

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

ANALÝZA MAGNETICKÉHO POLE POMOCÍ MKP A MAGNETICKÉ SONDY

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER`S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

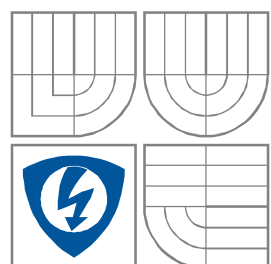
Bc. Tomáš Volf

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

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

ANALÝZA MAGNETICKÉHO POLE POMOCÍ MKP A MAGNETICKÉ SONDY

MAGNETIC FIELD ANALYSIS BY MKP AND MAGNETIC PROBE

Diplomová práce

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

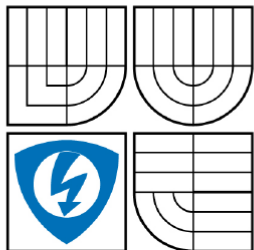
Bc. Tomáš Volf

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Miroslav Skalka

BRNO, 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Bc. Tomáš Volf

ID: 83141

Ročník: 2

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Analýza magnetického pole pomocí MKP a magnetické sondy

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Na základě analýzy v semestrálním projektu 2 navrhnete přípravek pro měření magnetického pole.
2. Proveďte měření magnetického pole na daném stroji pomocí magnetické sondy.
3. Porovnejte výsledky měření magnetickou sondou s MKP.
4. Posudte možnosti využití navrženého přípravku v průmyslu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Termín zadání: 1.10.2009

Termín odevzdání: 20.5.2010

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Skalka

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Projekt Analýza magnetického pole pomocí MKP a magnetické sondy se zabývá analýzou magnetického pole asynchronních strojů v příčném řezu. Tato analýza je zde podrobněji popsána spolu s nezbytnou teorií asynchronního stroje a programu ANSYS.

Magnetické pole zvoleného stroje je dále změřeno magnetickou sondou a výsledky jsou porovnány s výpočtem. Další součástí práce je návrh přípravku pro měření magnetického pole.

Abstract

The magnetic field analysis by MKP and magnetic probe project deals with magnetic field analysis of asynchronous machine cross section. This analysis is written in detail along with the necessary theory of asynchronous machine and the ANSYS program.

The magnetic field of selected machine is measured by magnetic probe and results are compared with calculation. The next part of thesis is draft of device for the magnetic field analysis.

Klíčová slova

asynchronní stroj; magnetické pole; analýza; stator; rotor; metoda konečných prvků; vinutí; uzel; element; meshování; okrajové podmínky; stupeň volnosti; magnetická indukce; proudová hustota; magnetická sonda; měřicí stativ; servomotor; měření; výpočet

Keywords

asynchronous machine; magnetic field; analysis; stator; rotor; the finite element method; winding; node; element; meshing; boundary conditions; degree of freedom; flux density; current density; magnetic probe; measuring stand; servomotor; measurement; calculation

Bibliografická citace

VOLF, T. *Analýza magnetického pole pomocí MKP a magnetické sondy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 55 s.
Vedoucí diplomové práce Ing. Miroslav Skalka.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Analýza magnetického pole pomocí MKP a magnetické sondy jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne

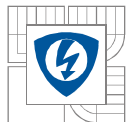
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Miroslavu Skalkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

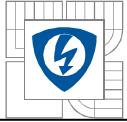
V Brně dne

Podpis autora



OBSAH

1 ÚVOD	12
2 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ A PROGRAM ANSYS	13
2.1 NUMERICKÉ METODY ŘEŠENÍ	13
2.2 POPIS POUŽÍVANÝCH NUMERICKÝCH METOD	13
2.2.1 METODA KONEČNÝCH DIFERENCÍ (MKD, THE FINITE DIFFERENCE METHOD)	13
2.2.2 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ (MKP, THE FINITE ELEMENT METHOD)	14
2.2.3 METODA HRANIČNÍCH PRVKŮ (MHP, THE BOUNDARY ELEMENT METHOD)	14
2.3 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ (MKP, THE FINITE ELEMENT METHOD)	14
2.4 TYPY ELEMENTŮ	15
2.4.1 PLANE13	15
2.4.2 PLANE53	16
3 ASYNCHRONNÍ STROJ	17
3.1 STATOR	17
3.1.1 VSY PÁVANÉ VINUTÍ.....	18
3.2 ROTOR	18
3.3 PRINCIP ČINNOSTI	19
3.4 OBVODOVÝ MODEL ASYNCHRONNÍHO MOTORU	20
4 ANALÝZA MAGNETICKÉHO POLE ASYNCHRONNÍHO STROJE	22
5 PŘÍPRAVEK PRO MĚŘENÍ MAGNETICKÉHO POLE	35
5.1 MAGNETICKÁ SONDA	35
5.1.1 MIKROSKOPIE MAGNETICKÝCH SIL	35
5.1.2 HALLOVA SONDA.....	35
5.2 NÁVRH PŘÍPRAVKU	36
5.3 MECHANICKÝ MĚŘICÍ STATIV	37
5.3.1 VÝPOČET SOUŘADNIC	40
5.3.2 OTOČNÝ KONDENZÁTOR.....	42
5.4 STATIV OVLÁDANÝ SERVOMOTORKY	42
6 MĚŘENÍ MAGNETICKÉHO POLE ASYNCHRONNÍHO STROJE	46
6.1.1 MĚŘENÝ STROJ	46
6.1.2 TEORETICKÝ ROZBOR	46
6.1.3 POSTUP MĚŘENÍ	46
6.1.4 VYPRACOVÁNÍ	46
6.1.5 POUŽITÉ PŘÍSTROJE A ZAŘÍZENÍ.....	49
6.1.6 ZÁVĚR	49
7 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ S VÝPOČTEM	50
8 ZÁVĚR	52



LITERATURA54

PŘÍLOHY56



SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: Rozdělení objektu na elementy</i>	13
<i>Obr. 2: Element PLANE13 [18]</i>	15
<i>Obr. 3: Element PLANE53 [18]</i>	16
<i>Obr. 4: Části asynchronního stroje [16]</i>	17
<i>Obr. 5: Kotva nakrátko [14]</i>	19
<i>Obr. 6: Obvodový model asynchronního motoru [17]</i>	20
<i>Obr. 7: Geometrie vytvořená v Inventoru</i>	22
<i>Obr. 8: Geometrie zobrazená v Ansysu</i>	22
<i>Obr. 9: Oblasti s materiály</i>	23
<i>Obr. 10: B-H křivka železa statoru a rotoru – materiál SA1010</i>	24
<i>Obr. 11: Mesh celého průřezu stroje včetně okolního vzduchu</i>	26
<i>Obr. 12: Vyobrazení uzlů celého průřezu stroje včetně okolního vzduchu</i>	26
<i>Obr. 13: Mesh – detail mezery a okolí</i>	27
<i>Obr. 14: Zobrazení vektoru statorového proudu</i>	28
<i>Obr. 15: Zobrazení proudové hustoty</i>	28
<i>Obr. 16: Siločáry – celý průřez stroje</i>	30
<i>Obr. 17: Magnetická indukce – celý průřez stroje</i>	30
<i>Obr. 18: Siločáry – detail drážek</i>	31
<i>Obr. 19: Magnetická indukce – detail drážek</i>	31
<i>Obr. 20: Siločáry – detail oblasti vektoru statorového proudu</i>	32
<i>Obr. 21: Magnetická indukce – detail oblasti vektoru statorového proudu</i>	32
<i>Obr. 22: Maximální magnetická indukce</i>	33
<i>Obr. 23: Průběh magnetické indukce ve středu vzduchové mezery</i>	33
<i>Obr. 24: Princip Hallova jevu [20]</i>	36
<i>Obr. 25: Mechanický měřicí stativ</i>	37
<i>Obr. 26: Uchycení sondy</i>	38
<i>Obr. 27: Spojení ramen</i>	38
<i>Obr. 28: Mechanismus rukojeti</i>	39
<i>Obr. 29: Kulový kloub</i>	40
<i>Obr. 30: Uspořádání otočného kondenzátoru</i>	42



<i>Obr. 31: Stativ ovládaný servomotor</i>	43
<i>Obr. 32: Uchycení sondy</i>	44
<i>Obr. 33: Spojení ramen</i>	44
<i>Obr. 34: Spojení dolního ramene s podstavcem</i>	45
<i>Obr. 36: Úhel vektoru magnetické indukce [15]</i>	46
<i>Obr. 37: Umístění měřených bodů [16]</i>	47
<i>Obr. 38: Zapojení magnetické sondy [15]</i>	49
<i>Obr. 39: B-H křivky materiálů SA1010 a Steel M19</i>	50
<i>Obr. 40: Průběhy magnetické indukce na kostře stroje</i>	51
<i>Obr. 41: Průběhy magnetické indukce materiálu SA 1010</i>	51



SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1: Relativní permeabilita použitých materiálů</i>	<i>24</i>
<i>Tab. 2: Nastavení dělení pro mesh</i>	<i>25</i>
<i>Tab. 3: Informace o modelu</i>	<i>34</i>
<i>Tab. 4: Naměřené hodnoty magnetické indukce</i>	<i>48</i>



1 ÚVOD

Úkolem diplomové práce je navázat na semestrální projekt 2, v němž byl vytvořen výpočet magnetického pole průřezu zvoleného asynchronního stroje pomocí programu ANSYS. Původní výpočet se nezabýval kostrou stroje, v diplomové práci je brána v potaz.

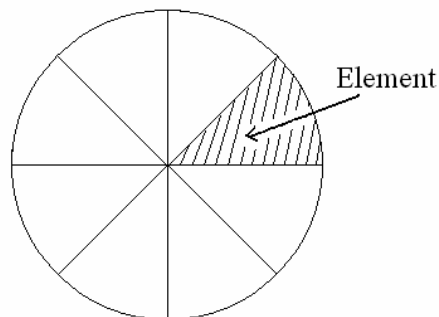
Dále je třeba navrhnout přípravek pro měření magnetického pole – pohyblivý měřicí stativ s magnetickou sondou – a posoudit možnosti jeho využití v průmyslu. Na zadaném elektrickém stroji je potom nutno pomocí magnetické sondy změřit magnetické pole a výsledek porovnat s výpočtem.

2 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ A PROGRAM ANSYS

2.1 Numerické metody řešení

Pro numerický výpočet rozložení elektromagnetického pole je vhodné použít některou z numerických metod.

Numerické metody řešení okrajových úloh vycházejí z principu sestavení složitého objektu z jednoduchých bloků (prvků, elementů) nebo rozdělení složitého objektu na malé, jednoduše definované bloky (Obr. 1).



Obr. 1: Rozdělení objektu na elementy

2.2 Popis používaných numerických metod

Mezi numerické metody řešení patří metoda konečných diferencí, metoda konečných prvků, metoda hraničních prvků. Popíšme tyto metody.

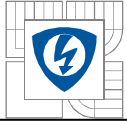
2.2.1 Metoda konečných diferencí (MKD, The Finite Difference Method)

Metoda konečných diferencí je nejstarší a nejjednodušší z numerických metod pro řešení okrajových úloh. Metoda je založena na obdobném řešení jako MKP. Tato metoda není příliš vhodná pro složitější geometrii. Postup řešení je následující :

1. Oblast, na níž hledáme řešení pole, pokryjeme sítí. Tvar sítě volíme podle požadované přesnosti výsledku a tvaru oblasti sítě s hexagonálními, čtvercovými, nebo trojúhelníkovými oky. V uzlech sítě zavedeme hledané potenciály.
2. V uzlech sítě nahradíme parciální derivace diferencemi. Potenciál v uzlu je vyjádřen pomocí okolních uzlů.
3. Soustavu lineárních rovnic řešíme pomocí některé eliminační metody. Řešení v jednotlivých bodech vyjadřuje hledaný potenciál.

Vlastnosti metody:

- Lze ji použít na libovolný typ rovnic.
- Řešení získáme jen v uzlech, pro ostatní je nutné použít interpolaci.
- Uzavřená hranice umožňuje řešit jen vnitřní problémy.
- Vedlejší podmínky je nutné realizovat „manuálně“.
- Jednoduchý princip vede na jednoduchý algoritmus.



2.2.2 Metoda konečných prvků (MKP, The Finite Element Method)

Metoda konečných prvků je účinná k řešení všech okrajových úloh inženýrské praxe popsaných diferenciálními rovnicemi. Už sousloví *konečný prvek* charakterizuje základní princip metody – transformace systému s nekonečným počtem neznámých (jakákoli část systému) na systém s konečným počtem neznámých, které jsou navzájem svázány prvky konečné velikosti.

Princip spočívá stejně jako u MKD v rozdělení oblasti, zavedení uzlů a uzlových potenciálů. Uzly však mohou být rozloženy v oblasti nerovnoměrně a mohou tak sledovat okraje hraničních ploch. V místě, kde se čeká prudká změna pole, se zavede větší hustota sítě.

Stejně jako u MKD se sestaví soustava rovnic pro neznámé uzlové potenciály. Koeficienty matice soustavy se ale nepočítají z diferencií, ale jako integrály přes elementární plošky nebo objemy, v jejichž vrcholech jsou uzly. Tyto elementární útvary nazýváme konečnými prvky.

Metoda nachází uplatnění pro výpočet polí složitých geometrických tvarů.

Podrobněji je metoda rozvedena dále.

2.2.3 Metoda hraničních prvků (MHP, The Boundary Element Method)

Metoda je vhodná pro řešení integrálních rovnic pole. Je velmi dobrým nástrojem pro řešení úloh z elektrostatiky, magnetických polí stacionárních i časově proměnných.

Využívá se zde princip diskretizace ploch vystupujících v integrálních rovnicích na prvky, stejně jako je tomu u MKP. Její výhoda spočívá v tom, že úlohy nemusí mít uzavřenou hranici a lze je využít pro řešení prostorově neomezených polí.

2.3 Metoda konečných prvků (MKP, The Finite Element Method)

Již řadu let představují numerické metody přední výpočetní nástroj. Zpočátku nezajímavá metoda konečných prvků se dnes stala jedním z hlavních výpočetních prostředků nejen ve strojírenství, pro kterou byla prvotně určena, ale také ve všech oblastech elektrotechnického průmyslu.

Metodu roku 1943 navrhl Richard Courant (1888-1972; americký matematik německého původu). O deset let později byla americkými inženýry použita při provádění pevnostních výpočtů leteckých konstrukcí. Systematické teoretické studium metody začalo v šedesátých letech, věnoval se mu Miloš Zlámal (1924 – 1997; zakladatel matematické teorie metody konečných prvků).

MKP je považována za jednu z nejúčinnějších přibližných metod pro řešení problémů popsaných diferenciálními rovnicemi. Svou nezastupitelnou roli sehrává jak při vývoji, návrhu a konstrukci nových elektrotechnických výrobků, tak i v případné rozměrové či materiálové optimalizaci stávajícího zařízení. Hlavní přednost metody spočívá v grafickém provedení často velmi abstraktních fyzikálních polí, ve kterých klasická technika řešení zavádí mnohdy značná zjednodušení na úkor přesnosti.

MKP umožňuje simulaci jevů a dějů, které by byly v praxi těžko uskutečnitelné nebo velmi nákladné. Pracuje s modelem fyzikálního problému, který je vytvořen pomocí výpočetního

software (např. ANSYS), ve kterém probíhá jeho další analýza a vyhodnocení s případnou rozměrovou či materiálovou optimalizací.

Základní myšlenkou metody je „ztrianglování“ vyšetřovaného tělesa, tedy rozdělení na konečný počet jednotlivých oblastí, což jsou pro rovinnou úlohu většinou trojúhelníky nebo čtyřúhelníky a pro prostorové úlohy čtyřstěny, pětistěny, kvádry a podobně. Poté se minimalizuje odpovídající potenciální energie na množině spojitých a po částech polynomických funkcí nad již vytvořenou triangulací. Vhodnou volbou bázových funkcí lze tuto úlohu převést na řešení soustavy lineárních (popř. nelineárních) algebraických rovnic, jejichž matice je řídká (obsahuje většinou nulové prvky).

Řídkost matice snižuje nároky na paměť počítače a počet prováděných aritmetických operací. To umožňuje řešit obrovské soustavy až o miliónech rovnic a miliónech neznámých.

Hlavní otázkou při určování elektrodynamických sil je výpočet elektromagnetického pole. Tento úkol se analyticky provádí velmi obtížně. K řešení se používají Maxwellovy rovnice, jejich výpočet 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. Tímto způsobem lze získat mnohem ucelenější představu a odhalit tak jinak skryté souvislosti. Numerické metody jsou tedy v podstatě jedinou možností, jak vyjádřit silové působení složitých tvarů a uspořádání v rámci elektromagnetických polí.

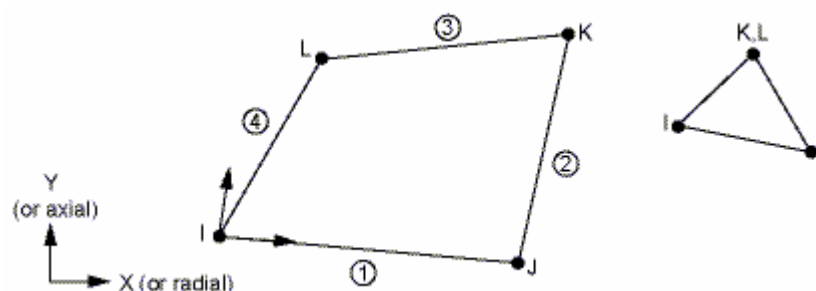
2.4 Typy elementů

Element je maticová reprezentace interakce mezi stupni volnosti různých uzlů. Elementem může být úsečka, plocha nebo pevné těleso a může být dvoj nebo trojrozměrný.

Z mnoha elementů, které je možno k výpočtu použít, vyberme následující dva. V našem případě byl použit první – PLANE 13.

2.4.1 PLANE13

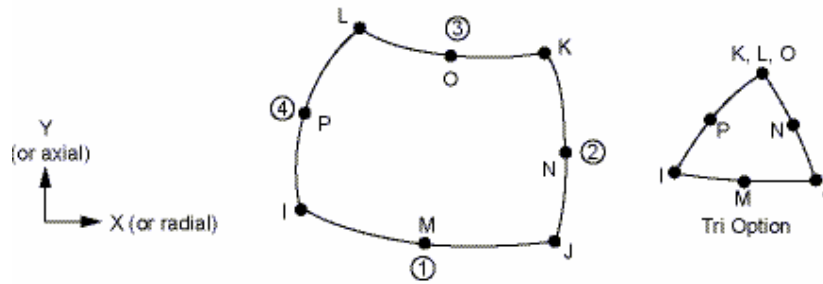
Element PLANE13 (Obr. 2) pomáhá modelovat 2D magnetické pole. Počet nodů tohoto elementu je 3 v případě trojúhelníkového tvaru a 4 u čtyřúhelníku. Tyto nody se nacházejí v rozích elementu. Tento element má 4 stupně volnosti na uzel – z složku magnetického vektorového potenciálu (AZ), časově integrovaný elektrický skalární potenciál (VOLT), elektrický proud a elektromagnetickou sílu (EMF).



Obr. 2: Element PLANE13 [18]

2.4.2 PLANE53

PLANE53 (Obr. 3) je velmi podobný elementu PLANE13, avšak na rozdíl od něj má dvojnásobný počet nodů – ty jsou umístěny nejen v jeho rozích, ale po jednom i v jeho stranách [10].



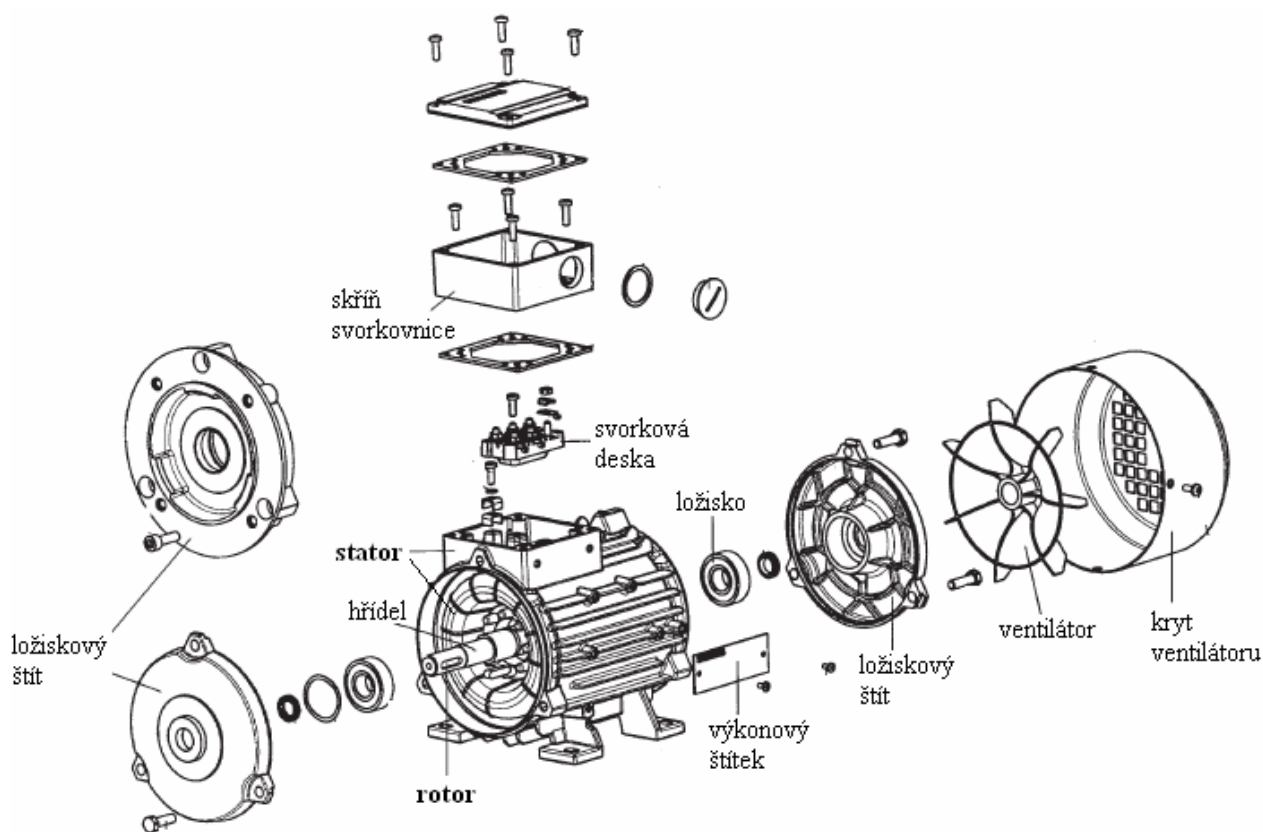
Obr. 3: Element PLANE53 [18]

3 ASYNCHRONNÍ STROJ

Asynchronní stroje, především ty s kotvou nakrátko, jsou již mnoho let jedny z nejrozšířenějších elektrických strojů. Je tomu tak především kvůli jejich konstrukční jednoduchosti, vysoké účinnosti a spolehlivosti, možnosti samostatného rozběhu a nízkým nákladům na údržbu. Rovněž u nich odpadá nevýhoda stejnosměrných strojů, a to nutnost komutátorů a kartáčů.

Asynchronní stroje umožňují elektromechanickou přeměnu energie. Lze je rozdělit na generátory, které mění mechanickou energii na energii elektrickou, a motory sloužící k přeměně energie elektrické na mechanickou – otáčivý nebo lineární pohyb.

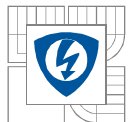
Stroj se skládá ze dvou hlavních částí (Obr. 4): pevné části – *statoru*, a části pohyblivé – *rotoru*.



Obr. 4: Části asynchronního stroje [16]

3.1 Stator

Na statoru je umístěno stejné trojfázové vinutí (ale i jednofázové a dvoufázové) jako u synchronního stroje, které napájí systém. Začátky a konce vinutí bývají vyvedeny na svorkovnici. Magnetický obvod statoru se skládá z plechů pro elektrotechniku o tloušťce 0,5 mm. Jsou to plechy z oceli s vyšším obsahem křemíku válcované za tepla. Mají-li vnější průměr menší nebo roven 990 mm, jsou lisovány vcelku, při průměru větším než 1000 mm se používají segmenty. Na vnitřním obvodu plechů se lisují drážky požadovaného tvaru pro uložení



statorového vinutí. Po vylisování se plechy z izolačních důvodů „odhrotí“ a ve většině případů se opatří izolačním lakem.

Jak již bylo řečeno, na statoru je umístěno stejné trojfázové vinutí, které napájí systém. Toto vinutí je umístěno v *drážkách*. Pro analýzu našeho stroje je důležitá *S-drážka*.

3.1.1 Vsypávané vinutí

U strojů do napětí 1 kV se používají kruhové vodiče zhruba do průměru 2 mm. Náklady na výrobu vinutí s použitím kruhových vodičů jsou menší než u vodičů profilových (obdélníkový průřez), avšak využitelnost drážky je nižší navíc s nedefinovaným napětím mezi závity.

Vsypávané vinutí se ukládá do polozavřených drážek s úzkým otevřením, kterým se postupně jednotlivé vodiče zavádějí („vsypávají“) do srážky (odtud je odvozen název vinutí – *vsypávané vinutí*).

Největší průměr vodiče používaný u vsypávaných vinutí zpravidla nepřevyšuje 2 mm, neboť vodiče většího průměru jsou příliš tuhé, špatně se upevňují v drážkách a činitel plnění drážky není příliš velký. Potřebného průřezu vodiče se dosahuje použitím několika dílčích paralelních vodičů.

Při návrhu strojů se pro snížení počtu paralelních vodičů volí vinutí s několika paralelními větvemi.

3.1.1.1 Činitel plnění drážky

Zuby statoru jsou po magnetické stránce jedním z nejvíce zatížených míst magnetického obvodu, proto je třeba volit takové rozměry drážek, které umožňují umístění nutného počtu vodičů vinutí a izolace v co nejmenším prostoru. Využití prostoru drážky pro umístění vodičů se vyjadřuje *činitelem plnění drážky* k_{dr} , který udává poměr celkového průřezu všech vodičů v drážce k ploše drážky S_d :

$$k_{dr} = \frac{S_v \cdot V_d \cdot n_p}{S_d} \quad [-], \quad (1)$$

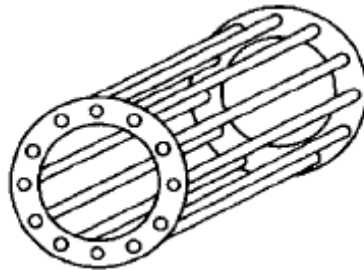
kde S_v je průřez dílčího vodiče, V_d počet vodičů v drážce a n_p počet paralelních drátů tvořících jeden vodič.

3.2 Rotor

Podle provedení rotorového vinutí je možné rozdělit asynchronní stroje následujícím způsobem:

- kroužkové** – vinutí je vsypávané, jedny jeho konce jsou spojeny do uzlu a vyvedeny na kroužky, které jsou přes kartáče spojeny s rotorovým spouštěčem (je možné navíc připojit zařízení sloužící k regulaci otáček),
- rotor nakrátko** – rotorové vinutí je trvale spojené s čelními kruhy nakrátko.

Nás bude dále zajímat skupina b), tedy stroj s rotorem nakrátko (Obr. 5).



Obr. 5: Kotva nakrátko [14]

Motory s kotvou nakrátko mají rotorové drážky zaplněny vinutím z měděných, mosazných nebo hliníkových tyčí spojeným spojovacími kruhy nakrátko.

3.3 Princip činnosti

Již název asynchronní naznačuje, že kmitočet rotoru stroje je co do velikosti odlišný od kmitočtu magnetického pole vytvořeného vinutím uloženým v drážkách statoru. Čím větší je zatížení stroje, tím jsou menší jeho otáčky. Rozdíl mezi otáčkami točivého magnetického pole statoru a otáčkami rotoru je možné vyjádřit tzv. *skluzem*, který je dán vztahy

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad [-] \text{ nebo} \quad (2)$$

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \cdot 100 \quad [\%], \quad (3)$$

kde n_1 jsou synchronní otáčky točivého magnetického pole a n jsou otáčky rotoru stroje.

Podívejme se na trojfázový asynchronní stroj. Ve statorových drážkách je uloženo trojfázové vinutí. Připojíme-li toto vinutí na zdroj trojfázového napětí, začne jím procházet elektrický proud, který vybudí v magnetickém obvodu statoru točivé magnetické pole. Otáčky tohoto pole nazvěme otáčkami synchronními. Lze je určit ze vztahu

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{p} \quad [\text{ot.} \cdot \text{min}^{-1}], \quad (4)$$

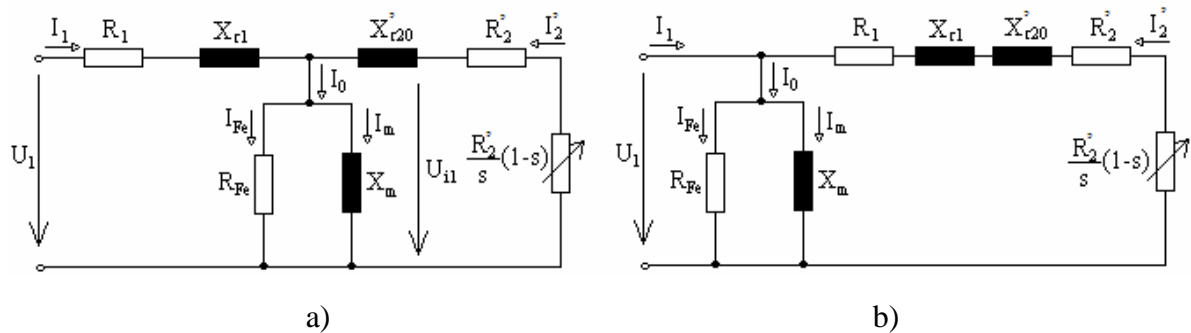
kde f je kmitočet napájecího proudu a p je počet pólových dvojic.

Díky tomuto točivému magnetickému poli statoru se indukuje napětí do vinutí rotoru. Pokud je rotorové vinutí spojené, začne jím procházet elektrický proud. Je známo, že na vodič protékající proudem v magnetickém poli působí síla, která může vyvolat točivý moment, proto se rotor roztočí stejným směrem, jakým se točí magnetické pole statoru. Velikost otáček rotoru uvádí rovnice

$$n = n_1 \cdot (1 - s) \quad [\text{ot.} \cdot \text{min}^{-1}]. \quad (5)$$

3.4 Obvodový model asynchronního motoru

Obvodový model asynchronního stroje je velmi podobný modelu transformátoru. Satorové i rotorové vinutí mají společný magnetický obvod, obě vinutí mají činný odpor a vlastní a rozptylovou indukčnost. Pro použití obvodového modelu na Obr. 6 b) se veličiny rotoru přepočítávají na počet závitů vinutí satoru. Přepočtené hodnoty se označují čárkou. Schéma se zjednodušuje přemístěním magnetizační větve na vstupní svorky.



Obr. 6: Obvodový model asynchronního motoru [17]

Z Obr. 6 b) je možné určit hodnotu elektrického proudu

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{r1} + X_{r20}')^2}} \quad [\text{A}]. \quad (6)$$

Uvedme také vzorec pro výpočet příkonu asynchronního motoru:

$$P_1 = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi \quad [\text{W}], \quad (7)$$

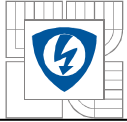
Kde m_1 je počet fází stroje a $\cos \varphi$ je účinník. Z příkonu se hradí činné ztráty ve vinutí satoru a ztráty v magnetickém obvodu motoru. Největší část příkonu (P_δ) však prochází skrze vzduchovou mezeru do rotoru stroje. Po odečtení ztrát ve vinutí rotoru dostáváme mechanický výkon stroje P_{mech} . Dalším při výpočtech hojně využívaným výkonem je výkon elektrická P_{el} , což je výkon, který se spotřebuje na všech činných odporech rotoru. Tento výkon se rovněž označuje jako výkon skluzový. Pomocí uvedených výkonů je možné vypočítat skluz, a to takto:

$$s = \frac{P_{el}}{P_\delta} \quad [-] \text{ nebo} \quad (8)$$

$$s = \frac{P_{el}}{P_\delta} \cdot 100 \quad [\%]. \quad (9)$$

Výkon na hřídeli P_2 je vlastně mechanický výkon P_{mech} zmenšený o mechanické ztráty stroje ΔP_{mech} a ztráty dodatečné ΔP_d :

$$P_2 = P_{mech} - \Delta P_{mech} - \Delta P_d \quad [\text{W}]. \quad (10)$$



Mechanický moment motoru lze určit z rovnice

$$M_{mech2} = \frac{P_{mech}}{\omega} \quad [\text{N}\cdot\text{m}]. \quad (11)$$

Úhlová rychlost rotoru je rovna rozdílu úhlových rychlostí točivých polí statoru ω_1 a rotoru ω_2 :

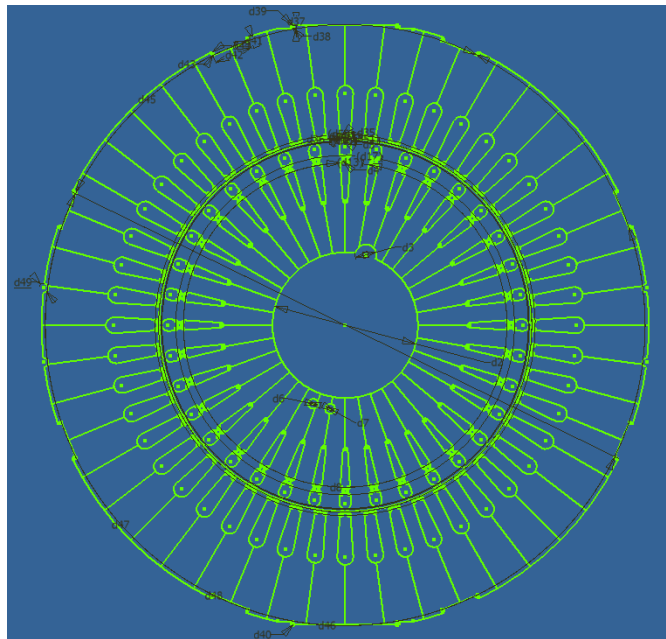
$$\omega = (\omega_1 - \omega_2) = \omega_1 \cdot (1 - s) \quad [\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}]. \quad (12)$$

Úhlová rychlost točivého pole statoru [10]

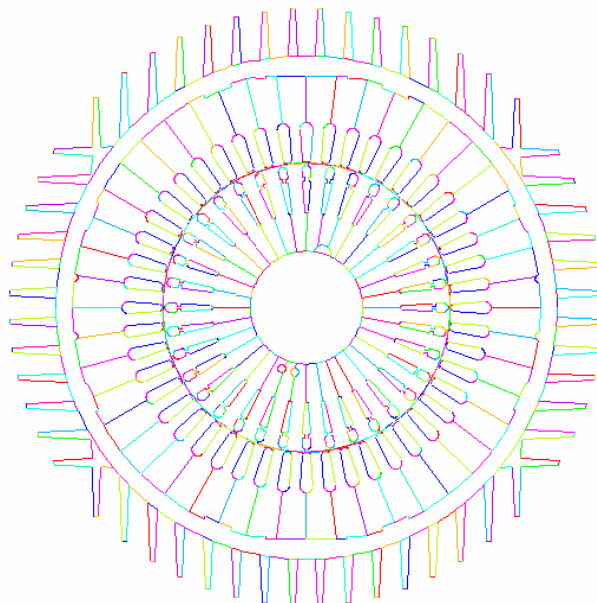
$$\omega_1 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p} \quad [\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}]. \quad (13)$$

4 ANALÝZA MAGNETICKÉHO POLE ASYNCHRONNÍHO STROJE

Při vytváření modelu stroje bylo nejprve třeba zhotovit geometrii průřezu stroje, k tomuto posloužil program Autodesk Inventor Professional 2008 (Obr. 7). Na tomto obrázku jsou rovněž viditelné některé kóty. Aby bylo možné docílit lepšího rozložení meshe, je potřeba správně stanovit rozměry elementů. Z toho důvodu je jak rotor, tak i stator v modelu rozdělený na jednotlivé segmenty – výseče – začínající např. uprostřed dna drážky a končící při obvodu statoru.



Obr. 7: Geometrie vytvořená v Inventoru

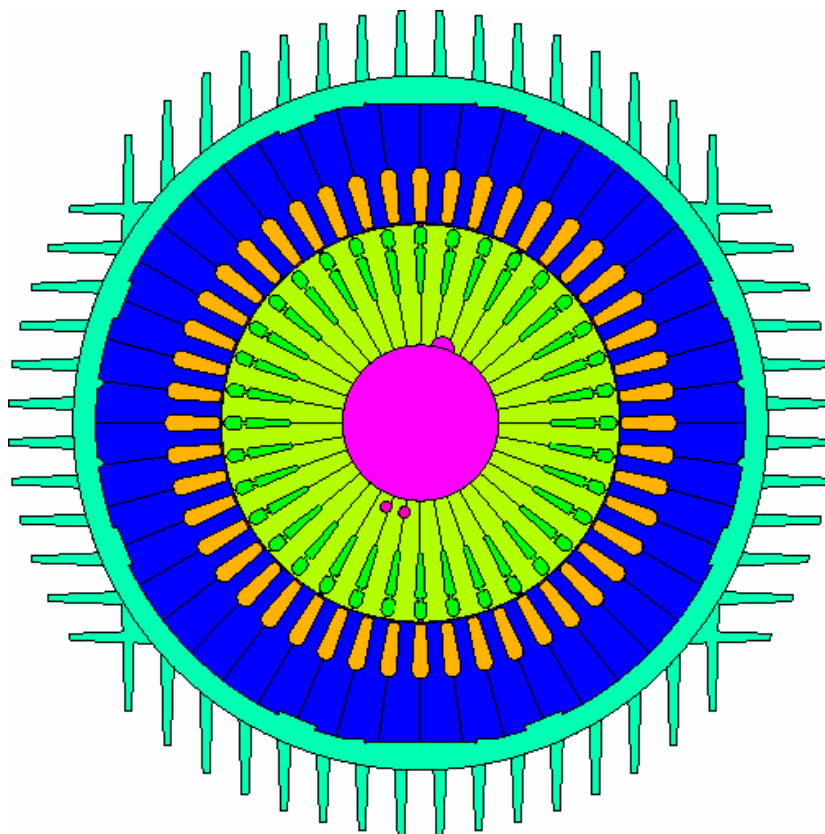


Obr. 8: Geometrie zobrazená v Ansysu

Kvůli importu vytvořené geometrie do Ansysu musí být model uložený v souboru formátu *.sat nebo *.igs. Jelikož se soubor formátu *.sat používá pro 3D modely, bylo vhodnější použít formát *.igs. Geometrie tedy byla přenesena do Ansysu (Obr. 8). Poněvadž rozměry zadávané v Inventoru měly za jednotky milimetry, zatímco Ansys používá metry, musel být model zmenšený tisíckrát.

Po menších úpravách geometrie přímo v Ansysu je možné přikročit k vytváření oblastí (areas, Obr. 9). Oblasti jsou barevně odlišené podle materiálů těmto oblastem přiděleným. Ansys přidělil oblasti hřídele barvu růžovou, růžové jsou i dva chladící otvory, jejich materiálem je však vzduch, rotorovému plechu byla přiřazena barva žlutá, rotorové drážky jsou zelené, drážky statoru jdou do oranžova, plech statoru je tmavě modrý a kostra světle modrá. Okolní vzduch zasahuje o 50 mm dále než kostra a pro přehlednost není znázorněný. Vzduchová mezera má šířku 0,15 mm, proto není na obrázku patrná.

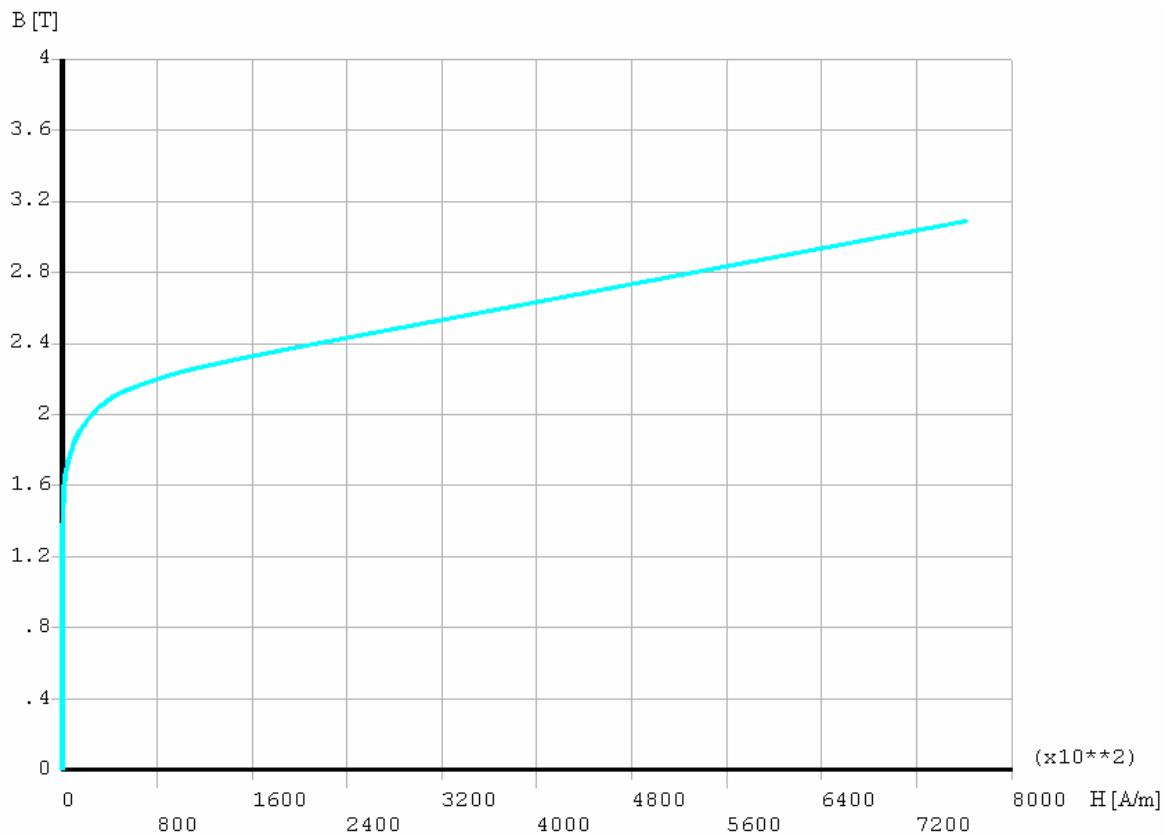
Všechny materiály jsou charakterizovány relativními permeabilitami (Tab. 1), výjimkou z pravidla jsou jha statoru a rotoru, jež jsou určena B-H křivkami (Obr. 10).



Obr. 9: Oblasti s materiály

Část modelu	Materiál	Relativní permeabilita
Hřídel	magnetický	4000
Statorové a rotorové drážky	Měď	0,99995
Vzduchová mezera, okolí, chladicí otvory,	Vzduch	1
Kostra	Hliník	1,022

Tab. 1: Relativní permeabilita použitých materiálů

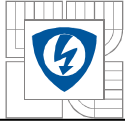


Obr. 10: B-H křivka železa statoru a rotoru – materiál SA1010

Nyní je možné přikročit k přípravě meshe (meshing), tedy k manuálnímu přidělení velikosti elementů jednotlivým čarám respektive oblastem.

V Tab. 2 je uvedeno nastavení dělení pro mesh u jednotlivých částí stroje, aby byla zajištěná potřebná velikost elementů tam, kde to vyžadujeme (tedy především zvýšená hustota v oblasti vzduchové mezery a jejím okolí). Malá velikost elementů (a následná zvýšená hustota meshe) na místech, která nevyžadují naši zvýšenou pozornost při výpočtu magnetické indukce (např. na hřídeli), by vedla ke zbytečnému zvýšení výpočtového času.

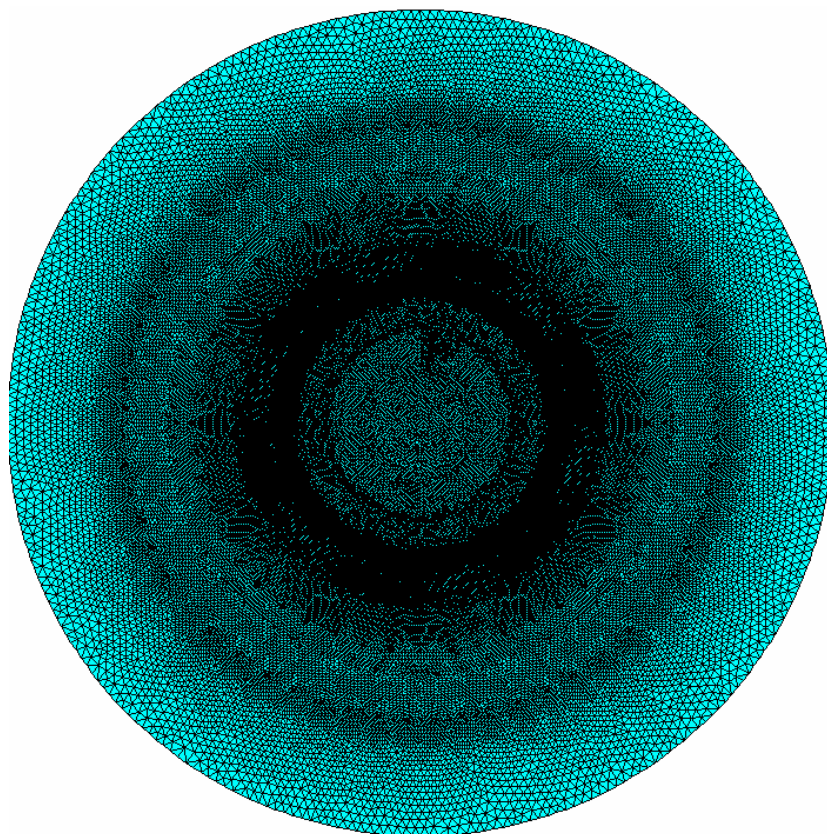
Tvorba meshe je generování výpočetní sítě (nastavení hustoty sítě). Model je „vymešovaný“ elementem **PLANE13** (Obr. 11). Jak již bylo uvedeno, počet nodů tohoto elementu je 3 v případě trojúhelníkového tvaru; tento tvar byl také použitý.



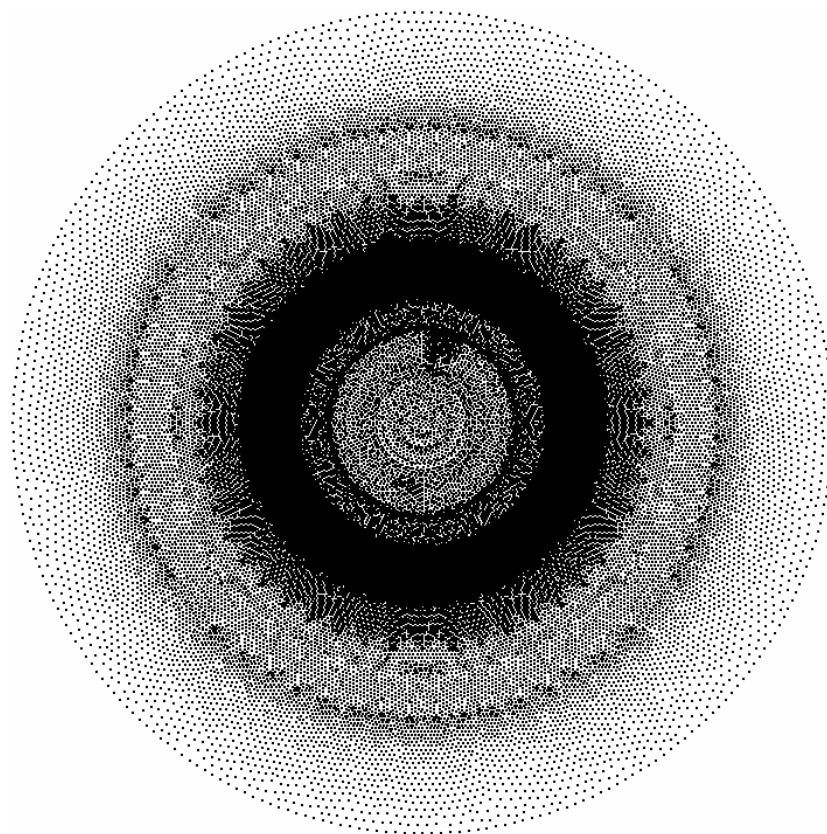
Část modelu stroje	Dělení pro mesh
hřídel	dělení čáry na 36 x 3 dílky – 0,0014m
povrch vnitřku rotoru	dělení na 12 dílků – 0,00134m
dno drážky rotoru	dělení na 2 dílky – 0,0006m
bok drážky rotoru	dělení na 12 dílků – 0,0011m
střední část drážky rotoru	dělení na 5 dílků – 0,0005m
půlkruh rot. drážky u vzduchové mezery	dělení na 20 dílků – 0,0003m
oblast klínu drážky rotoru	0,00005 m
vzduchová mezera	dělení oblasti na 3 elementy na šířku – 0,00005m
oblast klínu drážky statoru	0,00005m
bok drážky statoru	dělení na 20 dílků – 0,0006m
dno drážky statoru	dělení na 10 dílků – 0,0008m
povrch vnitřku statoru	0,0012m
vnější obvod statoru	0,003m
kostra	0,0017m
obvod okolního vzduchu	0,004m

Tab. 2: Nastavení dělení pro mesh

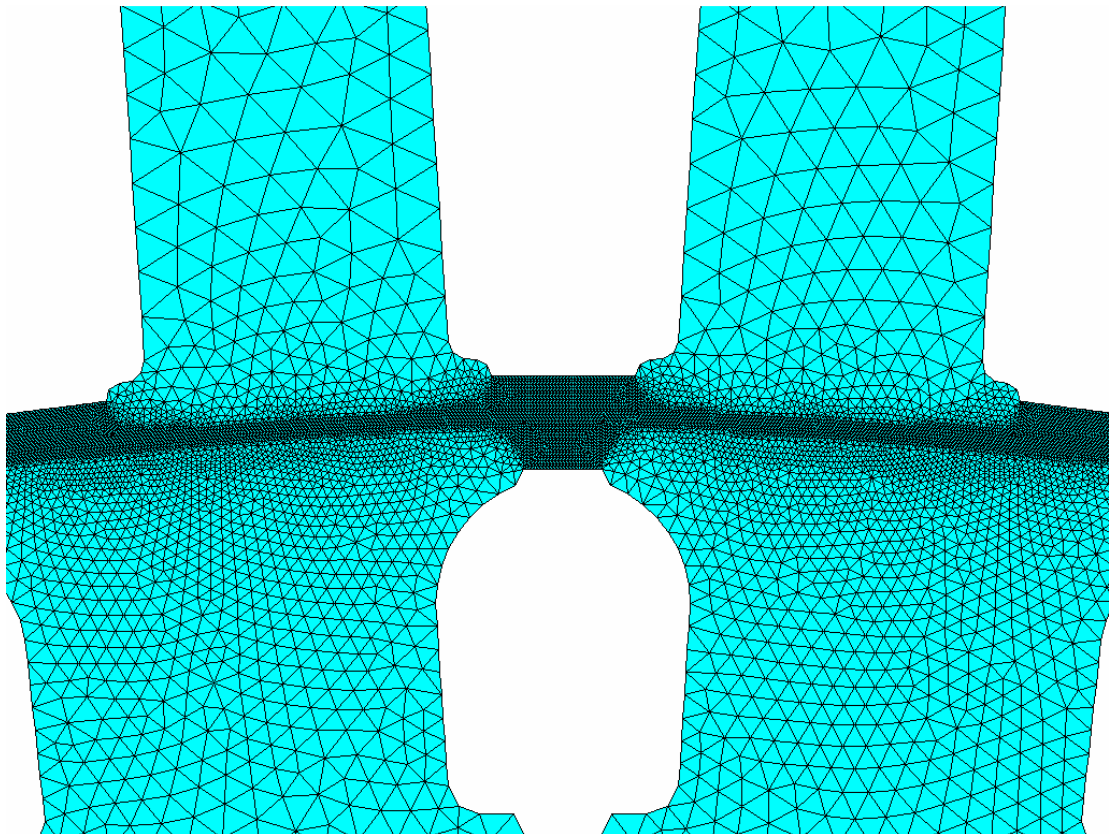
Na Obr. 12 jsou zobrazeny nody (uzly), jejich hustota je dána hustotou elementů. Síť elementů na Obr. 11 je nepřehledná, pro lepší představu Obr. 13 zobrazuje detail meshe vzduchové mezery a jejího okolí, pro zvýraznění tvarů byly z obrázku odebrány drážky stroje.



Obr. 11: Mesh celého průřezu stroje včetně okolního vzduchu



Obr. 12: Vyobrazení uzlů celého průřezu stroje včetně okolního vzduchu



Obr. 13: Mesh – detail mezery a okolí

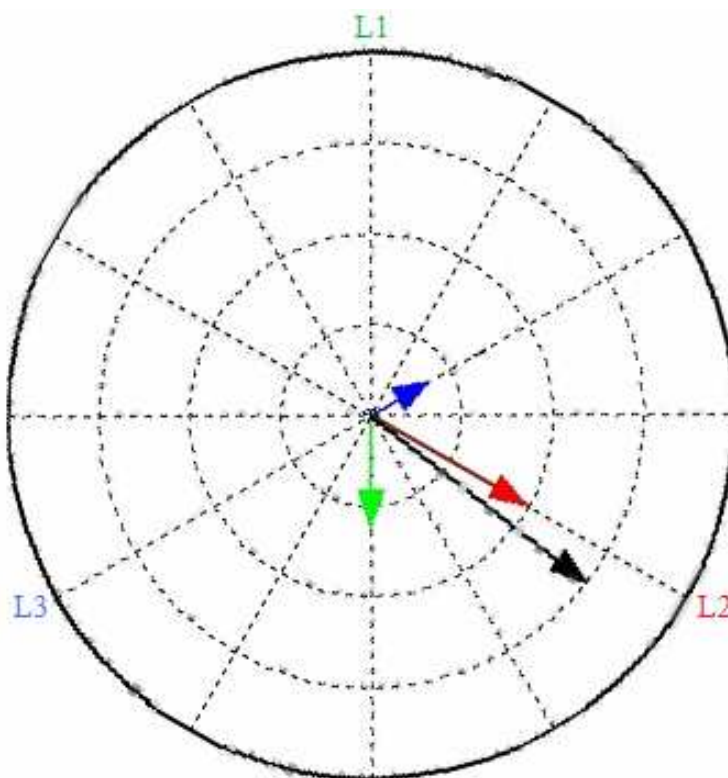
Jako další krok pro úspěšné vytvoření modelu stroje následuje definice okrajových podmínek (boundary conditions). Důležitou podmínkou elektromagnetické analýzy je *okrajová podmínka pro vektorový potenciál*, která musí být předepsána alespoň v jednom uzlu. Tato podmínka aplikovaná na hranici řešené oblasti jednoznačně určuje tuto oblast a všechny magnetické siločáry jsou k této hranici tečné. V modelu je touto hranicí kružnice kolem stroje ve vzdálenosti 30 mm od obvodu statoru.

Dále je potřeba zadat velikost proudové hustoty do všech drážek rotoru i statoru. Proudová hustota J charakterizuje proudové zatížení, je rovna poměru elektrického proudu a průřezu vodiče (vodičů).

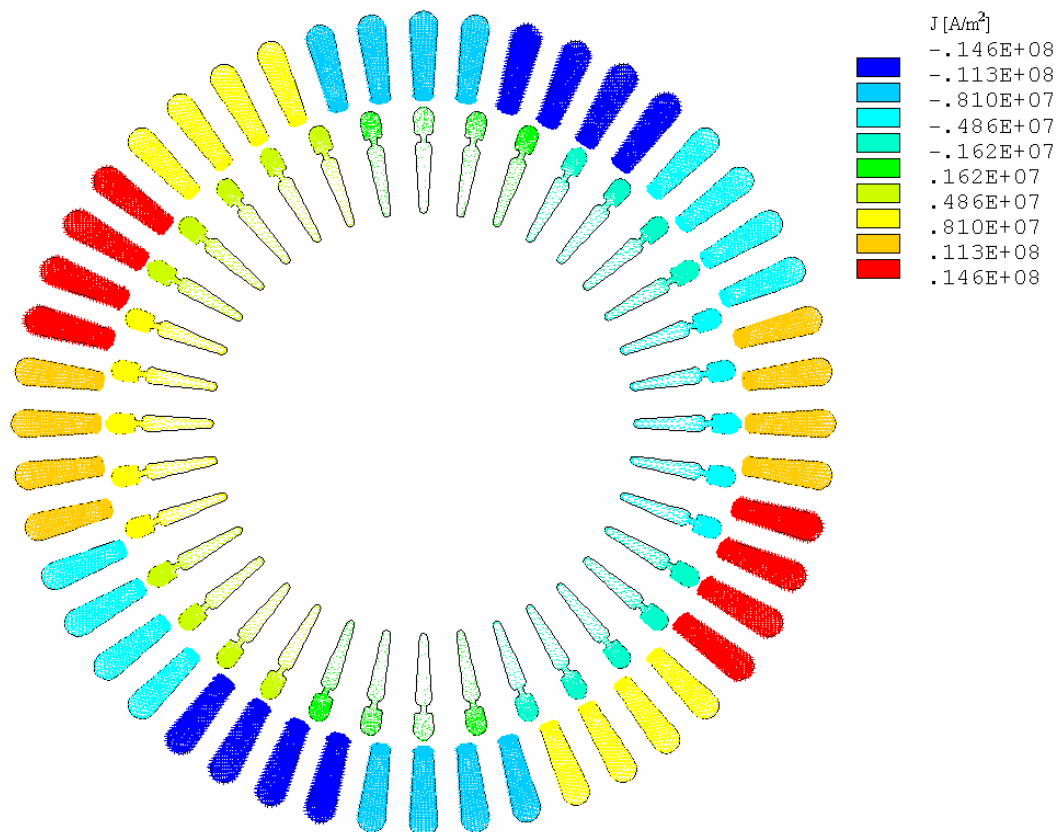
$$J = \frac{i \cdot N_v}{S_d} \quad [\text{A} \cdot \text{m}^{-2}], \quad (14)$$

kde i je elektrický proud, N počet vodičů jdoucích drážkou a S_d průřez drážky.

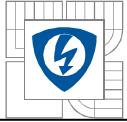
Rotorový i statorový proud jsou zadané vektorem a bylo nezbytné je přepočítat pro zadání do všech drážek stroje. Vektor statorového proudu byl přepočten pro jednotlivé fáze (Obr. 14) a podle schématu zapojení vinutí zadán do drážek (Obr. 15). Čím více se barva elementů blíží tmavě modré, tím je proudová hustota nižší, čím více je do červena, tím je vyšší.



Obr. 14: Zobrazení vektoru statorového proudu



Obr. 15: Zobrazení proudové hustoty



Ted' je možné přikročit k samotnému výpočtu a analýze spočtených dat.

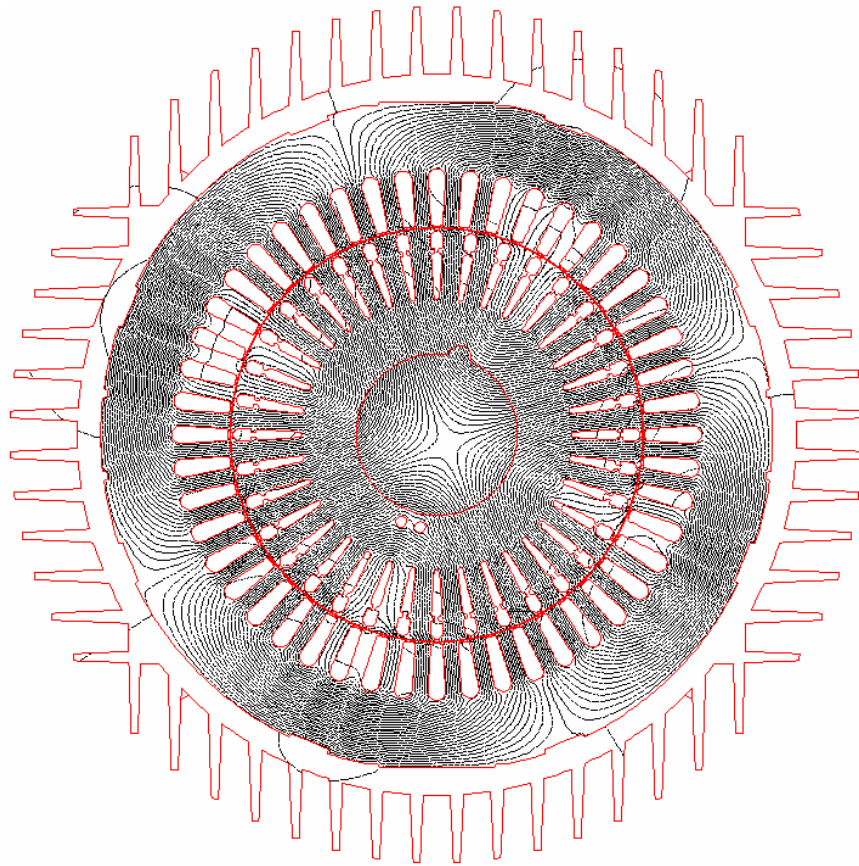
Vytvořený model asynchronního stroje umožňuje odečtení siločar a magnetické indukce v příčném řezu stroje.

Na Obr. 16 je znázorněno rozložení siločar v magnetickém obvodu vypočteného asynchronního motoru. Je patrné, že se jedná o čtyřpólový stroj. Vyšší hustota siločar se nachází v místě, kde se mění orientace vektoru zadávané proudové hustoty.

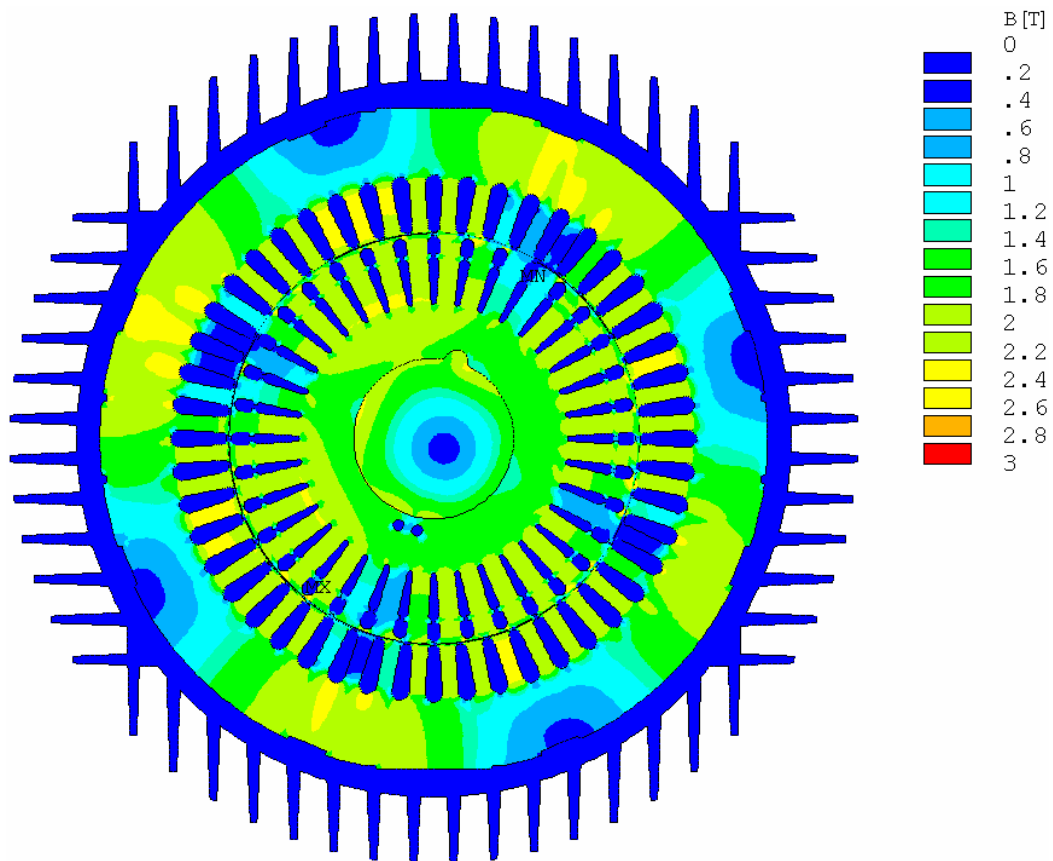
Magnetická indukce zobrazená na Obr. 17 nepřesahuje hodnotu 3 T. Nejnižších hodnot dosahuje v oblastech vinutí (rotorového i statorového – materiálem je nemagnetická měď), v okolním vzduchu a zhruba uprostřed hřídele, rovněž v oblastech klínů drážek a v půlkruhových oblastech ve jhu statoru v místech, kde se rozdělují skupiny siločar. Tam, kde je geometrie stroje zalomena v ostrých úhlech, dosahuje indukce vyšších hodnot, což je možné přičíst nahuštění siločar. Rovněž hustota meshe a velikost elementů mají vliv na rozložení magnetického pole.

Na Obr. 22 je zakreslena část stroje s nejvyšší magnetickou indukcí, kterou výpočet odhalil, a to část zubů statorové drážky u vzduchové mezery. Zde se velikost indukce přibližuje hodnotě 3 T; geometrie je zalomena téměř v pravém úhlu. Změnou tvaru zubu respektive drážky je možné upravit výsledné magnetické pole stroje.

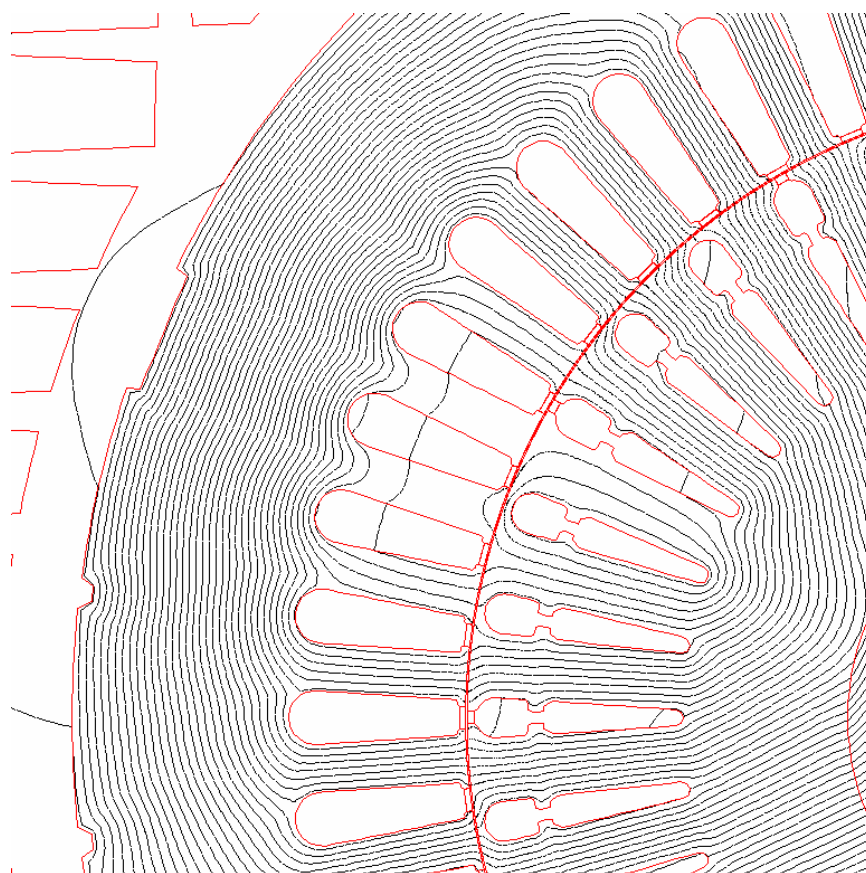
Na dalších obrázcích (Obr. 18 až Obr. 21) jsou zobrazeny detaily siločar a magnetické indukce. Na Obr. 23 je zachycen průběh magnetické indukce ve středu vzduchové mezery, opět je vidět, že se jedná o čtyřpólový stroj [10].



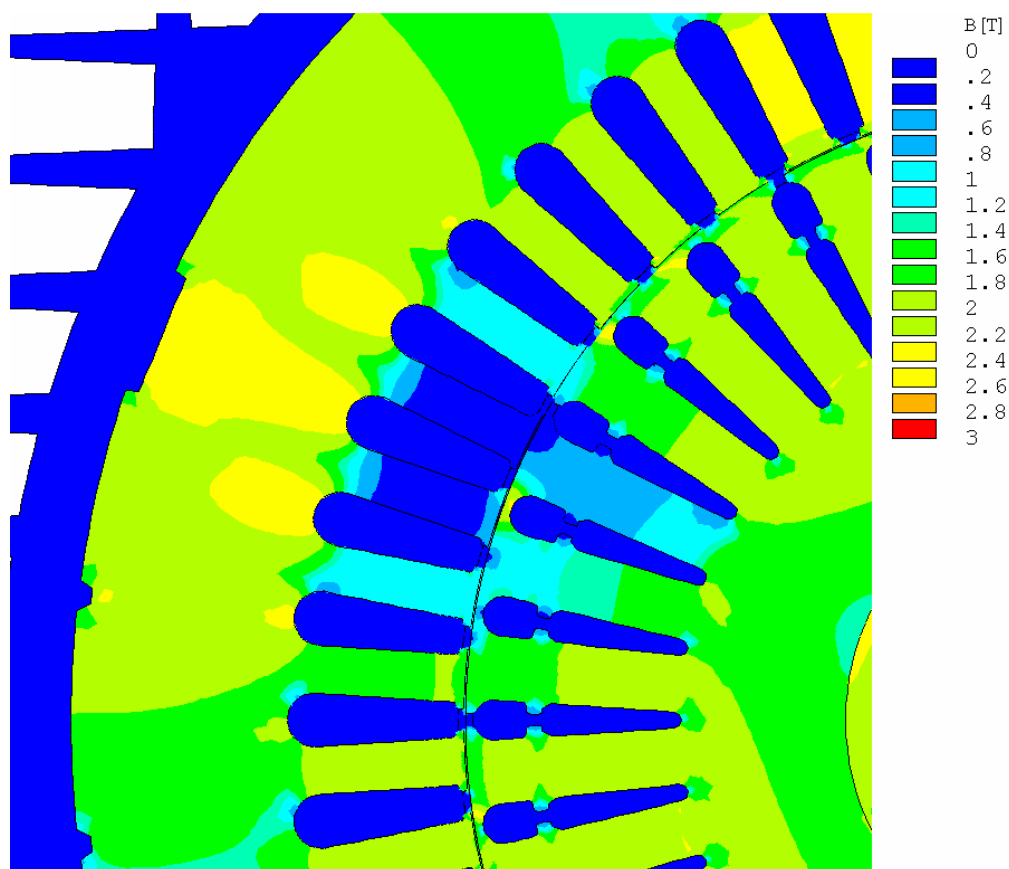
Obr. 16: Siločáry – celý průřez stroje



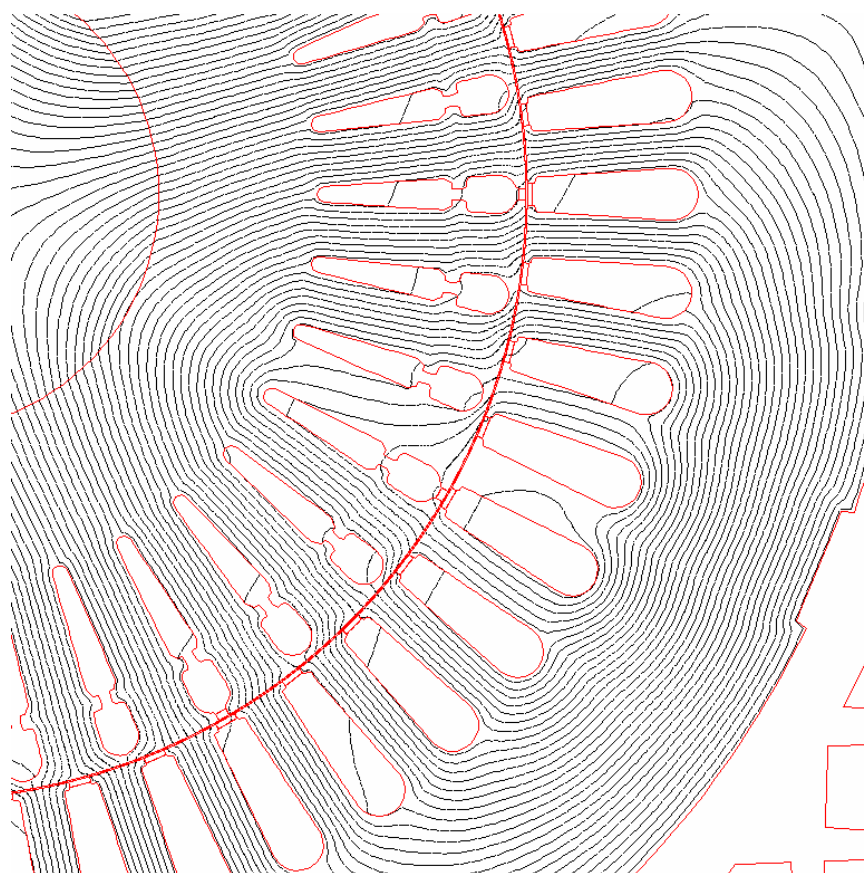
Obr. 17: Magnetická indukce – celý průřez stroje



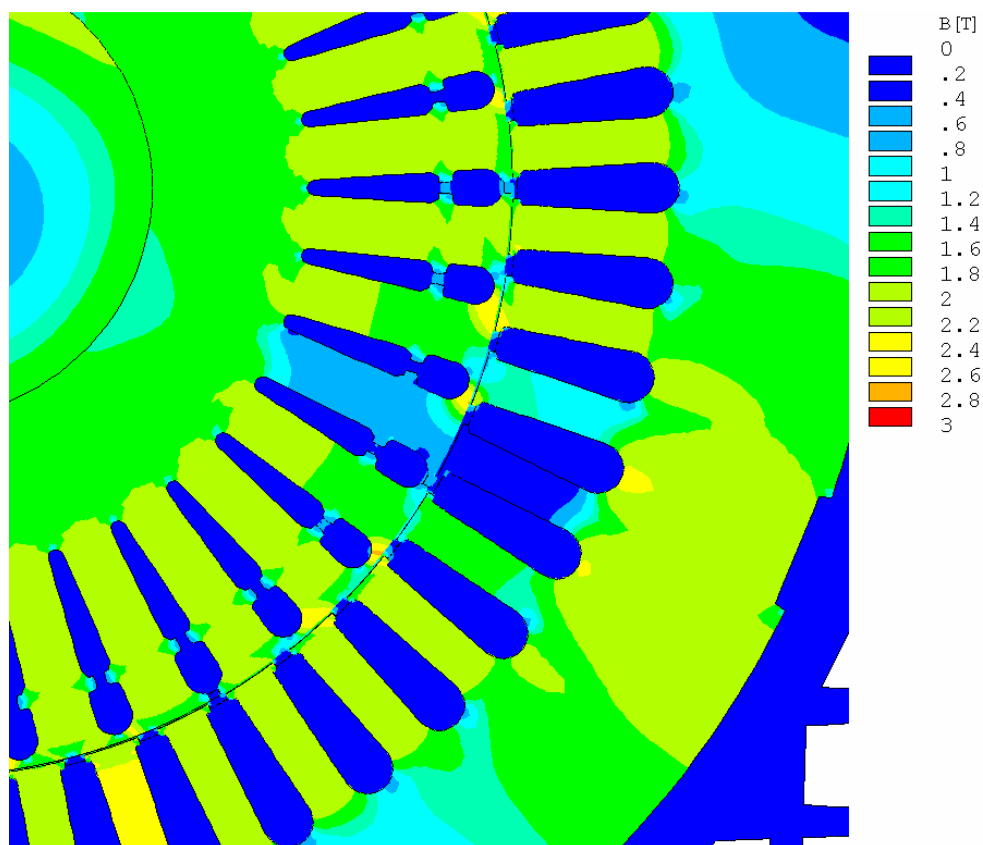
Obr. 18: Siločáry – detail drážek



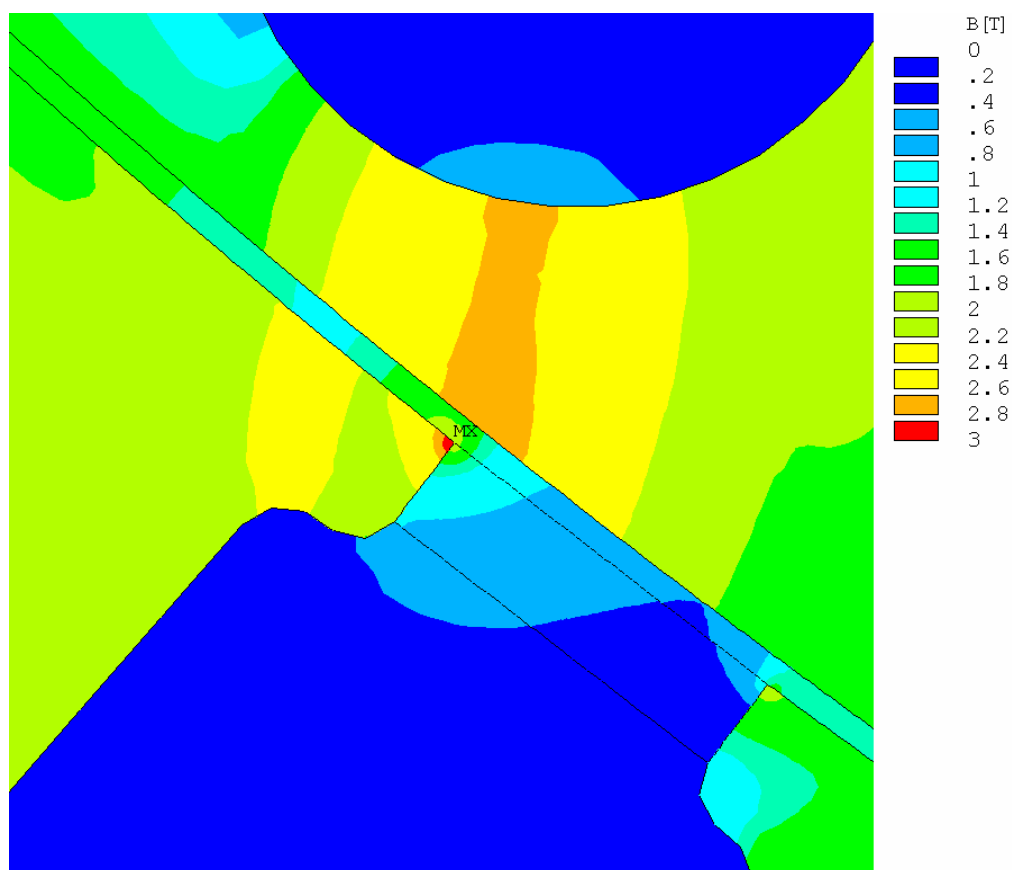
Obr. 19: Magnetická indukce – detail drážek



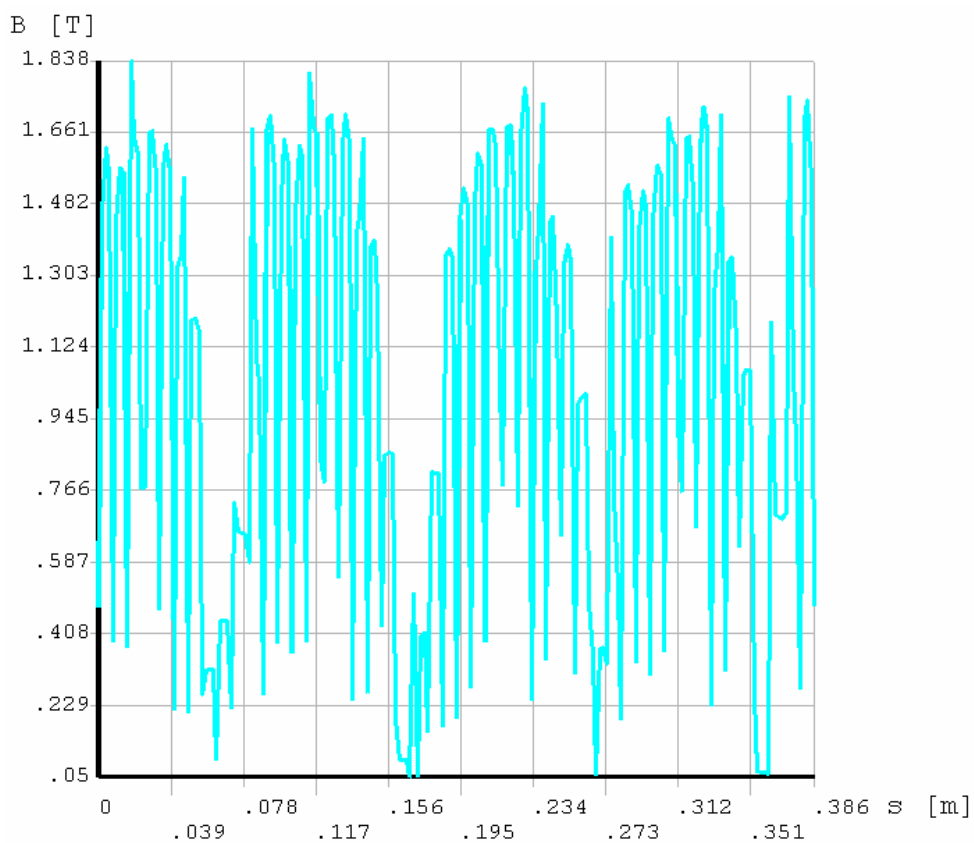
Obr. 20: Siločáry – detail oblasti vektoru statorového proudu



Obr. 21: Magnetická indukce – detail oblasti vektoru statorového proudu



Obr. 22: Maximální magnetická indukce



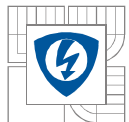
Obr. 23: Průběh magnetické indukce ve středu vzduchové mezery



Na závěr kapitoly uvedme tabulku charakterizující složitost modelu stroje vytvořeného v Ansysu. Je vidět, že výpočet probíhal v 207856 nodech.

Objekt	Počet
keypoints	1229
lines	1502
areas	283
nodes	207856
elements	415430

Tab. 3: Informace o modelu



5 PŘÍPRAVEK PRO MĚŘENÍ MAGNETICKÉHO POLE

5.1 Magnetická sonda

5.1.1 Mikroskopie magnetických sil

Mikroskopie založené na sondě skenující povrch těles zaznamenaly v průběhu posledních dvaceti let masivní rozvoj. Jednotlivé techniky jako skenující tunelovací mikroskopie, mikroskopie atomárních sil, mikroskopie magnetických sil a další pouze potvrdily svou jedinečnost v rámci dosahovaných rozlišení na atomové úrovni. A právě mikroskopie magnetických sil představuje jednu z nejelegantnějších metod studia magnetických vlastností povrchů při vysokém rozlišení a nenáročné přípravě vzorku.

V roce 1986 byla navržena technika spojující skenující tunelovací mikroskopii a profilometrii, kterou autoři G.Binnig, C. F. Quate a Ch. Gerber nazvali mikroskopii atomárních sil, a při které bylo dosaženo velmi přesných výsledků měření. O rok později se do popředí zájmu dostává metodika, při které se k dosažení obrazu využívá magnetické sály vzniklé interakcí mezi zmagnetovaným povrchem vzorku a zmagnetovaným hrotem, později nazývána jako *mikroskopie magnetických sil* (Magnetic Force Microscopy).

Princip, kterého mikroskopie magnetických sil využívá, je odvozený od metody mikroskopie atomárních sil, kdy lze říct, že je použita sonda v podobě magnetického hrotu. S ohledem na dlouho-dosahové působení magnetických sil vyvolaných vzorkem na zmagnetizovaný hrot jde o měření, které probíhá v nekontaktním režimu. Princip měření je možné popsat tak, že pružné raménko sondy s hrotem registruje změny stavu raménka v závislosti na interakci mezi magnetickým polem vzorku a hrotem z feromagnetického materiálu.

Raménko zakončené ostrým magnetickým hrotem je senzorem působící síly. Jakmile je sonda v dostatečné vzdálenosti od povrchu vzorku (obvykle jde o desítky až stovky nanometrů), vlivem magnetických interakcí mezi hrotem a vzorkem dochází ke změnám polohy raménka, které bývají většinou detekovány optickou cestou [8].

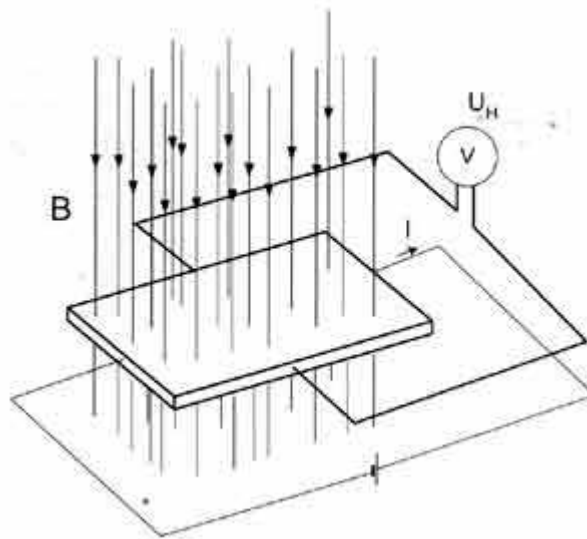
5.1.2 Hallova sonda

Pro měření magnetické indukce lze použít Hallova jevu. Hallovy sondy se mimo to často používají i k měření stejnosměrného a střídavého proudu.

Vložíme-li destičku polovodiče do magnetického pole a necháme-li jí příčně protékat stejnosměrný proud (Obr. 24), objeví se na opačných hranách destičky tzv. *Hallovo napětí*, jehož velikost je dána vztahem

$$U_h = k \cdot I \cdot B \quad [V], \quad (15)$$

kde k je konstanta závislá na materiálu, tloušťce a struktuře polovodičové destičky, I je stejnosměrný proud protékající destičkou a B indukce magnetického pole, v němž se destička nachází.



Obr. 24: Princip Hallova jevu [20]

Praktické řešení měření pomocí Hallovovy sondy by bylo možné popsat následovně: Vodič, jímž protéká měřený stejnosměrný nebo střídavý proud I_p , se obemkne kleštěmi magnetického obvodu. Ve vzduchové mezeře je zasunut Hallův generátor, kterým protéká řídicí stejnosměrný proud I_s . Současně s velikostí měřeného proudu I_p roste i velikost magnetické indukce ve vzduchové mezeře a tedy i jí odpovídající Hallovo napětí.

Dosažitelná přesnost je asi 1% přístroje lze použít pro měření proudu do kmitočtu asi 25kHz [20].

5.2 Návrh přípravku

Na následujících stránkách jsou popsány dva typy měřicích stativů. Zaprvé je to stativ mechanický, který se nastavuje do prostoru manuálně a souřadnice jsou odečteny, v druhém případě je to stativ ovládaný servomotoriky, které samy umožňují nastavení do požadované polohy.

Přípravek pro měření by se měl skládat ze stativu, na němž je upevněna magnetická sonda. Stativ musí umožňovat pohyb sondy ve všech třech osách a její natáčení v prostoru. Nabízí se možnost vytvořit stativ skládající se ze tří ramen, z nichž každé dovolí pohyb pouze v jedné ose prostoru, jeho výhodou je snadné odečtení souřadnic v prostoru. Další eventualitou je systém tvořený třemi rameny spojenými otočnými a kulovými klouby. Je to systém jednoduchý, přesný a praktický, především pro možnost povolit a vzápětí upevnit všechna ramena vůči sobě jediným otočením polohovací rukojeti. Problémem se může zdát přesné určení souřadnic v prostoru, toto však lze vyřešit odečítáním nastavovaných úhlů. Podobné struktury vyrábí firma NOGA ENGINEERING LTD z Izraele.

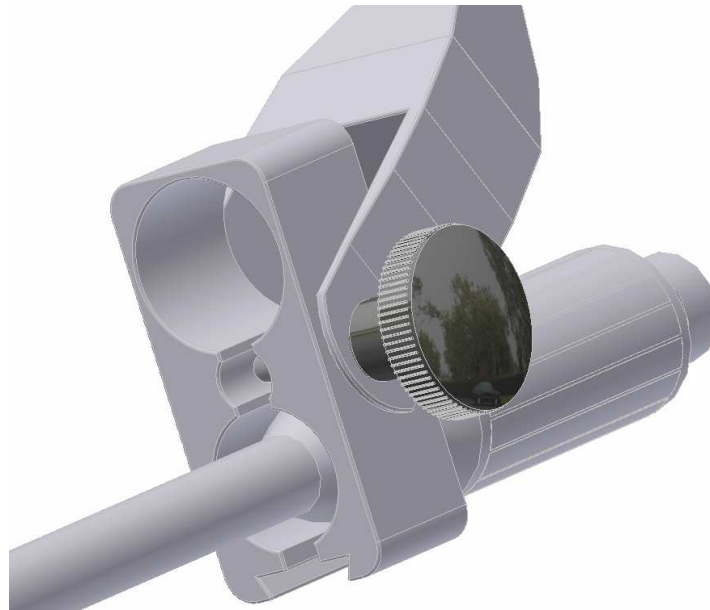
5.3 Mechanický měřicí stativ

Na Obr. 25 je zachycený měřicí stativ – přípravek pro měření magnetického pole. Tento stativ umožňuje uchycení magnetické sondy (6), poloha destiček Hallových sond je naznačena zářezem ve přední části sondy. Pohyb sondy je možný ve všech třech osách s natočením do všech směrů. To je zaručeno pohyblivými rameny (2 a 3). Tato ramena se mohou vůči sobě natáčet o 360°, aretována jsou mechanismem s rukojetí (7). Rameno (2) je spojeno s podstavcem (1) kulovým kloubem, taktéž je tomu i mezi ramenem (3) a úchytkou (4), která pomocí šroubu (8) drží otočnou svorku (5). Pozici podstavce umožňují upravit nožky (9) uchycené závitem. Při vhodném povrchu mohou být nožičky vyměněny za přísavky, aby bylo zajištěno lepší přilnutí. Úhly natočení ramen je možné snímat a při známé délce ramen lze spočítat přesnou polohu sondy v prostoru. Naměřené hodnoty mohou být zpracovány procesorem ukrytým v dutině podstavce a zobrazeny na displeji (10).



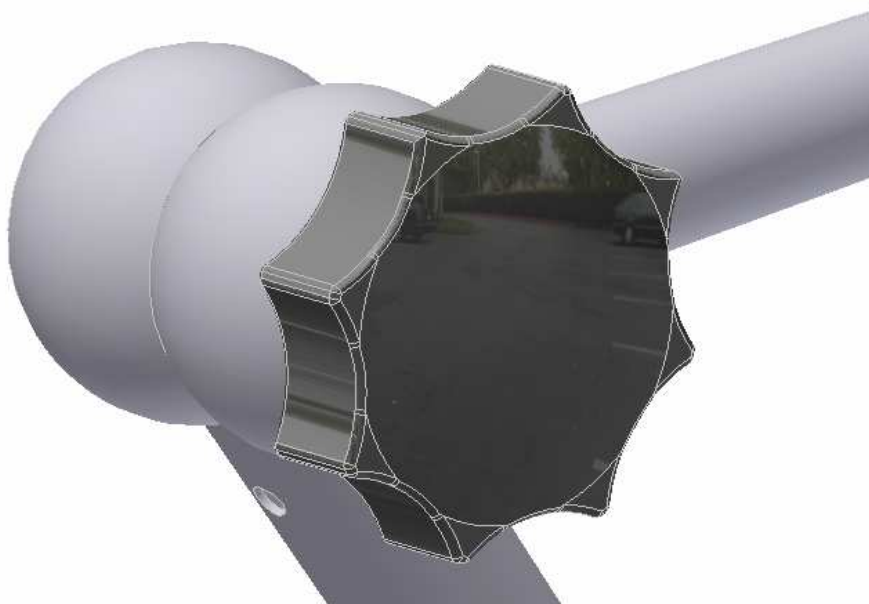
Obr. 25: *Mechanický měřicí stativ*

Obr. 26 ukazuje uchycení sondy v otočné svorce. Toto zajišťuje šroub s černou hlavou, díky kterému lze svorku rovněž natáčet. Natáčení svorky upravuje konečnou polohu sondy.



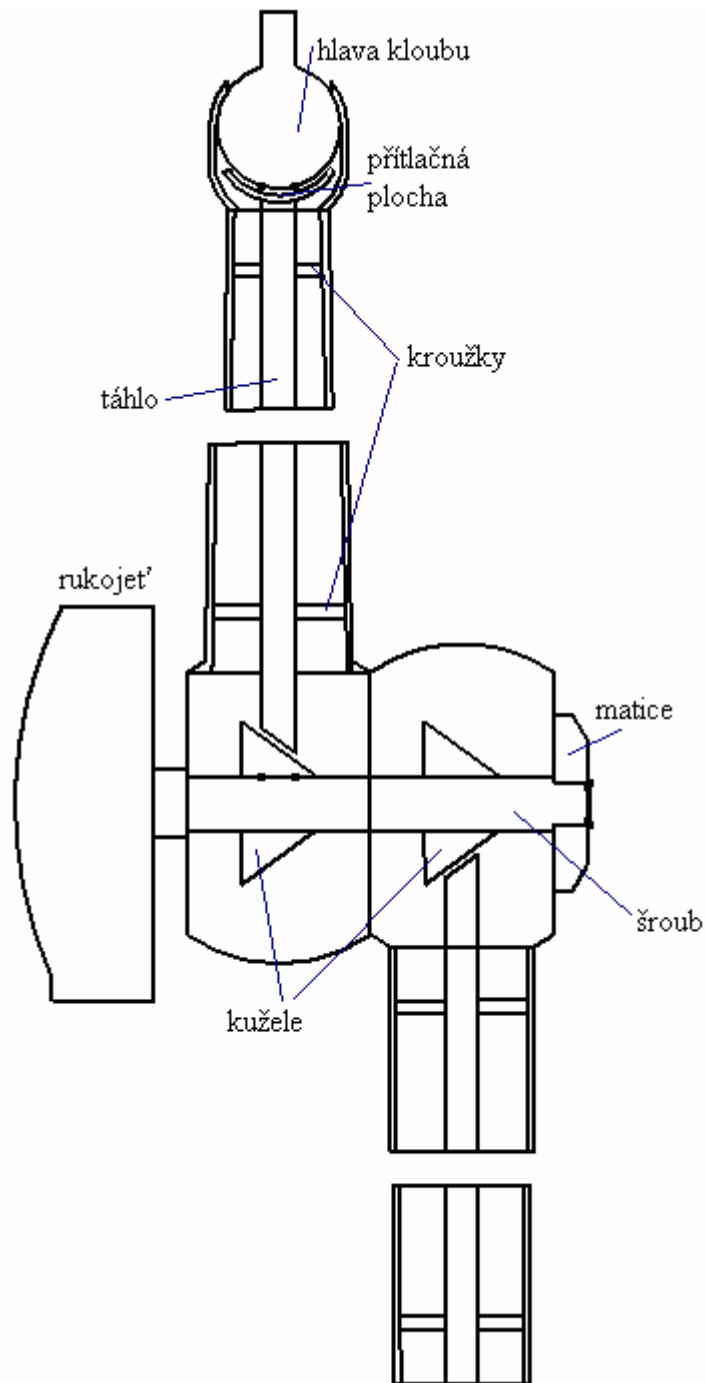
Obr. 26: Uchytení sondy

Ramena jsou spojena mechanismem s rukojetí (Obr. 27), jenž zároveň ovládá oba kulové klouby. Jedním pootočením mechanismu se tedy povolí všechny tři klouby, nastaví se do další polohy dle potřeby a dalším pootočením se upevní.



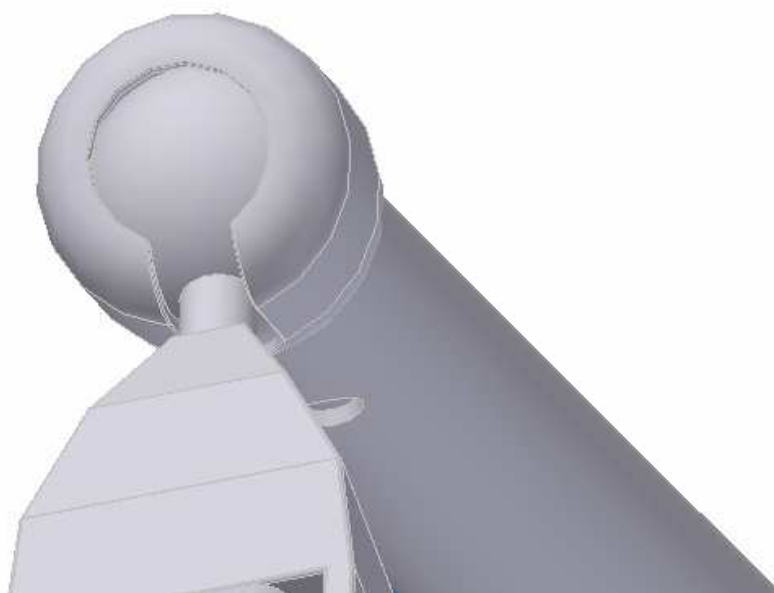
Obr. 27: Spojení ramen

Mechanismus je popsán na Obr. 28. Povolněním rukojeti se vysune šroub ze závitů matice, ramena, která byla dosud držena přítlačnou silou, získají prostor ke vzájemnému otáčení. Oba kužele se posunou směrem k rukojeti a uvolní tak táhla, ke kterým jsou připevněny přítlačné plochy. Síla ploch udržující hlavy kloubů v dané poloze se zmenší a klouby je možné otáčet. Opačným způsobem se klouby zaaretují a znemožní pohyb. Táhla jsou ve vyhrazeném prostoru udržována kroužky.



Obr. 28: Mechanismus rukojeti

Kulové klouby zabezpečují rotaci ramen i pohyb ramen proti podstavci respektive úchytce (Obr. 29).



Obr. 29: **Kulový kloub**

Doporučený materiál pro výrobu ramen, úchytky a svorky je dural, slitina daná zhruba poměrem 94,8 % hliníku, 4 % mědi, 0,6 % hořčíku a 0,6 % manganu. Jeho hustota je $2,8 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, nepatrně více než je tomu u čistého hliníku, permeabilita je přibližně stejně velká jako u hliníku (1,000023), tedy o málo více než u vzduchu, a magnetické pole významně neovlivňuje. Dural je pevný a tvrdý, povrchově se upravuje *eloxováním* – oxidací na povrchu.

5.3.1 Výpočet souřadnic

Označme délku dolního ramene (2) písmenem a , horního ramene (3) b , úchytky (4) c a přečnávající délku sondy d , úhel natočení dolního ramene α_1 , úhel, který svírá dolní rameno s podstavcem β_1 , posunutí ramen proti sobě β_2 , úhel natočení úchytky α_3 a její natočení proti hornímu rameni β_3 a úhel, který svírá sonda s úchytkou β_4 . Potom určíme polohu v kloubu mezi rameny (x_1, y_1, z_1) ze vztahů:

$$x_1 = u_1 \cdot \cos \alpha_1 \quad [\text{m}], \quad (16)$$

$$y_1 = u_1 \cdot \sin \alpha_1 \quad [\text{m}], \quad (17)$$

$$z_1 = a \cdot \sin \beta_1 \quad [\text{m}]. \quad (18)$$

V těchto vztazích figuruje veličina u_1 , což je přepona pravoúhlého trojúhelníku, jehož odvěsny jsou x_1 a y_1 a zároveň jedna z odvěsen trojúhelníku s přeponou a_1 a odvěsnou z_1 , tedy

$$u_1 = \sqrt{a^2 - z_1^2} \quad [\text{m}]. \quad (19)$$

Nyní se pomocí úhlu β_2 dostaneme do místa kulového kloubu horního ramene; úhel natočení α_1 se zatím nezměnil:

$$x_2 = u_2 \cdot \cos \alpha_1 \quad [\text{m}], \quad (20)$$

$$y_2 = u_2 \cdot \sin \alpha_1 \quad [\text{m}], \quad (21)$$



$$z_2 = b \cdot \sin \chi_2 \quad [\text{m}]. \quad (22)$$

$$u_2 = \sqrt{b^2 - z_2^2} \quad [\text{m}]. \quad (23)$$

Symbol χ_2 vyjadřuje úhel mezi osou x a horním ramenem b :

$$\chi_2 = \beta_1 + \beta_2 - 180^\circ \quad [^\circ]. \quad (24)$$

Dále spočítáme polohu šroubu úchytky:

$$x_3 = u_3 \cdot \cos \delta \quad [\text{m}], \quad (25)$$

$$y_3 = u_3 \cdot \sin \delta \quad [\text{m}], \quad (26)$$

$$z_3 = c \cdot \sin \chi_3 \quad [\text{m}]. \quad (27)$$

$$u_3 = \sqrt{c^2 - z_3^2} \quad [\text{m}]. \quad (28)$$

Úhel χ_3 opět znázorňuje natočení osy x , tentokrát od osy úchytky c . δ je pak úhel osy x od u_3 :

$$\chi_3 = \beta_3 + \chi_2 - 180^\circ \quad [^\circ], \quad (29)$$

$$\delta = \alpha_1 + \alpha_3 - 180^\circ \quad [^\circ]. \quad (30)$$

Poloha konečného bodu sondy (úhel δ se nezměnil):

$$x_4 = u_4 \cdot \cos \delta \quad [\text{m}], \quad (31)$$

$$y_4 = u_4 \cdot \sin \delta \quad [\text{m}], \quad (32)$$

$$z_4 = d \cdot \sin \chi_4 \quad [\text{m}]. \quad (33)$$

$$u_4 = \sqrt{d^2 - z_4^2} \quad [\text{m}]. \quad (34)$$

$$\chi_4 = \beta_4 + \chi_3 - 180^\circ \quad [^\circ]. \quad (35)$$

Konečná poloha je potom dána součtem jednotlivých vzdáleností v osách:

$$X = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \quad [\text{m}], \quad (36)$$

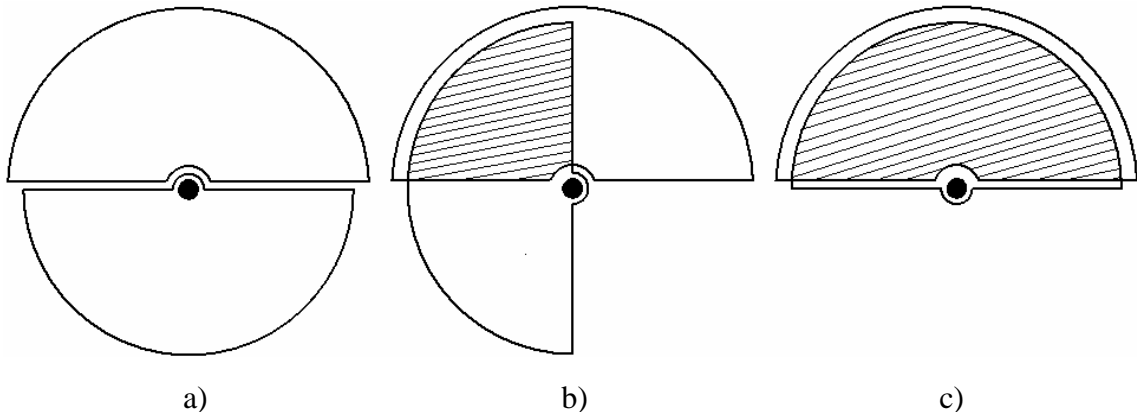
$$Y = y_1 + y_2 + y_3 + y_4 \quad [\text{m}], \quad (37)$$

$$Z = z_1 + z_2 + z_3 + z_4 \quad [\text{m}]. \quad (38)$$

Pomocí programu procesoru je možné kalibrovat (nulovat) výchozí polohu, tedy nejprve nastavit sondu do základní polohy, kam kalibrační umístíme počátek souřadného systému, další souřadnice se budou odpočítávat právě od tohoto bodu.

5.3.2 Otočný kondenzátor

Úhel natočení ramen od sebe i jejich otočení je možné měřit například pomocí otočného kondenzátoru, což je jeden z měnitelných kondenzátorů, u nějž se mezi soustavou pevných půlkruhových desek (stator) zatáčí soustava desek otočných (rotor). Otáčením se pohyblivé desky zasouvají mezi desky nepohyblivé, tím se mění plocha překrývajících se desek (Obr. 30 – a) se nepřekrývají, c) dochází k největšímu překrytí) a současně i kapacita kondenzátoru. Kapacitu je možné snímat a přepočtem zjišťovat plochu kondenzátoru a tím i úhel natočení jeho ploch.



Obr. 30: Uspořádání otočného kondenzátoru

Kapacitu kondenzátoru lze vyjádřit vztahem

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d} \quad [\text{F}], \quad (39)$$

kde ε_0 je permitivita vakua ($\varepsilon_0 = 8,854187 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$), ε_r relativní permitivita, S plocha rovnoběžných desek kondenzátoru, které jsou od sebe vzdáleny d .

5.4 Stativ ovládaný servomotorky

Tento stativ (Obr. 31) se skládá ze dvou ramen (2 a 3), úlohu třetího ramene plní sama magnetická sonda (8). Ta je k rameni připevněna úchytkou (4) a dotažena šroubem (11). Podstavec (1) s displejem (10) na čtyřech nožičkách (9) se podobá podstavci mechanického měřicího stativu. Pohyb ramen obstarávají servomotorky (5, 6, 7), další dva jsou schovány v podstavci a v horním rameni u úchytky.

K výběru vhodných servomotorků se nejprve musí vypočítat momenty síly, kterými jsou motorky charakterizovány:

$$\vec{M} = \vec{F} \cdot \vec{r} \quad [\text{N} \cdot \text{m}], \quad (40)$$

kde F je působící síla na rameno o délce r .

Působící síla je dána vztahem

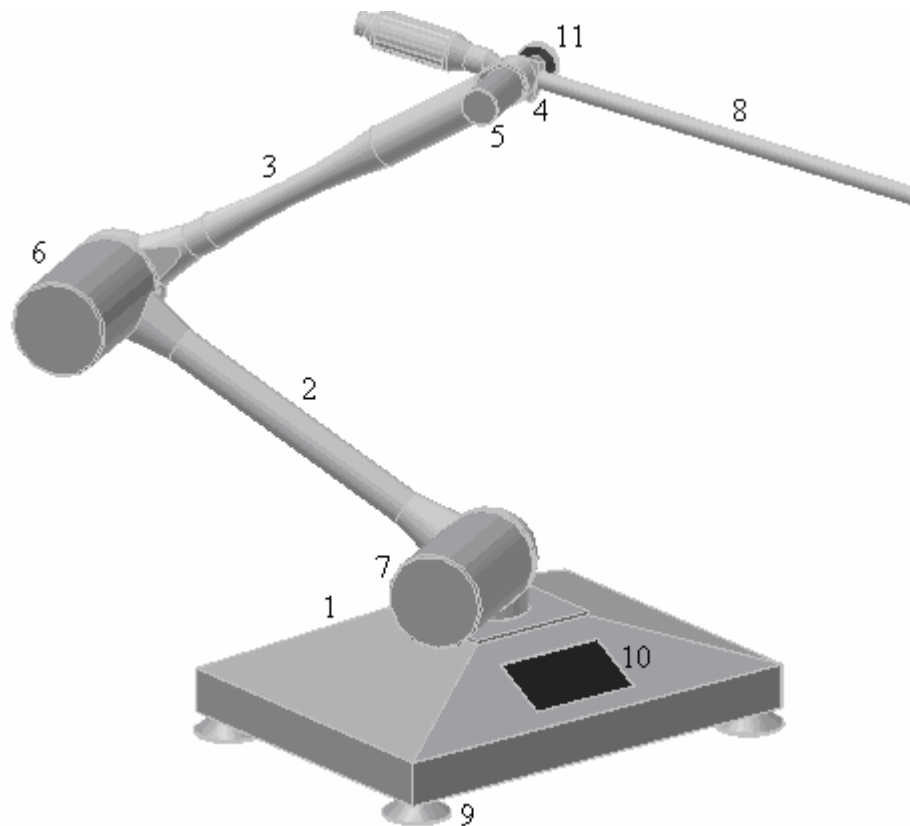
$$F = m \cdot g \quad [\text{N}], \quad (41)$$

kde m je hmotnost a g tíhové zrychlení.

Momenty se počítají zvlášť pro každý motorek, protože motorky jsou umístěny v různých částech stativu. Výsledný moment každého motorku je dán součtem momentů navazujících ramen (zde je možné zatížení považovat za spojité a působíště síly počítat uprostřed ramen) a motorků na nich umístěných. Například výsledný moment motorku nastavujícího úhel β_1 je dán součtem jednotlivých momentů obou ramen, sondy a jednotlivých tří motorků umístěných na ramenech. Každý vypočtený moment je pak nutné vynásobit bezpečnostním koeficientem.

Při výběru vhodného typu servomotorků je potřeba zamyslet se nad požadavky (moment, velikost, hmotnost), které budou na motorky kladeny. Krokové motory mají tu výhodu, že jednotlivé kroky odpovídají přesnému úhlu otočení. Při požadavku na velkou přesnost, tedy malý úhel a následně velký počet kroků roste velikost motorků, tím i jejich hmotnost, zvyšují se momenty a je potřeba vybrat silnější motor. Další možnosti nabízí například německá firma Faulhaber vyvíjející široký sortiment točivých i lineárních DC a EC mikromotorů, které při spojení s enkodéry zaručují přesnost až několika setin stupně. Rozměry těchto výrobků jsou malé a moment je pro naše účely dostatečný.

Servomotorky viditelné na Obr. 31 ovládají pohyb ramen vzhledem k podstavci a úchytce a vzájemně proti sobě (úhly β_1 , β_2 a β_3 – jako u mechanického měřicího stativu), motorek v podstavci otáčí sestavu o úhel α_1 a v horním rameni o α_2 .



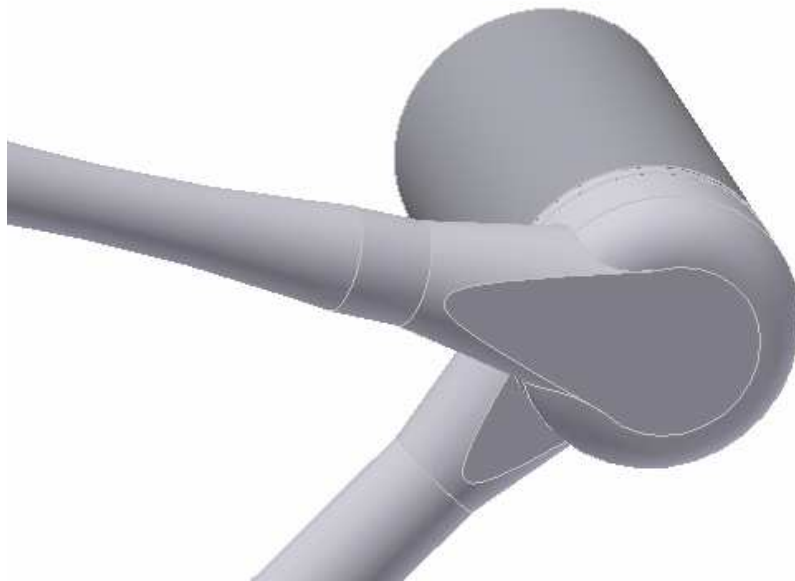
Obr. 31: Stativ ovládaný servomotorky

Na Obr. 32 je ukázáno uchycení magnetické sondy v úchytce šroubem, Obr. 33 a Obr. 34 znázorňují spojení ramen a dolního ramene s podstavcem, je vidět, jak motorky přesahují konstrukci stativu. Motorky je možné umístit i přímo v ramenech, jako je tomu u dvojice motorků

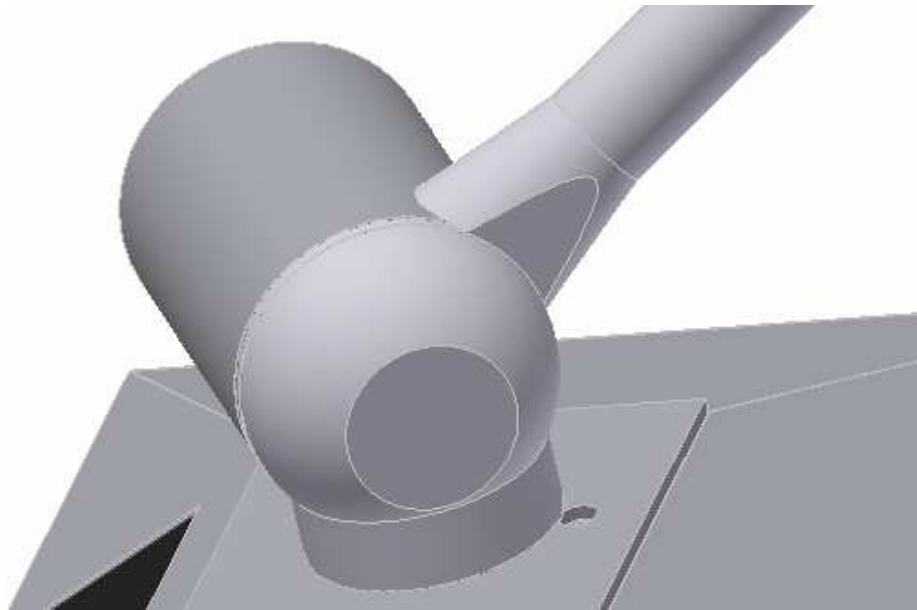
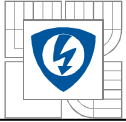
umožňujících rotaci, bylo by však zapotřebí použít převodovky, čímž by se snížila přesnost a mechanismus by pak byl složitější a tím i choulostivější.



Obr. 32: Uchycení sondy



Obr. 33: Spojení ramen



Obr. 34: Spojení dolního ramene s podstavcem

Výpočet souřadnic sondy probíhá stejným způsobem jako u mechanického měřicího stativu, pouze je zapotřebí brát v úvahu další stupeň volnosti, a to možnost otáčení magnetické sondy.

6 MĚŘENÍ MAGNETICKÉHO POLE ASYNCHRONNÍHO STROJE

6.1.1 Měřený stroj

asynchronní motor Siemens 3~mot type 1LA7133-4AA, v.č.99129-0021

7,5 kW; 50 Hz; 400 V; 15,1 A; 1455/min; $\cos\varphi$ 0,82

6.1.2 Teoretický rozbor

Viz kapitola 5.1.2 Hallova sonda.

6.1.3 Postup měření

1. Zapojte pracoviště.
2. Změřte magnetické pole měřeného stroje pomocí magnetické sondy v na několika místech kostry stroje.
3. Proveďte hodnocení měření.

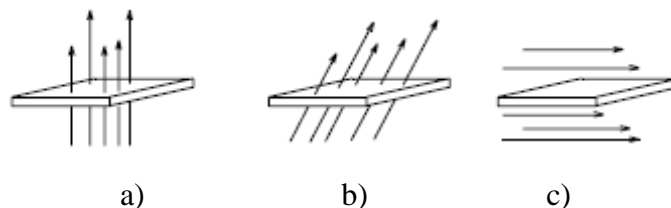
6.1.4 Vypracování

Na Obr. 36 jsou zaneseny body, na nichž proběhlo měření magnetickou sondou, hodnoty naměřené magnetické indukce v těchto bodech jsou zapsány v Tab. 4.

Suma magnetické indukce v pátém sloupci tabulky je dána vztahem

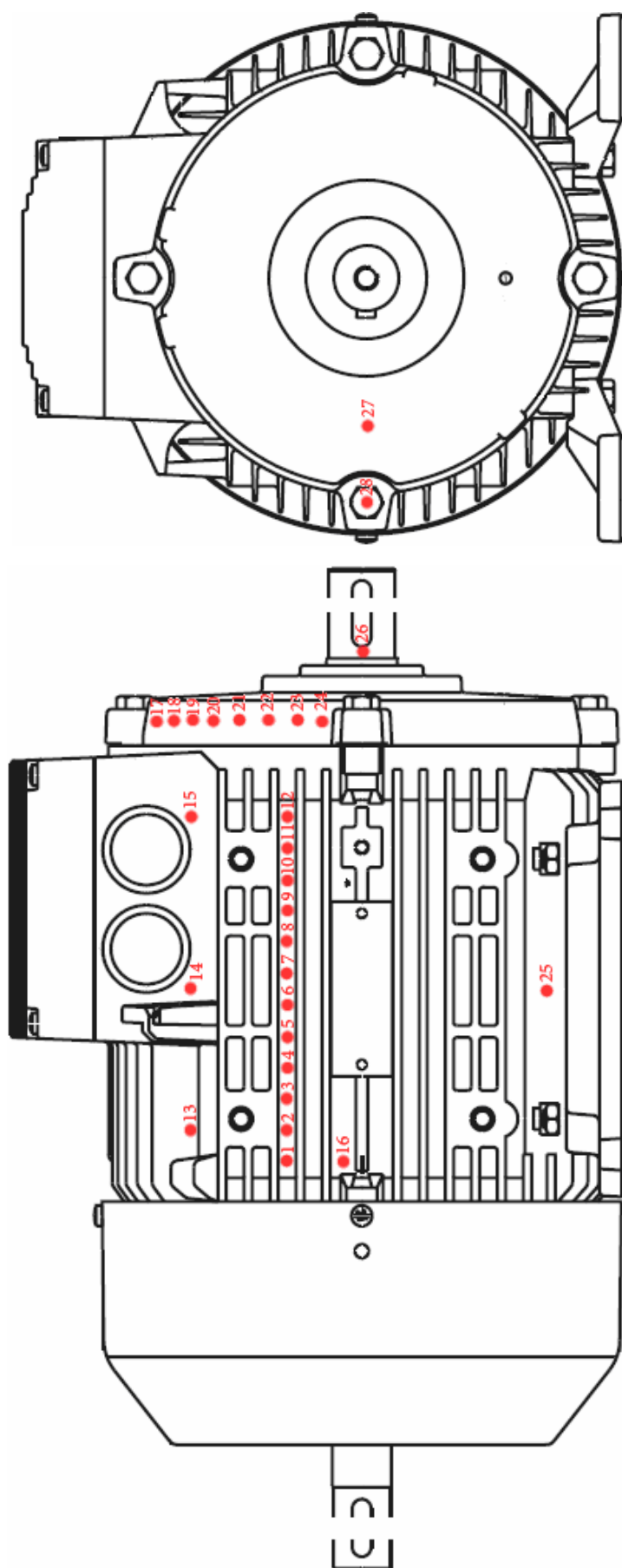
$$B_{suma} = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad [\text{T}]. \quad (42)$$

Při měření bylo důležité udržovat správnou polohu sondy – Hallovy sondy jsou citlivé nejen na velikost, ale i na úhel magnetické indukce. Názorně to ukazuje Obr. 35.

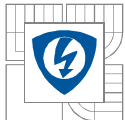


Obr. 35: Úhel vektoru magnetické indukce [15]

Při poloze a) bude naměřená hodnota nejvyšší, oproti tomu c) nejnižší (nulová).



Obr. 36: Umístění měřených bodů [16]

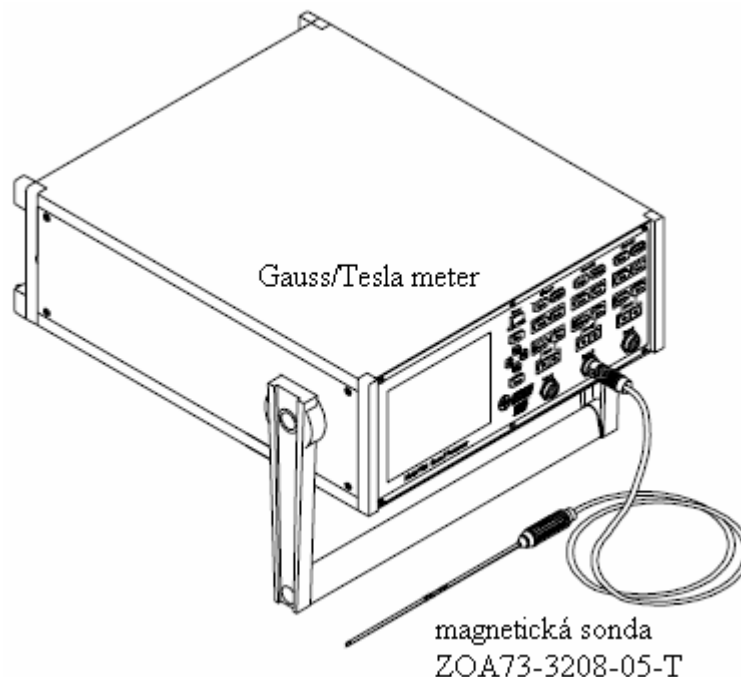


	Osa x	Osa y	Osa z	Suma
Bod/jednotka	[mT]	[mT]	[mT]	[mT]
1	0,415	0,307	1,218	1,323
2	0,176	0,272	0,929	0,984
3	0,062	0,214	0,636	0,674
4	0,062	0,175	0,540	0,571
5	0,000	0,128	0,494	0,510
6	0,062	0,154	0,471	0,499
7	0,062	0,156	0,544	0,569
8	0,156	0,174	0,688	0,727
9	0,197	0,222	0,853	0,903
10	0,237	0,264	1,064	1,122
11	0,445	0,384	1,269	1,399
12	0,403	0,416	1,280	1,405
13	0,253	0,242	0,877	0,944
14	0,062	0,116	0,507	0,524
15	0,324	0,921	1,094	1,466
16	0,701	0,244	1,041	1,279
17	0,701	0,041	0,154	0,719
18	0,000	0,082	0,154	0,174
19	0,000	0,092	0,154	0,179
20	0,000	0,074	0,155	0,172
21	0,000	0,073	0,154	0,170
22	0,000	0,042	0,154	0,160
23	0,000	0,000	0,154	0,154
24	0,000	0,000	0,154	0,154
25	0,000	0,105	0,275	0,294
26	0,000	0,000	0,107	0,107
27	0,000	0,000	0,154	0,154
28	0,000	0,000	0,175	0,175

Tab. 4: Naměřené hodnoty magnetické indukce

6.1.5 Použité přístroje a zařízení

- standardní 3-osá sonda ZOA73-3208-05-T, inv.č.40179; sonda obsahuje 3 Hallovy sondy v osách x,y,z
- Gauss/Tesla meter SYPRIS model 7030, v.č.0444008; tří-kanálový – možnost měřit ve třech osách najednou



Obr. 37: Zapojení magnetické sondy [15]

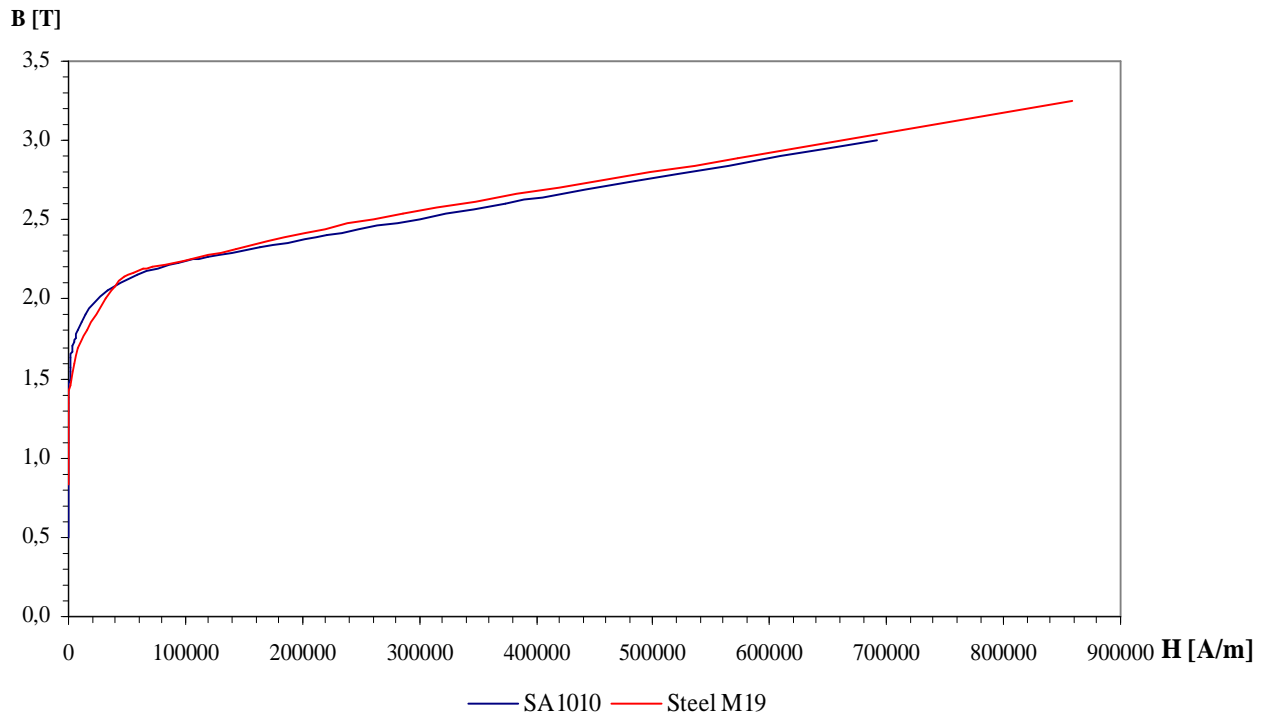
Na obrázku je zapojena jednoosá sonda do kanálu *Probe 2*, v našem případě byla použita trojosá sonda obsahující 3 Hallovy sondy v osách x,y,z, oproti obrázku byly tedy využity všechny tři kanály Gauss/Tesla meteru (*Probe 1,2,3*) – měřili jsme ve třech osách najednou.

6.1.6 Závěr

Měřili jsme magnetického pole na daném asynchronním stroji pomocí magnetické sondy. Po rozběhu motoru jsme na 28 bodech povrchu kostry stroje, jejichž umístění je na Obr. 36, změřili velikost magnetické indukce ve třech osách, výsledky měření jsou uvedeny výše v Tab. 4. Nejvyšší naměřená hodnota byla v bodě 15, který se nachází ve spodní části svorkovnice, nejnižší hodnoty byly zjištěny na ložiskovém štítě. Hodnoty se pohybovaly nejvýše v řádech jednotek mT – permeabilita kostry je nízká stejně jako magnetická indukce.

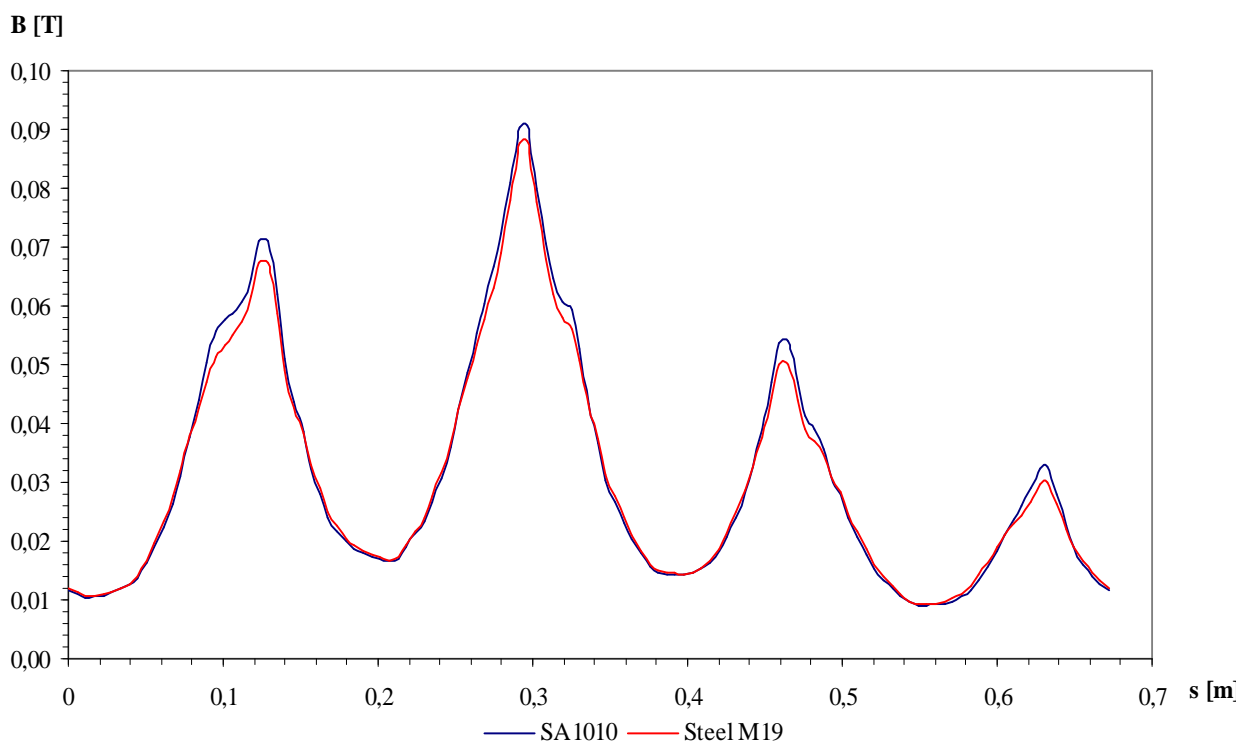
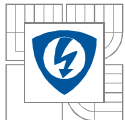
7 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ S VÝPOČTEM

Pro porovnání byly při výpočtu použity pro jha statoru a rotoru dva materiály, a to SA 1010 a Steel M19. B-H křivky těchto materiálů jsou společně vyneseny na Obr. 38. Tento diagram, jinak zvaný *magnetizační křivka*, vyjadřuje závislost magnetické indukce B na intenzitě magnetického pole H . Je vidět, že modré koleno křivky SA 1010 dosahuje vyšší hodnoty magnetické indukce, než je tomu u druhého materiálu, křivka pak dále pokračuje téměř lineárně lehce pod závislostí Steel M19.



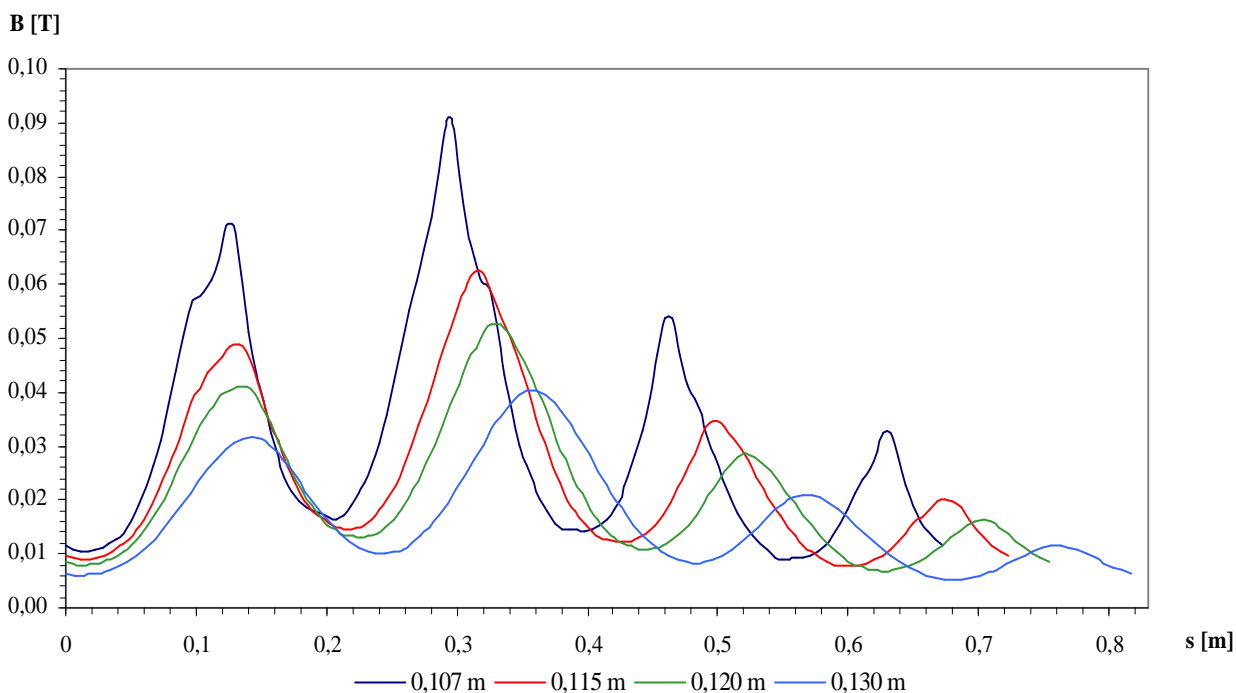
Obr. 38: B-H křivky materiálů SA1010 a Steel M19

Na Obr. 39 jsou zachyceny průběhy magnetické indukce stroje při použití obou materiálů na kružnici o poloměru 0,107 m kolem středu motoru, což je místo na rozhraní kostry stroje a okolního vzduchu, tedy místo, kde proběhlo měření magnetickou sondou. Obě křivky jsou charakteristické čtyřmi „kopečky“, což znovu dokazuje, že stroj je čtyřpólový. Modré špičky „kopečků“ SA1010 dosahují vyšších hodnot indukce než červené křivky Steel M19.



Obr. 39: Průběhy magnetické indukce na kostry stroje

S rostoucí vzdáleností od kostry stroje se hodnota magnetické indukce snižuje, jak ukazuje Obr. 40. Jsou zde zobrazeny čtyři křivky materiálu SA 1010 pro kružnice o různém poloměru od středu stroje.



Obr. 40: Průběhy magnetické indukce materiálu SA 1010



8 ZÁVĚR

Vytvořený model 7,5kW asynchronního stroje umožňuje zobrazení průběhu siločar a magnetické indukce v příčném řezu stroje. Geometrie byla vytvořena v programu Autodesk Inventor Professional 2008, samotný výpočet byl proveden metodou konečných prvků a proběhl v programu ANSYS v11. Model stroje se skládá z rotorové části, statoru, kostry a kruhu okolního vzduchu; výpočet probíhal v 207856 uzlech.

V následující tabulce jsou uvedeny oblasti přesycení magnetické indukce vypočteného modelu stroje o určité hodnotě v procentuálním poměru k magnetické indukci v celkové zobrazované části stroje včetně kostry. Je vidět, že magnetická indukce o hodnotě vyšší než 1,4T je v méně než 66% zobrazeného výsledku. Indukce větší než 2,6T se nachází v méně než 0,01% modelu.

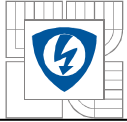
Nejvyšší vypočtená indukce byla v zubu statorové drážky u vzduchové mezery.

B [T]	[%]
< 1,4	34,09
> 1,4	65,91
> 1,8	41,36
> 2,2	4,49
> 2,6	méně než 0,01

Střední hodnota vypočtené magnetické indukce na povrchu kostry stroje je přibližně rovna hodnotě 0,03T = 30mT. Nejvyšší hodnota naměřené indukce mezi body 1 až 12 (body na kostře stroje ležící mezi dvěma žebry v horní polovině stroje) byla v bodě 12, který je nachází nejbližě ložiskovému štítu, a to 1,466mT. Měření tedy ukázalo hodnoty nižší. Je to dáno tím, že magnetická sonda byla držena vodorovně na bodech kostry umístěných na horní polovině stroje, při vodorovném držení se sonda kostry dotýkala pouze svým dolním okrajem a její střed byl od kostry vzdálený. Velikost magnetické indukce s rostoucí vzdáleností od kostry stroje klesá.

Dalším zásadním faktorem odlišnosti naměřených a vypočtených hodnot je velikost elektrického proudu – výpočet byl provedený v jediném okamžiku s konkrétními hodnotami rotorového a statorového proudu, při měření zřejmě tyto proudy dosáhly odlišných hodnot, především velikost proudu rotorového byla zřejmě rozdílná. Pro srovnání bylo magnetické pole stroje spočítáno i pro jiný materiál jha statoru a rotoru, čímž se potvrdila skutečnost, že velikost magnetické indukce je také ovlivňována použitým materiálem (B-H křivky různých materiálů mají odlišné průběhy).

Přípravky pro měření magnetického pole byly navrženy dva, a to *mechanický měřicí stativ* umožňující po jediném otočení mechanismu s rukojetí snadno a rychle manuálně změnit polohu magnetické (nebo jiné) sondy a odměřit její souřadnice v prostoru vůči počátku úvodního

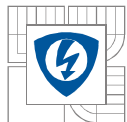


souřadného systému, a *stativ ovládaný servomotor*ky, který naopak po zadání souřadnic nastaví pětici motorků sondu do polohy žádané pro měření.

Hlavními součástmi obou přípravků jsou dvě ramena a úchytka, které jsou navzájem propojeny kulovými a otáčivými klouby umožňujícími pohyb v prostoru. Sonda je přidržována svorkou úchytky. Dolní rameno je uchyceno v podstavci s dutinou, jenž kromě stabilizační funkce nabízí prostor k uložení procesoru pro zpracovávání signálu z čidel polohy mechanického měřicího stavivu respektive k nastavení úhlů otočení příslušných servomotorů.

Magnetická sonda obsahuje 3 Hallovy sondy v osách x, y, z , které po spojení s tříkanálovým Tesla-meterem měří velikost magnetické indukce ve třech navzájem kolmých rovinách. Tesla-meter signály zpracuje a zobrazí velikost naměřené magnetické indukce pro každou osu zvlášť i v součtu.

Materiálem stavivů je nemagnetický dural, slitina hliníku, který neovlivňuje měřené magnetické pole. Přípravek je možné použít pro měření magnetického pole točivých i netočivých elektrických strojů, při použití jiné než magnetické sondy může mít využití i v jiném oboru techniky (měření drsnosti povrchů, vibrací, ...).

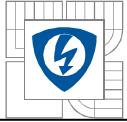


LITERATURA

- [1] TRŮNEČEK, Jiří. *Elektrotechnika*. Vyd.2. Praha : Práce, 1946. 582 s.
- [2] KUZNĚCOV, M.I. *Elektrotechnika*. Vyd.1. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1953. 366 s. 301 05 32.
- [3] DĚDKOVÁ, Jarmila. *Modelování elektromagnetických polí*. [s.l.] : [s.n.], 2005. 85 s. ISBN TEE501.
- [4] DĚDKOVÁ, Jarmila, et al. *Laboratorní cvičení z elektromagnetismu*. Brno : ÚTEE FEI VUT, 2001. 54 s. ISBN 80-214-1807-9.
- [5] DĚDKOVÁ, Jarmila; FIALA, Pavel. *Elektromagnetismus*. Brno : [s.n.], 2002. 48 s. ISBN 80-214-2242-4.
- [6] SKALKA, Miroslav; BOK, Roman; ONDRŮŠEK, Čestmír. Rozložení magnetického pole v elektrických strojích - část 1. *Elektrorevue* [online]. 2007, 31, [cit. 2010-05-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/0/rozlozeni-magnetického-pole-v-elektrickych-strojich---cast-1/>>. ISSN 1213-1539.
- [7] KOCMAN, Karel. *Elektrické stroje a přístroje*. Praha : [s.n.], 1990. 420 s. 19-996.
- [8] HENDRYCH, A.; KUBÍNEK, R.; VŮJTEK, M. *Mikroskopie magnetických sil* [online]. Olomouc : Katedra experimentální fyziky (Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého), 2008 [cit. 2010-05-12]. Dostupné z WWW: <<http://atmilab.upol.cz/texty/SPM-teorie.pdf>>.
- [9] VOLF, Tomáš. *Analýza magnetického pole synchronního stroje*. Brno, 2008. 59 s. Bakalářská práce. FEKT VUT Brno.
- [10] VOLF, Tomáš. *Analýza magnetického pole elektrických strojů pomocí MKP a magnetické sondy*. Brno, 2009. 34 s. Semestrální práce. FEKT VUT Brno.
- [11] FETTER, František . *Přehled silnoprůdové elektrotechniky I*. Praha : SNTL, 1957.
- [12] KOPYLOV, Igor P. *Stavba elektrických strojů*. SNTL : SNTL, 1988.
- [13] VAVŘIŇÁK, Petr. *Elektrické stroje a přístroje* [online]. Ostrava : Střední škola elektrotechnická, 2006 [cit. 2010-05-12]. Dostupné z WWW: <http://www.mrskeleton.net/soubory/ucebni_texty/SSE-Elektricke_stroje_a_pristroje.pdf>.
- [14] KADANÍK, Petr. *Řízení asynchronního motoru bez použití snímače rychlosti* [online]. Praha : Katedra elektrických pohonů a trakce (FEL ČVUT), 2004 [cit. 2010-05-12]. Elektrický pohon s asynchronním motorem, s. . Dostupné z WWW: <http://pohony.kadanik.cz/PDFs/disertace/kap_04_asynchronni_motor_disertace_kadanik.pdf>.
- [15] *7030 Gauss/Tesla Meter : Instruction Manual* [online]. Orlando, Florida : SYPRIS, [200?] [cit. 2010-05-12]. Dostupné z WWW: <<http://www.sypris.com/documents/File/Common/STM-FwBell/Manuals/7030%20users%20manual.pdf>>.



- [16] *Katalog K02 - 0605 CZ : Nízkonapěťové motory* [online]. Praha : Siemens s.r.o., [200?] [cit. 2010-05-12]. Dostupné z WWW: <<http://www.elektromotory-siemens.cz/upload/File/katalog-elektromotoru-11a7-0605-k02-cz.pdf>>.
- [17] *Elektrické stroje*. [s.l.] : [s.n.], Praha : Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky (FEKT VUT), [200?] [cit. 2010-05-12].
- [18] *Help programu ANSYS*.
- [19] *Faulhaber* [online]. 2010 [cit. 2010-05-13]. Drivers and Micro Precision Systems. Dostupné z WWW: <<http://www.faulhaber.com/>>.
- [20] Kolektiv profesorů. Hallova sonda. *Elektrika.cz* [online]. 4.4.2006, [cit. 2010-05-14]. Dostupný z WWW : <<http://elektrika.cz/data/clanky/clanek.2006-04-01.2480110481>>.



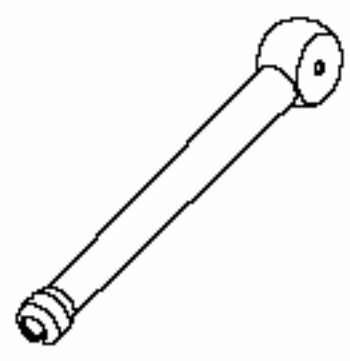
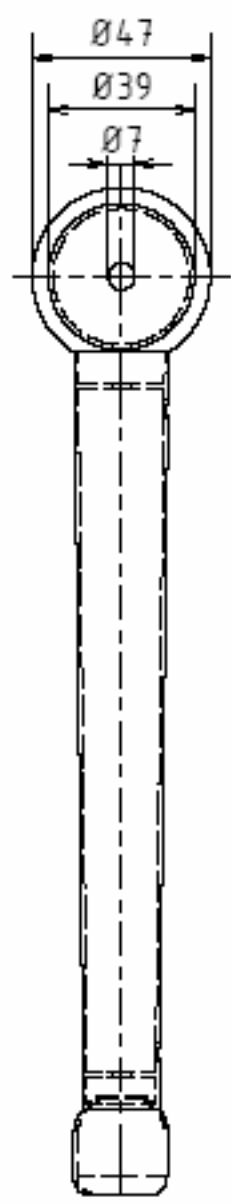
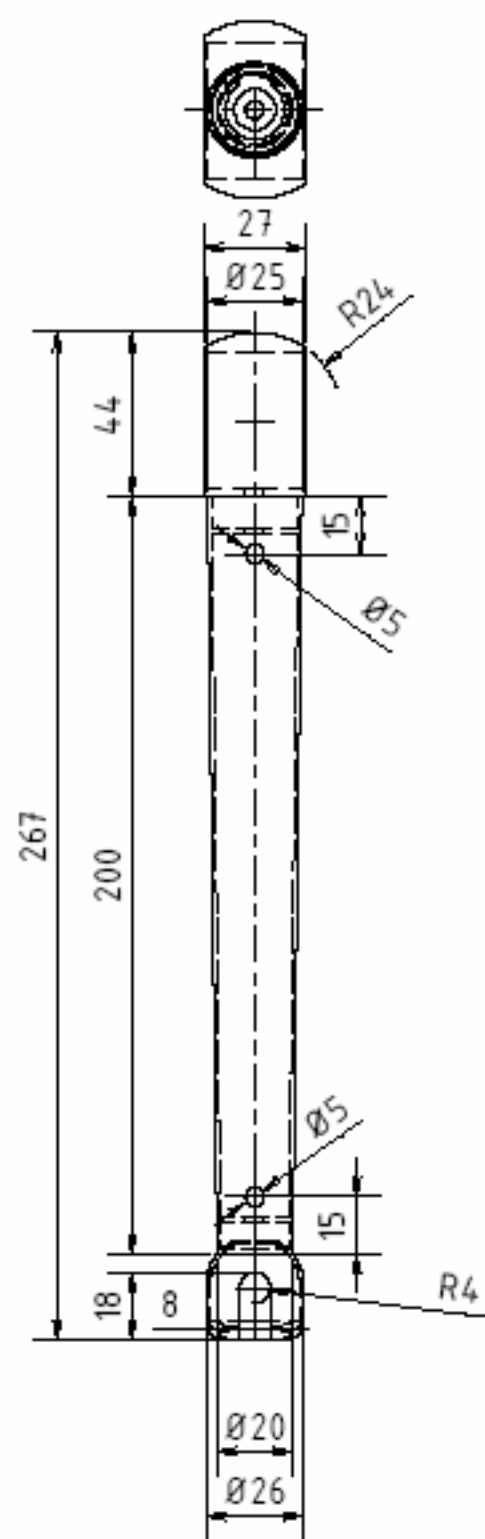
PŘÍLOHY

Sestava 1: Mechanický měřicí stativ

01-mech-stat-2010	Rameno dolní
02-mech-stat-2010	Rameno horní
03-mech-stat-2010	Úchytka
04-mech-stat-2010	Otočná svorka
05-mech-stat-2010	Dolní kloub
06-mech-stat-2010	Podstavec

Sestava 2: Stativ ovládaný servomotoriky

01-el-stat-2010	Rameno dolní
02-el-stat-2010	Rameno horní
03-el-stat-2010	Úchytka
04-el-stat-2010	Dolní kloub
05-el-stat-2010	Podstavec



				MĚŘÍTKO: 1:2		Materiál: Dural	
				ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY FEKT VUT BRNO			
				Datum: 10.5.2010		Jméno: Tomáš Volf	
				Název: Rameno dolní			
				Číslo výkresu: 01-mech-stat-2010		1	
						A4	
Štv	Změny	Datum	Jméno				

1 2 3 4

A A

B B

C C

D D

E E

F F

267

200

44

27

Ø22

15

Ø5

15

Ø11

Ø20

Ø47

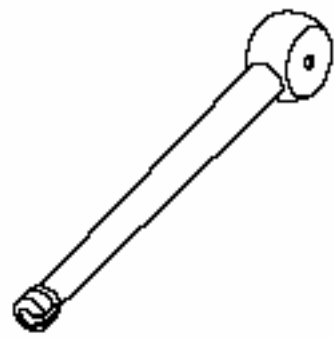
Ø39

Ø7

R3

15

Ø6



Měřítko: 1:2

Materiál: Dural

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY
FEKT VUT BRNO

Číslo

Datum

10.5.2010

Tomáš Volf

Název

Zpracoval

Norma

Název: Rameno horní

Číslo výkresu: 02-mech-stat-2010

2

A4

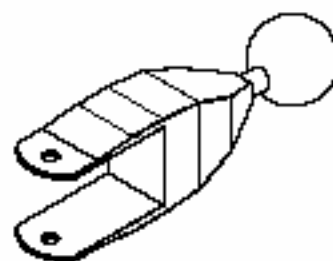
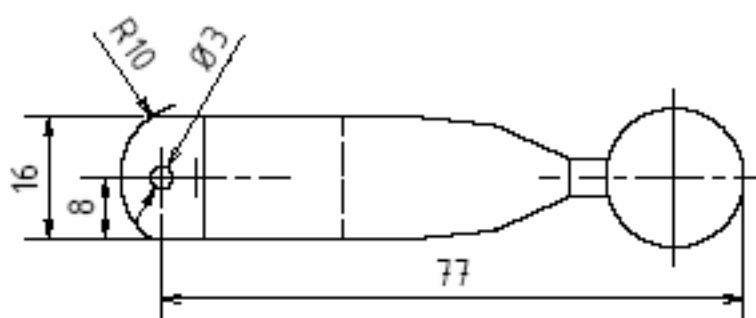
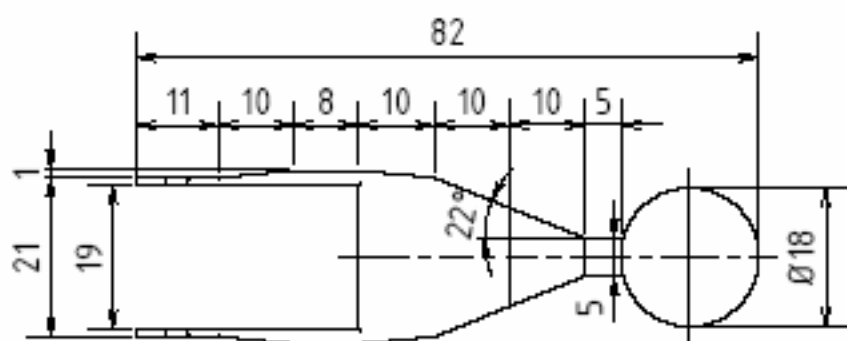
Šev	Změny	Datum	Jméno

1

2

3

4



Měřítko: 1:1

Materiál: Dural

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY
FEKT VUT BRNO

Název: Úchytka

Číslo výkresu: 03-mech-stat-2010

3

A4

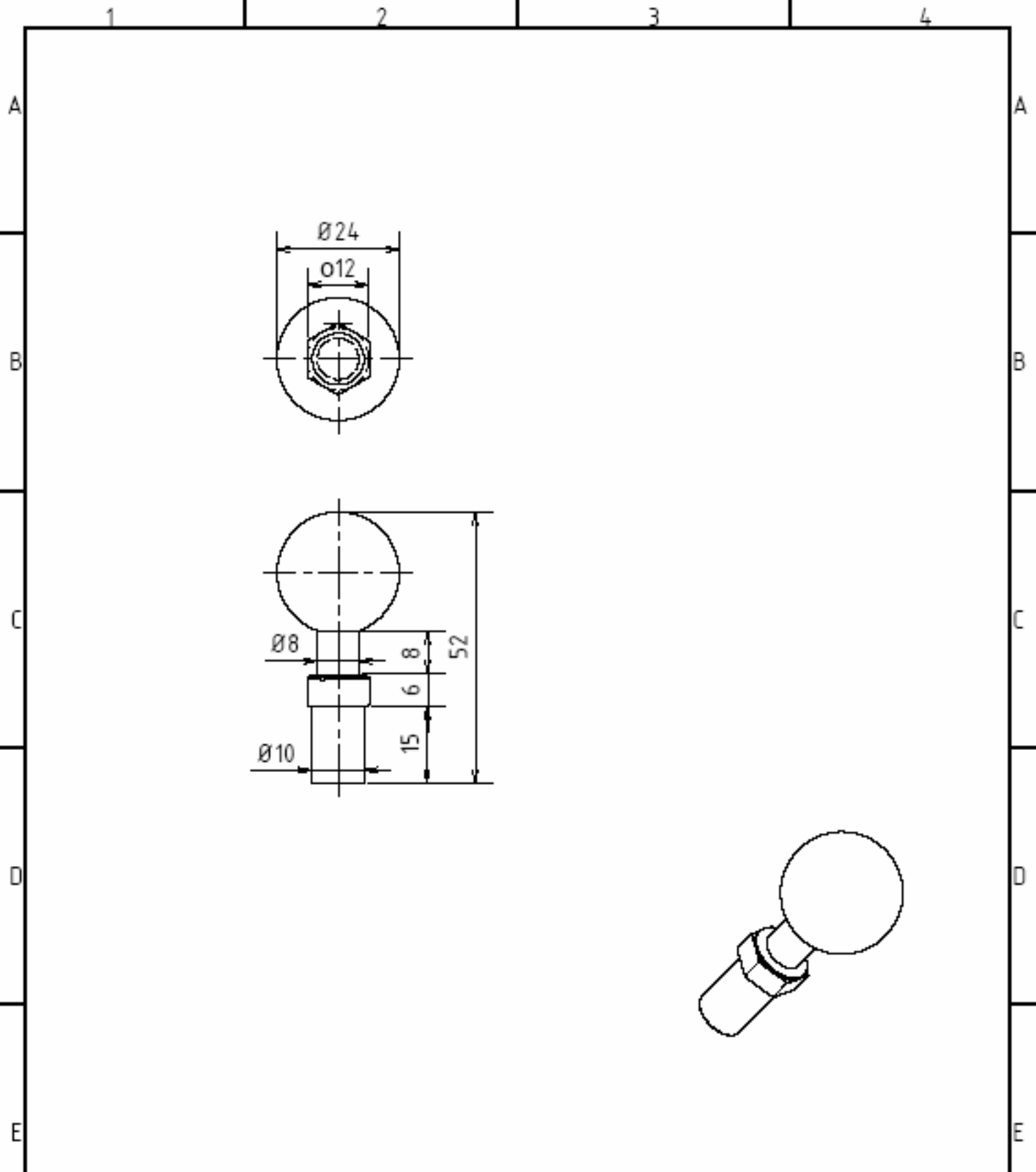
Štv	Změny	Datum	Jméno

1

2

3

4



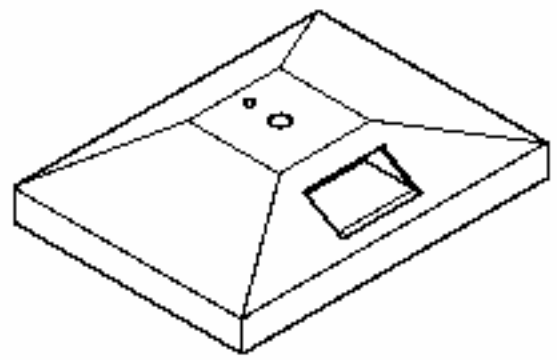
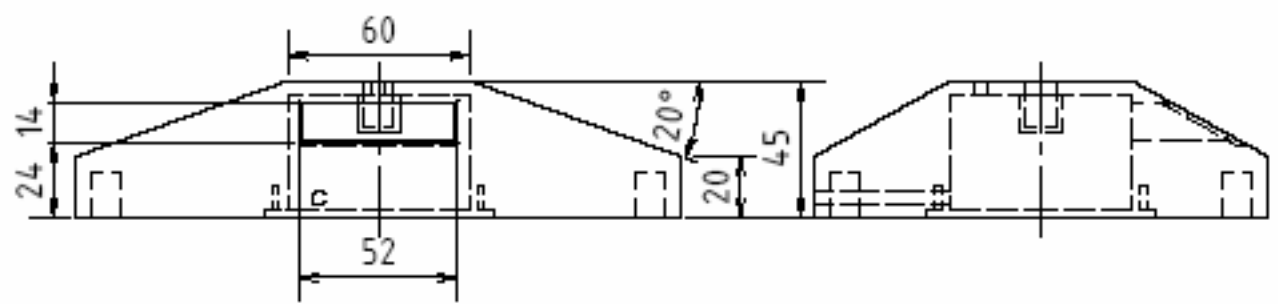
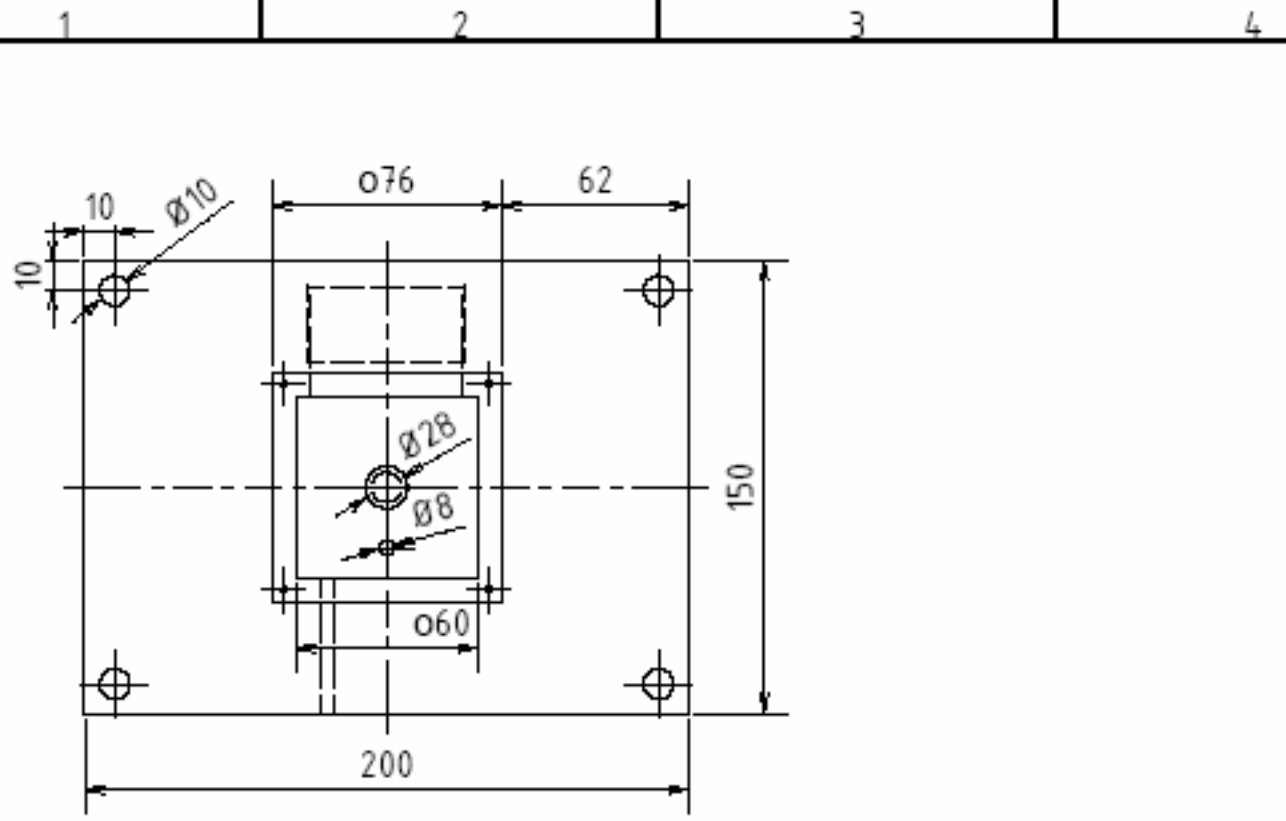
		Měřítko: 1:1		Materiál: Dural	
		ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY FEKT VUT BRNO			
			Datum	Jméno	
		Návrážen	10.5.2010	Tomáš Volf	
		Zobrazitel			
		Norma			
				Název: Dolní kloub	
				Číslo výkresu: 05-mech-stat-2010	
				5	
				A4	
Šev	Změny	Datum	Jméno		

1

2

3

4



		Měřítko: 1:2		Materiál: 11373°	
		ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY FEKT VUT BRNO			
			Datum	Jméno	
		Návrálek	10.5.2010	Tomáš Volf	
		Zhotovitel			
		Norma			
				Název: Podstavec	
				Číslo výkresu: 06-mech-stat-2010	
				6	
				A4	
Šev	Změny	Datum	Jméno		

1

2

3

4

A

A

B

B

C

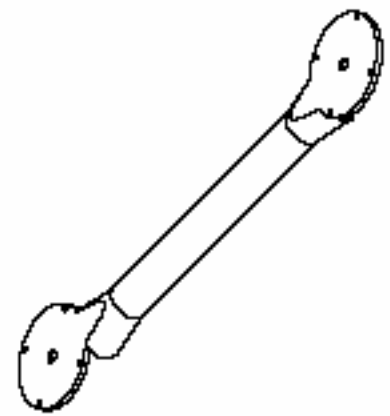
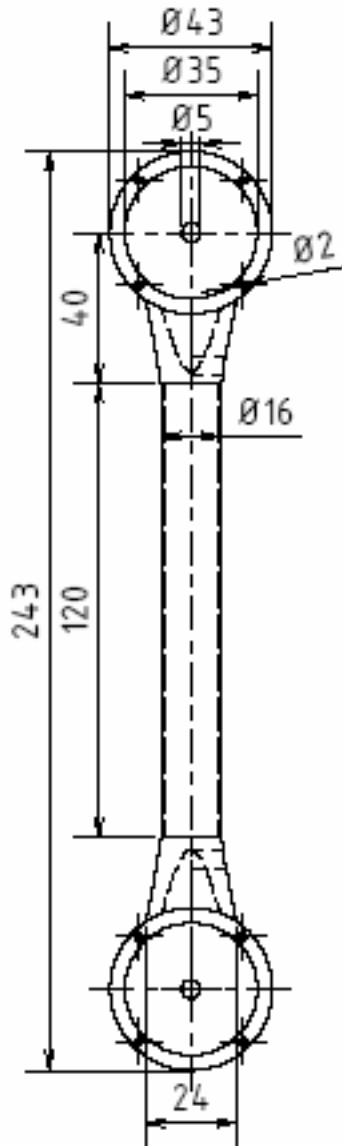
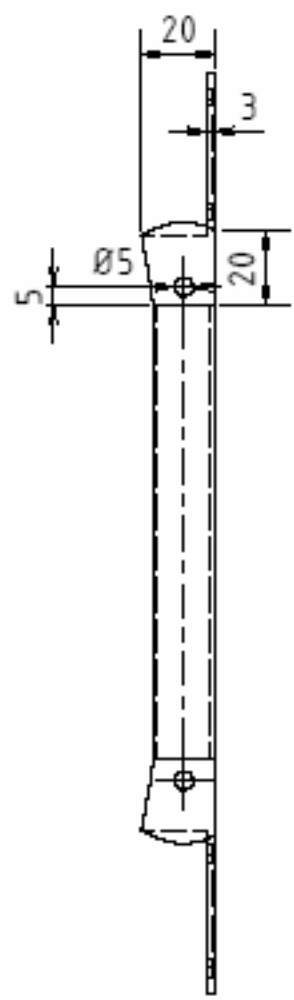
C

D

D

E

E



Měřítko: 1:2

Materiál: Dural

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY
FEKT VUT BRNO

Datum

Jméno

Návráčen

10.5.2010

Tomáš Volf

Zkontrolován

Norma

Název: Rameno dolní

Číslo výkresu: 01-el-stat-2010

7

A4

Štev	Změny	Datum	Jméno

1

2

3

4

1

2

3

4

A

A

B

B

C

C

D

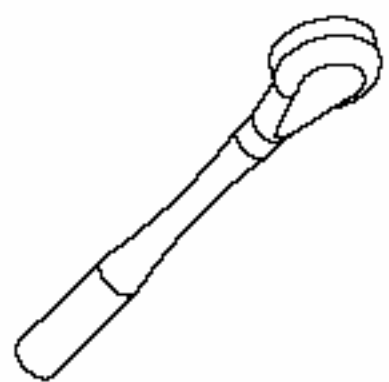
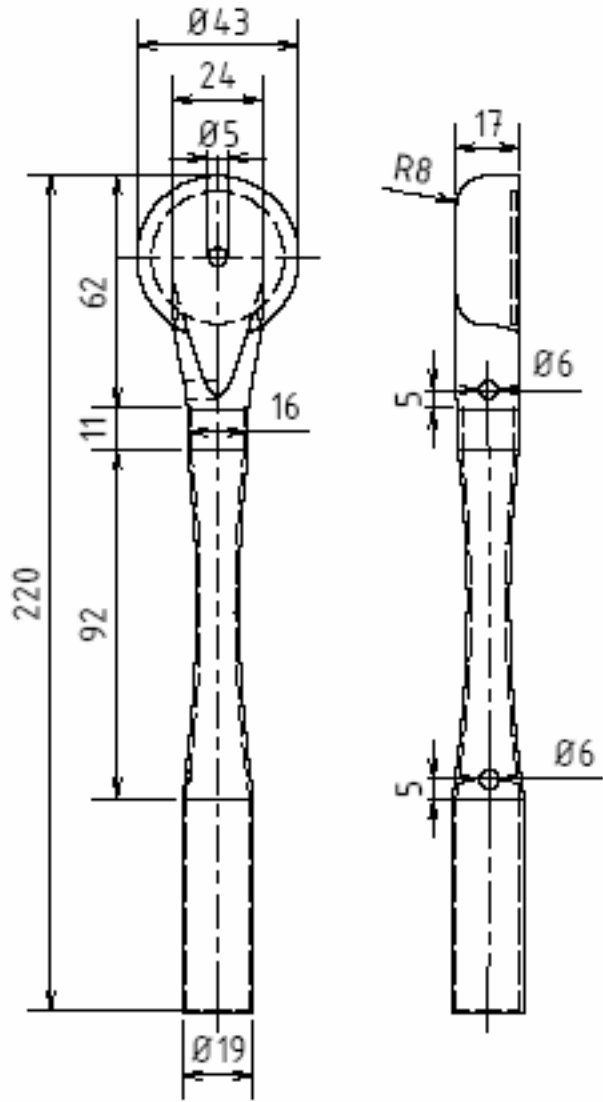
D

E

E

F

F



Měřítko: 1:2

Materiál: Dural

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY
FEKT VUT BRNO

Číslo

Datum

Jméno

Návráček

Zpracovatel

Norma

Název: Rameno horní

Číslo výkresu: 02-el-stat-2010

8

A4

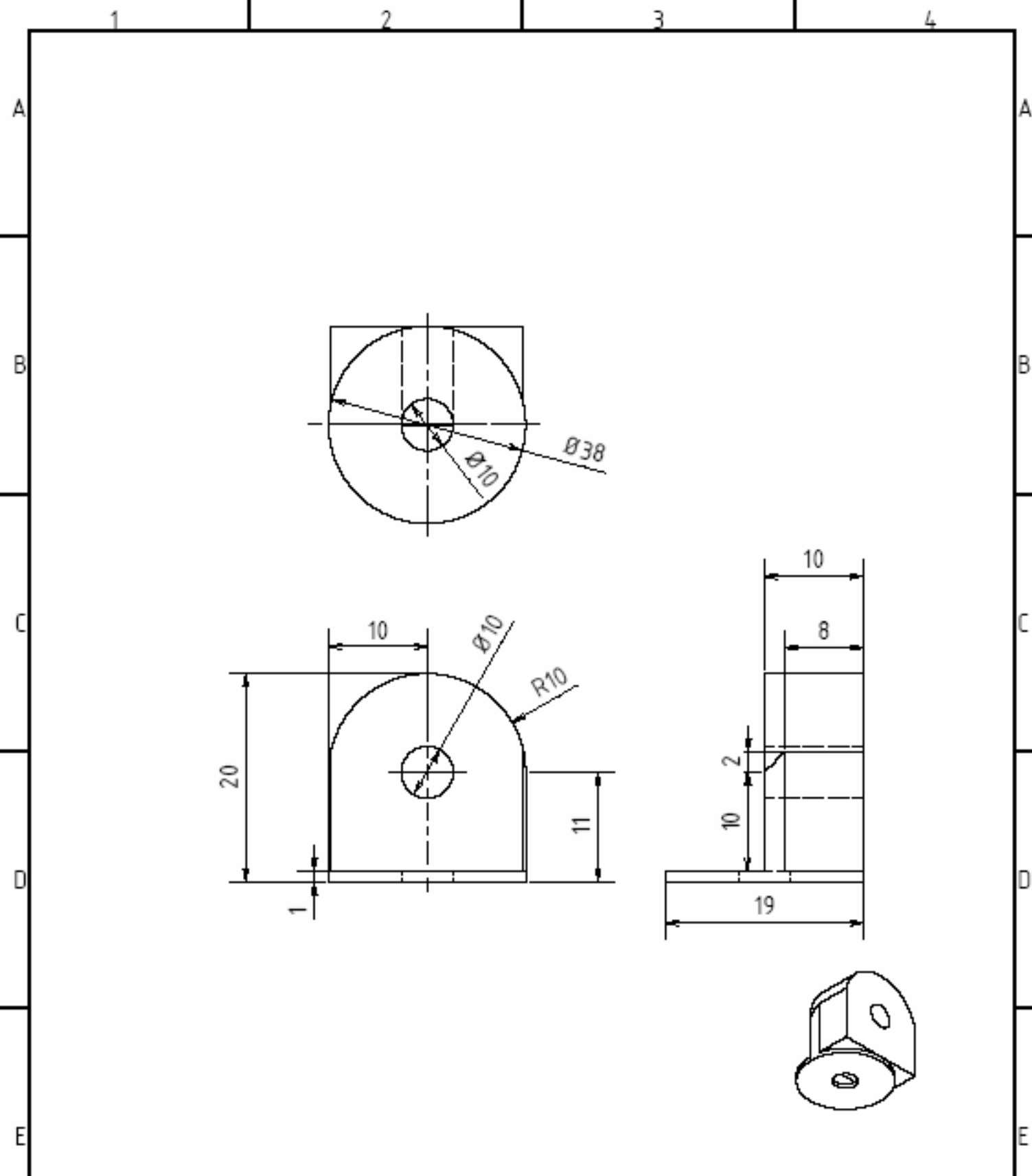
Štev	Změny	Datum	Jméno

1

2

3

4



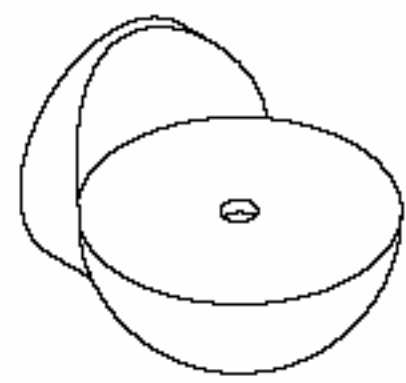
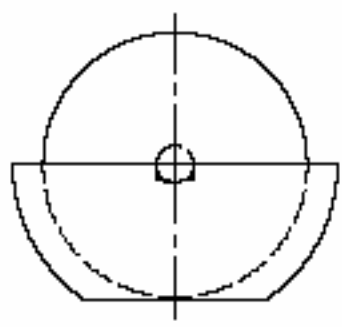
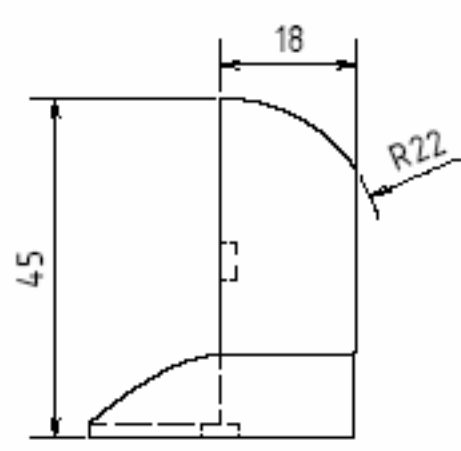
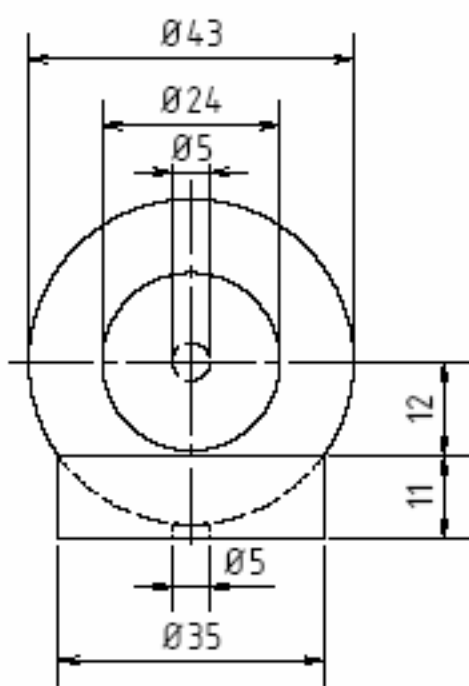
				Měřítko: 2:1		Materiál: Dural	
				ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY FEKT VUT BRNO			
				Datum	Jméno	Název: Úchytka	
			Návržen	10.5.2010	Tomáš Volf		
			Zpracován				
			Norma				
						Číslo výkresu: 03-el-stat-2010	
						9	
						A4	
Šev	Změny	Datum	Jméno				

1

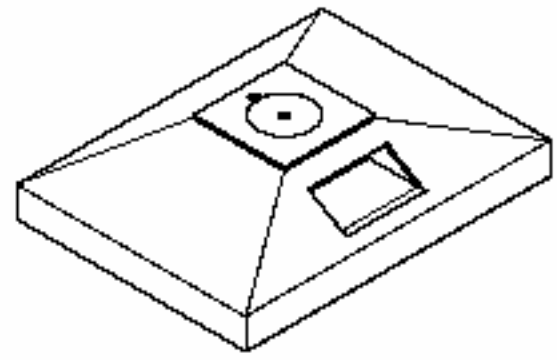
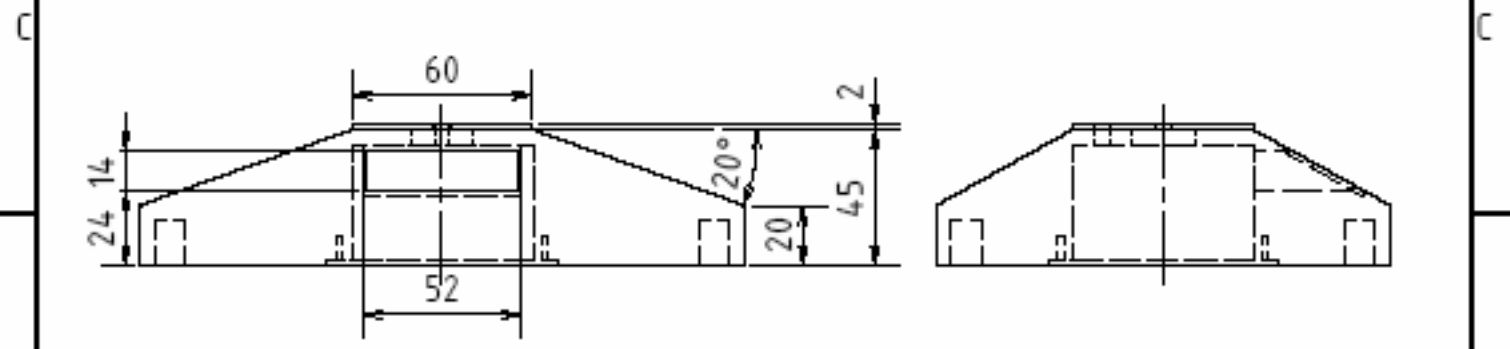
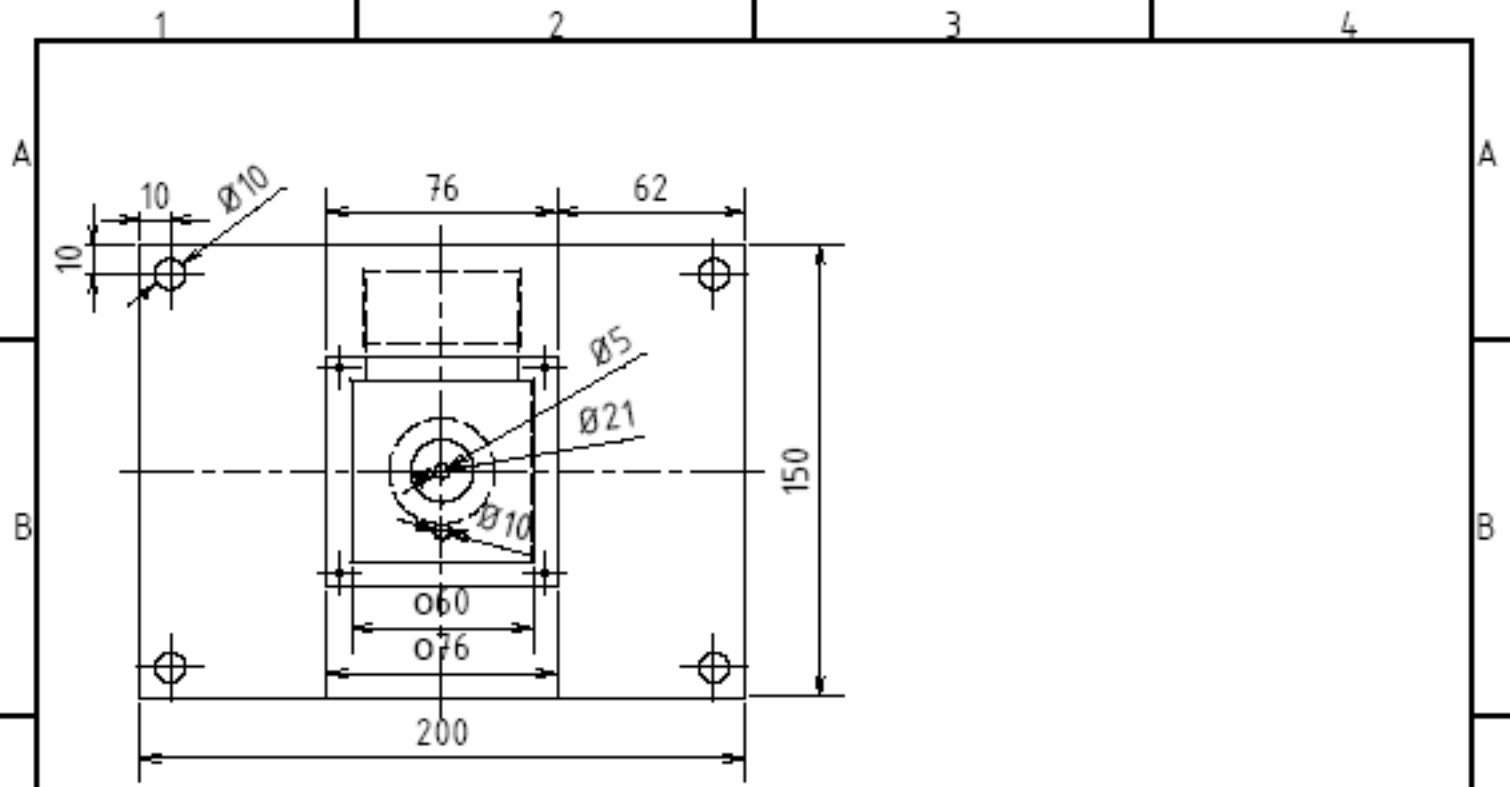
2

3

4



		Měřítko: 1:1		Materiál: Dural	
		ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY FEKT VUT BRNO			
			Datum	Jméno	
		Návržen	10.5.2010	Tomáš Volf	
		Zkontrolován			
		Norma			
				Název: Dolní kloub	
				Číslo výkresu: 04-el-stat-2010	
				10	
				A4	
Štv	Změny	Datum	Jméno		



				Měřítko: 1:2		Materiál: 11373°	
				ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY FEKT VUT BRNO			
				Datum	Jméno	Název: Podstavec	
			Návrážen	10.5.2010	Tomáš Volf		
			Zkontrolován				
			Norma				
						Číslo výkresu: 05-el-stat-2010	
						11	
						A4	
Šev	Změny	Datum	Jméno				

1

2

3

4