

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

SIMULOVÁNÍ MODELŮ ELEKTROMAGNETICKÝCH POLÍ V ELEKTRICKÝCH STROJÍCH

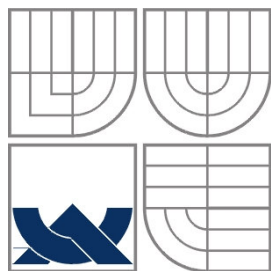
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

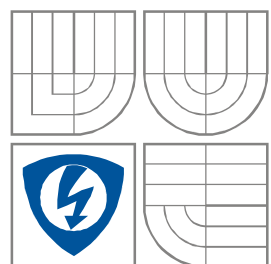
Petr Michailidis

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLÓGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

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

SIMULOVÁNÍ MODELŮ ELEKTROMAGNETICKÝCH POLÍ V ELEKTRICKÝCH STROJÍCH

MODEL'S SIMULATION OF ELECTROMAGNETICS FIELDS IN ELECTRIC MACHINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Michailidis

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marcel Janda

BRNO, 2008

LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Petr Michailidis

Bytem: nádražní 495, Moravský Beroun, 793 05

Narozen/a (datum a místo): 22.5.1985, Bruntál

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

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

elektrotechnika a elektroenergetika

(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

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

disertační práce

diplomová práce

bakalářská práce

jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Simulování elektromagnetických polí v elektrických strojích

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Marcel Janda

Ústav: Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v*:

tištěné formě – počet exemplářů 1

elektronické formě – počet exemplářů 1

* hodící se zaškrtněte

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

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

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

Článek 3

Závěrečná ustanovení

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

V Brně dne: 17.6.2008

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt

Tento projekt se zabývá možnostmi simulace elektromagnetických polí v elektrických strojích. Stěžejní metodou je metoda konečných prvků. Náplní projektu je vytvoření modelu a elektromagnetická simulace asynchronního stroje.

Klíčová slova

asynchronní stroj; Ansys; konečnoprvková síť; magnetická indukce; magnetická intenzita; Matlab; metoda konečných prvků; vinutí; uzel

Abstract

This project is dealing with simulation's possibilities of electromagnetic fields in electric machines. A finite element method is the final element technique. The content of this project is a model creation and electromagnetic simulation of asynchronous machine.

Keywords

Asynchronous Machine; Ansys; Field Intensity; Finite Element Method; Flux Density; Matlab; Mesh; Node; Winding

Bibliografická citace

Michailidis, Petr. Simulace elektromagnetických polí v elektrických strojích. Brno: FEKT VUT v Brně, 2008 54 s.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Simulace elektromagnetických polí v elektrických strojích jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne 17.6.2008

Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Marcelu Jandovi a panu Ing. Radku Vlachovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 17.6.2008

Podpis autora



Obsah:

OBSAH:.....	1
SEZNAM OBRÁZKŮ:.....	3
SEZNAM ROVNIC:	4
SEZNAM TABULEK:	5
ÚVOD	6
1 ŘEŠENÍ ELEKTROMAGNETICKÝCH POLÍ.....	7
1.1 METODA HRANIČNÍCH PRVKŮ.....	8
1.2 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ.....	8
1.2.1 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ V PRAXI	9
1.3 METODA KONEČNÝCH DIFERENCÍ (METODA SÍTÍ).....	10
2 MAGNETISMUS	10
2.1 MAGNETICKÉ POLE	10
2.1.1 MAGNETICKÉ INDUKČNÍ ČÁRY	11
2.2 MAXWELLOVY ROVNICE	12
2.2.1 GAUSSŮV ZÁKON PRO ELEKTRICKÉ POLE.....	12
2.2.2 GAUSSŮV ZÁKON PRO MAGNETICKÉ POLE	12
2.2.3 FARADAYŮV ZÁKON	13
2.2.4 AMPÉRŮV-MAXWELLŮV ZÁKON	13
2.3 MAGNETICKÁ INDUKCE	13
2.3.1 FLEMINGOVO PRAVIDLO LEVÉ RUKY	15
2.4 MAGNETICKÁ SÍLA	16
2.5 MOMENT SÍLY PŮSOBÍCÍ NA PROUDOVOU SMYČKU	18
2.5.1 PRAVIDLO PRAVÉ RUKY	18
3 ELEKTRICKÉ STROJE.....	19
3.1 DĚLENÍ ELEKTRICKÝCH STROJŮ.....	19
3.2 ASYNCHRONNÍ STROJE	20
3.2.1 VÝZNAM A POUŽITÍ.....	20
3.2.2 PRINCIP ČINNOSTI ASYNCHRONNÍHO STROJE (AS).....	20
3.2.3 ROZDĚLENÍ ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ (DÁLE JEN AM)	24
3.2.4 NÁHRADNÍ SCHÉMA ASYNCHRONNÍHO MOTORU.....	25
3.2.5 AM PŘI CHODU NAPRÁZDNO ($s \rightarrow 0$)	28
3.2.6 AM VE STAVU NAKRÁTKO ($s = 1$)	28
3.2.7 STANOVENÍ HYSTEREZÍCH ZTRÁT V ROTORU ASYNCHRONNÍHO STROJE.....	28
4 MĚŘENÍ MAGNETICKÉ INDUKCE NA POVRCHU KOSTRY STROJE.....	31
4.1 PŘÍKAZOVÝ ŘÁDEK	31
4.2 TABULKY NAMĚŘENÝCH A VYPOČTENÝCH HODNOT.	33
4.3 GRAFY NAMĚŘENÝCH HODNOT.	34



5 PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ	36
5.1 AUTODESK INVENTOR	36
5.1.1 PRACOVNÍ PROSTŘEDÍ.....	36
5.1.2 KONCEPCE NÁČRTU	37
5.1.3 KONSTRUKČNÍ PRVKY.....	38
5.1.4 SESTAVY.....	39
5.2 ANSYS.....	40
5.2.1 ANSYS MULTIPHYSICS, ELECTROMAGNETICS.....	40
5.2.2 ANSYS WORKBENCH	42
5.3 PŘENOS GEOMETRIE	43
5.3.1 MODELY PŘENOSU GEOMETRIE Z CAD SYSTÉMŮ, (V SOFTWARE ANSYS)	43
6 SIMULACE (ANSYS WORKBENCH).....	44
6.1 TECHNICKÉ PARAMETRY STROJE	44
6.2 TVORBA MODELU	44
6.3 IMPORT MODELU A VYTVOŘENÍ VINUTÍ.....	46
6.4 OBJEKT PRO OKRAJOVOU PODMÍNKU	47
6.5 VÝPOČETNÍ SÍŤ.....	48
6.6 NASTAVENÍ SIMULACE	49
6.6.1 B-H KŘIVKA.....	49
6.7 VÝSLEDKY SIMULACE	50
7 ZÁVĚR	53
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY:	54



Seznam obrázků:

Obrázek 1.1 Mesh and Nodes	7
Obrázek 2.1 Magnetické indukční čáry permanentního magnetu	11
Obrázek 2.2 Magnetická indukce.....	15
Obrázek 2.3 Magnetická síla závislá přímo úměrně na proud vodičem.....	16
Obrázek 2.4 Magnetická síla závislá přímo úměrně na délce vodiče.....	17
Obrázek 3.1 Blokové schéma dělení elektrických strojů.....	19
Obrázek 3.2 Časový průběh trojfázového harmonického proudu	21
Obrázek 3.3 Vznik točivého magnetického pole trojfázového vinutí statoru a vznik momentu AS	22
Obrázek 3.4 Svorkovnice asynchronního motoru	25
Obrázek 3.5 Náhradní schéma jedné fáze asynchronního motoru: a) úplné, b) zjednodušené	26
Obrázek 3.6 Mechanický a elektrický příkon v závislosti na skluzu.....	30
Obrázek 4.1 Magnetická indukce na vrchní straně kostry	34
Obrázek 4.2 Magnetická indukce na boční straně kostry	35
Obrázek 4.3 Magnetická indukce na čelní straně kostry	35
Obrázek 6.1 Kompletní sestava stroje – řez.....	45
Obrázek 6.2 Konečný model stroje pro import.....	45
Obrázek 6.3 Model stroje s vloženým vinutím.....	46
Obrázek 6.4 Vzduch vyplňující zbývající prostor okolo jednotlivých součástí.....	47
Obrázek 6.5 Výpočetní síť na pomocném modelu stroje.....	48
Obrázek 6.6 B-H křivka.....	49
Obrázek 6.7 Rozložení hustoty magnetické indukce	50
Obrázek 6.8 Detail rozložení hustoty magnetické indukce	50
Obrázek 6.9 Rozložení intenzity magnetického pole ve vzduchové mezeře.....	51
Obrázek 6.10 Detail rozložení intenzity magnetického pole ve vzduchové mezeře	51
Obrázek 6.11 Vektorové rozložení hustoty magnetické indukce.....	52



Seznam rovnic:

<i>[Rovnice 1 Gaussův zákon pro elektrické pole]</i>	12
<i>[Rovnice 2 Gaussův zákon pro magnetické pole]</i>	12
<i>[Rovnice 3 Faradayův zákon]</i>	13
<i>[Rovnice 4 Ampérův-Maxwellův zákon]</i>	13
<i>[Rovnice 5 Magnetická indukce]</i>	13
<i>[Rovnice 6 Magnetická síla]</i>	17
<i>[Rovnice 7 Magnetická síla elementem ds]</i>	17
<i>[Rovnice 8 Moment síly působící na cívku proudem]</i>	18



Seznam tabulek:

<i>Tabulka č. 4-1 Naměřené hodnoty magnetické indukce na vrchní straně kostry stroje.</i>	<i>33</i>
<i>Tabulka č. 4-2 Naměřené hodnoty magnetické indukce na čelní straně kostry stroje.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabulka č. 4-3 Naměřené hodnoty magnetické indukce na boční straně kostry stroje.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabulka č. 6-1 B-H křivka</i>	<i>49</i>



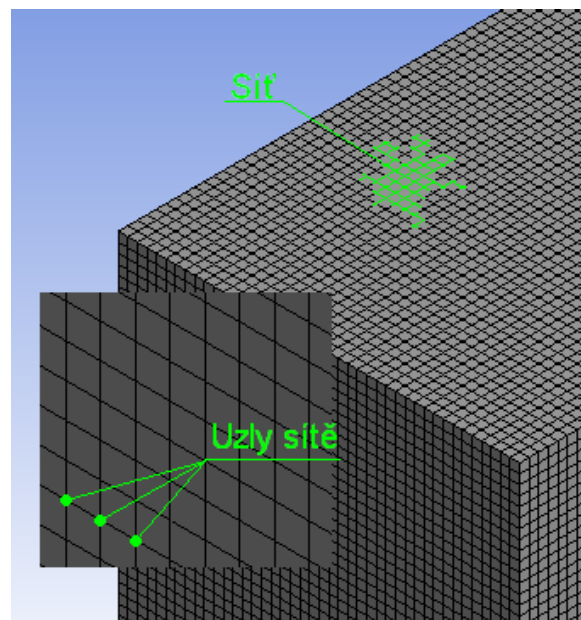
Úvod

V dnešní době, kdy různá odvětví elektroniky zažívají obrovský rozvoj, vzniká velké množství prototypů různých strojů a zařízení, jejichž výroba a vývoj je velice nákladný. Proto s rozvojem výpočetní elektroniky se přechází od výroby prototypů k jejich prvotní simulaci, za pomoci některých simulačních programů. Tento proces zmírní finanční náklady na vývoj a výzkum nového stroje.

Výroba a přenos elektrické energie by nebyla možná bez elektrických strojů, jako jsou alternátory, turbogenerátory a v neposlední řadě transformátory, popřípadě jiné stroje. Při výrobě elektrické energie v elektrárnách, je zapotřebí mechanickou energii, získanou větrem, spalováním paliva, štěpením či fúzí, přeměnit na energii elektrickou. Tato přeměna se děje za pomoci generátorů. Naopak elektrická energie se v mnoha případech používá také k přeměně na energii mechanickou, ke které dojde za pomoci různých motorů. Jsou zde i zařízení která přeměňují elektrickou energii na elektrickou energii o jiných parametrech. Tyto zařízení se nazývají transformátory a měniče. Tento semestrální projekt se zabývá simulací elektrických strojů metodou konečných prvků, která je implementována v programu ANSYS®.

1 ŘEŠENÍ ELEKTROMAGNETICKÝCH POLÍ

Pro výpočet rozložení elektromagnetického pole se v praxi používají numerické metody. S nástupem moderní výpočetní techniky se používají profesionální programy určené k těmto výpočtům. Jednotlivé programy využívají různé numerické metody řešení výpočtu to sice metody *hraničních prvku, konečných prvků a konečných diferencí*. Pro elektromagnetické výpočty je stěžejní metoda konečných prvků, kterou používá i většina programů Na tyto programy jsou kladeny vysoké nároky, jak z hlediska pořizovacích nákladů(vysoká cena) tak z hlediska velikosti paměti používaného počítačem. Tento faktor je ještě vyšší s příchodem řešení úlohy v třetím rozměru(3-D). Důležitá je také přesnost výpočtu, jenž je dána počtem uzlů (NODy), ve kterých dochází k výpočtu. Uzly jsou místa kde dojde ke křížení čar sítě(MESH).viz obrázek č. 1.1 Mesh and Nodes



Obrázek 1.1 Mesh and Nodes



1.1 Metoda hraničních prvků

Metoda hraničních prvků se začala rozvíjet především v souvislosti s potřebou snížit dimenzi výsledné soustavy rovnic, která byla výsledkem aplikace metody konečných prvků, a to především v případě prostorových modelů. Hlavní výhodou této metody je totiž snížení dimenze úlohy o jedničku, neboť se diskretizuje nikoliv celá uvažovaná oblast, ale pouze její hranice. Na každém hraničním prvku se aproximuje přesné řešení úlohy z uzlových bodů pomocí interpolačních funkcí. Po vyřešení odpovídající soustavy rovnic pro neznámé hodnoty na hranicích oblasti se odpovídající hodnoty uvnitř oblasti stanoví analyticky na základě tzv. fundamentálního řešení. Výhodou této metody je možnost úlohu řešit v prostorově neomezených polích, což v metodě konečných prvků divergovalo ke špatnému výsledku, nebo by byla nedostačující operační paměť příslušného počítače. Nevýhodami této metody je především nutnost znalosti fundamentálního řešení a dále nutný předpoklad homogenního prostředí uvnitř modelované oblasti. V souvislosti s rozvojem stále výkonnější výpočetní techniky se tato metoda dostává poněkud do pozadí

1.2 Metoda konečných prvků

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

Stěžejním problémem při určování elektrodynamických sil je výpočet elektromagnetického pole. Analyticky se tento úkol provádí velmi obtížně. Základním matematickým aparátem jsou i v tomto případě Maxwellovy rovnice, jejichž řešení však probíhá numericky pomocí výpočetní techniky. Výsledkem řešení není jen jedna hodnota fyzikální veličiny (elektromagnetická



indukce, intenzita), ale rozložení elektromagnetického pole na celé oblasti modelu. Tím lze získat mnohem ucelenější představu, a odhalit jinak skryté souvislosti.

1.2.1 Metoda konečných prvků v praxi

Metoda konečných prvků je vhodná pro řešení úloh s velikou složitostí jednotlivých prvků sestavy, kde lze v kritických oblastech vytvořit jemnější (detailnější) síť. Program, který je využit pro analýzu zadané úlohy, se nazývá Ansys.

Analýza v programu *ANSYS* je rozdělena do tří stěžejních bodů:

- **PreProcessing**

V této fázi dochází k vytváření modelu a definici jeho geometrických rozměrů. Následuje volba materiálových vlastností a generování výpočetní sítě. Většinou se zde aplikují i okrajové podmínky (kolmost a rovnoběžnost magnetických toků, neohraničenost okolního prostoru) a zatížení (úbytek napětí, proud, proudová hustota). Model může být jedno, dvou či trojrozměrný (1D, 2D, 3D).

- **Solution**

Zde probíhá volba typu analýzy (statická, harmonická, transientní), výběr "řešiče" optimalizovaného pro dané fyzikální pole a nastavení požadované přesnosti. Podle typu analýzy se pak volí výpočetní časy či frekvence, způsob zápisu a tisku výsledků atd. Ve většině výpočetních programů je tato část plně automatizována.

- **PostProcessing**

V této závěrečné části se provádí vyhodnocení řešené úlohy. K dispozici bývá několik možností grafické interpretace výsledků, z nichž nejpoužívanější je zobrazení mapy elektromagnetického pole, či vynesení závislosti elektromagnetických veličin (na čase, rozměru, teplotě, rychlosti a pod.)



1.3 Metoda konečných diferencí (metoda sítí)

Podstatou metody konečných diferencí je pokrytí oblasti, v níž hledáme řešení diferenciální rovnice, sítí, která se skládá z konečného počtu uzlových bodů. V každém bodě sítě se nahradí derivace v těchto uzlových bodech příslušnými diferencemi, tj. lineárními kombinacemi funkčních hodnot v okolních bodech. V závislosti na tom, zda volíme diference dopředné (přímé) či zpětné, dostáváme různé typy metody sítí (metody explicitní, implicitní). Po záměně derivací diferencemi ve všech uzlových bodech dostáváme soustavu lineárních algebraických rovnic s neznámými hodnotami v těchto uzlových bodech

2 MAGNETISMUS

2.1 Magnetické pole

V přírodě lze nalézt určité látky, mezi kterými působí určité síly, které se označují jako magnetické síly. Tyto síly lze (na makroskopické úrovni) pozorovat i tehdy, když u nich nelze pozorovat žádný makroskopický pohyb elektrických nábojů. Takové látky se označují jako magnetické látky. O tělesech, které vykazují magnetické vlastnosti, říkáme, že jsou zmagnetované popř. je označujeme jako (*permanentní*) magnety.

Magnetické pole je fyzikální pole, jehož zdrojem je pohybující se elektrický náboj (tedy elektrický proud). Magnetické pole lze tedy pozorovat kolem elektrických vodičů, kde je zdrojem volný elektrický proud, ale také kolem tzv. permanentních magnetů, kde jsou zdrojem pole vázané elektrické proudy. Magnetické pole může být také vyvoláno změnami elektrického pole.

Magnetické pole je částí elektromagnetického pole. Vztah mezi magnetickým a elektrickým polem popisují Maxwellovy rovnice.

Homogenní magnetické pole je pole, které je možné modelovat pomocí dvou nesouhlasných rozlehlých pólů magnetu v malé vzdálenosti od sebe. Vektory magnetické indukce (a tedy i magnetické indukční čáry) jsou navzájem rovnoběžné.

Jedná se opět pouze o idealizaci, skutečná magnetická pole jsou nehomogenní. Nehomogenity vznikají zejména na okrajích pole tzn., že magnetické indukční čáry přestávají být navzájem rovnoběžné.

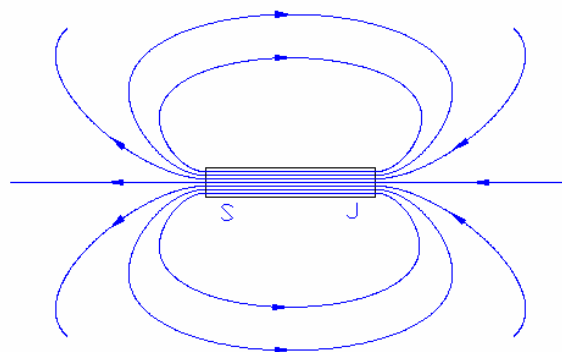
Rozdělení:

Podle závislosti na čase lze magnetické pole rozdělit na

- **nestacionární magnetické pole** - obecné, časově proměnné magnetické pole
- **stacionární magnetické pole** - časově neproměnné magnetické pole
 - **magnetostatické pole** - speciální případ stacionárního pole (tedy časově neměnného pole), v němž se nevyskytují volné elektrické proudy

2.1.1 Magnetické indukční čáry

Tvar magnetického pole lze popsat magnetickými indukčními čarami. Jsou to uzavřené neprotínající se orientované křivky, jejichž tečna v daném bodě má směr osy magnetky, která je umístěna v tomto bodě. V magnetu jsou indukční čáry orientovány od *severního pólu* k *jižnímu*, uvnitř magnetu naopak. (viz Obr. 2.1)



Obrázek 2.1 Magnetické indukční čáry permanentního magnetu



2.2 Maxwellovy rovnice

Tyto čtyři rovnice vysvětlují všechny kategorie elektromagnetických jevů. Jsou teoretickým základem pro vysvětlení funkce elektromagnetických zařízení, jako jsou například elektromotory, cyklotrony, radary, mikrovlnné trouby, televizní přijmače a vysílače.

Maxwellovy rovnice jsou fundamentální rovnice pro elektromagnetické pole. Může se z nich odvodit všechny rovnice, které popisují elektrické, magnetické nebo elektromagnetické pole.

2.2.1 Gaussův zákon pro elektrické pole

Vyjadřuje souvislost mezi tokem intenzity elektrického pole E uzavřenou plochou a celkovým elektrickým nábojem uvnitř této plochy.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad [\text{Rovnice 1 Gaussův zákon pro elektrické pole}]$$

2.2.2 Gaussův zákon pro magnetické pole

Vyjadřuje poznatek, že tok magnetické indukce B libovolnou uzavřenou plochou je roven nule (tj. neexistuje magnetický náboj)

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad [\text{Rovnice 2 Gaussův zákon pro magnetické pole}]$$



2.2.3 Faradayův zákon

Vyjadřuje souvislost mezi cirkulací intenzity elektrického pole \vec{E} podél uzavřené orientované křivky a časovou změnou indukčního magnetického toku $\Phi_B = \int \vec{B} d\vec{S}$ plochou ohraničenou touto křivkou.

$$\oint \vec{E} * d\vec{S} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad [\text{Rovnice 3 Faradayův zákon}]$$

2.2.4 Ampérův-Maxwellův zákon

Vyjadřuje souvislost mezi cirkulací magnetické indukce \vec{B} podél uzavřené orientované křivky a časovou změnou toku elektrické intenzity $\Phi_E = \int \vec{E} d\vec{S}$ plochou ohraničenou touto křivkou a celkovým proudem procházejícím touto plochou.

$$\oint \vec{B} * d\vec{S} = \mu_0 \left(\varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} + I_C \right) \quad [\text{Rovnice 4 Ampérův-Maxwellův zákon}]$$

2.3 Magnetická indukce

Je to fyzikální veličina, která vyjadřuje silové účinky magnetického pole na částice s nábojem. Magnetická indukce je vektorová veličina.

Magnetická indukce B je definována pomocí síly F_B působící na zkušební částici s nábojem Q , která se pohybuje rychlostí v v magnetickém poli:

$$\vec{F}_B = Q\vec{v} * \vec{B} \quad [\text{Rovnice 5 Magnetická indukce}]$$

Jednotkou B v soustavě SI je tesla [T]: $1\text{T}=1\text{NA}^{-1}\text{m}^{-1}$

(Nikola Tesla - chorvatský elektrotechnik žijící v Americe, který proslul vynálezy v oblasti elektrického inženýrství, elektrických strojů a vysokých frekvencí.)



Jednotka tesla je poměrně velká, velikost magnetické indukce permanentního magnetu je řádově $10^{-2} - 10^{-1}\text{T}$, velikost magnetické indukce Země je v našich zeměpisných šířkách řádově 10^{-5}T . Ale pro laboratorní účely se konstruují elektromagnety, u nichž má magnetické pole velikost magnetické indukce velikosti řádově jednotek tesla.

Bude-li v homogenním magnetickém poli vodič kolmo k indukčním čarám tohoto pole, tak velikost magnetické síly je:

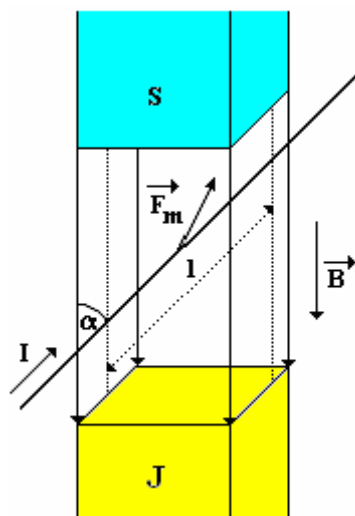
- přímo úměrná proudu I , který prochází vodičem
- přímo úměrná délce l části vodiče, která je v mg. poli (tzv. *aktivní délka*)

V uvažovaném případě tedy platí

$$F_m = B \cdot I \cdot l$$

kde veličina B má význam konstanty úměrnosti a charakterizuje silové působení magnetického pole na vodič s proudem. V homogenním magnetickém poli má stále stejnou velikost ($B=\text{konst.}$) a spolu se směrem magnetických indukčních čar určuje vektorovou veličinu \mathbf{B} - *magnetickou indukci*

Pokud by byl vodič umístěn do homogenního magnetického pole rovnoběžně s indukčními čarami, silové působení by nenastalo ($F_m=0$). Velikost magnetické síly závisí tedy na úhlu α , který svírá vodič s indukčními čarami magnetického pole: $F_m = BIl \sin \alpha$, kde $\alpha \in \langle 0; \pi \rangle$. Magnetická síla F_m je kolmá jak na vodič, tak na magnetickou indukci \mathbf{B} (a tedy i na magnetické indukční čáry) (viz obr. 2.2).



Obrázek 2.2 Magnetická indukce

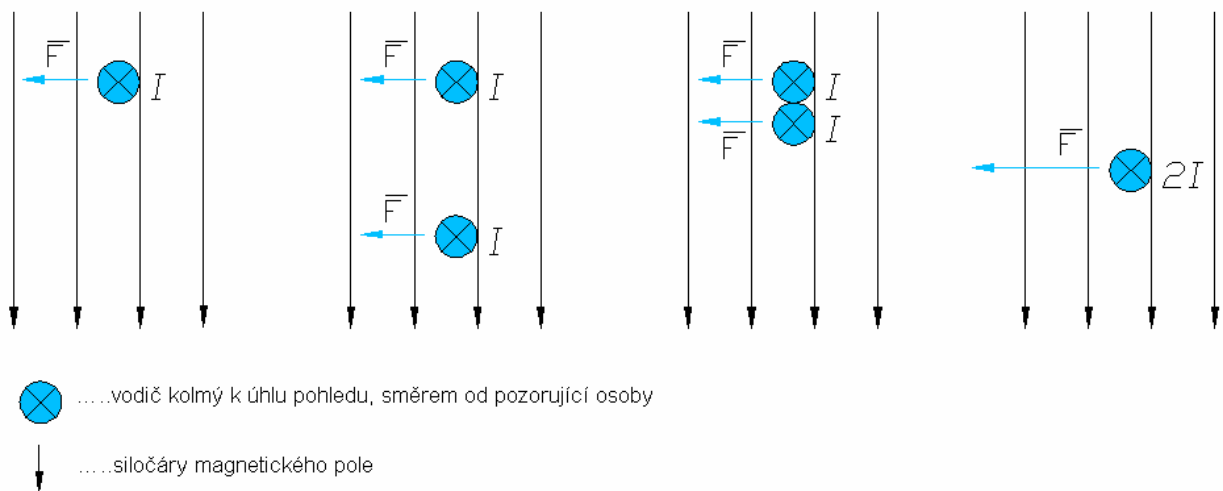
K určení jejího směru používáme Flemingovo pravidlo levé ruky

2.3.1 Flemingovo pravidlo levé ruky

Flemingovo pravidlo levé ruky umožňuje určit směr síly, kterou působí magnetické pole na vodič, který se v tomto poli nachází. Toto pravidlo říká, že pokud prsty ukazují směr proudu a indukční čáry vstupují do dlaně, pak palec ukazuje směr síly, kterou působí magnetické pole na vodič s proudem.

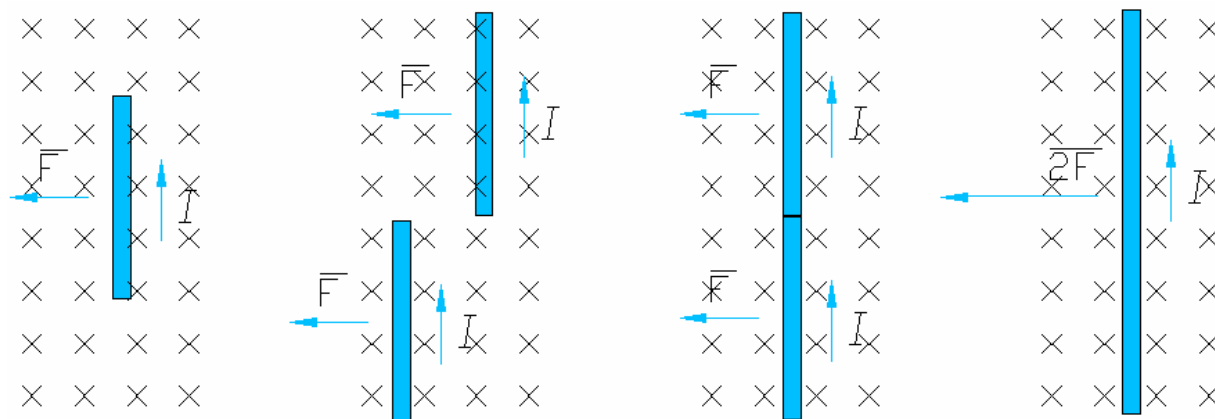
2.4 Magnetická síla

Na přímý vodič s proudem, umístěný kolmo na siločáry, v homogenním magnetickém poli působí síla. Kdyby byl vedle něj další jeden vodič, kterým bude protékat stejný proud, bude na tento vodič magnetické pole působit stejnou silou jako na vodič první. Kdyby byly vodiče v těsné blízkosti, pak na každý z nich bude působit stejná magnetická síla jako předtím, tedy síla působící na dva vodiče (umístěné v těsné blízkosti), dvojnásobná než předtím. Ale dva vodiče paralelně (vedle sebe) mohou být nahrazeny jedním vodičem, kterým poteče dvojnásobný proud (obr. 2.3). Magnetická síla se tedy při zdvojnásobení proudu zdvojnásobí - síla je přímo úměrná proudu.




Obrázek 2.3 Magnetická síla závislá přímo úměrně na proud vodičem

Dva vodiče jsou umístěny do magnetického pole, kterými prochází stejný proud. Na každý z nich působí stejná magnetická síla. Když budou umístěny za sebe (tím bude proud nezměněn), bude magnetická síla působící na jejich kombinaci dvakrát větší než síla působící na jednotlivé vodiče (Obr. 2.4). Tedy na dvojnásobně dlouhý



× × ...siločáry homogenního magnetického pole, směřující od pozorující osoby

vodič, protékaný proudem

Obrázek 2.4 Magnetická síla závislá přímo úměrně na délce vodiče.

Magnetická síla, nazývaná též jako síla Ampérová, je závislá přímo úměrně na délce vodiče. Pro vodič s proudem, který je kolmý k indukčním čarám, platí vztah

$$\vec{F}_B = I\vec{L} * \vec{B} \quad [\text{Rovnice 6 Magnetická síla}]$$

kde F_B je velikost síly působící na vodič, I je proud procházející vodičem, L je jeho délka a B je konstanta úměrnosti charakterizující "sílu magnetického pole". Je to fyzikální veličina nazývaná magnetická indukce. Její jednotkou je 1 T (tesla) (pojmenován po vynálezci Nikolovi Teslovi) Je to vektorová fyzikální veličina, má v každém bodě směr tečny k příslušné magnetické siločáře.

V homogenním magnetickém poli je velikost i směr magnetické indukce konstantní. Obvyklá velikost magnetické indukce v blízkosti permanentního magnetu je kolem 10^{-2} T až 10^{-1} T. Magnetické pole Země má velikost indukce kolem 10^{-5} T.

Síla, kterou působí magnetické pole o indukcii B na element ds vodiče protékaného proudem I , je:

$$d\vec{F}_B = I ds * \vec{B} \quad [\text{Rovnice 7 Magnetická síla elementem ds}]$$

Směr vektoru L , resp. ds , je souhlasný se směrem proudu I .

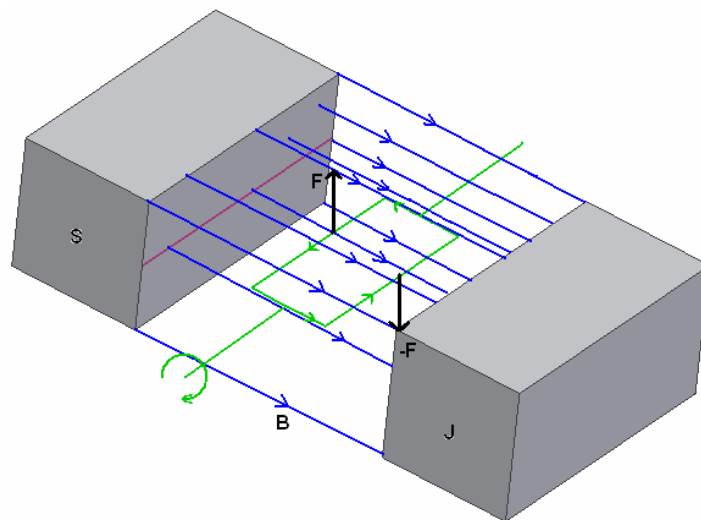
2.5 Moment síly působící na proudovou smyčku

Na cívku protékanou proudem I působí magnetické pole o indukci B momentem M :

$$\vec{M} = \mu * \vec{B} \quad [\text{Rovnice 8 Moment síly působící na cívku proudem}]$$

kde μ je magnetický dipólový moment cívky, jeho směr je dán pravidlem pravé ruky a velikost je $=NIS$, kde N je počet závitů cívky a S obsah plochy jednoho závitu.

Základní prvky elektrického motoru. Pravoúhlá smyčka protékaná proudem, volně otáčivá kolem pevné osy, se nachází v magnetickém poli. Komutátor (není zakreslen) mění směr proudu každou polovinu otáčky, takže silový moment má vždy tentýž směr.



Obrázek 2.5 Moment síly působící na proudovou smyčku,

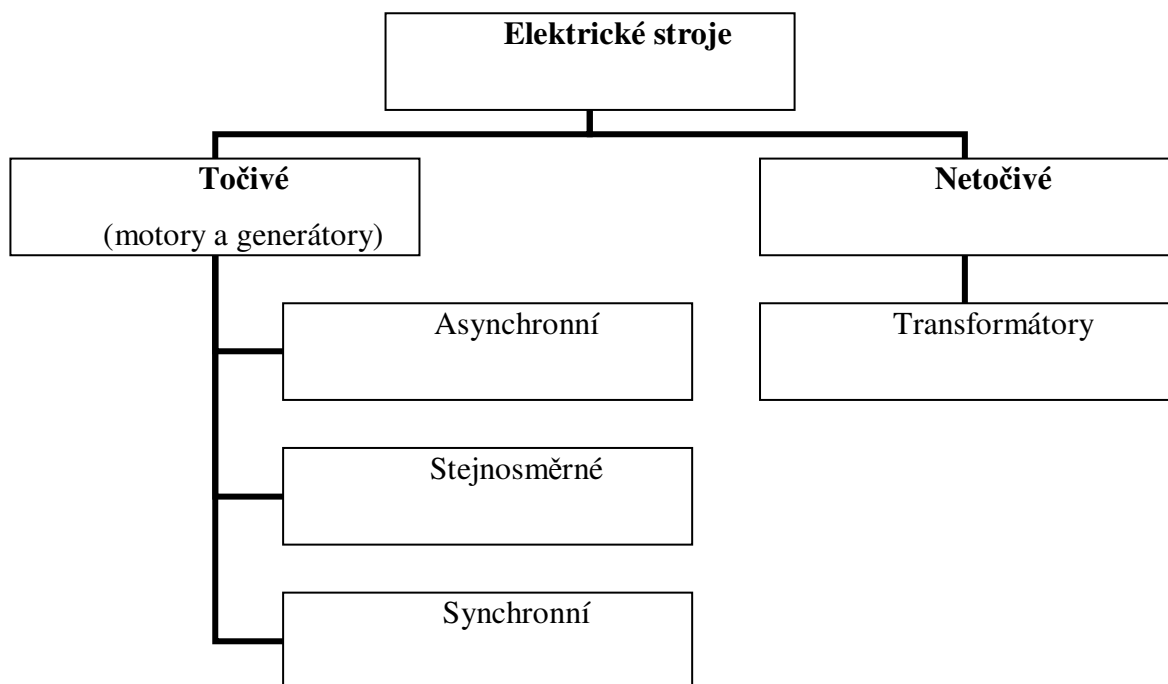
2.5.1 Pravidlo pravé ruky

Nebo též Ampérovo pravidlo je pravidlo udávající směr působení [magnetického pole](#) v okolí vodiče, kterým protéká [elektrický proud](#). Vloží-li pozorovatel pravou ruku na vodič tak, že prsty ukazují ve směru proudu a dlaň je odvrácena ke směru pozorování, potom palec ukazuje směr magnetického pole v daném bodě.

3 ELEKTRICKÉ STROJE

Jsou elektromechanická zařízení, sloužící k přeměně elektrické energie na mechanickou (případně opačně, točivé stroje), nebo elektrické energie opět na elektrickou, s jinými parametry.

3.1 Dělení elektrických strojů.



Obrázek 3.1 Blokové schéma dělení elektrických strojů

Činnost elektrických strojů je založena na elektromagnetické indukci a na využití silového působení magnetického pole na proudovou smyčku. Účinnost elektrických strojů ovlivňuje zejména výše ztrát v železe (hysterezi, vířivými proudy) a Jouleovy ztráty ve vinutí



3.2 Asynchronní stroje

3.2.1 Význam a použití

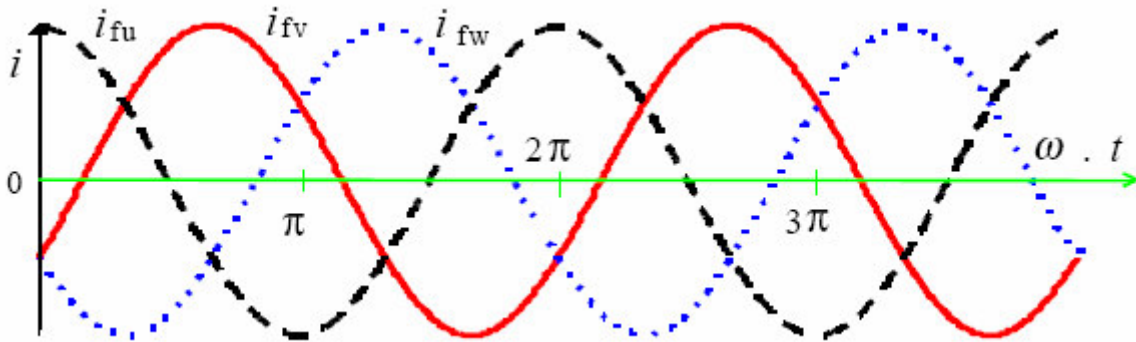
Asynchronní stroje se užívají nejčastěji jako motory. Jsou nejrozšířenějšími elektromotory vůbec a používají se k nejrůznějším pohonům proto, že jsou ze všech elektromotorů nejjednodušší a nejlacinější. Jsou rovněž provozně nejspolehlivější a vyžadují malou údržbu. Užívají se k pohonům zařízení jako jsou čerpadla, ventilátory, kompresory, pásové dopravníky, jeřáby, výtahy, obráběcí stroje, atd.

3.2.2 Princip činnosti asynchronního stroje (AS)

Princip činnosti AS je založen na vzájemném elektromagnetickém působení točivého magnetického pole statoru a proudů, vytvořených ve vinutí rotoru tímto magnetickým polem. AS je tedy založen na indukci napětí a proudů v rotoru a proto se také nazývá indukčním motorem. Točivé magnetické pole se u AS vytvoří ve vinutí statoru (pevná, nepohyblivá část stroje), které je nejčastěji provedeno jako trojfázové, kde vinutí jednotlivých fází jsou prostorově natočena o 120° a kterými protéká trojfázový harmonický proud.

Princip činnosti je zřejmý z obr.3.2 a 3.3. Pro jednoduchost je zde trojfázové vinutí uvažováno ve formě tří závitů, každý pro jednu fázi (označeny U, V, W). Proudy procházející jednotlivými závity vytvářejí magnetické pole s jedním severním a jižním pólem (jedná se tedy o dvojpólový motor). Na obr.3.2 v okamžiku t_1 ($\omega \cdot t_1 = 0$) má proud i_{fu} protékající fází U statorového vinutí maximální kladnou hodnotu, proudy i_{fv} , resp. i_{fw} ve fázích V a W poloviční velikost se zápornou polaritou. Výsledné magnetické pole $\Phi_{tot}(t_1)$ je dáno vektorovým součtem polí všech tří fází, vybuzenými příslušnými fázovými proudy a má v tomto okamžiku směr a orientaci jak je nakresleno na obr.3.3. V okamžiku t_2 ($\omega \cdot t_2 = \pi/3$) je proud i_{fw} ve fázi W maximální se zápornou polaritou, kdežto proudy ve zbývajících fázích U a V jsou kladné s poloviční velikostí, tak jak je to zřejmé z časového průběhu trojfázového harmonického proudu na obr.1. Výsledný magnetický tok $\Phi_{tot}(t_2)$, jak je vidět na obr.3.3, je vůči toku $\Phi_{tot}(t_1)$ posunutý o úhel 60° , tj. o stejný úhel o který se pootočily fázory proudů v jednotlivých fázích. Z toho je tedy zřejmé, že za dobu jedné periody střídavého harmonického proudu statoru se magnetické pole statoru otočí o 360° , tj. vykoná jednu otáčku. To znamená, že otáčky magnetického pole statoru n_{S1} dvojpólového AS (tzv. synchronní otáčky) jsou rovny frekvenci napájecího proudu statoru f_1 ($\Omega_{S1} = 2\pi \cdot n_{S1}$, $\Omega_{S1} = 2\pi \cdot f_1$). Obdobně lze dokázat, že v případě čtyřpólového AS se za stejnou dobu tj. za dobu jedné

periody střídavého harmonického proudu statoru magnetické pole otočí jen o 180° , tj. vykoná jen půl otáčky. Synchronní otáčky jsou tedy závislé i na počtu pólů stroje, resp. počtu pólových dvojic.



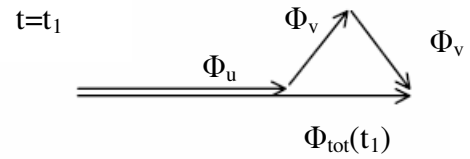
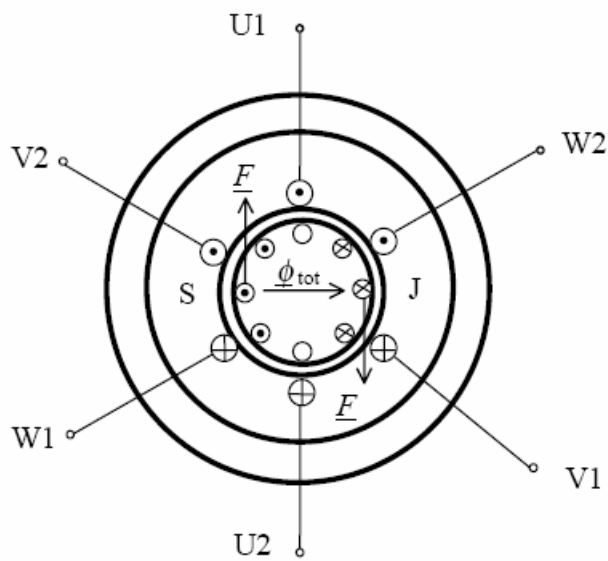
Obrázek 3.2 Časový průběh trojfázového harmonického proudu

Napětí a proudy v rotoru se podle indukčního zákona mohou indukovat točivým magnetickým polem jen při otáčkách rotoru odlišných od synchronních otáček točivého pole statoru, tedy při asynchronních otáčkách. Při synchronních otáčkách rotoru by se do něj neindukovalo napětí, neprotékaly by jím proudy a stroj by měl nulový moment.

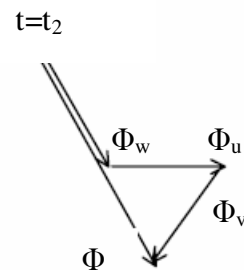
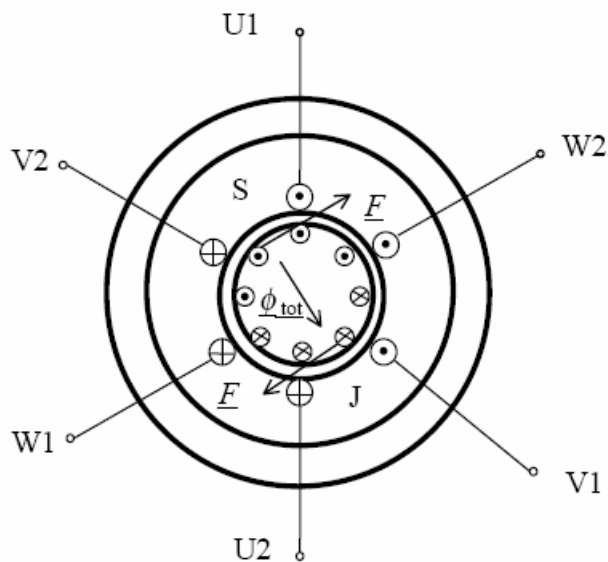
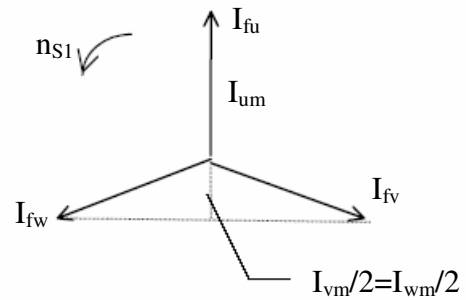
Při rozběhu se ve stojícím rotoru indukují napětí, která v uzavřeném obvodu rotoru vyvolají proudy, čímž dojde k silovému působení pole statoru na rotorový obvod. Směr a orientace této síly se určí podle Flemingova pravidla levé ruky. Účinkem těchto sil vzniká točivý moment, který roztočí rotor ve směru točení magnetického pole statoru. Elektrická energie se přeměňuje na mechanickou a stroj pracuje jako motor.

Asynchronní stroje mohou také pracovat jako asynchronní generátory (to znamená, že mechanickou energii přeměňují na elektrickou) v případě, že poháněním AM dosáhneme jeho mechanických otáček vyšších než jsou otáčky synchronní, čímž indukovaná napětí a proudy v rotoru jsou opačného smyslu a stroj tedy dodává činný elektrický výkon do sítě.

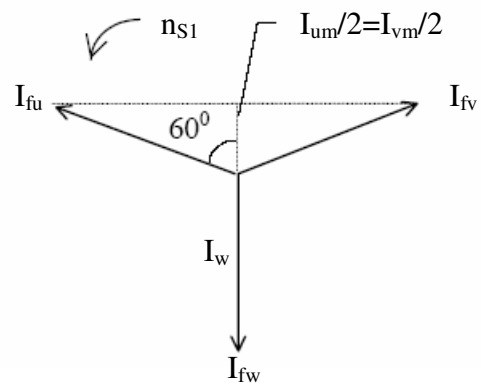
Poháníme-li stroj mechanickým momentem působícím proti směru otáčení točivého magnetického pole, pracuje jako asynchronní brzda, tj. moment asynchronního stroje působí proti hnacímu mechanickému momentu.



$$\Phi_{\text{tot}}(t_1) = \Phi_{\text{um}} + (1/2) \Phi_{\text{um}} = (3/2) \Phi_{\text{um}} = (3/2) \Phi_u$$



$$\Phi_{\text{tot}}(t_2) = \Phi_{\text{wm}} + (1/2) \Phi_{\text{wm}} = (3/2) \Phi_{\text{wm}} = (3/2) \Phi_w$$



$$n_{S1} = f_1$$

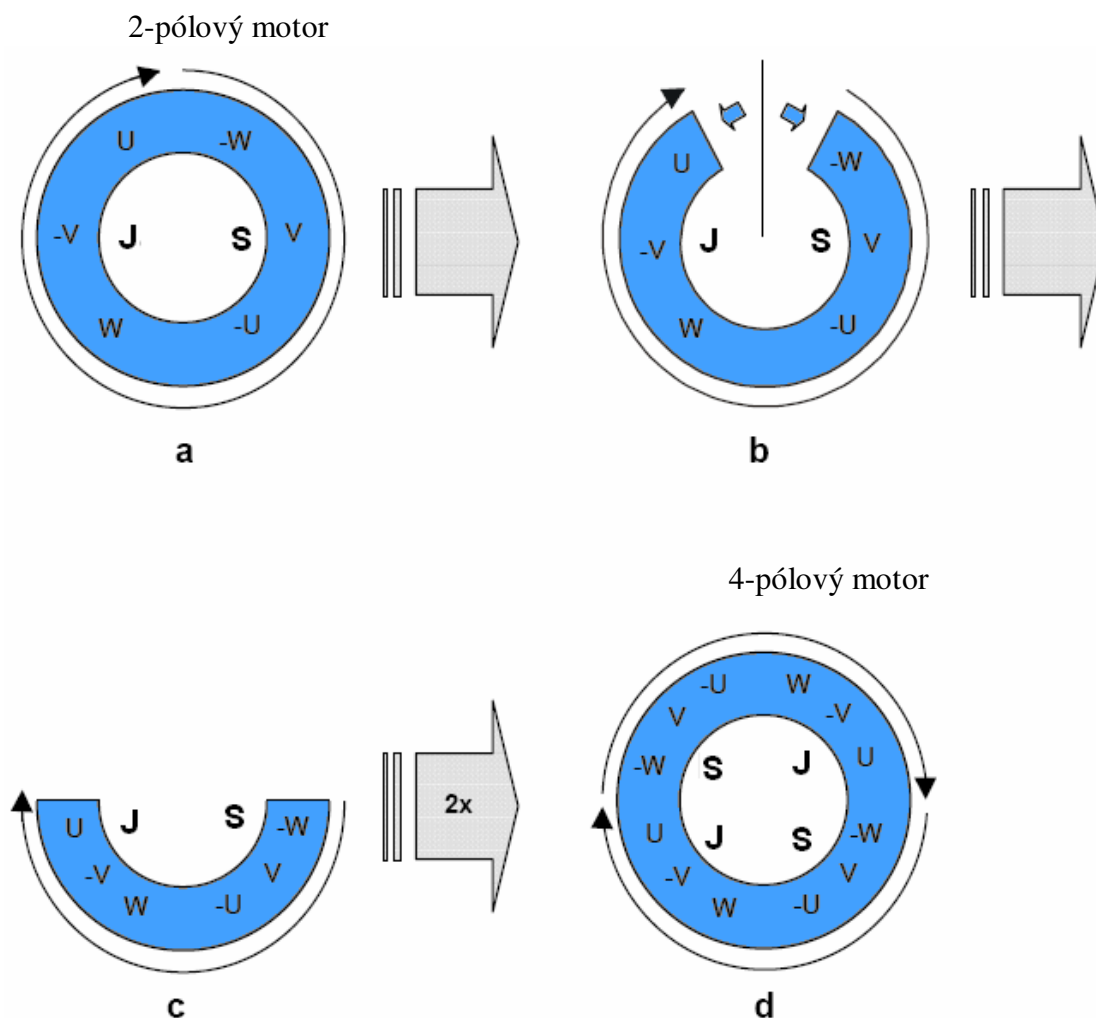
v obecném případě:

$$n_{S1} = f_1 / p \text{ [s}^{-1}\text{, Hz, -]}$$

p...počet pólových dvojic

Obrázek 3.3 Vznik točivého magnetického pole trojfázového vinutí statoru a vznik momentu AS

Na obrázku 3.4 je ukázána podstata vzniku vícepólového AM ze základního 2-pólového.



Obr.3.4 Počty pólů u asynchronního motoru.

Na obr.3.4a je točivé magnetické pole statoru vytvářející jeden severní S a jeden jižní J pól, tj. jedná se o dvojpólový motor. Na obr.3.4b a 3.4c je uvedena následující představa: trojfázové vinutí statoru je stlačeno tak, aby pokrývalo pouze polovinu obvodu statoru stroje. Totéž vinutí je pak znovu vloženo do uvolněné poloviny, čímž, jak je vidět na obr.3.4d, vznikne čtyřpólový motor, tj. motor jehož statorové vinutí vytváří dva severní a dva jižní póly. Obdobně lze získat i vícepólové motory (šestipólové, osmipólové, atd...). V praxi se vícepólové statorové vinutí získá vhodným provedením celého trojfázového vinutí.



V praxi se uvádějí otáčky AM v otáčkách za minutu, pak vztah pro synchronní otáčky je:

$$n_{s1} = \frac{60 \cdot f_1}{p} [\text{min}^{-1}, \text{Hz}, -]$$

Mírou asynchronismu tj. rozdílu otáček synchronních a otáček rotoru n je skluz, definovaný vztahem :

$$s = \frac{n_{s1} - n}{n_{s1}} \cdot 100$$

Indukované proudy v obvodu rotoru vytvoří rovněž točivé magnetické pole rotoru, které se vzhledem k rotoru stroje otáčí rychlostí danou vztahem :

$$n_2 = n_{s1} - n = \frac{f_2}{p}$$

kde frekvence f_2 je frekvence napětí a proudu ve vinutí rotoru definovaná jako :

3.2.3 Rozdělení asynchronních motorů (dále jen AM)

podle počtu fází statorového vinutí

- trojfázové
- dvojfázové
- jednofázové

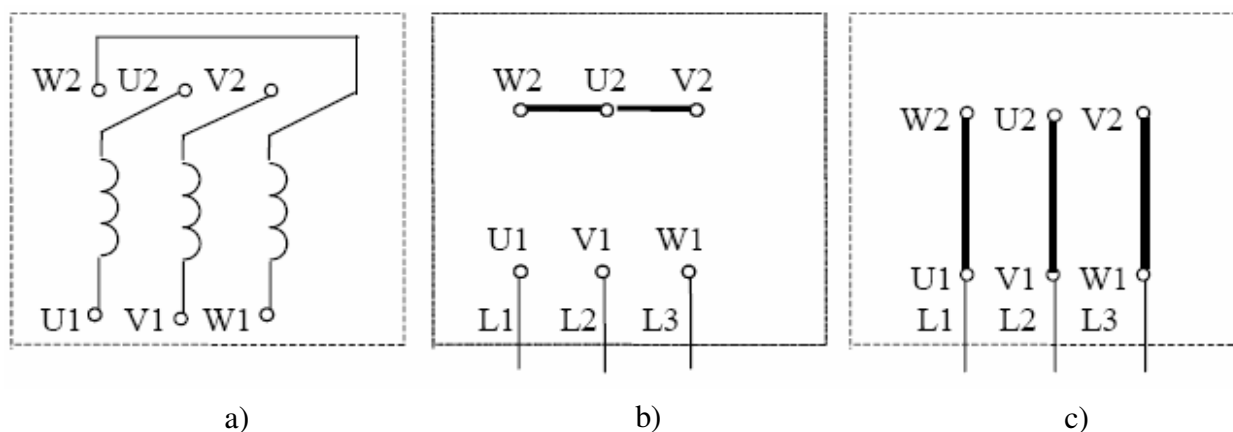
podle provedení rotorového vinutí

- s kotvou nakrátko (klecové) – v drážkách rotoru jsou uloženy vodivé tyče, nejčastěji hliníkové, spojené na čelních stranách kruhy nakrátko
- s kotvou kroužkovou – v drážkách rotoru je trojfázové vinutí z mědi spojené do hvězdy, jehož vývody jsou připojeny na tři kroužky nalisované stejně jako magnetický obvod rotoru na hřídeli stroje a ke kterým přiléhají pevně osazené kartáče umožňující vyvedení vinutí na

svorkovnici stroje.

Způsob zapojení trojfázového satorového vinutí

Vinutí statoru, nejčastěji trojfázové, je uloženo v drážkách jeho magnetického obvodu složeného z plechů vzájemně izolovaných. Jeho šest konců je vyvedeno na svorkovnici a označeno podle obr.3.4a, kde začátky vinutí jsou označeny U_1 , V_1 , W_1 a konce U_2 , V_2 , W_2 . Pomocí vodivých spojek lze spojit vinutí buď do hvězdy (obr.3.4b), nebo do trojúhelníka (obr. 3.4c).

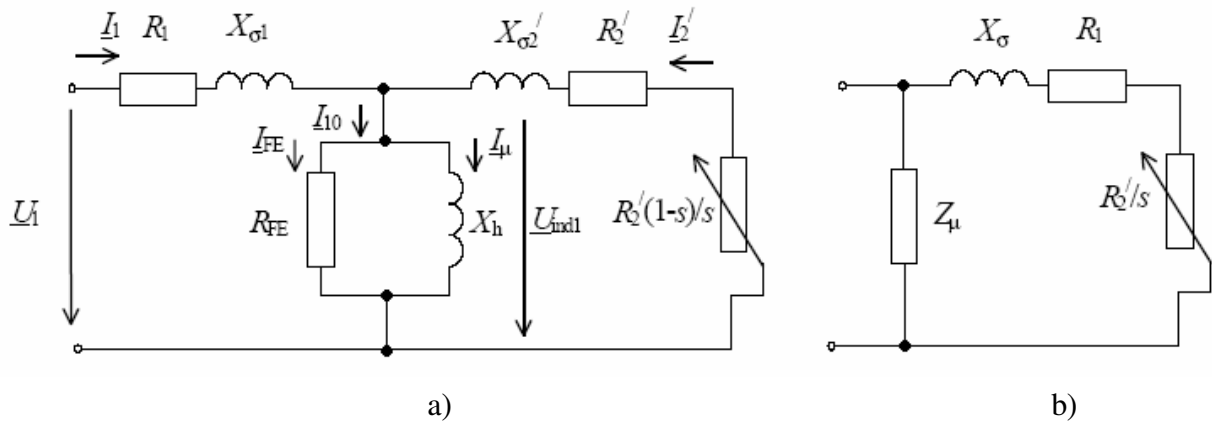


Obrázek 3.4 Svorkovnice asynchronního motoru: a) připojení vinutí, b) spojení do hvězdy(Y), c) spojení do trojúhelníka (D)

3.2.4 Náhradní schéma asynchronního motoru

Náhradní schéma AS je analogické s náhradním schématem transformátoru, v rovnicích pro indukovaná napětí je navíc tzv. činitel vinutí, který vyjadřuje prostorové rozložení vinutí každé fáze, které jsou tvořeny více cívkami rozloženými po obvodu statoru (rotoru), tak aby prostorový průběh magnetické indukce byl co nejbližší sinusovce a aby se omezil vliv vyšších harmonických. Náhradní schéma AS je na obr.3.5.

Porovnáním s náhradním schématem transformátoru je vidět, že na výstupních svorkách je připojena činná zátěž, jejíž velikost závisí na skluzu.



Obrázek 3.5 Náhradní schéma jedné fáze asynchronního motoru: a) úplné, b) zjednodušené

Efektivní hodnota indukovaného napětí v jedné fázi vinutí statoru a rotoru je dána vztahy:

$$U_{ind1} = 4,44 \cdot k_{v1} \cdot f_1 \cdot N_1 \cdot \Phi_m$$

kde k_{v1} – činitel vinutí statoru

N_1 – počet závitů jedné fáze statoru

Φ_m – celkový magnetický tok ve vzduchové mezeře stroje (maximální hodnota)

Rotorové veličiny se přepočítají na stator podle následujících vztahů:

$$U_{ind2s} = 4,44 \cdot k_{v2} \cdot f_2 \cdot N_2 \cdot \Phi_m = 4,44 \cdot k_{v2} \cdot s \cdot f_1 \cdot N_2 \cdot \Phi_m = U_{ind2} \cdot s$$

kde k_{v2} – činitel vinutí rotoru

U_{ind2} – indukované napětí při zabrzděném motoru ($s=1$, $n=0$)

N_2 – počet závitů vinutí jedné fáze rotoru



převod mezi státorem a rotorem se definuje obdobně jako u transformátoru

$$K = \frac{U_{ind1}}{U_{ind2}} = \frac{k_{v1} \cdot N_1}{k_{v2} \cdot N_2} - \text{definice pro zabržděný motor}$$

Rotorové veličiny se přepočítají na stator podle následujících vztahů:

$$U'_{ind2} = K \cdot U_{ind2} = U_{ind1}$$

$$I'_2 = I_2 \cdot \frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{1}{K}$$

$$R'_2 = R_2 \cdot K^2 \cdot \frac{m_1}{m_2}$$

$$X'_{\sigma 2} = X_{\sigma 2} \cdot K^2 \cdot \frac{m_1}{m_2}$$

kde m_1 - je počet fází statoru

m_2 - počet fází rotoru

Počet fází statoru nemusí být totožný s počtem fází rotoru.

Velikost indukovaného napětí v obvodu rotoru závisí na velikosti skluzu s , rovněž i velikost rozptylové reaktance vinutí rotoru jak je patrné ze vztahu:

$$X_{\sigma 2s} = 2\pi \cdot f_2 \cdot L_2 = 2\pi \cdot s \cdot f_1 \cdot L_2 = X_{\sigma 2} \cdot s$$

Přepočítaný proud tekoucí v rotoru na stator je:

$$I'_2 = \frac{U'_{ind2} \cdot s}{R'_2 + jX'_{\sigma 2s}} = \frac{U_{ind1}}{\frac{R'_2}{s} + jX'_{\sigma 2}}$$

$$\text{kde } \frac{R'_2}{s} = R_2 + R'_2 \cdot \frac{1-s}{s}$$

což odpovídá náhradnímu schématu na Obr. 3.5.



3.2.5 AM při chodu naprázdno ($s \rightarrow 0$)

Při chodu naprázdno nedosáhne AM synchronních otáček. Moment motoru totiž není nulový, motor je zatížen na hřídeli momentem ztrát naprázdno. AM odebírá ze sítě proud naprázdno, který je vlivem vzduchové mezery mezi státorem a rotorem podstatně větší než u transformátoru, proud rotoru naprázdno je velmi malý, protože skluz při chodu naprázdno se blíží k nule.

3.2.6 AM ve stavu nakrátko ($s = 1$)

Rotor AM je zabrzděn, motor se tedy neotáčí a stator je napájen ze sítě. Náhradní schéma je stejné jako u transformátoru nakrátko. Impedance nakrátko AM je však ve srovnání s transformátory větší, což je způsobeno větším rozptylem, který je ovlivněn jiným konstrukčním uspořádáním vinutí a vzduchovou mezerou. Proud nakrátko (v okamžiku rozběhu motoru tzv. záběrný proud) je tedy ve srovnání se zkratovým proudem transformátoru menší.

$$n = 0, R_2' \cdot \frac{1-s}{s} = 0$$

3.2.7 Stanovení hysterezích ztrát v rotoru asynchronního stroje

Je nutné mít asynchronní stroj v soustrojí, nejlépe se stejnosměrným strojem. Asynchronní stroj totiž musí být zatížen malým výkonem v podsynchronní i nadsynchronní oblasti. Pokud bude asynchronní stroj zabrzděn a bude rozpojeno rotorové vinutí, budou v rotoru vznikat pouze hysterezní ztráty a stroj bude vyvíjet jim úměrný moment. Tato složka je stálá, při $s > 0$ je kladná, při $s < 0$ záporná.

Měření se může provést i v chodu naprázdno. Při chodu naprázdno kryje moment pouze mechanické ztráty a ztráty od drážkových harmonických v železe.

$$(1-s)P_\delta = \Delta P_m + \Delta P_{vf}$$

Protože je skluz velmi malý, lze napsat

$$P_\delta = \Delta P_m + \Delta P_{vf}$$



Ztráty v rotoru jsou

$$s \cdot P_{\delta} = \Delta P_{j2} + \Delta P_{Fe2s}$$

kde jsou ΔP_{Fe2s} ztráty v železe při skluzu s . Tyto ztráty jsou složeny ze ztrát vířivými proudy a ztrát hysterezínch

$$\Delta P_{Fe2s} = s \cdot \Delta P_{2H} + s^2 \cdot \Delta P_{2V}$$

takže

$$P_{\delta} = \frac{\Delta P_{j2}}{s} + \Delta P_{2H} + s \cdot \Delta P_{2V}$$

Z poslední rovnice plyne, že hysterezní ztráty jsou na skluzu nezávislé. Platí:

$$\Delta P_m + \Delta P_{vf} = \frac{\Delta P_{2j}}{s} + \Delta P_{2H}$$

protože složku $s \cdot \Delta P_{2V}$ můžeme v okolí nulových skluzů zanedbat.

Při měření se zjišťuje příkon asynchronního stroje a také příkon stejnosměrného (zatěžovacího) stroje v okolí nulových skluzů. Asynchronní stroj nejprve běží jako motor a hraří mechanické ztráty stejnosměrného stroje. Pak se začne zvyšovat příkon ss stroje, až se asynchronní stroj dostane nad synchronní rychlost.

U zatěžovacího (ss) stroje by mělo být nižší napětí, aby se omezili ztráty v železe. Při nulovém skluzu vzniká v charakteristikách skok, který představuje dvojnásobek hysterezích ztrát. Hysterezní moment je konstantní

$$M_H = \frac{\Delta P_{2H}}{\omega_n}$$

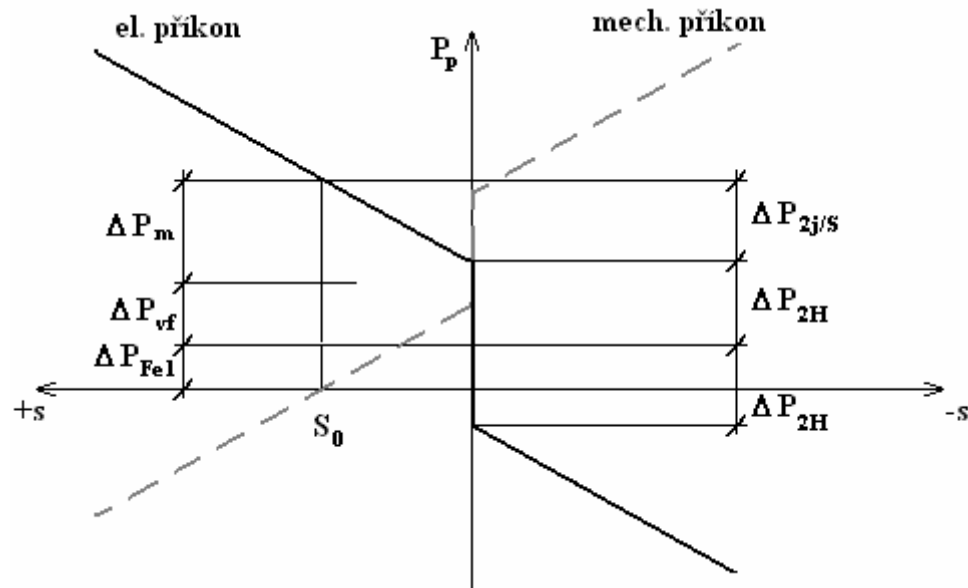
Odečtením z naměřených hodnot se zjistí skok v mechanickém příkonu a skok v elektrickém příkonu. Hysterezní ztráty v rotoru odpovídají polovině této skokové změny.

Vlivem okamžité frekvence sítě, která má málokdy přesně 50,000 Hz, nenastane skok příkonů přesně v synchronní rychlosti, ale při hodnotě jiné, což je pro tuto aktuální frekvenci synchronní rychlost. To platí, pokud je měření rychlosti nezávislé na frekvenci sítě. Pokud by se měření rychlosti provádělo např. stroboskopem, který by byl synchronizován se sítí, nastal by

skok hysterezích ztrát přesně pro nulový skluz, i když by rychlost stroje byla ve skutečnosti mírně jiná.

Měření se provádí při konstantním (jmenovitém) napětí.

$$\Delta P_{2H} \approx B^2 \approx U^2$$



Obrázek 3.6 Mechanický a elektrický příkon v závislosti na skluzu.

Předpoklad kladných hysterezích ztrát pro $s > 0$ potvrdíme skokovým nárůstem elektrického příkonu přechodem stroje do podsynchronní rychlosti.



4 MĚŘENÍ MAGNETICKÉ INDUKCE NA POVRCHU KOSTRY STROJE.

Aby bylo možné porovnat vypočtené hodnoty s naměřenými, bylo provedeno měření magnetické indukce na zadaném asynchronním stroji. Z důvodů absence Hallových sond uvnitř stroje, bylo měření provedeno pouze na povrchu stroje a to na vrchní straně (11 hodnot), na boční straně (11 hodnot) a na předním víku kostry (4 hodnoty). Měření bylo provedeno 3-osou Hallovou sondou. Zanesení naměřených hodnot do grafu (Obr.č. 4.1, 4.2 a 4.3) se provedlo zapsáním příkazů do souboru m.File, použitím programu Matlab® R2007a.

4.1 Příkazový řádek

Program Matlab® není tabulkový procesor, nýbrž programovací jazyk a tudíž bylo nutné zapsat sekvenci příkazů umožňující vykreslení grafu zobrazujícího vektory v prostoru. K tomuto vykreslení slouží příkaz *quiver3* naplněný hodnotami vektorů a jejich počátečními body. Důležité je aby tyto matice, vektorů a počátečních bodů, měli navzájem stejnou velikost, jinak nedojde k vykreslení grafu.

Výpis souboru *Graf_mereni.m* (m.File)

```
%Vrchní strana
clear
x=[0 15 30 45 60 75 90 105 120 135 150];
y=[0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];
z=[0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];
u=[0.388e-3 0.211e-3 0.3557e-3 0.131e-3 0.022e-3 0.024e-3 0.0068e-3
0.0317e-3 0.115e-3 0.149e-3 0.308e-3];
v=[0.329e-3 0.5789e-3 0.358e-3 0.222e-3 0.203e-3 0.207e-3 0.224e-3
0.2102e-3 0.249e-3 0.418e-3 0.263e-3];
w=[0.33e-3 1.136e-3 0.4968e-3 0.246e-3 0.21e-3 0.227e-3 0.2182e-3
0.186e-3 0.217e-3 0.829e-3 0.466e-3];
subplot(2,2,1)
quiver3(x,y,z,u,v,w)
axis([0 150 -100 100 0 37])
```



`%Boční strana`

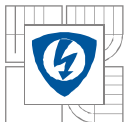
```
clear
x=[0 15 30 45 60 75 90 105 120 135 150];
y=[0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];
z=[0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];
u=[0.445e-3 0.269e-3 0.436e-3 0.127e-3 0.068e-3 0.0247e-3 0.028e-3
    0.046e-3 0.1756e-3 0.107e-3 0.427e-3];
v=[0.313e-3 0.539e-3 0.402e-3 0.304e-3 0.284e-3 0.261e-3 0.274e-3
    0.252e-3 0.307e-3 0.401e-3 0.293e-3];
w=[0.256e-3 1.297e-3 0.578e-3 0.342e-3 0.281e-3 0.247e-3 0.264e-3
    0.232e-3 0.3119e-3 1.062e-3 0.601e-3];
subplot(2,2,2)
quiver3(x,y,z,u,v,w)
axis([0 150 -100 100 0 37])
```

`%Čelní stěna`

```
clear
x=[72.74 72.74 21.83 21.83];
y=[72.74 21.83 21.83 72.74];
z=[0 0 0 0];
u=[0.0351e-3 0.0285e-3 0.028e-3 0.036e-3];
v=[0.0265e-3 0.037e-3 0.0278e-3 0.0352e-3];
w=[0.0153e-3 0.0249e-3 0.032e-3 0.0261e-3];
subplot(2,2,3)
quiver3(x,y,z,u,v,w)
axis([0 100 0 100 0 100])
```

Jednotlivé příkazy.

<code>Clar</code>	- vynulování hodnot proměnných, uložených v paměti
<code>x=[...</code>	- matice souřadnic, umístění jednotlivých bodů pro hodnotu X
<code>y=[...</code>	- matice souřadnic, umístění jednotlivých bodů pro hodnotu Y
<code>z=[...</code>	- matice souřadnic, umístění jednotlivých bodů pro hodnotu Z
<code>u=[...</code>	- matice vektoru magnetické indukce B_X v bodě X
<code>v=[...</code>	- matice vektoru magnetické indukce B_Y v bodě Y
<code>w=[...</code>	- matice vektoru magnetické indukce B_Z v bodě Z
<code>subplot(2,2,1);</code>	- vygenerování grafického okna pro 3 dílčí grafy
<code>quiver3(x,y,z,u,v,w)</code>	- vykreslení grafu magnetické indukce
<code>axis([...]);</code>	- vymezení os pro daný graf



4.2 Tabulky naměřených a vypočtených hodnot.

Tabulka č. 4-1 Naměřené hodnoty magnetické indukce na vrchní straně kostry stroje.

vzdálenost od kraje kostry [mm]	B_x [mT]	B_y [mT]	B_z [mT]	B_Σ [mT]	$B_{\Sigma\text{vypočtená}}$ [mT]
0	0,388	0,329	0,33	0,6	0,606
15	0,211	0,5789	1,136	1,286	1,292
30	0,3557	0,358	0,4968	0,65	0,708
45	0,131	0,222	0,246	0,34	0,356
60	0,022	0,203	0,21	0,273	0,293
75	0,024	0,207	0,227	0,305	0,308
90	0,0068	0,224	0,2182	0,296	0,313
105	0,0317	0,2102	0,186	0,281	0,282
120	0,115	0,249	0,217	0,336	0,350
135	0,149	0,418	0,829	0,936	0,940
150	0,308	0,263	0,466	0,622	0,617

Tabulka č. 4-2 Naměřené hodnoty magnetické indukce na čelní straně kostry stroje.

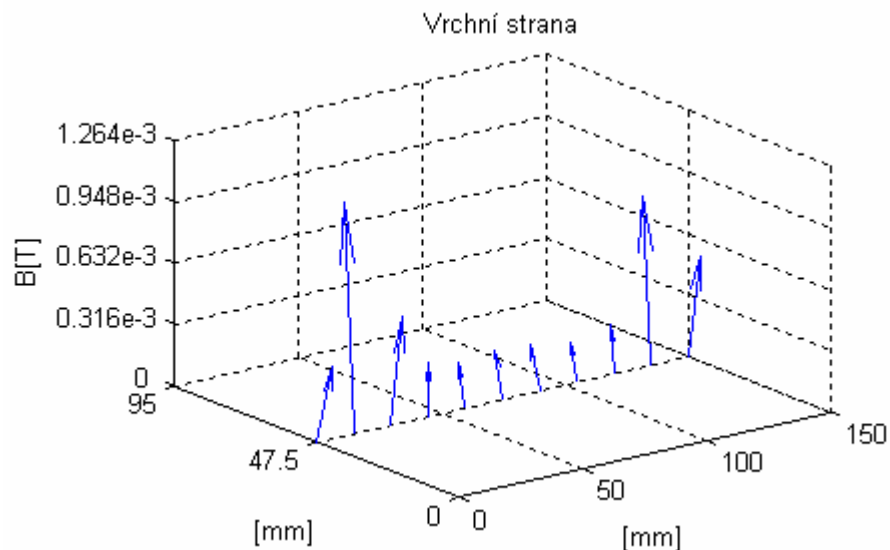
číslo otvoru	B_x [mT]	B_y [mT]	B_z [mT]	B_Σ [mT]	$B_{\Sigma\text{vypočtená}}$ [mT]
1	0,0351	0,0265	0,0153	0,0495	0,047
2	0,0285	0,037	0,0249	0,0529	0,053
3	0,028	0,0278	0,032	0,0497	0,051
4	0,036	0,0352	0,0261	0,05703	0,057

pozn. měřené body jsou vzdáleny 36mm od středu osy hřídele

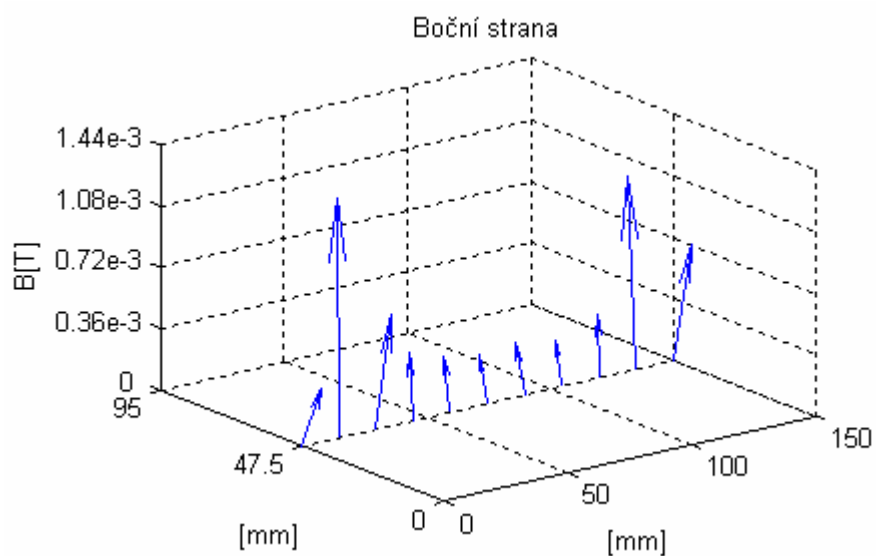
Tabulka č. 4-3 Naměřené hodnoty magnetické indukce na boční straně kostry stroje.

vzdálenost od kraje kostry [mm]	B_x [mT]	B_y [mT]	B_z [mT]	B_Σ [mT]	$B_{\Sigma\text{vypočtená}}$ [mT]
0	0,445	0,313	0,256	0,589	0,601
15	0,269	0,539	1,297	1,428	1,430
30	0,436	0,402	0,578	0,768	0,828
45	0,127	0,304	0,342	0,469	0,475
60	0,068	0,284	0,281	0,385	0,405
75	0,0247	0,261	0,247	0,346	0,360
90	0,028	0,274	0,264	0,352	0,382
105	0,046	0,252	0,232	0,346	0,346
120	0,1756	0,307	0,3119	0,447	0,472
135	0,107	0,401	1,062	1,1427	1,140
150	0,427	0,293	0,601	0,773	0,793

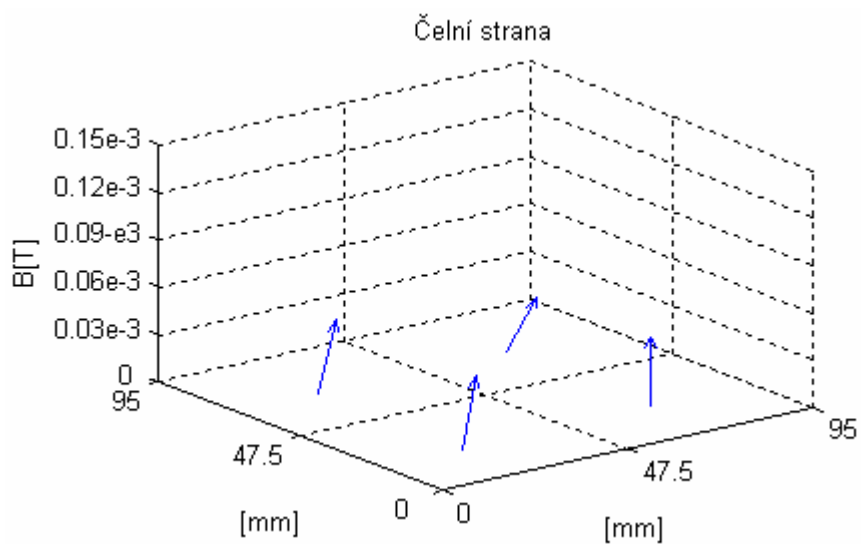
4.3 Grafy naměřených hodnot.



Obrázek 4.1 Magnetická indukce na vrchní straně kostry



Obrázek 4.2 Magnetická indukce na boční straně kostry



Obrázek 4.3 Magnetická indukce na čelní straně kostry



5 PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ

V této části kapitoly jsou popsány základní informace o programech Autodesk Inventor® 10.0 Professional a Ansys® Release 11.0

5.1 Autodesk Inventor

Inventor je 2D a 3D modelovací nástroj s parametrickým zadáváním, který umožňuje rychle a efektivně vytvořit jakýkoliv model, od těch nejjednodušších až po složité prvky a sestavy. V tomto případě je inventor využit k modelování jádra transformátoru.

5.1.1 Pracovní prostředí

Pracovní prostředí se skládá z okna Autodesk Inventoru, grafického okna, ukotvitelných panelů nástrojů, okna nástrojů, prohlížeče a místních nabídek.

Okno Autodesk Inventoru

Okno (hlavní) Autodesk Inventoru je zobrazeno vždy, když je aktivní Autodesk Inventor. V hlavním okně se nachází grafické okno, okno nástrojů, panely nástrojů a prohlížeč.

Grafické okno

Grafické okno je zobrazeno při otevřeném souboru. Jestliže je otevřen více než jeden soubor, každý soubor je zobrazen ve svém grafickém okně. Okno obsahující soubor, na kterém se pracuje, se nazývá aktivní okno. Je zde vyobrazen generovaný model nebo rozpracovaný náčrt samotného prvku.

Panely nástrojů a okno nástrojů

Autodesk Inventor zobrazuje pouze ty panely nástrojů a okno nástrojů, které se vztahují k aktivnímu prostředí. Jestliže je zároveň otevřena součást, sestava a výkresové soubory, tak panely



nástrojů se mění podle toho, které okno je aktivní. Je možné nastavit, které panely nástrojů a okno nástrojů se zobrazí pro určitá prostředí.

Prohlížeč

Prohlížeč zobrazuje hierarchickou strukturu součástí, sestav a výkresů. Prohlížeč vždy zobrazuje informace aktivního souboru. Prohlížeče součásti a sestavy mají panely nástrojů v horní části, aby bylo možné filtrovat zobrazení, nebo u sestav, aby měnili reprezentace zobrazení návrhu.

Symboly kurzoru

Při používání Autodesk Inventoru se vedle kurzoru často zobrazují symboly které označují, že se pracuje v určitém režimu nebo že jsou dostupné určité nástroje. Klepnutím pravého tlačítka se může zobrazit místní nabídka, která obsahuje více informací o dostupných volbách.

5.1.2 Koncepce náčrtu



Náčrty definují velikost a tvary profilů, trajektorií a umístění děr. Profily, trajektorie a středy děr jsou zpracovány při tvorbě konstrukčních prvků.

Pomocí nástrojů v panelu nástrojů Náčrt se může vytvořit náčrt v souborech součástí, souborech sestavy a výkresových souborech.

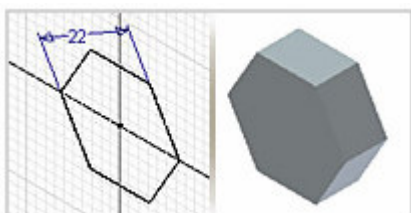
Náčrty se vytvářejí v náčrtové rovině, kde se mohou vytvořit náčrty úseček, oblouků a další geometrie. Při tvorbě náčrtu se vazby automaticky používají. Ze stabilního náčrtu se stane profil, který se použije jako základ pro načrtnuté konstrukční prvky, například vysunutí, rotace, tažení, šablonování nebo spirály. Náčrty jsou také používány jako cesty pro prvky tažení. Ve výkresech vytváří geometrie náčrtu značky, rohová razítka a rámečky.

Referenční geometrie náčrtu Konstrukční geometrie není částí profilu nebo trajektorie, ale používá se pro definici vazeb. Referenční geometrii lze promítnout z existujícího náčrtu do



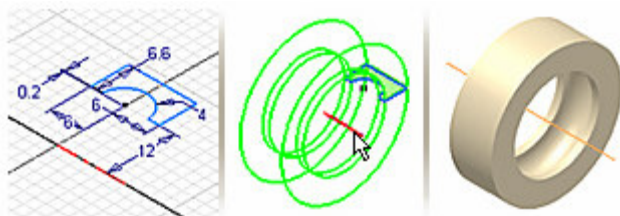
nového. Referenční geometrie je obvykle částí existujícího konstrukčního prvku, například hrana nebo obrys.

5.1.3 Konstrukční prvky



Vysunuté konstrukční prvky tvoří základní bloky součástí. Jsou-li použity v sestavách, představují určitý výrobní postup. U těchto prvků určujete směr, hloubku, úhel zúžení a metodu ukončení vysunutí (Booleovské operace).

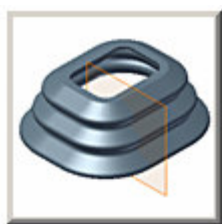
První konstrukční prvek součásti se nazývá základní prvek. Je-li přidán k jinému prvku, může být použito sjednocení, rozdíl či průnik s existujícím prvkem. Průnik vytvoří těleso ze sdíleného objemu dvou konstrukčních prvků a odstraní všechny materiál vně od sdílených hranic. Vysunuté konstrukční prvky sestavy se používají pro vyříznutí ostatními součástmi.



Konstrukční prvky **rotace** se vytváří tažením jednoho nebo více načrtnutých profilů kolem osy. Pokud je konstrukční prvek rotace prvním konstrukčním prvkem v souboru součástí, stává se základním prvkem.

Plocha, která může být vytvořena z rotovaného profilu, se může použít jako rovina ukončení pro jiné konstrukční prvky nebo jako dělicí nástroj pro rozdělenou součást.

Profil může rotovat okolo osy o úhel mezi nulou a 360 stupni. Osa rotace může být částí profilu nebo může být od profilu odsazená. Osa i profil musí být rovinné.



Konstrukční prvky **tažení** jsou objemové tvary, jejichž objem definuje posunutí profilu podél trajektorie roviny. Trajektorie může být otevřená křivka nebo uzavřená smyčka, ale je nutné, aby byla na rovině, která protíná profil. Plocha může být vytvořena z taženého profilu a použita jako ukončovací rovina pro další konstrukční prvky nebo jako dělicí nástroj pro rozdělenou součást.



Tažení se používá pro objekty, které mají stejné tvary při tažení podél nepravidelné trajektorie (například drážky těsnění, úchyty, kabely či trubky). Tažené plochy se používají k doladění tvarů návrhu, slouží například jako plocha ukončení pro jiné konstrukční prvky nebo jako dělicí nástroj při rozdělení součástí.

5.1.4 Sestavy



Novou součást nebo sestavu lze vytvořit během práce v existující sestavě. Součásti vytvořené na místě (v rámci sestavy) mohou mít určitou velikost, řízenou okótovanými náčrtů nebo být adaptivní (řízenou vztahem k jiným komponentům sestavy). Vybere se výchozí struktura rozpisky pro komponent v místě.

Vlastnost struktury rozpisky definuje stav komponentu v rozpisce. Struktura rozpisky má pět základních voleb: Normální, Dělicí, Referenční, Zakoupeno a Neoddělitelné. Na úrovni instance komponentu můžete přepsat strukturu, která bude Referenční.

Nové součásti mohou být načrtnuty na plochách jiných komponentů, které mají hrany nebo konstrukční prvky vhodné pro novou součást. Vazba se použije (implicitně) mezi vybranou plochou a plochou vytvořenou z nového náčrtu. Jestliže se potřebuje později přemístit součást, může se vazba odstranit. Rovněž lze vytvořit adaptivní vazbu nastavením volby na kartě Sestava dialogu Možnosti aplikace. Tato volba umožňuje součásti změnit velikost nebo umístění v případě, že se změní parametry vazby nebo komponentů.

Při tvorbě nové součásti se může promítnout geometrie z plochy jiné součásti. Pokud by nová součást byla asociativní s nadřazenou součástí, vybere se před tvorbou součásti volba nazvaná „Povolit asociativní hranu“. Součásti mohou být ukončeny na ploše jiného komponentu. Použití volby „Od do“ nebo „K“ pro vysunuté konstrukční prvky. Vysunuté konstrukční prvky pomocí volby „Od do“ nebo „K“ k jiným komponentům sestavy jsou implicitně adaptivní a mohou podle potřeby změnit velikost nebo se přesunout vzhledem k jiným komponentům. V sestavě se mohou vytvořit náčrt a konstrukční prvky, ale ty nebudou součástmi. Budou obsaženy v souboru sestavy (s příponou .iam).



5.2 Ansys

5.2.1 ANSYS Multiphysics, Electromagnetics

ANSYS Multiphysics – charakteristika programu

Zahrnuje celou známou šíři fyzikálních problémů, popsatelných metodou konečných prvků: strukturální analýzu (statika a dynamika), teplo, proudění, akustiku, nízko a vysokofrekvenční elektromagnetismus. Program je obecně nelineární a nestacionární, je možné zadávat veličiny jak skalární, tak vektorové povahy. Umožňuje současně řešit problémy tzv. sdružených úloh, jako strukturální/teplo, fluidní/strukturální, elektrostatický/strukturální.

Jednotné grafické prostředí GUI provází práci uživatele od preprocessingu, přes solvery, až po postprocessing. GUI zahrnuje celou šíři výpočtů, včetně nelineárních modelů výpočtů, stejně jako modely materiálů, nebo tranzientní úlohy, nebo parametrické modely pro optimalizaci

Rozsah programu

- Lineární
- Nelineární
 - Geometrická, materiálová, elementy, kontakty
- Statika
- Dynamika
 - Transientní, vlastní frekvence, harmonická analýza, spektrální analýza, nahodilé buzení
- Stabilita
- Topologická optimalizace

ANSYS Electromagnetics – charakteristika programu

VF analýza řeší úplnou soustavu Maxwellových rovnic a lze ji použít k simulaci elektromagnetických jevů v zařízeních, jejichž rozměry jsou srovnatelné nebo menší, než je délka vlny. Lze řešit oba základní typy úloh: na vnitřní oblasti (RF a mikrovlnné zařízení) a na vnější oblasti (vyzařování a rozptyl elektromagnetického záření).



NF analýza na základě zjednodušené soustavy Maxwellových rovnic (zanedbává posuvné proudy) nabízí řešení stacionárních nebo kvazistacionárních polí. Délka elektromagnetické vlny musí být mnohonásobně větší v porovnání s rozměry zařízení.

K efektivní simulaci je kromě klasických konečných prvků nabízena i celá řada speciálních prvků - kontaktní prvky na modelování styku těles, speciální prvky na modelování cívek, vinutí a částí masivních vodičů, infinitní a hybridní hraniční prvky k omezení velikosti oblastí u úloh s otevřenou hranicí.

Lze simulovat i zapojení vyvíjené součástky nebo zařízení přímo do elektronického obvodu, přičemž její prostorový model je vytvořen z konečných prvků a její řídicí elektronický obvod z klasických obvodových prvků se soustředěnými parametry.

Z výsledků simulací lze extrahovat gradienty polí, elektrostatické síly, kapacitní matice, hodnoty parazitních kapacit, indukční matice, rozptylové toky, magnetické síly i kroucí momenty. Lze též sledovat dráhy nabitých částic v kombinaci elektrostatického a magnetického pole.

Transientní a harmonickou analýzu lze využít k simulaci indukčního ohřevu, analýze elektrodynamických sil, vířivých proudů a bilanci Jouleových ztrát.

Vypočtené veličiny (síly, Jouleovy ztráty) mohou být použity jako vstup pro další typy analýz.



5.2.2 Ansys workbench

Prostředí

Workbench technology je původní, unikátní řešení firmy ANSYS Inc., založené na obousměrné (bi-directional) asociativitě geometrie a sítě při zachování parametrické vazby a dalších algoritmech, které jsou popsány v následujícím textu:

CAD asociativita a Bi-Directional asociativita

Workbench prostředí používá unikátní „Plug-In“ architekturu, která zachovává asociativitu s geometrií CAD systému, ať už se jedná o modely na úrovni objemů, nebo modely vytvořené z ploch, při změně geometrie CAD modelu zůstává zachována již jednou definovaná obecná okrajová podmínka (zatížení a okrajové podmínky) a jejich zadávání už není potřeba znovu opakovat. Jestliže je v následném optimalizačním výpočtu změněn některý z parametricky definovaných rozměrů modelu, provede „Workbench parameter manager“ automaticky změnu na geometrii CAD modelu.

Parametrická simulace

ANSYS Workbench umožňuje řídit a kontrolovat nejen parametry geometrie modelu, ale i jeho fyzikální parametry spojené s výpočtem: materiálové vlastnosti, zatížení a teplotu. Tyto parametry, souhrnně označované jako „Multiple design criteria“ je doporučeno zadávat pomocí tabulky, která je uživateli k dispozici v menu Parameter Manager. Regenerace parametrů modelu je prováděna automaticky. Regenerovaný, upravený model je znovu prostřednictvím ANSYS Workbench Environment připraven k dalšímu variantnímu výpočtu.

Robustní generace sítě

Aplikovaný generátor sítě používá automatické algoritmy. Uživatelské prostředí je stavěno tak, aby odpovídalo filosofii práce, aplikované v CAD systémech. Rychlá generace sítě a grafika zobrazování vychází z předpokladu možnosti práce s velkými modely a složitými soustavami.

Zatížení a okrajová podmínka

Workbench nabízí standardní škálu možností pro zadávání zatížení a definice okrajové podmínky a to s maximálním zaměřením na jednoduchost prostředí, jehož sofistika odpovídá CADovskému přístupu.

Automatické algoritmy postupu výpočtů

Prostředí velkých MKP systémů, obsahuje stovky příkazů (ANSYS více, než 1.300). Tradiční prostředí je určeno pro výpočtáře – specialistu, znalého teorie MKP analýz, fyzikálního a matematického teoretického základu inženýrských problémů a celou šíři užívaného software. Tento přístup sice umožňuje zadávat v ANSYS prakticky libovolný, MKP metodou popsitelný fyzikální problém, vyžaduje ovšem široké znalosti a zkušenosti, získané předchozí praxí. Workbench prostředí vychází z opačné filosofie: uživatelsky jednoduché a jasné prostředí nabízí



připravené algoritmy postupů základních inženýrských úloh, nevyžadující ani znalost teorie metody, ani složitého softwarového systému. Uživatel si zvolí fyzikální problém - například statiku, dynamiku, nebo teplo a celý průběh zadání, výpočtu a vyhodnocení provádí v prostředí dialogového menu. Výčet některých vnitřních algoritmů, provádějících strategicky důležité atributy výpočtu:

Adaptivní meshing s automatickým zjemňováním sítě na vybraných plochách

Generace „inteligentní sítě“, nepřipouštějící existenci elementů se špatnou kvalitou

Automatický iterativní proces adaptivního zjemňování sítě na základě nastavení kritéria konvergence. Umožňuje definovat požadovanou kategorii přesnosti výsledku výpočtu celého modelu, nebo s ohledem na jeho určitou část.

Automatický výběr pro danou úlohu optimálního řešiče

Automatické nastavení kontaktu

Jedním z algoritmů prostředí ANSYS Workbench je automatické zavedení kontaktu do míst vzájemného spojení součástek, tvořících model. Přiřazené kontaktní oblasti jsou editovatelné – uživatel může změnit typ nastaveného kontaktu. Manuálně je možné odebrat, nebo přidat další kontakty.

5.3 Přenos geometrie

Pomocí nástroje Exportovat do ANSYS se vytvoří kopie souboru analýzy, který je kompatibilní s ANSYS Workbench. Soubor se uloží s příponou .dsdb. Vytvořený model lze také uložit s příponou .ipt, .sat, které jsou rovněž kompatibilní s importem programu Ansys.

5.3.1 Modely přenosu geometrie z CAD systémů, (v softwaru ANSYS)

ANSYS používá tři základní modely přenosu geometrie z CAD systémů.

- Produkty řady ANSYS Environment (základní řada) používají model, označovaný jako „*Connection*“. Tento produkt je určen k importu aktuální geometrie z podporovaného CAD systému, bez možnosti přenosu parametrů a bez zachování asociativity.

Zbývající dva modely přenosu geometrie jsou aplikovány v prostředí ANSYS Workbench. Toto prostředí (simulační nástroj) je určeno pro práci s konkrétním CAD systémem uživatele. Principem je zachování transparentní geometrie, nezávisle na zúčastněných CAD systémech. Tento přístup je výhodný při použití několika rozdílných CAD systémů.



- První z těchto dvou modelů integrace je „*CAD Plug-in*“, představující přímé spojení do CAD packages programming interface (API), který dovoluje z prostředí ANSYS Workbench přístup ke čtení všech atributů geometrie a informací o parametrech. Tím je současně zachována i asociativita. Podmínkou je souběh předmětného CAD systému a Workbench Environment.
- Druhým modelem integrace je „*CAD reader*“, který propojuje ANSYS Workbench Environment s CAD geometrií, bez přenosu atributů a parametrů. Tento model je podobný jako „*Connection*“, rozdíl je v tom, že je aplikován pouze v prostředí ANSYS Workbench Environment.

6 SIMULACE (ANSYS WORKBENCH)

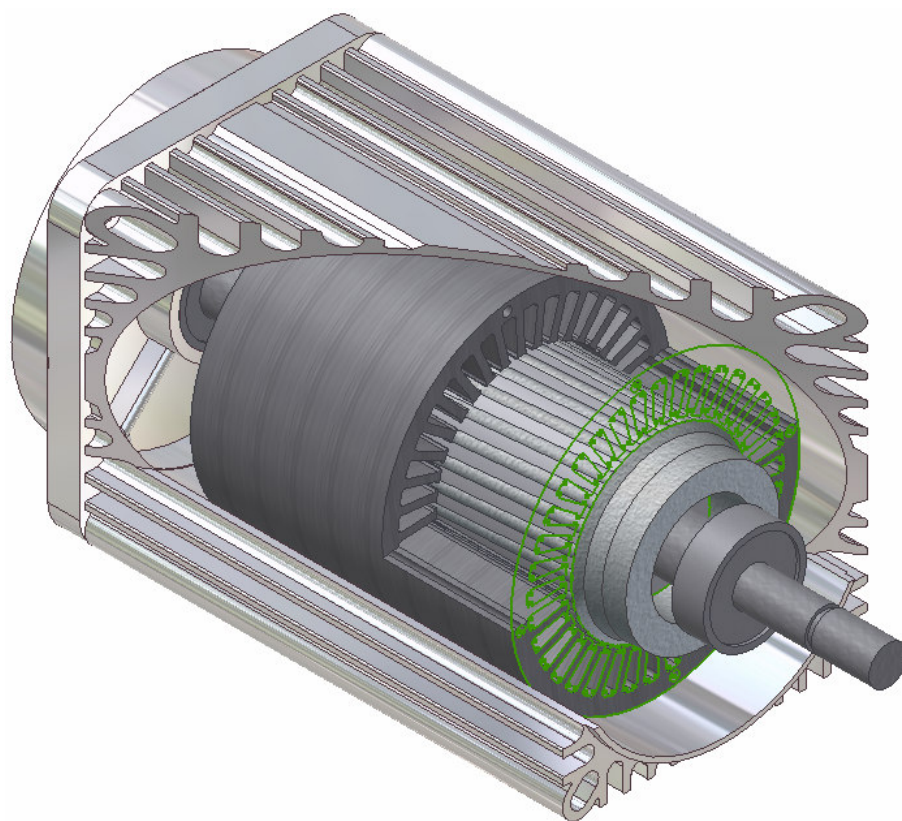
V této části projektu, je popsán postup práce při vytvoření modelu asynchronního stroje a jeho magnetické analýze.

6.1 Technické parametry stroje

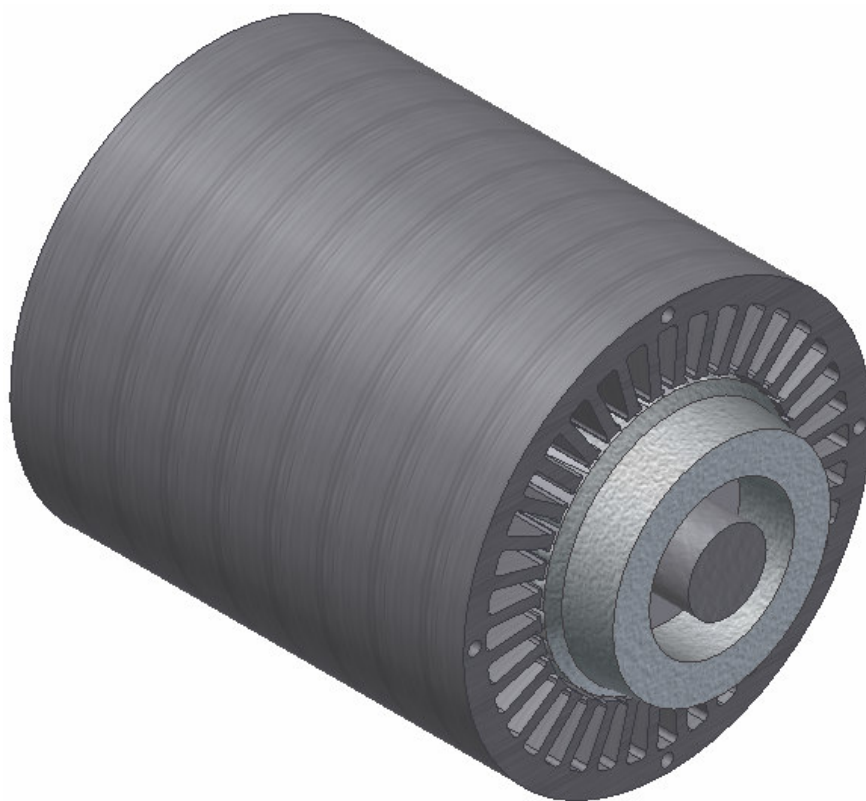
3 fázový asynchronní motor: $P_1=200$ W, $U_1 = 230$ V, $f=50$ Hz , $n_s=1000$ ot/min, 6 pólový, 36 drážek, $\eta_{\%} = 57\%$,

6.2 Tvorba modelu

V programu Autodesk Inventor byly vytvořeny jednotlivé komponenty stroje (hřídel, ložiska, stator, rotor, rotorové plechy a kostra stroje), které se následně umístily do sestavy (Obr.č. 6.1). Pro zjednodušení vytváření konečnoprvkové sítě v programu Ansys byly v modelu stroje odstraněny přebytečné prvky (ložiska, kostra stroje) a změněny parametry jednotlivých prvků (délka hřídele), viz Obr.č. 6.2.



Obrázek 6.1 Kompletní sestava stroje – řez

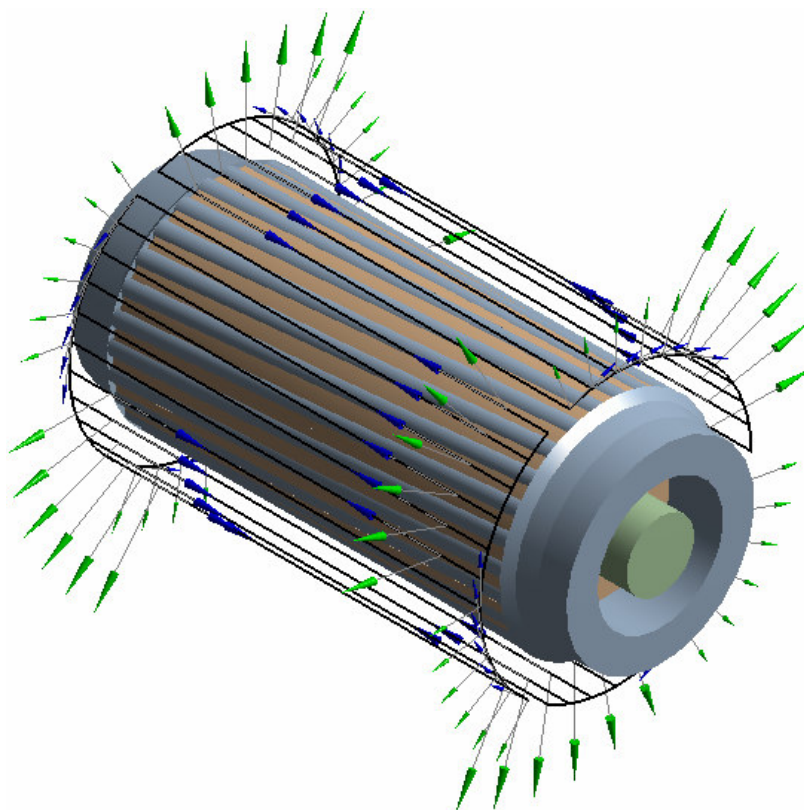


Obrázek 6.2 Konečný model stroje pro import.

6.3 Import modelu a vytvoření vinutí

Model je importován do geometrie programu Ansys, kde je vygenerován na pomocný objekt. V tomto případě je použit formát souboru *.igs. Při použití jiného formátu souboru se importovaný model rozložil na více jednotlivých prvků, jejichž objem je společný pro více prvků. Tato chyba importu měla za následek nevytvoření konečnoprvkové sítě, z důvodu sdílení objemu více prvky. Jelikož má stroj 6 pólů a 36 drážek, tak bylo první vinutí vloženo do drážek č.1 a č.7. Další vinutí jsou chronologicky posunuty v následujících drážkách. Konečné vinutí je možno vidět na Obr. 6.3. Parametry nutné pro vytvoření tohoto vinutí jsou následující:

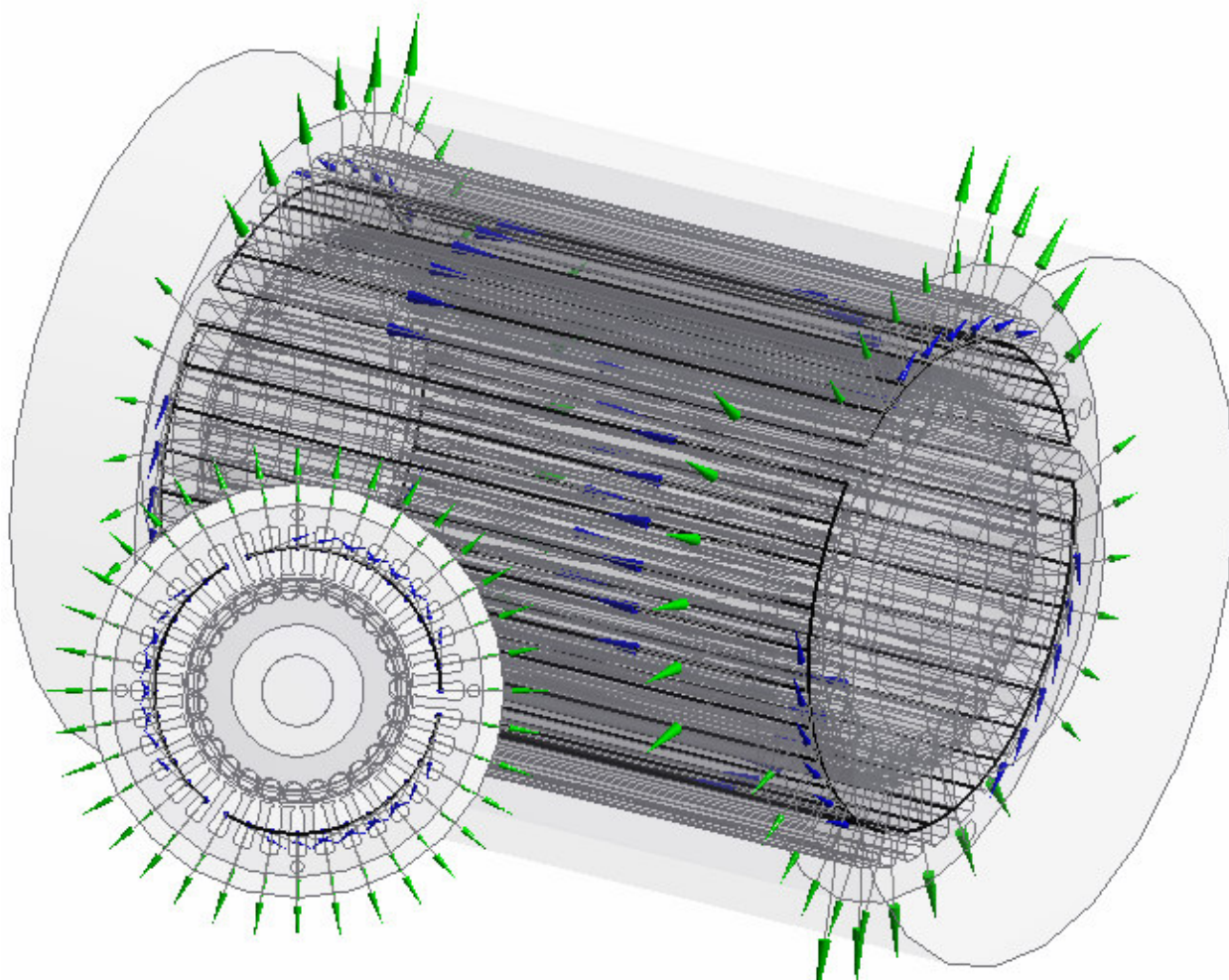
<i>fáze</i>	L1 (resp. L2, L3)	<i>přesah</i>	2,3mm
<i>číslo vinutí</i>	1 – 18	<i>vstupní poloměr</i>	34,5mm
<i>počet závitů</i>	1000	<i>výstupní poloměr</i>	34,5mm
<i>vstupní drážka</i>	1 (resp. 2, ...)	<i>výška vinutí</i>	10,8mm
<i>výstupní drážka</i>	7 (resp. 8, ...)	<i>šířka vinutí</i>	2,7mm
<i>směřování</i>	obloukové	<i>proud vinutím</i>	1,5A



Obrázek 6.3 Model stroje s vloženým vinutím.

6.4 Objekt pro okrajovou podmínku

Posledním vytvořeným objektem je prvek Solid (pevné těleso, v tomto případě vzduch, viz Obr.č. 6.4), který vyplňuje zbývající prostor okolo jednotlivých prvků stroje, v němž dochází k výpočtu. Přes tuto definovanou hranici nepřestupují žádné siločáry. Kdyby nebyla vytvořena tato hranice výpočet by pokračoval do nekonečné vzdálenosti. Došlo by tak k zahlcení výpočetní paměti a k následnému přerušení výpočtu.

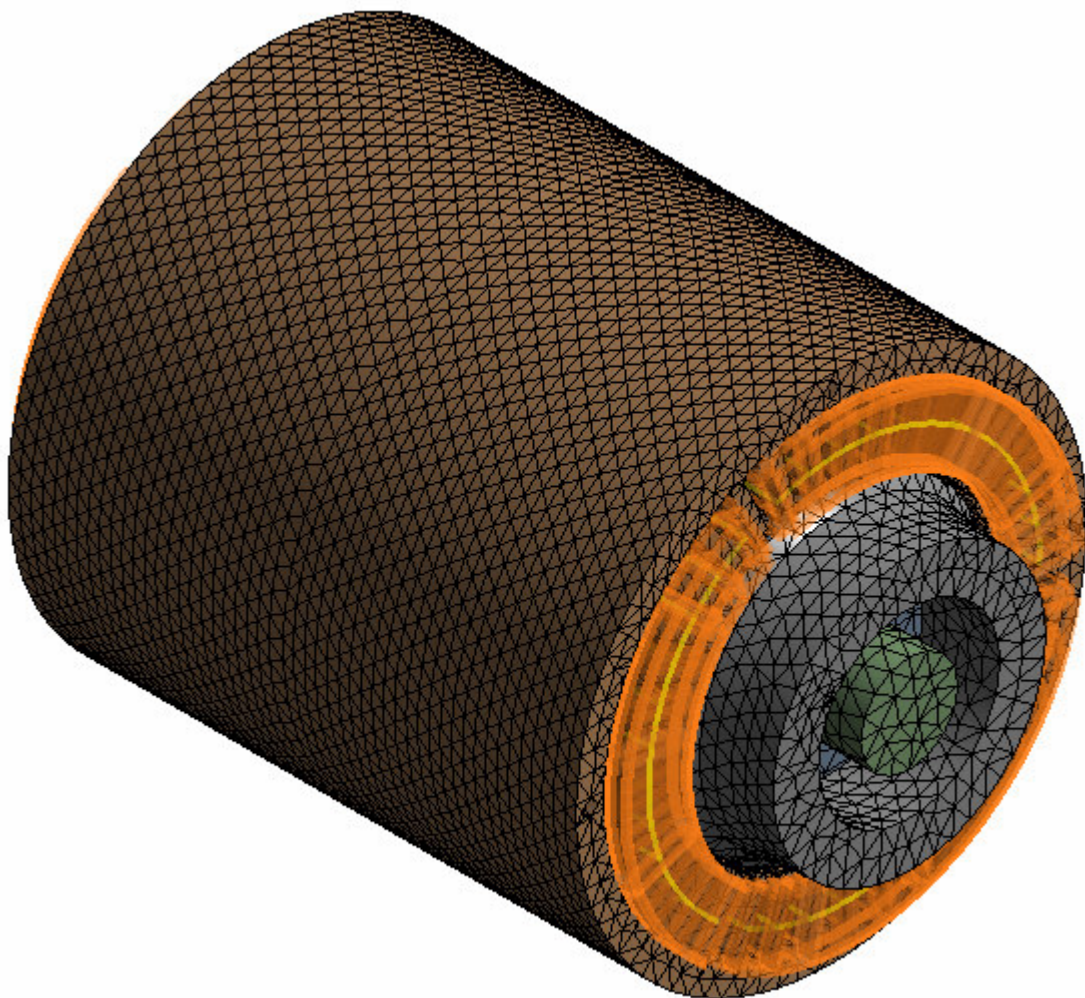


Obrázek 6.4 Vzduch vyplňující zbývající prostor okolo jednotlivých součástí.

6.5 Výpočetní síť

Na všechny objekty je aplikována metoda dominantních trojúhelníků s přizpůsobující se opravou. Při aplikaci dominantních čtverců je geometrie okolo vzduchové mezery a rotoru příliš složitá a dojde k přerušení vytváření výpočetní sítě. Algoritmus pro automatické vytváření sítě v tomto případě nedokáže již vytvořit výpočetní síť. Z tohoto důvodu je aplikována metoda dominantních trojúhelníků. Na jednotlivé prvky je pak aplikována rozdílná velikost elementů:

stator	$3e^{-3}m$ (velikost elementu)
rotor	$3e^{-3}m$
solid	$4e^{-3}m$
rotorové plechy	$3e^{-3}m$
hřídel	$3e^{-3}m$



Obrázek 6.5 Výpočetní síť na pomocném modelu stroje.

6.6 Nastavení simulace

Nastavil se typ analýzy na magnetickou a zadal proud tekoucí vnutím. Důležitou součástí nastavení je okrajová podmínka magnetického toku, která byla přiřazena k modelu vzduchu. V neposlední řadě je důležité u materiálových vlastností nastavit relativní permeabilitu, a u nelineárních materiálu B-H křivku prvotní magnetizace.

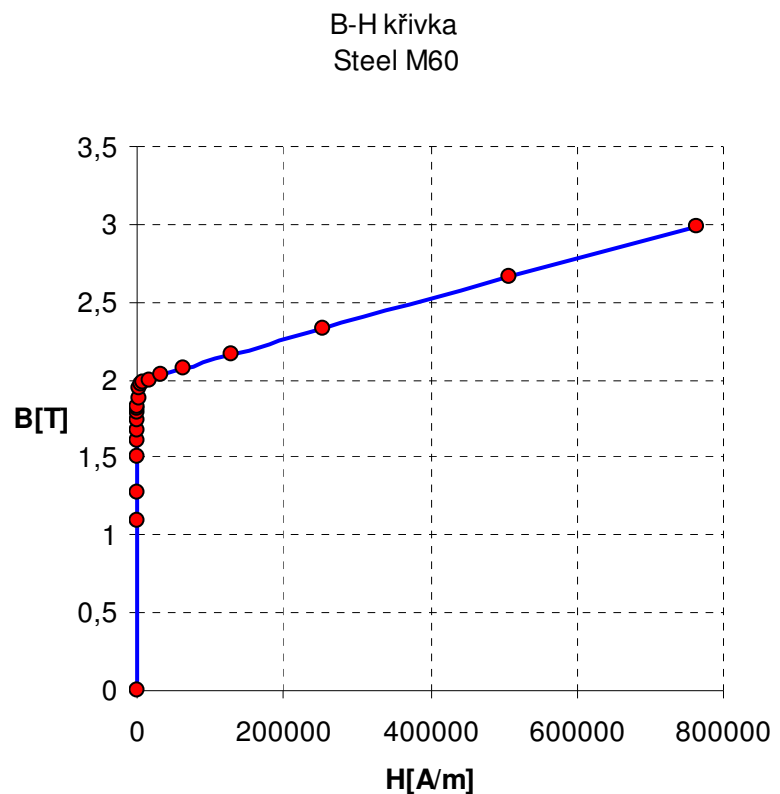
Jako řešení simulace se vložil výpočet rozložení magnetické indukce a intenzity.

6.6.1 B-H křivka

Pro nelineární výpočet magnetických polí je důležité pro statorové a rotorové plechy vložit B-H křivku prvotní magnetizace. Ta je vytvořena z následujících hodnot pro ocel M60:

Tabulka č. 6-1 B-H křivka

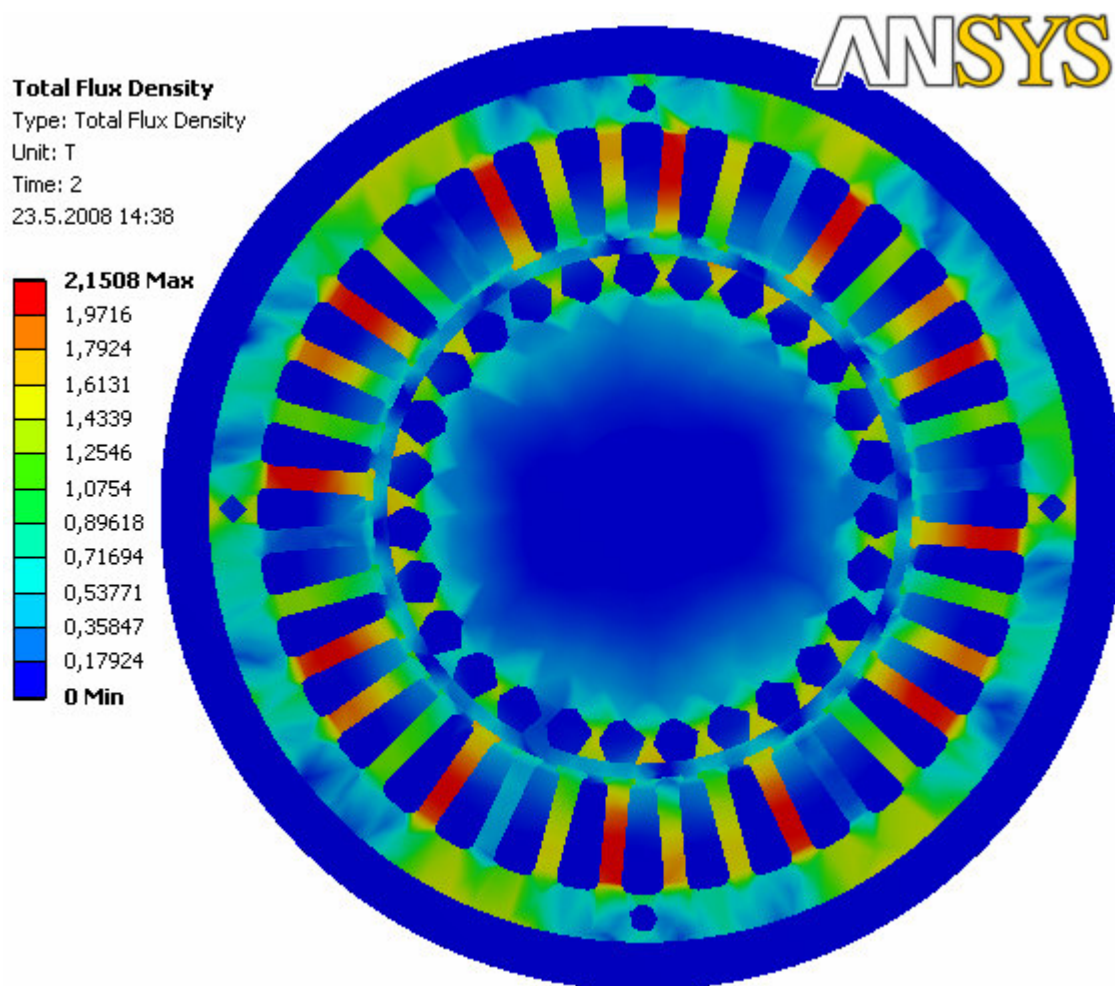
H [Am ⁻¹]	B [T]
0,00	0,000
11,90	1,090
15,91	1,280
28,00	1,500
47,70	1,610
79,60	1,670
159,10	1,738
318,20	1,795
556,90	1,815
795,50	1,830
1591,10	1,885
3182,20	1,945
5568,00	1,970
7955,00	1,980
15911,00	2,000
31822,00	2,030
63644,00	2,078
1,27E+05	2,166
2,55E+05	2,334
5,09E+05	2,660
7,64E+05	2,990



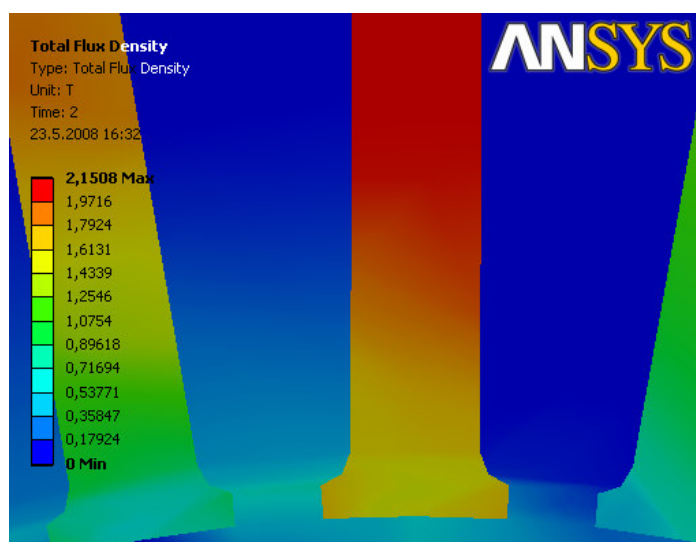
Obrázek 6.6 B-H křivka

6.7 Výsledky simulace

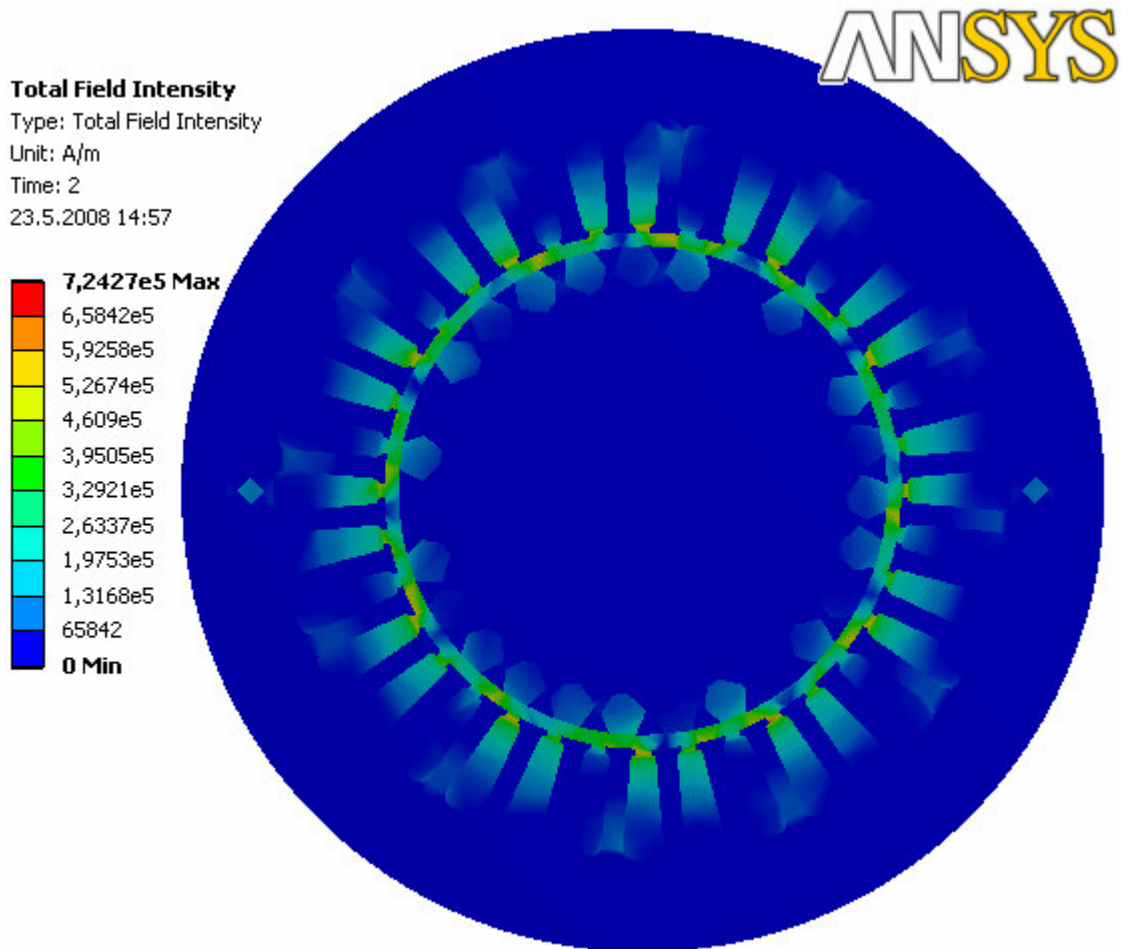
Výsledkem simulace bylo rozložení magnetické indukce a magnetické intenzity.



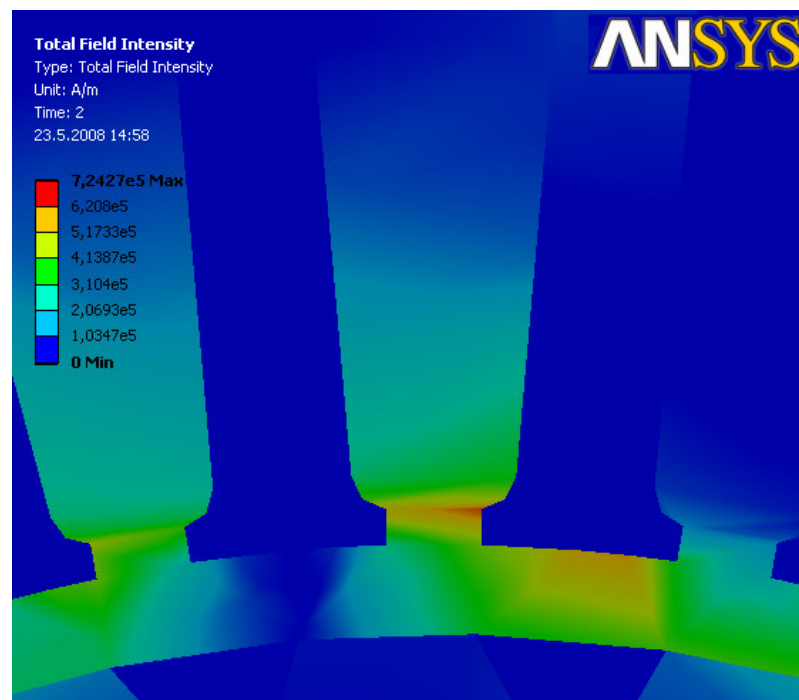
Obrázek 6.7 Rozložení hustoty magnetické indukce



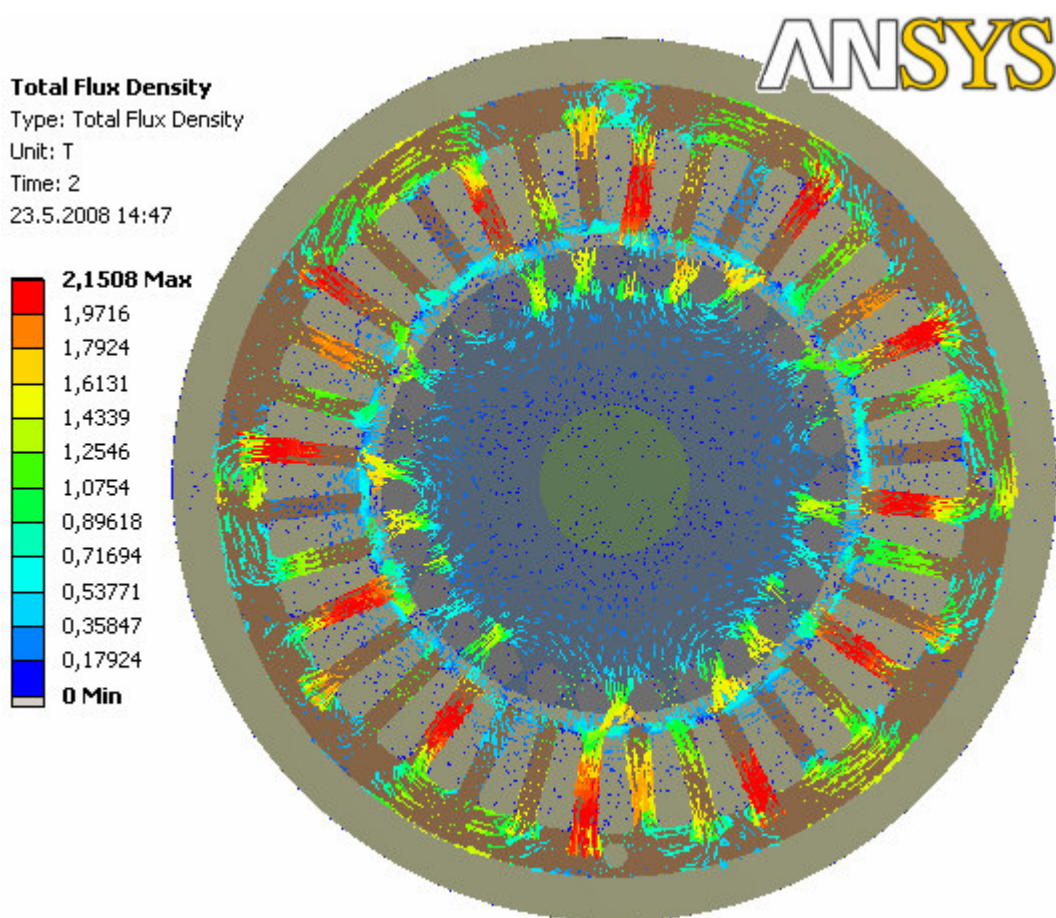
Obrázek 6.8 Detail rozložení hustoty magnetické indukce



Obrázek 6.9 Rozložení intenzity magnetického pole ve vzduchové mezeře



Obrázek 6.10 Detail rozložení intenzity magnetického pole ve vzduchové mezeře



Obrázek 6.11 Vektorové rozložení hustoty magnetické indukce



7 ZÁVĚR

Model simulovaného asynchronního stroje byl nakreslen programem Autodesk Inventor a vygenerován do souboru s příponou *.SAT. Tento typ souboru byl nedostačující z důvodu rozkladu modelu na dílčí části, při vygenerování modelu v programu Ansys. Vyhovující byl typ souborů s příponou *.IGS, u kterého nedošlo k předchozímu problému. Další nezbytnou částí modelu byla nutnost vytvořit vinutí, které se zadává do tabulky. V této tabulce jsou obsaženy následující údaje: číslo fáze, číslo vinutí, počet závitů, vstupní drážka, výstupní drážka, typ uzavření, přesah, vstupní poloměr, výstupní poloměr, výška vinutí a šířka vinutí. Při vytváření konečnoprvkové sítě automatickou metodou, bylo napojení sítě kotvy rotoru na síť statorových plechů složité a tudíž se v tomto místě konečnoprvková síť vůbec nevytvořila. Pomocí vložení funkce rozdílných velikostí elementů jednotlivých prvků (sizing) a ruční nastavení metody generování sítě (umožňuje pouze verze 11.0) se povedlo konečnoprvkovou síť vygenerovat. Nové automatické metody generování sítě, ve verzi 11.0, jsou více optimalizované pro kvalitu výsledné sítě a pro usnadnění práce uživatele, ale i přesto jsou u více složitějších modelů nedostačující. Pro výpočet magnetických polí v elektrických strojích, by počet elementů ve vzduchové mezeře měl být okolo pěti. Vzhledem k nárokům na výpočetní výkon byla tato skutečnost opomíjena z důvodu konečného počtu elementů. Při třech elementech ve vzduchové mezeře by celkový počet elementů v modelu přesáhl několik milionů a to by znamenalo obrovské nároky na výpočetní výkon. Jednodušší řešení by bylo vytvořit pouze řez strojem (2D rozměr), ale to bychom nezískali celkový pohled na stroj, jelikož spojovací tyče kotvy nejsou v rovině s osou stroje.

Výsledné rozložení magnetické indukce uvnitř statorových plechů stroje (Obr. 6.7) dosahuje maximálních hodnot na mnoha místech mezi drážkami statorového vinutí, nejvíce však v úzkých částech. Toto vysoké nasycení materiálu povede k rychlému ohřevu stroje a při jeho nedostatečném chlazení i k přehřátí až k destrukci. Z vektorového rozložení magnetické indukce (Obr. 6.11) je patrné, že se jedná o šestipólový stroj. Při pohledu na rozložení magnetické intenzity (Obr. 6.9) je zřejmé, že výsledek je ovlivněn nízkým počtem elementů ve vzduchové mezeře stroje a tudíž se vyšší hodnoty intenzity promítají do okolních materiálů. Tyto výsledky jsou zatíženy výpočetní chybou programu Ansys. Při porovnání naměřených a vypočtených hodnot, lze zjistit, že vypočtené hodnoty se liší s hodnotami naměřenými. Tato skutečnost je zapříčiněna měřením magnetické indukce na povrchu kostry, která není zahrnuta v simulovaném modelu. Místo této kostry je v modelu umístěn objekt okrajové podmínky, jenž má vlastnosti vzduchu, namísto litého hliníku. Vhodnější by bylo umístění hallových sond uvnitř stroje.



Seznam použité literatury:

- [1] Halliday, Resnick, Walker,: Fyzika část 3 elektřina a magnetismus, VUTIUM
Brno, 2003
- [2] http://lucy.troja.mff.cuni.cz/~tichy/elektross/magn_pole/magn_indukce.html
- [3] <http://www.cez.cz>
- [4] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Kategorie:Elektromagnetismus>
- [5] <http://fyzika.jreichl.com>
- [6] <http://www.elektroworld.info//modules.php?name=News&file=article&sid=119>
- [7] Doc.Ing. Č. Ondrůšek, Elektrické stroje - laboratorní cvičení, skripta VUT Brno,
2003
- [8] Nápověda programu Autodesk Inventor® Professional 10.0, Copyright© 1996 –
2005, Autodesk, Inc.
- [9] Nápověda programu Ansys® 11.0, Copyright© 2007, Ansys, Inc.
- [10] <http://www.svsfem.cz>
- [11] prof Ing. Václav Bartoš, Csc., Ing. Bohumil Skála, Ph.D., Měření na elektrických
strojích, TYPOS, Plzeň 2006
- [12] Ing. Stanislav Kocman, Asynchronní stroje, Katedra obecné elektrotechniky FEI
VŠB-TU Ostrava, 2002
- [13] Nápověda programu Matlab® R2007a, Copyright© 1984-2007, The MathWorks, Inc.