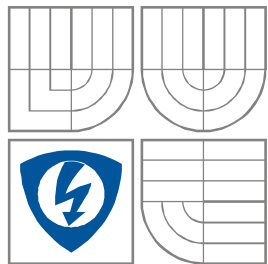


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

TVORBA A ANALÝZA PARAMETRICKÝCH MODELŮ ELEKTRICKÝCH STROJŮ

THE CREATION AND ANALYSIS OF PARAMETRIC MODELS OF ELECTRIC MACHINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PETR CHMELÍČEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Dr. Ing. HANA KUČHYŇKOVÁ

BRNO, 2008



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Chmelíček Petr

Ročník: 3

ID: 78044

Akademický rok: 2007/08

NÁZEV TÉMATU:

Tvorba a analýza parametrických modelů elektrických strojů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popište možnosti modelování v programu Autodesk Inventor 2008.
2. Popište možnosti simulace elektromagnetického pole pomocí programu Ansys Workbench.
3. Vytvořte animovanou prezentaci asynchronního motoru s vnějším rotorem.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Termín zadání: 10.10.2007

Termín odevzdání: 06.06.2008

Vedoucí projektu: doc. Dr. Ing. Hana Kuchyňková

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
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.

LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Petr Chmelíček

Bytem: Drobného 72, Brno

Narozen/a (datum a místo): 27. 2. 1986 v Brně

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc., předseda oborové rady Silnoproudá

elektrotechnika a elektroenergetika

(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
 - diplomová práce
 - bakalářská práce
 - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Tvorba a analýza parametrických modelů elektrických strojů

Vedoucí/ školitel VŠKP: Doc. Dr. Ing. Hana Kuchyňková

Ústav: Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Datum obhajoby VŠKP: 16. 6. 2008

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v*:

- tištěné formě – počet exemplářů 1
- elektronické formě – počet exemplářů 1

* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

.....

Nabyvatel

.....

Autor

Abstrakt

Cílem této práce je popsat a na praktických příkladech demonstrovat možnosti počítačové podpory konstruktérské činnosti. První část obsahuje popis programu Autodesk Inventor, což je jeden z nejvýznamnějších moderních parametrických CAD systémů. Rozebrány jsou základní funkce pro tvorbu modelů, výkresové dokumentace a analýzu návrhu.

Druhá část je zaměřena na demonstraci možností programu Ansys Workbench, což je významný systém pro podporu řešení inženýrských problémů pomocí metody konečných prvků. Je zde uveden základní popis dané metody a programu a jeho aplikace při řešení elektromagnetického pole asynchronního motoru. Součástí této části je také základní popis konstrukce jednofázového asynchronního motoru.

Úkolem poslední části je tvorba animované prezentace modelu asynchronního motoru s vnějším rotorem v modulu Inventor studio.

Abstract

The aim of this bachelor's thesis is to demonstrate facilities of computer aided design on practical tasks. First part contains description of Autodesk Inventor, which is one of the most important modern parametric CAD systems. There are described the basics of modeling, drawing creating and analysis of design.

Second part is oriented on demonstration of capabilities of Ansys Workbench, which is important system for solution of engineering problems by the finite element method. Also there is description of user interface of Ansys, analysis of electromagnetic field in asynchronous motor and description of one phase asynchronous motor.

Task of last part is to create animated presentation of asynchronous motor with outer rotor in Inventor studio.

Klíčová slova

Analýza; Animace; Ansys; Asynchronní motor; Autodesk Inventor; CAD; Magnetické pole; MKP; Parametrické modelování; Workbench.

Keywords

Analysis; Animation; Ansys; Asynchronous motor; Autodesk Inventor; CAD; FEM; Magnetic field; Parametric modeling; Workbench.

Bibliografická citace

CHMELÍČEK, P. Tvorba a analýza parametrických modelů elektrických strojů v CAD systémech. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 50 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Dr. Ing. Hana Kuchyňková.

Prohlášení

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

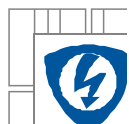
Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících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

V Brně dne

Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Doc. Dr. Ing. Haně Kuchyňkové a ing. Marcelu Jandovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.



OBSAH

1 ÚVOD	12
2 MODERNÍ, PARAMETRICKÉ CAD SYSTÉMY	13
2.1 AUTODESK INVENTOR 2008 PROFESSIONAL	13
2.2 UŽIVATELSKÉ ROZHŘANÍ AUTODESK INVENTOR 2008	14
2.3 GEOMETRICKÉ MODELOVÁNÍ V PARAMETRICKÝCH CAD SYSTÉMECH	15
2.3.1 MODELOVÁNÍ OBJEMOVÝCH DÍLŮ	15
2.3.2 MODELOVÁNÍ PLECHOVÝCH SOUČÁSTÍ	17
2.3.3 MODELOVÁNÍ SESTAV	19
2.3.4 MODELOVÁNÍ SVAŘOVANÝCH SESTAV	21
2.3.5 KNIHOVNA NORMALIZOVANÝCH SOUČÁSTÍ	22
2.3.6 KONSTRUKČNÍ NÁSTROJE	22
2.4 INŽENÝRSKÁ ANALÝZA	24
2.4.1 ANALÝZA FYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ TĚLESA	24
2.4.2 ANALÝZA MECHANISMŮ	24
2.4.3 PEVNOSTNÍ ANALÝZA METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ	25
2.5 TVORBA VÝKRESOVÉ DOKUMENTACE	26
2.6 VIZUALIZACE MODELU	28
2.7 SHRUTÍ VÝZNAMU MODERNÍCH PARAMETRICKÝCH CAD SYSTÉMŮ	29
3 ELEKTROMAGNETICKÉ VÝPOČTY V PROSTŘEDÍ ANSYS WORKBENCH	30
3.1 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ (MKP)	30
3.2 UŽIVATELSKÉ PROSTŘEDÍ ANSYS WORKBENCH	32
3.3 VÝPOČET ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE ASYNCHRONNÍHO MOTORU POMOCÍ METODY KONEČNÝCH PRVKŮ	35
3.3.1 KONSTRUKCE JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU S VNĚJŠÍM ROTOREM.....	35
3.3.2 ÚPRAVA MODELU V INVENTORU PRO POTŘEBY VÝPOČTU V ANSYSU	37
3.3.3 POSTUP ELEKTROMAGNETICKÉHO VÝPOČTU ASYNCHRONNÍHO MOTORU	38
3.3.4 ZHODNOCENÍ PROVEDENÉHO VÝPOČTU	42
3.4 SHRUTÍ VÝZNAMU PROGRAMU ANSYS WORKBENCH	45
4 ANIMACE MODELU JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU S VNĚJŠÍM ROTOREM	46
5 ZÁVĚR	48
LITERATURA	49
INTERNETOVÉ ZDROJE	49
PŘÍLOHY	50



SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 - Integrace CAx systémů do vývojového procesu.....</i>	<i>12</i>
<i>Obr. 2 - Základní uživatelské rozhraní Autodesk Inventor 2008</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 3 - Tvorba základního náčrtu nového tělesa.....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 4 - Různé možnosti tvorby objemového modelu z náčrtu.....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 5 - Příklad použití funkce Zaoblení při finálních úpravách modelu.....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 6 - Tvorba plechových součástí.....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 7 - Použití vazby Vložit pro kompletaci sestavy.....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 8 - Příklad použití adaptivity v jednoduché sestavě.....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 9 - Tvorba svařovaných sestav v prostředí Autodesk Inventrou</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 10 - Nabídka obsahového centra</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 11 - Příklad použití Design Acceleratoru pro tvorbu hřídele.....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 12 - Možnosti simulace mechanismů</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 13 - Pevnostní výpočet metodou konečných prvků</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 14 - Tvorba pohledů odvozených z modelu.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 15 - Výkres součásti vytvořený v modulu tvorby výkresu</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 16 - Animovaná prezentace sestavy v prostředí Inventor Studia.....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 17 - Renderování animace</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 18 - Vytvoření trojrozměrného konečnoprvkové sítě z jednoduchého modelu nosníku.....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 19 - Rozdílné uživatelské rozhraní Ansys Classic a Ansys Workbench</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 20 - Popis uživatelského rozhraní Ansys Workbench</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 21 - Simulation Wizard popisující jednotlivé kroky řešení dané úlohy</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 22 - Konstrukční provedení jednofázového asynchronního motoru s vnějším rotorem.....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 23 - Magnetický obvod asynchronního motoru</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 24 - Možné úpravy modelu před importem do Ansys Workbench</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 25 - Tabulka vinutí.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 26 - Připravený model v Design Modeleru s vytvořeným vinutím a vzduchovým obalem</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 27 - Konečnoprvkový model magnetického obvodu stroje</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 28 - Výsledek výpočtu magnetické indukce v obvodu asynchronního motoru.....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 29 - Zobrazení rozložení magnetické indukce pomocí barevných kontur.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 30 - Zobrazení rozložení magnetické indukce pomocí vektorového zobrazení.....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 31 Celkový pohled na rozložení magnetické indukce ve stroji</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 32 - Tvorba animace prostředí Inventor Studia.....</i>	<i>46</i>



SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 - Tabulka materiálových konstant použitých při výpočtu.....</i>	<i>43</i>
------------------------------------------------------------------------------	-----------

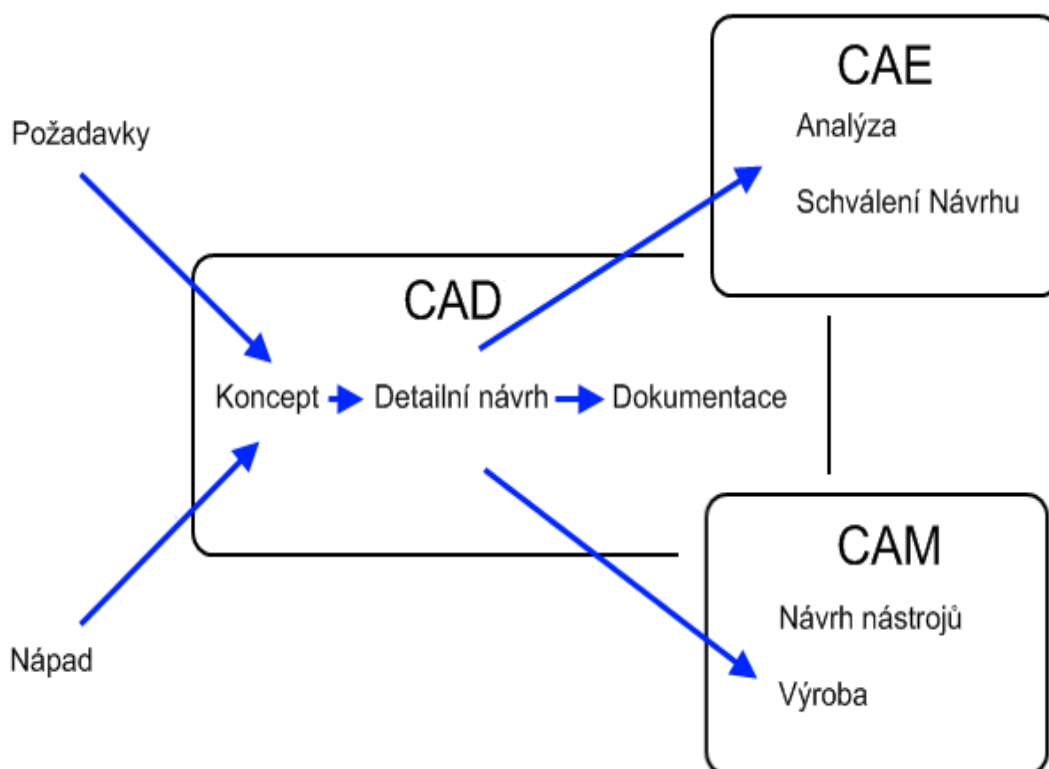
1 ÚVOD

S integrací počítačových technologií do všech oblastí průmyslu došlo k přesunu vývojové etapy výrobků z rýsovacích prken na obrazovky počítačů. Obecně mluvíme o nasazování takzvaných CAx (Computer aided – počítačově podporovaná činnost) technologií, které významně usnadňují a zefektivňují celý proces návrhu (CAD-design), vývoje (CAE-engineering) a výroby (CAM-manufacturing). Cílem této Bakalářské práce je popis možností moderních CAD/CAE aplikací a praktická demonstrace jejich použití při návrhu a analýze elektrických strojů.

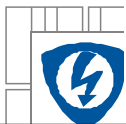
První část práce je věnována moderním parametrickým CAD systémům, základním vlastnostem, uživatelskému rozhraní a metodice práce. Jako příklad byl zvolen Autodesk Inventor Professional 2008, což je jeden z nejdůležitějších zástupců moderních parametrických CAD systémů.

Druhá část se zabývá aplikací metody konečných prvků za použití aplikace Ansys Workbench, což je specializovaný software pro výpočty fyzikálních polí metodou konečných prvků. Je zde uveden základní popis metody konečných prvků a na příkladu jednofázového asynchronního motoru je demonstrován postup při řešení výpočtu elektromagnetického pole v Ansysu.

Poslední část je prakticky orientována na zpracování animace modelu asynchronního jednofázového motoru. Cílem je vytvořit animovanou prezentaci daného stroje pomocí modulu Inventor Studio.



Obr. 1- Integrace CAx systémů do vývojového procesu



2 MODERNÍ, PARAMETRICKÉ CAD SYSTÉMY

CAD systémy jsou softwarové aplikace určené pro použití v úvodních etapách výrobního procesu při návrhu geometrických a rozměrových charakteristik výrobku. Digitální popis součástí a sestav je realizován buď jako klasická 2D dokumentace, nebo jako 3D model, definovaný pomocí objemů a ploch. V prvním případě jde o pouhou náhradu fyzického rýsovacího prkna za digitální, v druhém případě ale jde o kompletní změnu přístupu ke konstruktérství.

V posledních letech se stále více prosazují parametrické 3D CAD systémy, které obsahují řadu inovací, pro zvýšení produktivity a efektivity práce. Jde o komplexní softwarové balíky umožňující modelování virtuálních prototypů součástí a sestav, tvorbu výkresové dokumentace a základní typy analýz. Geometrie modelu je řešena jako částečně nebo plně parametrická, což znamená, že jednotlivé geometrické charakteristiky výrobku jsou řízeny sadou rozměrových parametrů. Výhoda spočívá v možnosti snadné editace, vytváření variací součástí bez nutnosti tvorby nového modelu, a také v možnosti řídit celou geometrii pomocí externí tabulky nebo rovnic. Výkresová dokumentace bývá odvozena přímo z geometrie modelu a je plně asociativně provázána s modelem. Ve většině moderních systémů také nechybí moduly pro základní mechanické výpočty, analýzy mechanismů, animace modelů a pro generování normalizovaných dílů. Práce s virtuálním trojrozměrným prototypem výrobku pomáhá odhalit chyby při konstrukci a významně urychluje proces uvedení produktu do výroby a také šetří náklady spojené s konstrukcí fyzických prototypů.

2.1 Autodesk Inventor 2008 Professional

Jedním z významných zástupců této kategorie je Autodesk Inventor Professional 2008. Jde o vlajkovou loď společnosti Autodesk pro oblast strojírenského konstruování. Veškeré ukázky práce v parametrických CAD systémech, budou demonstrovány právě na tomto programu. Protože je obecná filozofie práce v těchto systémech podobná, většina níže popsanych vlastností platí i pro konkurenční produkty (Solidedge, Solidworks, ...), rozdíl je především v rozdílném uživatelském rozhraní.

Práci v těchto systémech lze rozdělit do čtyř základních kategorií:

1. **Tvorba trojrozměrného modelu** – Systémy obsahují výkonné parametrické modeláře doplněné řadou funkcí pro plošné a objemové modelování.
2. **Inženýrská analýza** – Lze provádět základní pevnostní výpočty a simulace mechanismů.
3. **Tvorba výkresové dokumentace** – Výkres je odvozen z geometrie součástí a je plně asociativní.
4. **Animace modelu** – Lze vytvářet fotorealistické animace výrobku pro potřeby prezentace.

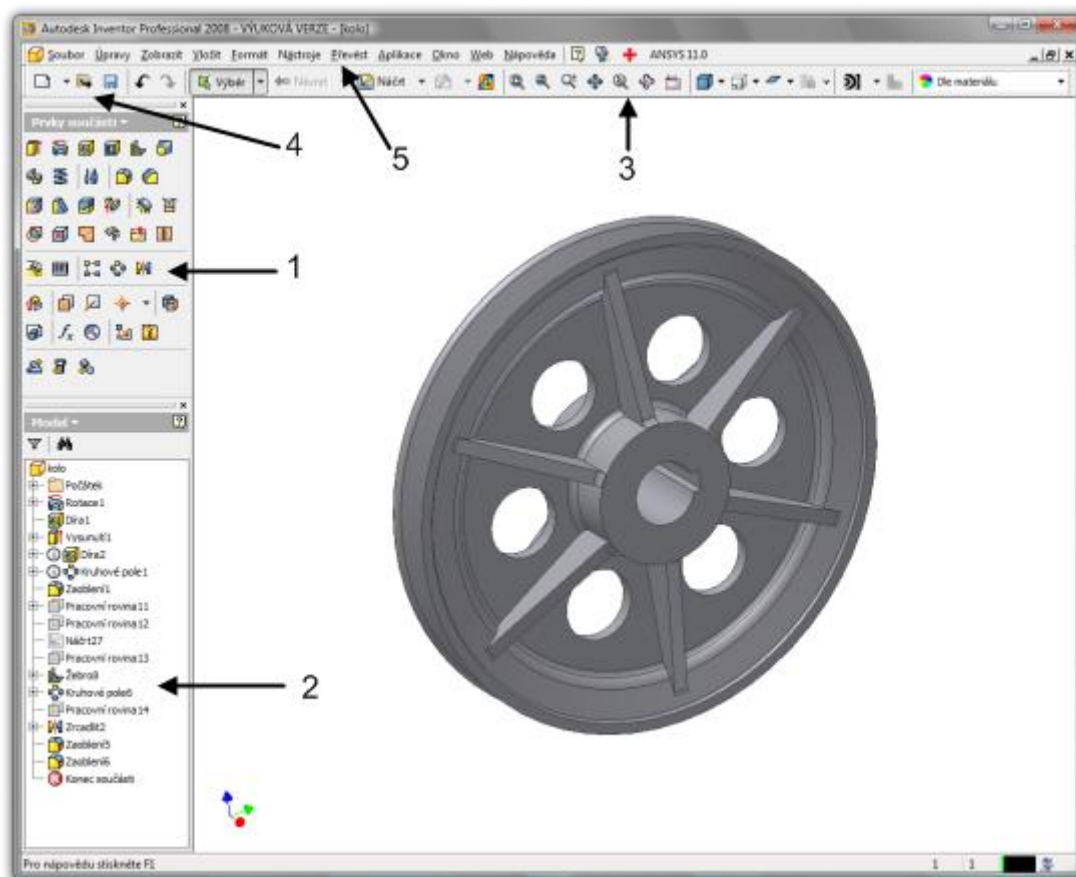
Většinu moderních programů lze dále rozšiřovat pomocí doplňkových modulů, například CAM moduly, pro programování obráběcích strojů a podobně. Dále je možné psát uživatelská makra, Autodesk Inventor obsahuje vývojové prostředí pro VBA (Visual Basic for Application).

2.2 Uživatelské rozhraní Autodesk Inventor 2008

Autodesk Inventor nabízí intuitivní uživatelské rozhraní pro snadnou počáteční orientaci a maximální produktivitu práce. Rozhraní je dynamické, což znamená, že rozložení oken zůstává při práci v různých modulech stejné, ale dynamicky se mění jejich obsah, aby měl uživatel vždy po ruce požadovanou paletu nástrojů. V aktuální verzi programu je vidět značná snaha o podobnost ikon s programem AutoCAD, což by mělo usnadnit přechod dlouholetých uživatelů tohoto softwaru k modernějšímu parametrickému řešení.

Základní uživatelské rozhraní obsahuje:

1. **Panel nástrojů** – Sada nejpoužívanějších nástrojů dynamicky se přizpůsobujících režimu práce. Pro začínající uživatele je možno zobrazit ikony s popisem příkazu.
2. **Prohlížeč součástí** – Obsahuje stromovou strukturu, ve které je zaznamenán každý krok postupu tvorby modelu. Kterýkoliv objekt v této struktuře je možné kdykoli zpětně editovat.
3. **Nástroje pro ovládání pohledu** – Zde je možné pohodlně ovládat pohled na model pomocí nástrojů pro zoom, rotaci a podobně.
4. **Nástroje pro práci se soubory** – Umožňuje vytvářet nové dokumenty, ukládat práci popřípadě importovat geometrii z jiných CAD systémů.
5. **Hlavní menu** - Obsahuje přístup k pokročilým funkcím, konfiguraci programu a kompletní dokumentaci.



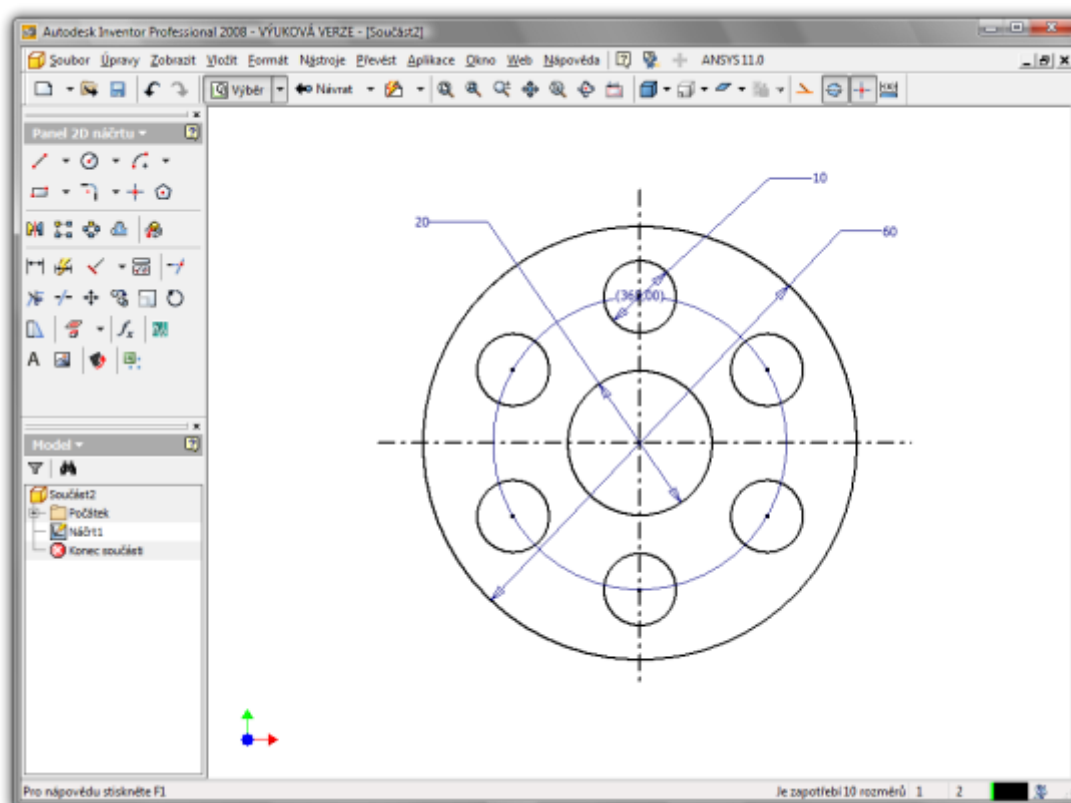
Obr. 2 - Základní uživatelské rozhraní Autodesk Inventor 2008

2.3 Geometrické modelování v parametrických CAD systémech

Prvním krokem při návrhu nového výrobku v prostředí moderních CAD systémů je geometrické modelování součástí a následná kompletace sestav. Následující kapitoly obsahují základní postupy při tvorbě objemových dílů, dílů z plechu, sestav a svařovaných sestav. Dále jsou rozebrány možnosti automatického generování dílů a použití knihoven normalizovaných součástí.

2.3.1 Modelování objemových dílů

Jednotlivá objemová součást je v Autodesk Inventoru reprezentována souborem typu .ipt. Základním kamenem každého dílu je dvourozměrný náčrt. V náčrtovém režimu konstruktér pomocí běžných geometrických tvarů jako je kružnice, přímka a podobně, vytváří základní tvar geometrie modelované součásti. Kreslení v náčrtovém režimu je podobné práci v klasických 2D CAD systémech s tím rozdílem, že jednotlivé entity je možné pomocí kót a vazeb parametrizovat. Dle stupně parametrizace dělíme náčrty na plně parametrické a částečně parametrické, význam tohoto rozdělení bude patrný především v části věnované tvorbě sestav. Postup práce je takový, že se vytvoří přibližný náčrt a následně se okótuje a doplní o vazby. Přímo editací kóty dochází ke změně požadovaného rozměru, čímž se hrubý náčrt zpřesňuje. Vazby určují vzájemnou polohu entit, je možné zajistit jejich kolmost, rovnoběžnost, soustřednost a podobně. Entitám lze dále přiřadit různé barvy a tloušťky čar, což sice nemá vliv na výslednou geometrii modelu, ale náčrt se jeví jako přehlednější.

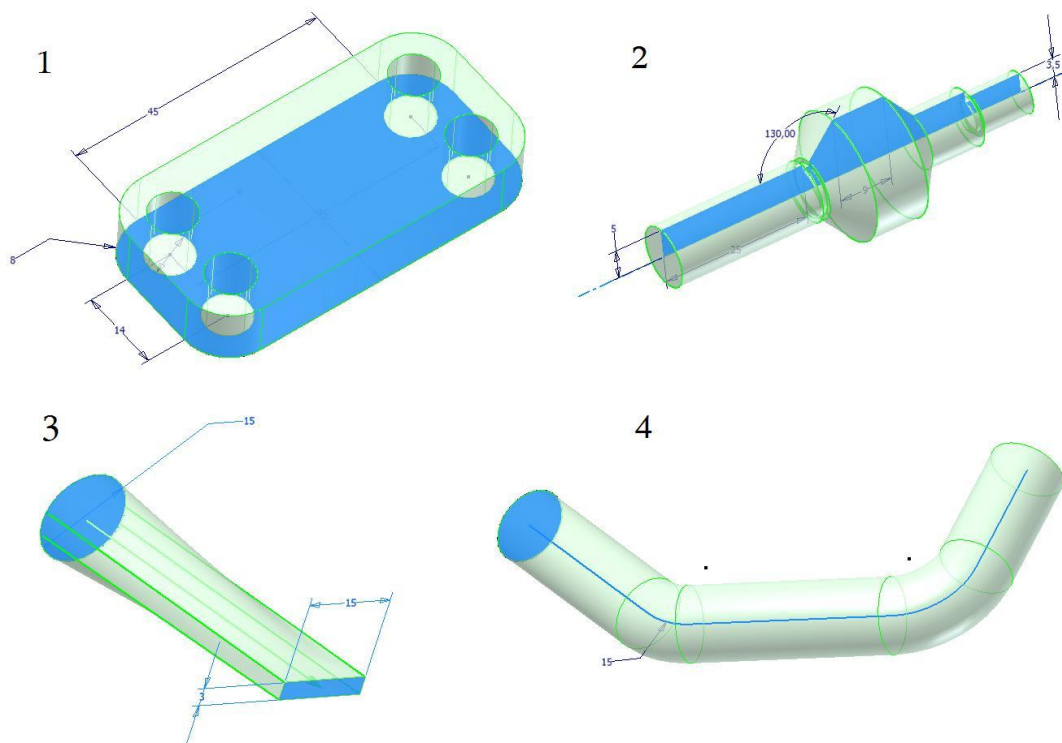


Obr. 3 - Tvorba základního náčrtu nového tělesa

Velkou výhodou je kompatibilita s formátem .dwg, díky kterému je možno importovat výkresy z AutoCADu a použít je při tvorbě trojrozměrného modelu. Dále je také možné importovat tabulku s parametry entit. Veškeré prvky náčrtu je možné kdykoli zpětně upravit a tím i upravit model z náčrtu vytvořený. Po dokončení všech úprav lze z náčrtu několika různými metodami vytvořit objemové nebo plošné těleso.

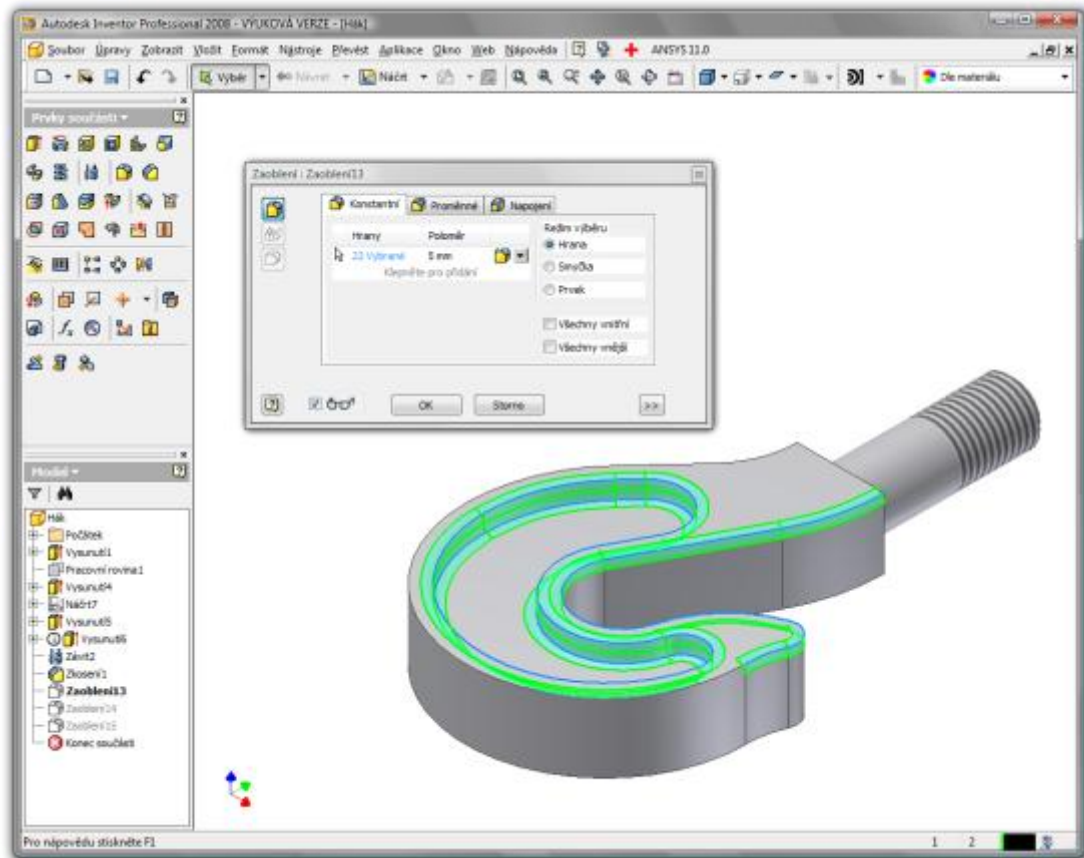
Možnosti tvorby modelu z náčrtu:

1. **Vysunutí** – Profil definovaný v náčrtu je vysunut o zvolenou délku v daném směru.
2. **Rotace** – Profil je rotován okolo definované osy rotace. Tato funkce je vhodná pro tvorbu hřídelů a obecně rotačních součástí.
3. **Tažení** – Vybraný profil je tažen po dané křivce. Křivka je nejčastěji definována pomocí 3D náčrtu. Funkce je možné použít například pro tvorbu řemenů.
4. **Šablonování** – Objemový model vzniká spojením několika profilů na různých rovinách. Hodí se pro plynulé spojení různě tvarovaných profilů.



Obr. 4 - Různé možnosti tvorby objemového modelu z náčrtu

Některou z výše popsaných metod vytvořené objemové těleso lze dále upravovat pomocí rozsáhlé sady nástrojů. Na libovolnou plochu nebo pomocnou rovinu lze umístit nový náčrt a vytvořit další tělesa, s kterými je možné provádět základní Booleovské operace, jako například rozdíl, součet nebo průnik objemů. Dále je možné zkosit nebo zaoblit hrany, vytvořit otvory, na válcové plochy umístit závity, doplnit žebrování a podobně. Důležitou vlastností je také schopnost vytváření a editace ploch. Plochy jsou prostorové geometrické útvary o nulovém objemu. Plochy je možné využít při modelování tvarově složitých plošných útvarů o zanedbatelné tloušťce, popřípadě lze editovat hraniční plochy objemových útvarů. Mezi základní nástroje Autodesk Inventoru pro práci s plochami patří například posunutí, odsazení, náhrada plochy, sešití a další.



Obr. 5 - Příklad použití funkce Zaoblení při finálních úpravách modelu

Každá součást vytvořená v parametrickém CAD systému je popsána tabulkou parametrů. V tabulce je možné jednotlivé parametry logicky pojmenovat a doplnit rovnice, popisující vzájemné vztahy parametrů, popřípadě vytvořit uživatelské parametry. V této vlastnosti spočívá velká síla parametrických CAD systémů. Pomocí vhodně zvolené soustavy rovnic lze jediným parametrem řídit celou geometrii modelu. Soustavu parametrů lze řídit i externí tabulkou vytvořenou například v Excelu.

Dalším využitím tabulky parametrů spočívá v tvorbě tzv. variantních součástí. Model je vytvořen klasickým způsobem, ale jeho jednotlivé parametry jsou řízeny externí tabulkou, která obsahuje několik sad parametrů. Přepínáním mezi sadami parametrů dochází ke změně geometrie. Lze takto vytvořit například sadu modelů ozubených kol s různými parametry průměrů nebo počtu zubů. Tyto variantní součásti se v prostředí Autodesk Inventoru nazývají iPrvky. Vytvořený iPrvek lze přidat do knihovny iPrvků a později použít v jiných projektech. Tyto možnosti výrazně zvyšují produktivitu práce odbouráváním zaběhlých rutin.

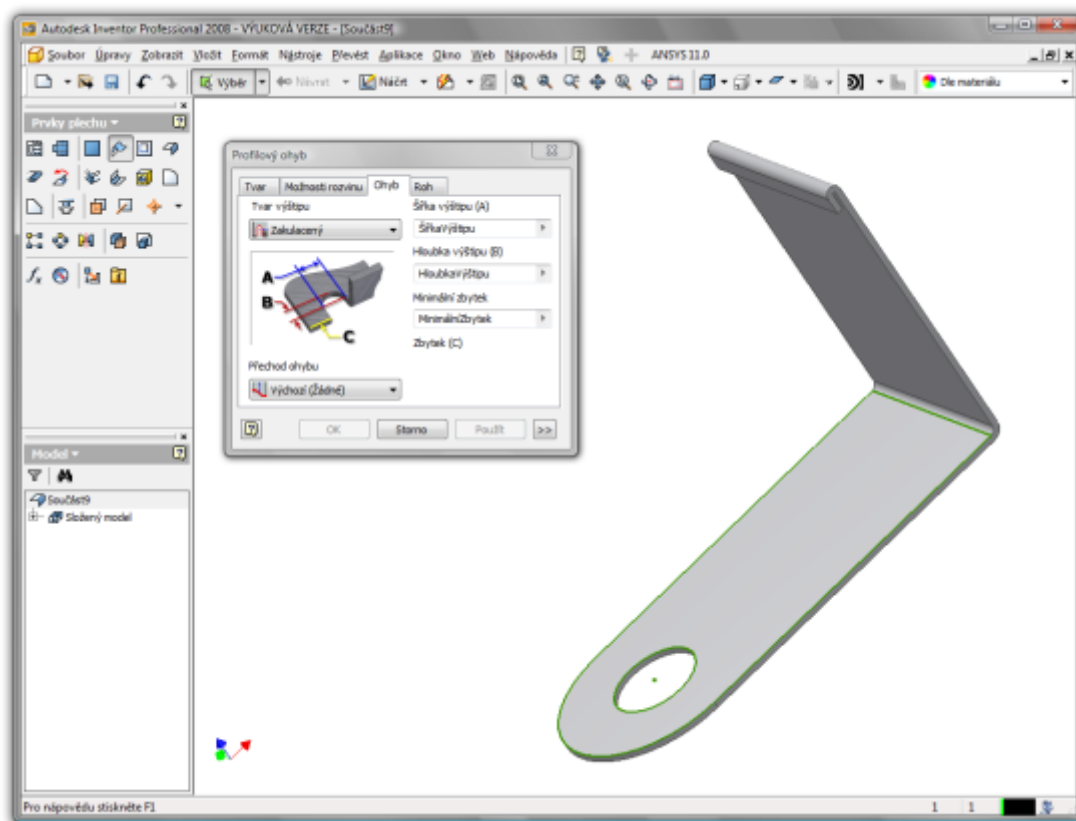
2.3.2 Modelování plechových součástí

Většina moderních parametrických CAD systémů nabízí optimalizované prostředí pro tvorbu plechových dílů. Plechový díl je z hlediska CAD systému běžný objemový díl, a proto jej lze vytvářet i v běžném prostředí pro modelování objemových komponent, s výhodou lze však využít speciální sadu nástrojů.

Postup tvorby plechového dílu:

1. **Materiálové vlastnosti** – Prvním krokem je nastavení materiálových vlastností v nabídce *Styly plechu*. Je nutné definovat typ, tloušťku, mez pevnosti v tahu, parametry ohybu a podobně.
2. **Náčrt** – Náčrt se tvoří podobně jako u obecného objemového modelu.
3. **Vysunutí** – Načrtnutý základní tvar je vysunut o délku danou tloušťkou plechu.
4. **Finální úprava** – Takto vytvořený plechový díl je upraven pomocí funkcí *Ohyb*, *Obruba*, *Lem* a podobně. Funkcí *razník* je možno do dílů vyrazit různé tvary, k dispozici je knihovna často využívaných tvarů (klíčové dírky, konektory, ...).

Z výše uvedeného postupu je zřejmé, že postup modelování odpovídá reálné výrobě, kdy je nejdřív vybrán typ plechu, následně je vyříznut základní tvar a poté je ohýbán do požadovaného tvaru. Program hlídá, jestli je navržený díl reálně vyrobitelný. Například je možné realizovat pouze takové ohyby, u kterých je zaručeno, že u daného materiálu nedojde k překročení meze pevnosti v tahu na vnější straně ohybu a tím nevratnému poškození součásti. V základním objemovém editoru není definice materiálových vlastností nezbytně nutná a lze ji kdykoli v případě potřeby doplnit do již hotového modelu, ale u plechu je to jedna ze základních operací, kterou je nezbytně nutné provést okamžitě po započítí práce na novém dílu.



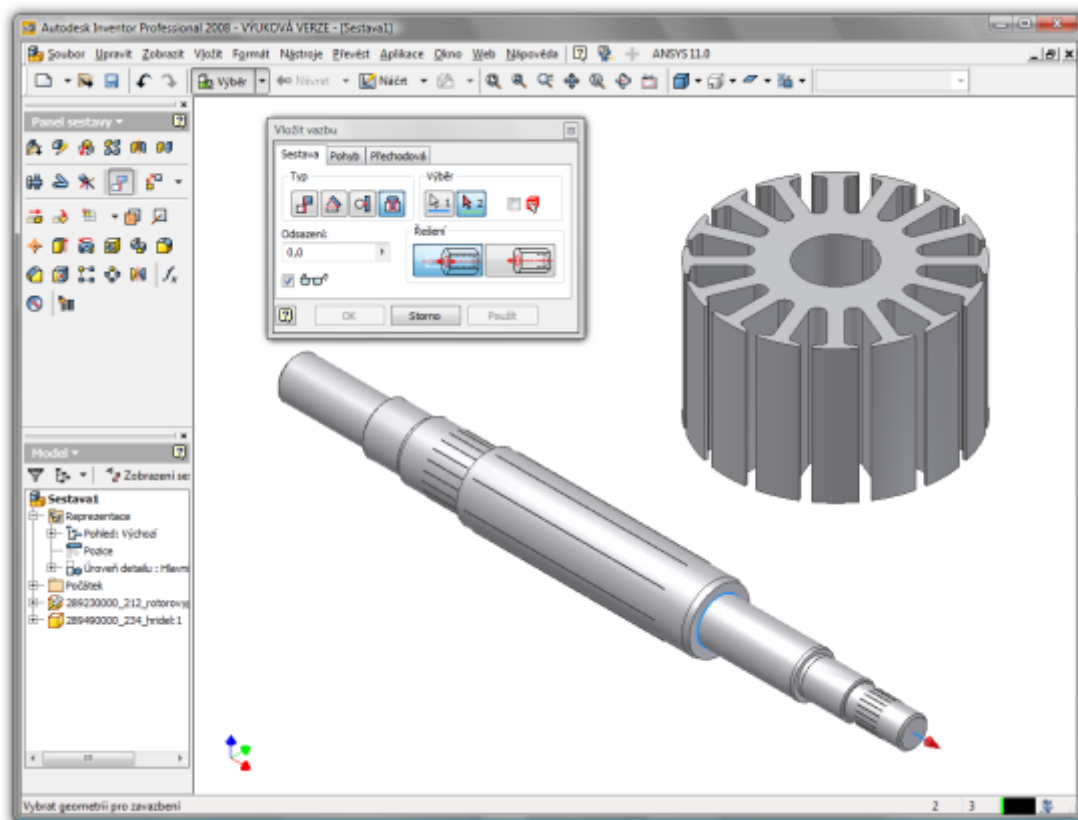
Obr. 6 - Tvorba plechových součástí

2.3.3 Modelování sestav

Důležitou součástí návrhu nových výrobků je kromě modelování jednotlivých dílů také práce se sestavami. Autodesk Inventor obsahuje modul pro tvorbu sestav s širokou paletou nástrojů, díky nimž je možné snadno a efektivně pracovat i s velkým počtem dílů. Sestava je reprezentována souborem typu .iam. Do prostředí sestavy je možné vkládat jednotlivé předem připravené komponenty nebo přímo v prostředí sestavy vytvářet nové.

Po načtení nebo vytvoření nových komponent v režimu sestavy je nutné omezit stupně volnosti jednotlivých dílů tak, aby byla jednoznačně určena jejich poloha v sestavě. Omezení stupňů volnosti se dělá pomocí vazeb. Při použití funkce *Umístit vazbu* se otevře dialog nabízející několik variant vazeb:

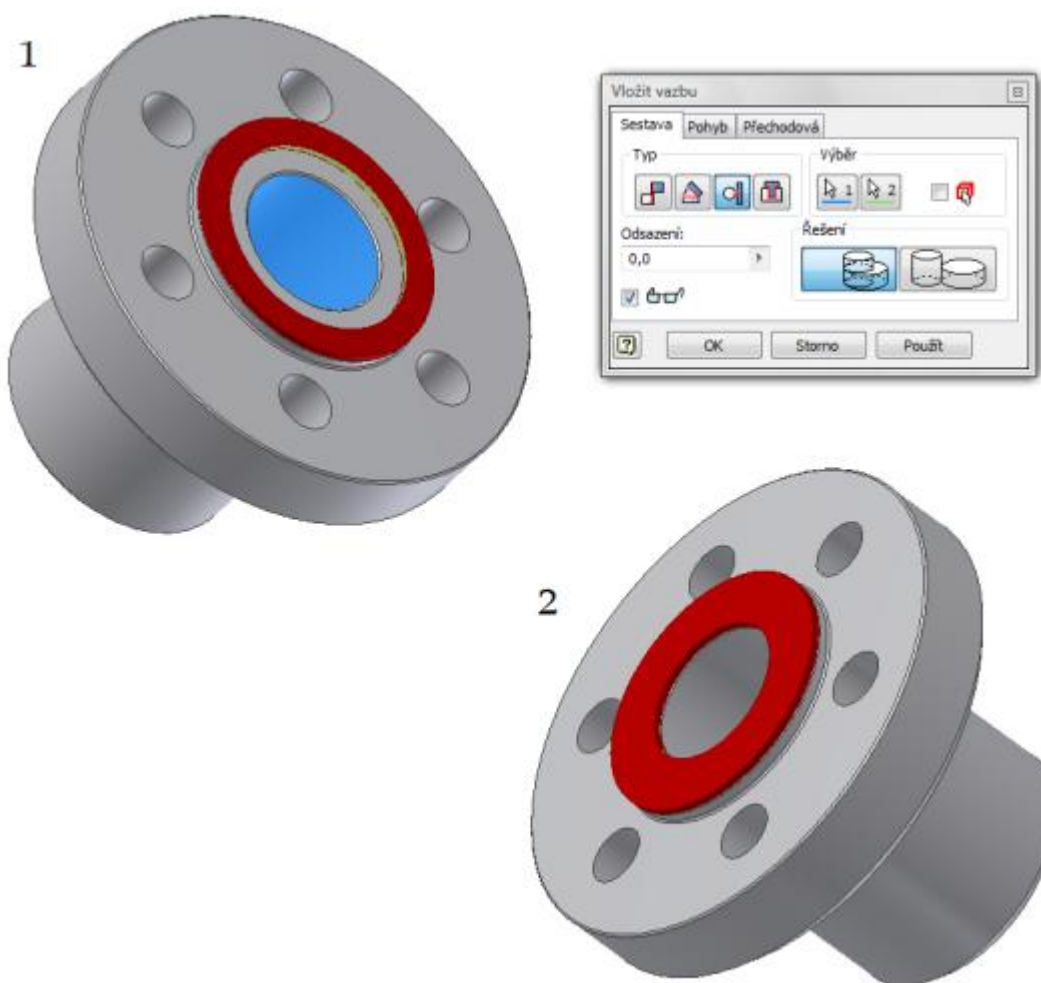
1. **Vazba v sestavě** – Tato funkce umožňuje svázat vazbou rovinné plochy proti sobě, plochy proti sobě pod určitým úhlem, dotyk válcových ploch a vložení jedné součásti do druhé.
2. **Pohybová vazba** – Slouží k vzájemné rotační vazbě dvou válcových dílů nebo válcového a rovinného dílu. Lze použít například při vazbě dvou ozubených kol nebo kola a řemenu.
3. **Přechodová vazba** – Tento typ vazby lze použít pro situaci, v níž je zapotřebí zajistit pohyb komponenty po určité vymezené dráze.



Obr. 7 - Použití vazby *Vložit* pro kompletaci sestavy

Pro určení vzájemné polohy součástí je většinou nutné využít většího počtu vazeb. Ve složitějších sestavách o velkém počtu dílů je nutné zamezit vzájemným kolizím mezi vazbami.

Zcela novým, a v posledních letech často diskutovaným, přístupem k tvorbě sestav je využití adaptivity u částečně parametrických součástí. V kapitole o modelování objemových těles je zmíněno, že model může být řešen jako částečně parametrický - to znamená, že některé rozměry tělesa nejsou pevně určeny rozměrovým parametrem. Pokud u takto definované součásti aktivujeme adaptivitu, je možné její neparаметrizované rozměry určit v sestavě vazbou na ostatní komponenty. V praxi to vypadá tak, že například vytvoříme hrubý návrh hřídele a při vložení do sestavy určíme jeho průměr až ve chvíli, kdy ho vazbou spojíme s ložiskem, do kterého má být vložen. Tento přístup výrazně zjednodušuje práci. Výhodou je i snížení počtu matematických rovnic nutných k definování geometrie. Rovněž tvorba variant modelovaných sestav je jednodušší.

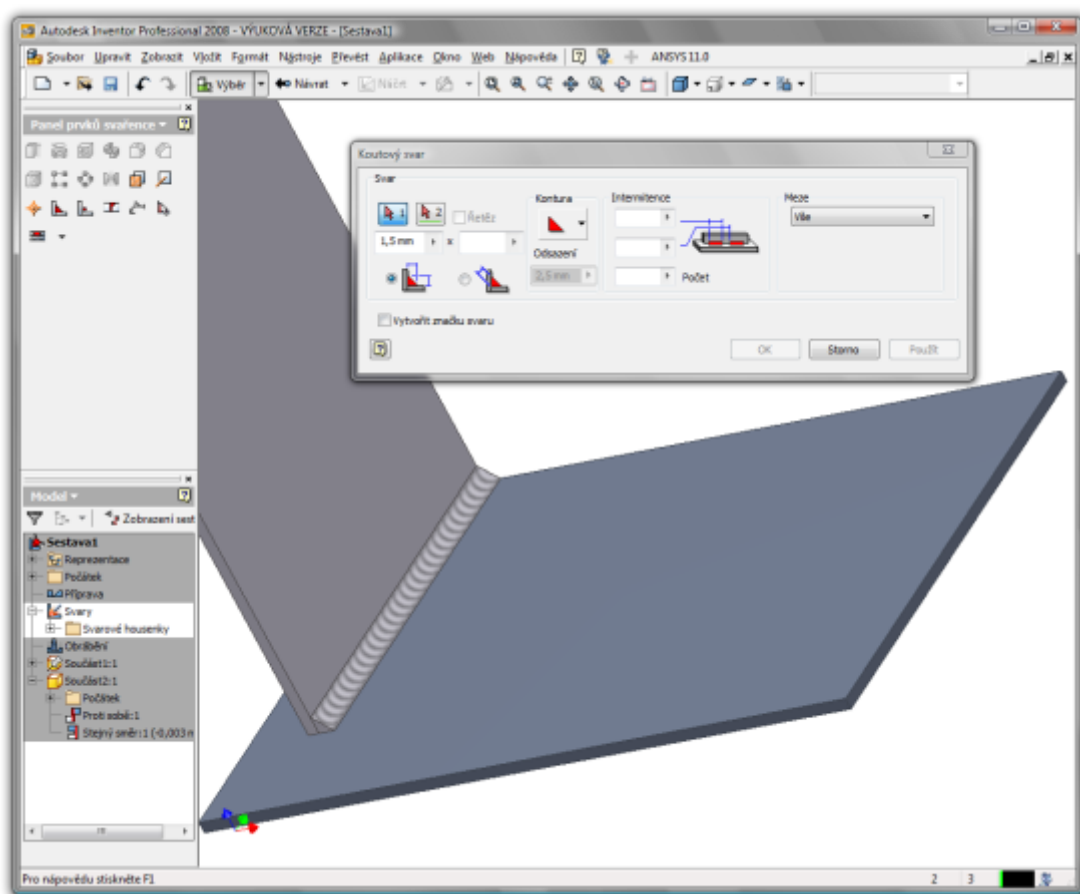


Obr. 8 - Příklad použití adaptivity v jednoduché sestavě

Na Obr. 8 je vidět využití adaptivity při řešení jednoduché sestavy. V náčrtu dílu nebyl u vnitřního průměru těsnění zadán žádný rozměr. Po vložení obou dílů do sestavy a aktivaci adaptivity u komponenty těsnění použijeme vazbu, aby osa příruby a těsnění ležely na jedné přímce. Následně použijeme vazbu pro dotyk sousých válcových ploch. Po aktualizaci zobrazení modelu vidíme, jak se vnitřní průměr těsnění přizpůsobil průměru příruby. Při jakékoli změně řídicího parametru dojde také ke změně řízeného parametru, což v našem případě znamená, že těsnění se bude plasticky přizpůsobovat rozměru příruby.

2.3.4 Modelování svařovaných sestav

Autodesk Inventor disponuje samostatným modulem pro tvorbu a konstrukci svařovaných sestav. Postup tvorby modelu podobně jako u modelování plechových dílů prakticky kopíruje symbolicky postup výroby svařovaných součástí. Jednotlivé díly se vytváří stejně jako u běžných sestav, i vazby mezi díly jsou řešeny stejně. Všechny komponenty sestavy se pomocí vazeb umístí na vybrané pozice, upraví se svařované plochy, vybere se typ svaru a vymodeluje se svarek. Následně je ještě možné obrobení funkčních ploch svarku.



Obr. 9 - Tvorba svařovaných sestav v prostředí Autodesk Inventrou

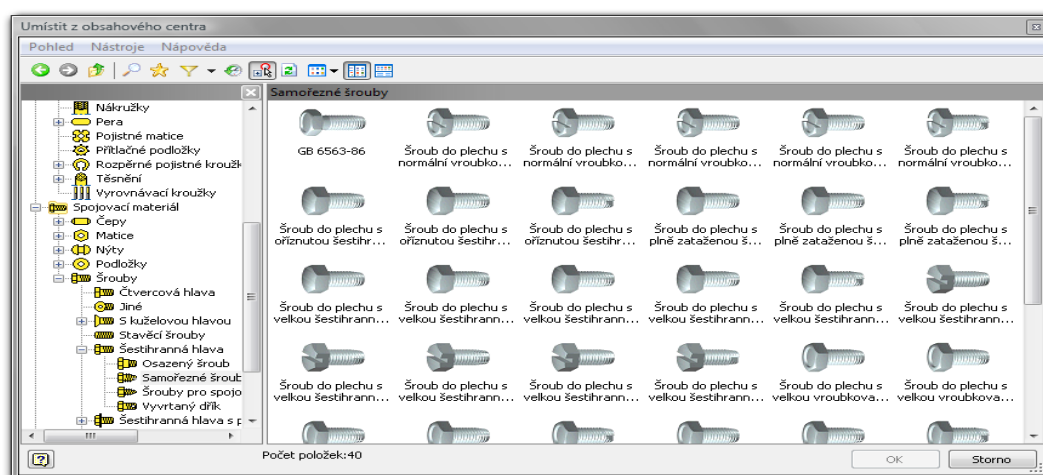
Postup tvorby svařované sestavy:

1. **Modelování součástí** – Lze vkládat hotové součásti nebo vytvářet nové stejně jako v režimu běžných sestav.
2. **Příprava svařování** – Nástroje pro přípravu svařovaných ploch.
3. **Vytvoření svarku** – Jednotlivé plochy jsou svařeny vybraným typem svaru.
4. **Obrábění** – Finální obrobení svařených ploch.

Při modelování svařovaných sestav lze samozřejmě využít adaptivity a dalších funkcí pro práci se sestavami.

2.3.5 Knihovna normalizovaných součástí

Při návrhu nových výrobků se široce uplatňuje použití normalizovaných dílů. V prostředí Autodesk Inventoru je knihovna normalizovaných částí řešena pomocí tzv. *Obsahového centra*. *Obsahové centrum* obsahuje širokou nabídku součástí, profilů a konstrukčních prvků dle světových norem jako je například ISO, ANSI, DIN a podobně. Přínos tohoto řešení je zřejmý, nutnost každý díl modelovat by výrazně snižovala produktivitu práce konstruktéra. V menu obsahového centra je možné snadno hledat komponenty, umisťovat je do sestav, popřípadě nahrazovat za jiné.



Obr. 10 - Nabídka obsahového centra

Načtenou a umístěnou normalizovanou součást můžeme kopírovat a upravovat. Pomocí místní nabídky můžeme měnit její velikost, případně ji můžeme nahradit součástkou jinou.

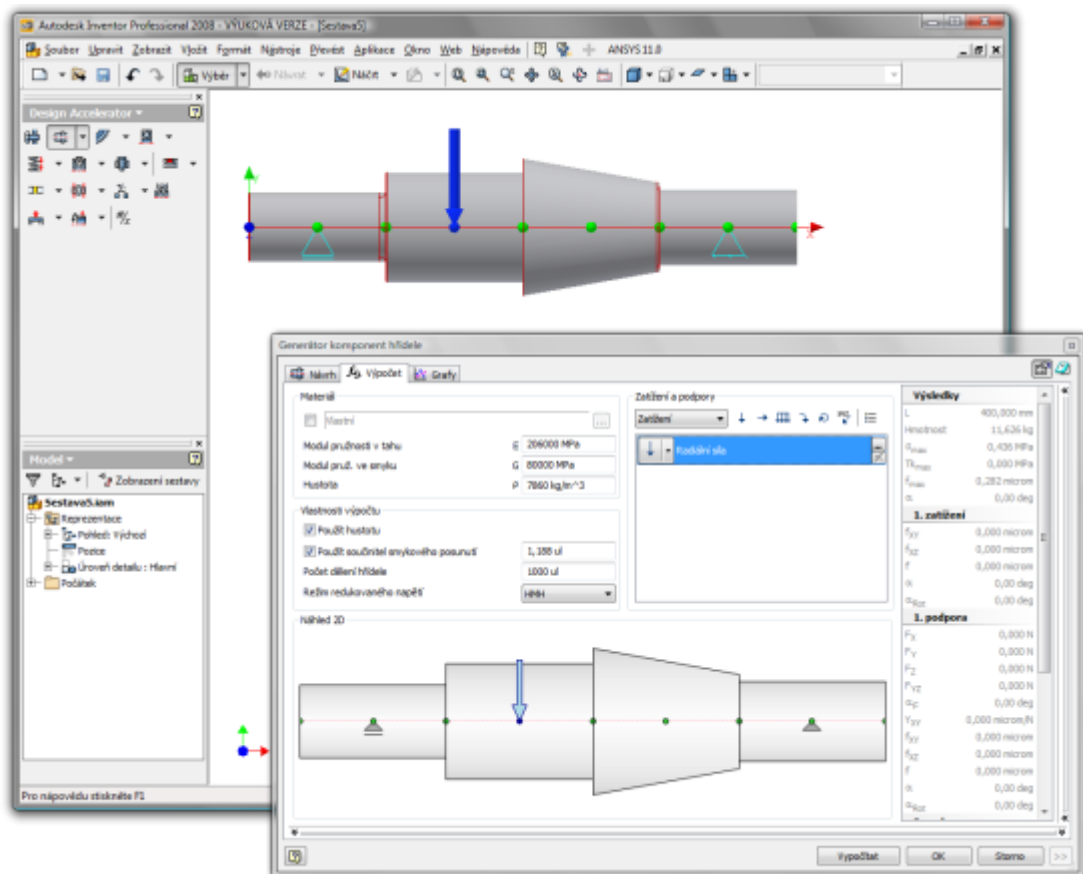
2.3.6 Konstrukční nástroje

Autodesk Inventoru umožňuje generovat běžné konstrukční součásti, jako jsou například hřídele, ozubená kola, pružiny pomocí funkce *Design accelerator*. Řešení jednotlivých úloh probíhá kompletně v prostředí aplikace a významně zkracuje dobu potřebnou pro kompletní návrh dané sestavy. Generování daného prvku probíhá v nabídkovém okně daného prvku vyplňováním charakteristických parametrů dílu. Výhodou je, že je kromě vygenerování výsledného objemu je také možné provést analýzu daného návrhu, zobrazit grafy rozložení síly a podobně.

Kromě toho také obsahuje několik samostatných modulů určených pro návrh:

1. **Generátor rámu** – Tvorba rámu vychází ze základní kostry, tvořené drátovou reprezentací budoucího rámu. Drátový skelet je možno vytvořit pomocí náčrtů v různých rovinách nebo pomocí 3D náčrtu. Pro vytvoření rámu je nutné vybrat profil rámu z široké nabídky obsahového centra nebo vytvořit živitelský. V nabídce tvorby rámu je dále možno specifikovat ukončení a napojení jednotlivých částí na sebe. Je také možné celou sestavu rámu nekonvertovat na svařovanou sestavu a doplnit svarky a opracování funkčních ploch. S pomocí tohoto nástroje je tvorba rámu velice snadná a intuitivní.

2. **Návrh potrubních systémů** – V prostředí sestavy je také možné vytvářet potrubní systémy. Je možné vytvářet tuhé potrubí s tvarovkami, trubek s ohyby nebo flexibilní hadice. Z nabídky obsahového centra se zvolí typ potrubí a definují se počáteční, koncové a průběžné body a výsledné potrubí je vygenerováno. V rámci zvoleného stylu potrubí je možné jednotlivé prvky a trasy editovat podle potřeby.
3. **Návrh kabelových rozvodů** – Dalším užitečným nástrojem je *Návrh Kabelových rozvodů* v podobě prostorových modelů kabeláží. V prostředí Autodesk Inventoru je také možné vytvářet rozpisky a obvodová schémata. Obvodová schémata je také možné vytvářet s využitím AutoCADu.



Obr. 11 - Příklad použití Design Acceleratoru pro tvorbu hřídele

2.4 Inženýrská analýza

Autodesk Inventor v posledních verzích výrazně převyšuje škatulku CAD systémů a svým obsahem zasahuje do oblasti CAE systémů, které sice plně nenahrazuje, ale poskytuje sadu nástrojů pro základní inženýrské výpočty a analýzy. Velkou výhodou je integrace všech nástrojů do jednoho přehledného a intuitivního prostředí, což zvyšuje produktivitu práce a napomáhá odhalit konstrukční nedostatky už v úvodní fázi návrhu.

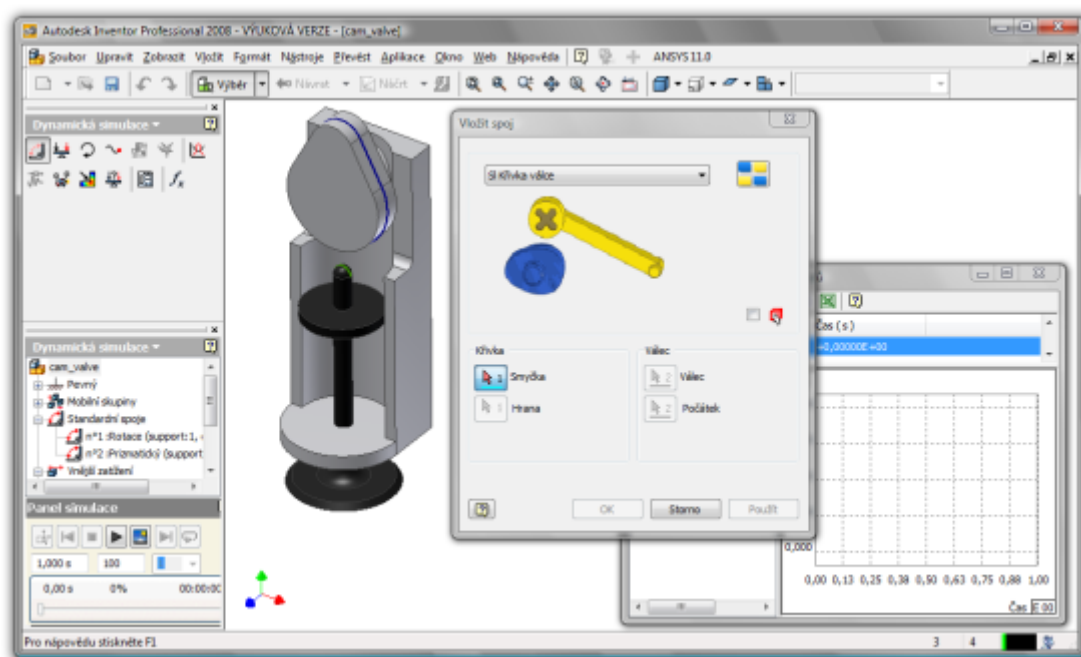
Kromě kontrolních výpočtů při generování hřídelů, ložisek a jiných normalizovaných dílů lze provádět analýzu fyzikálních vlastností těles, analýzu mechanismů a MKP analýzu.

2.4.1 Analýza fyzikálních vlastností tělesa

Při návrhu nových výrobků je nutné dodržet určité hodnoty v povolených mezích. Příkladem například může být návrh dílu, u kterého je nezbytně nutné dodržet požadavek na konkrétní hmotnost. Autodesk Inventor umí spočítat hmotnost dílů z výsledného objemu dílu a ze zadaných materiálových vlastností. Při analýze fyzikálních vlastností je možné sledovat limitní hodnoty daných parametrů. Například při modelování sestavy a aktivaci této funkce program průběžně při modelování kontroluje požadované parametry a v případě jejich překročení upozorní uživatele na nedodržení podmínky.

2.4.2 Analýza mechanismů

Modul analýzy mechanismů umožňuje v předvýrobní fázi návrhu výrobku zkontrolovat jeho funkčnost a chování v reálném provozu. To výrazně snižuje náklady, protože odpadá část výdajů nutných pro realizaci fyzických prototypů a jejich testování. Tento modul také umožňuje přímý export údajů do prostředí pevnostní analýzy metodou konečných prvků, což je pro potřebu kompletního posouzení dané sestavy velice výhodné. Z celé dynamické analýzy je možno vytvořit animaci interakce jednotlivých komponentů.



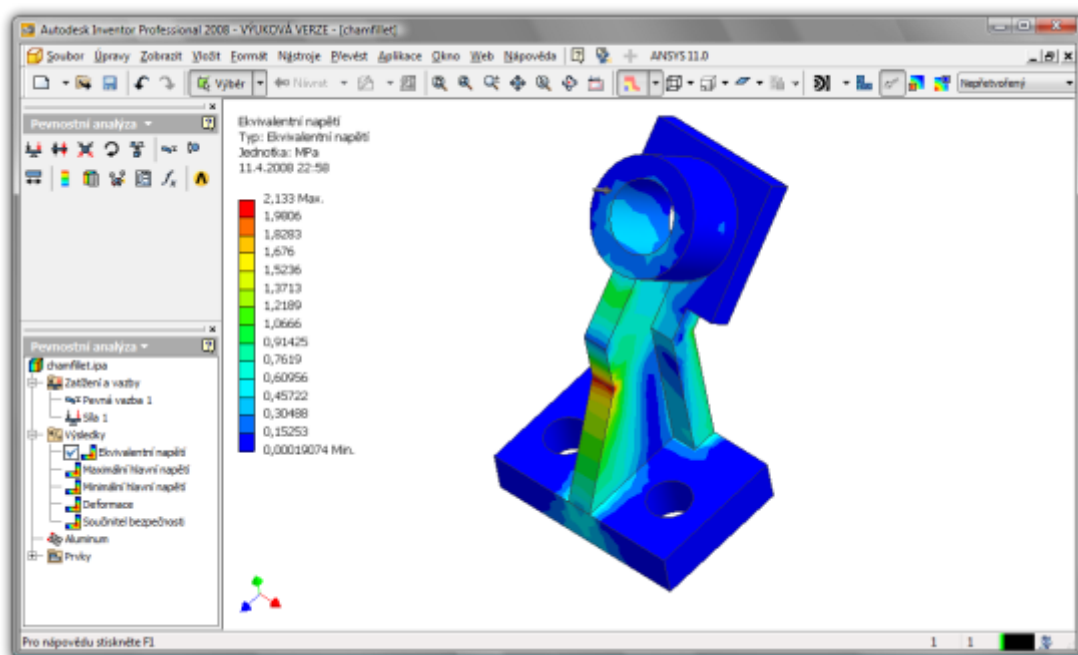
Obr. 12 - Možnosti simulace mechanismů

2.4.3 Pevnostní analýza metodou konečných prvků

Analýza metodou konečných prvků je moderní a často využívaná při řešení nejrůznějších inženýrských problémů. Jde o numerickou metodu, tudíž výsledky jsou přibližné, ale pro inženýrskou praxi dostatečně přesné. V následující podkapitole nebudeme řešit její teoretickou část, ale zaměříme se na její integraci do prostředí moderních CAD systémů. Autodesk Inventor obsahuje samostatný modul pro tento typ výpočtů, který umožňuje základní pevnostní a mechanickou analýzu jednotlivých součástí. Jak už bylo zmíněno v minulé kapitole, velkou výhodou je možnost provázání výpočtu s daty z dynamické analýzy a tím pádem snadné dimenzování jednotlivých dílů sestavy. Použité výpočetní jádro pochází z programu Ansys, což je speciální výpočetní software, jehož základnímu popisu je věnována druhá část této práce. Oproti Ansysu jsou nabízené možnosti MKP analýzy velice omezené, ale pro potřeby okamžité kontroly právě navrhovaného dílu a odhalení kritických míst je plně dostačující. Prakticky všichni zástupci střední kategorie parametrických CAD mají integrované řešení pro výpočty metodou konečných prvků.

Každá MKP analýza sestává z několika základních kroků řešení:

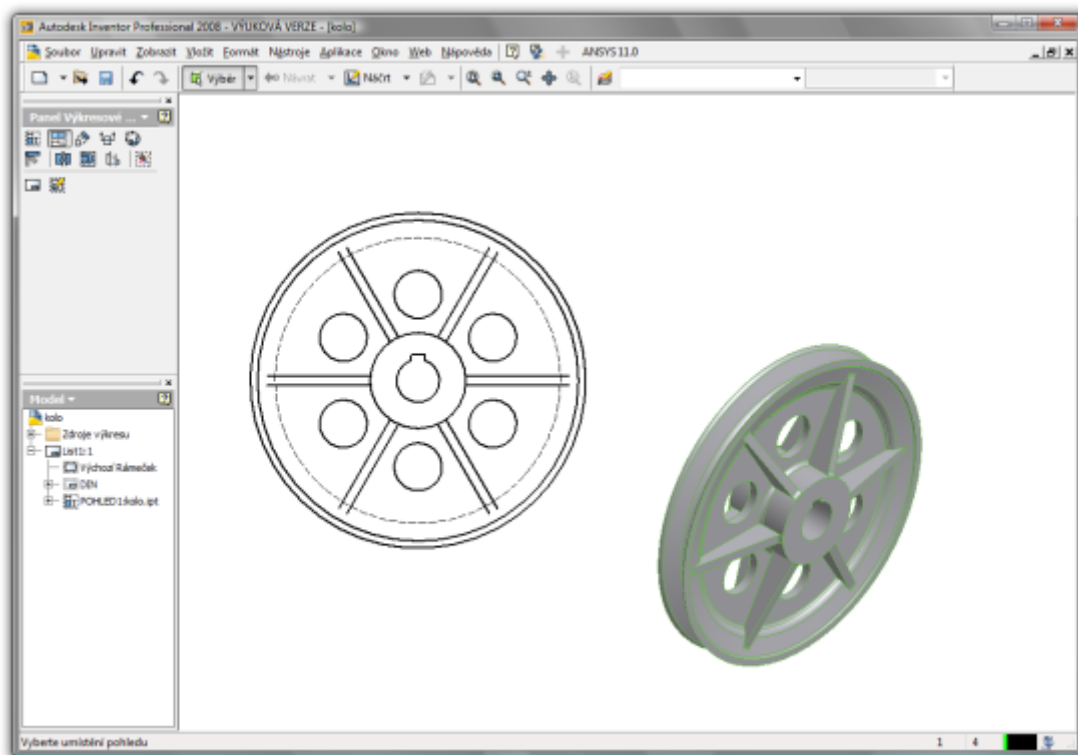
1. V první fázi se importuje geometrie do prostředí pro MKP výpočet, definují se materiálové vlastnosti a doplní se okrajové podmínky a jednotlivé zatížení součástí.
2. V druhé části se objemový model rozdělí na jednotlivé elementy pomocí konečnoprvkové sítě. Nejdůležitějším krokem je správné definování jednotlivých zatížení a okrajových podmínek.
3. V poslední fázi probíhá vlastní výpočet součástí a zobrazení výsledků. Do této poslední fáze významně zasahuje zkušenost a znalosti konstruktéra při vyhodnocování výsledků dodaných programem.



Obr. 13 - Pevnostní výpočet metodou konečných prvků

2.5 Tvorba výkresové dokumentace

I v dnešní době trojrozměrných virtuálních prototypů je nedílnou součástí konstruktérské činnosti vypracování výrobních výkresů. Autodesk Inventor, stejně jako většina jeho konkurentů, obsahuje samostatný modul pro tvorbu výkresové dokumentace s plnou podporou formátu DWG, což je stále nejrozšířenější formát výkresové dokumentace příslušející programu AutoCAD. Metodika tvorby výkresu se ale od AutoCADu výrazně liší - nejedná se o klasické rýsování, ale jednotlivé pohledy jsou přímo odvozeny z virtuálního prototypu. Tento přístup nabízí velice rychlé a jednoduché vytváření výkresů. Zde se také ukazuje propracovanost a kvalita jednotlivých systémů, kdy například vytváření výkresu řezů složitých sestav může nejen trvat velice dlouho, ale může obsahovat i chyby, které je nutné manuálně odstranit.



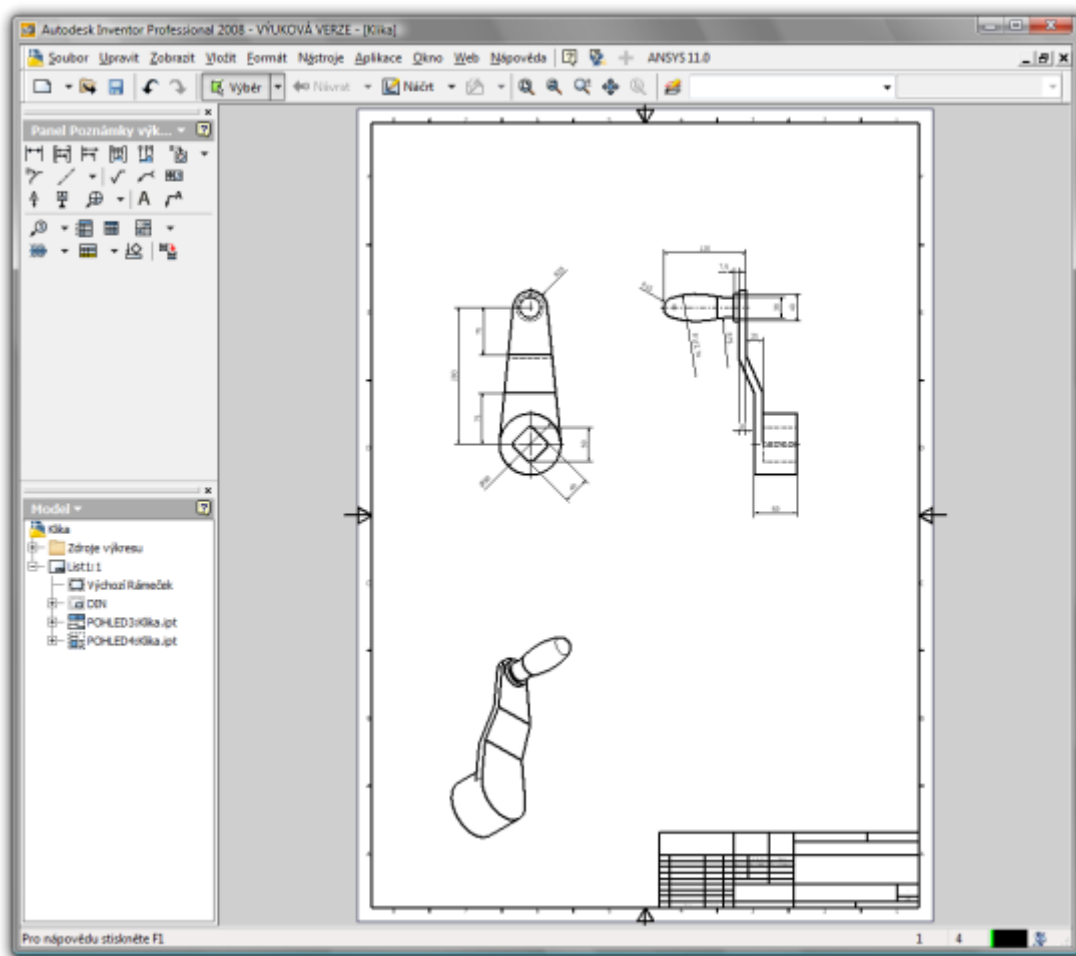
Obr. 14 - Tvorba pohledů odvozených z modelu

Autodesk Inventor umožňuje na výkresových listech definici nových rámečků, rohových razítek a značek. Po zadání příkazu *Definovat nový rámeček*, *nové rohové razítko*, *novou značku* se dostanete do prostředí náčrtu. Objekty vytvoříme nebo využijeme formáty s rámečky, rohová razítka a značky, které již byly navrženy v AutoCADu.

Tvorba pohledů v modulu tvorby výkresové dokumentace se vytváří promítáním 3D modelu do roviny výkresu. Nejdříve se vytvoří základní pohled a z něj jsou odvozeny ostatní pohledy. Na výkrese je možno vytvořit řezy, pomocné řezy, zobrazení detailů, doplnit kusovník. Danou součást lze dle norem okótovat, označit drsnosti a úpravy ploch. Výkres odvozený z modelu součástí je plně asociován a jakákoli změna výchozího modelu změní i výkres. Při tvorbě výkresu lze použít i kóty vytvořené v náčrtech daného modelu.

Díky modulu pro tvorbu výkresové dokumentace lze velice jednoduše a efektivně vytvářet výkresy součástí (plechových i obecných), sestav (svařovaných i obecných) a podsestav. Výhodou je plná asociativita výkresu vzhledem ke všem ostatním modulům, čímž odpadá množství rutinní práce. Některé parametrické CAD systémy umožňují i zpětnou asociativitu mezi výkresem a modelem, kdy úpravou kót výkresu dochází ke změně rozměrových parametrů modelu. Tento přístup Autodesk Inventor plně nepodporuje, ovšem vzhledem k tomu, že tento pracovní postup není příliš častý a vzhledem ke snadné a rychlé úpravě původního modelu, to ovšem nemusí uživatele příliš trápit.

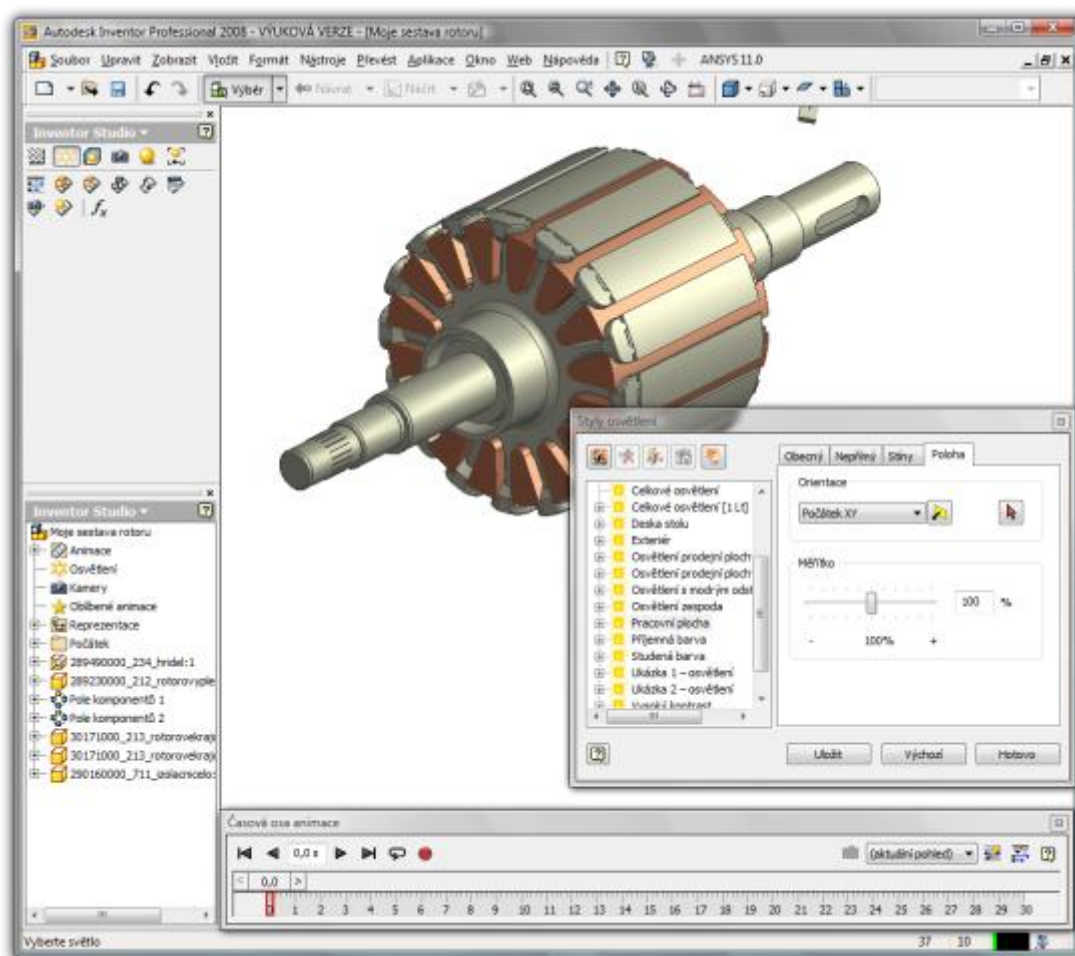
Součástí základní instalace systému Autodesk Inventor je také AutoCAD ve verzi Mechanical. Většina moderních parametrických CAD systémů obsahuje kromě modulu pro vytváření výkresů odvozením z modelu také jednoduchý dvourozměrný neparametrický CAD pro případnou úpravu vygenerovaných výkresů bez návaznosti na model. U Inventoru je toto řešeno právě pomocí AutoCADu, což je světově nepoužívanější CAD a etalon mezi neparametrickými systémy.



Obr. 15 - Výkres součásti vytvořený v modulu tvorby výkresu

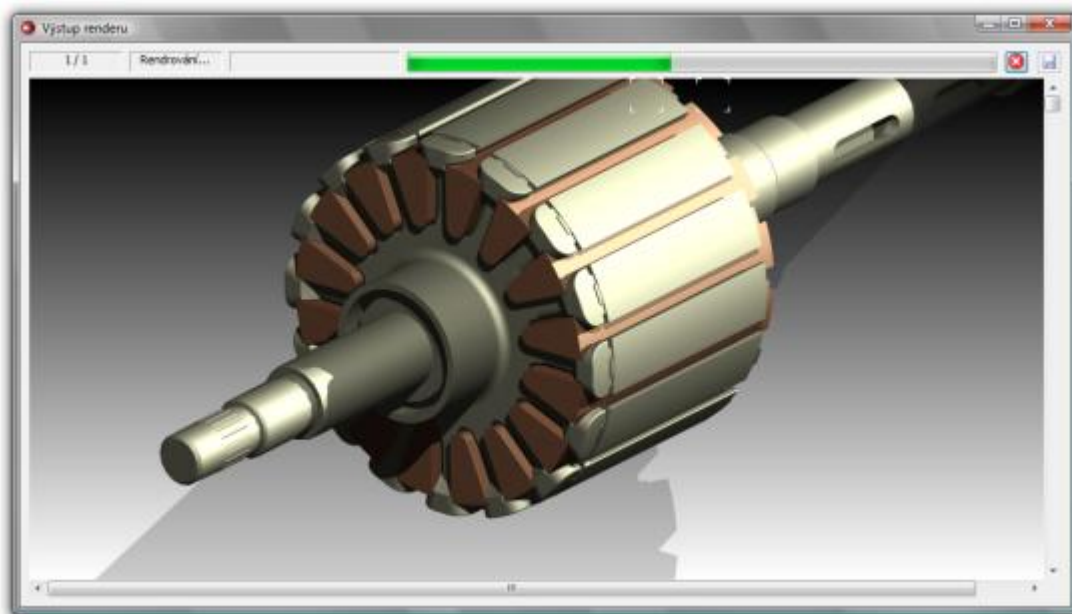
2.6 Vizualizace modelu

Autodesk Inventor zdaleka není software pro tvorbu složitých trojrozměrných animací, ovšem i pro konstruktérskou praxi může být výhodné snadno a efektivně vytvářet fotorealistické vizualizace virtuálních prototypů - ať už pro potřeby komerční prezentace, výukové účely nebo jako názorný montážní návod. Tyto požadavky jsou v prostředí Autodesk Inventoru zastoupeny modulem Inventor Studio, který je přímo integrován do návrhového prostředí a tak je velice snadné přímo z modulu pro návrh sestav přejít k tvorbě animované prezentace.



Obr. 16 - Animovaná prezentace sestavy v prostředí Inventor Studia

V Inventor studio je možné měnit typy povrchů, osvětlení, pozadí animovaného objektu. Lze animovat skládání a rozpady sestav, vazby mezi jednotlivými díly nebo komplexní funkčnost celé sestavy jako v dynamické analýze. Výsledná animace je následně renderována. Renderování je velice náročné a i na výkonných počítačích trvá dlouhou dobu. Čas potřebný k výpočtu scény lze zkrátit vhodnou volbou kvality stínů, rozlišení výsledného obrazu a podobně. Přestože není Inventor určen pro tvorbu animací, je Inventor studio dobře vybaveno a dále rozšiřuje bohatou funkčnost celého systému.



Obr. 17 - Renderování animace

2.7 Shrnutí významu moderních parametrických CAD systémů

- Přechod od dvourozměrné výkresové dokumentace k virtuálním, trojrozměrným modelům výrazně změnilo přístup konstruktéra k řešení problému.
- Parametrické modelování výrazně podporuje kreativitu a představivost.
- Parametrizace modelu umožňuje snadno vytvářet odvozené a variantní součásti a omezuje rutinní činnost.
- Postup tvorby modelu v přehledné stromové struktuře usnadňuje zpětnou editaci jednotlivých kroků.
- Intuitivní práce se sestavami s možností adaptivního modelování.
- Rozsáhlá databáze normalizovaných dílů všech hlavních technických norem významně urychluje návrh nového výrobku, stejně jako automatizované generátory často využívaných konstrukčních celků.
- Snadná a efektivní tvorba výkresové dokumentace odvozené přímo z modelu.
- Asociativita mezi modelem, sestavou a výrobním výkresem součásti významně zjednodušuje zpětnou editaci a návrh je variabilnější.
- Kompatibilita a snadný import dat z AutoCADu umožňují využít starou výkresovou dokumentaci pro tvorbu nových modelů.
- Integrace výpočetních nástrojů pro řešení inženýrských problémů dále zrychluje vývoj nového výrobku a snižuje náklady pro jeho uvedení na trh.
- Snadná tvorba efektních animovaných prezentací výrobků.

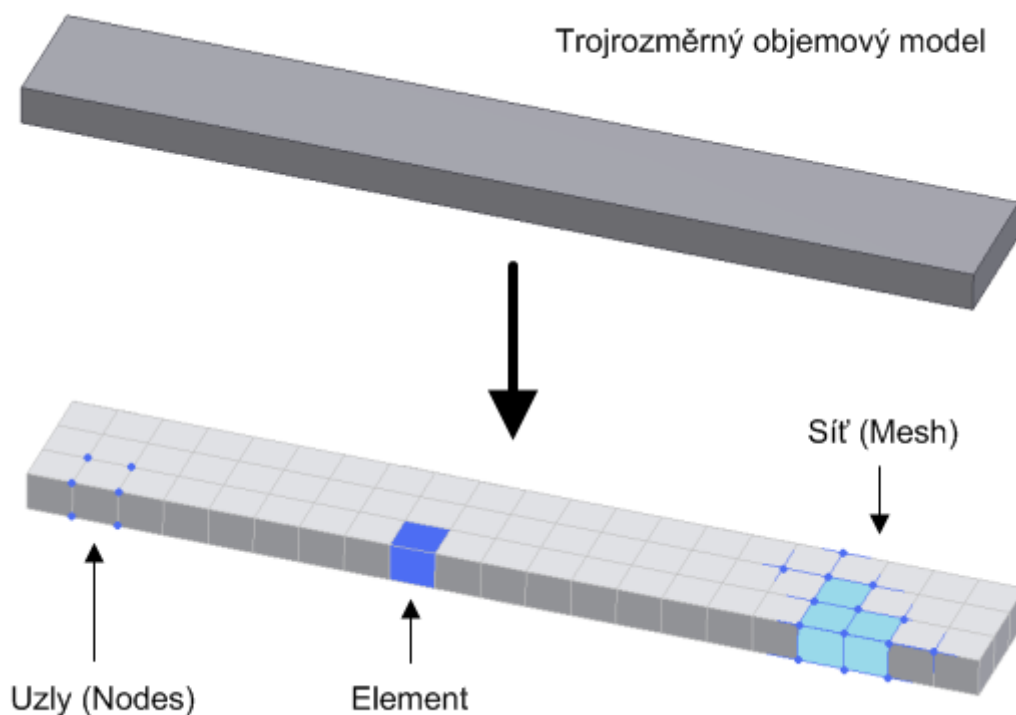
3 ELEKTROMAGNETICKÉ VÝPOČTY V PROSTŘEDÍ ANSYS WORKBENCH

Cílem této kapitoly je popsat možnosti elektromagnetického výpočtu v prostředí specializovaného výpočetního programu Ansys Workbench. Ansys je jedním z nejvýznamnějších softwarových balíčků pro výpočty metodou konečných prvků. Kapitola obsahuje základní popis metody konečných prvků, popis konstrukčního provedení jednofázového asynchronního motoru s vnějším rotorem, popis uživatelského rozhraní ANSYS Workbench 11.0 a postup práce při elektromagnetickém výpočtu daného stroje.

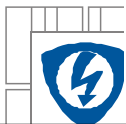
3.1 Metoda konečných prvků (MKP)

Metoda konečných prvků je v současné době jednou z nejvyužívanějších metod pro numerické řešení inženýrských problémů popsanych diferenciálními rovnicemi v oblasti mechanických a elektromagnetických výpočtů, obecně v případech, kdy exaktní řešení není možné nebo efektivní. Značné rozšíření a praktické nasazení dosáhla tato metoda především díky prudkému rozvoji výpočetní techniky v posledních desetiletích.

Metoda konečných prvků je založena na diskretizaci spojitého kontinua, což znamená, že spojitá úloha je rozdělena na konečný počet prvků (elementů), jednotlivé elementy se spolu stýkají v uzlech a dohromady tvoří takzvanou konečnoprvkovou síť. Řešení dané úlohy je následně vypočteno v jednotlivých uzlech sítě.



Obr. 18 - Vytvoření trojrozměrného konečnoprvkové sítě z jednoduchého modelu nosníku



Metoda poskytuje přibližné řešení problému. Přesnost metody přímo závisí na počtu elementů. Čas potřebný k výpočtu se zvyšuje s rostoucím počtem elementů, takže základem správného řešení je optimální volba počtu elementů a jejich rozložení v rámci modelu. Síť je vhodné z hustit v místech, kde je nutné dostat přesnější výsledky, naopak v místech mimo oblast zájmu může být elementů méně. Hodnoty mimo uzly sítě jsou získány interpolací mezi hodnotami jednotlivých uzlů.

Řešení úlohy metodou konečných prvků pomocí počítače lze obecně rozdělit do několika kroků:

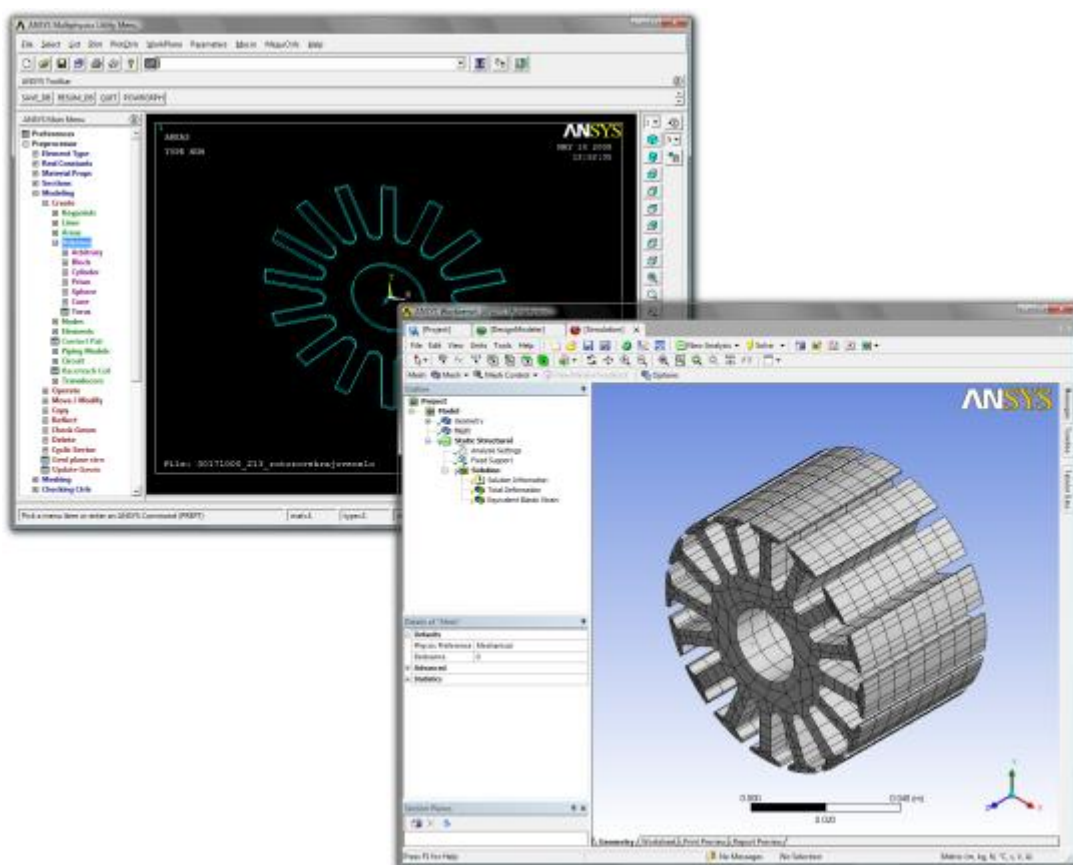
- **Preprocessing** (příprava modelu) – V tomto kroku se tvoří model, definují vlastnosti elementů a sítě, zadávají okrajové podmínky a jednotlivé zatížení. Model může být vytvořen přímo v prostředí příslušné aplikace pro výpočet nebo importován z externího CAD systému. Při vlastním modelování je nutné přemýšlet nad tím, jak zredukovat čas nutný pro výpočet a přitom dosáhnout požadované přesnosti. Toho lze docílit například využitím symetrií. Tvorbou modelu přímo souvisí také s dimenzionalitou dané úlohy. Spoustu trojrozměrných úloh lze řešit také jako dvojrozměrné, což výrazně redukuje počet elementů a zrychlí řešení. S dimenzionalitou úlohy také souvisí otázka volby elementu. U jednoduchých pravoúhlých tvarů lze použít krychle/čtverce, složitější tvary lze lépe vyplnit pomocí jehlanů a podobně. Během vytváření sítě je nutné předem zvážit, ve kterých oblastech je nutné více elementů a síť patřičně z hustit. Dále je pro jednotlivé části nutné zadat materiálové vlastnosti jako je měrná tepelná kapacita, Poissonova konstanta nebo relativní permeabilita. Všechny konstanty lze zadávat jako pevnou hodnotu nebo také pomocí naměřených křivek.
- **Solution** (řešení úlohy) – Ve chvíli, kdy je konečnoprvkový model hotov, lze přejít k vlastnímu řešení úlohy. Prvním krokem je nastavení vlastní analýzy, tedy definice typu, počátečních podmínek a podobně. Z hlediska typu lze provádět statické, transientní i harmonické analýzy s i bez vlivu nelinearit. Počáteční podmínky vycházejí z typu analýzy, například pro tepelnou to může být určitá teplota prostředí. Druhým krokem je definice zatížení a okrajových podmínek. Na jednotlivé objemy, plochy nebo i na samostatné elementy, popřípadě uzly, lze zadat zatížení dle typu prováděné analýzy. V případě, pro příklad, pevnostní analýzy lze zadat síly působící na různé části modelu, pevné ukotvení částí nebo třeba působení momentu. Po zadání všech okrajových podmínek a zatížení lze spustit vlastní výpočet úlohy.
- **Postprocessing** (vyhodnocení úlohy) – Vyhodnocení úlohy je nejdůležitější částí řešení problému. Zobrazení výsledků se nejčastěji zobrazuje jako barevné kontury, přičemž různá barva vyjadřuje různou amplitudu zobrazované veličiny. Těžiště této části ovšem neleží na použitém softwaru nebo metodě, ale na řešiteli. Správné vyhodnocení výsledků klade vysoké nároky na zkušenost a znalost dané problematiky. Velice nebezpečná je v tomto případě slepá víra, že to, co program spočítá, je správné řešení úlohy. Stejně jak je klíčové správně vytvořit model a zadat zatížení, tak je důležité správně interpretovat výsledky.

3.2 Uživatelské prostředí Ansys Workbench

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

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

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

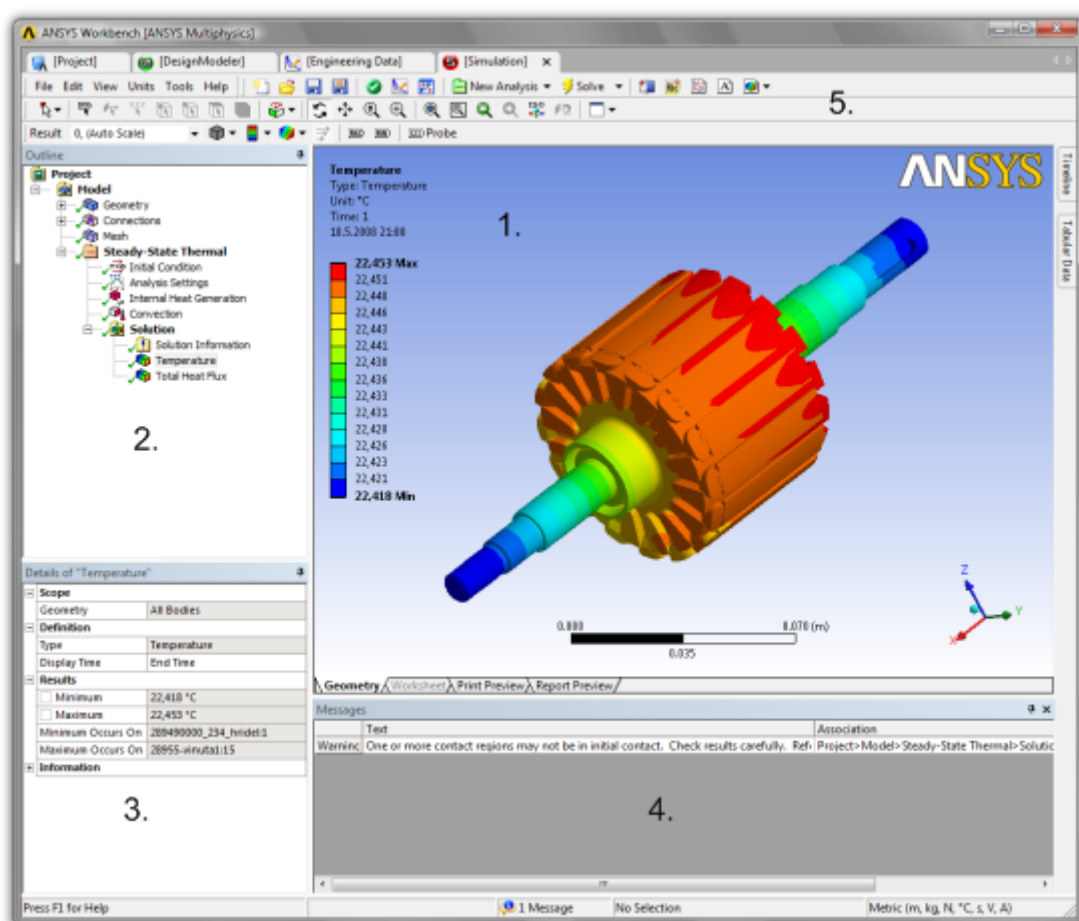


Obr. 19 - Rozdílné uživatelské rozhraní Ansys Classic a Ansys Workbench

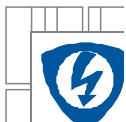
Po spuštění programu se nabízí volba započítání nového projektu. Každý projekt v Ansys Workbench sestává z modelu, sítě (mesh) a simulace. Všechny tyto kroky jsou reprezentovány v prostředí vlastním nezávislým modulem, všechny ale využívají podobné grafické rozhraní, takže základní popis rozhraní bude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

Rozhraní sestává z těchto částí:

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

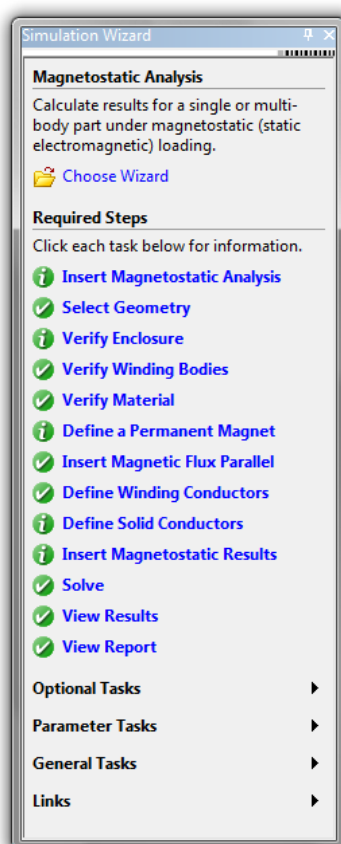


Obr. 20 - Popis uživatelského rozhraní Ansys Workbench



Postup práce po vytvoření nového projektu je takový, že uživatel nejdříve vytvoří požadovanou geometrii v modulu *Design Modeler* (v tomto modulu lze provést i import požadované geometrie z externího CAD systému), následuje vytvoření konečnoprvkové sítě, což lze udělat jednak v prostředí pro tvorbu meshe a jednak v modulu pro simulaci, a následně se v prostředí simulace zadají jednotlivé zatížení a podmínky a výpočet je spuštěn pomocí tlačítka *Solve*.

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



Obr. 21 - Simulation Wizard popisující jednotlivé kroky řešení dané úlohy

Jak už bylo řečeno výše, uživatelské rozhraní je značně přizpůsobeno moderním parametrickým CAD systémům, což je dobře patrné například při srovnání s programem Autodesk Inventor, do něž je také integrován jednoduchý výpočetní nástroj s jádrem od společnosti Ansys.

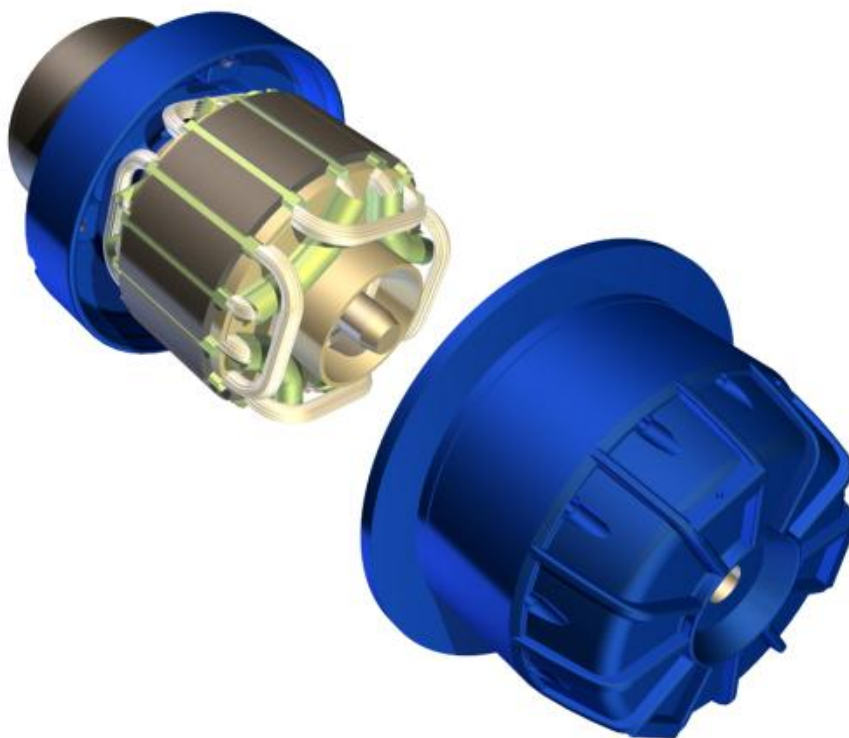
Přestože Ansys Workbench neobsahuje veškerou funkcionalitu Ansys Classic, jde o výkonný nástroj pro řešení inženýrských problémů s uživatelským rozhraním, které je schopný efektivně ovládat i začínající uživatel. Vývoj této nadstavby Ansysu neustále pokračuje a s každou novou verzí dochází k výraznému rozšíření možností. V budoucnu lze očekávat produkt, který bude nabízet širokou funkcionalitu spojenou s intuitivním grafickým rozhraním a vysokou efektivitou práce.

3.3 Výpočet elektromagnetického pole asynchronního motoru pomocí metody konečných prvků

Tato kapitola je zaměřena na praktickou demonstraci výpočtu elektromagnetického pole jednofázového asynchronního motoru s vnějším rotorem. Kompletní sestava vytvořená v Autodesk Inventoru bude upravena pro potřeby výpočtu, následně importována do prostředí Ansys Workbench a poté bude provedena simulace. Cílem této činnosti není ani tak spočítat přesné hodnoty reálného stroje jako spíše demonstrovat možnosti kooperace parametrických CAD systémů s výpočetními nástroji pro simulaci pomocí metody konečných prvků.

3.3.1 Konstrukce jednofázového asynchronního motoru s vnějším rotorem

Asynchronní motory jsou pro svou konstrukční jednoduchost a vysokou provozní spolehlivost nejrozšířenějším typem elektrického motoru. V našem případě budeme řešit jednofázový asynchronní motor v provedení s vnějším rotorem. Jednofázový asynchronní motor je konstrukčně řešen stejně jako běžný trojfázový s tím rozdílem, že vinutí statoru je rozděleno na vinutí hlavní a vinutí pomocné (rozběhové). Nejběžnější provedení vinutí je, že hlavní vinutí zabírá 2/3 drážek, v našem případě ovšem zabírá 1/2 drážek. Pokud napájíme hlavní vinutí z jedné fáze, tak dochází ke vzniku stojatého magnetického pole, které ovšem motor neroztočí. Pro rozběh motoru je v obvodu pomocného vinutí zapojen v tomto případě kondenzátor, který způsobí fázový posun mezi proudem v hlavním a pomocném vinutí, což má za následek vznik točivého magnetického pole, které motor roztočí. Po rozběhu je pomocné vinutí odpojeno.



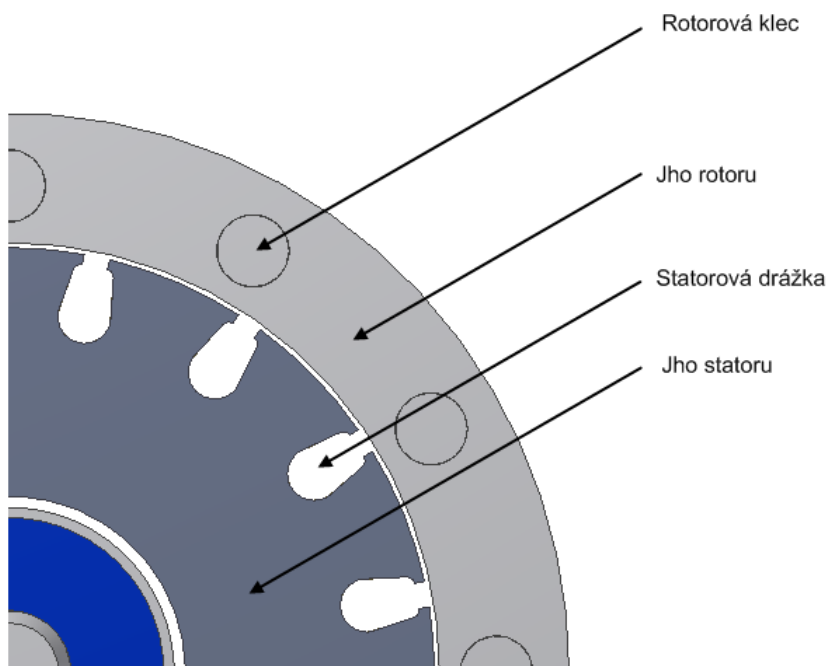
Obr. 22 - Konstrukční provedení jednofázového asynchronního motoru s vnějším rotorem

Motor modelovaný v této práci je v provedení s vnějším rotorem, což znamená, že uvnitř stroje je pevný stator se statorovým vinutím a vnější plášť stroje tvoří rotor s klecovou kotvou. Tato konstrukce je obzvláště vhodná například pro pohon ventilátoru, k čemuž je určen i tento konkrétní stroj. Statorový paket je proveden z plechů, ve kterých je 16 drážek, přičemž polovinu zabírá hlavní a polovinu rozběhové vinutí. Celý statorový paket je nasunut na statorové kostře, která je opatřena otvory se závity pro montáž motoru a na zadní straně také krytou svorkovnicí pro připojení stroje k síti. Vnější rotor je tvořen jako jeden kompaktní celek, který obsahuje klecovou kotvu a z vnější strany je upraven pro montáž ventilátoru a krytí statoru. Rotor je nalisován na hřídeli a přes dvojici kuličkových ložisek je spojen se státorem.

Simulovaný stroj má tyto jmenovité parametry:

- Jmenovitý výkon: 400 W.
- Jmenovité otáčky: 1450 ot/min.
- Jmenovitý proud: 2,9 A.
- Motor je rozbíhán pomocí kondenzátoru o kapacitě 60 μ F.
- Hmotnost: 5 Kg.
- Objem: 5dm³.

Pro potřeby elektromagnetického výpočtu je nejdůležitější magnetický obvod stroje, skládající se ze statorového jha se statorovými drážkami, ve kterých je uloženo statorové vinutí, rotorového jha s tyčemi rotorové klece a vzduchové mezery mezi rotorem a státorem.



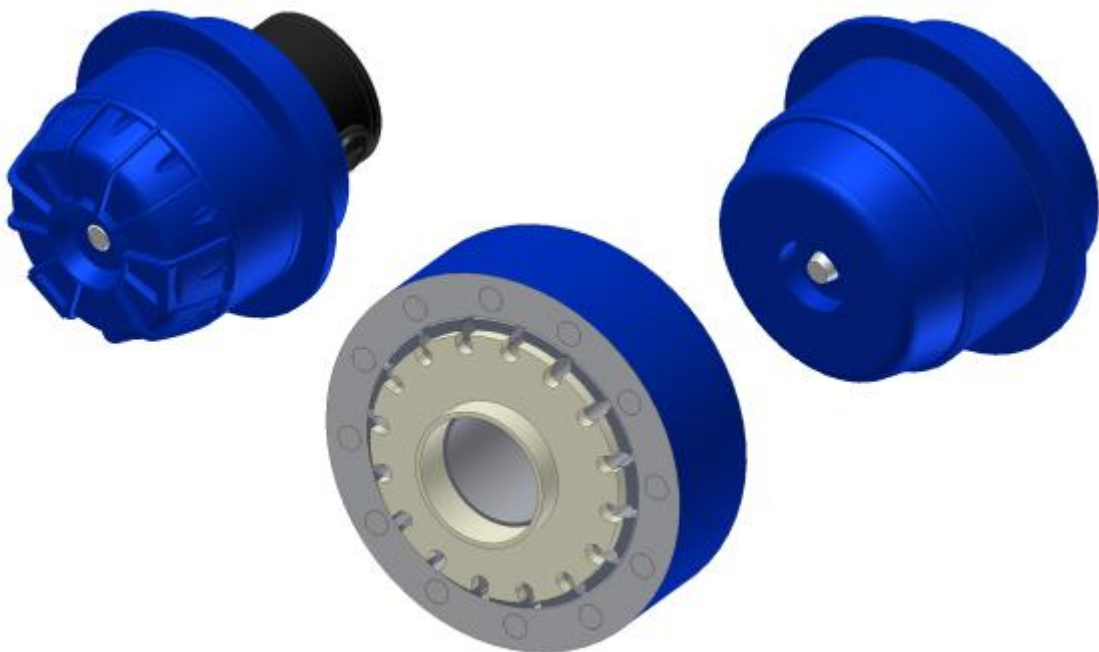
Obr. 23 - Magnetický obvod asynchronního motoru

3.3.2 Úprava modelu v Inventoru pro potřeby výpočtu v Ansysu

V podkapitole zabývající se základním popisem metody konečných prvků byl zmíněn velký vliv správně provedené konečnoprvkové sítě na dobu výpočtu a především jeho přesnost. Pro potřeby našeho výpočtu je k dispozici přesný výrobní model jednofázového asynchronního motoru vytvořený v prostředí Autodesk Inventor. Tento model je možné přímo importovat do prostředí Ansys Workbench a vytvořit síť. Ovšem takto vytvořený model pro výpočet bude obsahovat velké množství elementů v místech konstrukčních detailů a prvků, které nemají na přesnost výsledku zásadní vliv, ale dobu výpočtu značně prodlužují.

Proto je vhodné nejdříve provést následující úpravy:

- Odstranění všech částí, které nemají na výpočet vliv. Na našem konkrétním modelu lze zanedbat kompletní sestavu svorkovnice s vnějším krytím. Celkový model lze pro potřebu elektromagnetického výpočtu také zjednodušit pouze na vlastní magnetický obvod rotoru a statoru. Model vinutí je zcela odstraněn, protože místo něho bude vytvořeno vinutí přímo při výpočtu v prostředí Ansysu.
- Výrobní model je na mnoha hranách opatřen zkosením nebo zaoblením hran. Například u zaoblení o malém poloměru vzniká značné zhuštění sítě, což zbytečně komplikuje výpočet. Z daného modelu byly proto všechna zkosení a zaoblení malých poloměrů odstraněna.
- Rotorová klec bývá u moderních strojů řešena tak, že tyče jsou mírně zešíkma vůči čelům rotoru. Stejně je to provedeno i u daného modelu, pro zjednodušení výpočtu byla ale klec narovnána. Tato úprava především významně zjednoduší tvorbu sítě.



Obr. 24 - Možné úpravy modelu před importem do Ansys Workbench

3.3.3 Postup elektromagnetického výpočtu asynchronního motoru

Po přípravě modelu v Autodesk Inventoru je možné přejít k importu geometrie do prostředí Ansys Workbench a začít s řešením úlohy. Importování geometrie lze řešit několika přístupy. Nejjednodušším přístupem je přímý import z prostředí Inventoru nebo jiného CAD systému. V tomto případě ovšem musí být Ansys instalován na stejném počítači jako zvolený CAD systém. Po instalaci Ansysu se v menu Inventoru objeví tlačítko, po jehož stisknutí se automaticky spustí Ansys Workbench a právě aktivní geometrie je importována. Použití této funkce dobře dokumentuje vysokou míru integrace Ansysu s moderními CAD systémy a je velice efektivní. V případě daného modelu proběhly veškeré importy pomocí této funkce korektně.

Druhou možností je použít některý z přenosových formátů. V prostředí CAD systémů se celá sestava nebo díl uloží ve zvoleném formátu. Ansys Workbench dokáže pracovat s rozsáhlou sadou běžně používaných formátů jako například STL, SAT, IGES a podobně.

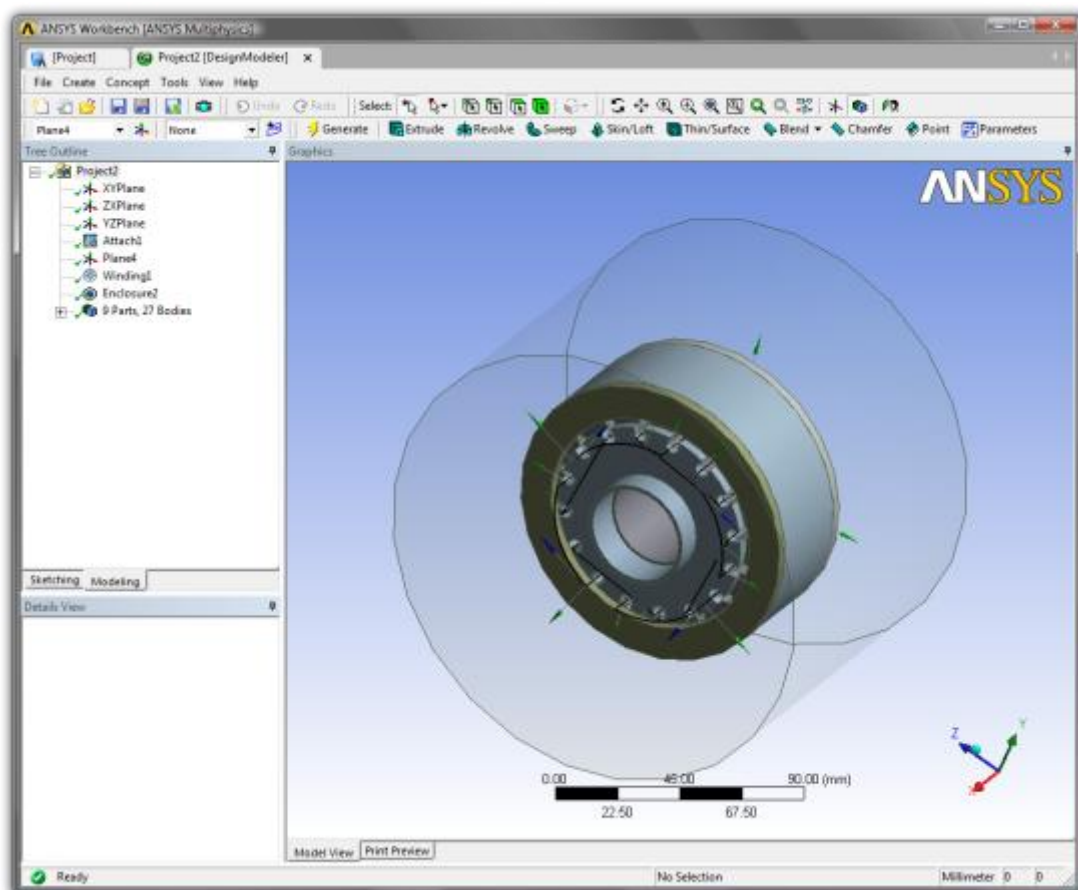
Ať už je geometrie importována jakoukoli metodou, po otevření prostředí Ansys Workbench začíná práce v prostředí *Design Modeler*. Zde je dotvořena výsledná geometrie před započítáním výpočtu. V daném případě je nutné především doplnit statorová vinutí a model reprezentující vzduchový obal.

Prvním krokem je vytvoření vinutí. Vinutí lze snadno vytvořit pomocí nástroje *WindingTool*, který je přímo určen pro tvorbu vinutí elektrických strojů. Výhodou této funkce je, že po přesunutí do prostředí simulace je vinutí automaticky bráno jako vodič a přímo a snadno lze doplnit parametry jako je počet závitů a protékající proud. Po aktivaci nástroje je nutné zvolit centrální rovinu rotoru, aby byla jednoznačně určena orientace vinutí, a vyplnit tabulku vinutí. Tabulka vinutí obsahuje informace o dílčích vinutích a jejich umístění v rotoru. Každé vinutí je definováno vstupní a výstupní drážkou, písmenem označující danou fázi, počtem závitů cívky a geometrickými údaji o rozměru cívky a zakončení čel vinutí. S výhodou je možné už jednou vytvořené vinutí uložit do textového souboru a následně načíst přímo ze souboru. Po nastavení všech parametrů a stisknutí tlačítka *Generate* je vinutí vytvořeno.

Phase	Coil	Turns	Slot In	Slot Out	Routing	Clearance	Radius In	Radius Out
A	1	150	1	4	Arc	15 mm	35 mm	35 mm
A	2	150	5	8	Arc	15 mm	35 mm	35 mm
A	3	150	9	12	Arc	15 mm	35 mm	35 mm
A	4	150	13	16	Arc	15 mm	35 mm	35 mm
B	1	150	3	6	Straight	10 mm	35 mm	35 mm
B	2	150	7	10	Straight	10 mm	35 mm	35 mm
B	3	150	11	14	Straight	10 mm	35 mm	35 mm
B	4	150	15	2	Straight	10 mm	35 mm	35 mm

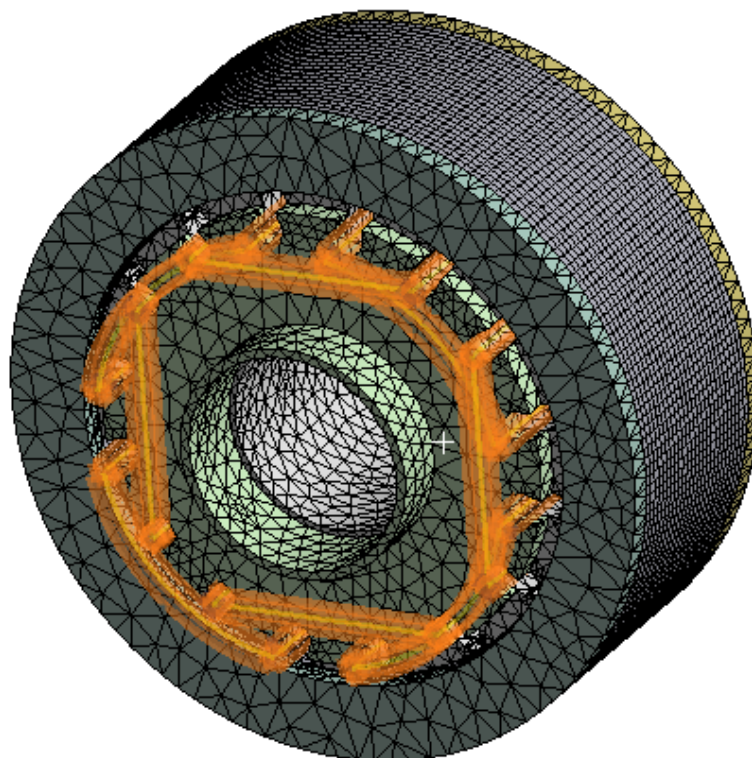
Obr. 25 - Tabulka vinutí

Poslední částí vytvořenou v *Design Modeleru* je objemový model vzduchového obalu. Pro vytvoření vzduchového obalu je k dispozici funkce *Enclosure*. Po aktivaci této funkce je možné zvolit tvar obalu (například krychle, válec nebo koule) a rozměr obalu zadaný vzdáleností od vnějších ploch zvolené geometrie. U dané geometrie bylo vhodné zvolit tvar válce, protože i magnetický obvod stroje má tvar válce. Po této konečné úpravě je model připraven pro vytváření sítě a vlastní výpočet.



Obr. 26 - Připravený model v *Design Modeleru* s vytvořeným vinutím a vzduchovým obalem

Po dokončení všech úprav v prostředí *Design Modeleru* je geometrie importována do prostředí simulace. Před vlastní simulací je potřeba ještě vytvořit mesh neboli konečnoprvkovou síť, což lze udělat jednak ve zvláštním modulu, ale i přímo v prostředí simulace. Tvorba meshe je v Ansys Workbench plně automatizovaná s možností uživatelského přizpůsobení. U tohoto konkrétního modelu rotoru a statoru lze s výhodou použít takzvaný *Sweep Mesh*. Tento typ meshe vytvoří na čelní ploše válcové součásti automaticky vytvořenou síť, která je poté tažena válcovým profilem až do koncové plochy. Povrch válce je rozdělen v pravidelných úsecích. Výsledná síť má pravidelný tvar a obsahuje méně elementů při zachování požadované přesnosti než volný, automatický mesh. I při automatickém generování meshe se snaží program detekovat válcové plochy a vytvářet *Sweep Mesh*. Dále je vhodné nastavit zhuštění elementů ve sledovaných částech modelu.



Obr. 27 - Konečnoprvkový model magnetického obvodu stroje

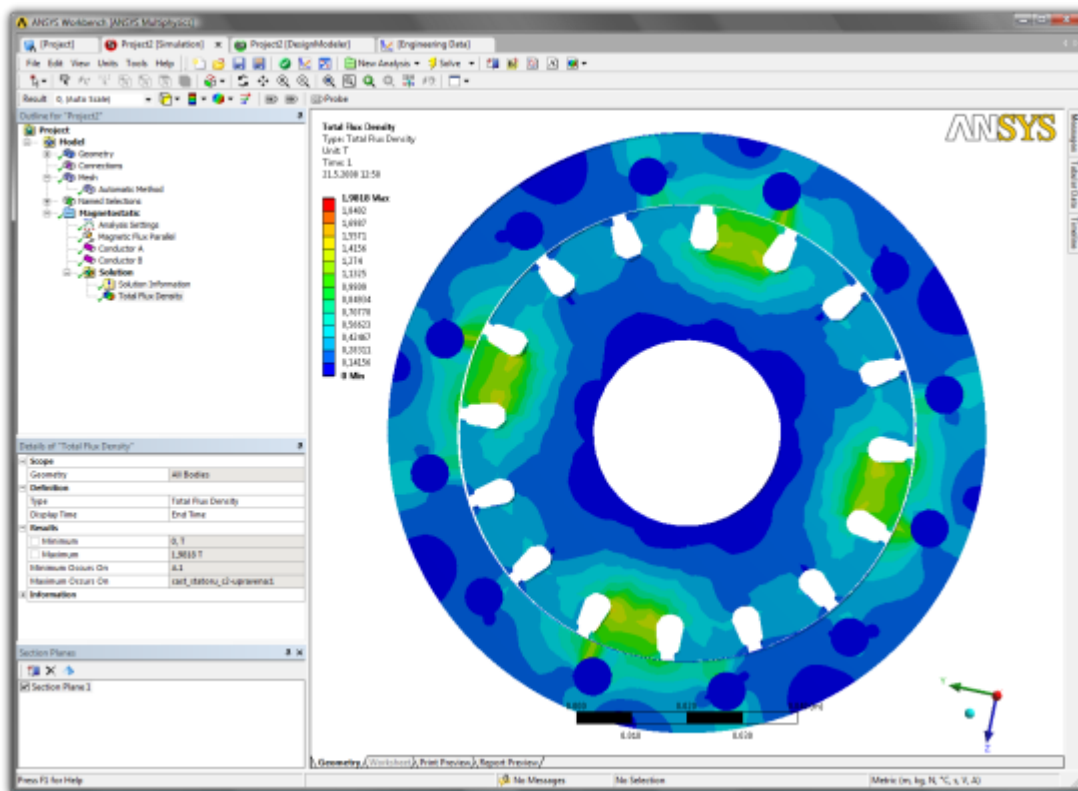
V nabídce tvorby meshe lze zvolit typ úlohy, která se bude na daném modelu řešit, a podle toho také program volí automaticky přesnost a provedení sítě. Na uživateli tak zbývá nastavení požadované přesnosti sítě pomocí posuvníku. Takto vygenerovaný mesh magnetického obvodu má přibližně tři sta tisíc elementů, což zajistí dostatečnou přesnost a výpočet nebude trvat příliš dlouho. Součástí sítě je samozřejmě také model vzduchového obalu stroje. Při generování meshe je potřeba dát pozor na složité geometrické tvary, u kterých může dojít k selhání programu. Stejně tak pro drobné detaily, menší než je velikost elementu, se nemusí podařit vytvořit požadovanou síť.

V prostředí simulace lze také nastavit typy použitých materiálů pro jednotlivé objemové modely. Ansys obsahuje knihovnu s několika základními nejpoužívanějšími materiály, lze samozřejmě další dodat a případně stávající doplnit. Pro daný model budou použity materiály *Structural Steel* (ocel na jeho rotoru a statoru), *Aluminum Alloy* (pro hliníkovou klec rotoru), *Copper Alloy* (pro měděná vinutí statoru) a *Air* (pro vzduchový obal modelu).

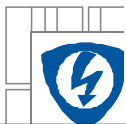
Po dokončení meshování a nastavení materiálů je nutné zvolit typ simulace, která se bude na daném modelu provádět. Už při meshování se sice objevuje volba typu simulace, ale ta přímo nesouvisí s prováděným výpočtem, ale jde pouze o sadu předdefinovaných nastavení automatického generátoru meshe. Volba typu úlohy je skryta pod položkou *New Analysis*, kde je v roletové nabídce zobrazen přehled nabízených simulací. Po výběru elektromagnetické analýzy přibude do stromové struktury, popisující výpočet, další úroveň. Celá stromová struktura je nakonec rozdělena do tří úrovní a to *Model*, *Analysis* a *Solution*, což odpovídá struktuře v klasickém Ansysu s položkami *Preprocessor*, *Solution* a *Postprocessor*.

Pod položkou vybrané analýzy je nabídka *Analysis Settings*, kde lze natavit počáteční podmínky, typy řešičů a ukládání souborů analýzy. Při označení analýzy ve stromové struktuře dojde ke změně nabídky na horní liště a je možné pomocí nových tlačítek doplnit jednotlivé zatížení a okrajové podmínky. V případě elektromagnetické analýzy jsou součástí modelu také vodiče elektrického proudu. V případě, že jsou vinutí a vodiče tvořeny jako objemový model, je nutné daný objem označit jako vodič pomocí nástroje *Conductor*, v našem případě bylo ovšem s výhodou použito vinutí vytvořené pomocí funkce *Winding Tool* a tudíž je automaticky detekováno a doplněno do stromu simulace s možností přímého zadání hodnoty protékajícího proudu, fázového posuvu a počtu závitů cívky. Důležitou podmínkou při řešení elektromagnetických výpočtů je okrajová podmínka nulového potenciálu. Tuto podmínku je nutné zadat na okrajové plochy modelu, tedy v našem případě na vnější plochy vzduchového obalu modelu. V prostředí Ansys Workbench se tato podmínka nazývá *Magnetic Flux Parallel*.

Po zadání těchto podmínek je úloha připravena pro řešení. V další úrovni stromu nazvané *Solution* je možná volba toho, které veličiny chceme při výpočtu řešit a zobrazit. Po vybrání požadovaných veličin lze ve stromové struktuře zkontrolovat, zda je vše korektně nastaveno. Správně nastavené prvky jsou zeleně zatrženy a u připravených pro řešení je symbol žlutého blesku. Po poklepnutí na tlačítko *Solve* je zahájeno řešení matematického modelu. Do této části již uživatel nezasahuje. Po skončení výpočtu lze zobrazit požadované veličiny přímo na modelu ve formě barevných izoliní popřípadě zobrazení vektorů v jednotlivých uzlech sítě. Ansys Workbench také umožňuje automatické generování protokolu s kompletním záznamem analýzy včetně zadaných a určených hodnot.



Obr. 28 - Výsledek výpočtu magnetické indukce v obvodu asynchronního motoru



3.3.4 Zhodnocení provedeného výpočtu

V této kapitole je shrnut výpočet provedený podle postupu v předchozí kapitole. Důraz je především kladen na reálnou práci s programem a zhodnocení možností spolupráce Ansys Workbench a Autodesk Inventor v úloze simulace magnetického pole asynchronního motoru, jehož konstrukční návrh byl vytvořen právě v Inventoru. Cílem není získat přesné hodnoty fyzikálních veličin, ale demonstrovat možnosti programu.

V první fázi bylo nutné upravit původní model motorku a provést import do Ansysu. Model motorku, který byl k dispozici, byl vytvořen za účelem tvorby animace, a proto některé jeho části nebyly zcela dokonale zpracovány a musely být nahrazeny nebo upraveny. Typickou chybou u tohoto modelu bylo, že některé rozměrové parametry byly zadávány s přesností na několik desetinných míst a jiné zaokrouhlovány. Ve výsledku na modelu vznikly nepatrné kolize objektů v sestavě. Při importu nebyl Ansys schopen danou geometrii korektně zpracovat a docházelo k rozpadu modelu, takže nejdříve bylo potřeba pomocí funkce *Kontrola kolizí* tyto chyby odstranit. Importování modelu do prostředí Ansysu proběhlo zcela bez potíží, a to jak při použití tlačítka pro přímý import, tak při importu z přenosového formátu .sat. Dalo by se říct, že pokud je model kvalitně zpracován v některém z moderních CAD systémů, tak s importem nebývá problém. Po importu bylo v *Design Modeleru* dotvořeno vinutí a vzduchový obal modelu. Použití funkce *Winding Tool* je trošku náročnější na představivost uživatele a je nutné znát přesně provedení vinutí daného stroje. Uzavření stroje do vzduchového obalu pomocí funkce *Enclosure* je velice snadné, ovšem položka *Merge Parts*, která provede slepení dílů modelu s objemem vzduchu, je defaultně nastavena na *No*, což při přehlédnutí může později vyústit v chybné výsledky simulace.

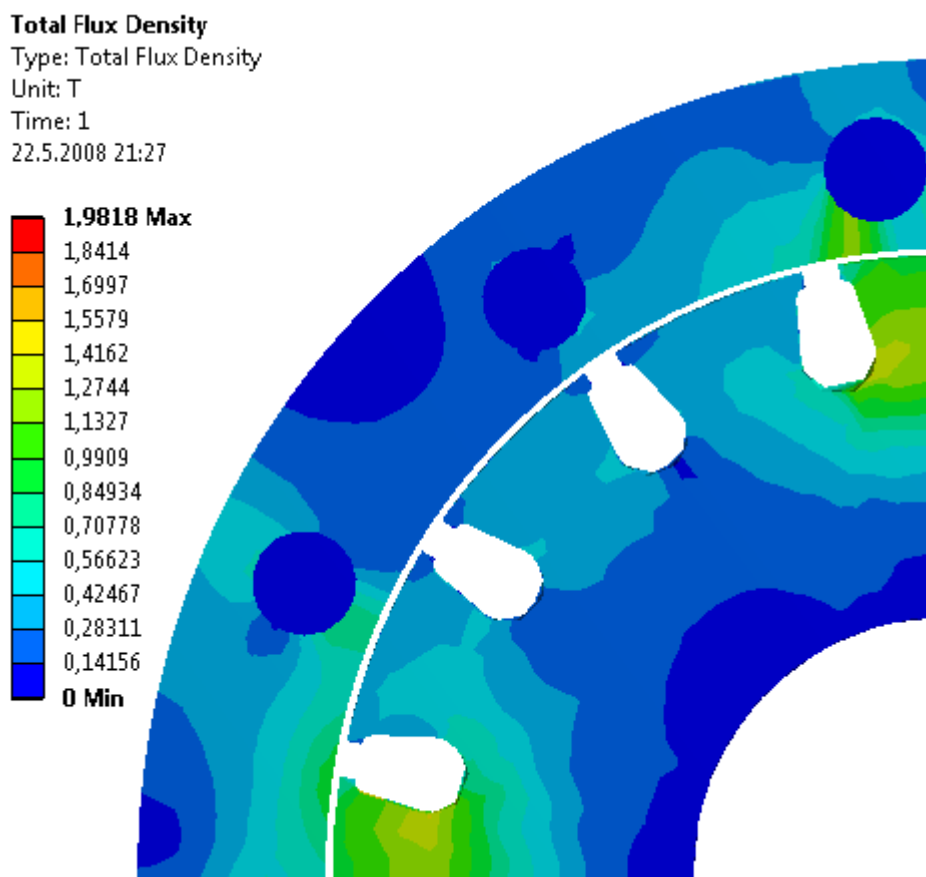
V druhé fázi bylo provedeno vytvoření konečnoprvkové sítě a nastavení simulace. Konečnoprvkovou síť je možné vytvořit ve zvláštním modulu nebo přímo v prostředí simulace. Vzhledem k tomu, že první varianta nepřináší žádné výhody, byl model přímo přenesen do prostředí simulace a síť byla vytvořena v něm. Meshování modelu bylo provedeno jako automatické s nastavením požadované přesnosti. Automatika se v tomto případě ukázala jako velice schopná a dokázala sama odhadnout místa pro použití *Sweep Meshe*. Původní model má tyče rotorové klece uložené šikmo vůči čelům rotoru, což se ukázalo jako značný problém právě při meshování. Bohužel vytvoření sítě na původním modelu zcela selhalo a program ji nebyl schopen vytvořit, proto bylo nutné provést úpravu na původním modelu a tyče narovnat, což pro potřeby tohoto výpočtu nevádí. Zde se jasně ukazuje nutnost úpravy modelu před meshováním, protože s tvarově složitými objemy mohou nastat problémy a přitom chyba výpočtu způsobená úpravou geometrie může být malá. Výsledná síť obsahuje zhruba tři sta tisíc elementů. V této fázi bylo nutné také zadat materiálové vlastnosti pro jednotlivé díly. Vzhledem k tomu, že výpočet je pouze demonstrativní, tak byly materiály reálného motoru odhadnuty a použity přednastavené z knihovny Ansysu. Po zvolení elektromagnetické simulace se do stromu simulace automaticky doplní cívky s okamžitou možností zadání parametru protékajícího proudu. V tomto případě byly nastaveny štítkové údaje 2,9A v hlavní fázi a 2,9A v pomocné fázi s tím, že v pomocné fázi byl nastaven fázový posuv 90° . Toto nastavení reprezentuje rozběh motoru s připojeným pomocným vinutím. Po nastavení podmínky nulového potenciálu na okraje modelu byla simulace připravena k výpočtu.

Na níže uvedených obrázcích je vidět výsledné rozložení magnetické indukce v řezu magnetického obvodu čtyřpólového asynchronního motoru. Na Obr. 29 je vidět zobrazení výsledků pomocí barevné kontury, zatímco na Obr. 30 je vektorové zobrazení. Na barevné kontuře je lépe vidět, jaké hodnoty přibližně dosahuje veličina v jednotlivých částech modelu. Vektorové zobrazení je zase vhodnější pro zobrazení směrové orientace vektorů dané veličiny.

Nejvyšší hodnota magnetické indukce v magnetickém obvodu je 1,98T - při použití materiálových konstant dle Tabulky 1 a štítkových údajů stroje. Vyřešení této úlohy trvalo počítači 11,5 minuty. Výpočet byl proveden na počítači s procesorem Intel Core2duo o frekvenci 3,6GHz a 4GB operační paměti.

Tabulka 1 - Tabulka materiálových konstant použitých při výpočtu

Materiál	Vzduch	Hliník	Ocel	Měď
Označení v Ansysu	Air	Aluminum Alloy	Structural Steel	Copper Alloy
Permeabilita [/]	1	1	10000	0,99
Rezistivita [Ωm]		5,70E-08	1,70E-07	1,72E-08



Obr. 29 - Zobrazení rozložení magnetické indukce pomocí barevných kontur

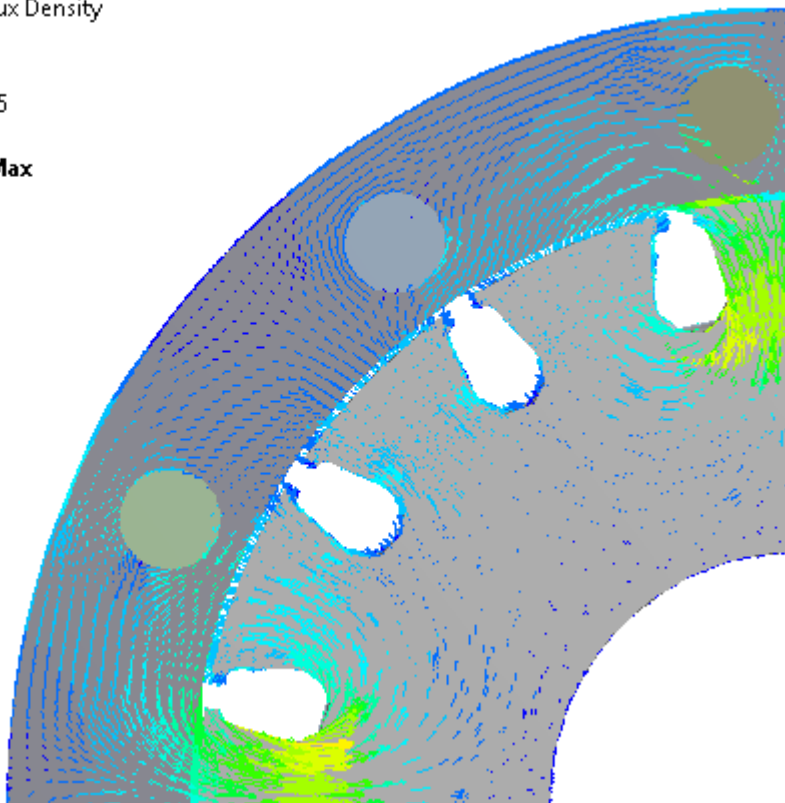
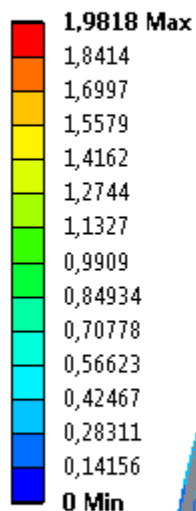
Total Flux Density

Type: Total Flux Density

Unit: T

Time: 1

22.5.2008 21:25



Obr. 30 - Zobrazení rozložení magnetické indukce pomocí vektorového zobrazení

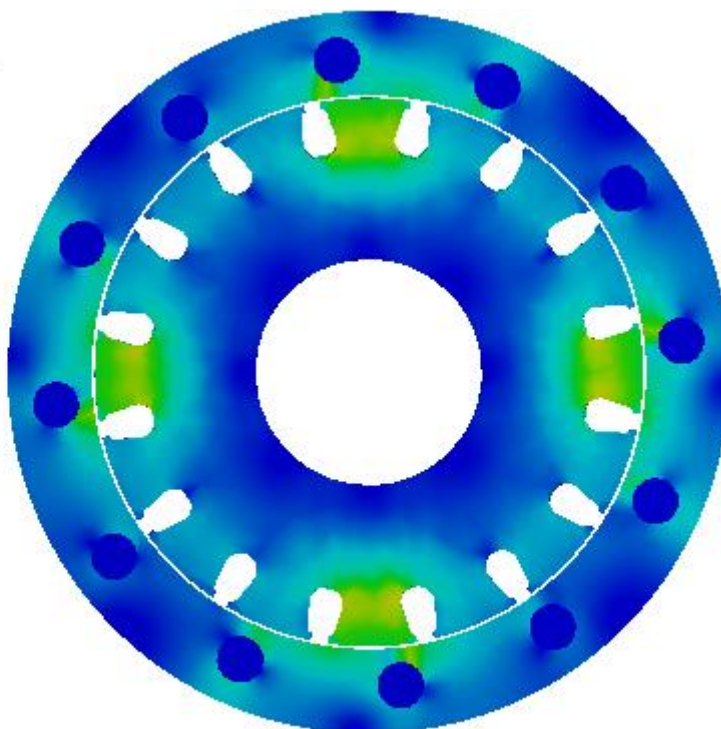
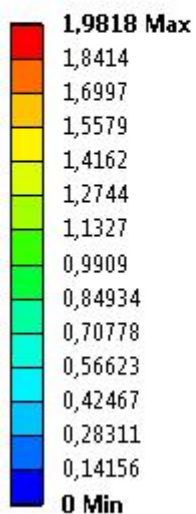
Total Flux Density

Type: Total Flux Density

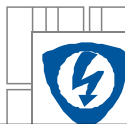
Unit: T

Time: 1

22.5.2008 21:38



Obr. 31 Celkový pohled na rozložení magnetické indukce ve stroji



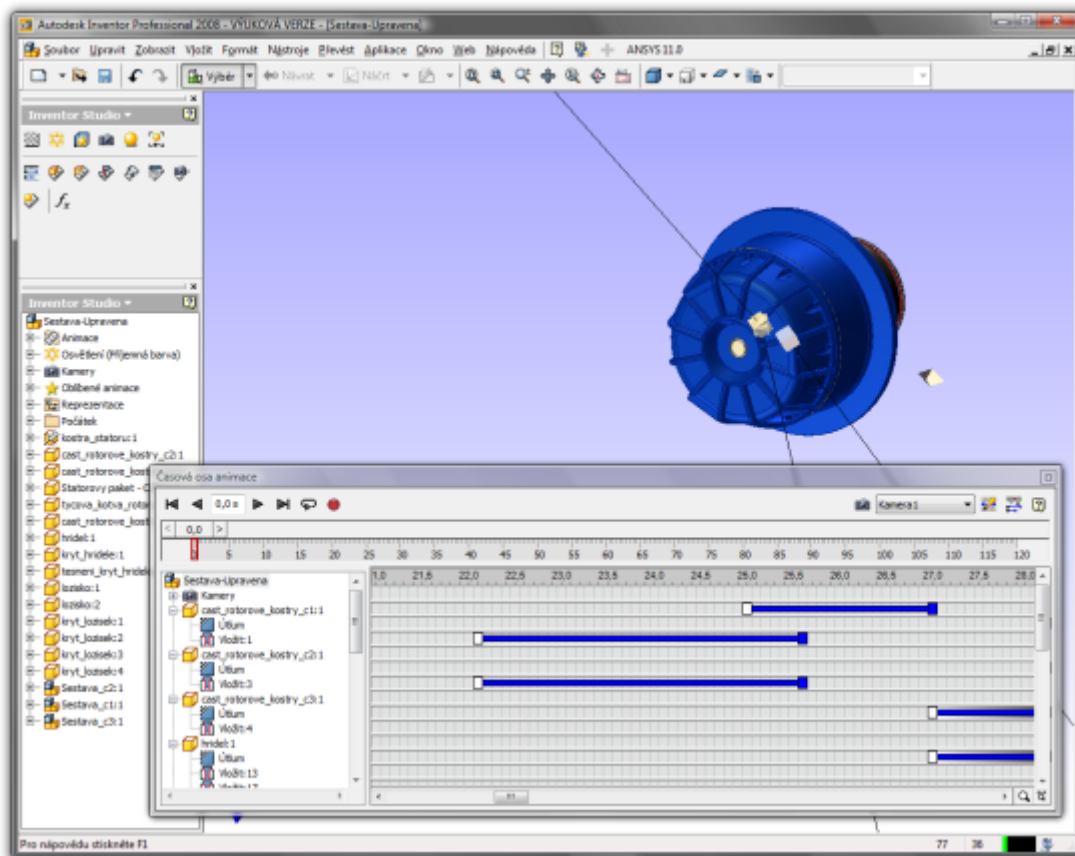
3.4 Shrnutí významu programu Ansys Workbench

- Ansys Workbench je grafickou nadstavbou Ansysu Classic.
- Nabízí intuitivnější a uživatelsky příjemnější prostředí s výraznou orientací na uživatele moderních parametrických CAD systémů z řad konstruktérů.
- Systém nabízí stejné výpočetní jádro jako Ansys Classic, ale ne všechny funkce jsou plně integrovány.
- Ansys Workbench obsahuje jednoduchý parametrický modelář pro tvorbu a úpravy geometrie s ovládáním podobným jako v parametrických CAD systémech.
- Ovládání systému bylo navrženo s ohledem na maximální jednoduchost a produktivitu práce.
- Celý průběh prováděné simulace je plně automatizován s možností uživatelského zásahu do procesu.
- K dispozici je nápověda, která vede uživatele krok za krokem a upozorňuje na možné chyby.
- Pomocí tohoto systému je možné řešit řadu fyzikálních úloh z oblasti mechaniky, elektromagnetismu, statiky a dynamiky tekutin.
- Charakteristická je vysoká míra integrace s moderními parametrickými CAD systémy, která významně zjednodušuje možnosti vzájemného importu geometrie.
- Podporována je široká paleta parametrických CAD systémů. Mezi nejvýznamnější patří Autodesk Inventor, Solidworks, Solidedge, NX, Catia nebo Pro/Engineer.
- Při řešení úlohy v Ansysu je možné volně přecházet mezi prostředím Workbench a Classic. Lze například využít jednodušší tvorbu geometrie v parametrickém prostředí Workbenche s následným řešením úlohy v prostředí Classic.
- Ansys Workbench není náhradou Ansysu Classic. Zatímco Ansys Classic je orientován spíše na profesionální výpočtáře, Ansys Workbench je určen především pro konstruktéry a pro běžnou inženýrskou praxi.
- Workbench je neustále ve vývoji a s každou novou verzí jsou integrovány další funkce Ansysu Classic.

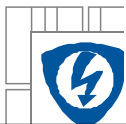
4 ANIMACE MODELU JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU S VNĚJŠÍM ROTOREM

Cílem této kapitoly bylo vytvořit animovanou prezentaci složení modelu jednofázového asynchronního motoru s vnějším rotorem pro pohon ventilátoru. Celá animace je provedena v prostředí Inventor Studio, což je modul Autodesku Inventoru umožňující tvorbu fotorealistických animací. Takto vytvořená animace může sloužit pro potřeby komerční prezentace výrobku, pro vzdělávací účely nebo jako vizualizace montážního postupu.

Inventor Studio nabízí sadu nástrojů pro animaci jednotlivých komponent sestavy a kamer. V této práci byly nejdříve využívány funkce *Animovat vazby*, *Animovat útlum* a *Animovat kameru*. Model byl umístěn ve středu scény a pomocí funkce *Animovat vazby* se zajistil pohyb komponent po daných drahách. Tato funkce funguje na principu, že vazbám je zadáno určité odsazení na počátku a konci času vymezeném pro pohyb. Přesun komponentu je možné ještě dále ovládat různou rychlostí posunu na počátku a na konci pohybu. Mizení komponent je realizováno pomocí funkce *Animovat útlum*, u které je zadáno procento viditelnosti na počátku a konci časového úseku a tím díl postupně mizí. Veškeré náhledy na model byly realizovány pomocí funkce *Animovat kameru*. Jak už bylo řečeno výše, model je staticky umístěn v prostoru a kamera se pohybuje okolo něj. U funkce *Animovat kameru* je zvolen počáteční a koncový pohled na scénu v určitém časovém rozsahu a vlastní animace je automaticky provedena s možností regulace rychlosti na počátku a konci.

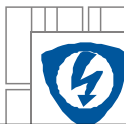


Obr. 32 - Tvorba animace prostředí Inventor Studia



Osvětlení dané scény bylo vybráno ze seznamu přednastavených sad. Lze samozřejmě také vytvořit vlastní osvětlení složené z různých typů světel, libovolně umístěných. Jako pozadí scény byl zvolen obrázek formátu .jpeg ve vhodném rozlišení.

Po nastavení všech požadovaných parametrů byla výsledná animace renderována. Při renderování se nabízí možnost volby rozlišení animace, stupně antialiasingu a počet snímků za vteřinu. Dále lze zvolit časový rozsah animace, pokud je například potřeba renderovat jen určitou část, nebo invertovat časovou osu. V případě této animace bylo zvoleno rozlišení 1024×768 pixelů, 25 snímků za vteřinu a nejvyšší stupeň antialiasingu. Časová osa animace byla invertována, protože má zobrazovat postupné skládání stroje z jednotlivých dílů. Výsledná animace trvá 104 vteřin, obsahuje 2600 snímků a renderování trvalo přibližně 7 hodin. Vyrenderovaná animace byla uložena ve formátu .avi pomocí kodeku *XviD video codec*. Text byl do animace doplněn pomocí programu Ulead Video Studio 9.



5 ZÁVĚR

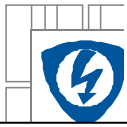
V této bakalářské práci byly rozebrány možnosti moderních parametrických CAD systémů a jejich spolupráce se systémy pro inženýrskou analýzu metodou konečných prvků z hlediska možného použití v oblasti konstrukce elektrických strojů.

První část je věnována moderním parametrickým CAD systémům a metodice parametrického modelování. Parametrické modelování přineslo značnou změnu do konstruktérské praxe. Klasické metody tvorby výkresové dokumentace pomocí neparametrických 2D CAD systémů, jako je například AutoCAD, v podstatě pouze nahrazují fyzické rýsovací prkno, zatímco parametrické trojrozměrné modelování je výrazně bližší uvažování konstruktéra a poskytuje lepší vizuální zpětnou vazbu při řešení geometrie výrobku. Tradiční výkresová dokumentace se tak stává sekundárním, ale neméně důležitým produktem, přičemž primární je virtuální trojrozměrný model. Výhodou také je možnost provádění různých typů analýz na modelu bez nutnosti vyrábět fyzické prototypy. V této práci je jako příklad moderního parametrického systému zvolen Autodesk Inventor 2008 ve verzi Professional, což je vlajková loď společnosti Autodesk pro oblast strojírenského konstruování. Tento systém poskytuje moduly pro tvorbu dílů, sestav, výkresové dokumentace a ve verzi Professional také nástroje pro inženýrskou analýzu. V kapitole věnující se tomuto systému jsou popsány možnosti jednotlivých modulů a základní metodika práce. Dále jsou popsány možnosti automatického generování normalizovaných dílů a konstrukčních součástí.

Cílem druhé části práce bylo popsat možnosti spolupráce parametrických CAD systémů a systémů pro výpočty metodou konečných prvků, které v našem případě zastupuje Ansys Workbench. Tento úkol byl realizován na praktickém příkladu analýzy magnetického pole jednofázového asynchronního motoru s vnějším rotorem. Analýza je popsána od výchozího zpracování geometrie v Inventoru přes import do Ansysu až po konkrétní řešení konečnoprvkové sítě, výpočet modelu a zhodnocení výsledků. Analýza byla zpracována především z hlediska demonstrace postupu a možností a proto její výsledky nelze brát jako směrodatné pro konkrétní stroj. S předem připraveným modelem pro výpočet, z externího CAD systému, je vlastní práce v Ansys Workbench velice rychlá a efektivní. Kompletní nastavení simulace netrvá i méně zkušenému uživateli déle než třicet minut.

Během práce byla mnohokrát využita nápověda, která je kvalitně zpracována se spoustou doprovodných příkladů. Na druhou stranu je nutno poznamenat, že například Autodesk Inventor má jak nápovědu, tak uživatelské rozhraní zpracováno podrobněji.

V poslední části byla vytvořena animovaná prezentace jednofázového asynchronního motoru s vnějším rotorem v modulu Inventor Studio. Možnosti tohoto modulu pro tvorbu animací jsou dosti omezené vůči profesionálním programům, nicméně je vhodným doplněním jinak konstruktérsky orientovaného softwaru a umožňuje vytvářet efektní prezentace. Výsledná animace může posloužit například pro ukázkou konstrukčního provedení strojů s vnějším rotorem při výuce zabývající se speciálními konstrukcemi elektrických strojů.

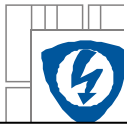


LITERATURA

- [1] Fořt, P., 2004, Autodesk Inventor adaptivní modelování v průmyslové praxi
- [2] Mravec, R., 1970, Elektrické stroje a přístroje
- [3] David, V., 2004 Fundamentals of finite elements analysis

INTERNETOVÉ ZDROJE

- [4] <http://www.designtech.cz/c/>
- [5] <http://www.cdesign.cz/>
- [6] <http://www.xanadu.cz/>
- [7] <http://www.autodesk.cz/>
- [8] http://mechanika.fsid.cvut.cz/sources_old/mmkp/node4.html
- [9] http://en.wikipedia.org/wiki/Finite_element_method
- [10] http://homen.vsb.cz/~kac37/_num_met_Kacor/
- [11] <http://www.ansys.com/>
- [12] <http://www.mcadonline.com/>
- [13] <http://www.mmspektrum.com/clanek/platforma-pro-integraci-cae-software>
- [14] <http://mechanika.fsid.cvut.cz/old/pme/systemy/ANSYS/index.html>
- [15] <http://www.ozeninc.com/default.asp?ii=84>
- [16] <http://www.cad.cz/index.php>
- [17] <http://www.root.cz/clanky/vymena-dat-mezi-cad-systemy/>
- [18] <http://cad.blog.cz/>



PŘÍLOHY

[1] DVD-R