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

VYUŽITÍ PROSTŘEDÍ ANSYS WORKBENCH PRO TEPLOTNÍ VÝPOČTY ELEKTRICKÝCH STROJŮ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER´S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. PETRA SEDLÁČKOVÁ

AUTHOR

BRNO 2010

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

VYUŽITÍ PROSTŘEDÍ ANSYS WORKBENCH PRO TEPLOTNÍ VÝPOČTY ELEKTRICKÝCH STROJŮ

UTILIZATION OF ADAPTIVE CAD SYSTEMS AT VIRTUAL MODEL CREATION OF ELECTRICAL MOTORS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER´S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. PETRA SEDLÁČKOVÁ
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE doc. Dr. Ing. HANA KUCHYŇKOVÁ
SUPERVISOR

BRNO, 2010

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

Magisterský navazující studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Bc. Sedláčková Petra
Ročník: 2

ID: 77987
Akademický rok: 2009/10

NÁZEV TÉMATU:

Využití prostředí ANSYS Workbench pro teplotní výpočty elektrických strojů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Zhodnoťte přínos nových funkcí v programu Autodesk Inventor Series 2010.
2. Popište využití prostředí ANSYS Workbench pro teplotní výpočty.
3. Vytvořte teplotní analýzu EC motoru pomocí metody konečných prvků.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Termín zadání: 1.10.2009

Termín odevzdání: 20.05.2010

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.

Abstrakt

Výpočet tepelných poměrů v elektrickém stroji je jedním ze základních kroků při jeho návrhu. Mezi tradiční způsoby výpočtu oteplení patří analytické metody založené na ekvivalentních odporových sítích, využívajících tepelně elektrické analogie. Další možností je využití metody konečných prvků, což je cílem této práce.

První část práce je věnována CAD systému Autodesk Inventor. Jde o moderní parametrický CAD systém umožňující vytvářet trojrozměrné virtuální modely. Tento systém je využit pro přípravu modelu elektronicky komutovaného motoru, na kterém je proveden tepelný výpočet. Druhá část práce se zabývá možnostmi tepelných výpočtů v programu Ansys Workbench a praktickou realizaci výpočtu na daném EC motoru.

Abstract

Thermal analysis of electric machine is one of the key steps in design procedure. Traditionally, thermal calculations are done by analytical method, mostly based on equivalent electrical circuit, where thermal quantities are replaced by equivalent electrical quantities. These methods employ so-called electro thermal analogy. Different approach is to use Finite Element Method, which is the main goal of this thesis.

First part of the thesis is devoted to description of CAD system Autodesk Inventor, which is modern parametric CAD for modelling of virtual prototypes. This system is then used for creation of three dimensional model of brushless DC machine.

Second part is focused on thermal calculations in Ansys Workbench environment. Model of brushless DC machine created in Inventor is transferred into Ansys Workbench and thermal analysis is carried out.

Klíčová slova

Autodesk Inventor; Ansys Workbench; EC motor; MKP; teplotní analýza.

Keywords

Autodesk Inventor; Ansys Workbench; EC motor; FEM; thermal analysis.

Bibliografická citace

Bibliografická citace: Sedláčková, P. Využití prostředí ANSYS Workbench pro teplotní výpočty elektrických strojů, Brno: FEKT VUT v Brně, 20010. 50 s.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Využití prostředí ANSYS Workbench pro teplotní výpočty elektrických strojů jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucí 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 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 vedoucí diplomové práce doc. Dr. Ing. Haně Kuchyňkové za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne …… Podpis autora …….

OBSAH

1 ÚVOD **12**

2 AUTODESK INVENTOR **12**

2.1 PRÁCE V PROGRAMU **13**

2.1.1 PRACOVNÍ PROSTŘEDÍ 13

2.1.1.1 Nástroje pro ovládání náhledu na pracovní plochu 14

2.1.2 TVORBA MODELU 16

2.1.3 POSTUP TVORBY SOUČÁSTI 17

2.1.4 POSTUP TVORBY SESTAVY 17

3 PŘEHLED NEJDŮLEŽITĚJŠÍCH NOVINEK V AUTODESK INVENTORU 2010 ..... **19**

3.1 NOVINKY V AUTODESK INVENTORU 2010 ..... **20**

3.1.1 UŽIVATELSKÉ ROZHRANÍ 20

3.1.1.1 Nástroje pro práci s obrazovkou 21

3.1.2 NÁČRTOVÁ OBLAST 21

3.1.3 TVORBA SOUČÁSTI 22

3.1.4 SESTAVY 22

3.1.5 ROZPISKA 24

3.1.6 OBSAHOVÉ CENTRUM 24

3.1.7 DESIGN AKCELERÁTOR 26

3.1.8 VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE 26

3.1.9 PLECHY A SVARY 27

3.1.10 JINÁ ZLEPŠENÍ 28

3.2 NOVINKY AUTODESK INVENTOR PROFESSIONAL 2010 ..... **29**

3.2.1 SIMULACE 29

3.2.2 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ (MKP) 29

4 ANSYS WORKBENCH **30**

4.1 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ- MKP **31**

4.2 PRACOVNÍ PROSTŘEDÍ **32**

4.3 PRÁCE V PROGRAMU **33**

5 TEPLOTNÍ ANALÝZA EC MOTORU **35**

5.1 EC MOTORY OBECNĚ **35**

5.1.1 KONSTRUKCE 35

5.1.2 PRINCIP FUNKCE 37

5.2 VLASTNOSTI SIMULOVANÉHO EC MOTORU **38**

5.3 ZÁKLADNÍ POJMY, MATERIÁLOVÉ KONSTANTY A HODNOTY DŮLEŽITÉ PRO TEPELNÝ VÝPOČET **39**

5.4 PRACOVNÍ POSTUP **41**

5.5 VÝSLEDKY ANALÝZY A JEJICH VYHODNOCENÍ **43**

6 ZÁVĚR **47**

LITERATURA **49**

PŘÍLOHY **50**

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Uživatelské rozhraní 14
Obrázek 2- Varianty naváděcího kruhu 15
Obrázek 3- Použití Náhledové kostky 15
Obrázek 4 - Tvorba modelu vysunutím náčrtu 16
Obrázek 5 - Použití vazby Vložit při tvorbě sestavy rotoru 18
Obrázek 6- Pás karet 20
Obrázek 7- Dvě barevné varianty ikonek 20
Obrázek 8- Navigační panel pro práci s obrazovkou 21
Obrázek 9 - Použití design acceleratoru pro tvorbu hřídele 26
Obrázek 10 - Uživatelské rozhraní Ansysu Workbench 31
Obrázek 11- Stromová struktura pracovních úkonů 33
Obrázek 12-Automatická mesh 34
Obrázek 13 - Správce simulací 34
Obrázek 14 - Magnetický obvod EC motoru s permanentními magnety nalepovanými na povrchu rotoru 36
Obrázek 15-Průběhy fázových proudů EC motoru [5] 38
Obrázek 16- Model EC motoru před a po zjednodušení 38
Obrázek 17 - Mesh stroje - různá hustota 42
Obrázek 18 - Rozložení teploty v motoru a okolním vzduchu v řezu, při výpočtem pouze se ztrátami ve vinutí[8] 44
Obrázek 19-Oteplovací charakteristika EC motoru, zahřívání a vypnutí 45
Obrázek 20- Teplotní pole EC motoru-čelní pohled 45
Obrázek 21- Teplotní pole EC motoru-částečný řez stroje, rozložení teploty povrchu kostry 46
Obrázek 22 - Oteplení stroje při přerušovaném chodu 46

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Přehled vlastností použitých materiálů při 20°C *40*

Tabulka 2- Vlastnosti vzduchu *41*

SEZNAM ROVNIC

Rovnice 1 - Výpočet množství tepla v látce *39*

SEZNAM ZNAČEK

Značka:	**název :**	**jednotka:**
λ	tepelná vodivost	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
c	tepelná kapacita	$J \cdot kg^{-1} K^{-1}$
ρ	hustota	$kg \cdot m^{-3}$
c_p (0 °C)	měrná tepelná kapacita	$kJ \cdot kg^{-1} K^{-1}$
c_v (0 °C)	měrná tepelná kapacita	$kJ \cdot kg^{-1} K^{-1}$
ΔP_{cu}	ztráty v mědi	W
Q	teplo látky	J
M	hmotnost látky	kg
T	teplota	K

1 ÚVOD

Úkolem této diplomové práce je provést teplotní analýzu za pomocí metody konečných prvků (dále MKP) v programu Ansys Workbench na 3D modelu elektricky komutovaného motoru (dále jen EC motoru), vytvořeného v programu Autodesk Inventor.

V první fázi projektu budou shrnuty novinky Autodesk Inventor 2010. V tomto programu bude nutné upravit model stroje do podoby usnadňující následnou práci v Ansysu Workbench. Takto vytvořený model musí nadále dobře reprezentovat skutečný stroj, ale nesmí obsahovat příliš mnoho drobných konstrukčních detailů a složitých tvarů, které by ovlivňovaly časovou náročnost analýzy. Úkolem bude nalézt optimální poměr mezi složitostí modelu a náročností na výpočetní výkon a čas. V práci bude možné porovnat výsledky dvou různě upravených strojů a jejich vliv na přesnost výsledků.

V druhé části bude zahájena vlastní práce v prostředí Ansys Workbench, kam bude model importován. Zde bude podle importované geometrie vytvořena konečnoprvková síť a provedeno nastavení materiálových vlastností, okrajových podmínek a podobně. Po provedení výpočtu bude vyhodnoceno oteplení jednotlivých částí stroje při jmenovitém zatížení po 10 minutách provozu při výpočtu zahrnující ztráty v mědi, mechanické i v magnetickém obvodu a tato hodnota porovnána s hodnotou získanou při simulaci při využití pouze ztrát v mědi. Dále bude vyhodnoceno celkové oteplení po ustálení teploty a hodnoty oteplení při přerušovaném chodu stroje.

Vstupní údaje pro simulaci jako jsou například ztráty v jednotlivých částech stroje, hodnoty proudů, napětí a zatížení a podobně, byly získány měřením skutečného stroje v laboratorních podmínkách. Součástí tohoto měření bylo i měření oteplení vinutí. Díky tomu bude možné provést srovnání naměřených a vypočtených hodnot.

2 AUTODESK INVENTOR

Tento parametrický CAD program byl původně vyvinut především pro použití v oblasti strojírenství, nyní ho lze však využít v jakékoli oblasti, kde je potřeba mít přesný virtuální model. V tomto programu lze zpracovávat 2D i 3D modely součástí a sestav i výkresovou dokumentaci - umožňuje tvorbu jednoduchých modelů dílů i složitých sestav.

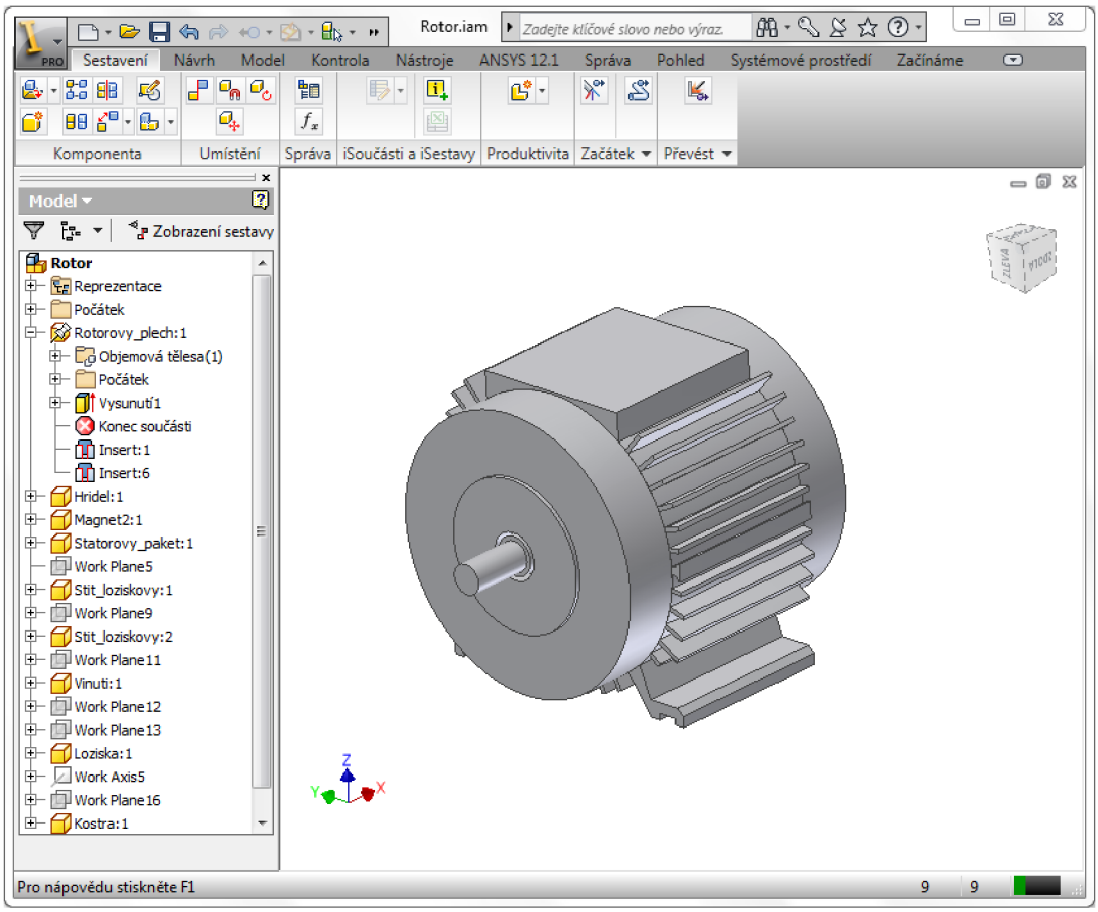
Jako přímou podporu počáteční fáze návrhu lze také využít základní nástroje pro analýzu sestavy nebo součástí. Velkou výhodou je přímá podpora formátu *.dwg, což umožňuje využití staré výkresové dokumentace z AutoCADu, nebo tvorbu zcela nové výkresové dokumentace už v tomto formátu.

2.1 Práce v programu

2.1.1 Pracovní prostředí

Pracovní prostředí Autodesk Inventoru (dále jen Inventoru) je uživatelsky přívětivé a intuitivní. Je navrženo s ohledem na jednoduchost ovládání pomocí menší sady inteligentních nástrojů. Uživatelské rozhraní se dá popsat pomocí několika základních prvků. Mezi základní prvky uživatelského rozhraní patří:

- Roletové nabídky – Roletové nabídky obsahují přístup k pokročilému nastavení programu, funkcím nápovědy a dokumentace. Také lze v těchto nabídkách najít některé funkce, které nejsou v základním panelu nástrojů.
- Pás karet – V Pásu karet najde uživatel vše, co potřebuje (z hlediska funkcí) pro základní modelování a práci s modelem. Celý pás karet se dynamicky přizpůsobuje aktuálně vykonávané činnosti. V tomto panelu lze zobrazit jak jednotlivé ikonky, tak ikonky s textem. Jde o nový prvek převzatý z uživatelského rozhraní Microsoft Office 2007.
- Prohlížeč součástí – Prvek nazvaný Prohlížeč součástí je jedním z nejdůležitějších prvků celého uživatelského rozhraní. Obsahuje stromovou strukturu, do které se zaznamenává historie tvorby modelu. Stromová struktura je základní zdroj informací o modelu a postupu, jakým byl vytvořen. Každá provedená změna a každý pracovní krok se uloží do stromové struktury prohlížeče - umožňuje tak návrat k minulým krokům a případnou snadnou editaci.
- Pracovní plocha – Pracovní plocha zabírá převážnou část obrazovky a je náhledem uživatele na modelovaný objekt.
- Náhledová kostka – Náhledová kostka je nástroj sloužící k lepší orientaci a ovládání náhledu na modelovanou součást.
- Naváděcí kruh – Slouží k lepšímu ovládání náhledu na pracovní plochu.



Obrázek 1 - Uživatelské rozhraní

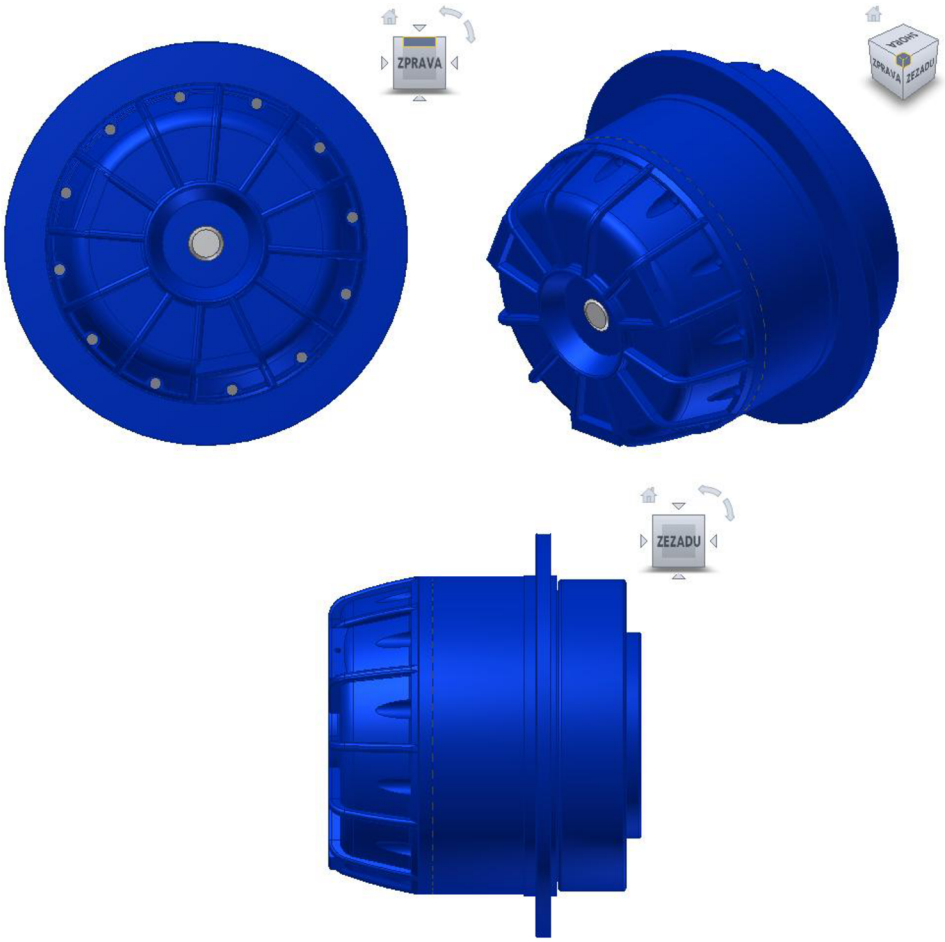
2.1.1.1 Nástroje pro ovládání náhledu na pracovní plochu

Naváděcí kruh (SteeringWheel)

Tento nástroj se chová jako nabídkové menu s výběrem základních operací pro ovládání náhledu na pracovní plochu. Toto menu se neustále pohybuje společně s kurzorem, a tak je sada nástrojů vždy po uživateli k dispozici. Nástroj obsahuje funkce *Přiblížit, Posun pohledu, Orbit, Předchozí pohled* a další. Nabízí několik variant dostupných nástrojů a několik variant zobrazení a velikosti. Naváděcí kruh také obsahuje funkci *Převinout*, která zobrazí „ filmový pás“ karet s celou historií změn náhledu na model. Na tomto pásu je možné se vrátit ke kterékoli poloze modelu vůči pohledu uživatele.

Funkce *Náhledová kostka* je dostupná ve všech modulech Inventoru, výjimkou je jen modul pro tvorbu výkresové dokumentace, kde není funkce *Náhledová kostka* k dispozici.

Obrázek 2- Varianty naváděcího kruhu



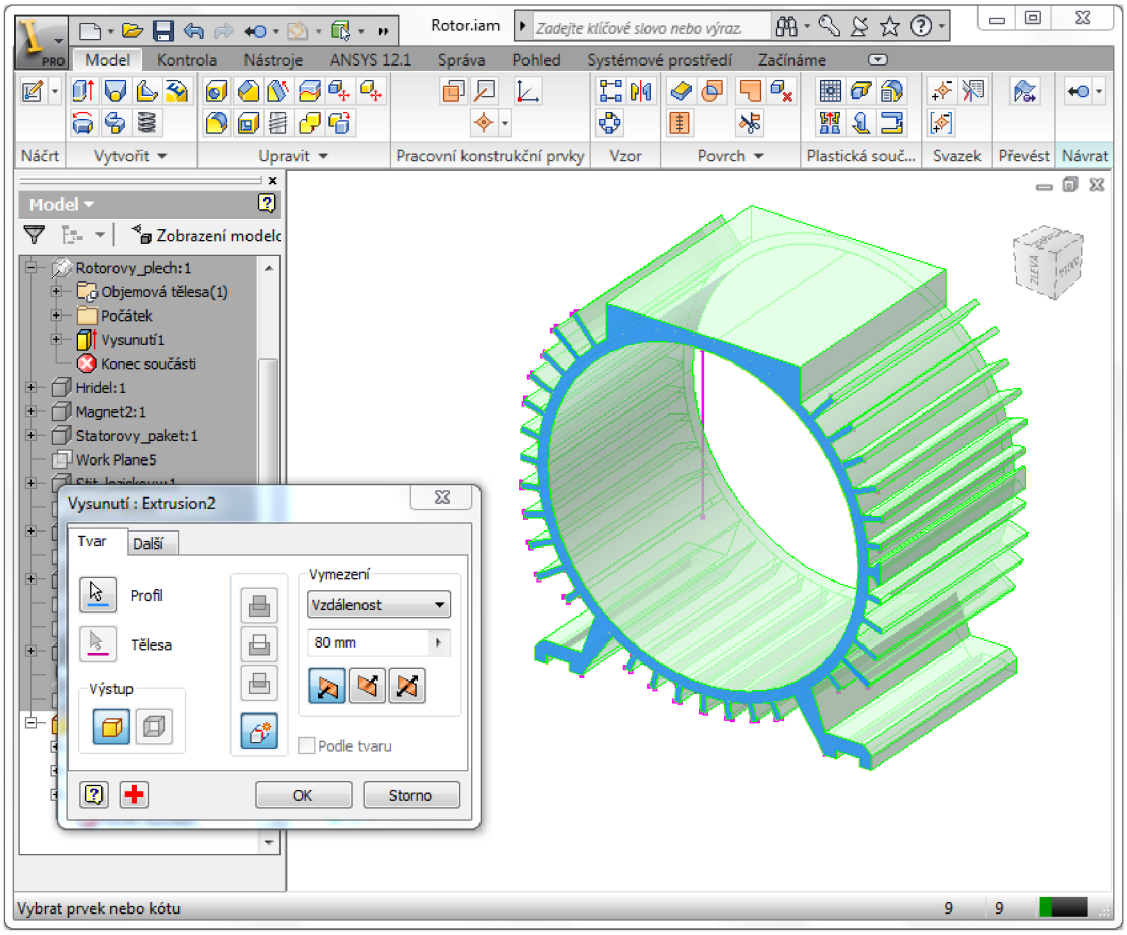
Obrázek 3 - Použití Náhledové kostky

Náhledová kostka (ViewCube)

V okně pracovní plochy je možné již od verze Inventoru 2009 možnost měnit pohled na model výběrem vrcholu, hrany nebo celé strany pohledové kostky umístěné v rohu grafické oblasti. Změna pohledu je velmi jednoduchá, zároveň však rychlá a přesná. Ovládací prvek také obsahuje tlačítko pro návrat do výchozí polohy a otáčení kolem osy modelu.

2.1.2 Tvorba modelu

Vytváření virtuálního modelu v Autodesk Inventoru se prakticky ztotožňuje s principy výroby reálného prototypu. V prvním kroku jsou navrženy geometrie jednotlivých součástí modelu a posléze jsou kompletovány do celkových sestav a podsestav celého zařízení.



Obrázek 4 - Tvorba modelu vysunutím náčrtu

Pro každou fázi tvorby modelu nabízí prostředí jiný typ souborového formátu. Při práci v Inventoru se rozlišují tyto formáty:

IPT – Tento formát se používá pro jednotlivé modely dílů. Tento formát je společný jak klasickým, tak i plechovým dílům.

IAM – Slouží pro tvorbu sestav z více dílčích komponentů. Je společný pro klasické sestavy i pro svařované sestavy.

DWG, IDW – Tyto dva formáty slouží pro zpracování výkresové dokumentace. DWG je formát používaný v AutoCADu a jeho plná podpora byla nově přidána do Autodesk Inventoru pro zvýšení kompatibility.

IPN – Z dílů a sestav lze vytvořit animované prezentace. Pro práci s nimi slouží formát IPN.

Po volbě typu souboru se zobrazí základní rozhraní a je možno započít práci. V následujících podkapitolách bude popsána tvorba dílu i celé sestavy za použití vazeb.

2.1.3 Postup tvorby součásti

Modelování součásti se dá obecně shrnout do těchto bodů:

a) V náčrtovém režimu se vytvoří základní geometrie součásti a případně se parametrizuje.
b) Za pomocí funkcí pro vytvoření objemu, jako je například *Vysunutí* nebo *Rotace kolem osy*, se vytvoří z náčrtu objemový model.
c) Pomocí dalších náčrtů se vytvoří kompletní geometrie modelu.
d) Pomocí funkcí jako je *Zkosení* se dotvoří detaily modelu.

Základem pro tvorbu modelu je náčrt vytvořený v náčrtovém prostředí. Náčrtový režim je aktivován automaticky po volbě vytvoření nové součásti. V náčrtové oblasti si lze všimnout vizuální pomůcky - zobrazené mřížky. V náčrtovém režimu zobrazuje okno nástrojů pouze pro tvorbu náčrtů – *Čára, Kružnice* a další. Vytvoření náčrtů je pouze první krok, druhým je pak určení přesných rozměrů a tvaru objektu. Když se náčrt okótuje, lze rozměry upravit jednoduše přepsáním kóty. Po vytvoření náčrtu a kliknutí na *Dokončit náčrt* následuje přesun k vlastnímu 3D modelování.

Dále se přechází z náčrtu na vytvoření objemu modelu a tím ke vzniku 3D modelu. K získání takovéhoto objemového modelu lze použít například funkce *Rotace kolem osy* - tím se vytvoří již zmiňovaný 3D objekt. Pracuje se s panelem nástrojů pro práci s 3D modelem, kde jsou kromě volby *Vysunutí* také nástroje pro konečné úpravy modelu, jakými jsou například funkce *Zkosení, Zaoblení, Funkce pole* apod.

2.1.4 Postup tvorby sestavy

Z vytvořených dílů je možné vytvářet sestavy. Sestava je model obsahující více komponentů, jejichž poloha je vzájemně definována pomocí vazeb.

Modelování sestavy se dá obecně shrnout do těchto bodů:

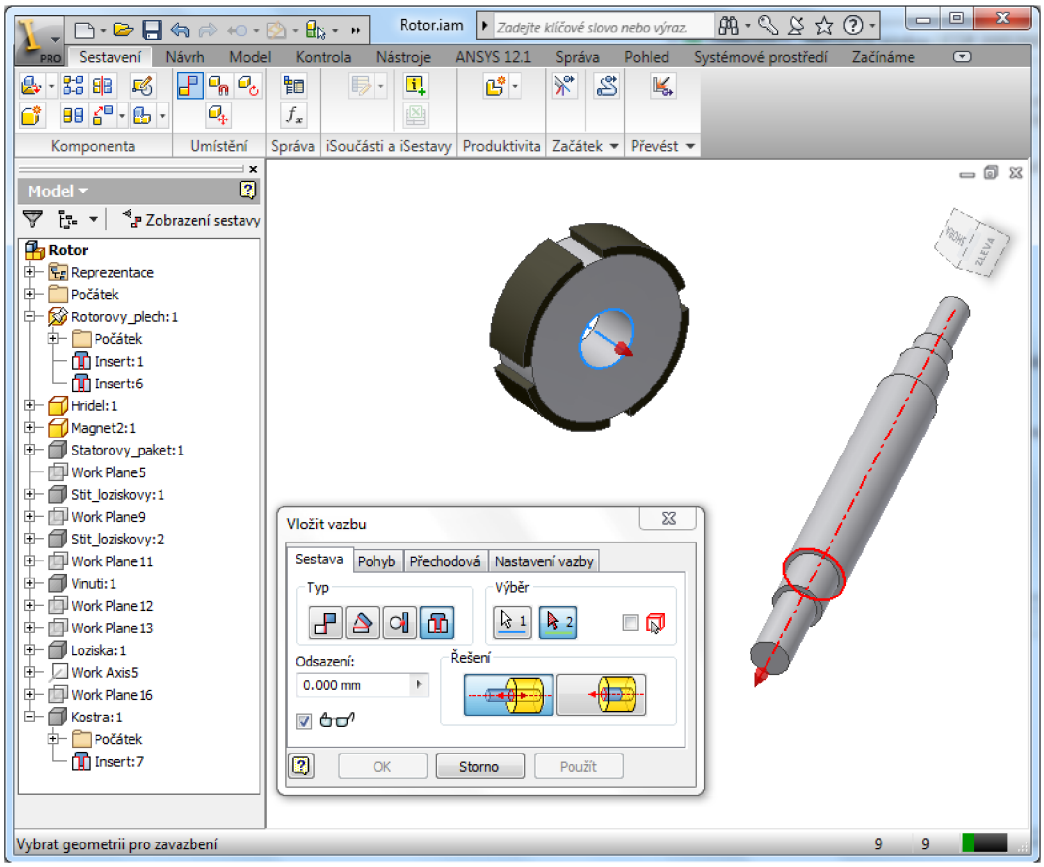
a) Vytvoření nového projektu - Je základní předpokladem tvorby sestavy. Na pracovní plochu se nejdříve vloží všechny požadované díly tvořící sestavu. V prostředí sestavy je možné kromě vkládání hotových dílů také vytvářet nové díly

standardním postupem jako při tvorbě jednotlivých dílů, popřípadě vkládat díly z knihovny normalizovaných součástí.

b) Odstraňování stupňů volnosti - Pomocí vazeb se postupně odebírají stupně volnosti jednotlivých dílů tak, aby se zamezilo pohybu v nežádoucích směrech a zajistila se správná poloha jednotlivých dílů v sestavě. Poloha jednotlivých dílů vůči sobě je definována použitím vhodné vazby na plochy jednotlivých komponentů.

c) Skládání sestav - Jednotlivé sestavy lze dále skládat dohromady, až do finálního modelu. U hotové sestavy je možné provést kontrolu kolizí jednotlivých dílů, kvůli včasnému odhalení nepřesností.

d) Volba materiálu - Lze (ale není to povinné) dodefinovat materiál jednotlivým dílům modelu. Definice materiálů má při geometrickém návrhu význam pouze pro lepší vizuální odlišení. Fyzikální vlastnosti materiálů lze použít například pro kontrolní výpočty v MKP modulu.



Obrázek 5 - Použití vazby Vložit při tvorbě sestavy rotoru

Pro tvorbu sestav jsou k dispozici tyto základní vazby:

- *Proti sobě* - Slouží pro umístění vybrané plochy rovnoběžně s totožnými plochami nebo zarovná součásti vedle sebe s plochami ve stejném směru. Mezi plochami může být také odsazení. Jde o jednu ze základních a často používaných vazeb v sestavách, kde díly nejsou rotačního tvaru. Jedná se o vazbu, která je uživateli používaná ze všech nejvíce.
- *Úhel* – Umístí plochy dvou dílů proti sobě pod určitým úhlem. První díl určuje kladný směr. Jde o variaci předchozí vazby *Proti sobě*.
- *Tečně* – Způsobí, že se geometrie mezi plochami stýkají v bodě tečnosti. Tečnost může být uvnitř nebo vně křivky. Jde o podobnou vazbu jako je *Vložit,* rozdíl je především v tom, že u vazby *Tečně* nejsou osy rotačních součástí shodné.
- *Vložit* – Umístí válcovité konstrukční prvky s rovinnými plochami kolmo na osu válce. U válcovitého komponentu zůstává stupeň volnosti otáčení.
- *Rotace* – Určuje směr otáčení dílu vzhledem k druhému.
- *Rotace-Posunutí* – Určuje otáčení rotačního komponentu vůči lineárnímu posuvu dalšího komponentu.[2]

3 PŘEHLED NEJDŮLEŽITĚJŠÍCH NOVINEK V AUTODESK INVENTORU 2010

Pokud by se měla nová verze programu popsat v několika větách, dalo by se říci asi toto: Autodesk Inventor 2010 přináší celou řadu novinek. V nové verzi aplikace Inventor je uživatelské prostředí vycházející z uživatelského prostředí Office 2007, což je na první pohled asi nejvýraznější změna. Tato změna přináší pro uživatele pohodlnější ovládání. Nástroje jsou tematicky tříděny do palet nástrojů, jejichž vzhled a polohu si může uživatel měnit dle libosti. Samozřejmostí je volba mezi novým uživatelským rozhraním a starším vzhledem, takže se nemusí uživatel přeučovat na jiný systém uspořádání, pokud mu nové uspořádání nevyhovuje.

Inventor 2010 umožňuje uživateli i import modelu ve formátu JT nebo Catia V5. To je změna, kterou ocení především uživatelé spolupracující s uživateli konkurenčních řešení.

Nejvýznamnější rozšíření prodělal modul pro výpočty pevnostní analýzy metodou konečných prvků. Tento modul, vycházející z výpočetního softwaru Ansys, nyní umožňuje kromě analýzy komponentů také analýzu celých sestav. Pro jednotlivé díly lze samostatně definovat hustotu konečnoprvkové sítě (verze Autodesk Inventor Professional 2010).

3.1 Novinky v Autodesk Inventoru 2010

3.1.1 Uživatelské rozhraní

Uživatelské rozhraní Autodesk Inventoru prošlo výraznější změnou. Nová verze přinesla používání pásu karet na místo roletového menu. Pro přechod na nový způsob ovládání je důležitý nástroj, který volbě příkazu v roletovém menu ukáže odpovídající příkaz v pásu karet.

Pás karet umožňuje přístup k příkazům a mění se podle režimu, ve kterém se uživatel v současné chvíli nachází. Roletové menu „Soubor“ je nahrazeno aplikačním menu. Přístup do toho menu je přes ikonu „žlutého I“ v levém horním rohu aplikace.

Kromě operací se soubory (otevírání, ukládání atd.) je možné v této části najít:

- Vyhledávání příkazů
- Seznam naposledy otevřených souborů
- Třídění a seskupování souborů
- Náhledy aktuálně a naposled otevřených souborů

Nad pásem karet se nachází menu rychlého přístupu, které obsahuje nejpoužívanější příkazy. Jednoduchým způsobem lze tuto nabídku upravovat.

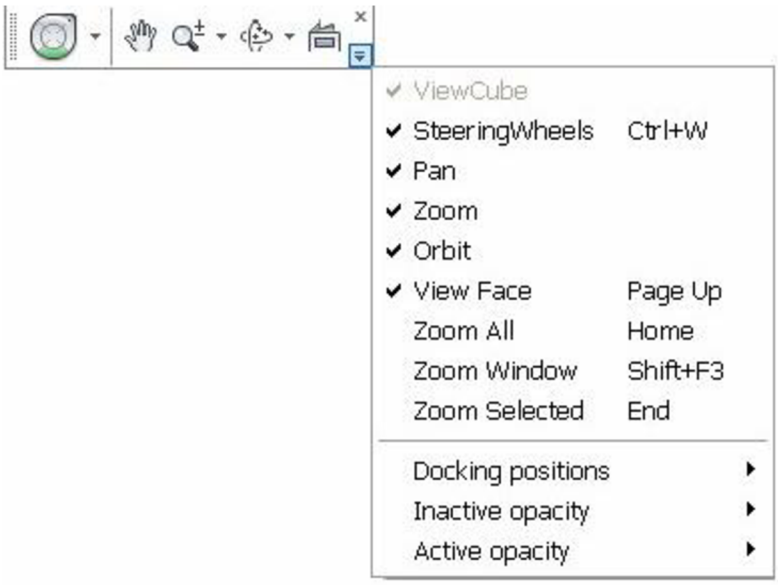
Po najetí na většinu příkazů se objeví krátká nápověda - často obsahuje vysvětlující obrázek. Chování nápovědy je možné nastavit v konfiguraci. Pro menu je možné použít klasické (menu jako předchozí verze) nebo nové (pomocí pásu karet) uživatelské rozhraní. V případě pásu karet lze zvolit ze dvou barevných možností ikonek, viz obr. 7.

Obrázek 6 - Pás karet

Obrázek 7- Dvě barevné varianty ikonek

3.1.1.1 Nástroje pro práci s obrazovkou

Nový navigační panel s příkazy pro práci s obrazovkou lze svázat například s nástrojem Náhledová kostka (View Cube).



Obrázek 8 - Navigační panel pro práci s obrazovkou

3.1.2 Náčrtová oblast

Inventor 2010 přinesl změny v náčrtové oblasti týkající se 2D zobrazení. Nově lze používat bloky nazvané seskupení 2D geometrie. U těchto bloků je možné provádět editaci, měnit jejich vlastnosti. Dokonce je možné je rozkládat. Lze definovat i vnořené bloky, které obsahují další bloky. Vnořené bloky mohou být flexibilní (podobně jako sestavy). Pro jejich snazší definování je vhodné použít importované bloky z AutoCADu.

Ve 3D náčrtu lze nově vytvářet pomocí příkazu oblouky. Tento příkaz je novinkou a při realizaci se používá metody třech bodů anebo metodu *Střed, počáteční, koncový bod.*

V dialogovém panelu pro rotaci a měřítko přibylo tlačítko s názvem *Použít*.

Další změnou v náčrtovém prostředí je zjednodušení menu sloužící k editování spline. Byla zrušena volba pro *Uzel*. Šedě jsou zobrazeny velikosti a směry normál. Upravené uzly lze vrátit v případě potřeby do původního tvaru. Na spline jsou pomocí čtverečků graficky znázorněny koncové body a pomocí kosočtverců body zjemnění.

Novým příkazem pro 3D náčrty je příkaz sloužící k vytvoření křivky siluety součásti. Tento příkaz se používá pro určení dělící křivky v určitém směru. [9]

3.1.3 Tvorba součásti

Další převratnou novinkou je to, že součást může být nyní složena z více těles. Lze používat normální konstrukční prvky pro vytváření nových objemů v souboru součásti. Objemy lze v rámci součásti i posouvat a je možné na ně aplikovat booleovské operace. Ve většině konstrukčních prvků je možnost aplikovat tento konstrukční prvek jen na vybraný objem, případně jím vytvořit objem nový. Jednoduchým způsobem lze rozdělit součást tvořenou jedním objemem na součást tvořící z více objemů, víceobjemovou součást. Jinými slovy lze do modelu součásti vložit pomocí odvození jinou součást jako další objem. Při tomto vložení lze nastavit, jakým způsobem se součást vloží. Pro toto vložení lze použít již zmíněné booleovské operace.

Pro modelování součástí přibyly nové konstrukční prvky, které jsou využitelné při modelování plastových výlisků. Jedná se o následující konstrukční prvky:

- Vytváření mřížek např. pro ventilátory
- Vkládání výstupků pro jednodušší sešroubování dvou částí plastových výlisků
- Pro umístění rovinných části na zakřiveném povrchu
- Pro spojení jednotlivých dílů pomocí západek
- Pro hromadné zaoblování součásti
- Umístění zámku podél dělicí roviny

Při využití funkce šablonování[1] je možné používat kontextové menu, které je k dispozici zmáčknutí pravého tlačítka myši. V tomto menu lze zvolit výběr řezu, trajektorií osy šablonování nebo řezů.

Tabulkou řízené součásti, tzv. iSoučásti, které obsahují iPrvky, je možné exportovat jako tabulkou řízené konstrukční prvky.

3.1.4 Sestavy

Pro zvýšení produktivity práce přináší nová verze 12 nových příkazů:

- Přejmenování položek v prohlížeči – lze zvolit 3 schémata přejmenování
- Přidání součásti nebo sestavy
- Uložení a nahrazení komponentu – vybraný komponent se uloží pod jiným názvem a potom se automaticky nahradí za vybraný komponent

---

[1] *Šablonování – funkce, kdy se nakreslí několik náčrtů s průřezem a s trajektorií, která ty průřezy spojuje a Inventor pomocí funkce šablonování vytvoří součástku s hladkým přechodem mezi dvěma tvary s tím, že sleduje zvolenou trajektorii. Například se nakreslí čtverec a kruh a mezi nimi zahnutá čáru a pomocí funkce šablonování se vytvoří „roura“, která bude začínat se čtvercovým průřezem a končit kulatým průřezem, zároveň bude mít tvar trajektorie.*

- Upevnění komponentu a přesun do počátku
- Odvození komponentu – po zadání jména je komponent umístěn do nového souboru, v něm je obsažen odvozený vybraný komponent
- Umístění komponentu do počátku vybraného komponentu
- Abecední setřídění komponentů
- Analýza stupňů volnosti
- Aktualizace všech nahrazených součástí
- Vytvoření náhradní součástí ze všech podsestav
- Aktivace určité úrovně detailu ve všech podsestavách

Pole komponentů může sloužit k vytvoření dalšího pole komponentů za použití již existujícího pole komponentů. Jinými slovy již není již nutné vytvářet další podsestavy.

Dalším zlepšením je zvýraznění geometrie vazby, pokud se na vazbu najede kurzorem. Barvy zvýraznění se shodují s barvami použitými při vytváření této vazby. U vazeb se navíc zobrazují i názvy komponentů, mezi kterými je vazba použita. Tato volba není zapnuta automaticky, ale lze ji nastavit/zapnout v konfiguraci. Novou ikonu dostala vazba *Proti sobě*, pokud je u jedné ze součástí vybrána válcová plocha.

V konfiguraci lze nastavit, jak bude při otevření sestavy sestava reprezentována. Nejedná se však o nic, co se nedá změnit, toto předvolené nastavení je možné změnit již při otvírání sestavy.

Změna struktury je inteligentnější než kdykoliv předtím. Bez změny fyzické polohy komponentů lze přesouvat součásti, celých podsestav uvnitř struktury prohlížeče i polí komponentů při tomto přesunu zůstávají zachovány vazby mezi komponenty (ve většině případů). V případě, že vazby není možné přenést, jsou takové vazby označené a je uživateli nabídnuta oprava, respektive sada nástrojů nutných pro opravu.

Do složek vytvořených v prohlížeči, lze přesouvat komponenty. Tato struktura složek může být tvořena několika úrovněmi. Zároveň je možné používat na tyto složky mnoho příkazů a pracovat s nimi jako kdyby se jednalo s podsestavami. Je možné například upevňovat součásti, měnit viditelnost či strukturu rozpisky.

Novým příkazem sloužícím ke zmenšení objemu sestavy je *Shrinkwrap,* tento příkaz se používá pro práci s velkými sestavami a využívá mechanismus odvozeného komponentu pro konvertování sestavy do zjednodušené součásti. Úroveň zjednodušení je možné nastavovat podle viditelnosti jednotlivých komponentů sestavy, odstranění některých komponentů sestavy je možné, záleží na velikosti zalepení mezer. Možné je i přerušení se základní komponentou. Příkaz *Shrinkwrap* lze použít pro vytvoření zjednodušené součásti anebo pro vytvoření náhrady. Pro vytvoření náhrady se využívá zobrazení úrovně detailu.[9]

3.1.5 Rozpiska

Editovat rozpisku lze v dialogovém panelu. Editace je podobná práci v Microsoft Excelu (dále jen Excelu):

- Klávesy SHIFT a CTRL slouží pro výběr plynulých nebo neplynulých výběrových množin.
- Pro vyplnění buněk se stejně jako v Excelu používá uzlů v pravém dolním rohu buňky.
- Dále lze provádět kopírování buněk vevnitř tabulky, ale i do jiné části rozpisky či souboru externího.
- Příkazy k použití se skrývají pod pravým tlačítkem. Jedná se o příkazy typu otevření souboru, kopírování a vložení pomocí schránky, přeměna znaků, hledání, nahrazování atd.
- Kopírování a vložení lze provést s pomocí schránky mezi dialogovým panelem rozpisky a Excelem, a to včetně neplynulé výběrové množiny

Z prostředí rozpisky je možné otevírat součásti i celé sestavy. Tento příkaz je dostupný přes pravé tlačítko při výběru řádku v rozpisce. Zároveň se v grafickém okně zvýrazní vybraný komponent.

Úpravy v rozpisce jsou ukládány do souboru sestavy. Jestliže je upravena rozpiska šablony sestavy, je tomto tato změna promítnuta do následných sestav. Konfiguraci rozpisky je možné importovat a exportovat například do souboru typu XML, což je výhodné především pokud chceme rozpisku dále importovat. Jako sloupec rozpisky lze požít sloupec s náhledem, tento sloupec je u nové šablony viditelný automaticky Což neplatí pro šablony staré, kde bylo nutné se o zviditelnění postarat. Je samozřejmý i import a export nastavení.

3.1.6 Obsahové centrum

Obsahové centrum, dále jen OC. Jestliže je OC používáno jen pro jednoho uživatele, není nyní nutné se přihlašovat k žádnému serveru. Administrace a konfigurace tohoto obsahového centra je snazší, používání je rychlejší a pohodlnější.

V dialogovém panelu konfigurace Autodesku Inventoru lze nastavit volby:

- Přístup ke knihovnám – je možné určit, zda se budou používat lokální knihovny bez nutnosti se přihlašovat anebo se použije způsob známý z předchozí verze a to Autodesk Vault Server.
- Obnova zastaralých normalizovaných součástí při vkládání – touto volbou se řídí obnova již existujících součástí ve složce OC. Jestliže není volba schválena (zaškrtnuta), potom jsou použity již vygenerované soubory ze složky OC.

Dialogový panel konfigurace knihoven OC je přepracován následujícím způsobem:

- Připojení a i odpojení knihovny je možné použitím označovacího symbolu u jména knihovny.
- Tento panel zobrazuje všechny knihovny.
- V případě lokální knihoven, tj. bez přihlašování, je možné vytvářet nebo mazat uživatelské knihovny. Vlastnosti těchto knihoven lze zobrazovat.
- Je možné transformovat lokální knihovny do knihoven, které jsou řízeny Autodesk Vault serverem a obráceně (k tomu slouží průvodce).

Nástroj pro aktualizaci knihoven byl vylepšen a toto vylepšení se skládá ze dvou oddělených procesů – migrace a synchronizace. První proces-migrační aktualizuje šablony a data rodiny knihovny do nového formátu. Druhý proces- synchronizace přenáší změny od nadřazené rodiny k podřízené. Při tomto procesu je možné potlačit odkaz na nadřazenou rodinu a později.

Do uživatelské knihovny zadat jiný i jiný materiál. Přidávat jej je možné k vybrané velikosti, ke všem velikostem vybrané rodiny a k nové rodině, pokud je to vytvořená kopie z již existující rodiny.

Normalizované díly lze vkládat do sestavy jako standardní díly, tzn. do složky OC nebo do pracovní složky, to se týká uživatelských dílů. Nastavení tohoto druhu se provádí v konfiguračním dialogu Inventoru.

Obnova normalizovaných součástí je více zřetelná. Je možné rozhodnout, zda jsou normalizované součásti obnoveny automaticky nebo na jen na požádání. Tento příkaz zahrnuje jen součásti s vlastnostmi nebo geometrií lišících se od údajů v knihovnách OC. Zároveň je vytvořen logovací soubor, ve kterém je možné vidět proces obnovy.

V rámci knihoven lze přesouvat rodiny nebo kategorie z jedné do druhé. Při přesunu se nemění obsah a všechna data rodiny, stejně tak zůstávají zachovány kategorie a odkazy na nadřazenou rodinu.

Pokud je kopírována rodina do knihovny uživatelské, lze tento proces zastavit tlačítkem. Zkopírovaná data (do cílové rodiny), jsou kompletní a funkční.

V prohlížeči Inventoru je možné odlišení vložené normalizované součásti od uživatelských, k tomu slouží nové ikonky.

V dialogovém panelu vložení normalizovaného dílu je možné uživatelsky přizpůsobit, jaké sloupce se budou zobrazovat při detailní pohledu na normalizované součásti. V dolní části tohoto okna je možné zobrazení tabulky rodiny. Pak je možné vkládat díl kliknutím na konkrétní řádek.

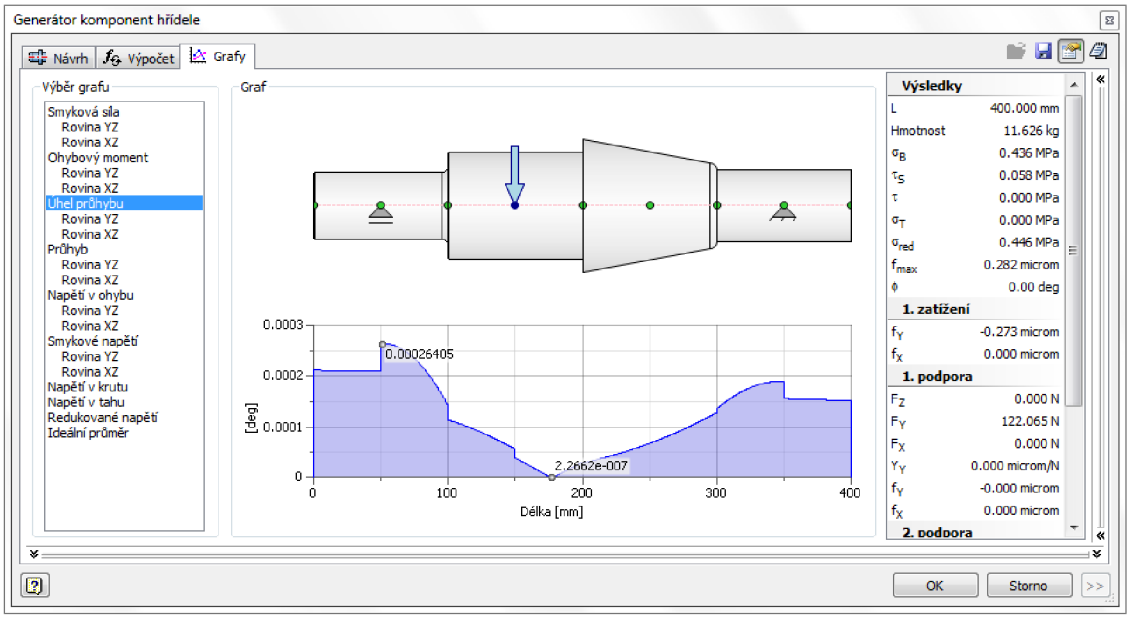
Viditelnost pracovních konstrukčních prvků je možné řídit u vložených normalizovaných součástí. Ovšem viditelnost lze nastavit pouze u rodin, vzniklých bez odkazu na nadřazené rodiny.

Tabulku rodiny je možné exportovat do Excelu, v Excelu ji upravit a importovat zpět do OC (i pro tento účel je zde tlačítko).[9]

3.1.7 Design akcelerátoru

Novinkou sloužící pro tvorbu vaček je generátor válcových vaček. Lze navrhnout tvar vačky, provést pevnostní výpočet a potom tvar vačky vložit do sestavy. Tvar vačky lze přidělat k již vymodelované geometrii.

Další novinka se nachází v dialogovém panelu pro výpočet a vložení čelních ozubených kol. Jedná se o tlačítko sloužící k náhledu. Díky tomuto tlačítku je možné vidět animaci přímku záběru, záběr kola s protikolem a ozubeným hřebenem. Pro již vytvořená ozubená kola je možné vyexportovat skutečnou geometrii boku kola. Lze nastavit toleranci a další parametry. Při vkládání ložisek přenášející axiální zatížení lze řídit směr vložení. [9]



Obrázek 9 - Použití design akcelerátoru pro tvorbu hřídele

3.1.8 Výkresová dokumentace

Zaktualizovat vlastnosti výkresu podle vlastností modelu umožňuje příkaz pro aktualizaci kopírovaných vlastností z modelu. Výkres se otevře pomocí pravého tlačítka, a to výkres modelu součásti, sestavy a prezentace. Vyhledávání výkresu lze provést v aktuální složce, kde výkres leží, a maximálně do třetí úrovně podsložek. V případě nenalezení výkresu se nabídne panel s nabídkou otevření souboru.

Poznámky ve výkresech

Novinkou je možnost zobrazení duálních jednotek na výkresech a to u poznámek děr, zkosení a ohybu a razníku.

Při vytváření pozice lze odkazové čáry krokovat po 15 stupních. Středové body pozic je možné horizontálně a vertikálně zarovnávat k již umístěným pozicím.

Novým příkazem lze uspořádat vytvořené kóty. Je možné automaticky uspořádat kóty podle jedné nebo obou os, případně vybrat všechny kóty ve výkrese. Při výběru např. jen horizontálních kót lze navíc určit, k jakému obrysu kóty uspořádat.

Při umístění kót do výkresu lze nastavit, aby se automaticky otevíral dialogový panel pro editaci kóty. Tím je možné rovnou ke kótě přidat lícovací značky, úchylky a další údaje. V dialogovém panelu je možné toto implicitní nastavení vypnout.

Jako filtry výběru lze použít tři další možnosti. Nyní je možné ve výkrese vybrat všechny kóty modelu, všechny kóty s přepsanými hodnotami nebo všechny kóty AutoCADu. Poslední jmenované lze použít pouze u DWG souborů.

Pro křivky typu spline je možné vytvořit kóty v koncových bodech a kóty pro minimální a maximální hodnoty ve směrech X a Y. Tyto typy bodů lze použít i pro kóty od základny.

Značka pro tolerance tvary a polohy je rozšířena o další symboly, např. plus/minus, sklon, kuželovitost.

V textech značek je možné používat kurzívu. Nastavení nemá vliv na symboly značek. K odkazové čáře značek lze přidávat další texty.

Autodesk Inventor nově podporuje normu ESKD. Podporu této normy je nutné načíst jako doplněk (nenačítá se implicitně). Tím se zpřístupní další příkazy. V odkazovém textu jsou další možnosti. Hmotnost v razítku má další možnosti formátování (jednotky, nastavení přesnosti). Lze vkládat texty technických požadavků.

Načrtnuté značky je možné upořádat v nových uživatelsky definovaných složkách.[9]

Výkresové pohledy

Při vytváření řezů lze použít jednu ze dvou metod. Nová je metoda vytváření rozbalených řezů. Použití je například u řezů převodových skříní, kdy se čára řezu jakoby rozbalí a teprve potom se vytvoří řez. [9]

3.1.9 Plechy a svary

- Svary- Při vytváření koutových svarů jsou podporovány mezery mezi součástmi. Pro přerušované svary lze měnit i směr. Žlábkový svar podporuje radiální vyplnění. Při výběru lze použít tečně navazující plochy.
- Plechy- Pro plechové díly je možné použít nový konstrukční prvek, který protahuje otevřený profil kolem vybrané osy. Pro modely vzduchotechniky lze použít nový konstrukční prvek šablonování. Je nutné vybrat dva profily a Autodesk Inventor mezi nimi tvoří objem. Rozříznutí plechových dílů je možné řešit pomocí dalšího konstrukčního prvku. Je přidáno

rozříznutí u plechových modelů, které byly vytvořeny pomocí uzavřených profilů. Někdy je výhodnější vkládat konstrukční prvky v rozvinutém tvaru. Lze použít konstrukční prvek pro rozvinutí, potom použít konkrétní konstrukční prvek (např. vysunutí) a plechový díl opět sbalit pomocí dalšího konstrukčního prvku. Více je vidět na obrázku. U ohybů v rozvinutém tvaru je možné řídit pořadí vytváření, které odpovídá technologickému postupu výroby plechové součásti. Použití jiného setřídění je viditelné v tabulce ohybů ve výkrese.

Na rozvinutém tvaru lze vytvářet kosmetické osy. [9]

3.1.10 Jiná zlepšení

- Parametry- Je možné jednoduše definovat nové uživatelské parametry. Při zadávání hodnot kót a ostatních hodnot v editačních panelech lze použít parametry, které ještě nebyly definovány.
- Výměnné formáty- Formátová řada, která slouží pro import a export, byla rozšířena o modely vytvořené v JT a CATIA V5. Nevýhodou je, podobně jako u ostatních převodních formátů není zde přenášena historie modelování. Výhodou je možnost zapnout asociativitu na zdrojové soubory.
- Inventor Studio- V oblasti vizualizací byly zlepšeny kamery v perspektivním pohledu. V dialogovém panelu pro editaci kamery lze měnit pomocí jezdce úhel zoomu kamery. Rozdíly mezi verzí 2009 a 2010 jsou v hodnotě perspektivního úhlu.
- V modelech lze používat uživatelsky definované souřadné systémy. V nich jsou definovány základní pracovní roviny, pracovní osy a středový bod, podobně jako v počátku. Uživatelský souřadný systém je možné různě umístit a orientovat. Použití souřadných systémů je v sestavách, výkresech (promítání souřadných systémů), náčrtech (zarovnání k souřadnému systému). V uživatelských souřadných systémech lze odměřovat. V konfiguraci Inventoru je možné zapnout upozornění na požadavek uložení. Po nastavitelné době se objeví nabídka, ve které je uvedeno, že je nutné uložit. Kliknutím je možné soubor uložit.
- Souřadný systém a jeho trojbarevná ikonka prošel změnou také. Ikonka souřadné systému, umístěna v grafickém okně, má označení písmeny X, Y, a Z. V dialogovém panelu konfigurace lze nastavit kvalitu zobrazení. [9]

3.2 Novinky Autodesk Inventor Professional 2010

3.2.1 Simulace

Prohlížeč dynamické simulace je aktualizován. Již odpadá nutnost přepínání se mezi režimem simulace a režimem sestavy, jelikož jsou příkazy pro práci se sestavou přístupné v prostředí simulace a lze je vyvolat otevřením kontextového menu pravým tlačítkem myši.

3.2.2 Metoda konečných prvků (MKP)

Strukturální a modální analýzu lze používat pro součásti i pro sestavy. Je možné:

- Pracovat podmínkami, přidávat okrajové podmínky pro zatížení a podpory pro jednotlivé součásti
- Detekovat a přidávat kontaktní podmínky
- Definovat a prohlížet mesh jednotlivých součástí
- Provádět více simulací v jediném dokumentu
- Možnost přepsat materiály součástí, tj. nadefinovat jiné než jsou modelu přiřazeny.
- Vyloučit některé součásti z analýzy, tj. ty bez podstatného vlivu na výsledek

Prostředí umožňuje používat parametrické analýzy. Je možně vybrat parametry modelu, zadat u nich rozsahy hodnot. Analýza potom provede výpočet pro jednotlivé kombinace hodnot parametrů. Při tomto způsobu výpočtu je možné použít i kritéria optimalizace. Potom analýza vyhledá hodnoty parametrů tak, aby odpovídali tomuto kritériu. Výsledné hodnoty parametrů je možné promítnout do jednotlivých součástí a tak tyto součásti následně změnit.

Možnosti zpracování výsledků analýzy jsou rozšířeny. V jednotlivých bodech na součástech lze zjistit výsledné hodnoty a umístit je do grafické plochy. Výsledky lze jednoduše animovat zvolením počtu kroků animace a výsledkem je animace ve formátu AVI.

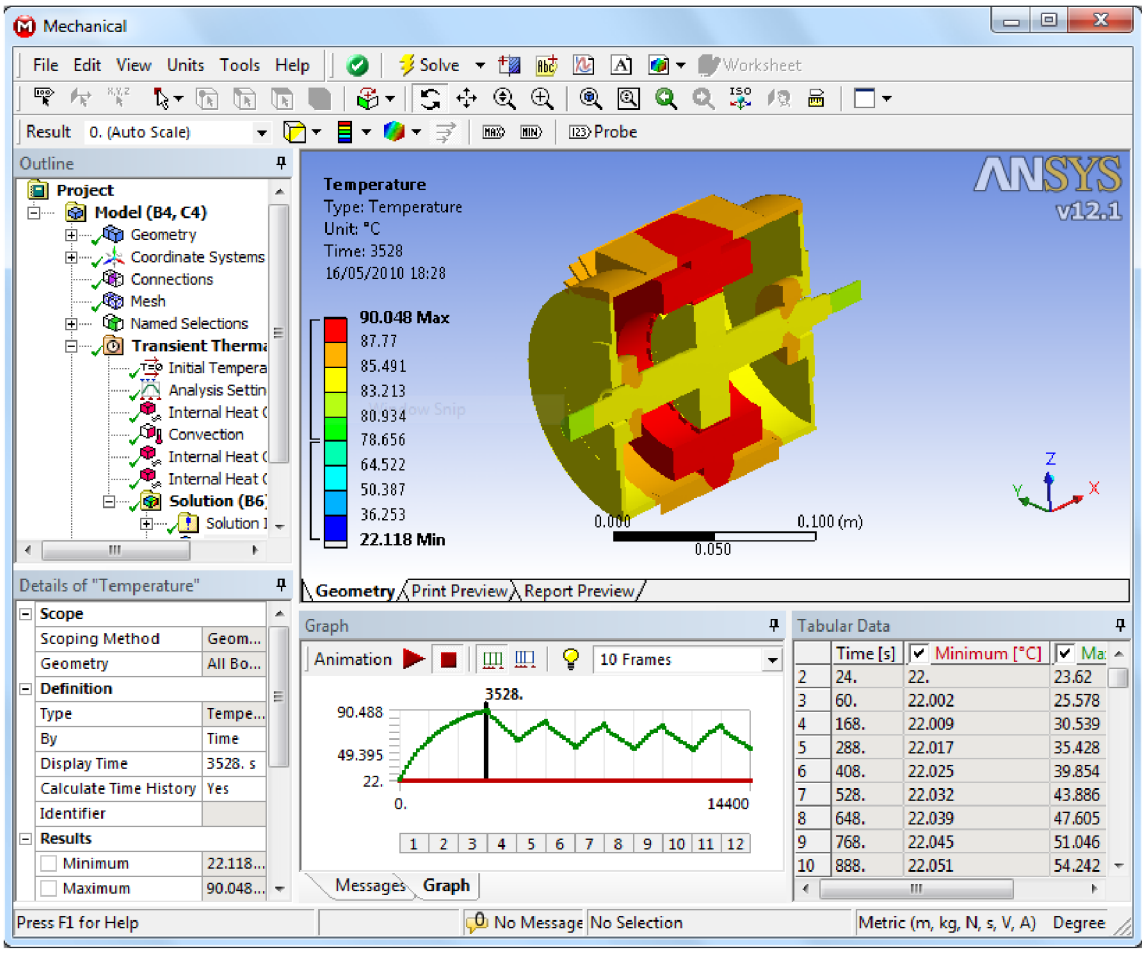
Pro zpracování výsledků slouží i nový generátor reportů. V dialogovém panelu je možné nastavit titulek, autora, logo, velikost obrázků a další parametry. Výsledek je ve formátu HTML Vizualizaci výsledku je možné exportovat do DWF souboru.[9]

4 ANSYS WORKBENCH

Součástí softwarového balíku Ansys je Ansys Workbench. Jedná se o zjednodušenou, pro uživatele přívětivější nástavbu Ansysu Classic. Stejně jako Ansys je založen na metodě konečných prvků a je vhodný pro řešení problémů z oblasti mechaniky, elektromagnetismu, tepla, akustiky a jejich kombinací a to ve 2D i 3D. Ansys umožňuje řešit lineární i nelineární úlohy.

Ansys Workbench byl vytvořený pro potřeby konstruktérů, klasický Ansys spíše ocení výzkumné ústavy. Workbench je sice mírně omezený oproti klasické verzi, toto omezení se ale s novějšími verzemi snižuje a běžný uživatel omezení ani nepozná. Ansys Workbench se přibližuje možnostmi víc a víc klasické verzi.Workbench velmi dobře spolupracuje i s moderními parametrickými CAD systémy. Podporována je široká paleta parametrických CAD systémů. Mezi nejvýznamnější patří Autodesk Inventor, Solidworks, Solidedge, NX, Catia nebo Pro/Engineer. Míra kompatibility závisí na použitém formátu souborů modelu. Z toho důvodu není třeba vytvářet geometrii v prostředí Ansysu, ale lze využít již vytvořeného modelu v jiném CAD programu. Autodesk Inventor dokonce umožňuje přímou importaci geometrie, což je vhodné spíše u menších sestav, jelikož u větších hrozí nebezpečí rozpadu modelu. Největší výhody:

- Ansys Workbench obsahuje jednoduchý parametrický modelář pro tvorbu a úpravy geometrie s ovládáním podobným jako v parametrických CAD systémech.
- Celý průběh prováděné simulace je plně automatizován s možností uživatelského zásahu do procesu.
- 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.
- Při řešení úlohy v Ansysu je možné volně přecházet mezi prostředím Workbench a Classic.
- Workbench je neustále ve vývoji a s každou novou verzí jsou integrovány další funkce Ansysu Classic.



Obrázek 10 - Uživatelské rozhraní Ansysu Workbench

4.1 Metoda konečných prvků- MKP

Metoda konečných prvků (dále MKP) je numerická metoda sloužící k simulaci multi-fyzikálních úloh popsaných diferenciálními rovnicemi. Využívá se také pro výpočty, jakými jsou například proudění tepla, rozložení elektromagnetického pole, atd. na vytvořeném modelu. Princip této metody je založen na tom, že je model rozdělen na určitý počet samostatných dílů – čím víc dílů tím větší přesnost výpočtu, ale také náročnost na délku výpočtu. Tímto rozdělením vznikne na tělese uzlová síť. Pro jednotlivé uzly jsou pak sestavovány diferenciální rovnice, které jsou pak pomocí programu řešeny některou z iteračních metod.

Jak již bylo řečeno, počet uzlů ovlivňuje výsledek, v praxi se ovšem počítá jen s nutným počtem dílů, který zaručuje rovnováhu mezi rychlostí výpočtu a jeho dostatečnou přesností. Uzlová síť, tzv. mesh, může být různě hustá (v celé ploše nebo jen v určité části) a může být složena z elementů různých tvarů. Tvar elementů se volí podle tvaru geometrie, přizpůsobuje se co nejvíc modelu. Zle využít meshe z elementů ve tvaru čtverců,

trojúhelníků, jehlanů, krychlí apod. Záleží na tom, zda se jedná o 2D nebo 3D model. U sestav s větším počtem dílů na sebe musí jednotlivé uzly sítě navazovat.

Metoda konečných prvků má uplatnění v mnoha inženýrských oborech. Především je užívána pro kontrolu navržených zařízení nebo pro stanovení kritických míst konstrukce. MKP je numerická metoda, a proto dává pouze přibližné výsledky, ovšem pro běžnou praxi je při správné aplikaci dostatečně přesná. Má uplatnění v mnoha oborech, slouží především v oblasti kontroly navrhovaných zařízení a zjištění jejich kritických míst a vlastností. Metody konečných prvků využívá celá řada softwarových balíků na trhu.

4.2 Pracovní prostředí

Pracovní prostředí je přehledné a intuitivní. Grafické uživatelské rozhraní je podobné například Autodesk Inventoru (dá se říci, že všem moderním CAD programům), což usnadní začátečníkům první kroky v prostředí. Automaticky se přizpůsobuje právě prováděné činnosti.

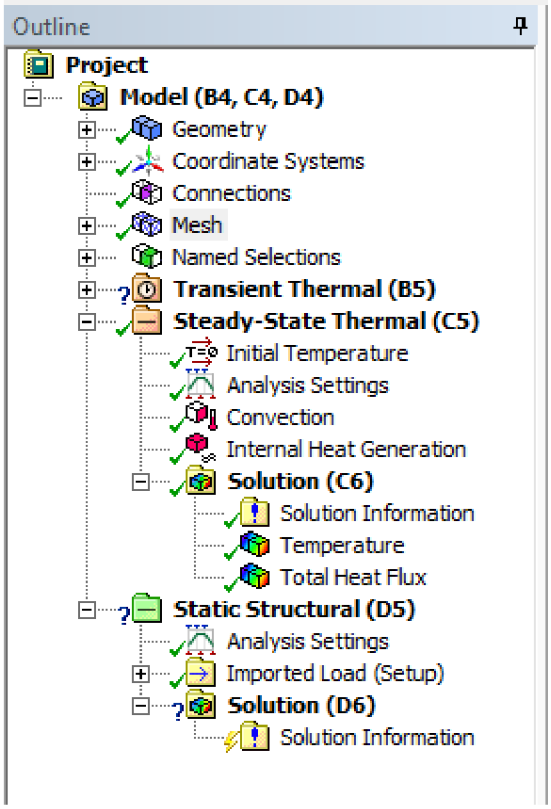
Rozhraní sestává z těchto částí:

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 přepínaní mezi jednotlivými moduly.

Jednotlivé pracovní kroky se ukládají do stromové struktury a bližší informace jednotlivých pracovních kroků se dají najít v okně pod stromovou strukturou.

Výhodou stromové struktury je snadná zpětná editace - jednoduše se lze vrátit ke kroku, který potřebuje uživatel změnit. Důležité je pro provedení změny (editace) do ostatních kroků model znovu vygenerovat, než se začne s další prací.

Program hlídá uživatele, aby nezapomněl na nějaký důležitý krok. Používá k tomu zelené zatržítko - pokud je krok v pořádku, a žlutý blesk - pokud něco není vyplněné. V případě, že se programu něco nelíbí, vyskočí chybové hlášení, upozorňující například na nepřesnosti v geometrii vzniklé importem apod.



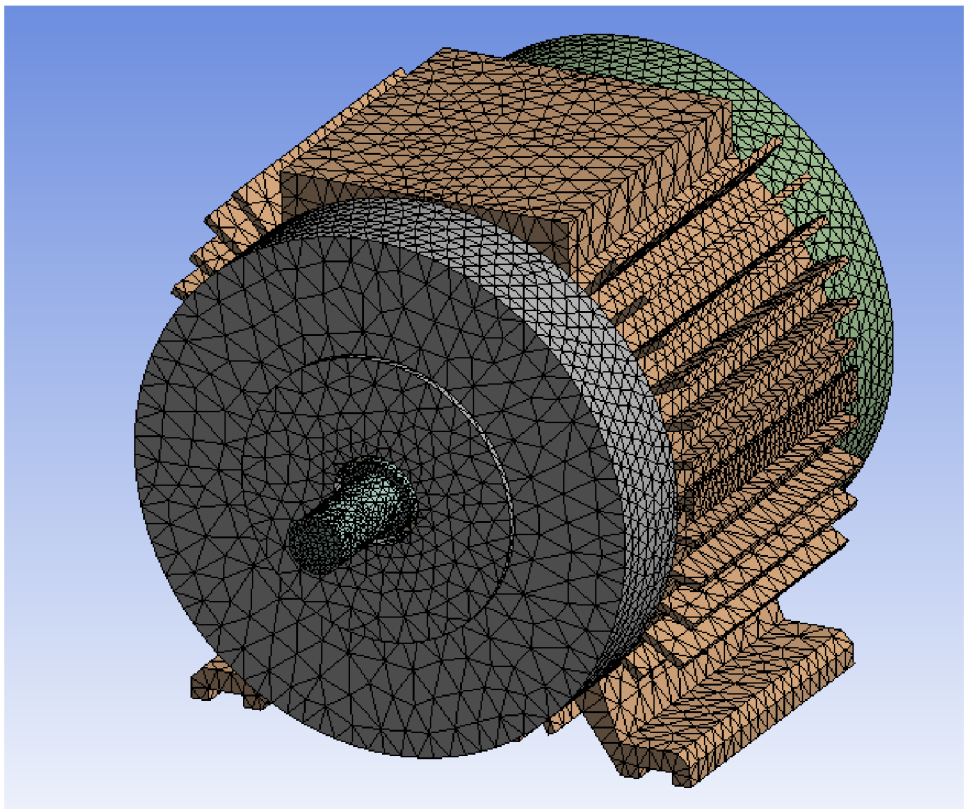
Obrázek 11- Stromová struktura pracovních úkonů

4.3 Práce v programu

Práce je rozdělena do tří etap:

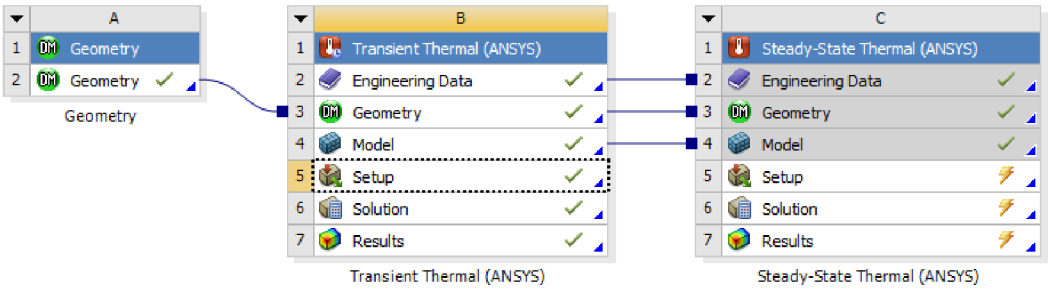
• *PreProcessing* - V této etapě se vytváří geometrie modelu nebo se importuje hotový model z jiného CAD programu. Volí se materiálové vlastnosti a generuje výpočetní síť podle složitosti modelu- typ meshe lze vybrat z nabídky nebo zvolit automatickou mesh (obrázek). Při tepelných výpočtech je také možné definovat kontakty mezi jednotlivými díly, ale i toto je v Ansysu Workbench plně automatizováno.

• *Solution* - Zde se volí typ analýzy, definují se zatížení a okrajové podmínky a veličiny, které chceme analýzou určit. Dále je možné zvolit způsob zápisu výsledků atd. Po zvolení analýzy se uživateli ukazují jen nabídky potřebné pro zvolenou analýzu, což je přehlednější a zabraňuje to nežádoucím chybám. Po zadání všech potřebných hodnot a nastavení analýzy je možné spustí vlastní výpočet, do kterého již uživatel nezasahuje. Doba potřebná pro vyřešení úlohy je závislá na složitosti modelu a počtu elementů sítě. V praxi se tyto výpočty provádějí na velmi výkonných pracovních stanicích.



Obrázek 12 - Automatická mesh

• *PostProcessing* - V této etapě dochází k vyhodnocení řešené úlohy. K dispozici je několik možností grafického znázornění výsledků. Výsledky lze i animovat - respektive vytvořit animaci z průběhu analýzy, například změnu teploty ve stroji v průběhu času. V této části je i nabídka vytvoření záznamu z analýzy, která obsahuje veškeré informace o modelu, fyzikálních vlastnostech materiálů, veškerá nastavení, typ analýzy a výsledky. Nejdůležitější je však při práci s Ansysem mít představu o výsledku, aby uživatel byl schopen určit, zda je výsledek reálný, nebo zcela chybný a mohl se případně opravit.[3]



Obrázek 13 - Správce simulací

5 TEPLOTNÍ ANALÝZA EC MOTORU

V této části bude popsán postup práce při vytvoření teplotní analýzu výše zmíněného elektronicky komutovaného motoru pomocí metody konečných prvků v programu Ansys Workbench krok po kroku.

Cílem této simulace je určit hodnotu oteplení statorového vinutí v čase 10 min. a při jmenovitém zatížení, dále určit hodnotu oteplení po ustálení stroje a hodnotu oteplení při přerušovaném chodu. Získané hodnoty budou srovnány s hodnotami získanými měřením, které lze považovat za referenční.

Tato práce navazuje na Semestrální práci 2 [8], kde byl proveden výpočet oteplení tohoto stoje za použití jednodušší meshe pro získání hodnoty oteplení stroje při 10 minutovém zatížení jmenovitým proudem. Nyní bude proveden výpočet přesnější výpočet při uvažování dalších ztrát, které byly v prvním výpočtu zanedbány a výpočet bude proveden až do ustálené hodnoty teploty.

Dále bude provedena simulace přerušovaného chodu stroje.

5.1 EC motory obecně

EC motor je v podstatě "obrácený "stejnosměrný motor, proto se někdy nazývá bezkomutátorovým stejnosměrným motorem. Zatímco klasický stejnosměrný motor má magnety ve statoru a vinutí na rotoru, elektronicky komutovaný motor má magnety na rotoru a vinutí na statoru. Funkci komutátoru přebírá tranzistorový měnič, který podle polohy rotoru přepíná proud do jednotlivých statorových vinutí.

5.1.1 Konstrukce

Elektronicky komutovaný motor sestává ze statoru, který se podobá standardnímu statoru třífázového asynchronního nebo synchronního stroje: ve statoru je v drážkách uloženo třífázové vinutí, statorové drážky jsou zešikmeny zpravidla o jednu drážkovou rozteč z důvodu snížení reluktančních momentů, způsobených různou magnetickou vodivostí drážek (vzduch) a zubů (železo). Rotor bývá konstrukčně uspořádán buď s magnety na povrchu, kdy nedochází ke koncentraci magnetického toku a magnetická indukce v mezeře odpovídá indukci permanentních magnetů, nebo s magnety vestavěnými uvnitř rotoru s koncentrací magnetického toku pólovými nástavci. Jako magnetických materiálů se používá vzácných zemin nebo levnějších tvrdých feritů, které však nemají tak dobré magnetické vlastnosti. Kvalita permanentních magnetů se porovnává podle průběhu hysterezní křivky, zejména její tzv. demagnetizační části.

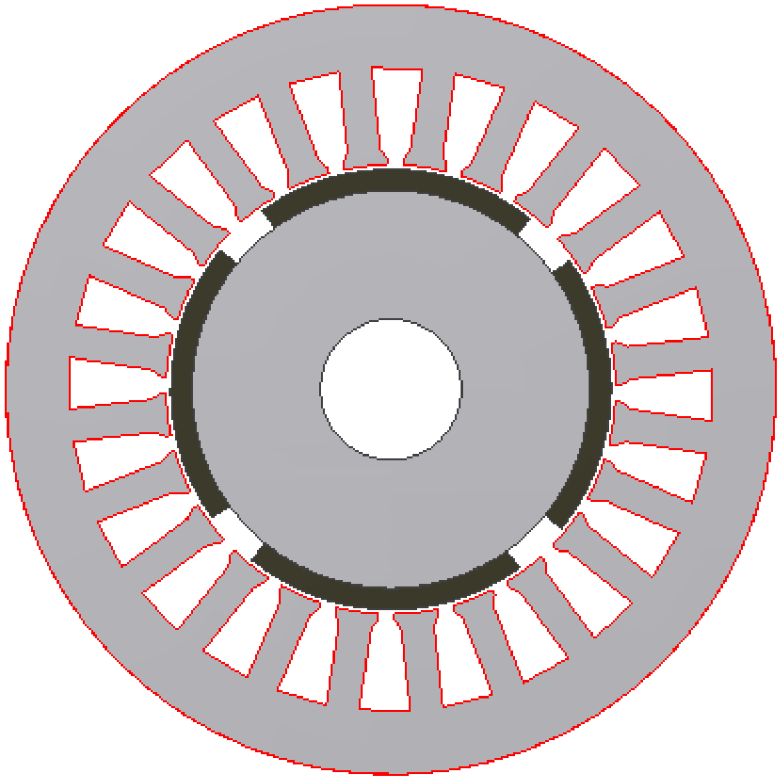
Dělení dle konstrukce:

válcové EC motory

- s vnitřním rotorem
- se statorovým vinutím bez drážek
- se statorovým vinutím v drážkách
- s rotujícím jhem
- s vnějším rotorem

ploché EC motory

- s vnitřním rotorem (krátký válec)
- s vnějším rotorem (plochý diskový tvar)



Obrázek 14 - Magnetický obvod EC motoru s permanentními magnety nalepovanými na povrchu rotoru

5.1.2 Princip funkce

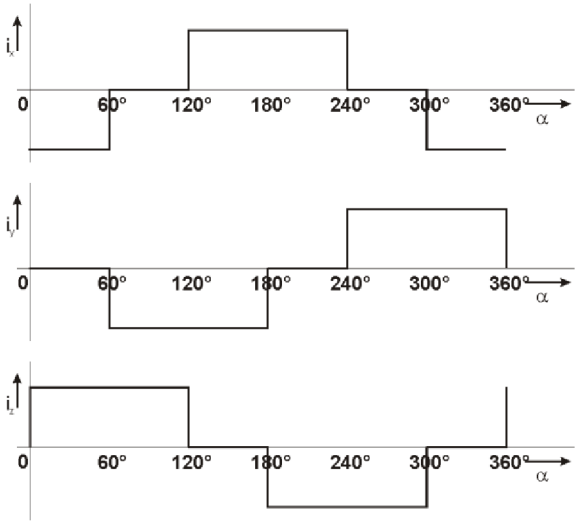
Budicí vinutí EC motoru je tvořeno permanentními magnety, které vytvářejí stacionární magnetické pole, a vinutí kotvy je pak nejčastěji několikafázové.

Princip stroje spočívá v připojování jednotlivých fází vinutí kotvy ke stejnosměrnému zdroji elektrické energie pomocí elektronických prvků, nejčastěji tranzistorů, podle aktuální polohy hřídele tak, aby stroj vytvářel moment v požadovaném směru a otáčel se požadovanou rychlostí. Z konstrukčního hlediska je elektronicky komutovaný stroj podobný spíše stroji synchronnímu.

O správnou funkci elektronické komutace se stará řídicí jednotka a snímač polohy rotoru. Ten musí předávat informace o poloze rotoru do řídicí jednotky, která pak určuje napájení jednotlivých vinutí. Snímač musí být na motoru orientován tak, aby směr magnetického pole generovaného statorovou cívkou předbíhal magnetické pole permanentního magnetu o 90° elektrických. Právě při tomto úhlu vzniká největší mechanický hnací moment. Úkolem řídicí jednotky je pak zajistit, aby tento úhel byl dodržen v celém rozsahu pracovních otáček a zatížení.

Průběh přepínání proudu do jednotlivých vinutí závisí na použitém snímači a jemu odpovídající řídicí jednotce. Jako snímače polohy lze použít rezolver, jehož primární cívka se napájí sinusovým napětím. Ve dvou sekundárních cívkách, navzájem otočených o 90°, se pak indukuje napětí odpovídající úhlu natočení vinutí rotoru. Řídicí jednotka v tomto případě vytváří pomocí informace z rezolveru tři napájecí napětí sinusového průběhu, která jsou vzájemně posunuta o 120° elektrických.

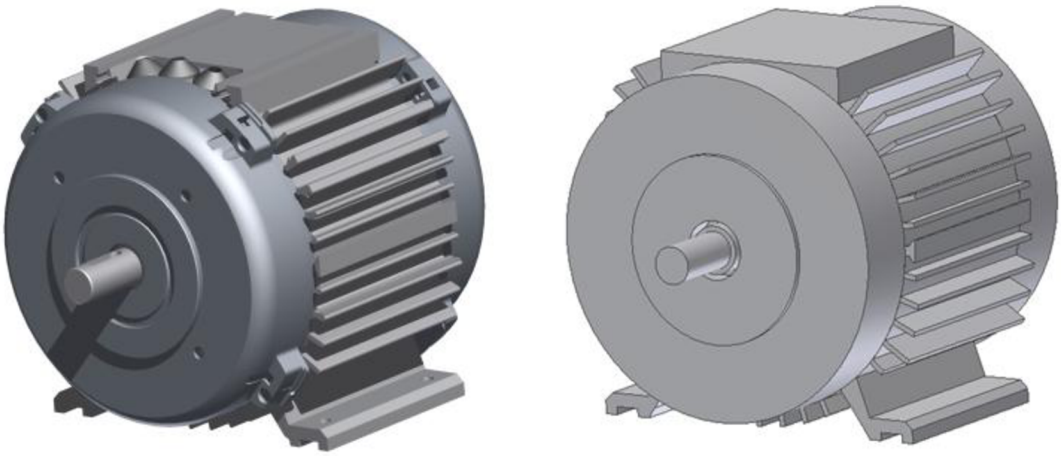
Digitální výstupní signál, a tím i řídicí, lze získat ze snímače vytvořeného pomocí Hallových sond. Pro nejjednodušší způsob řízení se ke snímání polohy rotoru používá snímač se třemi Hallovými sondami. Sondy snímají intenzitu magnetického pole magnetu na rotoru nebo zvláštního pomocného permanentního magnetu určeného ke snímání polohy. Každá sonda připojená k dvoupólovému motoru vytváří během jedné otáčky jeden kladný obdélník, který má dobu trvání rovnu půl periodě otáčení. Průběhy napětí ze tří sond jsou vzájemně fázově posunuty o 120°. Řídicí jednotka dvoupólového motoru tak dostává informaci o natočení rotoru šestkrát za otáčku a pomocí obdélníkových impulzů řídí proces komutace ve vinutí motoru.[5]



Obrázek 15-Průběhy fázových proudů EC motoru [5]

5.2 Vlastnosti simulovaného EC motoru

Elektricky komutovaný motor s vnitřním rotorem a se statorovým vinutím v drážkách.
Výrobce: ATAS elektromotory Náchod a.s.
Počet pólů p: 4
Jmenovité otáčky 4725ot/min
Chlazení: pasivní
Bez aktivního ventilátoru
Počet drážek na pól a fázi: 2
Permanentní magnety: Nd-Fe-B
Materiál kostry: hliník
Materiál vinutí: měď



Obrázek 16 - Model EC motoru před a po zjednodušení

5.3 Základní pojmy, materiálové konstanty a hodnoty důležité pro tepelný výpočet

Teplo

Je část vnitřní energie, kterou těleso přijme, respektive odevzdá, při tepelné výměně druhému tělesu. Teplo se značí písmenem Q a jeho základní jednotkou je joule [J]. Množství tepla obsažené v určité látce je možné určit ze vztahu:

$$\mathbf{Q = m \cdot c \cdot \Delta T}$$

Rovnice 1 -Výpočet množství tepla v látce

Kde $\boldsymbol{Q}$ … teplo látky [J]
$\boldsymbol{m}$ … hmotnost látky [kg]
$\boldsymbol{c}$ … měrná tepelná kapacita [$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
$\Delta \boldsymbol{T}$ … rozdíl počáteční a konečné teploty [K]

Teplota

Udává tepelný stav hmoty. Teplota má souvislost s kinetickou energií částic, konkrétně s její průměrnou hodnotou. Pokud se teplota snižuje, říká se, že těleso chladne. Pokud se naopak teplota zvyšuje, říká se, že se ohřívá. Při chladnutí odevzdává hmota do svého okolí teplo a při ohřevu z okolí teplo přijímá. Nejnižší možnou teplotou je teplota absolutní nuly, ke které se lze libovolně přiblížit, avšak nelze jí dosáhnout. Teplota se označuje písmenem T a jeho základní jednotkou je Kelvin [K]. Teplota se může udávat pomocí několika teplotních stupnic, které se liší podle své definice.

Přenos tepla

Teplo je energie, která je vázána na hmotu a přenáší se z jedné látky na druhou anebo prochází pouze jedinou látkou určitým průřezem ve směru gradientu teploty. Teplem může být i energie elektromagnetického záření o specifických vlnových délkách. Pak může existovat i bez hmoty ve vakuu. V tomto případě se uvažuje spíše než o teple o zářivé energii, resp. její hustotě. Zářivá energie je nositelem tepla a přenáší jej opět mezi látkami. Má svůj zdroj a cíl. Ve vakuu se šíří rychlostí světla ve formě rovinné, válcové nebo kulové vlny a to dle tvaru vysílací plochy.

Energie se předává za účelem vytvoření stabilního stavu rovnováhy. Většina přirozených systémů se buď nachází ve stabilním stavu anebo do něj postupně přecházejí. Důvodem je minimalizace energetické bilance soustav ve stabilním stavu. Stabilní systém vyžaduje minimální energii na svoji existenci a tudíž je stabilita z hlediska existence výhodná.

Tepelná rovnováha – v praxi ji nelze dosáhnout, důvodem je stálý pohyb hmoty. Stav, který vypadá jako stabilní v makropohledu, se může jevit jako nestabilní v mikropohledu.

Základní druhy šíření tepla

Vedení – *kondukce* - tepelná energie se postupně šíří v nepohyblivé hmotě. V případě simulovaného stroje je teplo, generované ve vinutí, vedeno statorovým plechem do statorové kostry a z chladicích žeber do okolního vzduchu.

Proudění – *konvekce* - dochází k přenosu tepla v důsledku proudění a promíchávání různě ohřátých částí hmoty.

Tepelné záření - *sálání* či *radiace* - dochází k vyzařování energie ze zdroje ve formě elektromagnetických vln a jeho následnému pohlcování ozařovaným tělesem.

Pro potřebu výpočtu v Ansysu je nutné znát hodnoty materiálových konstant. V modelu se vyskytovala převážně ocel, vinutí bylo měděné a magnety nalepené na rotoru byly NdFeB. V následujících tabulkách jsou veličiny pro jednotlivé použité materiály a vlastnosti vzduchu.

Měrná tepelná kapacita c - je množství tepla potřebného k ohřátí 1 kilogramu látky o 1 teplotní stupeň.

Tepelná vodivost Λ - schopnost látky vést teplo. Představuje rychlost, s jakou se teplo šíří ze zahřáté části látky do jiných, chladnějších částí.

Hustota ρ- vyjadřuje hmotnost objemové jednotky látky.

Materiál	**c [kJ·kg^{-1}·K^{-1}]**	**Λ [W·m^{-1}·K^{-1}]**	**ρ [2] [kg·m^{-3}]**
měď	0,383	395	8 960
hliník	0,896	229	2 700
železo	0,430	60,5	7 850
NdFeB	0,405	9	7450

Tabulka 1 - Přehled vlastností použitých materiálů při 20°C

[2] *Hodnoty hustoty vybraných materiálů při normálním tlaku 1013,25 hPa a teplotě 20°C*

Okolo modelu byl vytvořen obal ve tvaru válce reprezentující okolní vzduch. Z toho důvodu bylo nutné vyhledat jednotlivé konstanty pro vzduch.

Ansys Workbench má většinu materiálních vlastností již předdefinovanou, pouze pro vzduch a magnety bylo nutné údaje doplnit z tabulek. [3]

Pro danou simulaci byly uvažovány ztráty ve vinutí (mědi) o hodnotě ΔP_{cu}=62,42 W, dále ztráty mechanické na ložiscích (kde vznikají třením). Zde se vyšlo z informace, že celkové mechanické ztráty jsou ve stroji 30 W, z toho se uvažovalo 15 W na ložiska, tj. 7,5 W na jedno ložisko + zbytek například tvoří tření rotoru o vzduch atd. Dalšími ztrátami, se kterými se počítalo, byly ztráty v železe magnetického obvodu statoru (hysterezní a vířivými proudy). Všechny tyto hodnoty byly získány z měření kolegy Nepokoje [4].

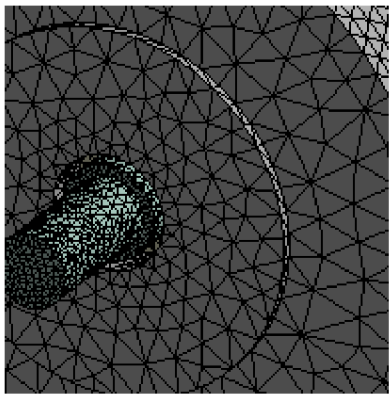
Vzduch - hodnoty při normálním (atmosférickém) tlaku 1013,25 hPa:

Vlastnost	Značka	Jednotka	Hodnota
Hustota	ρ	$kg \cdot m^{-3}$	1,29
Měrná tepelná kapacita (0 °C)	c_p	$kJ \cdot kg^{-1}.K^{-1}$	1,01
Tepelná vodivost	λ	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	0,024

Tabulka 2 - Vlastnosti vzduchu

5.4 Pracovní postup

Úplně prvním krokem práce v Ansysu Workbench je importování modelu z programu Autodesk Inventor. Pro potřebu tohoto výpočtu byl model vyroben jako mírně zjednodušený, neobsahuje například zkosení na hranách. Také bylo nutné vytvořit model vinutí tak, aby byl zajištěn kontakt mezi vinutím a povrchem drážky. Tyto úpravy sice mají vliv na přesnost výsledků, ale značně zjednoduší tvorbu meshe a zrychlí dobu výpočtu. Přímo v Ansysu Workbench byl ještě model doplněn o vzduchový obal.



Obrázek 17 - Mesh stroje - různá hustota

Dále se přiřazovaly jednotlivým dílům modelu jejich materiálové vlastnosti, jako například teplotní vodivost či kapacita (Tabulka 1). Z tohoto důvodu je nutné si zjistit materiálové konstanty důležité pro teplotní výpočty a zjistit použité materiály v motoru.

Poté se model motoru rozdělí pomocí meshe (sítě) na jednotlivé elementy buďto pomocí automatického generátoru nebo se manuálně nastaví parametry meshe, což umožňuje větší přesnost výpočtu. Takto vytvořenou síť je možné dále ještě upravovat, například zhuštěním meshe na místech, kde je nutné zvýšit přesnost výpočtu. V tomto případě bylo využito možnosti meshe manuální.

V této chvíli je analýza nastavena na požadované hodnoty a je možné přejít k výpočtu. Výpočet je možné spustit přímo v okně programu nebo na pozadí a pokračovat v práci.

Poté co jsou výsledky simulace vypočteny, je možné zobrazit výsledky požadovaných veličin. Zobrazení výsledků analýzy je velice názorné, efektní, přehledné a snadno pochopitelné i pro laika. V tomto případě bylo zkoumáno rozložení teploty v modelu stroje, toto rozložení je zobrazeno na modelu jako barevná kontura, místa se stejnou teplotou mají shodnou barvu. Vždy pro určitý rozsah teplot je přiřazena určitá barva. Rozsah je možné zužovat nebo rozšiřovat, popřípadě doplnit větší množství odstínů barev.

V případě transientní tepelné analýzy se také zaznamenává graf závislosti maximální teploty modelu na čase. Tato analýza byla provedena pro čas 10 minut, tj. nečekalo se na ustálení teploty stroje. Důvodem je možnost srovnání získaných hodnot s hodnotami kolegy Nepokoje, který ve své práci [4] měřil tento stroj, a získal hodnoty oteplení také v čase 10 min. Další hodnotou byla hodnota po ustálení teploty stroje. Také byl simulován přerušovaný chod motoru.

Dalším bodem práce byla oteplovací charakteristika stroje, pro kterou již bylo počítáno se ztrátami ve vinutí, mechanickými v ložiskách i ztrátami v magnetickém obvodu statoru. Tyto ztráty se do modelu zadávaly pomocí funkce Internal Heat Generation. Tato funkce se používá na určitou část modelu (třeba vinutí) a zadává se kolik W/m^3 se v součásti generuje. Například u vinutí kde ztráty v mědi jsou 62,42W se tato hodnota ještě musí podělit objemem tělesa.

Jelikož se počítala časová závislost teploty, tak se musely zadat ztráty jako časová závislost. Zadaly se první dvě hodiny, jako se ztrátami - stroj se ohříval a po dvou hodinách se stroj

vypnul a chladnul. Výsledkem byla oteplovací charakteristika - závislost maximální teploty na čase daného modelu - nejteplejší je jistě vinutí (nejvíc ztrát). Dalo by se proto tvrdit, že je to závislost teploty vinutí na čase. Za teplotu okolí bylo pro tento výpočet považováno 22°C.

Kromě oteplovací charakteristiky bylo zaznamenáno teplotní rozložení v daném modelu. Na obrázcích je vidět, že maximální dosažená teplota cca 90°C byla dosažena zhruba po 80 minutách provozu.

Pro zajímavost byla provedena i simulace přerušovaného chodu stroje pro časový interval 0- 200minut.

5.5 Výsledky analýzy a jejich vyhodnocení

Simulace s uvažováním jen ztrát ve vinutí

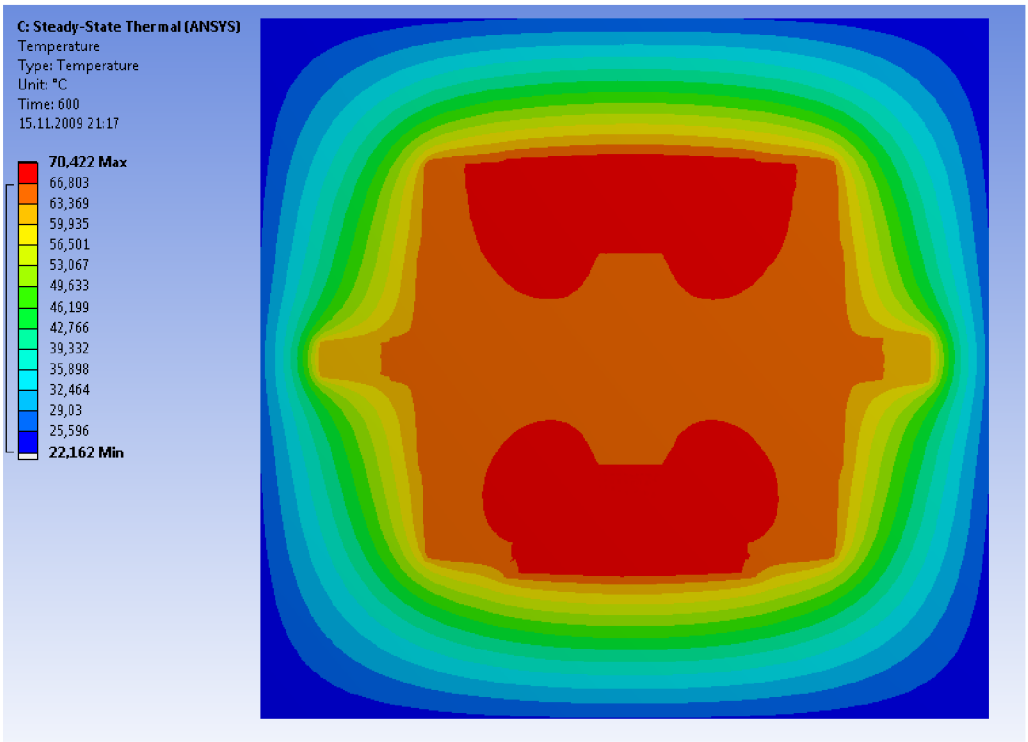
Z měření provedeného v laboratoři na skutečném stroji byly získány výsledky, které sloužily jako kontrolní údaj pro tuto práci a byly považovány za správné. Tímto měřením byla získaná teplota stroje po při desetiminutovém zatížení jmenovitým momentem přibližně 76 °C. [4]

Jak bylo řečeno v [8], při použití ztrát ve vinutí a zanedbání ztrát ostatních dosáhlo oteplení vinutí stroje přibližně hodnoty 70,5 °C po 10 minutách provozu. Rozdíl vypočtené hodnoty a hodnoty získané měřením je cca 6%, což je vzhledem k zjednodušení modelu dostatečná přesnost.

Pro danou simulaci byly uvažovány jen ztráty ve vinutí o hodnotě ΔP_{cu}=62,42W. Tyto ztráty jsou rovnoměrně rozloženy v objemu modelu reprezentující vinutí. V Ansysu jsou tyto ztráty zadávány jako měrné ztráty na metr krychlový, proto bylo nutné nejdřív určit objem modelu vinutí pomocí příslušné funkce v Inventoru.

Simulace s uvažováním ztrát ve vinutí, ztrát mechanických v ložiskách a ztrát v magnetickém obvodu statoru

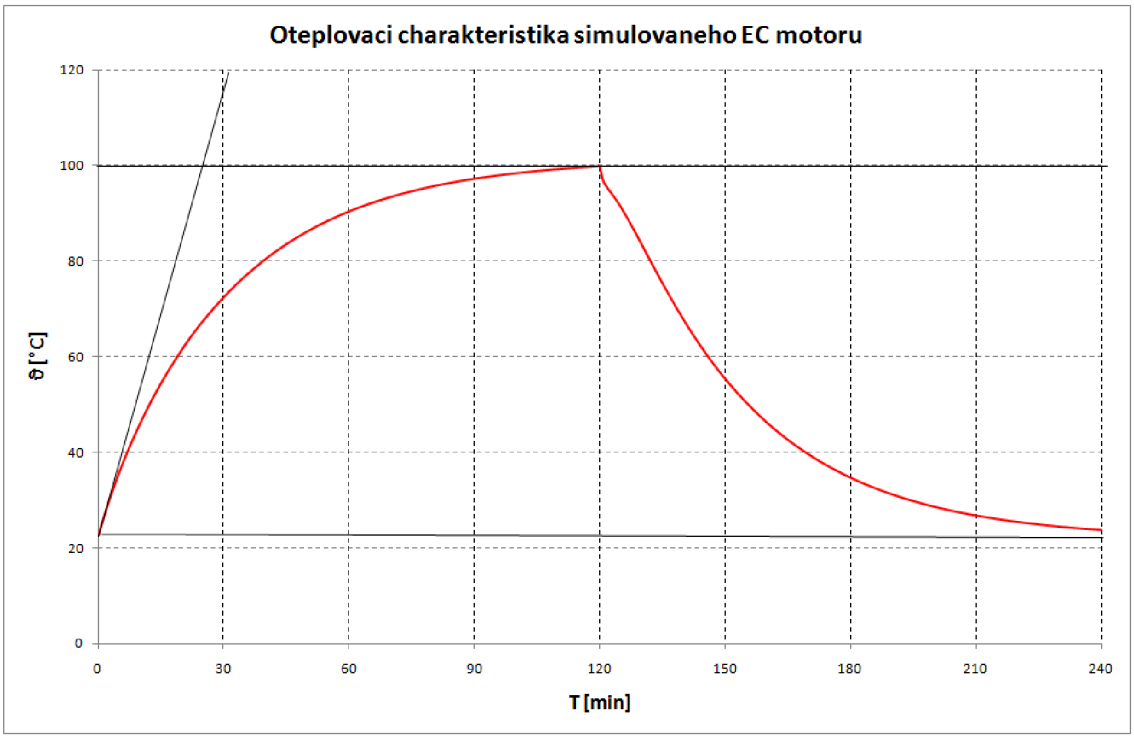
Při dalších simulacích byly uvažovány ztráty ve vinutí, mechanické ztráty v ložiskách a ztráty v železe, tj. magnetickém obvodu statoru (hysterezní i vířivými proudy). Oteplení v nejteplejší části stroje dosáhlo přibližně 90° C. Pokud srovnáme tento výsledek se dříve provedenou simulaci, kde bylo cílem určit oteplení v čase 10 minut při plném zatíženi stroje, je patrné, že teplota je podstatně nižší. To je způsobeno použitím jiné okrajové podmínky, představující chlazeni povrchu stroje okolo proudícím vzduchem. Simulace ověřila předpoklad, že nejteplejší místo je v oblasti, kde se magnetický obvod s vinutím dotýká kostry.



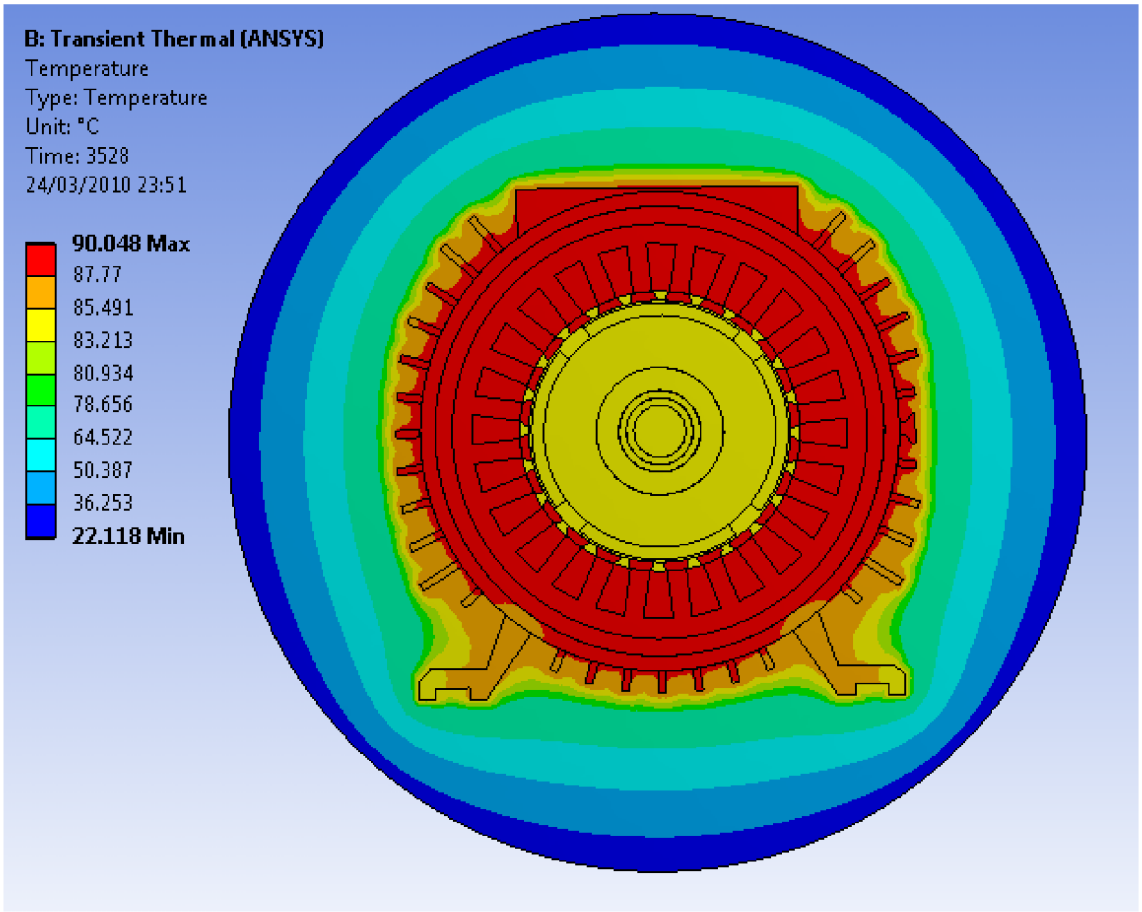
Obrázek 18 - Rozložení teploty v motoru a okolním vzduchu v řezu, při výpočtem pouze se ztrátami ve vinutí[8]

Simulace přerušovaného chodu

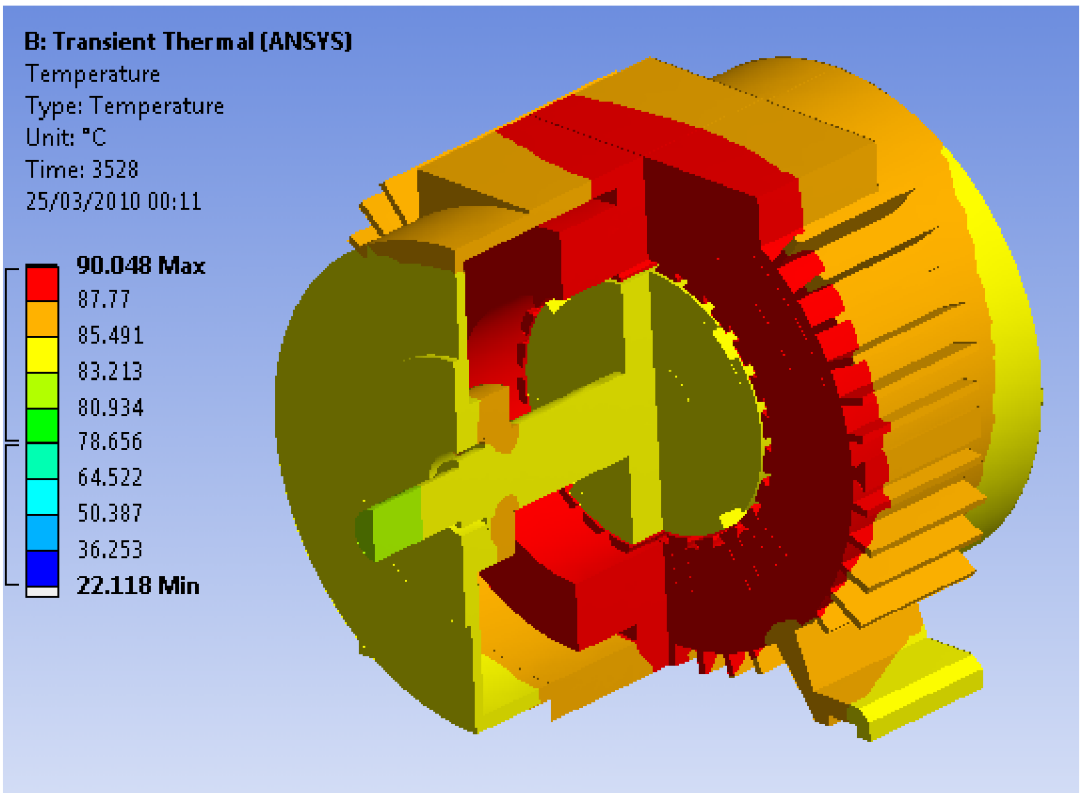
Dále byla provedena simulace přerušovaného chodu EC motoru, jehož výsledkem je oteplovací charakteristika - oteplení stroje při přerušovaném chodu. Na Obrázku 22 je vidět výsledek této simulace. Modře je znázorněna maximální teplota stroje, červeně zatížení stroje v procentech. Z průběhu je patrné, že dochází ke střídání stavů 100% zatížení a 0%. Teplota vždy roste při zapnutí stroje a klesá po exponenciále při vypnutí. To odpovídá předpokladům.



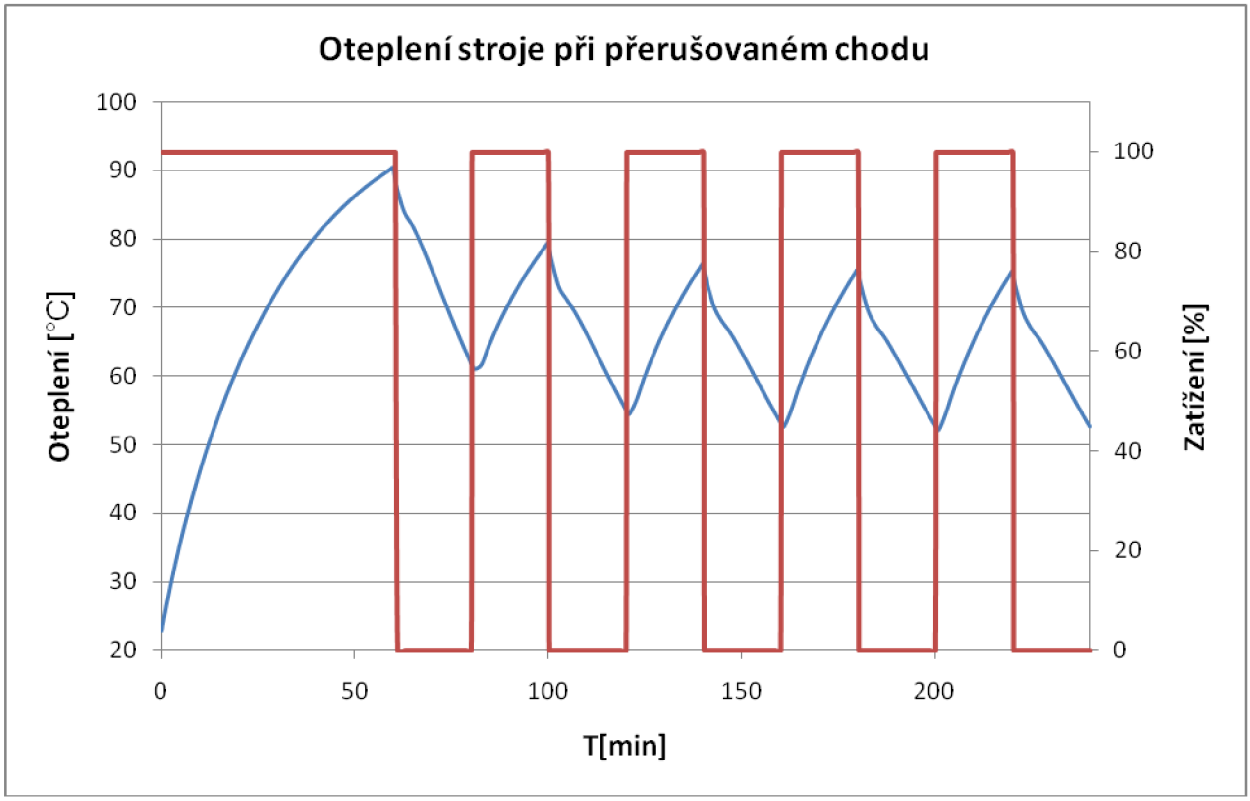
Obrázek 19 - Oteplovací charakteristika EC motoru, zahřívání a vypnutí



Obrázek 20 - Teplotní pole EC motoru-čelní pohled



Obrázek 21- Teplotní pole EC motoru - částečný řez stroje, rozložení teploty povrchu kostry



Obrázek 22 - Oteplení stroje při přerušovaném chodu

6 ZÁVĚR

Tato diplomová práce byla věnována jednomu z nejvýznamnějších zástupců parametrických 3D CAD systémů – programu Autodesk Inventor 2010, konkrétně verzi poskytované zdarma studentům. Práce se zabývala především pracovním prostředím tohoto programu a možností práce v něm. Dále byla věnována programu Ansys Workbench. Byla vyzkoušena spolupráce Autodesk Inventoru s jinými programy. Jednalo se konkrétně o program Ansys Workbench, program založený na metodě konečných prvků, ve kterém byla provedena simulace - transientní analýza EC motoru. Model tohoto motoru byl vytvořen v Autodesk Inventoru a pro potřeby analýzy zjednodušen do té míry, aby zjednodušení neovlivnilo výrazně výsledky, ale zmenšil se počet elementů, tj. zkrátila se doba výpočtu. Cílem analýzy bylo demonstrovat možnosti programu Ansys Workbench, vyzkoušet si práci v něm na konkrétním příkladu a posoudit reálnost výsledku porovnáním s výsledky získanými laboratorním měřením.

První část práce se zabývá popisem základních funkcí Autodesk Inventoru, použitých při tvorbě modelu EC motoru. Model byl vytvořen od základů, s ohledem na použití pro výpočet v programu Ansys Workbench, podle přesných výrobních podkladů. Zjednodušený model sestává z osmi komponent (statorová kostra, statorový paket, dva ložiskové štíty, vinutí, hřídel, rotorový paket a permanentní magnety). Nejvíc úprav bylo provedeno na statoru a to především na ložiskových štítech a na chladicích žebrech. Cílem modifikací bylo především odstranit drobné konstrukční detaily, jako jsou například zaoblení konců žeber, a tím výrazně zjednodušit tvorbu sítě konečných prvků v Ansysu.

Programem Ansys Workbench se zabývá bod práce číslo dvě. Je zde popsán základní princip programu i pracovní postup v něm.

Třetí bod se věnuje praktické ukázce práce v programu Ansys Workbech. Práce začíná importem modelu vytvořeného v Inventoru. Tento import lze provést pomocí řady přenosových formátů, ovšem v případě, že je na stejném počítači instalace Ansysu i Inventoru, lze použít přímý přenos dat pomocí doplňkové funkce v Inventoru. Toho bylo využito při přenosu modelu EC motoru a ukázalo se, že je tento způsob bezproblémový a plně funkční.

Při teplotní analýze se sleduje oteplení stroje při daných ztrátách ve stroji. Dominantním zdrojem ztrát v elektrických strojích jsou ztráty v mědi vinutí. V případě EC motoru je vinutí pouze na statoru a ztrátové teplo se odvádí z vinutí a magnetického obvodu do kostry a směrem k chladicím žebrům. Vstupním údajem pro analýzu jsou tedy především ztráty ve vinutí při jmenovitém zatížení a pro kontrolu správnosti výpočtu oteplené konkrétní části stroje v určitém čase. Tyto údaje byly získány z výsledků měření na skutečném stroji. Výpočet byl proveden pro ΔP_{cu}=62,42 W a oteplení bylo vypočteno v čase t=600 s. Uvažovány byly pouze ztráty ve vinutí. V tomto čase dosáhlo oteplení vinutí stroje přibližně hodnoty 70,5 °C. Rozdíl vypočtené hodnoty a hodnoty získané měřením je přibližně 6 %, což je vzhledem k zjednodušení modelu dostatečná přesnost.

Při dalších simulacích byly uvažovány kromě ztrát ve vinutí i mechanické ztráty v ložiscích a ztráty v železe, tj. magnetickém obvodu statoru. Maximální teplota stroje dosáhla 90°C. Pokud srovnáme tento výsledek s předchozí simulací, je patrné, že teplota je podstatně nižší. To je způsobeno použitím jiné okrajové podmínky. Simulace ověřila předpoklad, že nejteplejší místo je v oblasti, kde se magnetický obvod s vinutím dotýká kostry.

Dále byl proveden přerušovaný chod stroje, který potvrdil předpoklad, že při vypnutí stroje bude maximální teplota stroje klesat exponenciálně, viz Obrázek 22.

LITERATURA

[1] FOŘT, Petr, KLETEČKA, Jaroslav. *Autodesk Inventor: Adaptivní modelování v průmyslové praxi.* 1st edition. Brno: Computer Press, 2004. 283 s. ISBN 80-251-0389-7.

[2] Sedláčková, P., *Nové možnosti modelování v parametrických CAD programech*, Brno: VUT, FEKT, 2008, 43 s.

[3] Sedláčková, P., Využití *parametrických CAD systémů v tvorbě virtuálních modelů el. strojů*, Brno: VUT, FEKT, 2009, 33 s.

[4] Nepokoj, L. *Nové možnosti modelování v programu Autodesk Inventor Professional,2008.* Brno: VUT, FEKT, 2008, 54 s.

[5] Ing. Pavel Vorel, PhD., *Synchronní stroje s permanentními magnety*, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2005

[6] [on-line], [cit. 2009-11-25] http://www.cadforum.cz/

[7] [on-line], [cit. 2009-11-25] http://www.designtech.cz/

[8] Sedláčková, P., *Využití programu Ansys Workbench pro výpočty elektrických strojů*, Brno: FEKT, VUT v Brně, 2009. 29 s.

[9] [online], [cit. 2010-4-18] http://www.dagis.cz/

PŘÍLOHY

[1] CD-R