

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Tvorba indukčního stroje pomocí APDL skriptu

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub GOMBÁR**
Osobní číslo: **E09N0046K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Tvorba modelu indukčního stroje pomocí APDL skriptu**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Uveďte základní znaky jazyka APDL.
2. Vytvořte makro pro tvorbu 2D geometrie indukčního stroje (nastavení typu a počet drážek, ventilačních otvorů, hlavní rozměry, ...).
3. Vytvořte makro, které vzniklou geometrii vhodně diskretizuje sítí konečných prvků (specifikace typu elementu, rozměr elementů, ...) a zatíží.
4. Funkčnost skriptu demonstруйте na jednoduchém příkladě.


Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. **Reece, A.B.J. and Preston T.W. : Finite element methods in electrical power engineering, 2000**
2. **Bianchi, N. : Electrical machine analysis using finite elements**
3. **Kopylov, I.P. a kol. : Stavba elektrických strojů, Praha, 1988**
4. **Haňka, L. : Teorie elektromagnetického pole, SNTL, Praha, 1975**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Vladimír Kindl**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: **18. října 2010**
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2011**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan




Prof. Ing. Zdeněk Vostracký, DrSc., dr. h. c.

vedoucí katedry

V Plzni dne 18. října 2010

Anotace

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na tvorbu modelu indukčního stroje v prostředí ANSYS. První část práce obsahuje popis prostředí ANSYS a základní znaky jazyka APDL. Druhá část práce je věnována problematice tvorby makra 2D geometrie indukčního stroje, včetně rozboru jednotlivých částí. Ve třetí části je popsána tvorba modelu z hlediska ANSYSu. Čtvrtá část je zaměřena na rozbor navrhovaného programu. Poslední částí je věnována návrhu konkrétního AS motoru dle vytvořených skriptů.

Klíčová slova

Tvorba modelu, indukční stroj, skript, ANSYS, geometrie, drážka, ventilační otvor, element, diskretizace, metoda konečných prvků.

Abstract

The thesis is focused on creating a model of the induction machine in the ANSYS . The first part contains a description of the environment and the basic features of ANSYS APDL language. The second part is devoted to creating macros 2D geometry induction machines, including an analysis of its parts. The third part describes the creation of the model in terms of ANSYS. The fourth section focuses on the analysis of the proposed program. The last section is devoted to the design of a particular AS engine created by scripts.

Key words

Modelling, induction machine, the script, ANSYS, geometry, groove, ventilation hole, element discretization, finite element method.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 22.5.2013

Bc. Jakub Gombár

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Vladimíru Kindlovi za cenné rady, věcné připomínky a konzultace při zpracování mé diplomové práce.

Obsah

OBSAH.....	8
ÚVOD.....	9
1. ANSYS.....	10
1.1. ROZBOR SYSTÉMU ANSYS.....	10
1.1.1. Uživatelské prostředí ANSYS.....	11
1.2. JAZYK APDL	13
1.2.1. Popis příkazu APDL.....	13
2. TVORBA GEOMETRIE MODELU MOTORU.....	14
2.1. ROTOR.....	16
2.1.1. Rotorové drážky.....	16
2.1.2. Ventilační kanály.....	17
2.2. STATOR.....	17
2.2.1. Statorové drážky.....	18
2.2.2. Ventilační kanály.....	18
3. TVORBA MODELU V ANSYSU	19
3.1. GEOMETRIE.....	19
3.2. MATERIÁLY	26
3.3. SÍŤOVÁNÍ.....	31
4. PROGRAM	36
4.1. POPIS PROGRAMU	37
4.2. NÁVRH PROGRAMU	37
4.3. PRINCIP ČINNOSTI PROGRAMU	39
5. FUNKČNOST.....	45
5.1. PRŮVOD PROGRAMEM.....	45
5.2. NÁVRH	52
6. ZÁVĚR.....	60
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	61
SEZNAM PŘÍLOH.....	1

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na postup návrhu modelu indukčního stroje pomocí APDL skriptu v systému ANSYS. Za účelem usnadnění práce při návrhu byl vytvořen program pro generování APDL skriptů dle libovolného návrhu uživatele. Obsah práce je rozdělen do pěti hlavních částí. První část obsahuje popis a seznámení s prostředím ANSYS. Další část se je věnována přiblížení problematiky motoru z hlediska jeho geometrie a popisu jednotlivých částí. Následně je rozebrána problematika tvorby modelu z hlediska systému ANSYS. Zde jsou popsány jednotlivé části tvorby doprovázené ukázkami APDL skriptu a jejich grafické interpretace. Čtvrtá část DP je věnována navrhovanému programu, pomocí kterého je návrh modelu motoru prováděn. Výsledným výstupem je APDL skript, prostřednictvím kterého bude vytvořen model motoru. Závěrečná část je věnována popisu funkčnosti programu a obsahuje ukázkou návrhu konkrétního motoru.

1. Ansys

Menší, výkonnější, odolnější, lehčí atd. to jsou argumenty dnešní doby. Především díky tomuto stavu jsou kladeny vysoké požadavky na rychlou a efektivní zpětnou vazbu výrobních a vývojových společností. Poptávka na trhu technologií je hnacím motorem pro společnosti a reagovat jako první je pro velikost zisků klíčové. Být první neznamena být nejlepší a nejkvalitnější, toho si jsou vědomi všichni výrobci a proto jsou kladeny vysoké nároky na zařízení z hlediska inovativního řešení a spolehlivosti. Společnosti potřebují přesně vědět, jak se jejich produkty budou chovat v reálném prostředí. Každý výrobek dříve musel projít početnými zatěžkávacími zkouškami v laboratořích a provozech, což bylo mnohdy velmi časově náročné. Díky dnešním špičkovým simulačním prostředím, je možné tyto časově náročné zkoušky nahradit popř. zkrátit a efektivně tak reagovat na poptávku trhu. Princip spočívá ve vytvoření virtuálního prototypu daného návrhu, který je vystaven působení multifyzikálním vlivům dle potřeby. V případě nevyhovujících výsledků se model může jednoduše upravit a opětovně podrobit zatížení. Dříve by to znamenalo vyrobit nový prototyp a znovu podrobit dlouhým zkouškám. Jedním takovým systémem je ANSYS.

1.1. Rozbor systému ANSYS

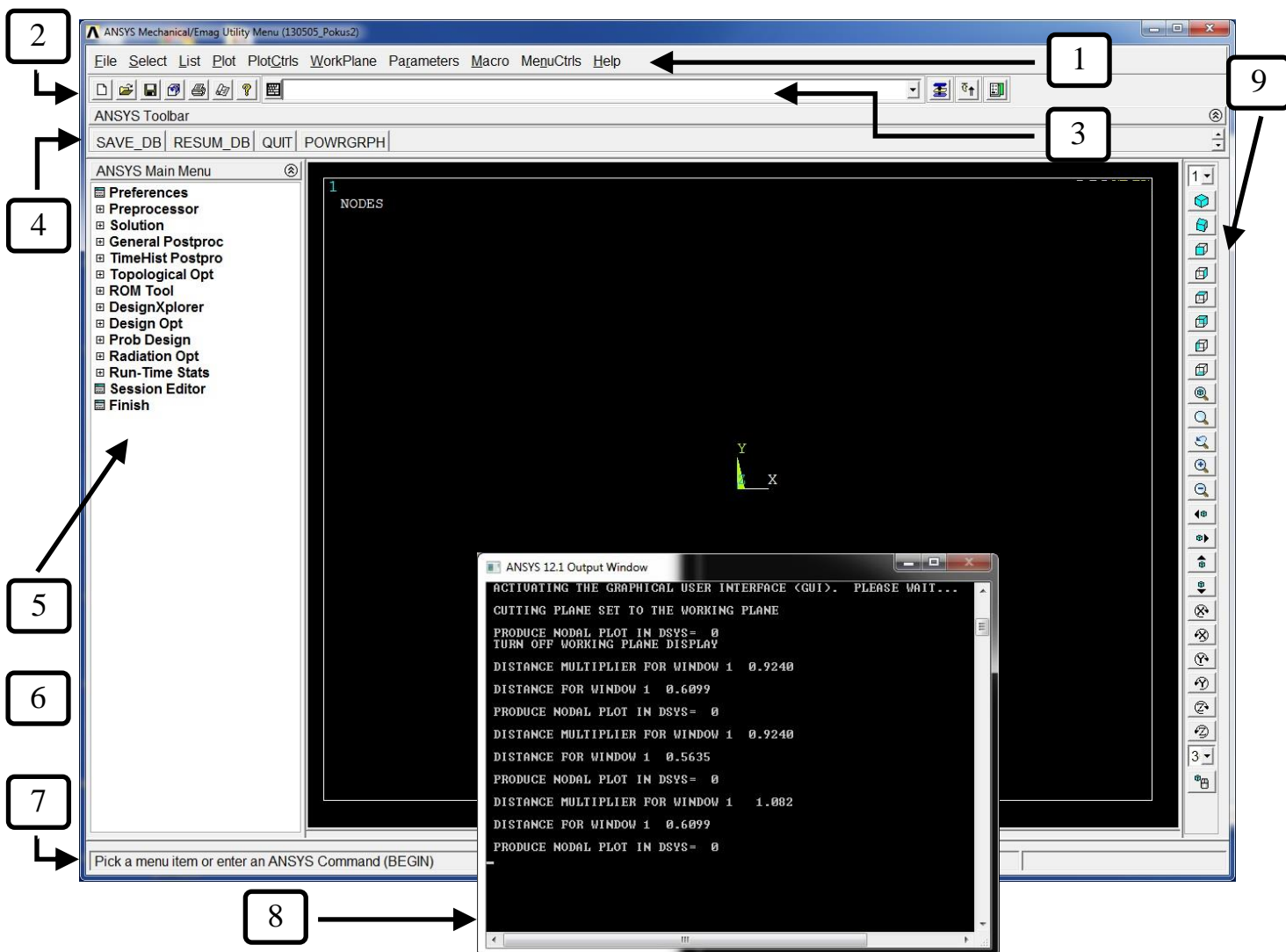
ANSYS je analytický systém ve kterém je možné provádět nejrozmanitější multifyzikální analýzy. ANSYS patří do kategorie proprietárního software a je jeden z nejvýkonnějších, nejuniverzálnějších a nejvyspělejších systémů v oblasti analýzy vůbec. Umožňuje simulovat interakce mezi pevnostní analýzou, přenosem tepla, prouděním kapalin a plynů a elektromagnetismem.

ANSYS je postaven na technologii osvědčených řešičů, které prošli testy předními světovými univerzitami a společnostmi na světě. To se projevuje především v kvalitě výsledků a rychlosti výpočetních časů. ANSYS je velmi kvalitní systém a za své výsledky ručí certifikací jakosti ISO 9001 (s podmínkou správných vstupů).

ANSYS díky své interoperabilitě poskytuje možnost propojení s CAD systémy a tím usnadňuje obousměrný přenos geometrie.

ANSYS kromě svých skvělých výtvarných a výpočetních funkcí disponuje také propracovaným systémem postprocessingu (animace, path-ploty, grafy, atd.). Pracovat v systému ANSYS je možné dvěma způsoby, uživatelským rozhraním, nebo tzv. dávkovým módem. Veškerou činnost prováděnou v uživatelském rozhraní, lze plnohodnotně provádět pomocí dávkového módu, neboli přímým zadáváním APDL příkazů do příkazového řádku.

1.1.1. Uživatelské prostředí ANSYS



Obr. 1.1: Uživatelské prostředí ANSYS

Legenda:

1 – **Utility Menu** – obsahuje užitečné funkce, které jsou přístupné přes jednotlivé sekce:

File (Soubor) – nový projekt, načtení ze souboru, uložení, import, export,...

Select (Výběr) – vybírání entit, jejich seskupování do tzv. komponent,...

List (Seznam) – seznamy jednotlivých entit

Plot (Vykreslení) – vykreslení entit, sítě, tabulek v podobě grafu,...

PlotCtrls (Nastavení vykreslování) – nastavení pohledu, stylů vykreslení entit, grafů, tvorba obrázků, animací,...

WorkPlane (Pracovní rovina) – definice pomocné roviny,...

Parameters (Parametry) – zadávání konstant, tabulek, polí, funkcí,...

Macro (Makro) – tvorba maker

MenuCtrls (Nastavení menu)

Help(Nápověda)

2 – **Standard Toolbar** (Standardní panel nástrojů) – ZLEVA: Nový, Otevřít, Uložit, Pan-zoomrotate, Tisk, Report Generator, Help

3 – **Input Window** (Vstupní okno) – příkazový řádek

4 – **Ansys Toolbar** (Panel nástrojů) – tlačítka odpovídají vždy určitému příkazu

5 – **Main Menu** (Hlavní menu) – primární funkce ANSYSu

6 – **Graphics Window** (Grafické okno) – zobrazovací prostor návrhu

7 – **Status and Prompt Area** (Informační a nápovědný panel)

8 – **Output window** (Okno výstupu) – výpis veškerých akcí ANSYSu reakce na uživatelské kroky. Výpis lze přesměrovat do souboru

9 – **Zoom toolbox** (Panel zobrazení) – pomocný panel pro rychlé zobrazení modelu v požadovaném pohledu, zvětšení, zmenšení,...

1.2. Jazyk APDL

Jazyk APDL (ANSYS Parametric Design Language) je tzv. skriptovací jazyk, který je používán především pracujeme-li v tzv. dávkovém módu čili přímým zadáváním příkazů do příkazového řádku. Jazyk APDL využívá velmi podobné struktury jako programovací jazyk BASIC, FORTRAN atd. ANSYS obsahuje přibližně 1500 příkazů, z nichž každý má svou specifickou syntaxi a funkci. Znáť všechny příkazy z paměti by bylo velmi náročné a zbytečné, neboť ANSYS disponuje velmi dobře propracovanou nápovědou, která je přehledná a obsahově velmi uspokojivá. Výběr vhodné operace hraje klíčovou roli při programování s APDL. Většina příkazů APDL vyžaduje ke své funkci argumenty oddělené čárkami. Princip použití argumentů bude popsán na příkazech sloužících k výběru.

1.2.1. Popis příkazu APDL

Základní skupina příkazů pro výběr zahrnuje takové příkazy, které uživateli umožní vybrat podmnožinu subjektů, tj. KSEL, LSEL, ASEL, VSEL, NSEL and ESEL. Syntaxe těchto příkazů je následující:

KSEL, Type, Item, Comp, VMIN, VMAX, VINC

LSEL, Type, Item, Comp, VMIN, VMAX, VINC

ASEL, Type, Item, Comp, VMIN, VMAX, VINC

VSEL, Type, Item, Comp, VMIN, VMAX, VINC

NSEL, Type, Item, Comp, VMIN, VMAX, VINC

ESEL, Type, Item, Comp, VMIN, VMAX, VINC

První argument, "Type" určuje konkrétní typ výběru s následujícími možnými hodnotami:

S vybere podmnožinu z celého souboru

R vybere podmnožinu z aktuálně vybrané sady

A vybere podmnožinu z celého souboru a přidat ho do aktuálně vybrané sadě

U odebere podmnožina z aktuálně vybrané sady

ALL obnoví úplnou sadu

NONE zruší výběr celé sady

INVE obrátí aktuálně vybranou sadu, která zruší výběr aktuálně vybrané sady a vybere aktuálně vybranou sadu

Druhý argument "Item", může mít několik různých významů v závislosti na entitě. Třetí až šestý argument (Comp, VMIN, VMAX, a VINC) odkazují na argument Item. Nejčastěji používané Item argumenty jsou:

- Název entity: KP (keepoints) pro klíčové body, LINE pro úsečky, AREA pro plochy, VOLU pro objemy, NODE pro uzly a ELEM pro prvky. V tomto případě je položka Comp prázdná a VMIN, VMAX, a VINC odkazují na minimální a maximální hodnoty rozsahu a přírůstek v rozsahu (pokud VINC není zadán, jeho výchozí hodnota je 1), resp. Například, za účelem výběru KP 21 až 30, se používají následující údaje:

KSEL, S, KP,, 21,30

- MAT, REAL, TYPE: Vybere entity na základě jejich vztahu k materiálu, reálné konstantě a atributu typ prvku. Podobně jako u názvu entity, položka Comp je prázdná. Použití této položky je ukázáno v následujícím příkladu, ve kterém je vybrán element s materiálovou vlastností číslo 2:

ESEL, U, MAT, 2

- LOC: Tato položka umožňuje uživateli provádět operace výběru založených na umístění entit, s výjimkou prvků. Položka Comp v tomto případě odpovídá směru (x, y, z pro Kartézský souřadnicový systém, r, θ , z pro Cylindrický souřadný systém. Pro vysvětlení, uzly se nacházejí v rozmezí $2,5 \leq Z \leq 4$ mohou být přidány k aktuálně vybrané sadě uzlů pomocí následujícího příkazu:

NSEL, A,LOC, Z, 2.5,4

2. Tvorba geometrie modelu motoru

Elektrický motor je točivý elektrický stroj, který se skládá z elektrického a magnetického obvodu. Elektrickým obvodem se rozumí ta část, kterou protéká elektrický proud a nazývá se vinutí. Magnetickým obvodem se rozumí ta část elektrického stroje, kudy se uzavírá žádoucí magnetický tok stroje. Ten je tvořen železem a vzduchovou mezerou. Může být masivní, nebo složen z tenkých plechů.

Motory se dělí podle principu na

- a) Stejnoseměrné
- b) Synchronní
- c) Asynchronní

Diplomová práce je zaměřena na tvorbu trojfázového asynchronního motoru s kotvou nakrátko.

Asynchronní motor je elektrický točivý stroj, který se dělí podle statorového vinutí na

- a) Jednofázové
- b) Trojfázové

a podle rotorového vinutí na

- a) nakrátko
- b) kroužkový

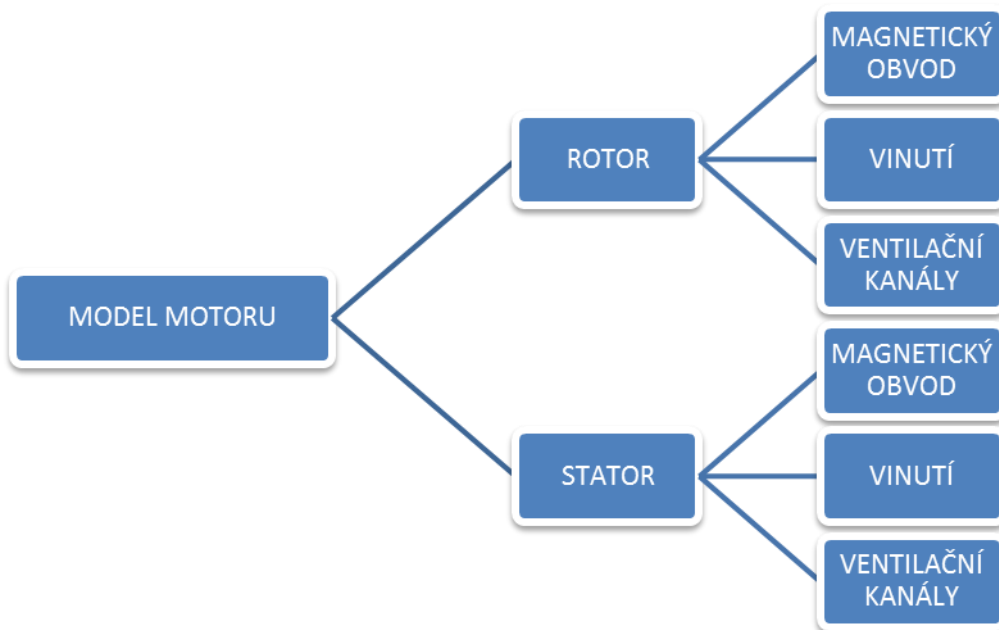
Tento typ motoru je jednoduchý, provozně spolehlivý a nevyžaduje žádnou zvláštní obsluhu a údržbu. Díky své konstrukční jednoduchosti je nejvyžívanějším motorem.

Hlavní části asynchronního motoru s kotvou nakrátko jsou:

- Magnetický obvod statoru
- Statorové vinutí
- Kostra
- Magnetický obvod rotoru
- Rotorové vinutí (klec)
- Ložiska
- Ložiskové štíty
- Ventilátor
- Statorová svorkovnice

Pro tvorbu modelu asynchronního stroje budou uvažovány pouze následující části:

- Rotorové vinutí
- Statorové vinutí
- Magnetický obvod rotoru
- Magnetický obvod statoru
- Ventilační kanály



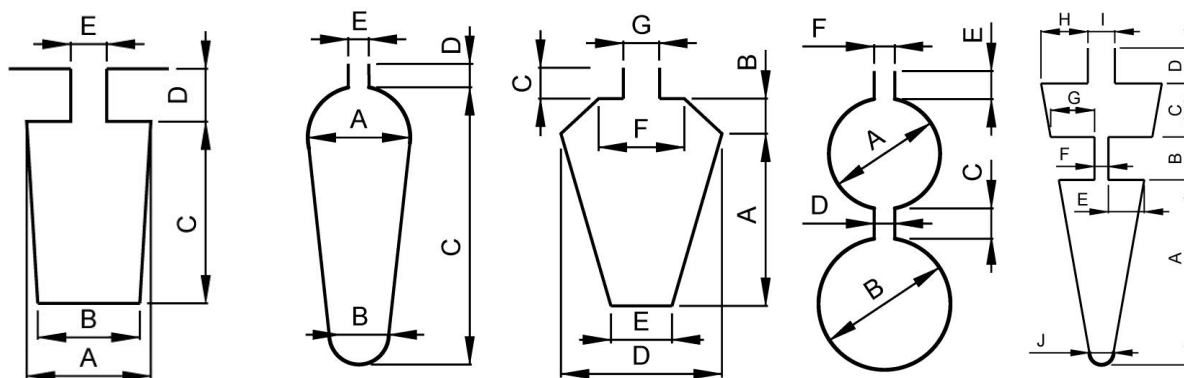
Obr. 2.1: Přehled částí modelu motoru

2.1. Rotor

Tvoří válec masivní, nebo složený z tenkých plechů. Rotor má po svém obvodě rotorové drážky, které jsou vyplněny vinutím. Tato vinutí jsou po stranách spojeny kruhy a dohromady tvoří rotorovou klec. Rotor obsahuje ventilační kanály v podobě kruhových otvorů, které vedou po celé délce rotoru.

2.1.1. Rotorové drážky

Počet dostupných typů rotorových drážek se pohybuje okolo dvaceti. Lze předpokládat, že se tento počet může ještě zvýšit vlivem neustálého vývoje. Volba typu rotorové drážky se odvíjí od druhu provedení klece rotoru. Klece rotorů mohou být jednoduché, nebo dvojité. Drážky mohou být otevřené, nebo polouzavřené. Pro možnosti návrhu byly vybrány následující typy drážek.

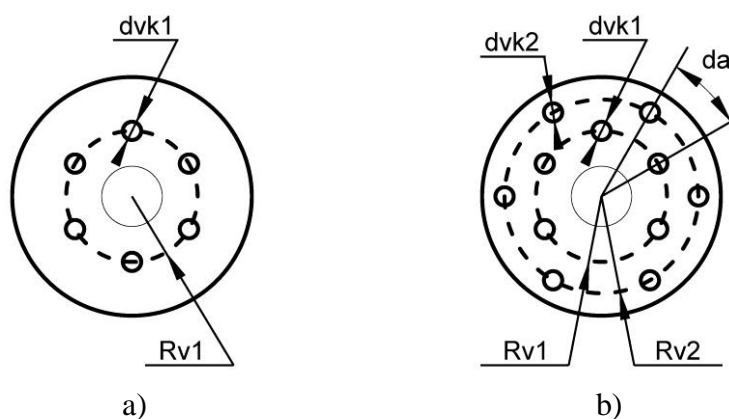


Obr. 2.2: Přehled typů vybraných rotorových drážek

Vinutí je v drážkách zajištěno proti dynamickým účinkům el. proudu a odstředivým silám drážkovými klíny. Klíny musí být nemagnetické, aby nezvyšovaly magnetický tok. Tyto klíny nebudou součástí návrhu modelu stroje.

2.1.2. Ventilační kanály

Ventilační kanály mají kruhový tvar a jsou navrhovány jako axiální. Provedení ventilačních kanálů je buď jednořadé, nebo dvouřadé viz Obr. 2.3.



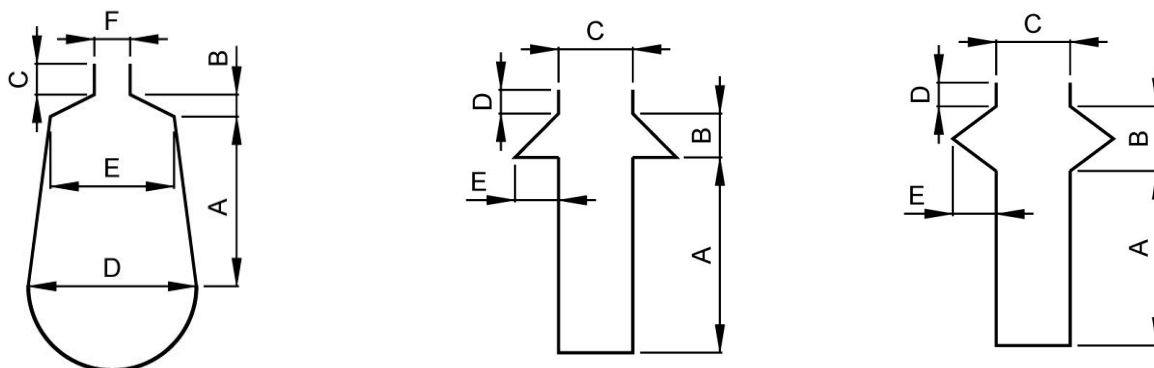
Obr. 2.3: Provedení ventilačních kanálů: a) jednořadé; b) dvouřadé

2.2. Stator

Je složen z tenkých plechů vytvářející mezikruží, které jsou vloženy do kostry stroje. Stator má po své vnitřní straně mezikruží statorové drážky, které jsou vyplněny vinutím. Konce vinutí jsou vyvedeny do statorové svorkovnice. Stator dále obsahuje ventilační kanály v podobě kruhových otvorů, které vedou po celé délce statoru, stejně jako u rotoru.

2.2.1. Statorové drážky

Počet dostupných typů statorových drážek se pohybuje obdobně jako u rotoru okolo dvaceti. Volba typu statorové drážky závisí na projektantovi a odvíjí se také od typu použitých vodičů. Obdélníkové tvary statorové drážky jsou vhodnější pro obdélníkové průřezy vodičů a lichoběžníkové tvary pro vodiče kruhové. Drážky mohou být otevřené, nebo polouzavřené. Pro možnosti návrh byly vybrány následující typy drážek.

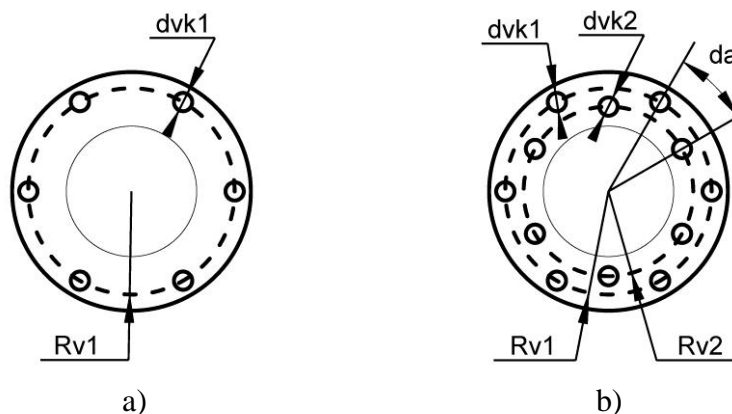


Obr. 2.4: Přehled typů vybraných statorových drážek

Vinutí je v drážkách zajištěno proti dynamickým účinkům el. proudu drážkovými klíny. Klíny musí být nemagnetické, aby nezvyšovaly magnetický tok a elektricky nevodivé. Tyto klíny nebudou součástí návrhu modelu stroje.

2.2.2. Ventilační kanály

Ventilační kanály mají kruhový tvar a jsou navrhovány jako axiální. Obdobně jako u rotoru je provedení ventilačních kanálů buďto jednořadé, nebo dvouřadé viz Obr. 2.5.

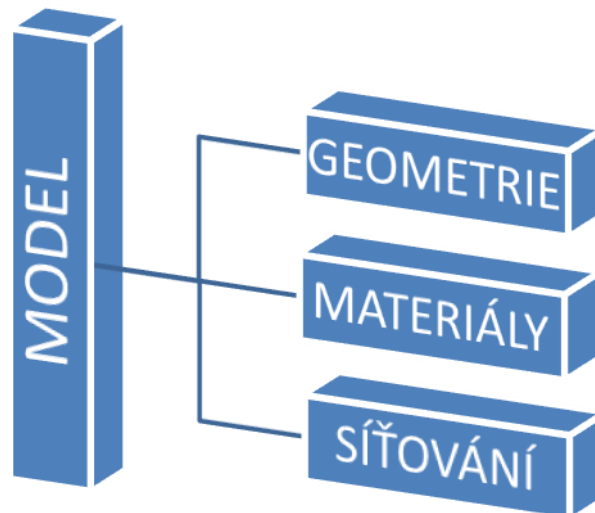


Obr. 2.5: Provedení ventilačních kanálů: a) jednořadé; b) dvouřadé

3. Tvorba modelu v ANSYSu

Návrh modelu AS motoru v Ansysu vyžaduje znalosti v oblasti motorů z hlediska konstrukce a principu činnosti, ale hlavně dobré znalost práce se systémem ANSYS.

Tvorba modelu je tvořena třemi hlavními fázemi; geometrickým modelem, materiálovými vlastnostmi a generováním výpočetní sítě, viz Obr. 3.1.



Obr. 3.1: Schéma tvorby modelu

3.1. Geometrie

Za geometrii je považován, celkově vykreslený model motoru, obsahující všechny požadované části.

3.1.1. Způsob tvorby geometrie

Vytvářet geometrii modelu v prostředí ANSYS lze několika způsoby:

- v uživatelském rozhraní
- importem
- dávkovým módem

Uživatelské rozhraní

Geometrie modelu je vytvářena ručně krok zákrokem pomocí jednotlivých nabídek Main Menu v prostředí ANSYS (klikání myší).

Import

Importem se rozumí převzetí geometrie z podporovaných CAD systémů. Před importem je důležité zidealizovat některé části geometrie, které jsou pro výpočet nevýznamné, ale následně by zbytečně zvyšovaly náročnost tvorby sítě.

Dávkový mód

Může být provedeno ručně nebo automaticky. Ruční režim je alternativou k práci s nabídkami Main Menu. Jedná se o přímé zadávání jednotlivých příkazů v jazyce APDL do command-line. V automatickém režimu se pracuje s komplexním APDL skriptem, který obsahuje všechny potřebné příkazy a po vložení do ANSYSu navrhne požadovaný model.

Každá z těchto variant má své pro a proti, záleží na počátečních podmínkách návrhu (např. možnost převzetí geometrie CAD) a na zkušenostech uživatele.

3.1.2. Geometrický model

Představuje výsledné geometrické těleso, které je souborem vzájemně navazujících geometrických entit. Geometrickými entitami jsou body, čáry, plochy a objemy. Každá z těchto entit ohraničuje entity vyšší kromě bodu. Při tvorbě geometrického modelu je nutné dodržet topologickou spojitost. Topologická spojitost entit znamená, že mají společnou hraniční entitu.

3.1.3. Postup tvorby geometrie motoru v ANSYSu

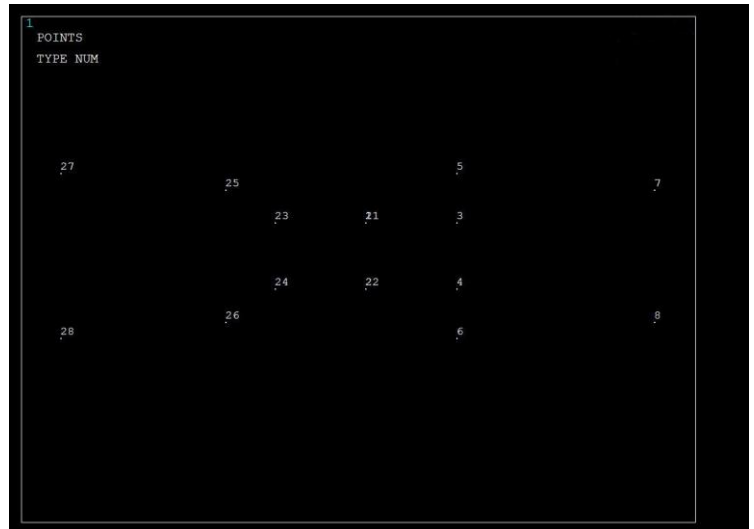
1) Tvorba keepointů

Prvním krokem tvorby modelu je vykreslení keepointů rotorové a statorové drážky (Obr. 3.2).

Ukázka použitého kódu APDL skriptu

```
k,1, -612.5, 10,  
k,2, -612.5, -10,  
k,3, -585, 10,  
k,4, -585, -10,  
k,5, -585, 25,  
k,6, -585, -25,  
k,7, -525, 20,
```

$k,8, -525, -20,$
 $k,21, -612.5, 10,$
 $k,22, -612.5, -10,$
 $k,23, -640, 10,$
 $k,24, -640, -10,$
 $k,25, -655, 20,$
 $k,26, -655, -20,$
 $k,27, -705, 25,$
 $k,28, -705, -25,$



Obr. 3.2: Keypointy rotorové a statorové drážky

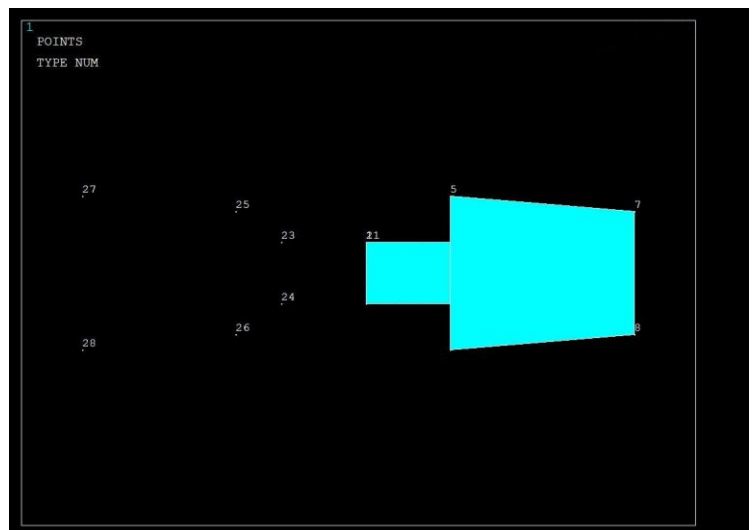
2) Tvorba rotorové drážky

Rotorová drážka je charakterizována plochou, které vychází z předchozího vykreslení kepointů 1-8 (Obr. 3.2). Drážka je rozdělena na dvě plochy, kde jedna z ploch reprezentuje vinutí uvnitř drážky a druhá budoucí vzduchovou mezeru.

Ukázka použitého kódu APDL skriptu

A,5,7,8,6

A,1,3,4,2



Obr. 3.3: Rotorová drážka

3) Tvorba rotorové vinutí

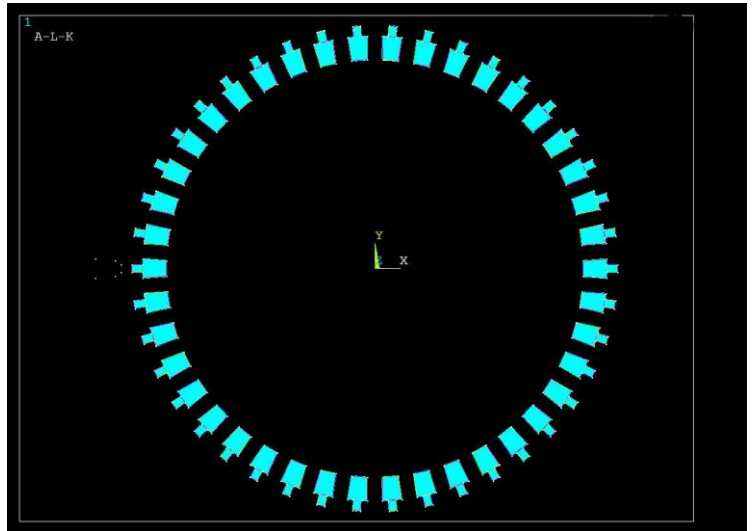
Navržená rotorová drážka je rozmnožena dle navrženého počtu rotorových drážek čímž vznikne vinutí rotoru (Obr. 3.4).

Ukázka použitého kódu APDL skriptu

```
csys,1
```

```
AGEN,42,1,,,,360/42,,0
```

```
AGEN,42,2,,,,360/42,,0
```



Obr. 3.4: Rotorové vinutí

4) Tvorba ventilačních kanálů rotoru

Další částí rotoru jsou ventilační kanály. Ventilační kanály jsou tvořeny kruhovými plochami v jednořadém, nebo dvouřadém provedení (Obr. 3.5).

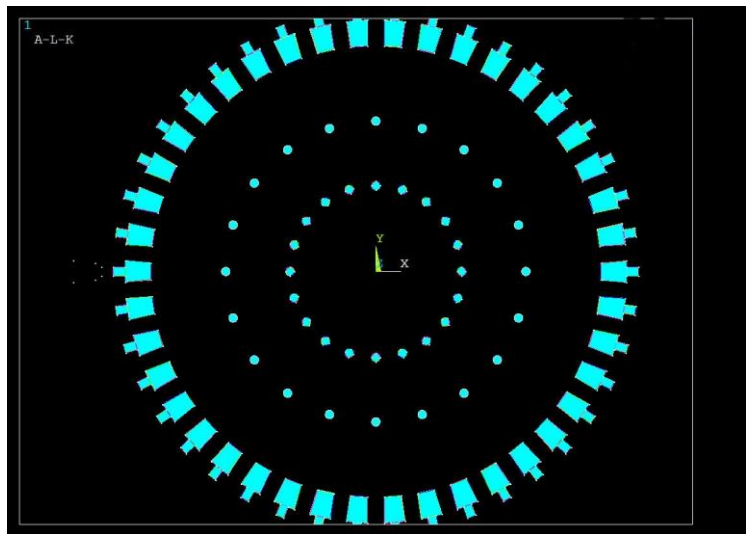
Ukázka použitého kódu APDL skriptu

```
CYL4,-200,0,10
```

```
AGEN,20,85,,,,360/20,,0
```

```
CYL4,0,350,10
```

```
AGEN,20,105,,,,360/20,,0
```



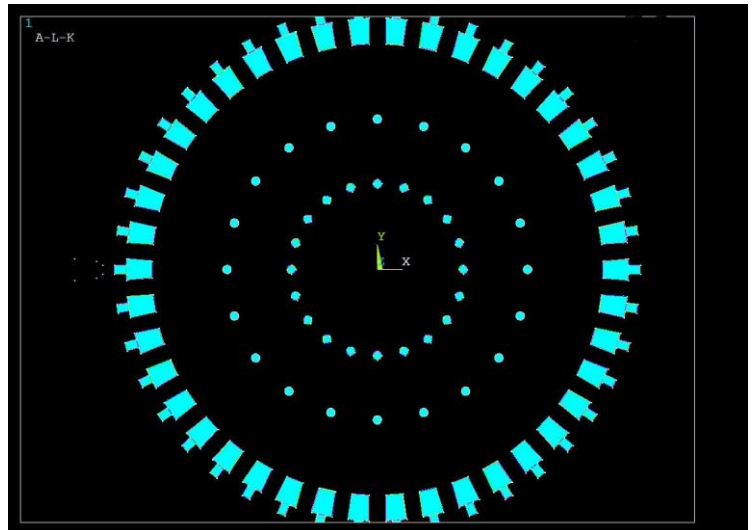
Obr. 3.5: Rotorové vinutí a ventilační kanály

5) Tvorba hřídele

Rotorová hřídel je tvořena kruhovou plochou uprostřed rotoru (Obr. 3.6).

Ukázka použitého kódu APDL skriptu

```
CYL4,0,0,100
```



Obr. 3.6: Rotorové vinutí a ventilační kanály

6) Tvorba rotorového železa

Rotorové železo je poslední navrhovanou částí rotoru. Rotorové železo je tvořeno kruhovou plochou, která respektuje geometrii ostatních částí rotoru (Obr. 3.7).

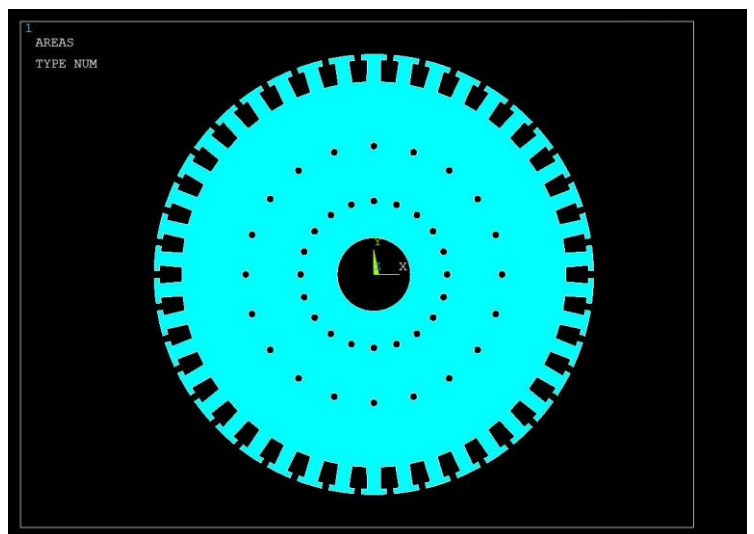
Ukázka použitého kódu APDL skriptu

```
CYLA, 0, 0, 600
```

```
APTN, ALL
```

```
asel, s, loc, x, 577.5, 612.5,
```

```
adele, all, ,, 1
```



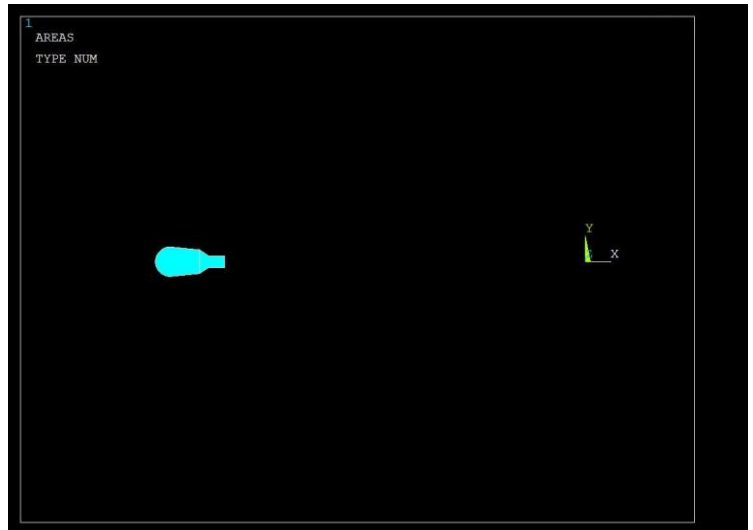
Obr. 3.7: Rotorové železo

7) Tvorba statorové drážky

Statorová drážka je charakterizována plochou, které vychází vykreslení keepointů 21-26 v počátku tvorby modelu (Obr. 3.2). Drážka je rozdělena na dvě plochy, kde jedna z ploch reprezentuje vinutí uvnitř drážky a druhá budoucí vzduchovou mezeru (Obr. 3.8).

Ukázka použitého kódu APDL skriptu

```
A,25,23,21,22,24,26
```



Obr. 3.8: Statorová drážka

8) Tvorba statorové vinutí

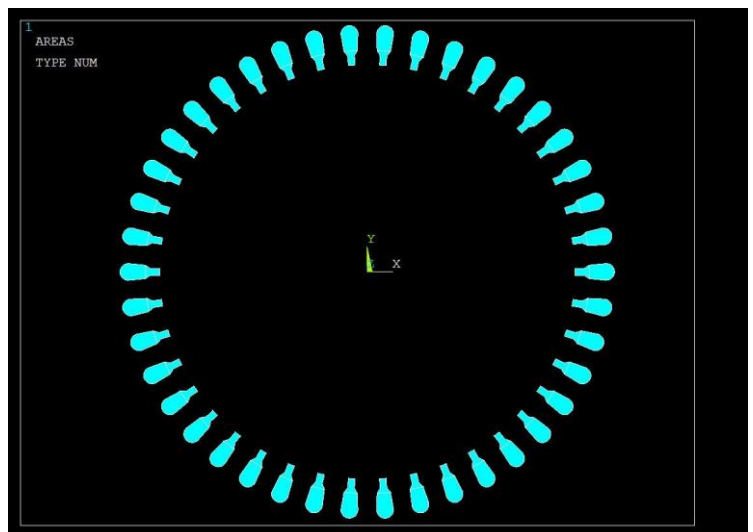
Navržená statorová drážka je rozmnožena dle navrženého počtu statorových drážek čímž vznikne vinutí statoru (Obr. 3.9).

Ukázka použitého kódu APDL skriptu

```
csys,1
```

```
AGEN,42,85,,,360/42,,,0
```

```
AGEN,42,86,,,360/42,,,0
```



Obr. 3.9: Statorové vinutí

9) Tvorba ventilačních kanálů

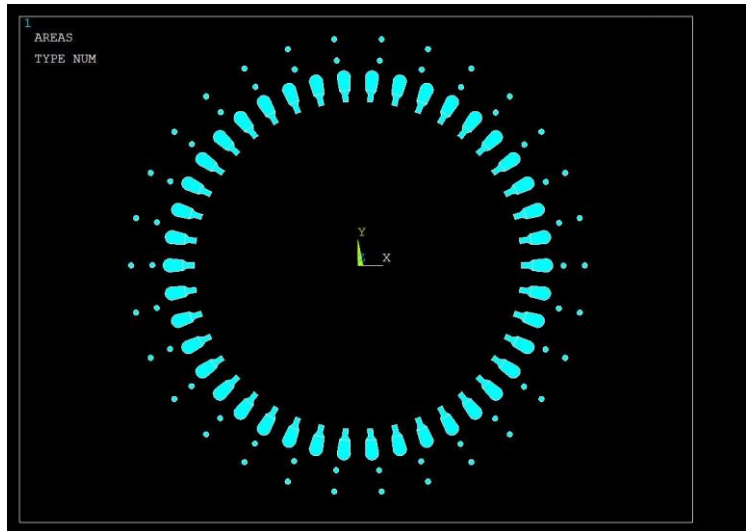
Ventilační kanály jsou obdobně jako u rotoru tvořeny kruhovými plochami v jednořadém, nebo dvouřadém provedení (Obr. 3.10).

Ukázka použitého kódu APDL skriptu

```

CYL4,-850,0,10
AGEN,30,169,,360/30,,0
CYL4,0,-702.9678,10
AGEN,30,199,,360/30,,0

```



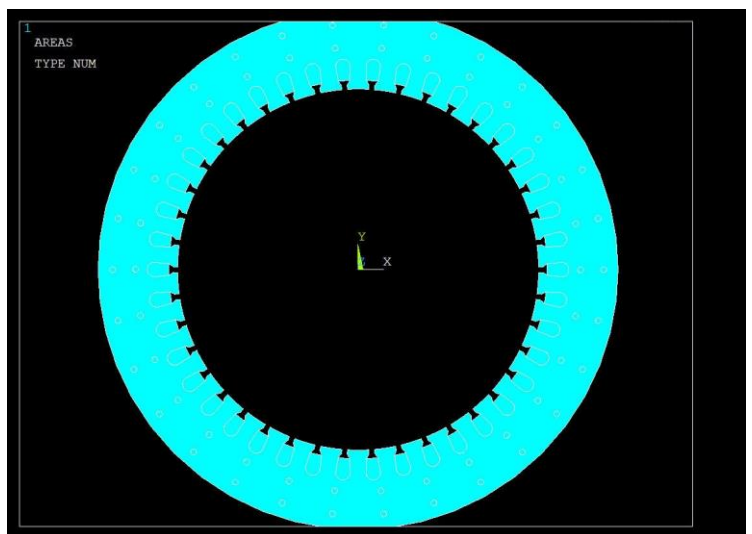
Obr. 3.10: Statorové vinutí a ventilační kanály

10) Tvorba statorového železa

Statorové železo je poslední navrhovanou částí statoru. Statorové železo je tvořeno plochou mezikruží, která respektuje geometrii ostatních částí statoru (Obr. 3.11).

Ukázka použitého kódu APDL skriptu

```
PCIRC,625,900,
```



Obr. 3.11: Statorové železo

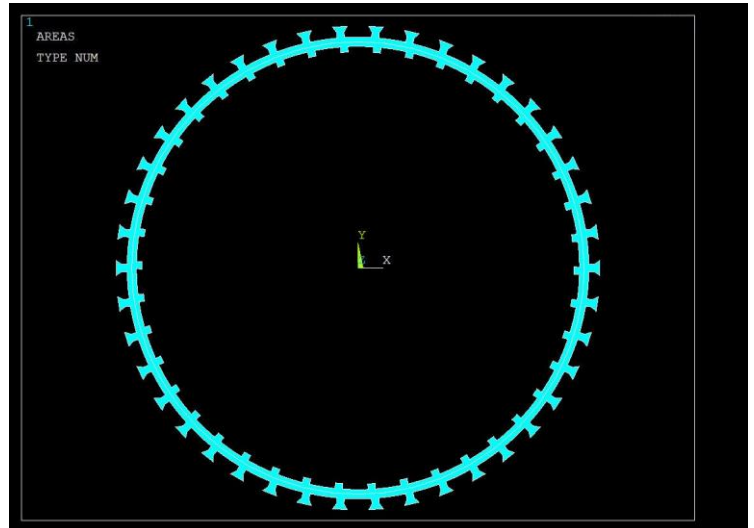
11) Tvorba vzduchové mezery

Vzduchová mezera je tvořena plochou mezi rotorem a státorem (Obr. 3.12).

Ukázka použitého kódu APDL skriptu

```
CYL4,0,0,612.5
```

PCIRC,612.5,900,



Obr. 3.12: Vzduchová mezera

3.2. Materiály

Vykreslením geometrie, tvorba modelu nekončí. Další fází tvorby je definování materiálů, neboli materiálových vlastností. Materiálové vlastnosti představují velmi široký pojem. Pro provedení multifyzikální analýzy je nutné znát nejen mechanické vlastnosti, elektrické vlastnosti, ale také závislost na teplotě, popř. čase. Pro oblast elektromagnetismu, která je pro tuto práci předmětná jsou to především elektrická vodivost a permeabilita.

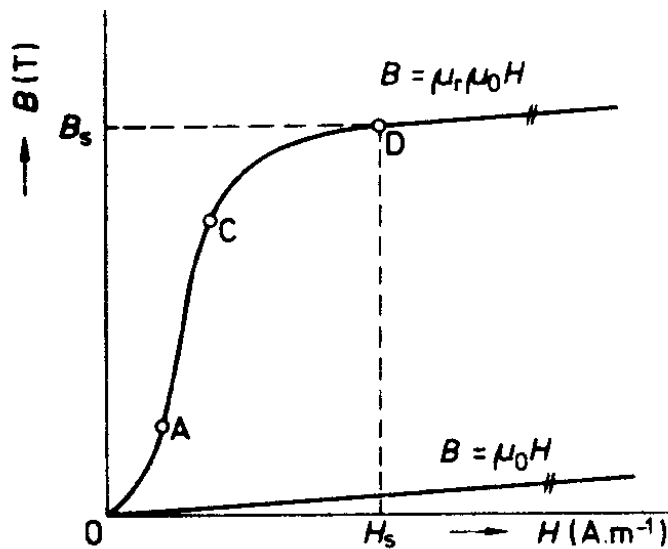
3.2.1. Postup práce s materiály v ANSYSu

Materiály motoru jsou rozděleny na pět hlavních skupin:

- vinutí rotoru
- vinutí statoru
- rotorové železo
- statorové železo
- vzduch (vzduchová mezera, ventilační kanály, hřídel rotoru)

Materiály vinutí rotoru a statoru jsou definovány rezistivitou a relativní permeabilitou. Mohou být definovány jako standardní měď (Rezistivita = $1.78e-8$, relativní permeabilita = 1), nebo pomocí zadání vlastních hodnot rezistivity a relativní permeability.

Materiálové vlastnosti rotorového a statorového železa určuje průběh magnetizační křivky. Magnetizační křivka (Obr. 3.13) znázorňuje závislost magnetické indukce na intenzitě vnějšího magnetického pole.



Obr. 3.13: Magnetizační křivka

Pro materiálové vlastnosti vzduchu je definována pouze relativní permeabilita = 1

1) Definování materiálů

Materiál č. 1 je definován jako standardní měď a později bude přiřazen rotorovému vinutí

Ukázka použitého kódu APDL skript

MPTEMP,1,0

MPDATA,MURX,1,,1

MPDATA,RSVX,1,,1.70E-08

Materiál č. 2 je definován také jako standardní měď a později bude přiřazen statorovému vinutí.

Ukázka použitého kódu APDL skript

MPTEMP,1,0

MPDATA,MURX,2,,1

MPDATA,RSVX,2,,1.70E-08

Materiál č. 3 je definován magnetizační křivkou, které je tvořena patnácti body a později bude přiřazen rotorovému železu.

Ukázka použitého kódu APDL skript

TB,BH,3,1,41
TBPT,,67.000000,0.400000
TBPT,,72.000000,0.450000
TBPT,,77.000000,0.500000
TBPT,,83.000000,0.550000
TBPT,,90.000000,0.600000
TBPT,,99.000000,0.650000
TBPT,,109.000000,0.700000
TBPT,,119.000000,0.750000
TBPT,,133.000000,0.800000
TBPT,,147.000000,0.850000
TBPT,,166.000000,0.900000
TBPT,,187.000000,0.950000
TBPT,,217.000000,1.000000
TBPT,,252.000000,1.050000
TBPT,,295.000000,1.100000

Materiál č. 4 je definován magnetizační křivkou, které je tvořena patnácti body a později bude přiřazen statorovému železu

Ukázka použitého kódu APDL skript

TB,BH,3,1,41
TBPT,,67.000000,0.400000
TBPT,,72.000000,0.450000
TBPT,,77.000000,0.500000
TBPT,,83.000000,0.550000
TBPT,,90.000000,0.600000
TBPT,,99.000000,0.650000
TBPT,,109.000000,0.700000
TBPT,,119.000000,0.750000
TBPT,,133.000000,0.800000
TBPT,,147.000000,0.850000
TBPT,,166.000000,0.900000
TBPT,,187.000000,0.950000

TBPT,,217.000000,1.000000

TBPT,,252.000000,1.050000

TBPT,,295.000000,1.100000

Materiál č. 5 je definován jako vzduch a později bude přiřazen vzduchové mezeře, ventilačním kanálům a hřídeli rotoru

Ukázka použitého kódu APDL skript

MPTEMP,1,0

MPDATA,MURX,5,,1

2) Přiřazení jednotlivých materiálů

V této části je nutné jednotlivé nedefinované materiály přiřadit příslušným částem modelu. Při přiřazování jednotlivých materiálů se zároveň přidělují také typy elementů, které jsou popsány v následující kapitole síťování.

Rotorové vinutí

Nejprve se provede selekce ploch reprezentujících rotorové vinutí a poté je tomuto výběru přiřazen materiál č. 1

Ukázka použitého kódu APDL skript

asel, s,, 42, 83,

aatt , 1, 1, 0

Statorové vinutí

Obdobně jako u rotoru, selekce ploch reprezentujících statorové vinutí a poté přiřazení materiálu č. 2

Ukázka použitého kódu APDL skript

asel, s,, 85, 126,

aatt , 2, 2, 0

Rotorové železo

Výběr příslušné plochy pro rotorové železo a přiřazení materiálu č. 3

Ukázka použitého kódu APDL skript

asel, s,, 84,

aatt , 3, 3, 0

Statorové železo

Výběr příslušné plochy pro statorové železo a přiřazení materiálu č. 4

Ukázka použitého kódu APDL skript

asel, s,, 129,

aatt , 4, 4, 0

Vzduch

Výběr obsahuje rotorové ventilační kanály, statorové ventilační kanály, vzduchovou mezeru, rotorovou hřídel a následně mu je přiřazen materiál č. 5

Ukázka použitého kódu APDL skript

asel,s,,1,20,

asel,a,,21,40,

asel,a,,41,

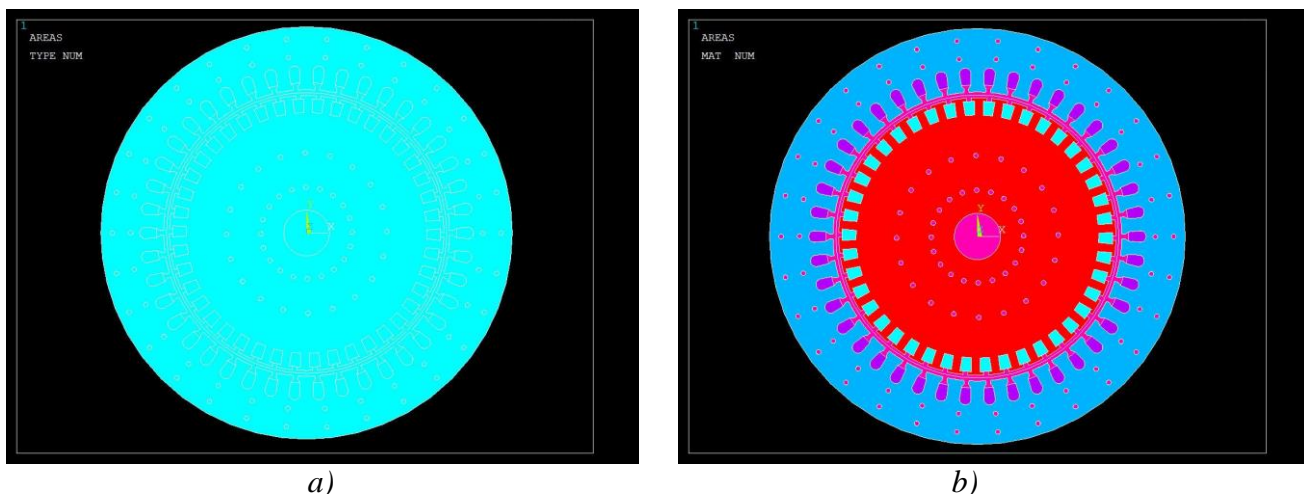
asel,a,,130,159,

asel,a,,160,189,

asel,a,,127128,

aatt , 5, 5, 0

Přiřazení materiálů jednotlivým částem modelu je charakterizováno změnou barevného provedení modelu (Obr. 3.14b).



a)

b)

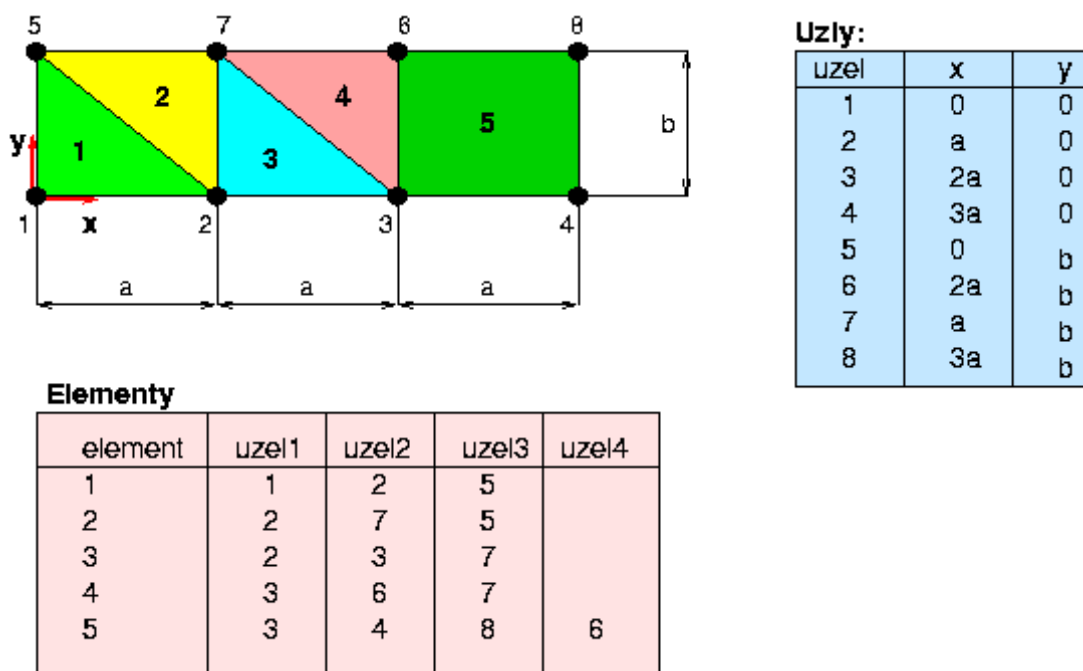
Obr. 3.14: Náhled modelu; a) před přiřazením materiálů; b) po přiřazení materiálů

3.3. Síťování

Síťování je založeno na principu metody konečných prvků (MKP). Metoda konečných prvků je numerická metoda, která se používá při diskretizaci analyzované oblasti. To znamená rozdělení vytvořeného modelu, který je předmětem výpočtu, na konečný počet částí (tzv. elementy), které s patřičnou přesností vyplní tvar modelu.

Konečně prvkový model

Oproti geometrickému modelu, který byl složen ze souboru tří entit (bodů, čar a ploch) je Konečně prvkový model tvořen pouze dvěma typy entit, uzly a elementy (Obr. 3.15).



Obr. 3.15: Konečně prvkový model [3]

3.2.2. Postup tvorby při síťování v ANSYSu

Pro tuto fázi je důležité dodržet topologickou spojitost již na začátku při tvorbě geometrie. Je-li geometrický model stávající se z více geometrických entit topologicky spojitý, pak je zaručena i topologická spojitost automaticky generovaných sítí. Případná nespojitost by ve finální fázi síťování vyvolala chybové hlášení a celá geometrie by musela být vytvořena znovu.

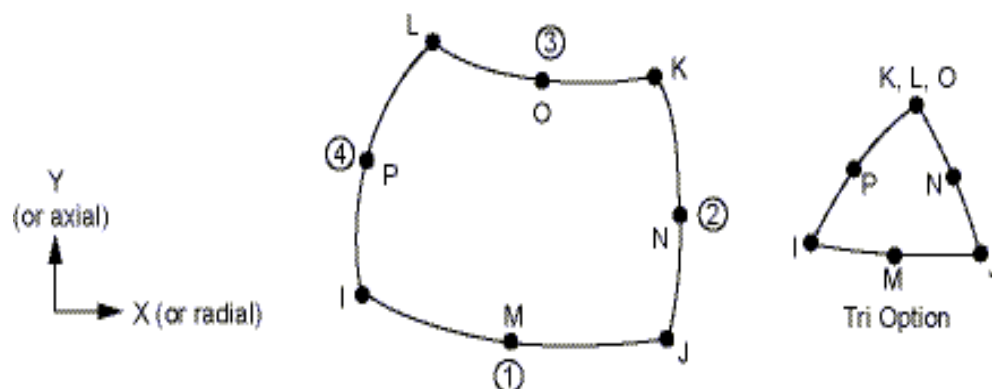
Aby bylo možné provést diskretizaci požadované oblasti je zapotřebí definovat:

- Typ elementu
- Přiřazení elementu
- Velikost elementu

1) Volba elementu

Typ elementu

Výběr vhodného elementu je jednou z klíčových voleb při provádění diskretizace. Knihovna elementů je velmi rozsáhlá a obsahuje přes 100 typů elementů. Pro tvorbu modelu motoru byl zvolen typ elementu PLANE53 (Obr. 3.16).



Obr. 3.16: Element PLANE53 [4]

PLANE53 je element používaný pro 2D modely magnetických polí. Prvek je definován 8 uzly, z nichž 4 jsou libovolně pohyblivé.

Počet typů elementu respektuje rozdělení materiálů na pět hlavních částí:

- vinutí rotoru
- vinutí statoru
- rotorové železo
- statorové železo
- vzduch (vzduchová mezera, ventilační kanály, hřídel rotoru)

Ukázka použitého kódu APDL skript

ET,1,53

ET,2,53

ET,3,53

ET,4,53

ET,5,53

2) Přiřazení elementu

Element je přiřazován jednotlivým částem modelu při fázi přiřazování materiálů.

3) Velikost elementu a síťování

Nastavením velikosti elementu je definována rozsáhlost konečně prvkové sítě. Každá skupina elementů má svou velikost. Po nastavení příslušné velikosti je provedeno síťování dané oblasti.

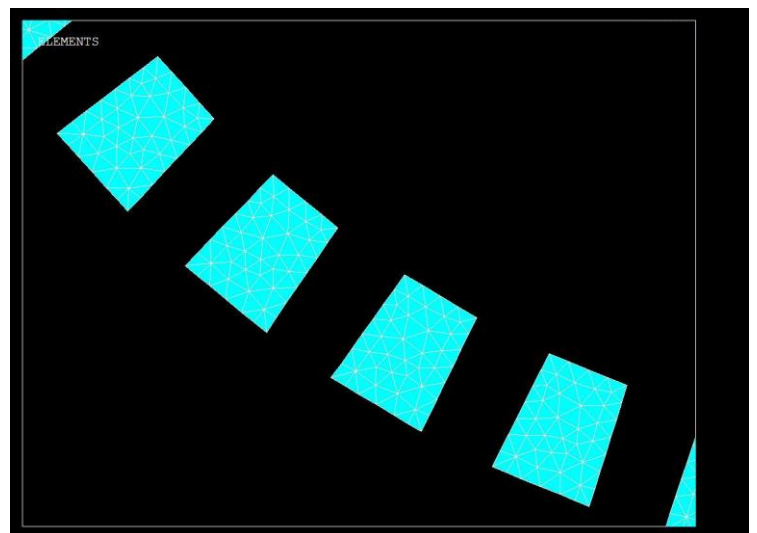
Síťování rotorového vinutí

Ukázka použitého kódu APDL skriptu

ASEL,S,MAT,,1

ESIZE,10,0,

amesh,all



Obr. 3.17: Síťování rotorového vinutí

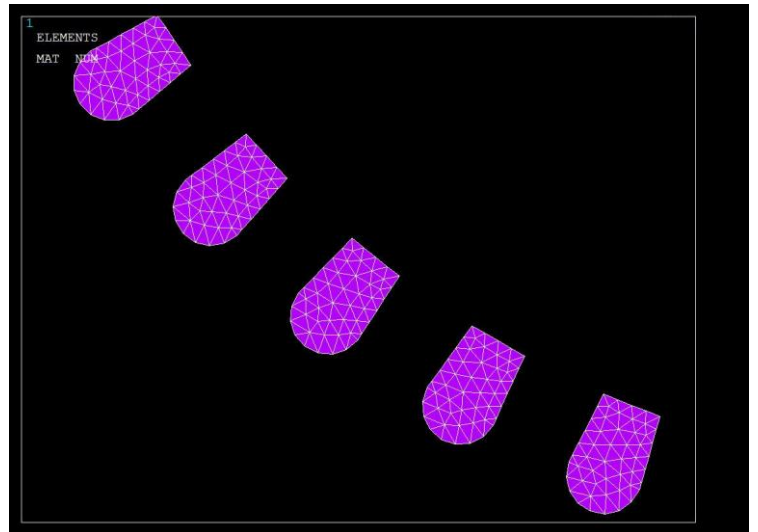
Síťování statorového vinutí

Ukázka použitého kódu APDL skriptu

```
ASEL,S,MAT,,2
```

```
ESIZE,10,0,
```

```
amesh,all
```



Obr. 3.18: Síťování statorového vinutí

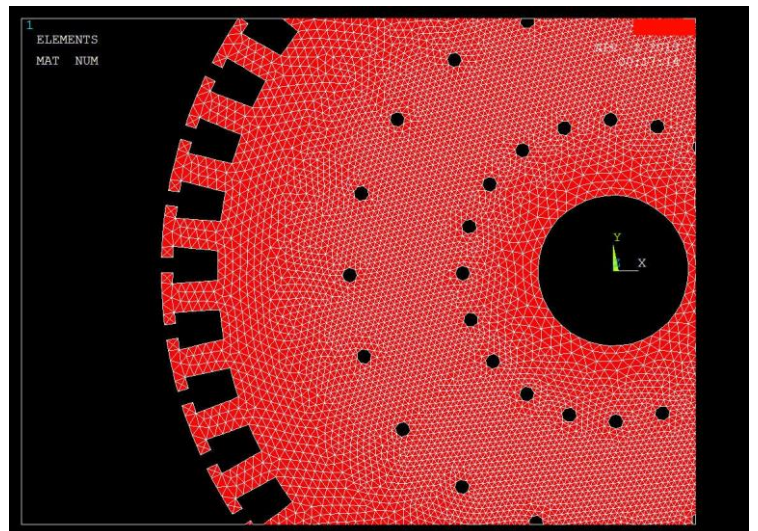
Síťování rotorového železa

Ukázka použitého kódu APDL skriptu

```
ASEL,S,MAT,,3
```

```
ESIZE,15,0,
```

```
amesh,all
```



Obr. 3.19: Síťování rotorového železa

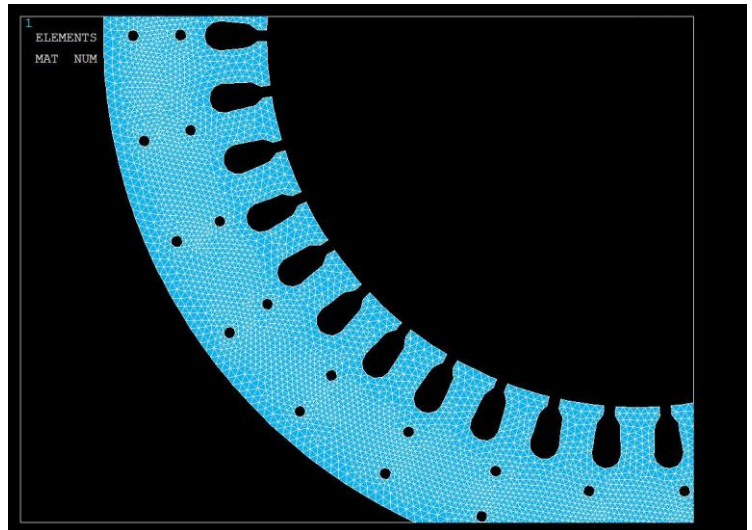
Síťování statorového železa

Ukázka použitého kódu APDL skriptu

```
ASEL,S,MAT,,4
```

```
ESIZE,15,0,
```

```
amesh,all
```



Obr. 3.20: Síťování rotorového železa

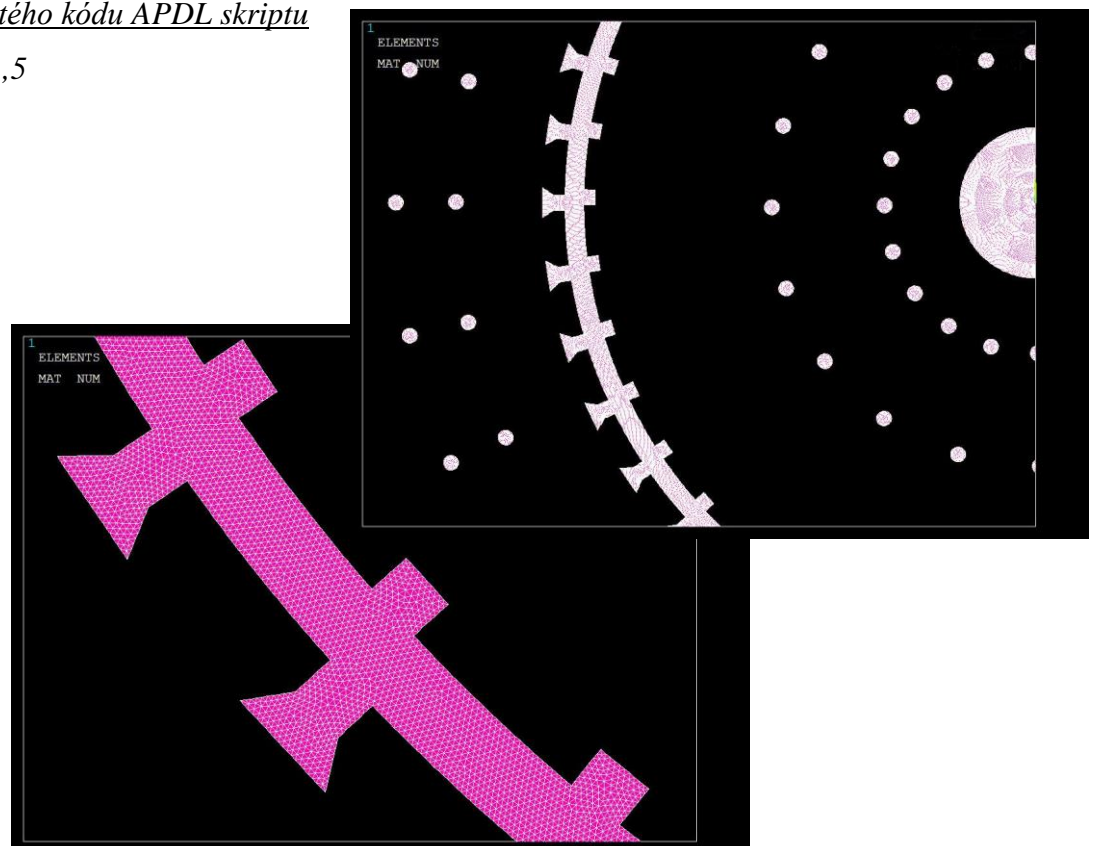
Síťování prostoru vzduchu

Ukázka použitého kódu APDL skriptu

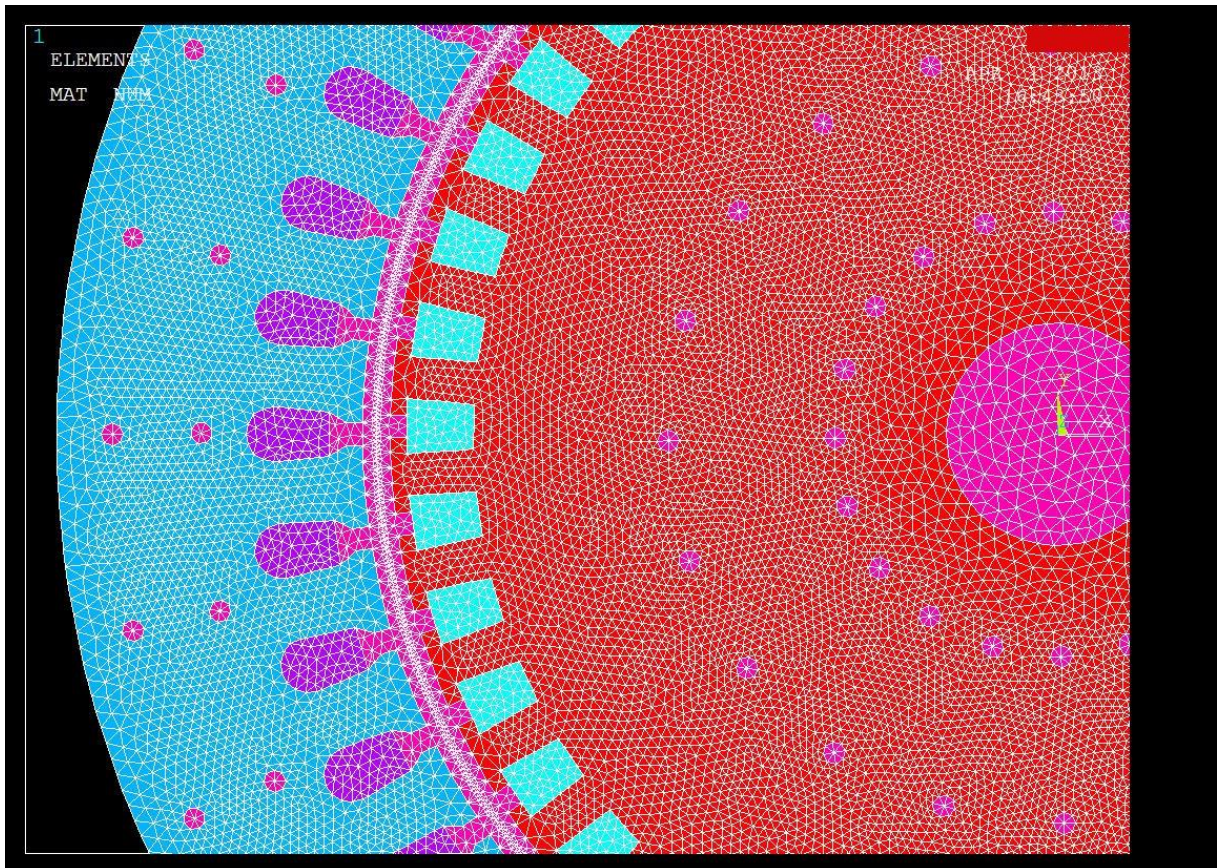
```
ASEL,S,MAT,,5
```

```
ESIZE,2,0,
```

```
amesh,all
```



Obr. 3.21: Síťování prostoru vzduchu



Obr. 3.22: Celkové síťování modelu

4. Program

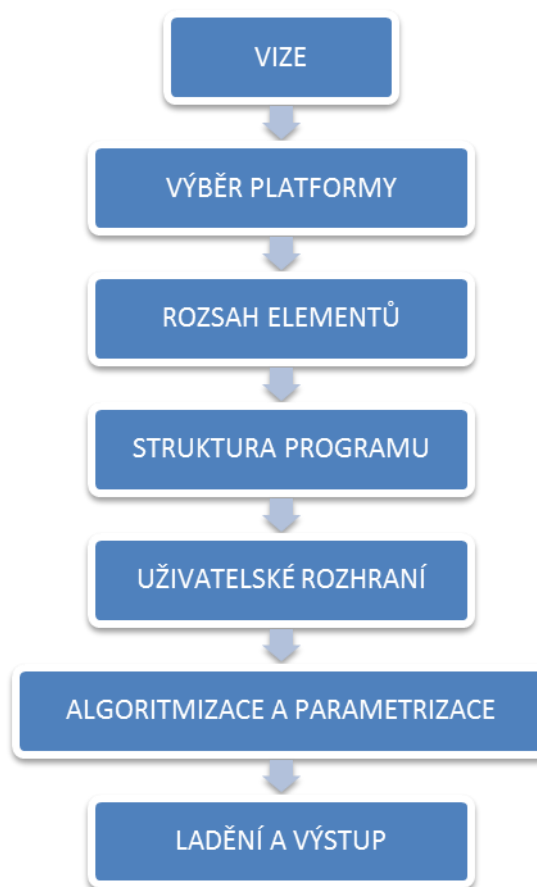
Jak bylo řečeno tvorba modelu v ANSYSu může probíhat několika způsoby. Nejsnadnější variantou se jeví použití již vytvořeného makra pro daný typ motoru. Nevýhodou tohoto způsobu je jednoúčelovost z hlediska připraveného makra. Jedná se vždy o konkrétní motor s konkrétními typy drážek provedením ventilačních kanálů atp. Toto makro může být použito jako šablona a s provedením změn v jeho struktuře a obsahu se dosáhne nového návrhu. Postupovat tímto to způsobem je možné ale z časového hlediska a případné chybovosti, není zcela optimální. Návrh tímto způsobem je vyčleněn pouze uživatelům, kteří mají s návrhem strojů a především s návrhem modelu v prostředí ANSYS dobré zkušenosti. Při zamyšlení nad těmito otázkami vznikla myšlenka vytvořit program, který by návrh modelu AS s kotvou nakrátko a usnadnil, jak zkušeným uživatelům, tak také studentům a uživatelům, které tyto zkušenosti zatím nemají.

4.1. Popis programu

Hlavním úkolem programu je usnadnit práci při modelování strojů pro katedru KEV a umožnit návrh vlastního modelu AS motoru nezkušeným uživatelům. Úkolem programu je vygenerování APDL skriptu, který po vložení do systému ANSYS, vytvoří model dle návrhu v uživatelském prostředí aplikace.

4.2. Návrh programu

Celkový proces tvorby programu je znázorněn na Obr. 4.1.



Obr. 4.1: Schéma procesu tvorby programu

1) Výběr platformy

Na začátku celého návrhu bylo zapotřebí dát teoretické vizi konkrétní podobu a zvolit vhodnou platformu, na které bude projekt realizován. Volba padla na Visual Basic od společnosti Microsoft, který společně s tabulkovým editorem Excel, bude tvořit základní platformu pro tvorbu programu.

2) Rozsah elementů

Jak bylo uvedeno v části 2, každý motor se skládá z několika částí. Tyto části mohou mít různorodé provedení vždy s ohledem na technologické možnosti, požadavky a povahu stroje. Bylo tedy nutné stanovit typy provedení jednotlivých částí s ohledem na jejich současné využití. Výběr rozsahu elementů stroje byl konzultován na katedře KEV.

3) Struktura aplikace

Před začátkem tvorby bylo nutné vytvořit strukturu (architekturu) celé aplikace. Tato struktura sloužila jako předloha při samotné tvorbě.

4) Uživatelské prostředí

Tvorba uživatelského prostředí byla založena na předem vytvořené struktuře s důrazem na intuitivnost a srozumitelnost. Design uživatelského prostředí je věcí vkusu, z hlediska výplní, ohraničení apod. vychází ze standardního nastavení Visual Basic a má prostý neutrální vzhled.

5) Algoritmizace a parametrizace

Tato fáze by se dala nazvat také jako „oživení“. Aby byl program schopný přijímat nějaké informace v podobě vstupních hodnot uživatele, bylo zapotřebí vytvořit vnitřní algoritmy a parametrizovat vstupní informace.

Parametrizace je proces, při kterém jsou vstupní hodnoty uživatele ať už v podobě přímé (zapsání hodnoty do pole), nebo nepřímé (volbou ovládacího prvku) vyhodnoceny a přiřazeny danému parametru.

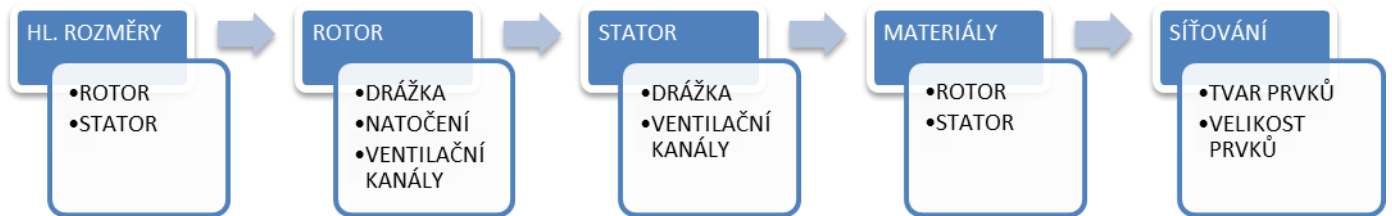
Algoritmizace jednou z nejdůležitějších fází celého procesu. Jedná se o programovací fázi, ve které je tvořen vnitřní algoritmus, na němž bude celý program pracovat. Algoritmy pracují na základě činnosti uživatele v uživatelském rozhraní. Tyto vstupní informace jsou v průběhu návrhu vyhodnocovány a ovlivňují další činnost programu a výsledné řešení celého návrhu.

6) Ladění a výstup

Je poslední fáze, ve které byla definována struktura požadovaného výstupu, v našem případě skriptu. Tvorba geometrie modelu v ANSYSu, si vyžaduje pro různé návrhy motorů z hlediska výběru a uspořádání elementů různé postupy. Tento úkon je tvořen v rámci programu na základě návrhu uživatele.

4.3. Princip činnosti programu

Program pracuje na konkrétní posloupnosti. Proces návrhu je rozdělen do pěti kroků Obr. 4.2.



Obr. 4.2: Přehledové schéma procesu

Detailní popis jednotlivých kroků z hlediska vnitřní činnosti aplikace by obsahlo další diplomovou práci, a proto budou tyto kroky popsány zjednodušenou formou.

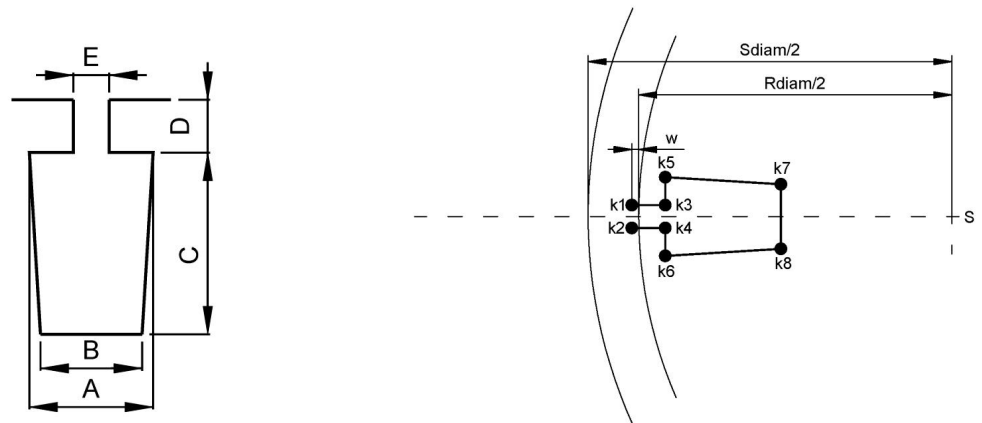
1) Hlavní rozměry

Úvodním krokem návrhu je zadání hlavních rozměrů stroje. Hlavní rozměry jsou rozděleny na tři oblasti; rotor, stator a hřídel. Zadané hodnoty jsou přiřazeny jednotlivým proměnným, které budou v průběhu procesu volány podle potřeby a nastavení algoritmu.

2) Rotor

Návrh rotoru je tvořen posloupností čtyř dílčích kroků; výběr typu drážky, nastavení rozměrů drážky, natočení rotoru a ventilační kanály.

- Výběr typu drážky – výběr je prováděn dvoufázovým cyklem, kde se jako první volí provedení klece a na základě volby jsou zpřístupněny typy drážek, ze kterých je možno vybírat. Volba drážky je doprovázena ilustrační grafikou vybrané drážky. Volba drážky projde vyhodnocením, na jehož základě budou vygenerovány příslušná pole pro další krok (zadávání rozměrů).
- Nastavení rozměrů drážky – po vyplnění všech hodnot dojde k uložení do příslušných proměnných. Na základě předchozí volby drážky a zadaným rozměrům algoritmus vybere vhodné rovnice a provede výpočet jednotlivých keepointů, které budou zapotřebí při návrhu modelu v ANSYSu. Po zadání rozměrů algoritmus provede kontrolu šířky zubu a případně vyzve k opravě rozměrů.



Obr. 4.3: Ukázka řešení keepointů rotorové drážky

Výpočet souřadnic jednotlivých keepointů

$$k1x = -(Rdiam / 2) - w$$

$$k1y = E / 2$$

$$k2x = -(Rdiam / 2) - w$$

$$k2y = -E / 2$$

$$k3x = -(Rdiam / 2) + D$$

$$k3y = E / 2$$

$$k4x = -(Rdiam / 2) + D$$

$$k4y = -E / 2$$

$$k5x = -(Rdiam / 2) + D$$

$$k5y = A / 2$$

$$k6x = -(Rdiam / 2) + D$$

$$k6y = -A / 2$$

$$k7x = -(Rdiam / 2) + D + C$$

$$k7y = B / 2$$

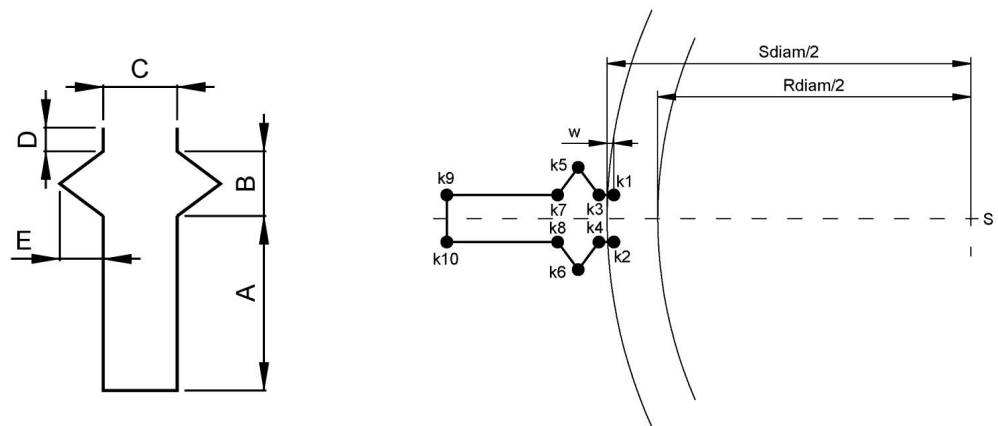
$$k8x = -(Rdiam / 2) + D + C$$

$$k8y = -B / 2$$

Přehled výpočetních postupů pro keepointy všech rotorových drážek jsou přílohou (3-7).

- Nastavení natočení rotoru – zadané parametry natočení jsou uloženy do příslušné proměnné. Tyto parametry jsou použity při tvorbě skriptu, kde jsou zařazeny na požadované místo a při tvorbě modelu natočí rotor dle zadání.

- Ventilační kanály – volbou provedení ventilačních kanálů a zadáním potřebných parametrů budou naplněny příslušné proměnné. Nastavené hodnoty budou volány zpět při tvorbě výstupního skriptu.
- 3) Stator
- Návrh statoru je tvořen posloupností třech dílčích kroků; výběr typu drážky, nastavení rozměrů drážky, natočení rotoru a ventilační kanály.
- Výběr typu drážky – výběr je prováděn dvoufázovým cyklem, kde se jako první volí provedení klece a na základě volby jsou předloženy možné typy drážek, ze kterých je možno vybírat. Volba drážky je doprovázena ilustrační grafikou vybrané drážky. Volba drážky projde vyhodnocením, na jehož základě budou vygenerovány příslušná pole pro další krok.
 - Nastavení rozměrů drážky – po vyplnění všech hodnot dojde k uložení do příslušných proměnných. Na základě předchozí volby drážky a zadaným rozměrům algoritmus vybere vhodné rovnice a provede výpočet tzv. keepointů, které budou zapotřebí při návrhu modelu v ANSYSu. Po zadání rozměrů algoritmus provede kontrolu šířky zubu a případně vyzve k opravě rozměrů.



Obr. 4.4: Ukázka řešení keepointů statorové drážky

Výpočet souřadnic jednotlivých keepointů

$$k1x = -(Sdiam / 2) + w$$

$$k1y = C / 2$$

$$k2x = -(Sdiam / 2) + w$$

$$k2y = -C / 2$$

$$k3x = -(Sdiam / 2) - D$$

$$k3y = C / 2$$

$$k4x = -(Sdiam / 2) - D$$

$$k4y = -C / 2$$

$$k5x = -(Sdiam / 2) - D - (B/2)$$

$$k5y = (C / 2) + E$$

$$k6x = -(Sdiam / 2) - D - (B / 2)$$

$$k6y = -(C / 2) - E$$

$$k7x = -(Sdiam / 2) - D - B$$

$$k7y = C / 2$$

$$k8x = -(Sdiam / 2) - D - B$$

$$k8y = -C / 2$$

$$k9x = -(Sdiam / 2) - D - B - A$$

$$k9y = C / 2$$

$$k10x = -(Sdiam / 2) - D - B - A$$

$$k10y = -C / 2$$

Přehled výpočetních postupů pro keepointy všech rotorových drážek jsou přílohou (8-10).

- Ventilační kanály – volbou provedení ventilačních kanálů a zadáním potřebných parametrů budou naplněny příslušné proměnné. Nastavené hodnoty budou volány zpět při tvorbě výstupního skriptu.

4) Materiály

Volba materiálů je rozdělena na materiály vinutí (rotoru, statoru) a na materiál magnetického obvodu (rotoru a statoru). Materiály vinutí jsou charakterizovány dvěma parametry. Rezistivitou a relativní permeabilitou. Při volbě vlastního materiálu jsou zadané hodnoty ukládány do proměnných. Pokud je materiálem zvolená měď program bude pracovat s přednastavenými parametry v interní paměti. Přednastavené parametry mědi jsou:

$$\text{Rezistivita} = 1.78e-8$$

$$\text{Relat. permeabilita} = 1$$

Materiál rotorového nebo statorového magnetického obvodu je definován magnetizační křivkou s maximálním počtem 30 bodů. Všechny zadané hodnoty jsou ukládány do proměnných, které budou volány zpět při tvorbě skriptu.

5) Síťování

V posledním kroku návrhu se volí tvar prvku a velikosti prvků jednotlivých materiálů. Hodnoty jsou opět zapsány do proměnných a volány během tvorby skriptu.

6) Výstupní skript

Výstupní skript je vytvořený kód v jazyce APDL uložený jako textový soubor. Po vložení vygenerovaného skriptu do systému ANSYS dojde k vytvoření modelu stroje dle návrhu.

Struktura skriptu je tvořena s ohledem na funkční postupy tvorby v systému ANSYS. Základní struktura skriptu je uvedena níže. Obsah jednotlivých bodů je proměnný v závislosti na výběru elementů uživatelem ve fázi návrhu.

Základní struktura skriptu

```
!*****
!**** NÁVRH AS MOTORU S KOTVOU NAKRÁTKO ****
!*****

-   Název motoru
-   preprocessor

!*****
!***** HLAVNÍ PARAMETRY STROJE ****
!*****

-   výpis hlavních rozměrů

!*****
!***** ROZMĚRY DRÁŽKY ROTORU ****
!*****

-   výpis rozměrů drážky
-   výpis souřadnic jednotlivých keepointů

!*****
!***** ROZMĚRY DRÁŽKY STATORU ****
!*****

-   výpis rozměrů drážky
-   výpis souřadnic jednotlivých keepointů
-   tvorba rotorových drážek

!Rotorové ventilační kanály
```

- tvorba ventilačních kanálů
- tvorba hřídele
- tvorba rotorového železa
- tvorba statorových drážek

!Statorové ventilační kanály

- tvorba ventilačních kanálů
- tvorba statorového železa
- tvorba vzduchové mezery

!*****

!***** Seznam čísel všech ploch *****

!*****

- výpis ploch pro další činnost

!*****

!***** Materiály *****

!*****

- tvorba elementů a materiálů
- přiřazení materiálů

!*****

!***** Síťování *****

!*****

- nastavení procesu síťování
- provedení síťování

!*****

!***** Zatížení *****

!*****

- zatížení statorového vinutí

Skutečná podoba skriptu konkrétního návrhu viz Příloha 2.

5. Funkčnost

5.1. Průvod programem

Hlavní rozměry

V první části návrhu jsou zadávány hlavní rozměry stroje. Hlavní rozměry jsou rozděleny do tří částí na rotor, stator a hřídel (Obr. 5.1).

Obr. 5.1: Hlavní rozměry

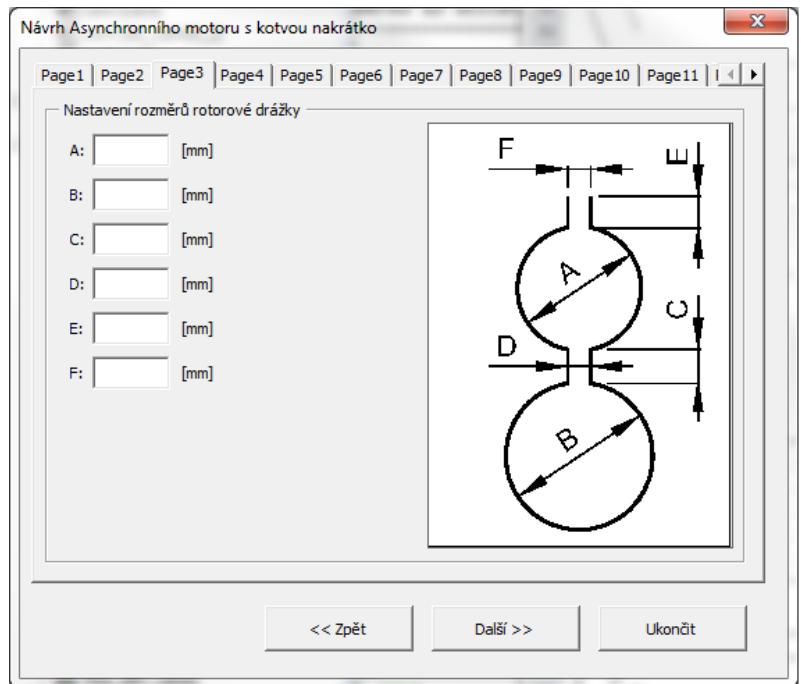
Rotorová drážka

Další částí návrhu je volba rotorové drážky. Rotorová drážka je volena na základě provedení a typu (Obr. 5.2).

Obr. 5.2: Rotorová drážka

Rozměry rotorové drážky

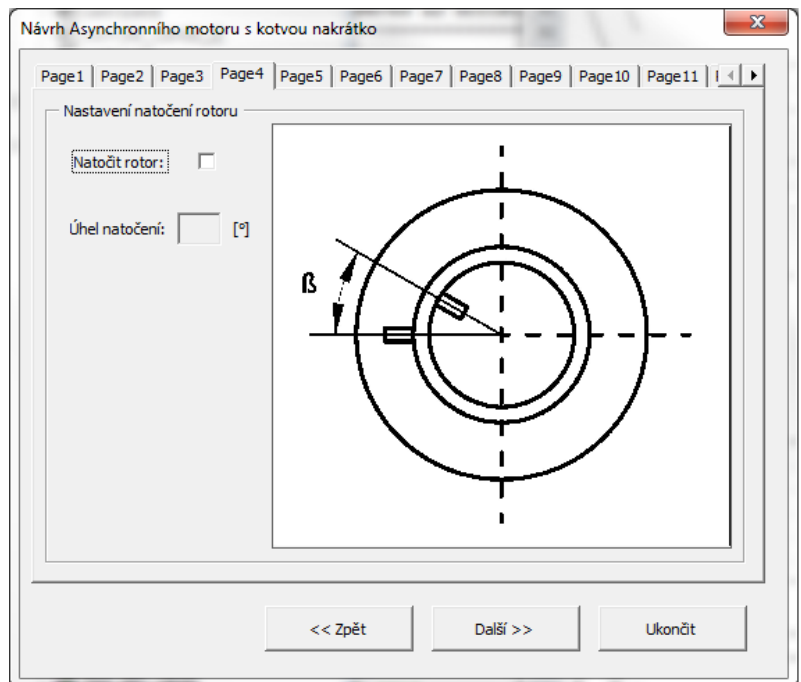
V této části jsou zadávány jednotlivé rozměry zvolenému typu drážky (Obr. 5.3).



Obr. 5.3: Nastavení rozměrů rotorové drážky

Natočení rotoru

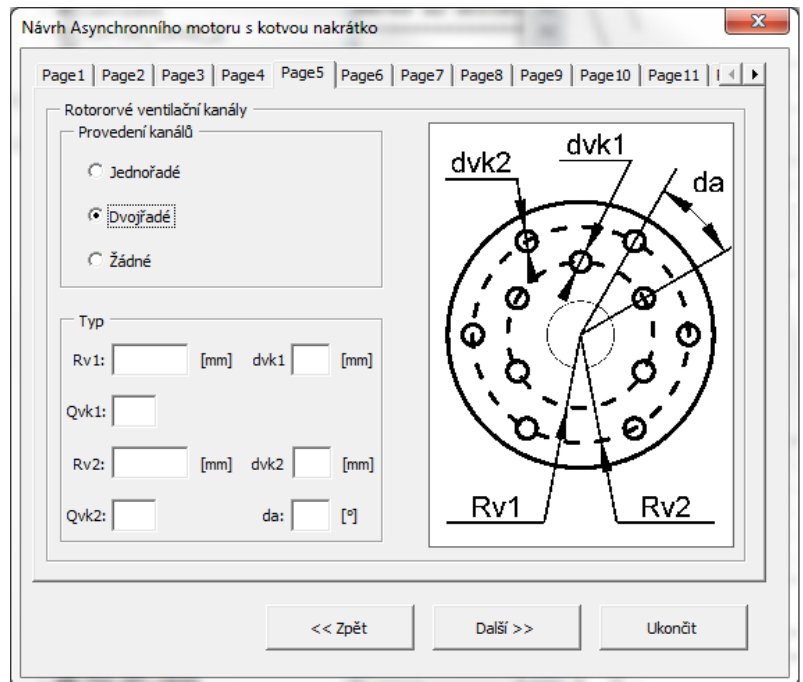
Natočením rotoru je voleno osové vychýlení mezi rotorovou a statorovou drážkou (Obr. 5.4).



Obr. 5.4: Natočení rotoru

Rotorové ventilační kanály

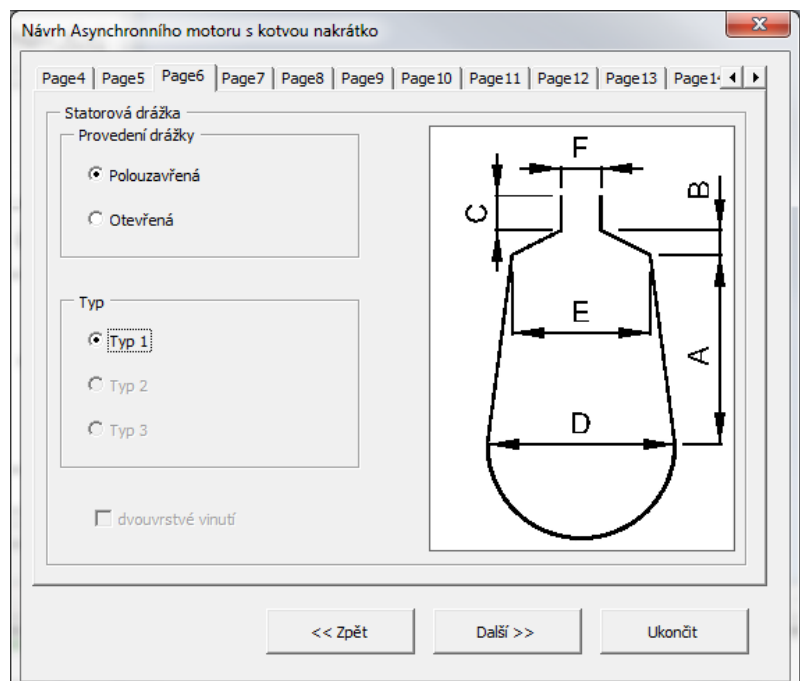
Volba ventilačních kanálů není povinná. Ventilační kanály mohou být jednořadé, nebo dvouřadé (Obr. 5.5).



Obr. 5.5: Rotorové ventilační kanály

Statorová drážka

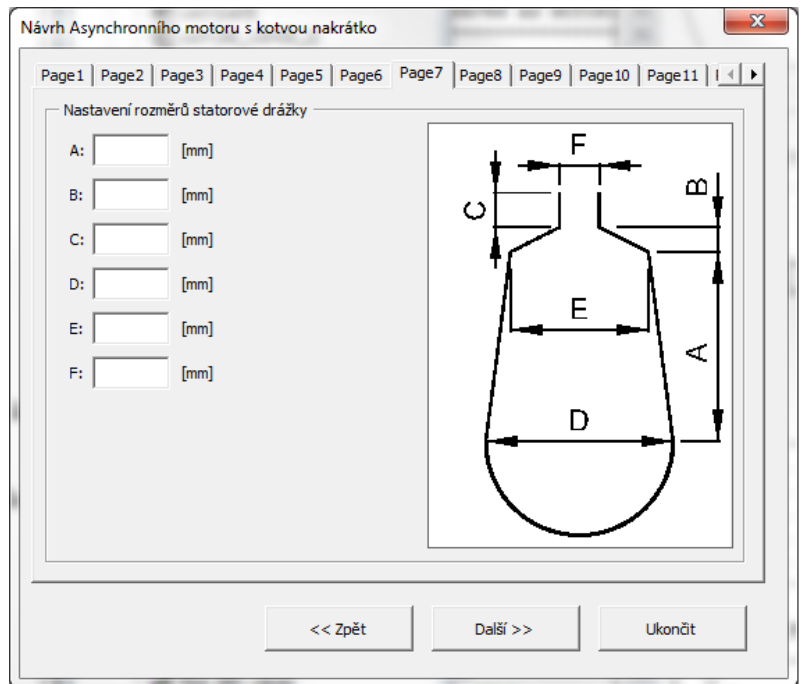
Obdobně jako u rotorové drážky je statorová drážka volena na základě provedení a typu (Obr. 5.6).



Obr. 5.6: Statorová drážka

Rozměry statorové drážky

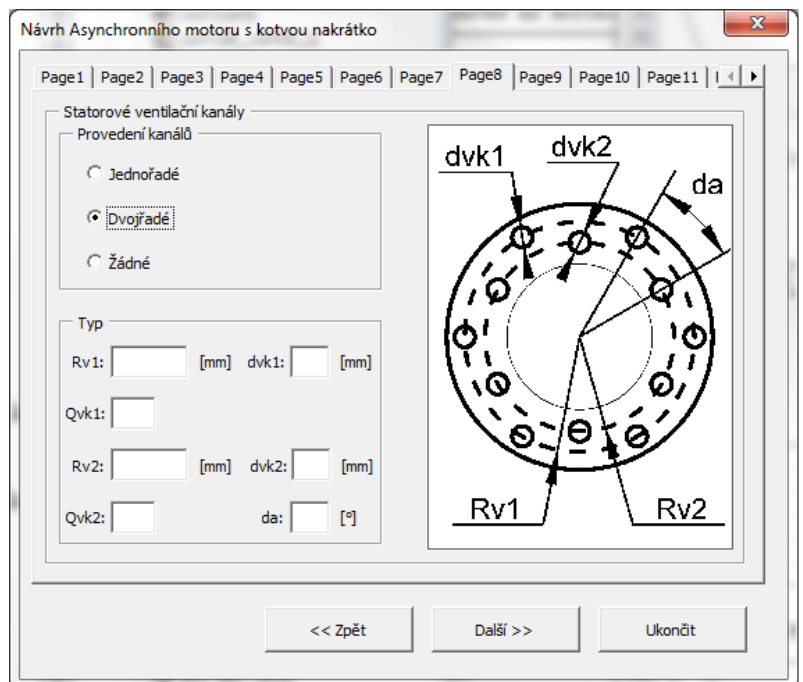
Obdobně jako u rotorové drážky jsou zadávány jednotlivé rozměry zvolenému typu drážky (Obr. 5.7).



Obr. 5.7: Nastavení rozměrů statorové drážky

Statorové ventilační kanály

Volba ventilačních kanálů není povinná. Ventilační kanály mohou být jednořadé, nebo dvouřadé (Obr. 5.8).



Obr. 5.8: Statorové ventilační kanály

Materiály vinutí

V této části jsou nastaveny požadované materiálové vlastnosti rotorového a statorového vinutí. Pro materiál vinutí může být použita standardní měď, nebo jiný materiál s vlastní rezistivitou a relativní permeabilitou (Obr. 5.9).

Návrh Asynchronního motoru s kotvou nakrátko

Page1 | Page2 | Page3 | Page4 | Page5 | Page6 | Page7 | Page8 | Page9 | Page10 | Page11 | < | >

Materiál vinutí rotoru

Měď [Rezistivita=1.78E-08, Relat. Permeabilita=1]

Vlastní

Rezistivita: [Ohm.m]

Relat. Permeabilita:

Materiál vinutí statoru

Měď [Rezistivita=1.78E-08, Relat. Permeabilita=1]

Vlastní

Rezistivita: [Ohm.m]

Relat. Permeabilita:

<< Zpět Další >> Ukončit

Obr. 5.9: Materiály vinutí

Materiál rotorového magnetického obvodu (železa)

Materiálové vlastnosti magnetického obvodu rotoru jsou definovány prostřednictvím magnetizační křivky. Magnetizační křivku je možné definovat libovolným počtem bodů s maximálním počtem 30bodů (Obr. 5.10).

Návrh Asynchronního motoru s kotvou nakrátko

Page1 | Page2 | Page3 | Page4 | Page5 | Page6 | Page7 | Page8 | Page9 | Page10 | Page11 | < | >

Materiál rotorového železa

Definovat materiál magnetizační křivkou BH

Zadej počet bodů křivky BH: Max. počet bodů je 30!

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
B:	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
H:	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
B:	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
H:	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
B:	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
H:	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

<< Zpět Další >> Ukončit

Obr. 5.10: Materiál rotorového železa

Materiál statorového magnetického obvodu (železa)

Materiálové vlastnosti magnetického obvodu statoru jsou definovány prostřednictvím magnetizační křivky. Magnetizační křivku je možné definovat libovolným počtem bodů s maximálním počtem 30bodů (Obr. 5.11).

Obr. 5.11: Materiál statorového železa

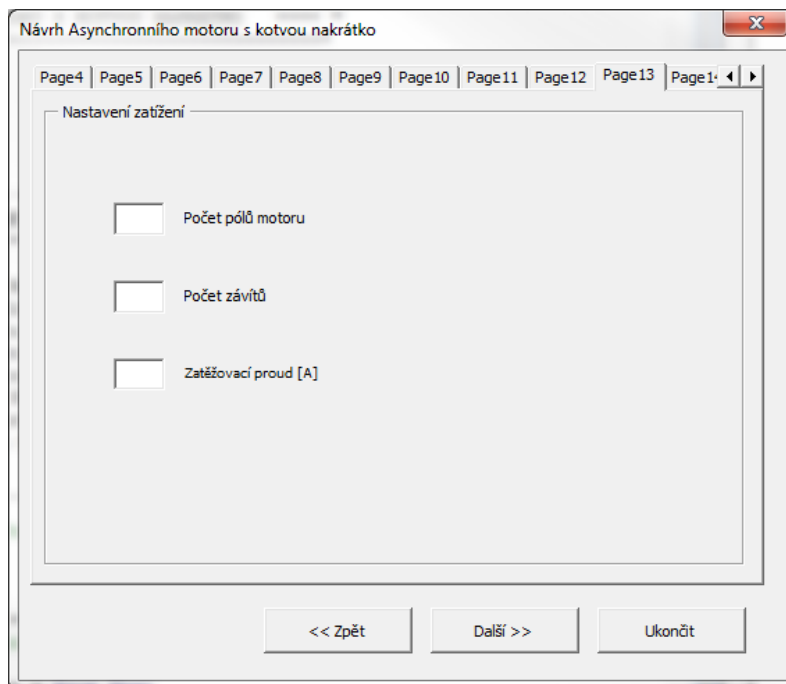
Nastavení síťování

V této části se volí tvar prvku, který bude při síťování použit a velikosti tohoto prvku s ohledem na použitý materiál (Obr. 5.12).

Obr. 5.12: Nastavení síťování

Nastavení zatížení

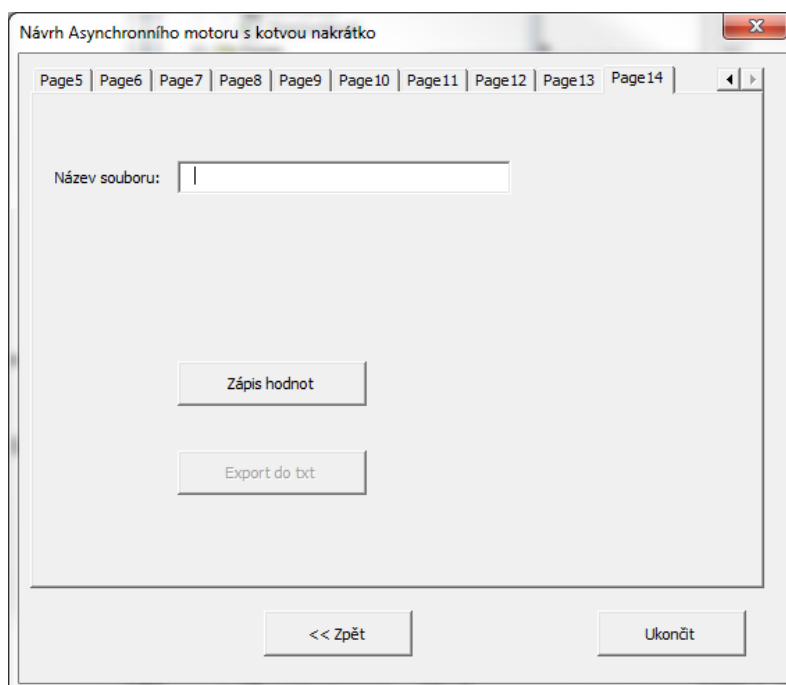
V této části se nastavuje počet pólů motoru, počet závitů cívky statorového vinutí a zatěžovací proud. Na základě těchto hodnot bude model zatížen. Vyplnění není povinné. V případě potřeby může být vytvořen model bez zatížení (Obr. 5.13).



Obr. 5.13: Nastavení zatížení

Export APDL skriptu

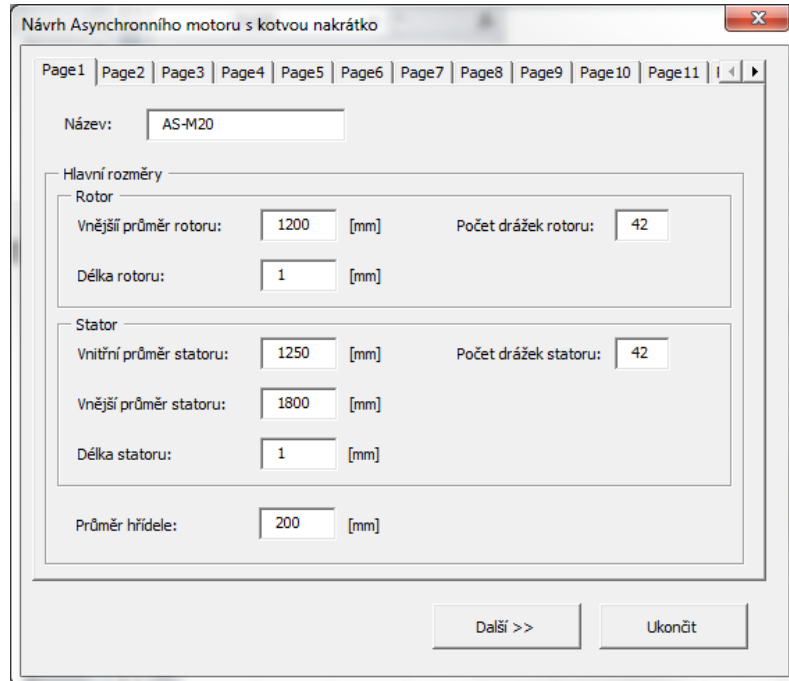
V poslední části se zadává název, pod kterým bude vygenerován výsledný APDL skript. Tlačítkem *Zápis hodnot* dojde k vygenerování potřebných dat, které se zapíší do prvního listu excelového souboru programu. Stisknutím tlačítka *Export do txt* dojde k vytvoření APDL skriptu v textovém souboru uloženým pod zadaným názvem (Obr. 5.14).



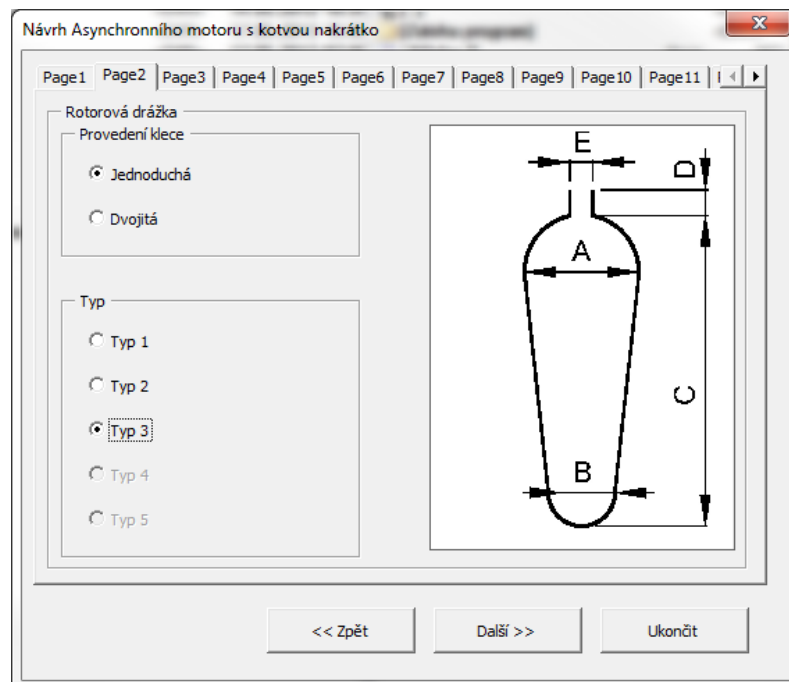
Obr. 5.14: Export APDL skriptu

5.2. Návrh

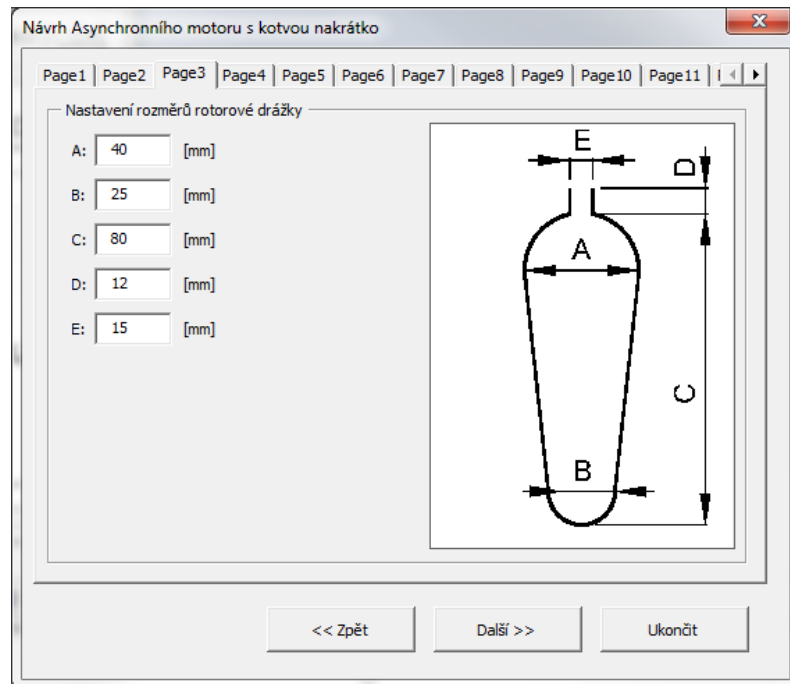
V této části DP je proveden návrh vlastního smyšleného modelu Asynchronního motoru s kotvou nakrátko pomocí vytvořeného programu. Postup tvorby, včetně zadaných hodnot je prezentován prostřednictvím náhledů obrazovky jednotlivých kroků tvorby.



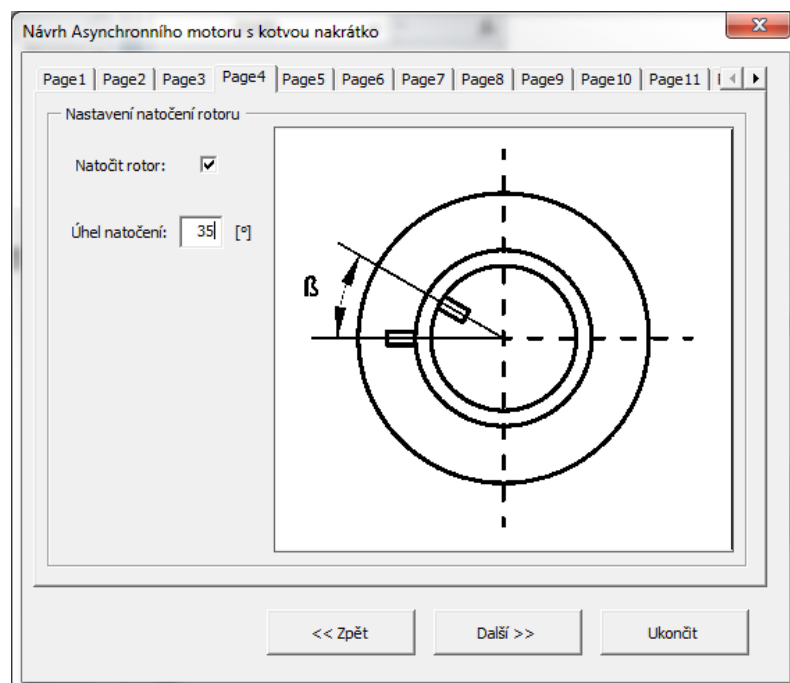
Obr. 5.15: Hlavní rozměry



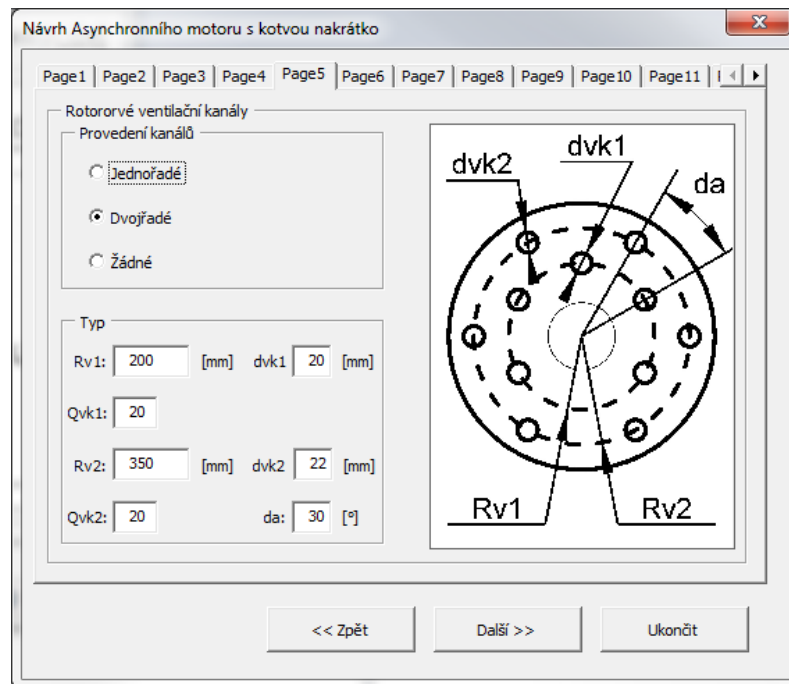
Obr. 5.16: Rotorová drážka



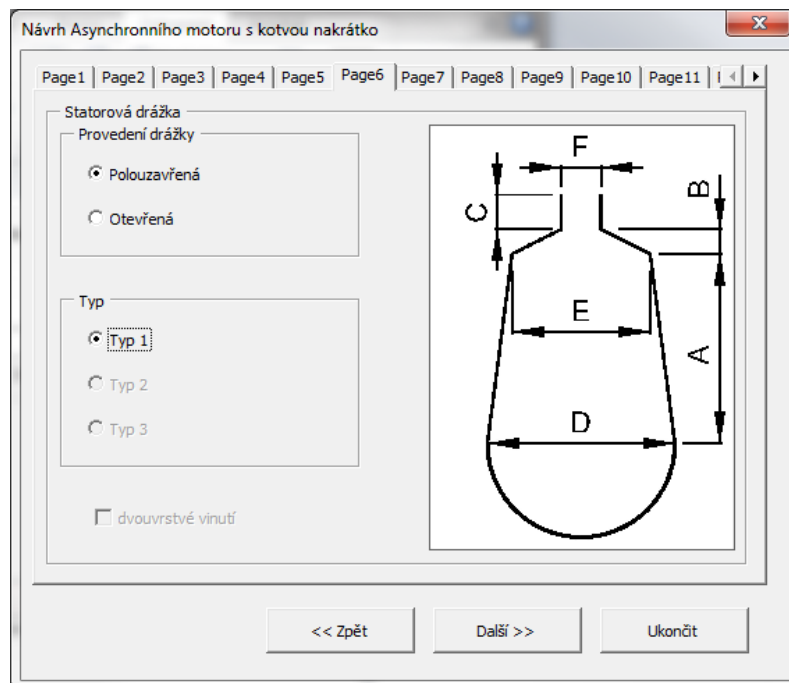
Obr. 5.17: Nastavení rozměrů rotorové drážky



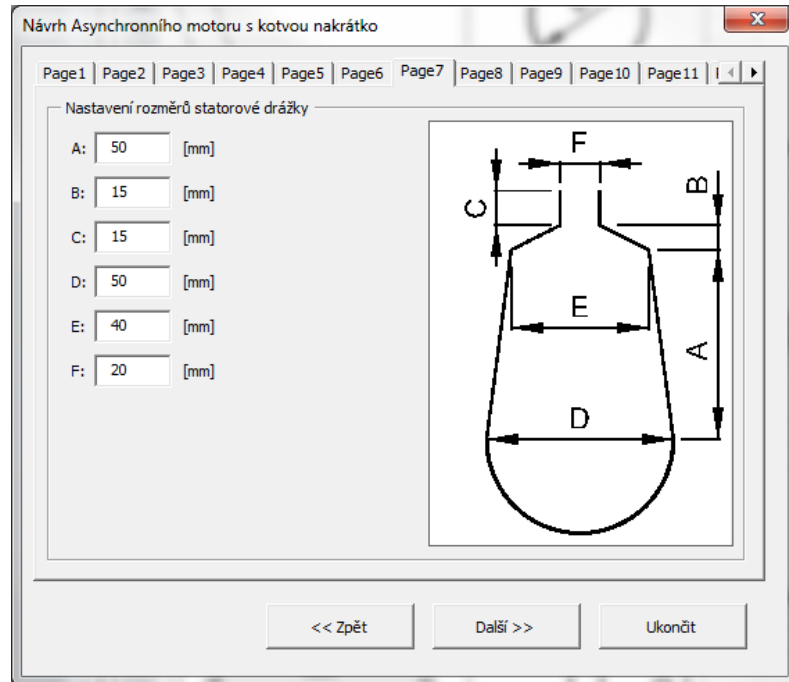
Obr. 5.18: Natočení rotoru



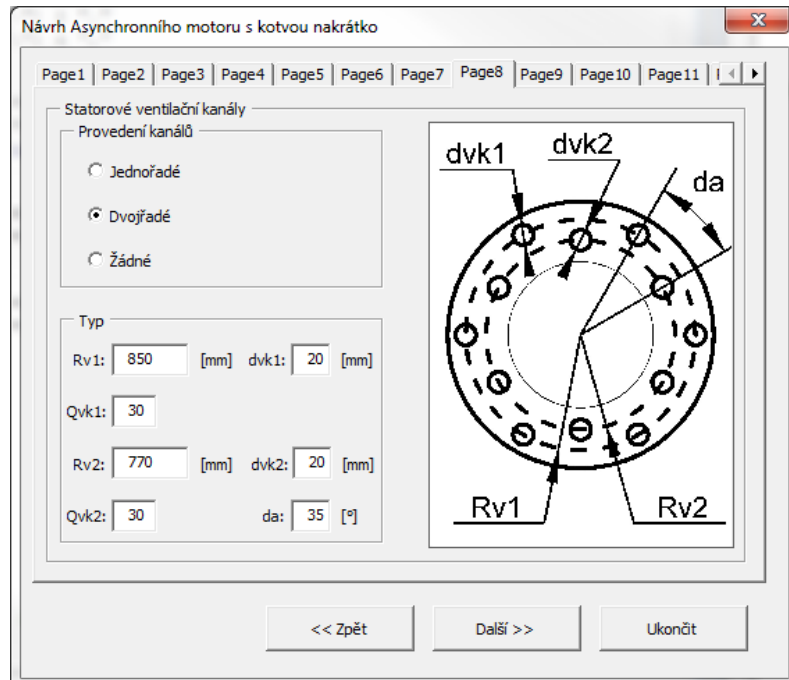
Obr. 5.19: Rotorové ventilační kanály



Obr. 5.20: Statorová drážka



Obr. 5.21: Nastavení rozměrů statorové drážky



Obr. 5.22: Statorové ventilační kanály

Návrh Asynchronního motoru s kotvou nakrátko

Page1 | Page2 | Page3 | Page4 | Page5 | Page6 | Page7 | Page8 | Page9 | Page10 | Page11 | i | < | >

Materiál vinutí rotoru

Měď [Rezistivita=1.78E-08, Relat. Permeabilita=1]

Vlastní

Materiál vinutí statoru

Měď [Rezistivita=1.78E-08, Relat. Permeabilita=1]

Vlastní

<< Zpět Další >> Ukončit

Obr. 5.23: Materiály vinutí

Návrh Asynchronního motoru s kotvou nakrátko

Page1 | Page2 | Page3 | Page4 | Page5 | Page6 | Page7 | Page8 | Page9 | Page10 | Page11 | i | < | >

Materiál rotorového železa

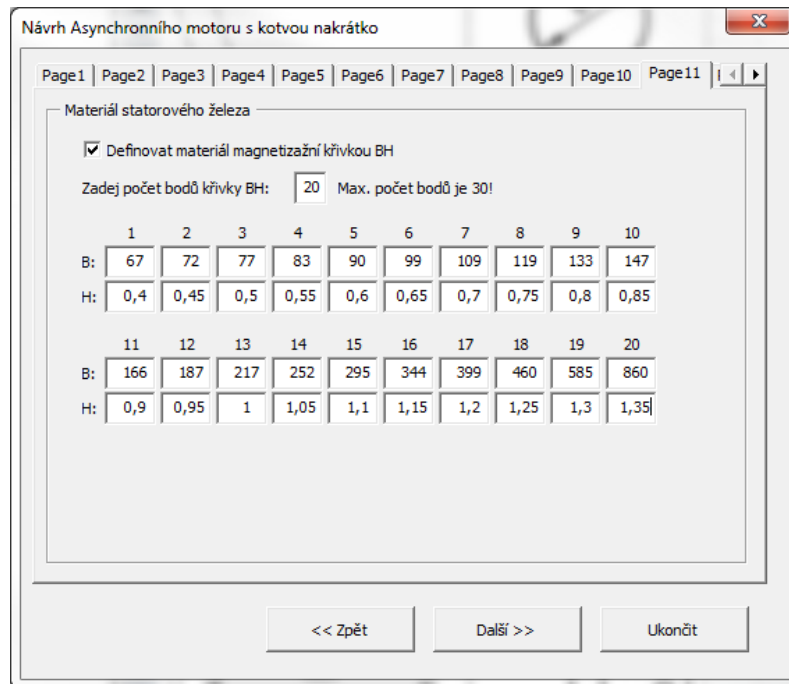
Definovat materiál magnetizační křivkou BH

Zadej počet bodů křivky BH: Max. počet bodů je 30!

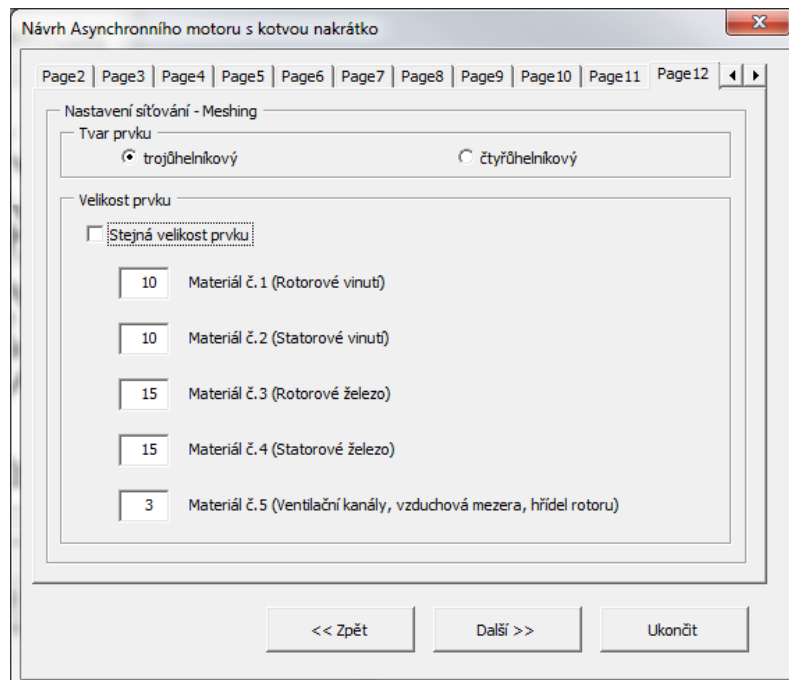
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
B:	67	72	77	83	90	99	109	119	133	147
H:	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
B:	166	187	217	252	295	344	399	460	585	860
H:	0,9	0,95	1	1,05	1,1	1,15	1,2	1,25	1,3	1,35

<< Zpět Další >> Ukončit

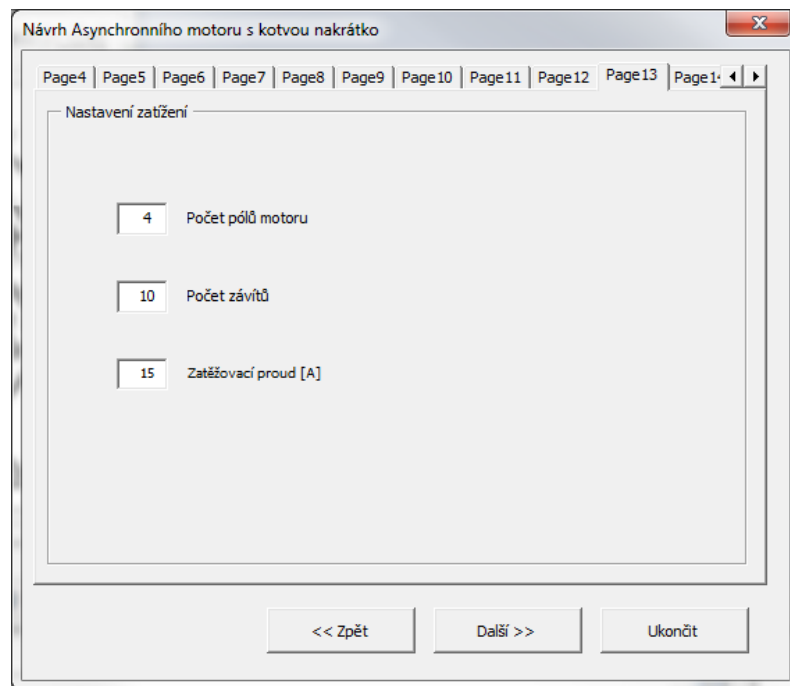
Obr. 5.24: Materiál rotorového železa



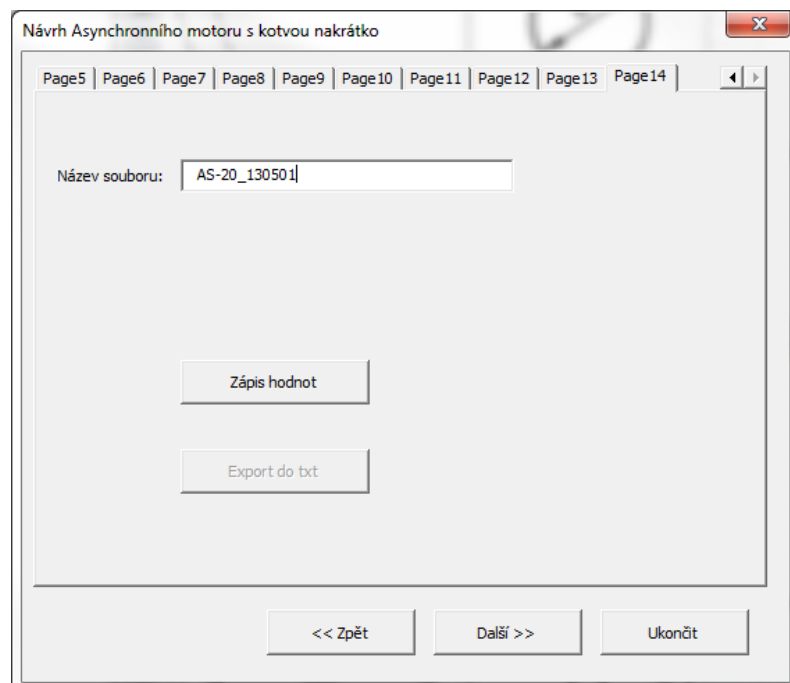
Obr. 5.25: Materiál statorového železa



Obr. 5.26: Nastavení síťování

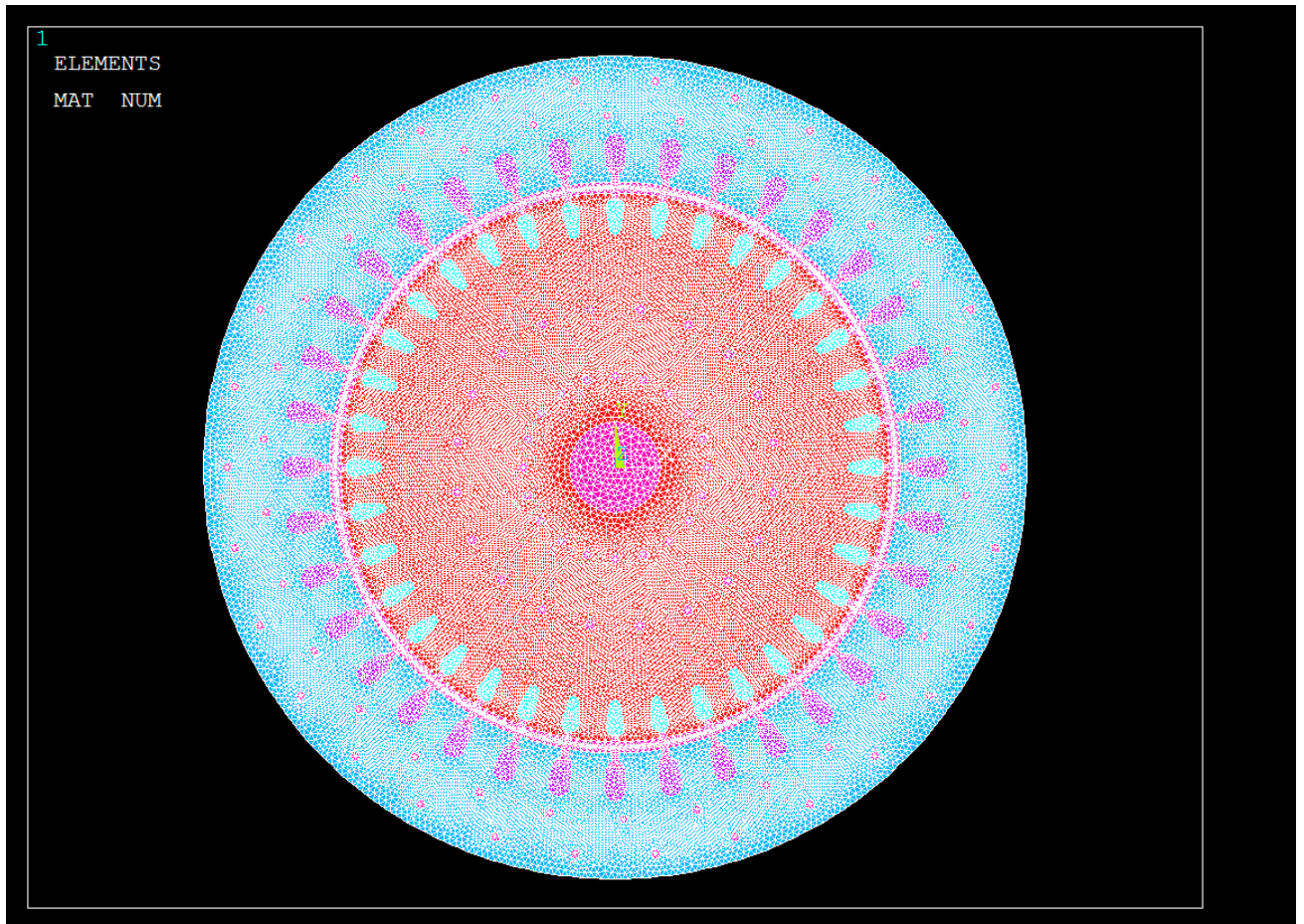


Obr. 5.27: Nastavení zatížení



Obr. 5.28: Export APDL skriptu

Výsledkem návrhu je APDL skript (viz Příloha 2), který je vložen do systému ANSYS. Výsledný model navrhovaného motoru je na Obr. 5.29.



Obr. 5.29: Výsledný model navrhovaného motoru

6. Závěr

Cílem mé diplomové práce bylo vytvořit vzorové makro modelu indukčního stroje pomocí APDL skriptu a přiblížit problematiku tvorby modelu v systému ANSYS. Vytvořený skript měl být pomůckou při tvorbě modelů indukčního stroje na katedře KEV. Návrh modelu motoru v systému ANSYS obnáší znalosti v oblasti konstrukce motorů a zkušenosti s prací v systému ANSYS. Výsledný model je velmi efektní a z hlediska orientace v dané problematice, také přínosný. Během tvorby diplomové práce jsem se rozhodl rozšířit původní koncepci DP a vytvořit program, který by usnadnil proces budoucích návrhů AS motorů na katedře KEV, a zároveň umožnil vlastní tvorbu uživatelům, kteří nemají znalosti v systému ANSYS. Původní tvorba vzorového skriptu byla tedy nahrazena tvorbou programu, který vygeneruje skript na základě libovolného návrhu uživatele.

V první části diplomové práce jsem se věnoval rozboru systému ANSYS. ANSYS je analytický systém ve kterém je možné provádět nejrozmanitější multifyzikální analýzy. Využívání těchto systému je dnes nutností při vývoji nových zařízení a technologií. ANSYS slouží k vytvoření virtuálního prototypu, který je následně vystaven působení multifyzikálním vlivům, za účelem predikce budoucího chování zařízení. Dále byl proveden rozbor skriptovacího jazyka APDL systému ANSYS ve kterém je napsán výstupní skript návrhového programu. V další části DP jsem se věnoval technickému rozboru motoru z hlediska jeho geometrie a jednotlivých elementů. Třetí část DP je věnována rozboru modelování v systému ANSYS, kde jsem popsal jednotlivé možnosti postupů při tvorbě návrhu a jejich aplikaci. Dále byly popsány jednotlivé kroky návrhu za použití částí APDL skriptu a jejich grafické interpretace. Následně jsem provedl rozboru navrhovaného programu. Zde byl popsán postup při vytváření programu a přiblížil jeho vnitřní strukturu, kde jsem rozebral jednotlivé fáze procesu. Dále jsem popsal základní strukturu výstupního skriptu včetně jeho funkčních bloků. Poslední část DP byla věnována funkčnosti programu, kde jsem provedl popis prostředí programu včetně postupu při tvorbě návrhu. Dále byla ilustrována funkčnost na konkrétním návrhu motoru. Přínos DP práce vidím především ve vytvořeném programu, který bude využíván při návrhu modelů asynchronních motorů na katedře KEV.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ANSYS, Help.: *Command reference*
- [2] HAŇKA, L.: *Teorie elektromagnetického pole*. SNTL, Praha, 1982. ALFA
- [3] KINDL, V.: *Modelování polí v elektrických strojích*. Plzeň, 2008
- [4] KOPYLOV, I.P. a kol.: *Stavba elektrických strojů*. SNTL, Praha, 1988. ISBN 04-531-88
- [5] MORAVEC, R.: *Elektrické stroje a přístroje*. Bratislava, 1978. ALFA
- [6] PETROV, G.N.: *Elektrické stroje 2*. Academia, Praha, 1982. ISBN 21-055-82
- [7] HALVORSON, M.: *Visual Basic*. Computer Press, Brno, ISBN 978-80-251-3146-6

Seznam příloh

PŘÍLOHA 1	Seznam použitých příkazů APDL
PŘÍLOHA 2	APDL skript vzorového návrhu
PŘÍLOHA 3	Rotorová drážka jednoduché klece – TYP 1
PŘÍLOHA 4	Rotorová drážka jednoduché klece – TYP 2
PŘÍLOHA 5	Rotorová drážka jednoduché klece – TYP 3
PŘÍLOHA 6	Rotorová drážka dvojité klece – TYP 4
PŘÍLOHA 7	Rotorová drážka dvojité klece – TYP 5
PŘÍLOHA 8	Statorová drážka polouzavřená – TYP 1
PŘÍLOHA 9	Statorová drážka otevřená – TYP 2
PŘÍLOHA 10	Statorová drážka otevřená – TYP 3

Obsah CD

- Diplomová práce – Tvorba indukčního stroje pomocí APDL skriptu (formát PDF)
- APDL skript vzorového návrhu
- Program – Návrh Asynchronního motoru s kotvou nakrátko

Příloha 1

Seznam použitých příkazů APDL

k	vytváří bod
l	vytváří čáru
a	vytváří plochu
CYL4	vytváří kruhovou plochu
APTN	prokládá entity a potlačuje nespojitost
NUMCMP	přečísluje entity podle nastavení
AADD	sloučí více ploch do jedné
ALLSEL	vybírá všechny entity
ASEL	vybírá plochy dle potřeby
ADELE	vymaže plochy dle potřeby
CSYS	přepíná souřadné systémy
AGEN	generuje kopie ploch
PCIRC	vytváří mezikruží
ET	vytváří elementový typ
MPDATA	materiálové vlastnosti
TB	materiálové vlastnosti tabulkou
TBPT	definování budu BH křivky
AATT	přiřazuje materiál a element entitám
MSHAPE	nastavuje síťovací vlastnosti elementu
MSHKEY	nastavuje chování volného síťování
ESIZE	nastavuje velikost elementu síťování
AMESH	provádí síťování dané oblasti
APLOT	zobrazuje všechny plochy
BFA	nastavuje zatížení dané oblasti
GET	vrací hodnoty dle dotazu

Příloha 2

```

!*****
!****  NÁVRH AS MOTORU S KOTVOU NAKRÁTKO  ****
!*****
!AS-M20
/prep7

!*****
!****  HLAVNÍ PARAMETRY STROJE  ****
!*****
!Průměr rotoru 1200
!Délka rotoru 1
!Počet drážek rotoru 36
!Vnitřní průměr statoru 1250
!Vnější průměr statoru 1800
!Délka statoru 1
!Počet drážek statoru 36
!Průměr hřídele 200

!*****
!****  ROZMĚRY DRÁŽKY ROTORU  ****
!*****
!R_dr_T2
!RA= 40
!RB= 25
!RC= 80
!RD= 12
!RE= 15

k,1,    -612.5,  7.5,
k,2,    -612.5, -7.5,
k,3,    -578,    7.5,
k,4,    -578,    -7.5,
k,5,    -568,    20,
k,6,    -568,    -20,
k,7,    -520.5, 12.5,
k,8,    -520.5, -12.5,

!*****
!****  ROZMĚRY DRÁŽKY STATORU  ****
!*****
!S_dr_T1
!SA= 50

!SB= 15
!SC= 15
!SD= 50
!SE= 40
!SF= 15

k,21,   -612.5,  7.5,
k,22,   -612.5, -7.5,
k,23,   -640,    7.5,
k,24,   -640,    -7.5,
k,25,   -655,    20,
k,26,   -655,    -20,
k,27,   -705,    25,

```

```

k,28, -705, -25,
CYL4, -568, 0, 20
CYL4, -520.5, 0, 12.5

A, 5, 7, 8, 6

APTN, ALL
NUMCMP, AREA

AADD, 3, 4, 5, 6, 7

NUMCMP, AREA
asel, u,, 3,
ADELE,ALL
allsel

A, 1, 3, 4, 2

APTN, ALL
NUMCMP, AREA

AADD, 1, 3
NUMCMP, AREA

csys,1
AGEN, 36, 1, ,, 360/36, ,, 0
AGEN, 36, 2, ,, 360/36, ,, 0

!Ventilační kanály jednořadé
!Průměr VK1 je 20 !Počet ventilačních kanálů je 20
CYL4, -200, 0, 10
AGEN, 20, 73, ,, 360/20, ,, 0
!Průměr VK2 je 22 !Počet ventilačních kanálů je 20
CYL4, 345.8111, 53.98801, 11
AGEN, 20, 93, ,, 360/20, ,, 0

CYL4, 0, 0, 100
CYL4, 0, 0, 600
APTN, ALL
asel, s,loc,x, 582, 612.5,
adele,all,,1
allsel

NUMCMP, AREA

asel, u,, 1, 78

CYL4, -705, 0, 25

CSYS,0
A, 27, 25, 26, 28
APTN, ALL
NUMCMP, AREA
AADD, 81, 82, 83
NUMCMP, AREA

asel, u,, 81,
ADELE,ALL
    
```

```

allsel
NUMCMP,      AREA

A,      25,      23,      21,      22,      24,      26

csys,1
AGEN, 36,      79,      ,,      360/36, ,,      0
AGEN, 36,      80,      ,,      360/36, ,,      0

!Ventilační kanály jednořadé
!Průměr VK1 je 20 !Počet ventilačních kanálů je 30
CYL4, -850, 0,      10
AGEN, 30,      151,      ,,      360/30, ,,      0
!Průměr VK2 je 20 !Počet ventilačních kanálů je 30
CYL4, 329.7007,      -695.843,      10
AGEN, 30,      181,      ,,      360/30, ,,      0

PCIRC, 625,      900,
APTN, ALL

asel,      s,loc,x, 612.5, 662.5,
adele,all,,,1
allsel
asel,      s,,,      1,      78,

AGEN, ,ALL,,,, -35,,,, 1
allsel
CYL4, 0,      0,      612.5
PCIRC, 612.5, 900,
APTN, ALL
NUMCMP,      AREA

!*****
!**** Seznam čísel všech ploch ****
!*****
!Plochy ventilacnich kanalu rotoru vk1: 2 - 21
!Plochy ventilacnich kanalu rotoru vk2: 22-41
!Plocha hridele: 42
!Plochy rotorovych drazek: 1, 43 - 77
!Plocha zeleza rotoru: 78
!Plochy statorovych drazek: 79 - 114
!Plocha vzduchove mezery u rotoru: 115
!Plocha vzduchove mezery u statoru: 116
!Plocha zeleza statoru: 117
!Plochy ventilacnich kanalu statoru vk1: 118-147
!Plochy ventilacnich kanalu statoru vk2: 148-177

!*****
!***** Materialy *****
!*****

ET,1,53
ET,2,53
ET,3,53
ET,4,53
ET,5,53

MPTEMP,1,0
MPDATA,MURX,1,, 1
MPDATA,RSVX,1,, 1.70E-08

```

```

MPTEMP,1,0
MPDATA,MURX,2,, 1
MPDATA,RSVX,2,, 1.70E-08

```

```

TB,BH,3,1,41
TBPT,,67.000000,0.400000
TBPT,,72.000000,0.450000
TBPT,,77.000000,0.500000
TBPT,,83.000000,0.550000
TBPT,,90.000000,0.600000
TBPT,,99.000000,0.650000
TBPT,,109.000000,0.700000
TBPT,,119.000000,0.750000
TBPT,,133.000000,0.800000
TBPT,,147.000000,0.850000
TBPT,,166.000000,0.900000
TBPT,,187.000000,0.950000
TBPT,,217.000000,1.000000
TBPT,,252.000000,1.050000
TBPT,,295.000000,1.100000
TBPT,,344.000000,1.150000
TBPT,,399.000000,1.200000
TBPT,,460.000000,1.250000
TBPT,,585.000000,1.300000
TBPT,,860.000000,1.350000

```

```

TB,BH,4,1,41
TBPT,,67.000000,0.400000
TBPT,,72.000000,0.450000
TBPT,,77.000000,0.500000
TBPT,,83.000000,0.550000
TBPT,,90.000000,0.600000
TBPT,,99.000000,0.650000
TBPT,,109.000000,0.700000
TBPT,,119.000000,0.750000
TBPT,,133.000000,0.800000
TBPT,,147.000000,0.850000
TBPT,,166.000000,0.900000
TBPT,,187.000000,0.950000
TBPT,,217.000000,1.000000
TBPT,,252.000000,1.050000
TBPT,,295.000000,1.100000
TBPT,,344.000000,1.150000
TBPT,,399.000000,1.200000
TBPT,,460.000000,1.250000
TBPT,,585.000000,1.300000
TBPT,,860.000000,1.350000

```

```

MPTEMP,1,0
MPDATA,MURX,5,, 1

asel, s,, 43, 77,
asel, a,, 1,
aatt , 1, 1, 0
allsel

asel, s,, 79, 114,
aatt , 2, 2, 0

```

```

allsel

asel, s,, 78,
aatt , 3, 3, 0
allsel

asel, s,, 117,
aatt , 4, 4, 0
allsel

asel, s,, 2, 21,
asel, a,, 22, 41,
asel, a,, 42,
asel, a,, 118, 147,
asel, a,, 148, 177,
asel, a,, 115, 116,
aatt , 5, 5, 0
allsel

MSHAPE, 1,2D
MSHKEY,0

ASEL,S,MAT,,1
ESIZE, 10,0,
amesh,all
aplot
allsel

ASEL,S,MAT,,2
ESIZE, 10,0,
amesh,all
aplot
allsel

ASEL,S,MAT,,3
ESIZE, 15,0,
amesh,all
aplot
allsel

ASEL,S,MAT,,4
ESIZE, 15,0,
amesh,all
aplot
allsel

ASEL,S,MAT,,5
ESIZE, 3,0,
amesh,all
aplot
allsel
epplot

!*****
!***** Zatižení *****
!*****
*GET, S, AREA, 79, AREA
N=10
I=15
J=N*I/S
    
```

asel,s,, 79, 81
BFA,all,JS,,j,0
allsel

asel,s,, 82, 84
BFA,all,JS,,-j,60
allsel

asel,s,, 85, 87
BFA,all,JS,,j,120
allsel

asel,s,, 88, 90
BFA,all,JS,,-j,180
allsel

asel,s,, 91, 93
BFA,all,JS,,j,240
allsel

asel,s,, 94, 96
BFA,all,JS,,-j,360
allsel

asel,s,, 97, 99
BFA,all,JS,,j,0
allsel

asel,s,, 100, 102
BFA,all,JS,,-j,60
allsel

asel,s,, 103, 105
BFA,all,JS,,j,120
allsel

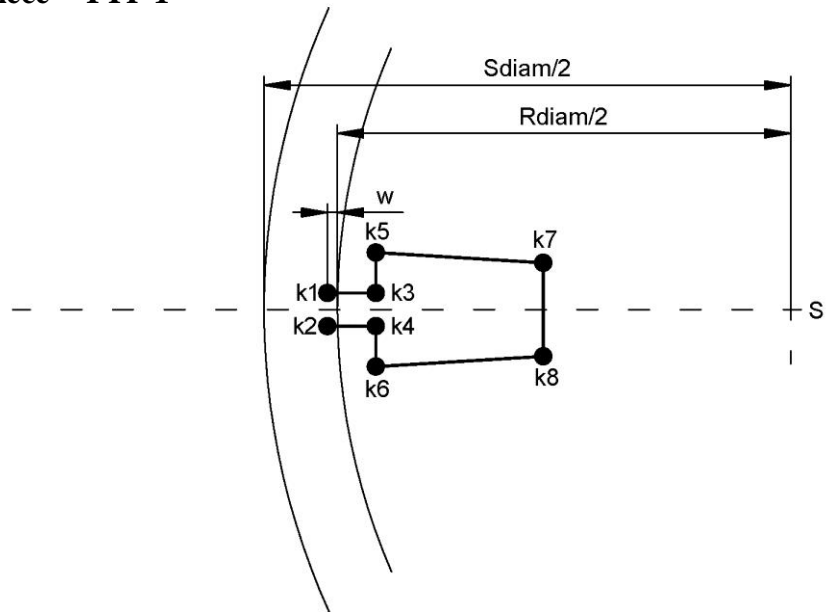
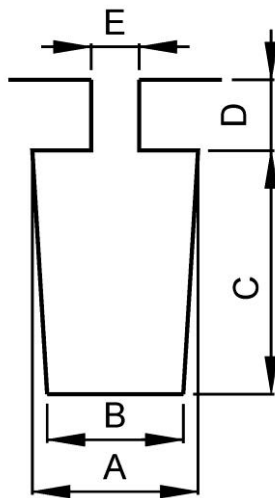
asel,s,, 106, 108
BFA,all,JS,,-j,180
allsel

asel,s,, 109, 111
BFA,all,JS,,j,240
allsel

asel,s,, 112, 114
BFA,all,JS,,-j,360
allsel

Příloha 3

Rotorová drážka jednoduché klece – TYP 1



$$k1x = -(Rdiam / 2) - w$$

$$k1y = E / 2$$

$$k2x = -(Rdiam / 2) - w$$

$$k2y = -E / 2$$

$$k3x = -(Rdiam / 2) + D$$

$$k3y = E / 2$$

$$k4x = -(Rdiam / 2) + D$$

$$k4y = -E / 2$$

$$k5x = -(Rdiam / 2) + D$$

$$k5y = A / 2$$

$$k6x = -(Rdiam / 2) + D$$

$$k6y = -A / 2$$

$$k7x = -(Rdiam / 2) + D + C$$

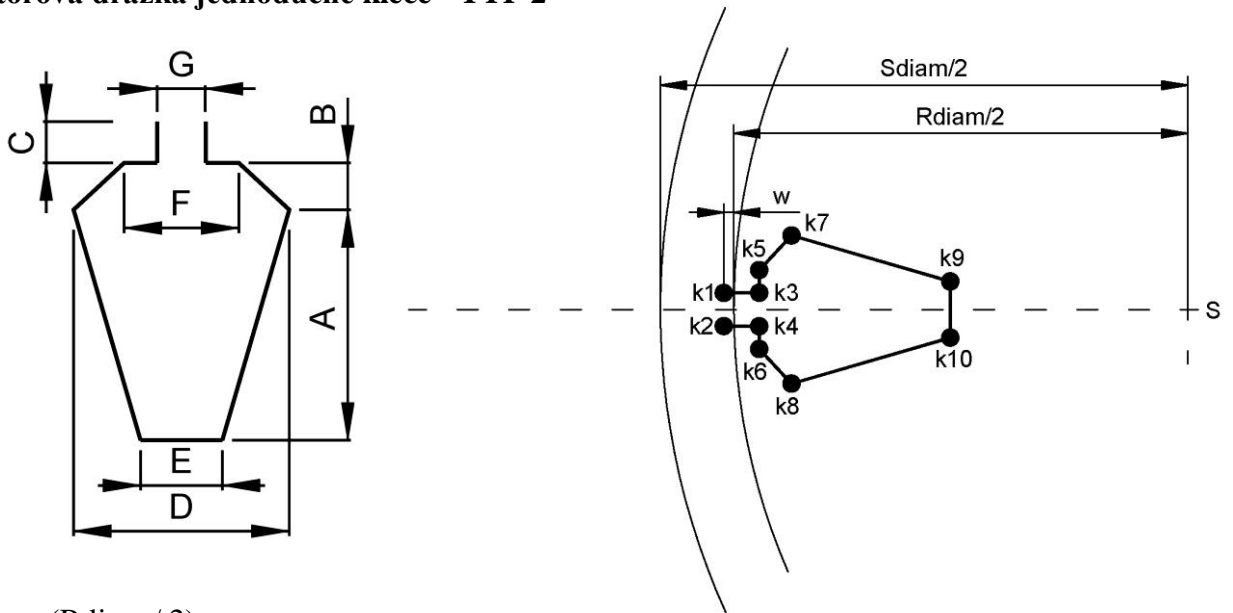
$$k7y = B / 2$$

$$k8x = -(Rdiam / 2) + D + C$$

$$k8y = -B / 2$$

Příloha 4

Rotorová drážka jednoduché klece - TYP 2



$$k1x = -(Rdiam / 2) - w$$

$$k1y = G / 2$$

$$k2x = -(Rdiam / 2) - w$$

$$k2y = -G / 2$$

$$k3x = -(Rdiam / 2) + C$$

$$k3y = G / 2$$

$$k4x = -(Rdiam / 2) + C$$

$$k4y = -G / 2$$

$$k5x = -(Rdiam / 2) + C$$

$$k5y = F / 2$$

$$k6x = -(Rdiam / 2) + C$$

$$k6y = -F / 2$$

$$k7x = -(Rdiam / 2) + B + C$$

$$k7y = D / 2$$

$$k8x = -(Rdiam / 2) + B + C$$

$$k8y = -D / 2$$

$$k9x = -(Rdiam / 2) + B + C + A$$

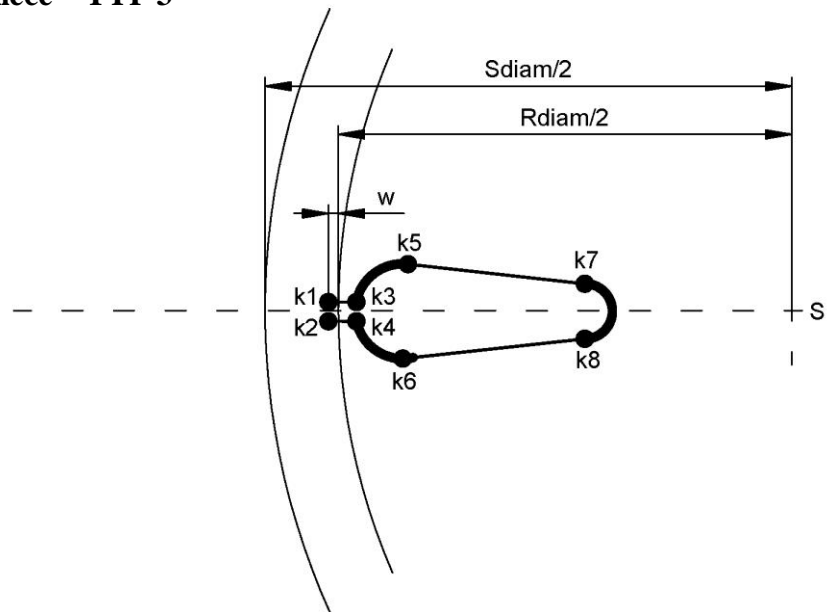
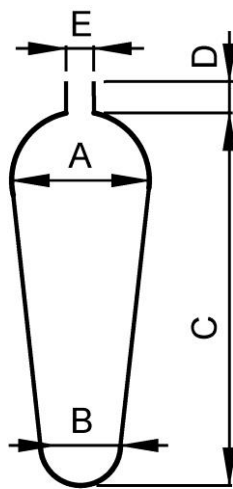
$$k9y = E / 2$$

$$k10x = -(Rdiam / 2) + B + C + A$$

$$k10y = -E / 2$$

Příloha 5

Rotorová drážka jednoduché klece – TYP 3



$$Rk1x = -(Rdiam / 2) - w$$

$$Rk1y = E / 2$$

$$Rk2x = -(Rdiam / 2) - w$$

$$Rk2y = -E / 2$$

$$Rk3x = -(Rdiam / 2) + D + (A / 4)$$

$$Rk3y = E / 2$$

$$Rk4x = -(Rdiam / 2) + D + (A / 4)$$

$$Rk4y = -E / 2$$

$$Rk5x = -(Rdiam / 2) + D + (A / 2)$$

$$Rk5y = A / 2$$

$$Rk6x = -(Rdiam / 2) + D + (A / 2)$$

$$Rk6y = -A / 2$$

$$Rk7x = -(Rdiam / 2) + D + C - (B / 2)$$

$$Rk7y = B / 2$$

$$Rk8x = -(Rdiam / 2) + D + C - (B / 2)$$

$$Rk8y = -B / 2$$

$$SAx = -(Rdiam / 2) + D + (A / 2)$$

$$SAy = 0$$

$$SBx = -(Rdiam / 2) + D + C - (B / 2)$$

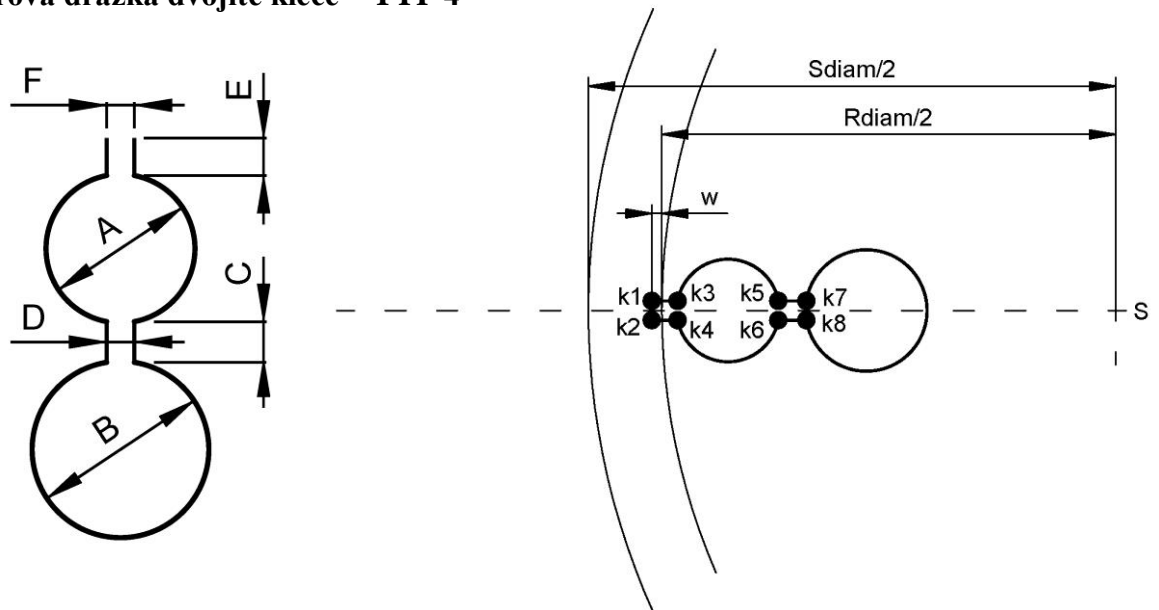
$$SB_y = 0$$

'střed kružnice A

'střed kružnice B

Příloha 6

Rotorová drážka dvojitě klece – TYP 4



$$Rk1x = -(Rdiam / 2) - w$$

$$Rk1y = F / 2$$

$$Rk2x = -(Rdiam / 2) - w$$

$$Rk2y = -F / 2$$

$$Rk3x = -(Rdiam / 2) + E + (A / 4)$$

$$Rk3y = F / 2$$

$$Rk4x = -(Rdiam / 2) + E + (A / 4)$$

$$Rk4y = -F / 2$$

$$Rk5x = -(Rdiam / 2) + E + A - (A / 4)$$

$$Rk5y = D / 2$$

$$Rk6x = -(Rdiam / 2) + E + A - (A / 4)$$

$$Rk6y = -D / 2$$

$$Rk7x = -(Rdiam / 2) + E + A + C + (B / 4)$$

$$Rk7y = D / 2$$

$$Rk8x = -(Rdiam / 2) + E + A + C + (B / 4)$$

$$Rk8y = -D / 2$$

$$SAx = -(Rdiam / 2) + E + (A / 2)$$

'střed kružnice A

$$SAy = 0$$

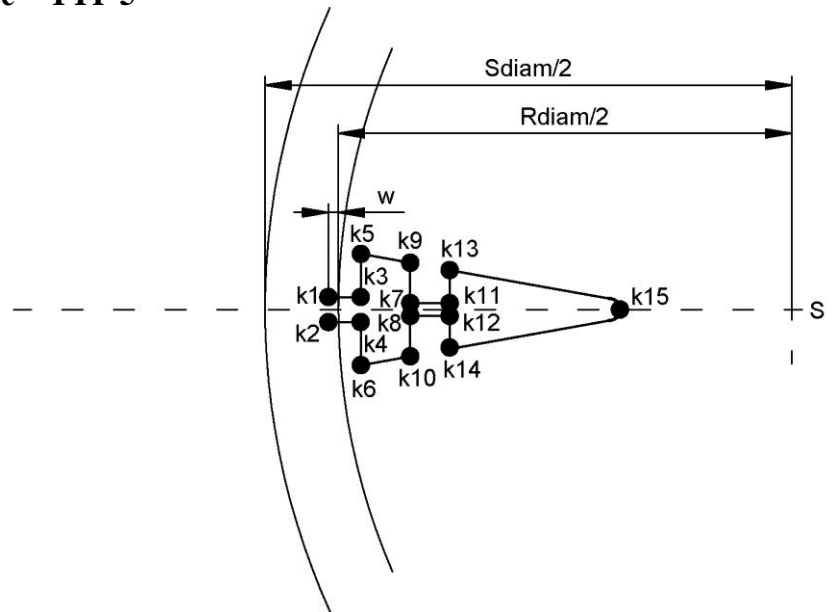
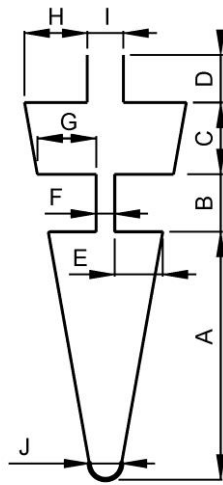
$$SBx = -(Rdiam / 2) + E + A + C + (B / 2)$$

'střed kružnice B

$$SB_y = 0$$

Příloha 7

Rotorová drážka dvojitě klece – TYP 5



$$Rk1x = -(Rdiam / 2) - w$$

$$Rk1y = I / 2$$

$$Rk2x = -(Rdiam / 2) - w$$

$$Rk2y = -I / 2$$

$$Rk3x = -(diam / 2) + D$$

$$Rk3y = I / 2$$

$$Rk4x = -(Rdiam / 2) + D$$

$$Rk4y = -I / 2$$

$$Rk5x = -(Rdiam / 2) + D$$

$$Rk5y = (I / 2) + H$$

$$Rk6x = -(Rdiam / 2) + D$$

$$Rk6y = -(I / 2) - H$$

$$Rk7x = -(Rdiam / 2) + D + C$$

$$Rk7y = F / 2$$

$$Rk8x = -(Rdiam / 2) + D + C$$

$$Rk8y = -F / 2$$

$$Rk9x = -(Rdiam / 2) + D + C$$

$$Rk9y = (F / 2) + G$$

$$Rk10x = -(Rdiam / 2) + D + C$$

$$Rk10y = -(F / 2) - G$$

$$Rk11x = -(Rdiam / 2) + D + C + B$$

$$Rk11y = F / 2$$

$$Rk12x = -(Rdiam / 2) + D + C + B$$

$$Rk12y = -F / 2$$

$$Rk13y = (F / 2) + E$$

$$Rk13x = -(Rdiam / 2) + D + C + B$$

$$Rk14x = -(Rdiam / 2) + D + C + B$$

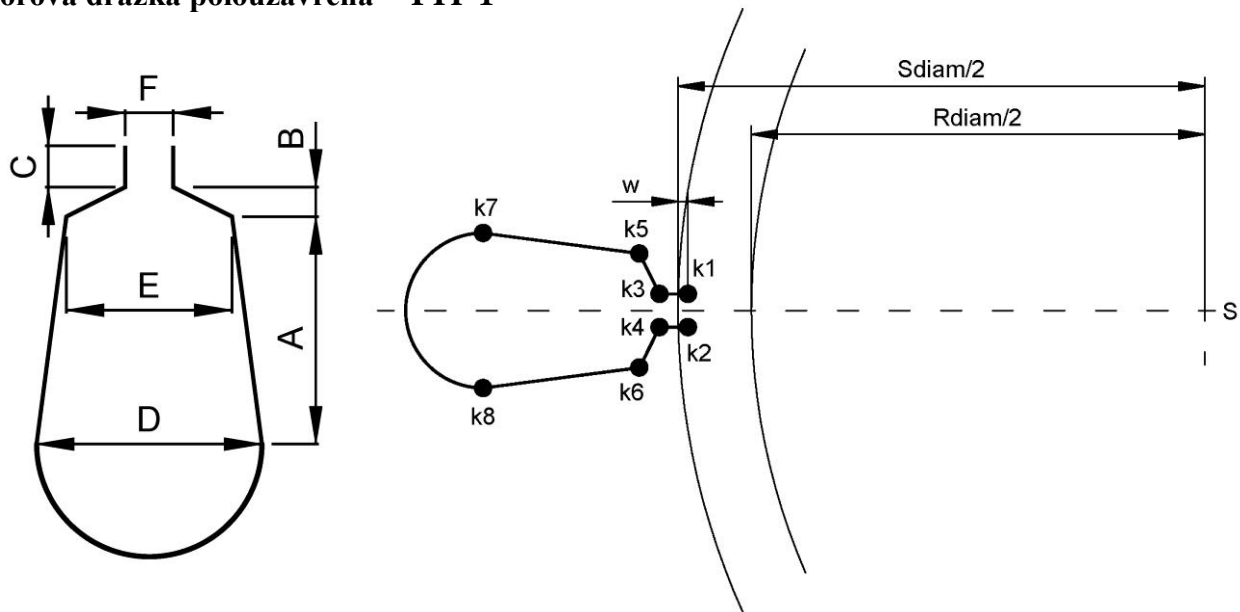
$$Rk14y = -(F / 2) - E$$

$$Rk15x = -(Rdiam / 2) + D + C + B + A$$

$$Rk15y = 0$$

Příloha 8

Statorová drážka polouzavřená – TYP 1



$$Sk1x = -(Sdiam / 2) + w$$

$$Sk1y = F / 2$$

$$Sk2x = -(Sdiam / 2) + w$$

$$Sk2y = -F / 2$$

$$Sk3x = -(Sdiam / 2) - C$$

$$Sk3y = F / 2$$

$$Sk4x = -(Sdiam / 2) - C$$

$$Sk4y = -F / 2$$

$$Sk5x = -(Sdiam / 2) - C - B$$

$$Sk5y = E / 2$$

$$Sk6x = -(Sdiam / 2) - C - B$$

$$Sk6y = -E / 2$$

$$Sk7x = -(Sdiam / 2) - C - B - A$$

$$Sk7y = D / 2$$

$$Sk8x = -(Sdiam / 2) - C - B - A$$

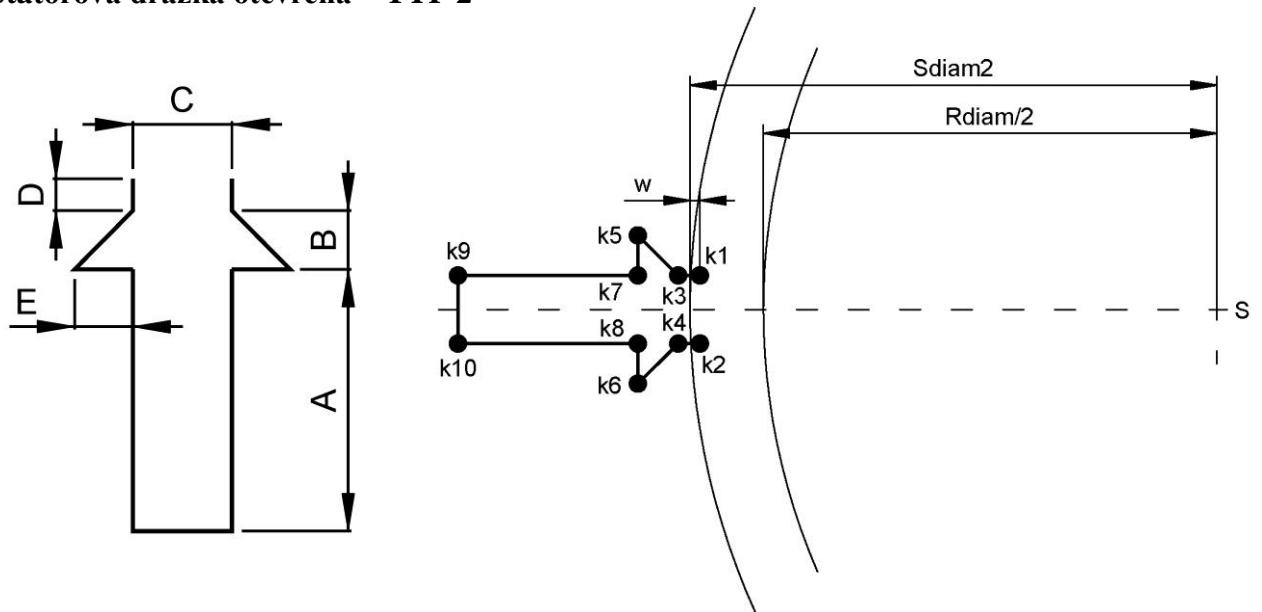
$$Sk8y = -D / 2$$

$$Sx = -(Sdiam / 2) - C - B - A$$

$$Sy = 0$$

Příloha 9

Statorová drážka otevřená – TYP 2



$$Sk1x = -(Sdiam / 2) + w$$

$$Sk1y = C / 2$$

$$Sk2x = -(Sdiam / 2) + w$$

$$Sk2y = -C / 2$$

$$Sk3x = -(Sdiam / 2) - D$$

$$Sk3y = C / 2$$

$$Sk4x = -(Sdiam / 2) - D$$

$$Sk4y = -C / 2$$

$$Sk5x = -(Sdiam / 2) - D - B$$

$$Sk5y = (C / 2) + E$$

$$Sk6x = -(Sdiam / 2) - D - B$$

$$Sk6y = -(C / 2) - E$$

$$Sk7x = -(Sdiam / 2) - D - B$$

$$Sk7y = C / 2$$

$$Sk8x = -(Sdiam / 2) - D - B$$

$$Sk8y = -C / 2$$

$$Sk9x = -(Sdiam / 2) - D - B - A$$

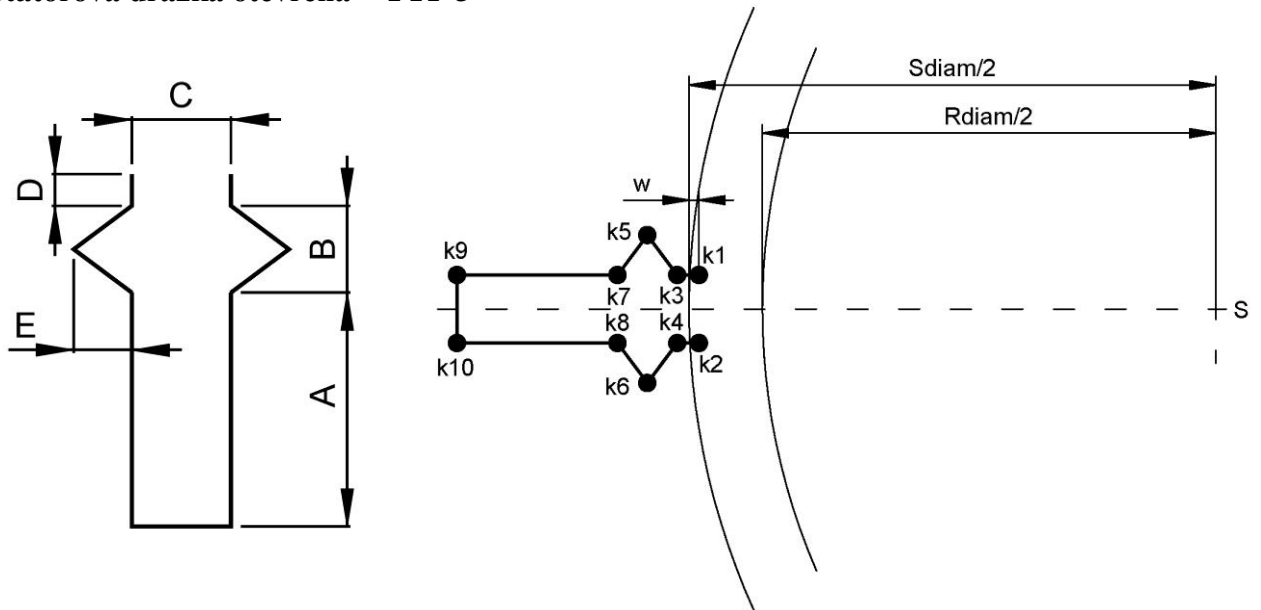
$$Sk9y = C / 2$$

$$Sk10x = -(Sdiam / 2) - D - B - A$$

$$Sk10y = -C / 2$$

Příloha 10

Statorová drážka otevřená – TYP 3



$$Sk1x = -(Sdiam / 2) + w$$

$$Sk1y = C / 2$$

$$Sk2x = -(Sdiam / 2) + w$$

$$Sk2y = -C / 2$$

$$Sk3x = -(Sdiam / 2) - D$$

$$Sk3y = C / 2$$

$$Sk4x = -(Sdiam / 2) - D$$

$$Sk4y = -C / 2$$

$$Sk5x = -(Sdiam / 2) - D - (B / 2)$$

$$Sk5y = (C / 2) + E$$

$$Sk6x = -(Sdiam / 2) - D - (B / 2)$$

$$Sk6y = -(C / 2) - E$$

$$Sk7x = -(Sdiam / 2) - D - B$$

$$Sk7y = C / 2$$

$$Sk8x = -(Sdiam / 2) - D - B$$

$$Sk8y = -C / 2$$

$$Sk9x = -(Sdiam / 2) - D - B - A$$

$$Sk9y = C / 2$$

$$Sk10x = -(Sdiam / 2) - D - B - A$$

$$Sk10y = -C / 2$$