu geometrie



Obrázek 38 – Postup importu geometrie

Po úspěšném importu geometrie je možné provést další úpravy modelu včetně využití funkce *boolean* např. pro svařené součásti. Pokud je geometrie kompletní, je možné se přesunout do prostředí *Mechanical*, ve kterém bude probíhat další práce na vlastní analýze. Před tímto krokem, je nutné nadefinovat materiály modelu a jejich fyzikální parametry. To je možné kliknutím na položku *Engineering Data* v toolboxu zvolené analýzy. Zde je možné vytvářet a modifikovat knihovny materiálů. Pro možnost přidání nového materiálu musí být zatrhnuto příslušné políčko ve sloupci označeném písmenem B (Obrázek 39). V knihovně jsou pak definovány materiály pro jednotlivá tělesa. Materiály mohou být homogenní, nehomogenní, izotropní a lineárně pružné, které jsou definovány pomocí Youngova modulu  $E$  [MPa], Poissonovým číslem  $\mu$  [-] a modulem pružnosti ve smyku  $G$  [Pa]. Přidat materiály do projektu analýzy je možné pomocí tlačítka *plus*. Pro návrat do projektu slouží tlačítko *Return to the project*.



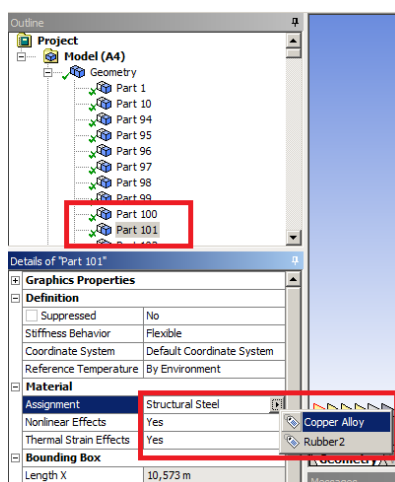
Obrázek 39 – Definice materiálu pro projekt

Pro potřeby prováděné modální analýzy byly definovány tyto materiály:

- Měď
  - Hustota: 8300 kg/m<sup>3</sup>
- Ocel
  - Hustota: 8500 kg/m<sup>3</sup>
- Pryž
  - Hustota: 1000kg/m<sup>3</sup>
  - Youngův modul v příčné ose: 45450N/mm
  - Youngův modul v podélné ose: 20250N/mm
  - Youngův modul v ose vertikální: 45450N/mm
  - Poisonovo číslo: 0,5
  - Modul pružnosti ve smyku: 0,6MPa

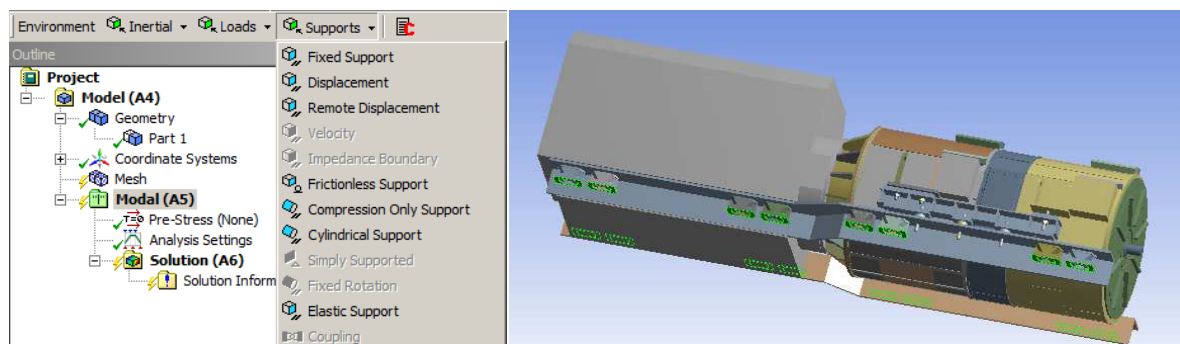
Po definici materiálů je možné se dvojklikem na položku *Model* přesunout do prostředí analýzy. Prvním krokem v tomto prostředí je přiřadit materiál součástí modelu. Ve stromu událostí v položce *Geometry* se vybere příslušná součást a v dolní části pracovního okna se objeví detailní informace o vybrané součásti (Obrázek 40). Zde v položce *Assignment* je možné zvolit vybraný materiál z knihovny materiálů. V případě prováděné modální analýzy byl přiřazen materiál měď všem částem vinutí a materiál pryž pro část silentbloku označenou na obrázku 23 černě. U všech ostatních částí byl ponechán automaticky přiřazený materiál ocel.

Protože se analyzovaný model skládá z mnoha součástí, je nutné zkontrolovat a případně upravit automaticky generované kontakty mezi součástmi. Program nabízí několik typů kontaktů, které je možné využít (bonded, frictional, frictionless...). V modelu soustrojí bylo nutné upravit vazbu mezi ložiskem a statorem. Dále bylo přidáno několik kontaktů (lepený spoj), které nebyly definovány programem.



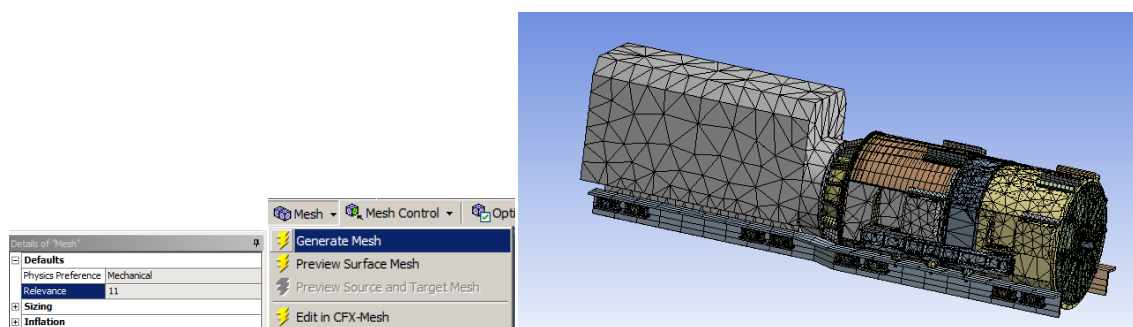
Obrázek 40 – Definice materiálu pro součást

Dalším velmi důležitým krokem je definice okrajových podmínek. V případě této modální analýzy se jedná o definici pevné podpory na spodní straně silentbloků (Obrázek 41) a nastavení parametrů modální analýzy (počet vypočítaných vlastních frekvencí).



Obrázek 41 – Definice pevné podpory

Posledním krokem před spuštěním vlastního výpočtu je vygenerování sítě konečných prvků. Po označení položky *Mesh* ve stromu událostí se v dolní části pracovního okna zobrazí detaily sítě, kde je možné nastavit hustotu sítě a velikost jednotlivých elementů. Dále je možné vybrat metodu meshování (pomocí menu *Mesh Control*) a další parametry. V této modální analýze byla upravena jen hodnota *Relevance* (obrázek 42)

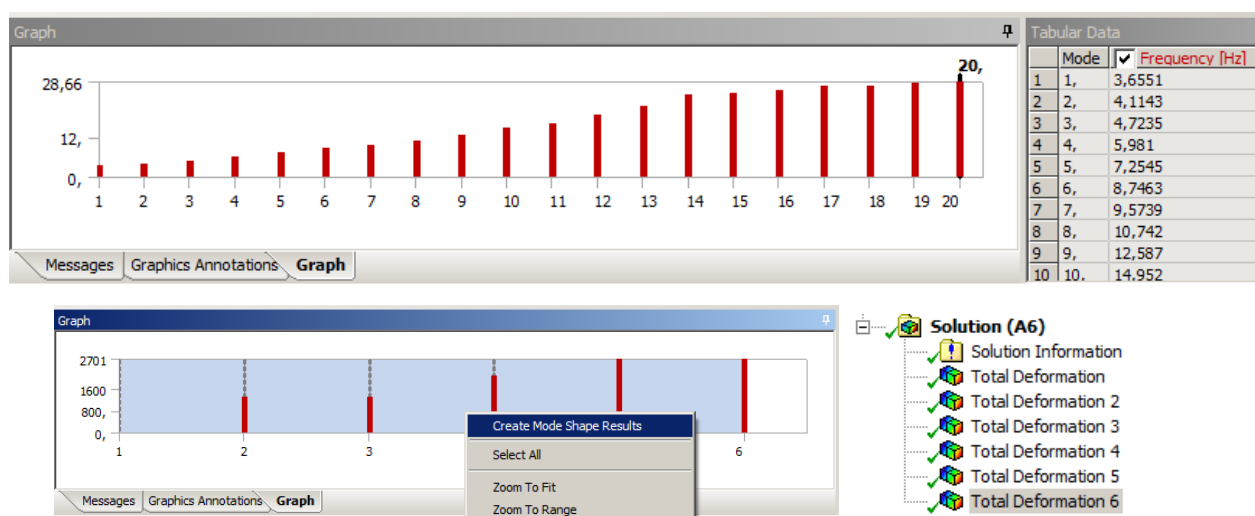


Obrázek 42 – Tvorba sítě konečných prvků

Parametry sítě konečných prvků:

- Počet elementů: 250245
- Počet uzlů sítě: 500739

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. Pro zobrazení jednotlivých tvarů vlastních kmitů je nutné kliknout pravým tlačítkem myši nad zobrazeným grafem a vybrat položku *Select All* a následně znovu kliknout pravým tlačítkem myši a vybrat položku *Create Mode Shape Results*. 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.



Obrázek 43 – Zobrazené výsledky výpočtu

### 3.11 Výsledky modální analýzy soustrojí motor – generátor

Modální analýza byla prováděna na modelu soustrojí motor – generátor, jehož jednotlivé součásti byly vytvářeny a upravovány v programu Autodesk Inventor 2012. Model byl po úpravě načten do prostředí modální analýzy programu ANSYS Workbench pomocí výměnného datového formátu *.sat*. Výpočet probíhal na počítači následujících parametrů:

- Procesor – Intel Pentium 4 core 2,8 GHz
- Paměť RAM – 4GB

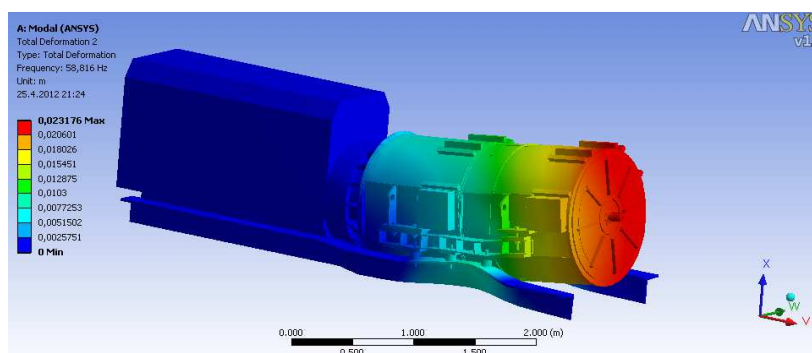
Výsledkem modální analýzy v programu ANSYS Workbench jsou vypočítané vlastní frekvence a grafické zobrazení vlastních tvarů kmitů. Na těchto diagramech lze pozorovat chování rotorů drážního generátoru při určitém frekvenčním zatížení.

#### 3.11.1 Analýza soustrojí bez silentbloků

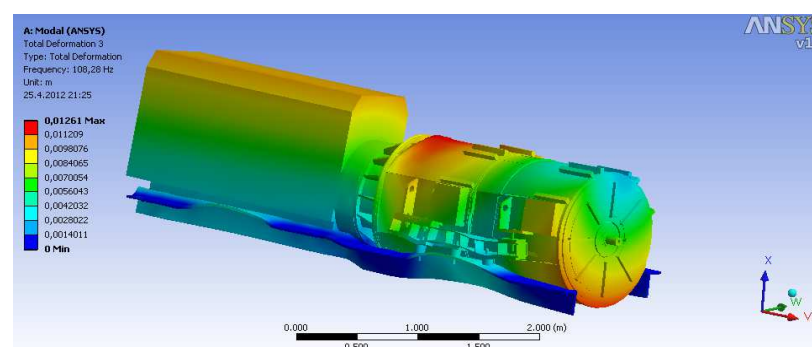
V tabulce 1 jsou zobrazeny vypočítané vlastní frekvence analyzovaného soustrojí bez silentbloků. Vypočítáno bylo prvních dvacet vlastních frekvencí (tabulka 1). Provoz soustrojí bez silentbloků není normálním provozním stavem, ale hodnoty poslouží k ověření funkce silentbloků. Druhý a třetí tvar kmitů jsou zobrazeny na obrázcích níže. Prvních sedm vlastních tvarů kmitů je zobrazeno v příloze 1.

Tvar kmitu	Frekvence [Hz]
1	49,08
2	58,816
3	108,28
4	120,51
5	131,9
6	140,53
7	148,01
8	174,77
9	187,46
10	217,47
11	277,52
12	286,24
13	288,25
14	301,16
15	317,2
16	320
17	329,57
18	377,04
19	382,68
20	398,84

Tabulka 1 – Vlastní frekvence analyzovaného soustrojí bez silentbloků



Obrázek 44 – Vlastní tvar kmitu při frekvenci 58,816 Hz



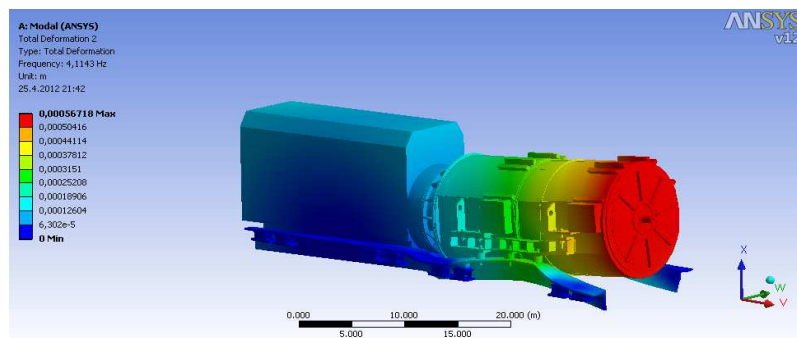
Obrázek 45 – Vlastní tvar kmitu při frekvenci 108,28 Hz

### 3.11.2 Analýza soustrojí včetně silentbloků

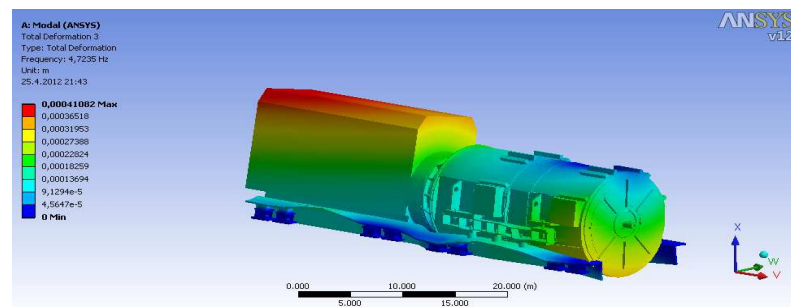
V tabulce 2 jsou zobrazeny vypočítané vlastní frekvence analyzovaného soustrojí se silentbloky umístěnými pod společným rámem generátorů a deiselmotoru. Vypočítáno bylo prvních dvacet vlastních frekvencí (tabulka 2). V tomto případě bylo na společný rám soustrojí umístěno 16 silentbloků. Geometrie silentbloku byla vytvořena na základě katalogového listu výrobce. Umístění silentbloků odpovídá skutečnosti. Porovnáním vypočítaných hodnot analýzy sestavy bez silentbloků a se silentbloky je patrné, že umístěním silentbloků na rám došlo k posunu vlastních frekvencí do nižších oblastí. Například hodnota vypočítané první vlastní frekvence soustrojí bez silentbloků je 49,08 Hz, zatímco hodnota první vlastní frekvence soustrojí se silentbloky je 3,6551 Hz. Ke stejnému posunu došlo i u zbývajících hodnot vlastních frekvencí. Současně byly vypočítány hodnoty maximálního posunutí (viz grafické zobrazení vlastních tvarů kmitů). Na základě porovnání hodnot obou analýz lze říci, že došlo k výraznému snížení maximální deformace modelu. Například při prvním tvaru kmitu dosáhla maximální hodnota posunutí, v případě modelu bez silentbloků, 20,97 mm. V případě modelu se silentbloky činila maximální hodnota posunutí 0,59 mm. Grafické zobrazení prvních sedmi tvarů kmitů soustrojí včetně hodnot posunutí je zobrazeno v příloze 2.

Tvar kmitu	Frekvence [Hz]
1	3,6551
2	4,1143
3	4,7235
4	5,981
5	7,2545
6	8,7463
7	9,5739
8	10,742
9	12,587
10	14,952
11	15,868
12	18,486
13	21,202
14	24,573
15	25,354
16	26,053
17	27,155
18	27,531
19	28,161
20	28,662

Tabulka 2 – Vlastní frekvence analyzovaného soustrojí včetně silentbloků



Obrázek 46 – Vlastní tvar kmitu při frekvenci 4,1143 Hz



Obrázek 47 – Vlastní tvar kmitu při frekvenci 4,7235 Hz

### 3.11.3 Modální analýza rotorových částí

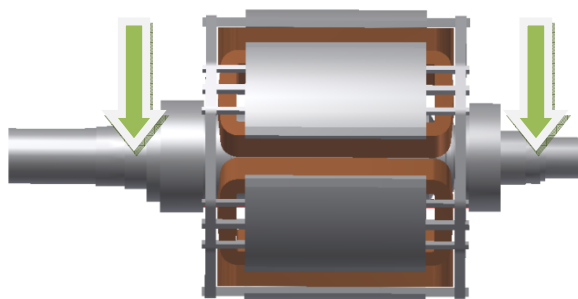
Jako další část modální analýzy byla provedena analýza jednotlivých rotorů soustrojí. Počet uzlů sítě a počet elementů sítě pro jednotlivé analyzované modely je uveden v následující tabulce:

Model	Počet uzlů	Počet elementů
Celek	1013870	443159
Hlavní generátor	533345	213302
Topný generátor	686222	270991

Tabulka 3 – Parametry sítě konečných prvků

V této analýze bylo nutné nastavit vazby, které nahrazují uložení hřídele v ložiskách. Pro tento případ byla použita válcová vazba (cylindrical), s nastavením:

- Pevný radiální směr
- Volný axiální směr
- Volný tečný směr

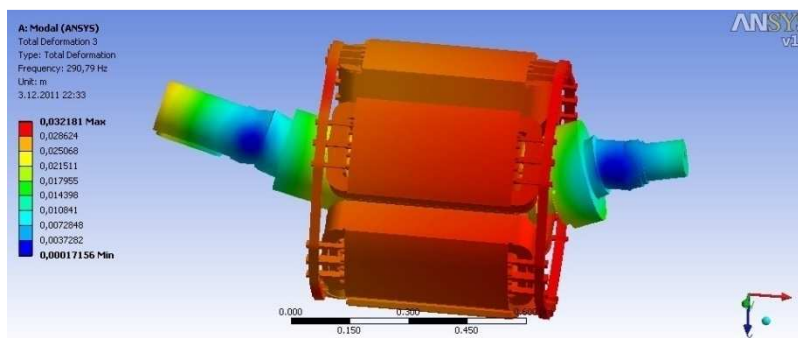


Obrázek 48 – Umístění ložisek na hřídeli rotoru hlavního generátoru

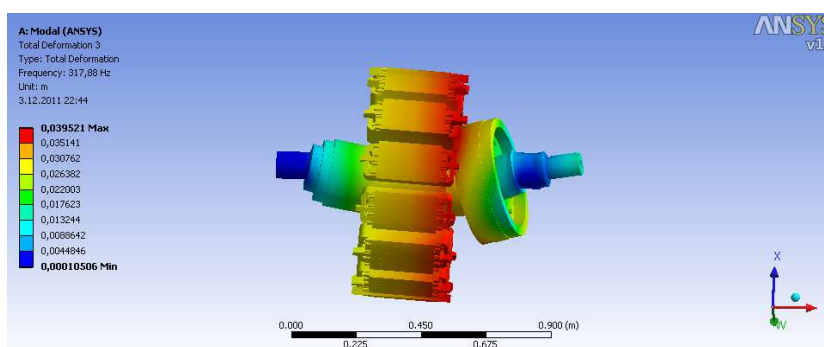
Topný generátor			Hlavní generátor		
Mód	Frekvence		Mód	Frekvence	
1	0	Hz	1	0	Hz
2	101,24	Hz	2	50,592	Hz
3	290,79	Hz	3	317,88	Hz
4	292,97	Hz	4	318,89	Hz
5	559,47	Hz	5	565,88	Hz
6	563,38	Hz	6	566,33	Hz

Tabulka 4 – Vlastní frekvence rotorových částí

Při modální analýze samostatných rotorů obou generátorů bylo vypočítáno prvních šest vlastních tvarů kmitů. Z grafického zobrazení výsledků jsou velmi dobře patrné vlastní ohybové tvary kmitů prvního a druhého druhu. První ohybový tvar kmitů nastal u hlavního generátoru při frekvenci 290,79 Hz a při 292,97 Hz. U topného generátoru nastal první ohybový tvar kmitů při frekvenci 317,88 Hz a při 318,79 Hz. Oba první ohybové tvary kmitů jsou prakticky stejné, jen se projevují v odlišných osách. Tento tvar kmitů je buzen nedokonalou vyvážeností rotoru. Pokud by se rotor nacházel v této frekvenční oblasti, dostal by se do rezonance a mohl by být poškozen. Druhý ohybový tvar kmitů nastal u hlavního generátoru při frekvencích 559,47 Hz a 563,38 Hz. U topného generátoru nastal při frekvencích 565,88 Hz a 566,33 Hz. Vzhledem k maximálním otáčkám soustrojí 1800 ot/min, nejsou druhé ohybové tvary kmitů pro analyzované generátory podstatné. Otáčky 1800 ot/min odpovídají u hlavního generátoru (6 pólů) frekvenci 90 Hz a u topného generátoru (14 pólů) frekvenci 210 Hz. Grafické zobrazení jednotlivých tvarů kmitů rotorů obou generátorů je uvedeno v přílohách 3 a 4.



Obrázek 49 – První ohybový tvar kmitů hlavního generátoru, frekvence 290,79 Hz



Obrázek 50 – První ohybový tvar kmitů topného generátoru, frekvence 317,88 Hz

---

## 4 ANIMACE SOUSTROJÍ DRÁŽNÍHO GENERÁTORU

Animace Soustrojí drážního generátoru byla vytvářena jako projekt pro firmu Siemens Electric Machines s.r.o. Drásov. Soustrojí se skládá z hlavního generátoru 1350kVA a topného generátoru 420kVA. Vzniklá animace nejde využít při školeních a prezentaci výrobku. Animace byla vytvářena v programu Inventor Studio.

Data modelu byla předána v souboru STEP. Tento soubor je jeden z výměnných datových formátů, který se využívá pro přenos 2D výkresů a 3D modelů mezi několika konstruktéry, kteří využívají rozdílné CAD systémy. Výhodou tohoto formátu je, že s jeho pomocí lze přenášet i složité sestavy bez chyb vzniklých následným přenosem. Nevýhodou je, že není možné přenést materiály modelu ani vazby mezi jednotlivými částmi. Celá sestava modelu byla složena z cca 2200 dílů. Z důvodu velké náročnosti na paměť systému bylo nutné k tvorbě animace takto rozsáhlého modelu použít 64bitový systém a jemu odpovídající verzi programu Autodesk Inventor 2010. V systémech 32bitových je totiž velikost paměti RAM omezena na 2GB (respektive 3GB).

Pro zefektivnění práce s touto sestavou bylo nutné rozdělit ji na čtyři podsestavy (stator hlavního generátoru, stator topného generátoru, rotor hlavního generátoru, rotor topného generátoru) a některým povrchům byly přiděleny materiály. Takto upravené podsestavy byly posléze načteny jako součásti do hlavní sestavy. Tento krok zajistí rychlejší odezvu systému a nijak nebrání animaci jednotlivých dílů načtených sestav.

Dalším krokem byla tvorba vlastní animace. Tato byla vytvářena s pomocí standardních nástrojů, které program Inventor Studio poskytuje. Nejčastěji byly použity funkce: *Animovat komponentu* a *Animovat útlum*. Metodika vytváření animace byla následující:

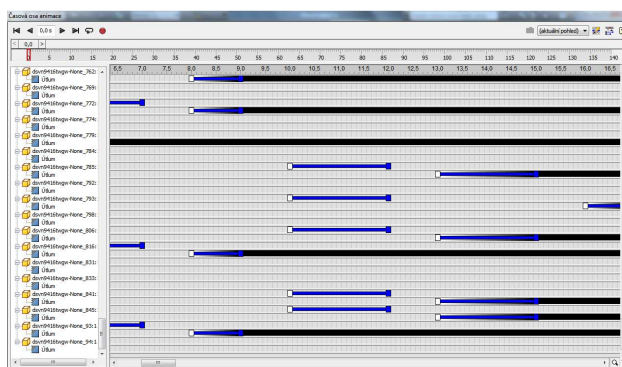
- Nejprve byla nastavena scéna (vhodný pohled na model, pozadí animace).
- Animace byla vytvářena jako rozpad sestavy a při následném renderování byla použita možnost převrátit časovou osu. Tímto krokem byla získána animace sestavení modelu.
- Animace byla vytvářena po částech (od cca 12 sekund do cca 1minuty) s různými pohledy na sestavu.
- Všechny komponenty, které nebyly potřebné pro daný záběr, byly vymazány (snížení nároku na paměť systému).
- Výstupem bylo 25 souborů ve formátu .avi

Posledním krokem při tvorbě animace bylo sestavení vzniklých videosouborů pomocí stříhového programu Corel Video Studio 12 do výsledného filmu. Do videa byla přidána úvodní znělka s logem společnosti Siemens, informační obrazovka s technickými parametry soustrojí a obrázek řezu modelem. Dále byly přidány titulky, průhledné logo společnosti a vložen hudební podklad.

Celková délka animace je cca 15 minut a 30 sekund. Byla renderována jako soubor .avi s rozlišením 1024x768, 12 snímků za sekundu – výsledná animace je složena z téměř 10800 snímků. Animace byla renderována celkem ve třech verzích a konzultována s odborníky. Čas potřebný k vyrenderování poslední verze byl cca 65 hodin. Dlouhá doba renderování byla dána velkou náročností na paměť systému. Pro účely prezentace modelu byla vytvořena také krátká verze o délce asi 5 minut.



Obrázek 51 – Model statoru a rotoru po aplikaci materiálů



Obrázek 52 – Ukázka časové osy vytvářené animace

---

## 5 ZÁVĚR

Tato práce se věnuje využití moderních CAD systémů a modální analýzy v silnoproudé elektrotechnice. Ve velké míře se věnuje programu Autodesk Inventor 2012 a programu ANSYS Workbench, ve kterém je vytvořena ukázka výpočtu modální analýzy na modelu soustrojí drážního generátoru.

První část se věnuje obecně CAD systémům a jejich rozdělení. V další části se práce věnuje programu Autodesk Inventor 2012. Je zde uvedeno stručné seznámení s pracovním prostředím a s programem samotným. Dále je na jednoduchých příkladech ukázána tvorba součástí, tvorba sestav a možnosti prezentace vytvořených modelů v prostředí Prezentace a v prostředí Inventor Studio.

Další část práce se zabývá metodou konečných prvků a programem ANSYS workbench. Je zde uveden princip metody konečných prvků a její historie. Dále je zde popsán program ANSYS Workbench, jeho pracovní prostředí a některé typy analýz, které program umožňuje provádět.

V další části práce je popsána tvorba modální analýzy na modelu drážního soustrojí motor – generátor. V této kapitole je uveden popis synchronních strojů, teoretický popis modální analýzy a postup výpočtu modální analýzy soustrojí včetně vyhodnocení výsledků.

V poslední části práce je popsána tvorba animace montáže soustrojí drážního generátoru. Tato animace je vytvořena v programu Inventor Studio ve spolupráci s firmou Siemens Electric Machines s.r.o. Drásov pro účely školení a prezentace. Jedná se o model, který obsahuje více než 2000 součástí a proto bylo třeba během animace řešit několik problémů, které práce s velkými sestavami přináší. Všechny kroky, které vedly k vytvoření animace, jsou popsány v poslední části této práce.

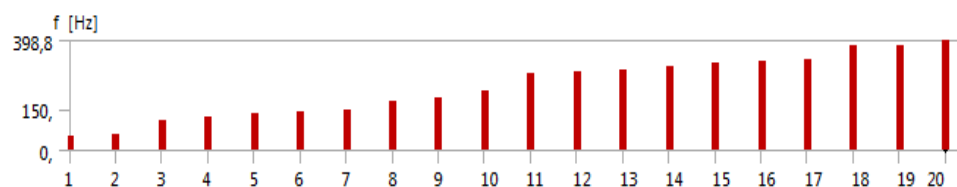
---

## LITERATURA

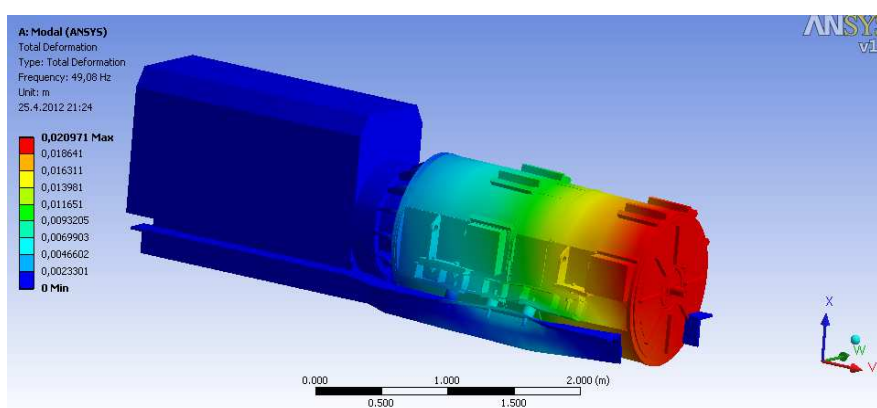
- [1] FOŘT, Petr. Autodesk Inventor adaptivní modelování v průmyslové praxi. Brno: CPRESS, 2007. 318 s. ISBN 978-80-251-1773-6.
- [2] MÁNEK, Petr. Využití adaptivních CAD systémů pro modelování elektrických strojů, Brno, 2010. 49 s. Bakalářská práce. VUT, FEKT.
- [3] CAD studio [online]. 2011 [cit. 2011-02-01]. Autodesk Inventor. Dostupné z WWW: < <http://www.cadstudio.cz/inventor> >
- [4] Náповěda k aplikaci Autodesk Inventor. Autodesk Inventor Professional 2012 [program na DVD-ROM]. 64bitová verze pro Windows, Build: 253, SP1, typ použití licence: studentská verze, Autodesk, California (USA).
- [5] PÍŠA, Zdeněk; POLZER, Aleš. Systémy CAD [online] [cit. 2011-02-06] Dostupné z WWW: < [http://esf.fme.vutbr.cz/?page=modul\\_3](http://esf.fme.vutbr.cz/?page=modul_3) >
- [6] Autodeskclub [online]. 2010 [cit. 2011-02-20]. AutoCAD Inventor-2011. Dostupné z WWW: < <http://www.autodeskclub.cz/clanek/5235-autocad-inventor-2011> >
- [7] Doc. Ing. ONDRŮŠEK, Čestmír, Elektrické stroje, skripta, VUT Brno, 2003.
- [8] SEDLÁČKOVÁ, Petra. Využití prostředí Ansys Workbench pro teplotní výpočty elektrických strojů, Brno, 2010. 50 s. Diplomová práce. VUT, FEKT.
- [9] DVOŘÁK, Vítězslav. Experimentální modální analýza, ZČU FST, 2009  
[cit. 2011-10-28].
- [10] KOČMAN, Stanislav. *Synchronní stroje* [online]. Ostrava: TU Ostrava VŠB, 2004 [cit. 2011-10-30]. Dostupné z WWW: <[http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske\\_FS/prednasky/sylab\\_synchronni%20stroje\\_bc%20FS.pdf](http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FS/prednasky/sylab_synchronni%20stroje_bc%20FS.pdf)>.
- [11] SOKOL, Zdeněk. *Synchronní stroje* [online]. Dobruška: SPŠ Dobruška, 2010 [cit. 2011-10-30]. Dostupné z WWW: <[www.spse.dobruska.cz/download/SG.pdf](http://www.spse.dobruska.cz/download/SG.pdf)>.
- [12] BILOŠOVÁ, Alena. Experimentální modální analýza [online]. Ostrava: VŠB TU Ostrava, 2011 [cit. 2012-04-13]. Dostupné z WWW: < [www.337.vsb.cz/materialy/BilosovaAlena\\_EMA.pdf](http://www.337.vsb.cz/materialy/BilosovaAlena_EMA.pdf) >.

## PŘÍLOHY

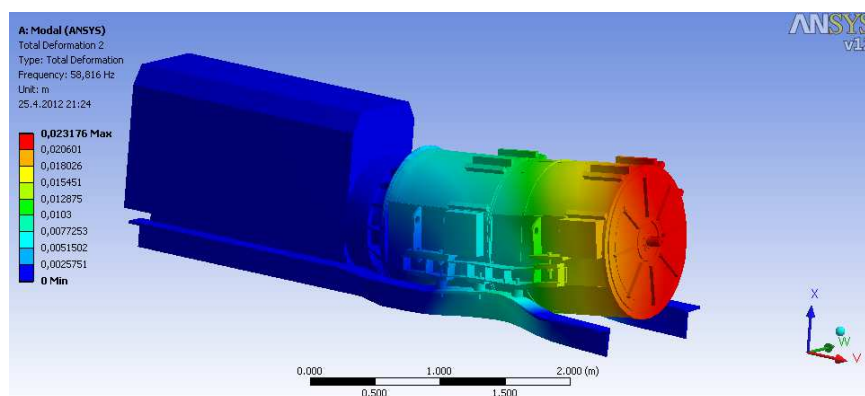
### PŘÍLOHA 1 – Vlastní tvary kmitů soustrojí motor – generátor bez silentbloků



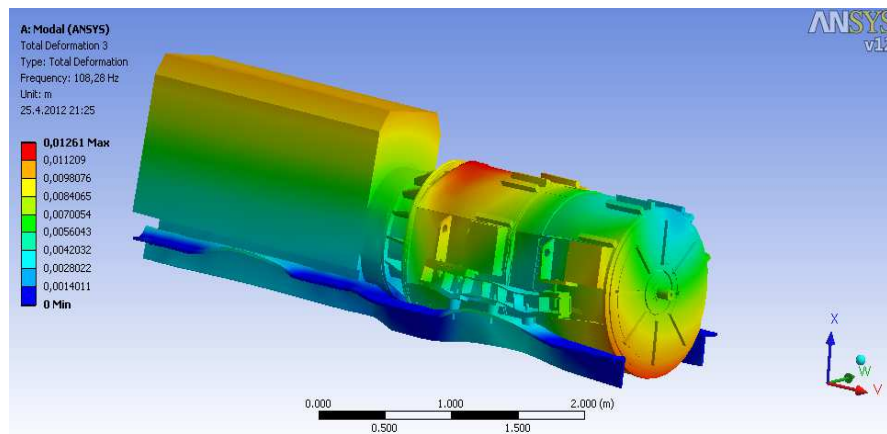
Graf P1 – Vlastní frekvence soustrojí bez silentbloků



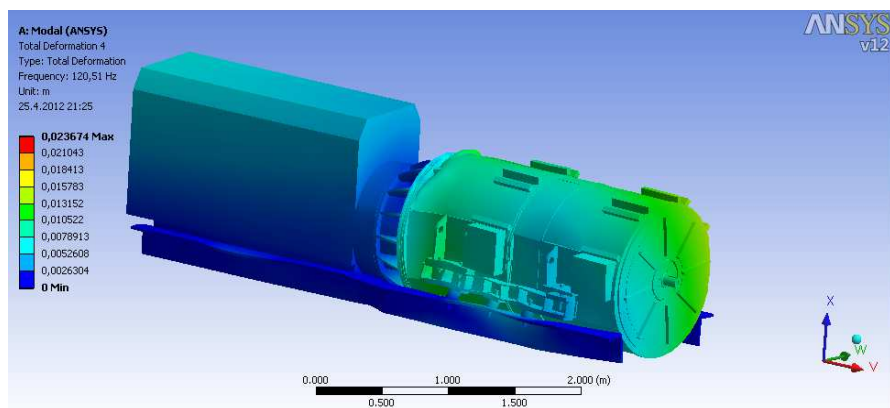
Obrázek P1 – Tvar vlastních kmitů při frekvenci 49,08 Hz



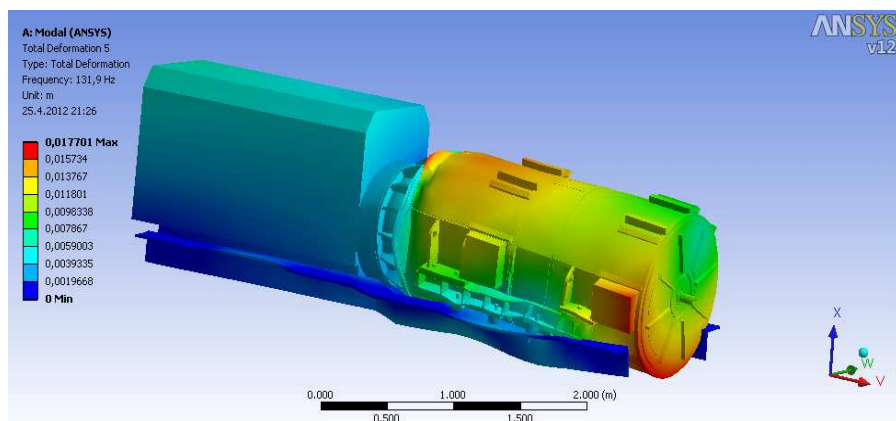
Obrázek P2 – Tvar vlastních kmitů při frekvenci 58,816 Hz



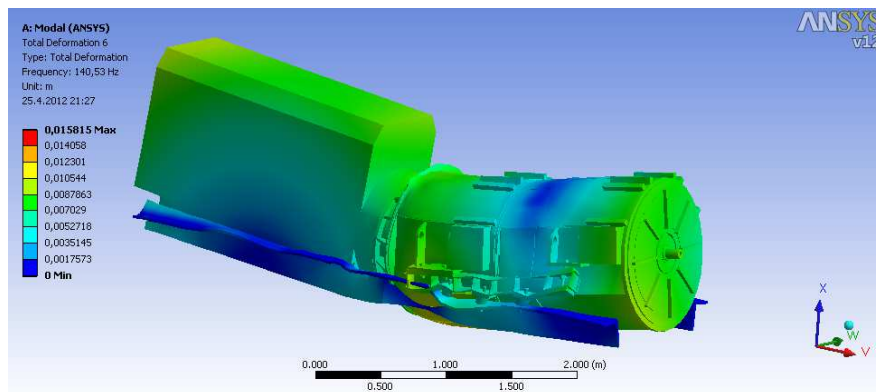
*Obrázek P3 – Tvar vlastních kmitů při frekvenci 108,28 Hz*



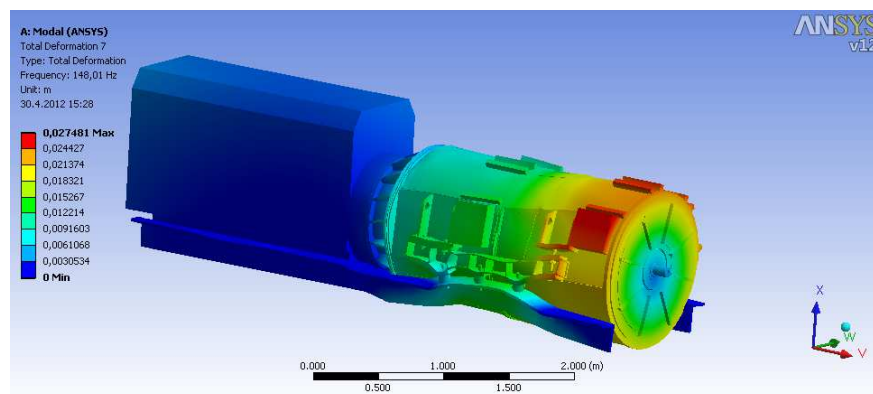
*Obrázek P4 – Tvar vlastních kmitů při frekvenci 120,51 Hz*



*Obrázek P5 – Tvar vlastních kmitů při frekvenci 131,9 Hz*

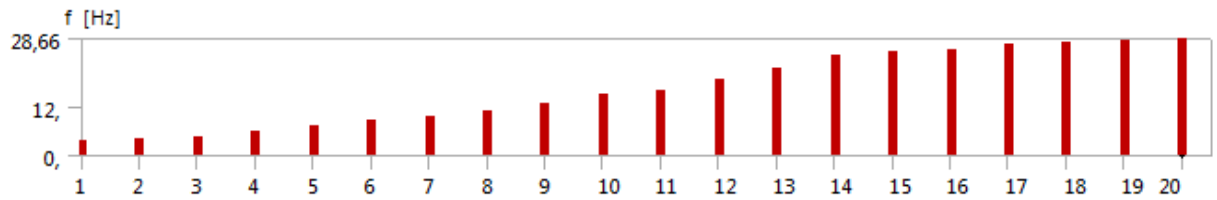


Obrázek P6 – Tvar vlastních kmitů při frekvenci 140,53 Hz

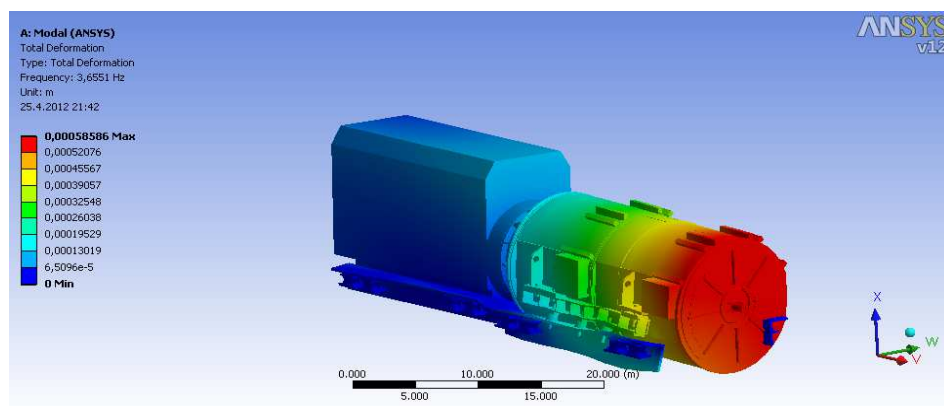


Obrázek P7 – Tvar vlastních kmitů při frekvenci 148,01 Hz

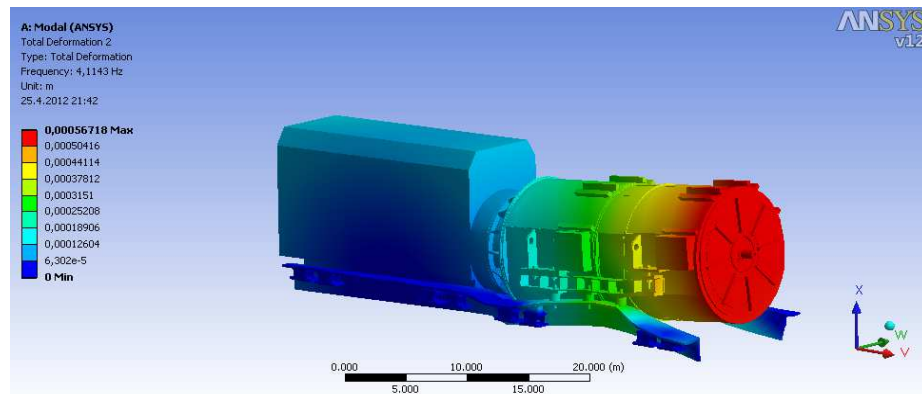
## PŘÍLOHA 2 – Vlastní tvary kmitů soustrojí motor – generátor včetně silentbloků



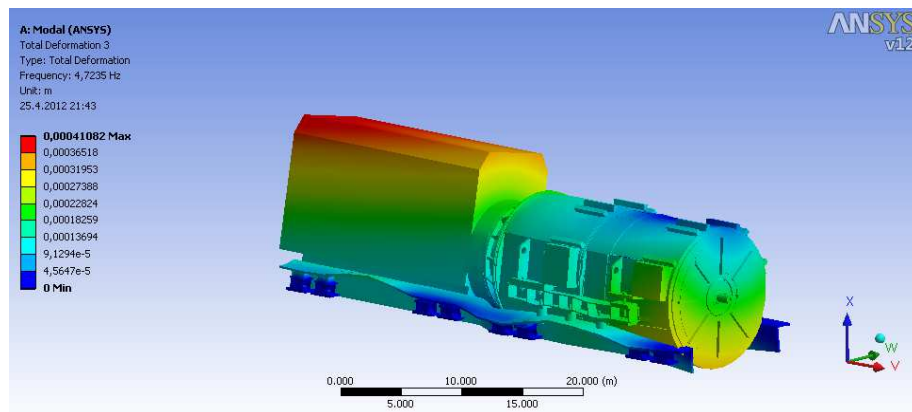
Graf P2 – Vlastní frekvence soustrojí se silentbloky



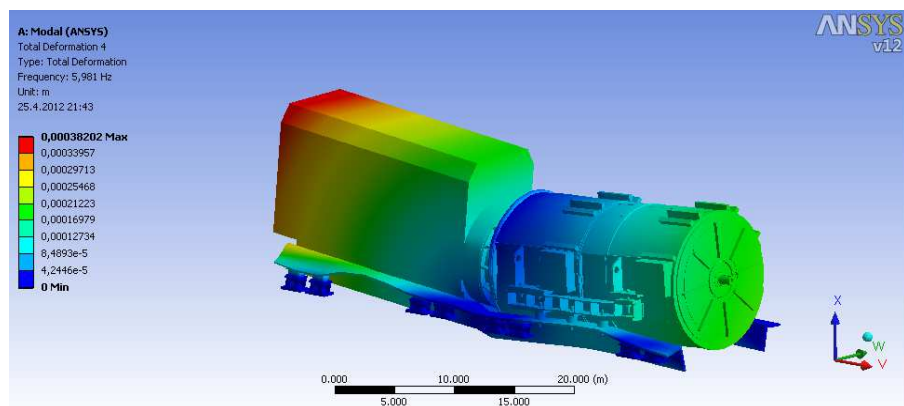
Obrázek P8 – Tvar vlastních kmitů při frekvenci 3,6551 Hz



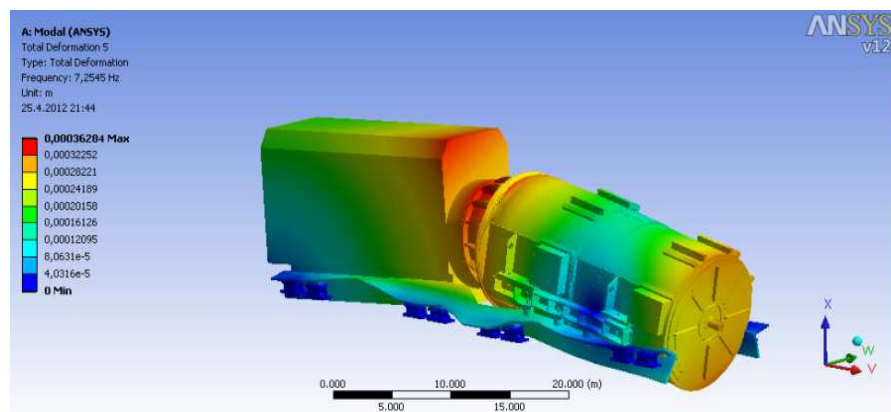
Obrázek P9 – Tvar vlastních kmitů při frekvenci 4,1143 Hz



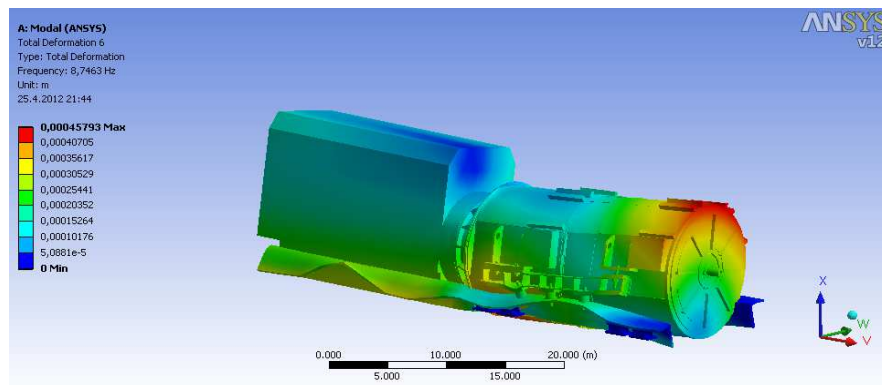
*Obrázek P10 – Tvar vlastních kmitů při frekvenci 4,7235 Hz*



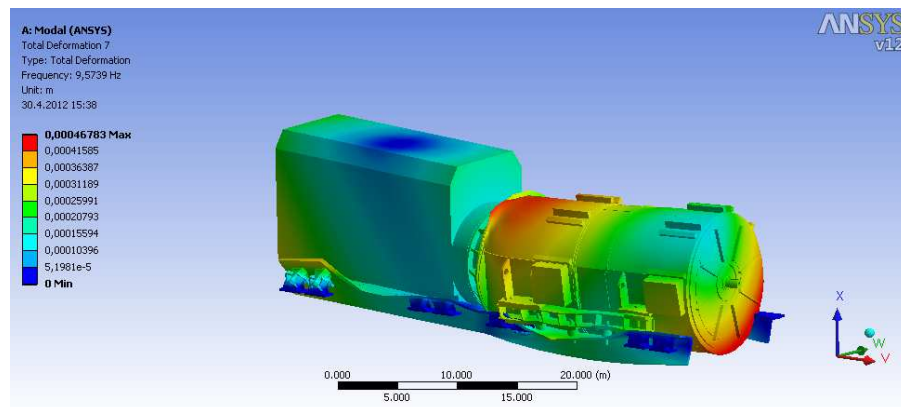
*Obrázek P11 – Tvar vlastních kmitů při frekvenci 5,981 Hz*



*Obrázek P12 – Tvar vlastních kmitů při frekvenci 7,2545 Hz*

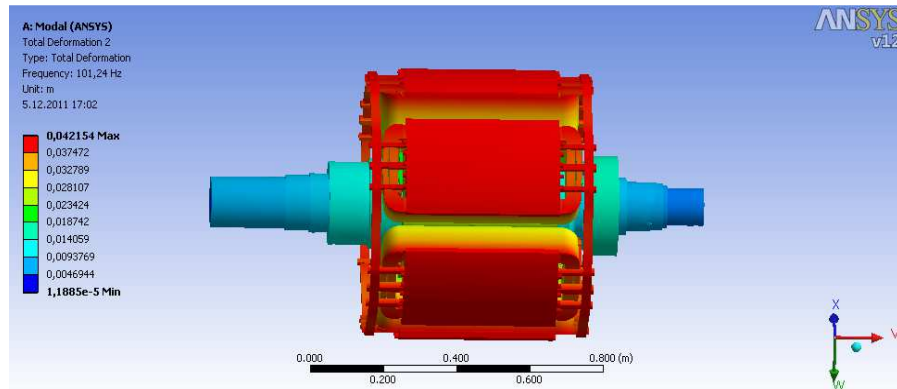


Obrázek P13 – Tvar vlastních kmitů při frekvenci 8,7463 Hz

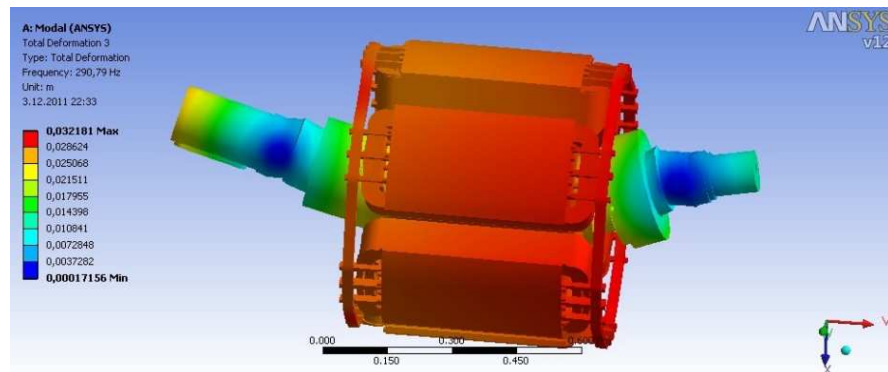


Obrázek P14 – Tvar vlastních kmitů při frekvenci 9,5739 Hz

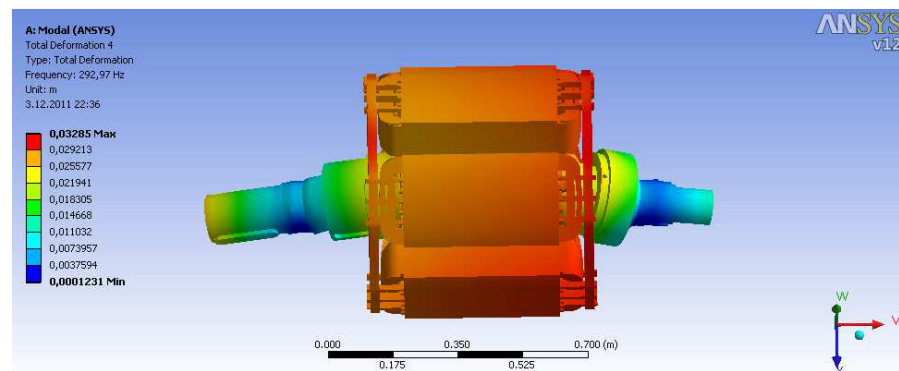
## PŘÍLOHA 3 – Výsledky modální analýzy rotoru hlavního generátoru



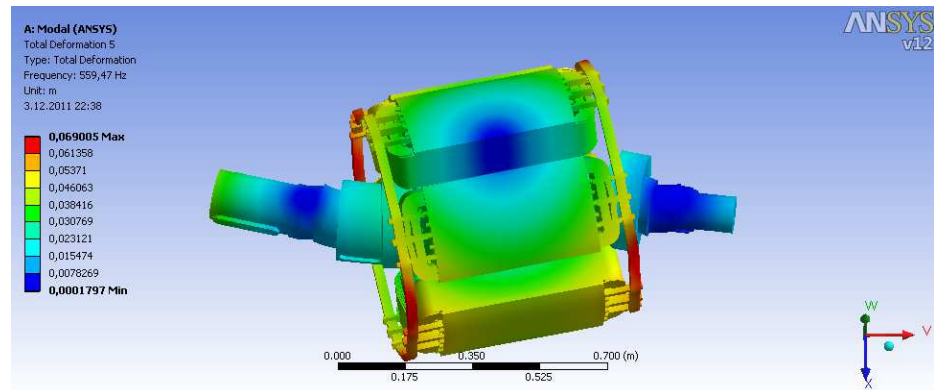
Obrázek P15 – Torzní tvar kmitů, frekvence 101,24 Hz



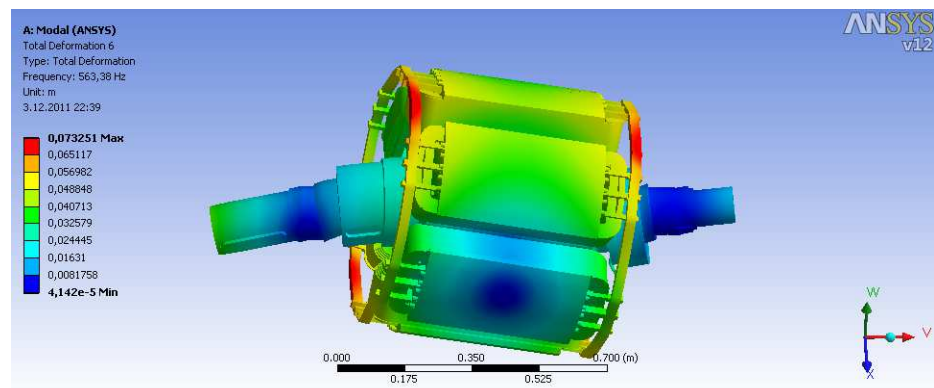
Obrázek P16 – První ohybový tvar kmitů, frekvence 290,79 Hz



Obrázek P17 – První ohybový tvar kmitů, frekvence 292,97 Hz

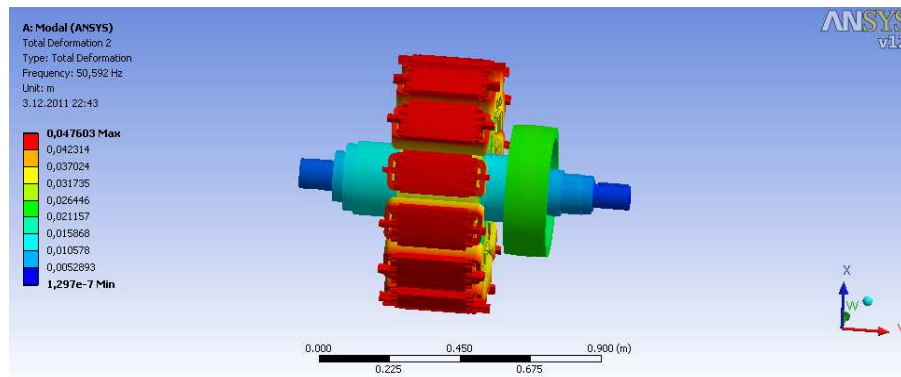


Obrázek P18 – Druhý ohybový tvar kmitů, frekvence 559,47 Hz

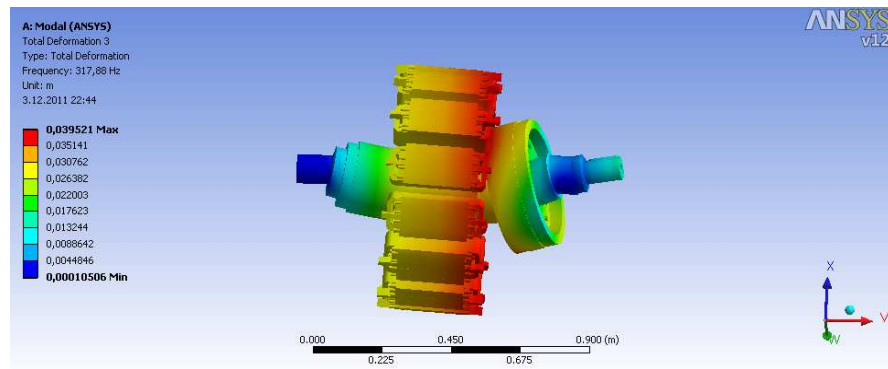


Obrázek P19 – Druhý ohybový tvar kmitů, frekvence 563,38 Hz

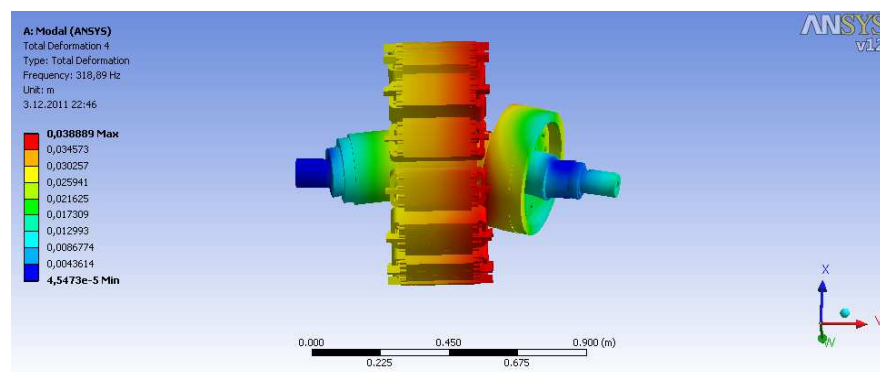
## PŘÍLOHA 4 – Výsledky modální analýzy rotoru topného generátoru



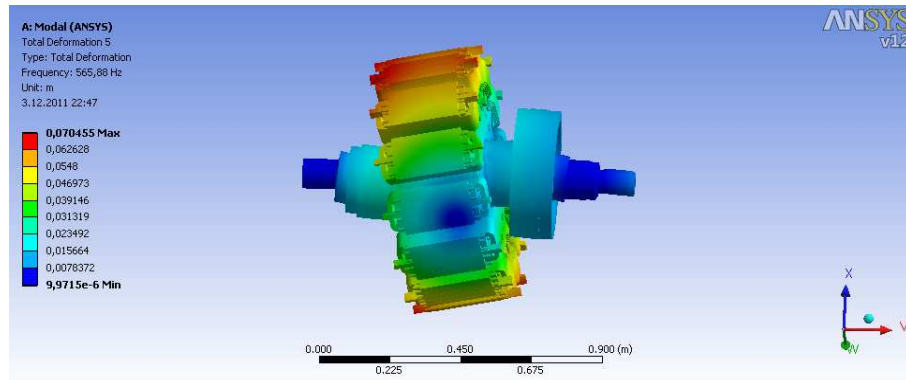
Obrázek P20 – Torzní tvar kmitů, frekvence 50,592 Hz



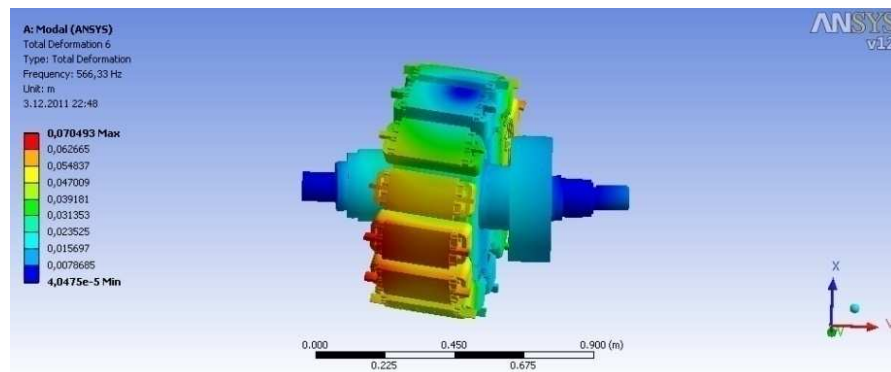
Obrázek P21 – První ohybový tvar kmitů, frekvence 317,88 Hz



Obrázek P22 – První ohybový tvar kmitů, frekvence 318,89 Hz



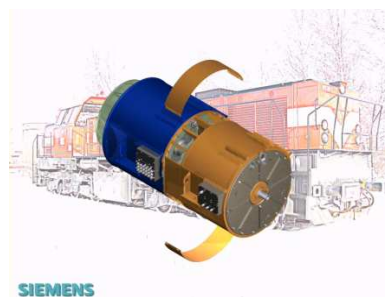
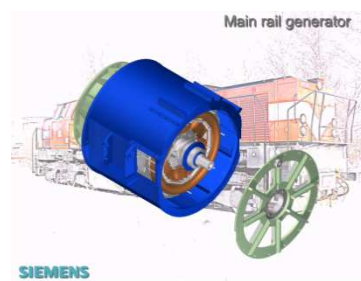
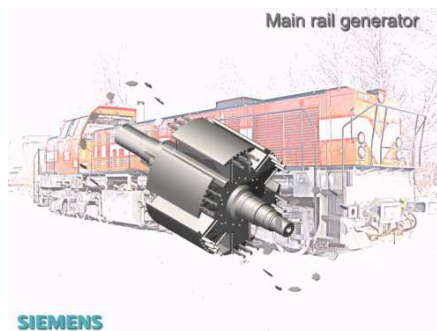
*Obrázek P23 – Druhý ohybový tvar kmitů, frekvence 565,88Hz*



*Obrázek P24 – Druhý ohybový tvar kmitů, frekvence 566,33 Hz*

## PŘÍLOHA 5 – Ukázka animace drážního soustrojí

# SIEMENS



Obrázek P25 – Ukázka vytvořené animace