

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Krokové motory**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2013/2014

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ondřej NOVOTNÝ**  
Osobní číslo: **E11B0065P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Krokové motory**  
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

Předmětem bakalářské práce je základní rozdělení krokových motorů s popisem jejich funkce. Dále práce bude obsahovat základní návrh magnetického obvodu krokového motoru s příslušnými výpočty.

1. Seznamte se s jednotlivými druhy krokových motorů (KM) včetně pracovních režimů.
2. Porovnejte vlastnosti reluktančních KM a KM s permanentním magnetem na rotoru.
3. Rozeberte principy řízení KM.
4. Nasimulujte aktivní krokový motor pomocí MKP.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. Hrabovcová, V., Janoušek, L., Rafajdus, P., Ličko, M.: **Moderné elektrické stroje**, 2001, ISBN: 80-7100-809-5.
2. Toliyat, A. H., Kliman, B. G.: **Handbook of electric motors**, CRC Press, 2004, ISBN: 100-8247-4105-6.
3. **Veřejně dostupné informační zdroje, databáze [www.ieee.org](http://www.ieee.org)**

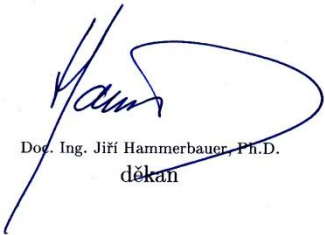
Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Pavel Světlík**

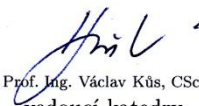
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2013**

Termín odevzdání bakalářské práce: **9. června 2014**

  
Doc. Ing. Jirí Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na základní rozdělení krokových motorů a popis jejich funkce. Zabývá se základními principy, typy a způsoby řízení krokových motorů, vlastnostmi reluktančních krokových motorů a krokových motorů s permanentním magnetem na rotoru. Součástí práce je několik modelů krokových motorů simulovaných pomocí metody konečných prvků ve výpočetním programu FEMM (Finite Element Method Magnetism). Modely byly mezi sebou porovnávány jak pomocí momentových charakteristik (magnetická energie  $W_m$ , kroutící moment  $M$  a indukčnost  $L$ ), tak vzhledem k tvaru provedení rotorových magnetů.

## **Klíčová slova**

Krokový motor, momentové charakteristiky, metoda konečných prvků, permanentní magnet,

## **Abstract**

The present thesis is focused on the basic division of a stepping motor and a description of their function. It deals with the basic principles, types and methods of control of stepper motors, characteristics of reluctance stepper motors and stepper motors with permanent magnet on the rotor. The thesis contains several models of stepper motors simulated using finite element method in a computer program FEMM (Finite Element Method Magnetism). Models were compared among each other by using both the torque characteristics (magnetic energy  $W_m$ , torque  $M$  and the inductance  $L$ ) and design of rotor magnets.

## **Key words**

Stepper motors, the torque characteristics, finite element method, permanent magnet,

## Prohlášení

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

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

.....  
podpis

V Plzni dne 5.6.2014

Jméno příjmení

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval zejména Ing. Vladimíru Kindlovi, PhD., který ačkoliv nebyl můj vedoucí práce, mi ochotně poskytl cenné odborné rady potřebné k vypracování mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Pavlu Světlíkovi, že se mě ujal jako vedoucí práce a pomohl mi práci dokončit.

# Obsah

<b>OBSAH.....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM GRAFŮ.....</b>	<b>10</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>10</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>10</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>11</b>
<b>1 PODSTATA KROKOVÉHO MOTORU.....</b>	<b>12</b>
1.1 POUŽITÍ KROKOVÝCH MOTORŮ.....	13
1.2 OBEČNÉ VLASTNOSTI KROKOVÝCH MOTORŮ.....	14
1.3 MOMENTOVÁ CHARAKTERISTIKA KROKOVÝCH MOTORŮ.....	14
1.4 STATICKÁ MOMENTOVÁ CHARAKTERISTIKA KROKOVÝCH MOTORŮ.....	15
<b>2 DRUHY KROKOVÝCH MOTORŮ.....</b>	<b>16</b>
2.1 KROKOVÉ MOTORY S PASIVNÍM ROTOREM (S PROMĚNLIVOU RELUKTANCÍ).....	16
2.2 KROKOVÉ MOTORY S AKTIVNÍM ROTOREM (ROTOR TVOŘEN PERMANENTNÍM MAGNETEM).....	18
2.3 HYBRIDNÍ KROKOVÉ MOTORY.....	19
2.4 LINEÁRNÍ KROKOVÝ MOTOR.....	22
<b>3 VLASTNOSTI RELUKTANČNÍCH KROKOVÝCH MOTORŮ A KROKOVÝCH MOTORŮ S PERMANENTNÍM MAGNETEM NA ROTORU – SROVNÁNÍ.....</b>	<b>24</b>
3.1 VLASTNOSTI RELUKTANČNÍCH KROKOVÝCH MOTORŮ.....	24
3.2 VLASTNOSTI KROKOVÝCH MOTORŮ S PERMANENTNÍM MAGNETEM NA ROTORU.....	24
3.3 SROVNÁNÍ RELUKTANČNÍCH KROKOVÝCH MOTORŮ A KROKOVÝCH MOTORŮ S PERMANENTNÍM MAGNETEM NA ROTORU.....	25
<b>4 PRINCIPY ŘÍZENÍ KROKOVÝCH MOTORŮ.....</b>	<b>26</b>
4.1 TYPY ŘÍZENÍ KROKOVÝCH MOTORŮ.....	26
BIPOLÁRNÍ ŘÍZENÍ.....	26
UNIPOLÁRNÍ ŘÍZENÍ.....	26
4.1.1 Čtyřtaktní způsob ovládnání při buzení jedné fáze.....	26
4.1.2 Čtyřtaktní způsob ovládnání při buzení dvou fází.....	27
4.1.3 Osmitaktní řízení.....	27
4.1.4 Mikrokrokování.....	28
<b>5 MODEL AKTIVNÍHO KROKOVÉHO MOTORU.....</b>	<b>30</b>
5.1 MODEL AKTIVNÍHO KROKOVÉHO MOTORU.....	30
5.2 SIMULACE AKTIVNÍHO KROKOVÉHO MOTORU V PROGRAMU.....	31
5.2.1 Simulace pomocí výpočetního programu FEMM.....	31
5.2.2 Realizace simulace.....	31
5.2.3 Výstupní hodnoty vyhodnocené pomocí simulace.....	33
<b>6 ZÁVĚR.....</b>	<b>39</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....</b>	<b>41</b>
<b>PŘÍLOHY.....</b>	<b>413</b>



## Seznam symbolů a zkratek

$m$ .....	počet fází krokového motoru [-]
$\alpha$ .....	úhel kroku [°]
$n$ .....	počet otáček za minutu [ <i>ot/min</i> ]
$f_k$ .....	kmitočet kroků [ <i>Hz</i> ]
$N$ .....	počet závitů [-]
$N_r$ .....	počet zubů rotoru [-]
$N_s$ .....	počtu zubů statoru [-]
$M, M_0, M_L$ .....	jednotlivé točivé momenty v momentové charakteristice [ <i>Nm</i> ]
$f_0, f_1$ .....	frekvence [ <i>Hz</i> ]
$\theta$ .....	úhel odklonu hřídele [°]
$\theta_s$ .....	úhel natočení statorových pólů [°]
$k_T$ .....	konstrukční konstanta [-]
$I$ .....	velikost proudu [A]
$i_A, i_B$ .....	budící proudy v jednotlivých fázích [A]
$\Delta\Phi$ .....	změna magnetického toku [Wb]
$\varphi$ .....	plný úhel kroku [°]
$W_{sy}$ .....	šířka statorové obruče [mm]
$W_{st}$ .....	šířka vyjádřeného pólu [mm]
$N_s$ .....	počtu zubů statoru [-]
$W_{rt}$ .....	šířka rotorového magnetu [mm]
$R_{tp}$ .....	šířka statorového pólového nástavce [mm]
$W_{st}$ .....	šířka vyjádřeného pólu [mm]
$N_p$ .....	počet statorových pólů [-]
$L$ .....	indukčnost [H]
$W_m$ .....	magnetická energie [J]
S1, S2, S3.....	vypínače [-]
$n_m$ .....	počet mikrokroků [-]

## Seznam grafů

<i>GRAF 1. MOMENTOVÁ CHARAKTERISTIKA KROKOVÉHO MOTORU [6].....</i>	<i>14</i>
<i>GRAF 2. STATICKÁ MOMENTOVÁ CHARAKTERISTIKA DVOU KROKOVÝCH MOTORŮ [6].....</i>	<i>15</i>
<i>GRAF 3. INDUKČNOST STROJE 2.....</i>	<i>35</i>
<i>GRAF 4. INDUKČNOST STROJE 1.....</i>	<i>36</i>
<i>GRAF 5. ZÁVISLOST MOMENTU STROJE NA NATOČENÍ MOTORU.....</i>	<i>36</i>

## Seznam obrázků

<i>OBR. 1 PRINCIP ČINNOSTI KROKOVÝCH MOTORŮ [3] .....</i>	<i>12</i>
<i>OBR. 2. REÁLNÉ PROVEDENÍ ROTORU RELUKTANČNÍHO KROKOVÉHO MOTORU [26] .....</i>	<i>17</i>
<i>OBR. 3. RELUKTANČNÍ KROKOVÝ MOTOR FÁZE A BUZENA [17] .....</i>	<i>17</i>
<i>OBR. 4. KROKOVÝ MOTOR S AKTIVNÍM ROTOREM (RADIÁLNĚ POLARIZOVANÝ MAGNET) [19]. .....</i>	<i>18</i>
<i>OBR. 5. PRINCIP KROKOVÉHO MOTORU S PERMANENTNÍM MAGNETEM [3].....</i>	<i>19</i>
<i>OBR. 6. ŘEZ HYBRIDNÍHO KROKOVÉHO MOTORU [20].....</i>	<i>20</i>
<i>OBR. 7. FUNKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ HYBRIDNÍHO KROKOVÉHO MOTORU [20].....</i>	<i>20</i>
<i>OBR. 8. USPOŘÁDÁNÍ HYBRIDNÍHO KROKOVÉHO MOTORU [3].....</i>	<i>21</i>
<i>OBR. 9. PRINCIP HYBRIDNÍHO KROKOVÉHO MOTORU [3].....</i>	<i>21</i>
<i>OBR. 10. SAWYERŮV LINEÁRNÍ KROKOVÝ MOTOR [10].....</i>	<i>22</i>
<i>OBR. 11. LINEÁRNÍ KROKOVÝ MOTOR V REÁLNÉM PROVEDENÍ [25].....</i>	<i>23</i>
<i>OBR. 12. ČTYŘTAKTNÍ OVLÁDÁNÍ [9].....</i>	<i>26</i>
<i>OBR. 15. VÝPOČETNÍ SÍŤ MODELU 1 .....</i>	<i>32</i>
<i>OBR. 16. VÝPOČETNÍ SÍŤ MODELU 2 .....</i>	<i>33</i>

## Seznam tabulek

<i>TABULKA 1. ROZDĚLENÍ FÁZOVÝCH PROUDŮ .....</i>	<i>29</i>
<i>TABULKA 2. VYPOČÍTANÉ HODNOTY STROJE 1.....</i>	<i>34</i>
<i>TABULKA 3. VYPOČÍTANÉ HODNOTY STROJE 2.....</i>	<i>35</i>

## Úvod

Krokový motor je historicky již poměrně dlouho známým elektrickým pohonem. V době moderní elektroniky, elektrotechniky a automatizace jsou krokové pohony široce využívány. Hlavním požadavkem při aplikaci těchto pohonů je konstrukce zařízení, které jsou schopné rychle a přesně nastavovat polohu mechanických systémů. Jejich předností je extrémně malá setrvačností a velký krouticí moment. Krokové motory mají široké možnosti použití také díky své velikosti, spolehlivosti. Využívají se především tam, kde je potřebné řídit nejen otáčky, ale také konkrétní polohu rotoru. Běžně je možné se s nimi setkat v zařízeních používaných v domácnostech, jsou aplikovány v průmyslových zařízeních, v automobilovém průmyslu. Jejich předností jsou polohovací schopnosti a relativně nízké náklady. Výkon motoru je přitom definován použitými materiály, geometrickými detaily zejména statorovými póly. Nicméně optimalizace geometrie s cílem dosáhnout vyššího krouticího momentu může někdy ovlivnit přesnost krokování a dynamiku pohybu rotoru.

Předkládaná práce je zaměřena na krokové motory, jejich rozdělení s popisem jejich funkce. Teoreticky se zabývá základními principy, typy a způsoby řízení krokových motorů. Text je rozdělen do čtyř částí. První část se zabývá vysvětlením podstaty fungování krokového motoru, druhá část je zaměřena na rozdělení krokových motorů dle různých hledisek. V třetí části jsou vysvětleny vlastnosti reluktančních krokových motorů a krokových motorů s permanentním magnetem na rotoru. Poslední částí práce je základní model magnetického obvodu krokového motoru a následné namodelování aktivního krokového motoru pomocí metody konečných prvků.

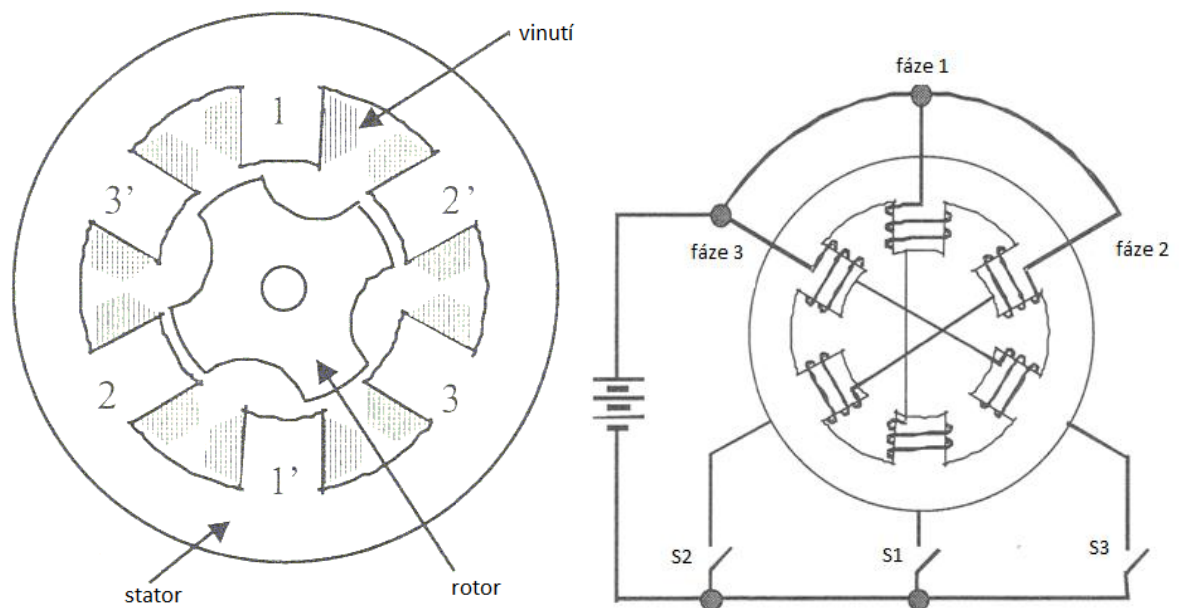
# 1 Podstata krokového motoru

Krokový motor je impulzně napájený motor, který vykonává kruhový pohyb nespojitě a po jednotlivých krocích. K řízení krokového motoru slouží řídicí obvod. Krok je pro každý krokový motor konstantou, která je daná tvarem magnetického obvodu motoru. Krok je mechanická odezva krokového motoru (jeho rotoru) na jeden řídicí impuls [3].

Krokový motor je z principu synchronní motor (rotor se točí stejnou rychlostí jako točivé magnetické pole ve statoru). Točivé magnetické pole ale není vytvářeno střídavým proudem, ale postupným zapínáním jednotlivých cívek statoru [3].

**Stator** motoru se skládá z několika dvojic cívek, které mohou být různě zapojeny.

**Rotor** je váleček buď z magneticky měkkého, nebo tvrdého materiálu s vyniklými póly.



Obr. 1 Princip činnosti krokových motorů [3]

Na obrázku 1 je znázorněn průřez krokového motoru. Stator má na vnitřní straně 6 vyjádřených pólů, které se nazývají zuby. Konstrukce pólů může být různá, proto pojem pól a zub nejsou stejné. Rotor má na vnější straně čtyři zuby. Počet zubů rotoru  $N_r$  se nerovná počtu zubů statoru  $N_s$  a platí mezi nimi vztah [3]:

$$N_r = N_s \pm \frac{N_s}{m} \quad (1.1)$$

kde  $m$  je počet fází.

Stroj na obrázku 1 je napájený ze stejnosměrného zdroje přes vypínače S1, S2, S3. Pokud je sepnutý spínač S1 (fáze 1 je buzená). Dva rotorové zuby jsou v ose s dvěma statorovými zuby fáze 1. Takový stav můžeme nazvat rovnovážným stavem. V případě sepnutí spínače S2 a zároveň rozepnutí spínače S1 se nabudí fáze 2 a současně odbudí fáze 1, která je nyní odpojena od zdroje. Vytvoří se magnetický tok fáze 2 a současně se vytvoří moment kolmý na směr toku. Tento moment otočí rotorem do nové rovnoběžné polohy a nazývá se reluktanční. Při každé změně spínacího stavu dojde k pootočení rotoru do nové rovnovážné polohy o určitý úhel, který označujeme úhlem kroku. Úhel kroku je dán vztahem [3]:

$$\alpha = \frac{360}{m \cdot N_r} [^\circ] \quad (1.2)$$

kde:  $m$  je počet fází krokového motoru,

$N_r$  počet zubů rotoru.

V případě uvedeném na obrázku 1 je úhel kroku  $30^\circ$ . To znamená, že po nabuzení fáze 2 a ustálení přechodového děje je rotor otočen vůči výchozí poloze o  $30^\circ$ . Postupným přepínáním jednotlivých dvojic cívek lze dosáhnout kruhového pohybu.

**Otáčky rotoru** jsou určeny kmitočtem kroků  $f_k$ , tj. počtem kroků za sekundu, které vykoná rotor krokového motoru. Otáčky určíme pomocí následujícího vztahu [9]:

$$n = \frac{60 \cdot f_k \cdot \alpha}{360^\circ} [ot/min] \quad (1.3)$$

Kde:  $n$  je počet otáček za minutu,

$f_k$  je kmitočet kroků v Hz,

$\alpha$  úhel kroku.

## 1.1 Použití krokových motorů

Krokové motory nalézají využití zejména tam, kde potřebujeme přesné řízení polohy při nízkých a středních rychlostech, jejich předností je také relativně nízká cena, výborná životnost a nenáročnost z hlediska údržby [20]. V tomto ohledu krokové motory výborně konkurují servo-systémům, kde není zapotřebí zpětná vazba a kriticky vysoká rychlost nebo zrychlení, ale je nezbytná velice přesná polohovatelnost [15]. Krokové motory se využívají ve výpočetní technice (u počítačů pro polohování hlaviček pevných i pružných disků, tiskáren, čteček apod.). Uplatnění nacházejí také u obráběcích strojů, v leteckém a automobilovém průmyslu, v regulační technice, v pohonech průmyslových robotů a dalších odvětví. V automobilovém průmyslu se například využívají pro pohon motorků k nastavení sklonu

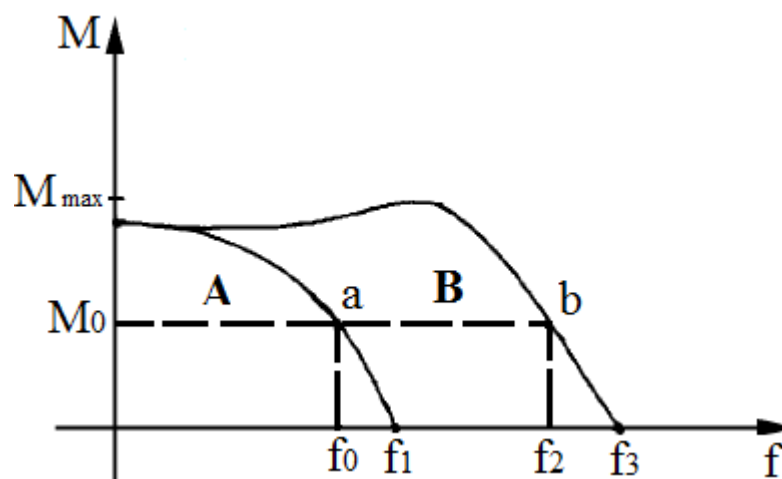
světél. Dále je můžeme nalézt v anténních nastavovačích polohy.

## 1.2 Obecné vlastnosti krokových motorů

Krokové motory mají několik výjimečných vlastností, které jsou dány jejich konstrukcí. Pro obvyklé činnosti není ke změně rychlosti nebo polohy zapotřebí zpětné vazby. Motory fungují v takzvané otevřené smyčce. Chyba polohy není závislá na počtu kroků. Krokové motory musejí být napájeny ze stejnosměrného zdroje a ovládání zajišťuje řídicí elektronický obvod. U krokových motorů v otevřené smyčce nelze dosáhnout srovnatelné rychlosti jako například u stejnosměrného motoru [10]. Krokové motory jsou taktéž kompatibilní s moderními digitálními zařízeními [3]. Za nevýhodu krokového motoru je možné považovat jev, který je označován jako ztráta kroků. Tento jev může nastat při zatížení motoru nad mez možné zátěže. Další negativní vlastnost je sklon k mechanickému zakmitání, což může vést k nestabilitě při pohybu. Těmito dvěma negativním vlastnostem lze předejít vhodně zvoleným krokovým motorem pro danou aplikaci [5].

## 1.3 Momentová charakteristika krokových motorů

Momentová charakteristika znázorňuje závislost momentu na frekvenci krokování. Tato charakteristika je zpravidla uváděna v katalogovém listu k danému krokovému motoru. Může být uvedena pro různé napětí, proudy či různé zapojení vinutí [6, 7].



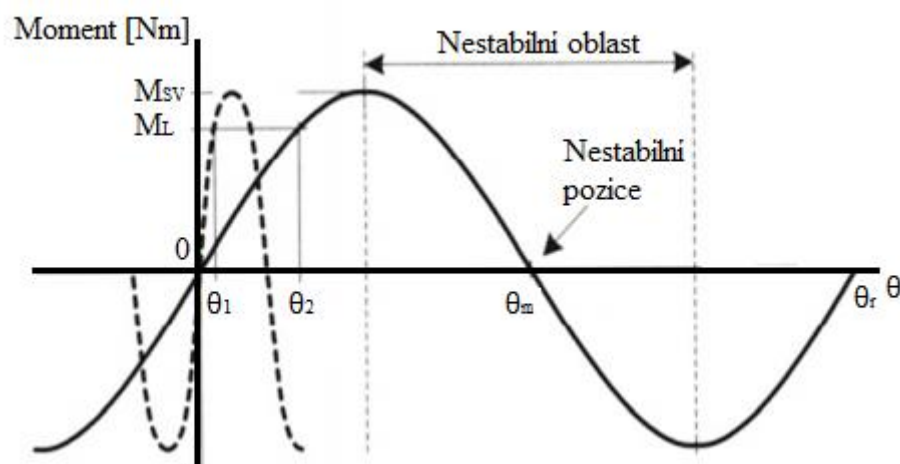
Graf 1. Momentová charakteristika krokového motoru [6]

Momentovou charakteristiku je možné rozdělit na dvě základní části. Část **A**, která se označuje jako *rozběhová část* a sektor **B**, který bývá nazýván jako *provozní*. Rozběhová část charakterizuje stavy, v nichž se může krokový motor nacházet bez ztráty kroku po připojení

impulzů na stojící krokový motor. Jako příklad lze uvést charakteristiku znázorněnou v grafu 1. Při zatížení stojícího motoru momentem  $M_0$  lze na motor přivést řídicí napětí o frekvenci  $f_0$ . Teoreticky, pokud bychom neuvažovali ztráty v krokovém motoru a rozběh by byl realizován bez zátěže, bylo by možné přivést řídicí kmitočet  $f_1$ . Oblast **B** (provozní část charakteristiky) znázorňuje stav krokového motoru, kterého je možné dosáhnout při plynulém navyšování řídicí frekvence. Z toho je možné usuzovat, že pokud je zvolen složitější řídicí obvod, lze krokový motor napájet větší řídicí frekvencí [6].

#### 1.4 Statická momentová charakteristika krokových motorů

Statická momentová charakteristika vyjadřuje závislost úhlu natočení hřídele  $\theta$  na kroutícím momentu břemene. U ideálního krokového motoru je statická momentová charakteristika totožná s funkcí sinus.



Graf 2. Statická momentová charakteristika dvou krokových motorů [6]

V grafu 2 jsou znázorněny průběhy dvou rozdílných krokových motorů. Zatímco plná čára představuje krokový motor s větší velikostí kroku, čerchovaná je označen krokový motor s menší velikostí kroku. Oba krokové motory jsou zatíženy stejným momentem  $M_L$ . Z grafu 2 je patrné, že motor s menší velikostí kroku má výrazně větší strmost momentové charakteristiky. Je tedy možné usoudit, že při otočení rotoru dojde mnohem rychleji k ustálení výsledné polohy oproti krokovému motoru s velkým krokem. Důležitým bodem uvedené charakteristiky je vrchol charakteristiky. Tento bod je označován jako **statický vazební moment**. Je to maximální moment, jímž můžeme zatížit nabuzený stojící krokový motor, aniž by došlo vlivem momentu břemene k nežádoucímu natočení rotoru do polohy  $\theta_r$  [6].

## 2 Druhy krokových motorů

Krokové motory můžeme členit z mnoha hledisek:

- **Dle pohybu:**

1. **Rotační** (rotor vykonává rotační pohyb),
2. **Lineární** (vykonává nespojitý posuvný pohyb, stator je rozvinut do přímky).

- **Dle konstrukce:**

Krokové motorky je možné podle jejich konstrukčního provedení rozdělit do tří základních skupin:

1. **Krokové motorky s pasivním rotorem**, označované také jako **reluktanční, reakční, s proměnnou reluktancí**. Jsou to motorky s vyjádřenými póly na statoru i rotoru, využívající výrazně rozdílné magnetické reluktance (vodivosti) v příčné i podélné ose. Podmínkou funkce je rozdílný počet pólů (zubů) na statoru a rotoru.
2. **Krokové motory s aktivním rotorem**, jejichž rotor je tvořen **permanentním magnetem** (odtud i název aktivní). Rotor je polarizován radiálně.
3. **Krokové motorky hybridní** – slučují konstrukční principy obou předchozích typů. Rotor je tvořen permanentním magnetem a je polarizován axiálně.

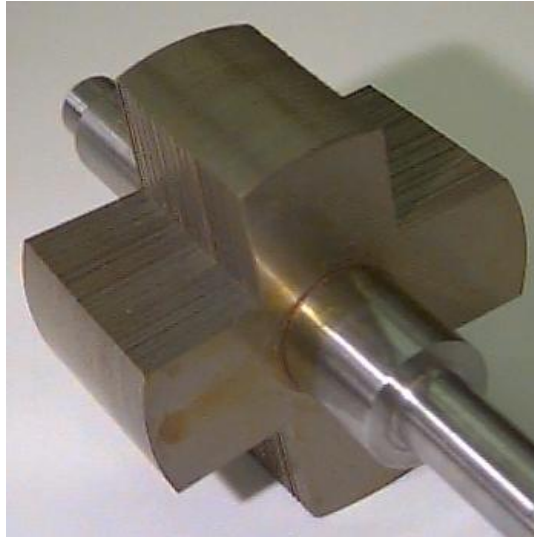
- **Dle počtu fází statoru:**

1. jednofázové krokové motory,
2. dvoufázové krokové motory,
3. několikafázové, obvykle čtyřfázové krokové motory.

### 2.1 Krokové motory s pasivním rotorem (s proměnlivou reluktancí)

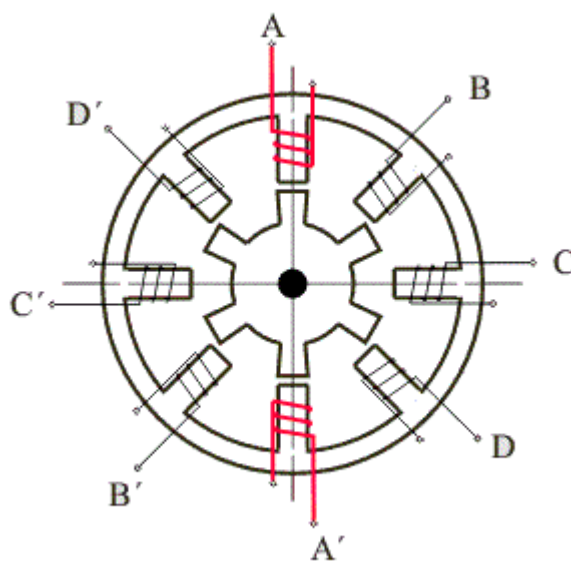
Motor s pasivním rotorem je považován za základní typ krokového motoru. Rotor i stator je složený z plechů s vysokou permeabilitou, můžeme se však setkat i s verzí rotoru, která není složena z plechů [17]. Na obrázku 2 je reálné provedení rotoru reluktančního krokového motoru složeného z plechů.





Obr. 2. Reálné provedení rotoru reluktančního krokového motoru [26]

Na rotoru i statoru jsou umístěny zuby [17]. Vinutí jedné fáze je uloženo na protilehlých statorových zubech a jednotlivé cívky jedné fáze mohou být zapojené sériově nebo paralelně [3]. Vzhledem na směr vinutí cívek jedné fáze mohou mít statorové zuby jedné fáze kladnou i zápornou polaritu. Hřídel motoru je připojena k rotoru a je uložena v ložiskách na obou koncích. Stator je umístěn v plášti, který drží plechy pohromadě. Aby motor byl schopný chodu, musí být počet zubů na statoru odlišný od počtu zubů na rotoru. Vzduchová mezera mezi rotorem a státorem by měla být co nejmenší za účelem dosažení co největšího momentu při co nejmenším objemu rotoru [4].



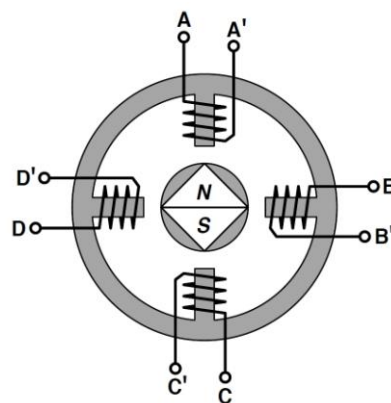
Obr. 3. Reluktanční krokový motor fáze A buzena [17]

Připojí-li se na stator napětí, vytvoří se magnetické pole v jednom páru pólů (obrázek 3). Následně dojde k přitáhnutí nejbližších rotorových zubů k pólu statoru. Rotor se tedy snaží natočit tak, aby byla co nejnižší reluktance magnetického obvodu. Vlivem otočení rotoru vzniká moment setrvačnosti. Rotor má následně tendenci pokračovat dále ve směru pohybu a nezastaví se v místě působení nejmenší reluktance, ale pokračuje dál. V tomto případě začne opět narůstat reluktance a rotor se vrátí zpět do rovnovážné polohy tedy místa s nejmenší reluktancí [12]. Je-li proud k prvnímu páru pólů přerušen a protéká druhým párem pólů, otočí se rotor o jeden krok [18].

Velký počet možností provedení statorových, rotorových zubů a počtu fází vede k dostupnosti široké škále motorů s různým úhlem kroku [14]. Obvykle se setkáváme s hodnotami úhlu kroku od  $1^\circ$  až do  $5^\circ$  [13]. Identifikovat tento typ motoru lze snadno, jelikož při mechanickém otáčení rotoru se rotor otáčí volně bez postřehnutelného „krokování“. Jedná se o nejstarší provedení krokových motorů, které jsou již v dnešní době na ústupu [19]. Jednou výjimkou pro reluktanční krokové motory jsou aplikace s velmi vysokými teplotami [15].

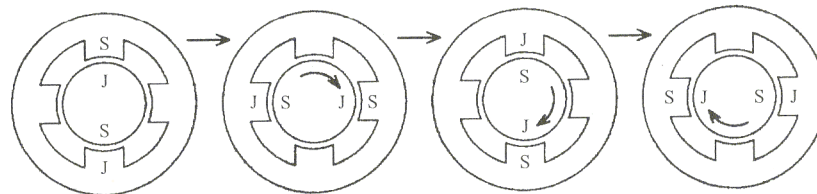
## 2.2 Krokové motory s aktivním rotorem (rotor tvořen permanentním magnetem)

Krokové motory s aktivním rotorem mají rotor tvořen permanentním magnetem, který tvoří jednotlivé póly [13]. Magnety mohou být na rotoru nalepeny nebo zapuštěny do rotoru [8]. Rotor tohoto krokového motoru je válcový tedy neobsahuje vyjádřené zuby. Stator je obdobný jako u reluktančního krokového motoru má tedy vyjádřené zuby. Podél obvodu rotoru se střídavě mění severní a jižní pól. Počet pólů rotoru se většinou volí dvojnásobný oproti pólům statoru [13].



Obr. 4. Krokový motor s aktivním rotorem (radiálně polarizovaný magnet) [19].

Na obrázku 4 je zjednodušeně znázorněn krokový motor s válcovým rotorem z permanentních magnetů. Při spínání jednotlivých fází je potřeba měnit polaritu napětí. Právě nutnost měnit polaritu napětí je jedna z největších odlišností od krokového motoru proměnlivou reluktancí, kde nezáleželo na polaritě, protože rotor vždy zaujal polohu s minimální reluktancí [3].

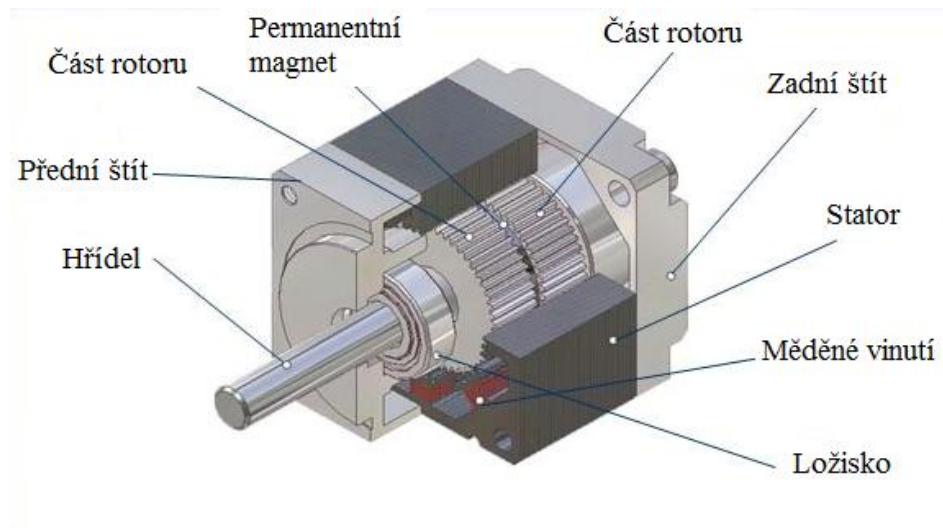


Obr. 5. Princip krokového motoru s permanentním magnetem [3].

Princip tohoto typu motoru je patrný z obrázku 5. Nejprve je na první cívku statoru přivedena záporná polarita napětí a na protilehlý pól napětí o kladné polaritě. Nyní dojde k natočení pólů rotoru tak, že jih se přitáhne k severu a sever k jihu. Po odpojení první fáze dojde k připojení druhé fáze a rotor se nyní otočí o úhel kroku, který definuje počet pólů na rotoru a statoru. Z obrázku 4 vyplývá úhel kroku  $90^\circ$ . Pokud by byl počet pólů rotoru a počet zubů statoru dvojnásobný, dosáhli bychom úhlu kroku  $45^\circ$ . V následujícím stavu musíme změnit polaritu první fáze ve statorových zubech, abychom dosáhli dalšího pootočení rotoru. To samé je nutné provést i s fází 2 v posledním stavu na obrázku 5 [3].

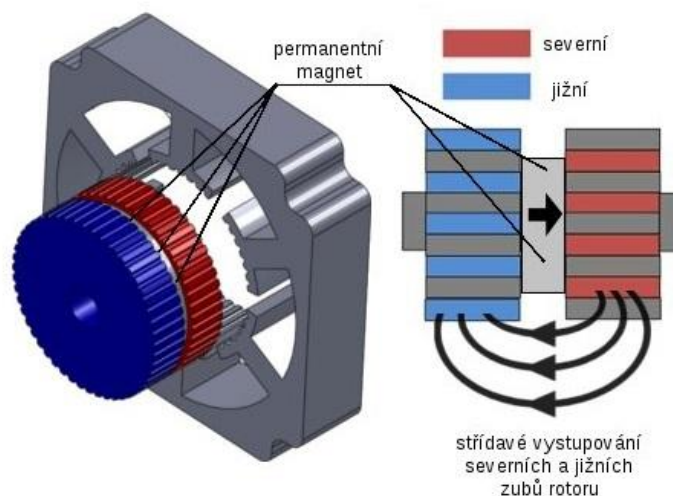
### 2.3 Hybridní krokové motory

Nejdůležitějším znakem hybridního krokového motoru je rotor. Rotor se skládá z válcového permanentního magnetu. Uspořádání statoru hybridního krokového motoru je prakticky stejné jako u krokového motoru reluktačního. Magnetický obvod je buzen kombinací vinutí a permanentních magnetů [1]. Průřez hybridního krokového motoru je znázorněn na obrázku 6.



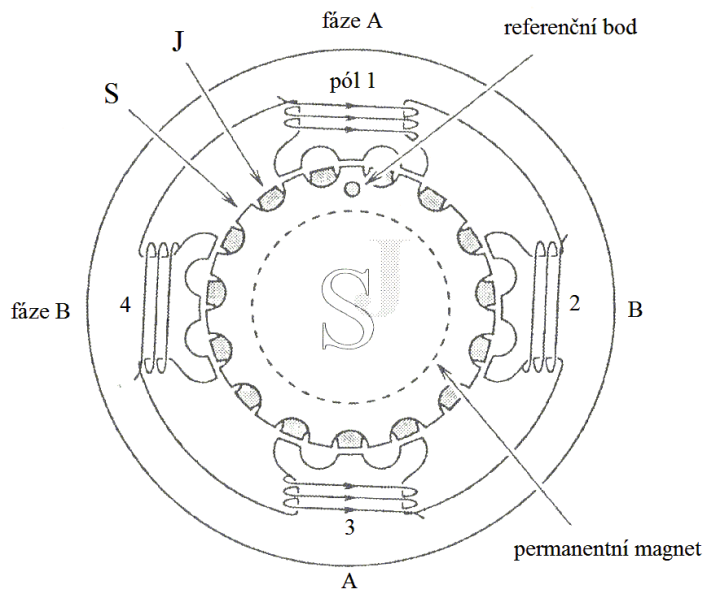
Obr. 6. Řez hybridního krokového motoru [20]

Permanentní magnet je magnetován v ose hřídele. Na obvodu rotoru se nachází pólové nástavce, které jsou opatřeny obvodovými zuby [3]. Z obrázku 7 je patrné, že rotor obsahuje dva pólové nástavce a při pohledu v ose hřídele můžeme pozorovat střídavé vystupování severních a jižních zubů rotoru [20]. Póly bývají nejčastěji vyrobeny z křemíkových plechů.



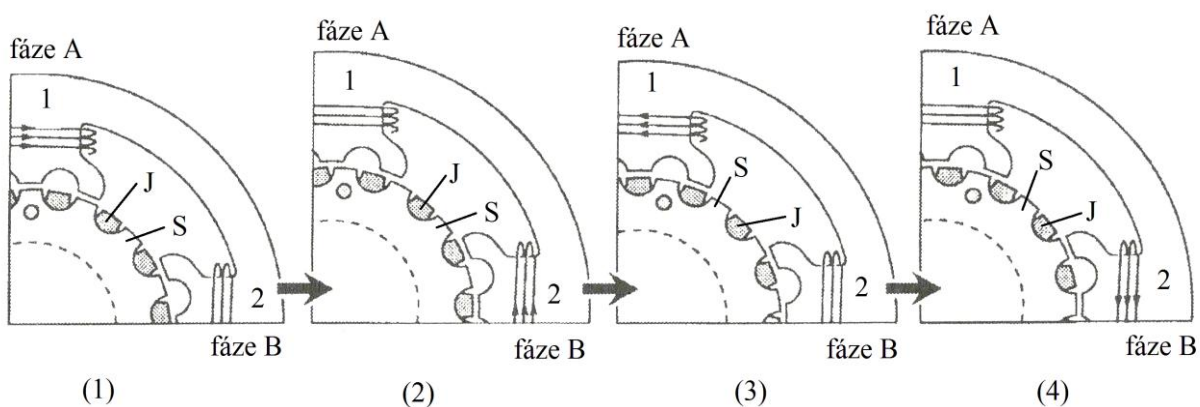
Obr. 7. Funkční uspořádání hybridního krokového motoru [20]

Nejčastěji se setkáváme s dvoufázovým hybridním krokovým motorem, který je zobrazen na obrázku 8, proto je možné na něm vysvětlit základní funkční princip.



Obr. 8. Uspořádání hybridního krokového motoru [3]

Stator obsahuje 4 póly každý pól je dále tvořen třemi zuby. Fáze A je vytvořena sériovým spojením pólu 1 a 3. Obdobně i fáze B je sériovým spojením pólu 2 a 4.



Obr. 9. Princip hybridního krokového motoru [3]

Na obrázku 9 je znázorněn postup otáčení při jednofázovém buzení. V prvním stavu (1) je buzená fáze A. V tuto chvíli jsou k pólu 1 přitaženy rotorové zuby severního pólu a zároveň statorový pól přitáhne zuby rotoru jižní polaritu. V následujícím stavu (2) je zapnutá fáze B. Rotor se nyní pootočí o čtvrtinu zubového rozestupu. Ve třetím stavu (3) je znovu buzená fáze A, ale opačnou polaritou než ve stavu 1. Rotor se tedy opět otočí o čtvrtinu zubového rozestupu a zaujme polohu 3. Nyní je tedy jižní pól rotoru v ose pólu 1 a severní pól v ose se statorovým pólem 3. Následně (4) spínáme fázi B o opačné polaritě než v minulém případě,

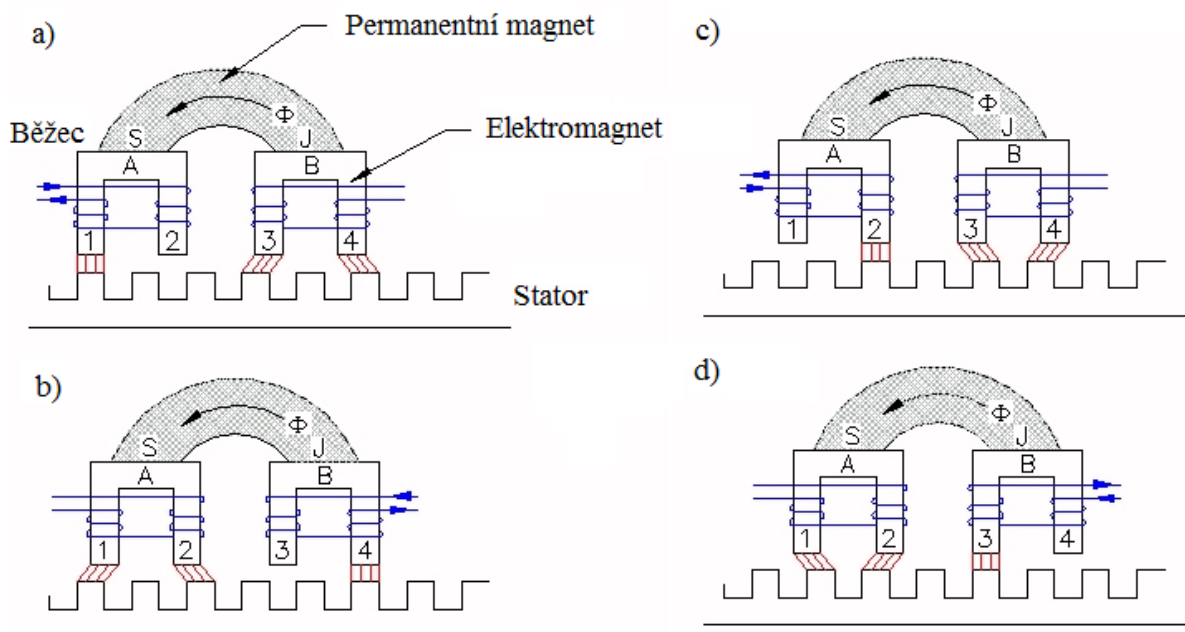
tím dosáhneme dalšího pootočení rotoru [3].

Čím dál častěji se setkáváme s motory, jejichž rotory obsahují permanentní magnety vyráběné ze slitin vzácných zemin. Jejich cena je vyšší, ale zaručují větší výstupní točivý moment nebo například vyšší stálost magnetu za vyšších teplot [15].

## 2.4 Lineární krokový motor

V předcházejícím textu byly popsány stroje, které vykonávají rotační pohyb. Ovšem existují také stroje vykonávající posuvný pohyb. Takové stroje jsou označovány jako lineární. Tento typ krokového motoru se skládá z pevného lineárního statoru a nad ním je umístěn pohyblivý běžec [7]. Mezi statorem a běžcem se nachází vzduchová mezera. Lineární krokové motory samozřejmě můžeme opět rozdělit na lineární krokové motory s proměnnou reluktancí, s permanentními magnety a hybridní [3].

Za nejpoužívanější typ lineárního krokového motoru je považován dvoufázový motor s permanentními magnety, který je znám pod názvem Sawyerův lineární krokový motor (obrázek 10).



Obr. 10. Sawyerův lineární krokový motor [10]

Pohyblivá část lineárního krokového motoru tvoří permanentní magnet a dva elektromagnety A a B. Magnetický tok se uzavírá přes permanentní magnet a elektromagnet A, odkud prochází přes vzduchovou mezera do statoru. Následně se vrací přes vzduchovou mezera a

elektromagnet B do permanentního magnetu [7]. Pokud elektromagnet není buzený, tak magnetický tok prochází přes oba zuby. Tuto situaci je možné pozorovat na obrázku 8 ve stavu a) a c) u elektromagnetu B a ve stavu b) a d) u elektromagnetu A. V případě průchodu proudu cívkou se průchod magnetického toku začne soustředit pouze na jeden zub elektromagnetu. Opět lze tuto situaci pozorovat na obrázku 10 například ve stavu a), kde celý magnetický tok prochází zubem 1 elektromagnetu A. Dále také můžeme pozorovat, že zub 1 se nachází v ose se statorovým zubem. Magnetický tok je pod zubem 1 elektromagnetu A největší. Zatímco magnetický tok procházející zubem 2 elektromagnetu A je minimální až zanedbatelný. Jakmile je buzen elektromagnet B, zub 4 se zařadí do osy s jedním ze statorových zubů, tím dojde k posuvu běžce o čtvrtinu zubového rozestupu. Výsledná situace je znázorněna na obrázku 8 b). Pro další posuv běžce ve stejném směru je zapotřebí vybudit opět elektromagnet A, ale opačnou polaritou než byl vybuzen minule. Tento děj zachycuje obrázek 8 c) [10].



Obr. 11. Lineární krokový motor v reálném provedení [25]

Na obrázku 11 je zobrazen reálný lineární krokový motor vyráběný společností H2W Technologies. Lineární krokové motory se používají například na pohon laserových řezaček nebo do strojů na výrobu polovodičů a vláknové optiky. V porovnání s rotacími motory rotačními případně servomotory obsahují lineární krokové motory méně součástí, nevykazují téměř žádné opotřebení ani nutnost údržby. Integrace do strojů je také velice snadná díky konstrukčnímu provedení [15]. Další z firem zabývajících se výrobou lineárních krokových motorů je například Johnson Electric. V současné době nabízejí motory řady Saia o velikostech průměru od 28 do 50 mm s životností až 25 000 hodin. Motory disponují rychlostmi 4,16-12,5 mm/s (při 200 Hz) a maximální silou 35-70 N [16].

### 3 Srovnání vlastností reluktančních krokových motorů a krokových motorů s permanentním magnetem na rotoru

Vlastnosti krokových motorů hrají zásadní roli při výběru vhodného motoru do dané aplikace a vycházejí z konstrukce a ovládání.

#### 3.1 Vlastnosti reluktančních krokových motorů

Krokové motory s proměnou reluktancí patří k první generaci krokových motorů, tím je také dáno, že jejich konstrukce je již částečně překonaná a v dnešní době používaná velmi zřídka [18]. Tento typ krokového motoru vyniká schopností dosáhnout vysokých otáček rotoru, avšak točivý moment je relativně nízký. Dosahuje hodnot mNm až jednotek Nm. Obvykle je možné se setkat s velmi malým úhlem kroku  $1^\circ - 5^\circ$ , výjimečně s větším [13]. Za další vlastnost plynoucí z konstrukce reluktančního krokového motoru můžeme označit nulový přídržný moment za vypnutého stavu [19]. Absence permanentního magnetu zapříčiňuje neměnnou funkčnost motoru i v prostředí o vysoké teplotě. Vlivem malého točivého momentu dochází k menší přesnosti kroku [11,24].

#### 3.2 Vlastnosti krokových motorů s permanentním magnetem na rotoru

Krokové motory s permanentním magnetem na rotoru mají komplikovanější magnetický obvod, tím je také dána vyšší cena. Pokud není motor buzený, stále vykazuje vlivem permanentních magnetů přídržný moment [6]. Použití permanentních magnetů přináší mnoho výhod, ale také stále omezují využití těchto motorů v prostředí s velmi vysokými teplotami [24]. Točivý moment u strojů s permanentním magnetem na rotoru dosahuje hodnot od jednotek mNm až do desítek Nm v závislosti na typu motoru. Také velikost kroku je značně rozdílná. U motoru, který má rotor polarizován radiálně, je většinou velikost kroku větší než  $15^\circ$ , obvykle  $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ , zatímco motory s axiálně polarizovaným magnetem (hybridní) se konstruují nejčastěji s velikostí kroku od  $0,36^\circ$  do  $5^\circ$  [13].

Mezi další významnou vlastnost je jistě možné zařadit velkou přesnost kroku. Krokové motory s permanentními magnety nabízejí několik výhod jako je vysoká účinnost, vysoká hustota energie, vysoký poměr točivého momentu k setrvačnosti a vynikající trvanlivost a provozuschopnost [2].



### 3.3 Srovnání reluktančních krokových motorů a krokových motorů s permanentním magnetem na rotoru

Níže uvedený text je zaměřen na porovnání vlastností krokových motorů reluktančních a krokových motorů s permanentními magnety na rotoru.

Reluktanční krokové motory jsou technologicky nejjednodušším typem krokových motorů, z toho je možné usoudit, že i cena takového stroje je nižší než u složitějších typů s permanentními magnety. Vyšší cena krokového motoru s permanentními magnety je však opodstatněna lepšími parametry. Provozní moment při obdobných velikostech stroje je 2 až 2,5 krát větší než u motoru s proměnlivou reluktancí [13]. Také poměr výkon/hmotnost je výrazně lepší u krokového motoru s permanentními magnety [3]. Mezi další výhody krokového motorů s permanentními magnety lze zařadit vyšší přídržný moment, vyšší přesnost kroku a kratší časovou konstantu, díky které lze dosáhnout většího rozsahu otáček [1]. Nevýhodou krokového motoru s permanentním magnetem je větší poměr moment/moment setrvačnosti než u krokového motoru reluktančního a složitější výroba motoru s malým úhlem kroku [3].

Permanentní magnety vlivem vysokých teplot ztrácejí svoje magnetické vlastnosti. Proto je potřeba věnovat pozornost okolnímu prostředí, kde bude krokový motor s permanentními magnety na rotoru pracovat. Do míst s velmi vysokými teplotami je z tohoto důvodu vhodnější použít reluktanční krokový motor [24].

## 4 Principy řízení krokových motorů

Řízení krokových motorů lze rozdělit do dvou základních typů řízení, a to řízení **bipolární** a řízení **unipolární**.

### 4.1 Typy řízení krokových motorů

- **Bipolární řízení**

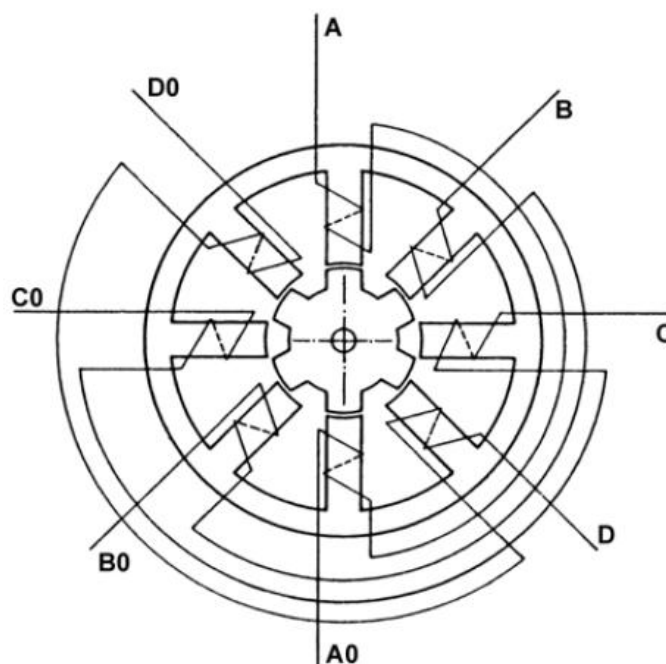
Při řízení krokového motoru tímto způsobem prochází proud cívkami, které jsou vzájemně protilehlé. Cívky jsou opačně polarizovány, tedy jejich magnetické pole je opačně orientováno. Krokový motor má v tomto režimu větší kroučící moment, který je ovšem vykoupěn větší spotřebou energie. Řídící obvody musejí být díky buzení více fází současně složitější.

- **Unipolární řízení**

Princip unipolárního řízení spočívá ve spínání vždy pouze jedné cívky na statoru. Tímto sice lze dosáhnout zjednodušení řídicího obvodu, ale za cenu snížení kroučícího momentu.

#### 4.1.1 Čtyřtaktní způsob ovládání při buzení jedné fáze

Tento způsob buzení spadá díky buzení pouze jedné fáze do řízení unipolárního.



Obr. 12. Čtyřtaktní ovládání [9].

Jeho princip je možné vysvětlit pomocí obrázku 12. Výchozí stav vyobrazený na obrázku 12 odpovídá buzení fáze A. Ostatní fáze tedy B, C, D buzeny nejsou. Rotor krokového motoru je tedy natočen tak, že jeho magnetický odpor je nejmenší. Tento stav lze označit za výchozí rovnovážnou polohu. Kroutící moment v této poloze je nulový. Následně odpojíme fázi A od proudu a začneme budit fázi B. Rotor má opět tendenci zaujmout pozici s co nejmenším magnetickým odporem a dojde tedy k jeho pootočení. Rotor se tedy natočí do nové rovnovážné polohy. Postupným spínáním fází dosáhneme kruhového pohybu. Pokud vyžadujeme rotaci v opačném směru, budíme jednotlivé cívky v opačném pořadí. Tento způsob řízení krokového motoru patří k nejjednodušším a lze ho využít jak pro krokové motory s proměnlivou reluktancí, tak výjimečně i pro hybridní krokové motory. Pro krokové motory s radiálně polarizovaným magnetem a klasicky vinutým státorem lze tento způsob řízení využít jen velmi omezeně. Je totiž nutné otáčet polaritu jednotlivých fází.

#### 4.1.2 Čtyřtaktní způsob ovládání při buzení dvou fází

U tohoto řízení krokového motoru dochází k současnému vybudování dvou sousedních fází. Princip lze opět snadno vysvětlit pomocí obrázku 12. Současně dojde k vybudování statorových cívek A, A0 a B, B0. V tuto chvíli dojde k natočení rotoru takovým způsobem, že rotorové vyniklé zuby zaujmou pozici, ve které se co největší plochou kryjí se statorovými póly. Nyní je potřeba rozhodnout o směru otáčení rotoru. Pokud je zapotřebí otáčet rotorem po směru hodinových ručiček dojde k odpojení buzení fáze A, A0 vinutím fáze B, B0 stále protéká proud. K této fázi je opět zapotřebí vybudit vedlejší fázi tedy C, C0. Dále dochází ke spínání fází obdobným způsobem. Tím zajistíme požadované otáčení rotoru. Velikost kroku je stejná jako v případě čtyřtaktního řízení při buzení jedné fáze. Magnetické pole dosáhne ustálené polohy vždy v ose mezi statorovými póly. Tento způsob řízení je náročnější jak na řídicí obvod, tak i spotřeba energie je větší. Tyto nevýhody lze vyvážit statickým přídržným momentem, který je 1,9 krát větší než v případě řízení s buzením jedné fáze.

#### 4.1.3 Osmitaktní řízení

Principiálně vychází osmitaktí řízení z dvou výše popsaných řízení. Vždy při spínání dvou sousedních fází vložíme časovou pauzu po nabuzení jedné cívky. Tímto lze dosáhnout cyklického střídání osmi možných kombinací sepnutí krokového motoru. Nespornou výhodou tohoto řízení je možnost zdvojnásobit počet kroků u jednoho typu motoru. Pro krokový motor z obrázku 12 je možné pomocí tohoto řízení dosáhnout úhel kroku  $7,5^\circ$ .

#### 4.1.4 Mikrokrokování

V případě, že není dostačující základní krok krokového motoru, je možné tento základní krok rozdělit do menších elementů. Takovéto rozdělení základního kroku se nazývá mikrokrokování. Je potřeba zmínit, že pomocí mikrokrokování lze zvětšit počet kroků, tedy rozlišení krokového motoru nikoliv přesnost daného kroku. Přesnost kroku je dána mechanickou konstrukcí krokového motoru. Princip mikrokrokování spočívá v různém buzení fází. Tedy pokud budíme dvě fáze vedle sebe, lze v jedné fázi budící proud zvyšovat, zatímco v druhé budící proud snižovat. Bude se tak magnetické pole ustalovat v závislosti na hodnotách budících proudů vždy v jiné poloze mezi dvěma buzenými fázemi. Podrobněji si lze mikrokrokování přiblížit na příkladu dvoufázového hybridního krokového motoru. Tento krokový motor vyžaduje pro plný krok otočení magnetického pole o  $90^\circ$ . Moment motoru se mění podle funkce sinus v závislosti na daném natočení rotoru. Pro přídržný moment, který ovlivňuje velikost budícího proudu, lze napsat tyto rovnice [23]:

$$M_A = -k_T \cdot i_A \cdot \sin(N \cdot \Delta\Phi) \quad (4.1)$$

$$M_B = -k_T \cdot i_B \cdot \sin\left(N \cdot \Delta\Phi - \frac{\pi}{2}\right) \quad (4.2)$$

kde:  $k_T$ - je konstrukční konstanta,

$i_A, i_B$  - budící proudy v jednotlivých fázích,

$N$ - počet závitů

$\Delta\Phi$  - změna magnetického toku.

Pro hybridní krokový motor je typické, že pro jeho otáčení musíme cívky statoru budit střídavě kladným a záporným proudem. U dvoufázového hybridního krokového motoru odpovídá plný krok otočení magnetického pole o již zmíněných  $90^\circ$ . Plný krok je tedy možné rozdělit do  $n_m$  mikrokroků. Jednotlivé budící proudy ve fázích lze popsat těmito vztahy:

$$i_A = I \cdot \cos\left(\frac{k \cdot \varphi}{n_m}\right) \quad (4.3)$$

$$i_B = I \cdot \cos\left(\frac{k \cdot \varphi}{n_m} - \frac{\pi}{2}\right) \quad (4.4)$$

kde:  $\varphi$  – plný úhel kroku,

$I$  – velikost proudu,

$n_m$ - počet mikrokroků,

$k$  – konstanta ( $k = 0, 1, 2 \dots$ ).

Pokud uvážíme, daný plný krok dvoufázového hybridního krokového motoru rozdělit na čtyři mikrokroky, rozdělení proudů ve fázích bude následné (tabulka 1).

Mikrokrok číslo	Elektrický úhel $\varphi$	Proud fází A $i_A$	Proud fází B $i_B$
0	$0^\circ$	1 I	0 I
1	$22,5^\circ$	0,924 I	0,383 I
2	$45^\circ$	0,707 I	0,707 I
3	$67,5^\circ$	0,383 I	0,924 I
4	$90^\circ$	0 I	1 I

Tabulka 1. Rozdělení fázových proudů [23]

Mikrokrokování je velmi univerzální a lze ho využít prakticky u všech krokových motorů. Zejména nalézá využití u systémů, kde je kladen velký důraz na počet kroků tedy například odvětví robotiky, fyto techniky, mikrotechniky.

## 5 Model aktivního krokového motoru

Před samotnou simulací aktivního krokového motoru bylo zapotřebí provést návrh aktivního krokového motoru a nakreslit geometrii pro simulační program.

### 5.1 Model aktivního krokového motoru

Grafický model krokového motoru byl proveden v programu Autocad za těchto předpokladů. Nejprve bylo zapotřebí zvolit velikost stroje:

Výška stroje: **50 mm**.

Hloubka stroje: **50 mm**.

Na statoru aktivního krokového motoru bylo vytvořeno **6** vyjádřených pólů zakončených pólovými nástavci. Rotor byl osazen **dvěma** permanentními magnety. Další rozměry byly zvoleny nebo vypočítány ze základních pravidel.

**Šířka statorové obruče [14]:**

$$W_{sy} \geq \frac{W_{st}}{2} \quad (5.1)$$

kde:  $W_{sy}$  - šířka statorové obruče,

$W_{st}$  - šířka vyjádřeného pólu.

Po dosazení do výše uvedeného vzorce byla šířka statorové obruče stanovena na **2,5 mm** a to vzhledem k zvolené šířce vyjádřeného pólu **5 mm**.

**Šířka rotorového magnetu [14]:**

$$W_{rt} = 0,4R_{tp} \text{ až } 0,6R_{tp} \quad (5.2)$$

kde:  $W_{rt}$  - šířka rotorového magnetu,

$R_{tp}$  - šířka statorového pólového nástavce.

**Úhel vzájemného natočení statorových pólů [14]:**

$$\theta_s = \frac{360^\circ}{N_p} \quad (5.3)$$

kde:  $\theta_s$  - úhel natočení statorových pólů,

$N_p$  - počet statorových pólů.

Pro daný model obsahující 6 pólů na statoru, dosáhlo vzájemné natočení  $60^\circ$  stupňů.

Vzduchová mezera namodelovaného aktivního krokového motoru, byla zvolena experimentálně, a to pomocí metody konečných prvků. Vzduchová mezera by samozřejmě měla dosahovat co nejmenší možné hodnoty s ohledem na výrobní schopnosti. Také je nutné uvážit vůli v ložiskách rotoru. Vzduchová mezera byla s ohledem na výše uvedené zvolena **0,5 mm**. Při zvětšení mezery k hodnotám větším než 1,5 mm bylo velice obtížné dosáhnout správného nasycení.

## 5.2 Simulace aktivního krokového motoru v programu

Simulace aktivního krokového motoru byla provedena pomocí metody konečných prvků (MKP). Programový soubor MKP je schopný poskytnout informace o rozložení magnetických siločar, velikosti magnetické energie a dalších parametrů elektromagnetického pole [4].

### 5.2.1 Simulace pomocí výpočetního programu FEMM

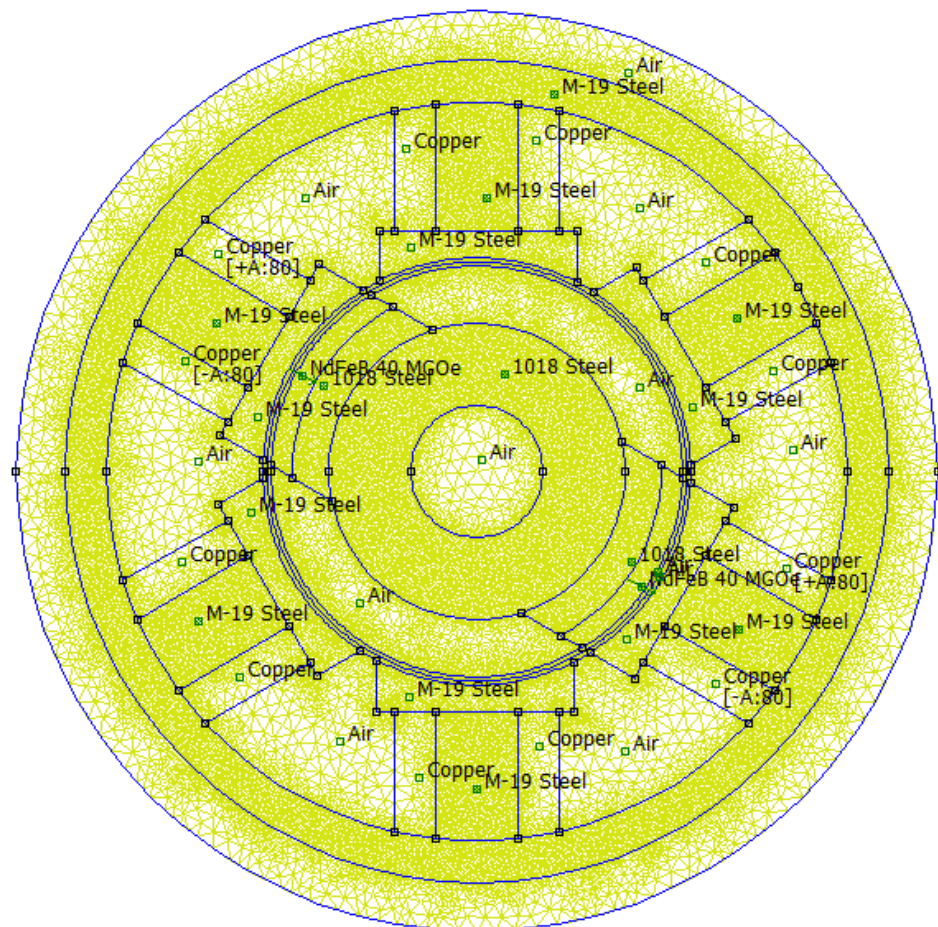
Pro konečné vyhodnocení nakreslené geometrie byl zvolen výpočetní program FEMM (Finite Element Method Magnetics). V tomto programu je možné simulovat a vyšetřovat problematiku magnetického, elektrostatického pole, dále pak tepelných a proudových toků [21].

Pro danou geometrii byla řešena problematika elektromagnetického pole. Zejména byly zkoumány změny indukčnosti, momentu a rozložení magnetické indukce v závislosti na natočení rotoru krokového motoru. Dále byl porovnán tvar dvou různých provedení rotorových magnetů. První návrh rotorových magnetů spočívá v provedení geometrie tak, že magnetické póly jsou rovné. Druhý návrh rotorových magnetů předpokládá geometrii rotorových pólů se zkosenými magnety.

### 5.2.2 Realizace simulace

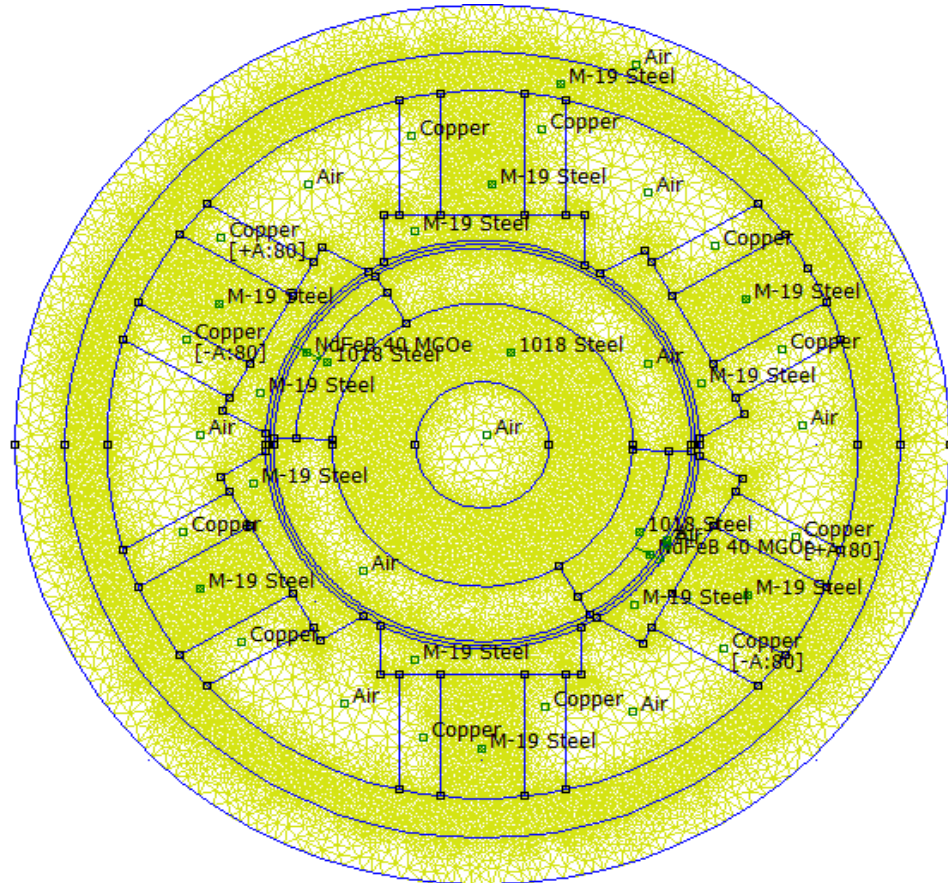
Nejprve bylo nutné samotný CAD model importovat do výpočetního programu FEMM za předpokladu, že CAD model měl příponu souboru (*dxg*). Následující podmínkou bylo umístění modelu v souřadnicích ( $x = 0, y = 0$ ), a to z důvodu správného vyhodnocení kroutícího momentu pomocí funkce (*torque from Stress Tensor*). Po úspěšném importování geometrie bylo zapotřebí správně nadefinovat jednotlivé materiály.

V příloze 1 je možné pozorovat volbu jednotlivých materiálů. Permanentní magnety jsou vyrobeny z kombinace materiálů neodym – železo – bór (NdFeB). Tento materiál se vyznačuje při pokojové teplotě nejvyšším energetickým součinem ze všech komerčně vyráběných magnetů. Nevýhodou NdFeB materiálu je velká citlivost na teplotu. Již při teplotách kolem 100°C je potřeba zvláštní konstrukce NdFeB materiálu. Pokud je nutné pracovat ještě s vyššími teplotami, nelze již tento materiál použít. V takovém případě je možné použít materiál na bázi hliník – nikl – kobalt [1, 14]. Při simulaci byly vyzkoušeny oba výše uvedené materiály. Díky lepším vlastnostem byl zvolen NdFeB materiál, který při použití vykazoval větší kroutící moment. Dále vinutí stroje bylo vytvořeno z mědi. Na statorové póly, pólové nástavce a obruč byla zvolena ocel M19. Jedná se o ocel s nízkým obsahem uhlíku, která je legovaná malým množstvím křemíku. Velikost čísla za písmenem M označuje množství ztrát vířivými proudy. Tento typ oceli vyniká velmi malými ztrátami s ohledem na co nejnižší náklady při výrobě [22]. Celý model byl následně vložen do vzduchu.



Obr. 13. Výpočetní síť modelu 1 (vlastní zpracování)





Obr. 14. Výpočetní síť modelu 2 (vlastní zpracování)

Z obrázku 15 a 16 je patrná výpočetní síť navržených modelů 1 a 2. V průběhu simulování se vyskytl problém s hustotou zasiťování ve vzduchové mezeře. Díky řídké síti nebylo možné vyhodnocovat přesně zkoumané hodnoty. Vzduchová mezera byla tedy přesně vymezena kružnicemi a v jejich mezikruží byla nadefinována hustší výpočetní síť. Kružnice uprostřed vzduchové mezery po té sloužila k vyhodnocování krotícího momentu.

### 5.2.3 Výstupní hodnoty vyhodnocené pomocí simulace

Před samotným vyhodnocováním parametrů bylo nutné natočit rotor tak, aby se rotorové permanentní magnety nalézaly ve vertikální ose spolu se statorovými pólovými nástavci. Tuto polohu je možné označit jako  $\theta = 0^\circ$ , tedy úhel natočení je roven  $0^\circ$ . Po té bylo s rotorem otáčeno v levotočivém směru po  $5^\circ$  až do polohy, kde rotorové magnety byly umístěny v ose s vedlejšími statorovými póly  $\theta = 60^\circ$ . K řízení modelu bylo využito bipolární řízení. Spínaná byla tedy protilehlá vinutí. Budící proud byl zvolen  $I=2A$  a počet závitů  $N=80$ .

$\Theta$ [°]	$W_m$ [J]	$M$ [Nm]	$L$ [H]
0	0,3190	0,0223	0,1595
5	0,3182	0,1336	0,1591
10	0,3166	0,1667	0,1583
15	0,3162	0,1682	0,1581
20	0,3154	0,1465	0,1577
25	0,3154	0,1465	0,1577
30	0,3155	0,1633	0,1577
35	0,3155	0,1718	0,1577
40	0,3151	0,1687	0,1575
45	0,3140	0,1440	0,1570
50	0,3128	0,0705	0,1564
55	0,3153	0,0029	0,1576
60	0,3168	0,0010	0,1584

Tabulka 2. Vypočítané hodnoty stroje 1 (vlastní zpracování)

Tabulka 2 uvádí vypočtené hodnoty magnetické energie  $W_m$ , kroutícího momentu  $M$ , a indukčnosti  $L$  vyhodnocované vždy po natočení rotoru o  $5^\circ$  u návrh stroje 1 (rotorové magnety v provedení geometrie tak, že magnetické póly jsou rovné). Tabulka 3 zobrazuje výsledné hodnoty u návrhu stroje 2 (rotorové magnety v provedení geometrie rotorových pólů se zkosenými magnety). Spolu s těmito parametry bylo ještě zkoumáno rozložení magnetické indukce  $B$  (příloha 1 a 2).

Indukčnost  $L$  byla počítána dle vztahu [12]:

$$L = \frac{W_m}{0,5 \cdot I^2} \quad (5.4)$$

kde:  $L$  – indukčnost,

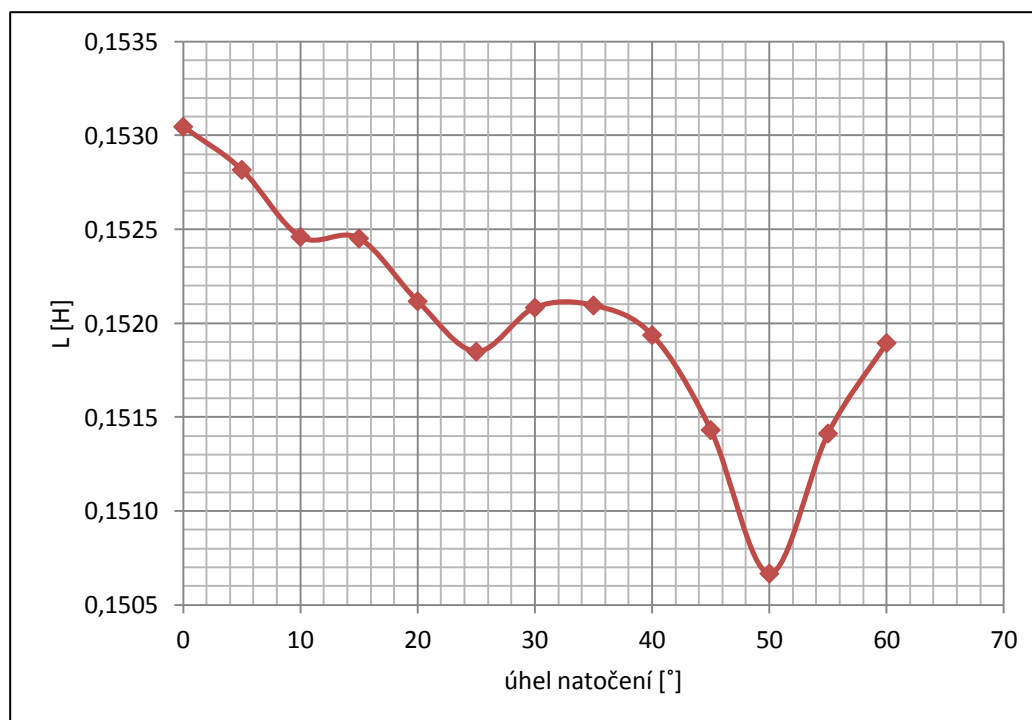
$W_m$  – magnetická energie,

$I$  - proud.

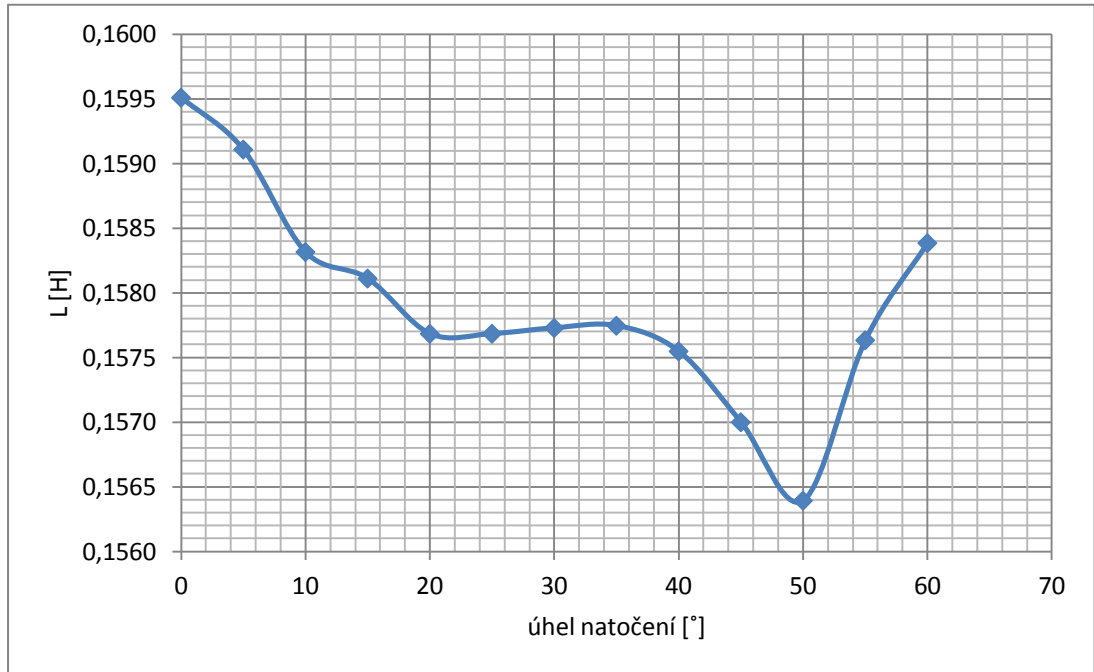
$\Theta$ [°]	$W_m$ [J]	M [Nm]	L [H]
0	0,3061	0,0118	0,1530
5	0,3056	0,1087	0,1528
10	0,3049	0,1591	0,1525
15	0,3049	0,1691	0,1525
20	0,3042	0,1512	0,1521
25	0,3037	0,1374	0,1518
30	0,3042	0,1591	0,1521
35	0,3042	0,1718	0,1521
40	0,3039	0,1710	0,1519
45	0,3029	0,1499	0,1514
50	0,3013	0,0797	0,1507
55	0,3028	0,0195	0,1514
60	0,3038	0,0020	0,1519

Tabulka 3. Vypočítané hodnoty stroje 2 (vlastní zpracování).

V grafech 3 a 4 je vyobrazená závislost indukčnosti na úhlu natočení rotoru u jednotlivých návrhů strojů. Pokud dojde ke srovnání obou uvedených průběhů lze usoudit, že první návrh magnetického obvodu vykazuje větší indukčnost než druhý. U obou průběhů dochází k výraznému poklesu indukčnosti při úhlu natočení rotoru  $\theta = 50^\circ$ .

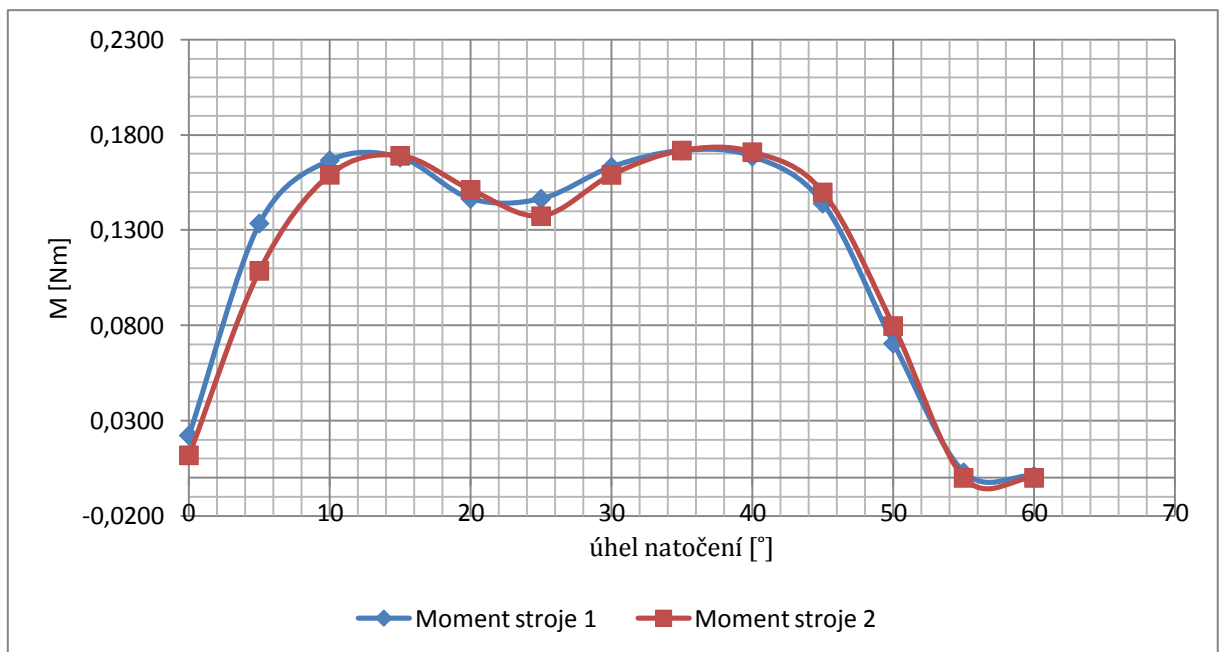


Graf 3. Indukčnost stroje 2 (vlastní zpracování).



Graf 4. Indukčnost stroje 1 (vlastní zpracování).

V grafu 5 je zobrazena závislost kroučícího momentu na úhlu natočení rotoru. Dále je graf 5 zaměřen na porovnání dvou rozdílných geometrií rotoru.



Graf 5. Závislost momentu stroje na natočení motoru (vlastní zpracování)

V přímém porovnání uvedených křivek v grafu 5 je patrná výrazná shoda obou křivek od 30° do 60°. Naopak v první části charakteristiky má model stroje 1 strmější vzestup momentu, což lze označit za zjevnou výhodu. Další výhodou tohoto provedení je menší propad momentu

při 25°. Maximální kroutící moment obou modelů je pak téměř totožný. Dále z grafu 5 je zřejmý pokles kroutícího momentu při otočení rotorové části krokového motoru o 20° a 25°. Tento pokles je zřejmě dán nedokonalou konstrukcí statorových pólů, kde docházelo k přesycování pólu v určitém místě a tím k zamezení průchodu magnetického toku. Z důvodu nejmenších propadů momentu byl model 1 a 2 vyhodnocen jako nejlepší ze všech zkoumaných geometrií.

Dalším negativním vlivem, který bylo možné pozorovat během simulování, byl jev nazývaný jako **lepení magnetů**. Díky použití velmi kvalitních magnetů tedy i značně silných docházelo k přilnutí rotorových permanentních magnetů ke statorové části krokového motoru. Při pokusu vyhodnocení simulace za použití permanentních magnetů AlNiCo nedocházelo k tak výraznému lepení magnetů, ovšem kroutící moment byl značně omezen.

Při dalších experimentálních pokusech změny geometrie, za účelem dosažení většího kroutícího momentu nebylo dosaženo lepších výsledků než u dvou výše uvedených geometrií. Například při zmenšení velikosti statorových pólových nástavců z důvodu snížení lepení permanentních magnetů, bylo dosaženo menšího kroutícího momentu než v případě těchto geometrií.

V příloze 4 - 7 jsou uvedeny další čtyři modely, ve kterých byly vlivem změněné geometrii zkoumány parametry. Jedná se o modely označené čísly 3, 4, 5 a 6.

U modelů 4 a 5 byla vzduchová mezera zmenšena na 0,3 mm a statorový pól byl rozdělen na dva zuby. Dále pak model 4 má stejně navržený rotor jako je tomu u modelu 1 a model 5 reprezentuje stejnou geometrii rotoru jako model 2. Zřejmě vlivem menší vzduchové mezery bylo dosaženo vyšších kroutících momentů. V grafu 2 příloha 8 je možné pozorovat porovnání kroutícího momentu modelu 4 a 5. Je patrné, že ve srovnání s modely 1 a 2, kde maximální kroutící moment dosáhl hodnoty 0,172 Nm, je tento moment vyšší a dosahuje hodnoty 0,226 Nm. Samotný průběh momentu je značně zdeformovaný a při úhlu natočení rotoru 35° dojde k výraznému poklesu kroutícího momentu. Tento pokles by mohl mít za následek zadrhávání rotoru při otáčení.

Dále se v příloze 4 respektive v příloze 7 nachází model 3 a 6. Oba tyto modely mají opět menší vzduchovou mezera (0,3 mm) a statorové póly rozděleny na dva zuby. Model 3 má zúžené statorové póly za účelem snížení jevu lepení magnetů. Model 6 má statorové póly

vyšší s cílem snížení přesycování pólu v určitém místě. V grafu 1 příloha 8 je opět porovnání kroutícího momentu v závislosti na natočení rotoru modelu 3 a 6. U modelu 6 bylo dosaženo nejvyššího kroutícího momentu ze všech uváděných geometrií a to 0,278 Nm. Opět ale dochází k deformacím křivky, a to na více místech než tomu bylo u modelů 4, 5. Také strmost vzestupu kroutícího momentu je nízká. Motor má tedy do úhlu natočení rotoru  $15^\circ$  velmi malý kroutící moment. Model 3 nepřináší žádný pozitivní přínos. Snížení jevu lepení magnetů a tím navýšení kroutícího momentu není tímto opatřením v geometrii možné. Lze tak usoudit z dané momentové charakteristiky graf 1 příloha 8, že nedochází k výraznému nárůstu kroutícího momentu. Opět lze pozorovat strmé poklesy kroutícího momentu.

## 6 Závěr

V první kapitole této práce je rozebrán základní princip krokových motorů. Jak je již výše uvedeno jedná se o motor, který principiálně spadá do motorů synchronních. V další kapitole práce jsou globálně hodnoceny vlastnosti všech typů krokových motorů. Z popisovaných vlastností je zřejmé, že krokový motor lze označit za velice schopného konkurenta servo-pohonů a to zejména v oblastech, kde není zapotřebí zpětná vazba systému a kde není dosahováno příliš vysokých otáček. Jedním z typických příkladů nahrazení servo-pohonu krokovým motorem je automobilový průmysl konkrétně nastavení sklonu světlometů. V takovémto případě je použití krokového motoru velice výhodné a to z důvodu jasně daných kroků a jejich přesnosti.

V následující kapitole se práce zaměřuje na požívané typy krokových motorů, ať už vykonávajících kruhový pohyb nebo přímý (lineární). Ve stručném shrnutí této problematiky se jedná o tři základní typy. Prvním typem je *reluktanční krokový motor*, který lze označit za nejlevněji vyrobitelný a principiálně nejjednodušší. Na rotoru takového motoru se neaplikují žádné permanentní magnety. Druhým typem je *aktivní krokový motor*, jehož rotor již obsahuje permanentní magnety a rotor je polarizován radiálně. Tento typ je vhodný pro velký úhel kroku. Třetím typem je *hybridní krokový motor*, ten má rotor polarizován axiálně. Dnes se jedná o nejvíce zastoupený model na trhu často konstruovaný s velice malým úhlem kroku.

Dále práce srovnává krokové motory reluktanční a krokové motory s permanentními magnety na rotoru. Prakticky všechny parametry jako poměr výkon/hmotnost nebo velikost momentu hrají ve prospěch krokových motorů s permanentními magnety. Naproti tomu reluktanční krokové motory si zachovávají svojí nízkou výrobní cenu.

Další důležitou částí pro správnou činnost krokového motoru je jeho řízení. V krátkosti lze konstatovat, že principiálně existují dva základní způsoby řízení a to řízení unipolární a bipolární. Obě tyto řízení jsou výše v textu rozebrány.

Součástí práce je několik modelů krokových motorů simulovaných pomocí metody konečných prvků. Modely byly vytvořeny ve výpočetním programu FEMM (Finite Element Method Magnetism), kde je zároveň možné vyšetřovat problematiku magnetického a elektrostatického pole, změny indukčnosti, momentu a rozložení magnetické indukce v závislosti na natočení rotoru krokového motoru. Modely byly mezi sebou porovnávány jak

pomocí těchto charakteristik tak také vzhledem k tvaru provedení rotorových magnetů. Na podkladě hodnocených modelů lze konstatovat, že při snižování vzduchové mezery lze dosáhnout lepších hodnot kroutících momentů. Vzduchová mezera však v praxi musí být zachována na určité velikosti a to z důvodu technologického provedení. Při modelování krokového motoru se vyskytl problém s jevem lepení rotorových permanentních magnetů na statorové póly. Tento jev měl za následek snížení velikosti kroutícího momentu. Model číslo 3 měl za úkol přilínání magnetů ke statoru alespoň částečně řešit. Z výsledné momentové charakteristiky ovšem vyplynulo, že velikost momentu dosahovala menších hodnot než u ostatních modelů se stejně velkou vzduchovou mezerou. Nelze tak toto provedení považovat za výhodné. U momentových charakteristik modelů číslo 4 a 5 docházelo ke značným propadům kroutícího momentu při určitých úhlech natočení rotoru. Snaha o odstranění propadů vedla ke konstrukci modelu číslo 6, kde za pomoci zvětšení výšky statorových pólových nástavců mělo dojít ke snížení přesycování pólového nástavce v určitém místě při inkriminovaných úhlech natočení rotoru. Výsledkem však byla momentová charakteristika viz příloha 8 graf 1., kdy se výrazně zmenšila strmost náběhu kroutícího momentu a propady odstraněny nebyly. Výrazného zlepšení průběhu momentové charakteristiky bylo dosaženo až u modelů číslo 1 a 2, které byly konstruovány jako poslední. Zde byla zvětšena vzduchová mezera a statorový pól nebyl rozdělen na dva zuby. Dalšími úpravami geometrie (*např. zvětšením plochy magnetů*) by pravděpodobně bylo možné dosáhnout ještě lepších výsledků.



## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ACARNLEY, Paul. *Stepping motors: a guide to theory and practice*. 4th ed. London: Institution of Electrical Engineers, 2003. vii, 159 s. IEE control engineering series; 63. ISBN 0-85296-029-8.
- [2] BIFARETTI, S., IACOVONE, V., ROCCHI, A., TOMEI, P., VERRELLI, C. M. Global Learning Position Controls for Permanent-Magnet Step Motors. Dept. of Electron. Eng., Univ. of Rome Tor Vergata, Rome, Italy. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 11/2011; DOI:10.1109/TIE.2011.2114314
- [3] HRABOVCOVÁ, Valéria. *Moderné elektrické stroje*. 1. vyd. Žilina: Žilinská univerzita, 2001. 265 s. Vysokoškolské učebnice. ISBN 80-7100-809-5.
- [4] HRABOVCOVÁ, Valéria a LIČKO, Miroslav. *Reluktančný synchronný motor*. 1. vyd. Žilina: Žilinská univerzita, 2001. 229 s. Vedecké monografie. ISBN 80-7100-891-5.
- [5] MARTÍNEK, Radislav. Krokové motory s ovladači. *Automa*, 8/2006, ISSN 1210-9592
- [6] NOVÁK, Petr. *Mobilní roboty-pohony, senzory, řízení*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství: BEN-technická literatura, 2005. 248 s. ISBN 80-7300-141-1.
- [7] NOVOTNÝ, Jan, HNÍZDIL, Jiří. Rotační a lineární krokové motory. [online]. *Elektrorevue - Internetový časopis*. Dostupné z [www: <http://www.elektrorevue.cz>](http://www.elektrorevue.cz) 43/2005, ISSN 1213-1539.
- [8] PISKAČ, Luděk. *Elektrické pohony: principy a funkce*. 2., upr. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2008. 119 s.
- [9] RYDLO P.: *Krokové motory a jejich řízení* Technická univerzita Liberec, 2000. [online]. [cit. 10.3.2014]. Dostupné z [www: <http://www.mti.tul.cz/files/ats/krok2.pdf>](http://www.mti.tul.cz/files/ats/krok2.pdf)
- [10] SINGULE, Vladislav. Vlastnosti a použití mikromotorů. *Automa*, 3/2008, str. 62-64. ISSN 1210-9592.
- [11] ŠKOFIC, J., KOBLAR, D., BOLTEŽAR, M.: Permetric Study of Permanent-Magnet Stepper Motor's Stepping Accuracy Potential. *Strojnický věstník – Journal of Mechanical Engineering* 60(2014), pp. 255-264. DOI:10.5545/sv-jme.2013.1526.
- [12] TOLIYAT, Hamid A., ed. a KLIMAN, Gerald B., ed. *Handbook of electric motors*. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 2004. xxi, 805 s. ISBN 978-0-8247-4105-1.
- [13] UHLÍŘ, Ivan et al. *Elektrické stroje a pohony*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. 120 s. ISBN 80-01-02482-2.
- [14] YEADON, William H., ed. a YEADON, Alan W., ed. *Handbook of small electric motors*. New York: McGraw-Hill, ©2001. 1 sv. (v různém stránkování). ISBN 0-07-

072332-X.

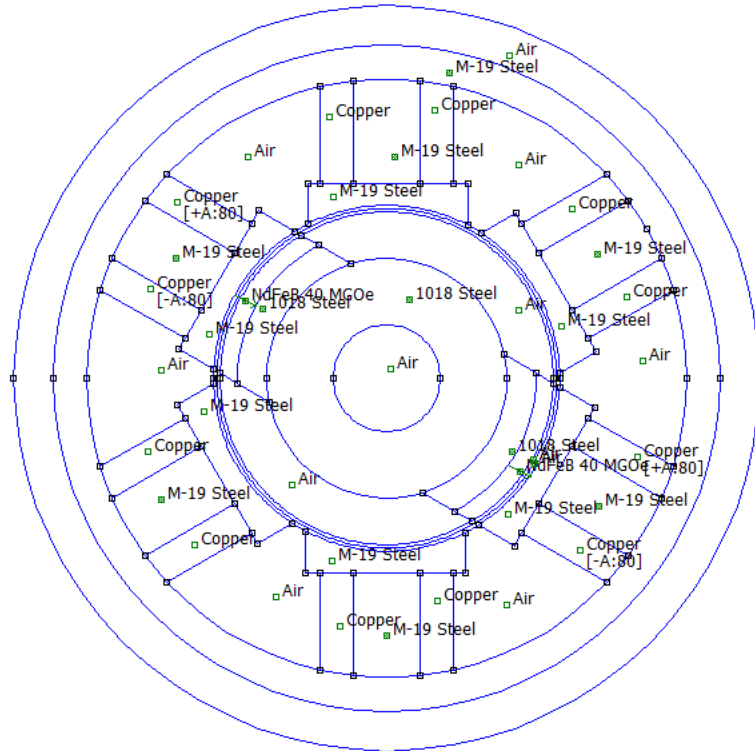
- [15] Bartos, Frank J.: *Evoluce krokových motorů*. [online]. Control Engineering [cit. 3.1.2014] dostupné na www: <<http://www.controlengcesko.com/hlavni-menu/artykuly/artykul/article/evoluce-krokovych-motoru>>
- [16] *Linear stepper motors*. [online]. Johnson Elektrick [cit. 8.1.2014] dostupné na www: <<http://www.johnsonelectric.com/en/products/motion/stepper-motors/linear-stepper-motors.html>>
- [17] Elektické pohony. [online]. Informační portál z oblasti automatizace. [cit. 12.12.2013]. Dostupné z www: <[http://www.e-automatizace.cz/ebooks/ridici\\_systemy\\_akcni\\_cleny/Akc\\_el.html](http://www.e-automatizace.cz/ebooks/ridici_systemy_akcni_cleny/Akc_el.html)>
- [18] *Princip – Krokový motor*. [online]. Portál o pohonné technice v průmyslu, [cit. 2.12.2013]. Dostupné z www: <<http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/krokovy-motor>>
- [19] *Krokové motory 1 – typy motorů*. [online]. Robodoupě. Web o robotice. [cit. 20.2.2013]. Dostupné z www: <<http://robodoupe.cz/2013/krokovy-motory-1-typy-motoru/>>
- [20] *Krokový motor - Hybridní krokový motor*, [online]. Servo-drive. [cit. 2.2.2013]. Dostupné z www: <[http://www.servo-drive.com/specialni\\_krokovy\\_motory\\_krokovy\\_motory\\_na\\_miru.php](http://www.servo-drive.com/specialni_krokovy_motory_krokovy_motory_na_miru.php)>
- [21] *Simulační program FEMM* [online]. [cit. 18. 4. 2014]. Dostupné z www: <<https://sites.google.com/site/karelmls/simulan-program-femm>>
- [22] Silicon Steel (Electrical Steel), [online]. Proto Laminations Inconline [cit. 25. 4. 2014]. Dostupné z www: <<http://www.protolam.com/page7.html>>
- [23] *Pohony s krokovými motorky* [online]. [cit. 18.2.2014]. Dostupné z www: <[http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni\\_materialy/se/cast\\_C\\_el\\_pohony/se\\_eph\\_c1\\_krokac\\_02\\_teorie.pdf](http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/se/cast_C_el_pohony/se_eph_c1_krokac_02_teorie.pdf)>
- [24] *Curieho teplota aneb jak zrušit magnet.*, [online]. Fyzmatik píše [cit. 3.2.2014]. Dostupné z www: <<http://fyzmatik.pise.cz/868-curieho-teplota-aneb-jak-zrusit-magnet.html>>
- [25] *H2W linear stepper motor stages ideal for robotic applications.*, [online]. Linear Motion Tips. [cit. 3. 5. 2014]. Dostupné z www: <<http://www.linearmotiontips.com/h2w-linear-stepper-motor-stages-ideal-for-robotic-applications/>>
- [26] KIKUCHI, Tatsuya, KENJO, Takashi. A Unique Desk-top Electrical Machinery Laboratory for the Mechatronics Age [online]. [cit. 3.5.2014]. Dostupné z www: <<http://www.ewh.ieee.org/soc/es/Nov1997/09/INDEX.HTM>>

## Přílohy

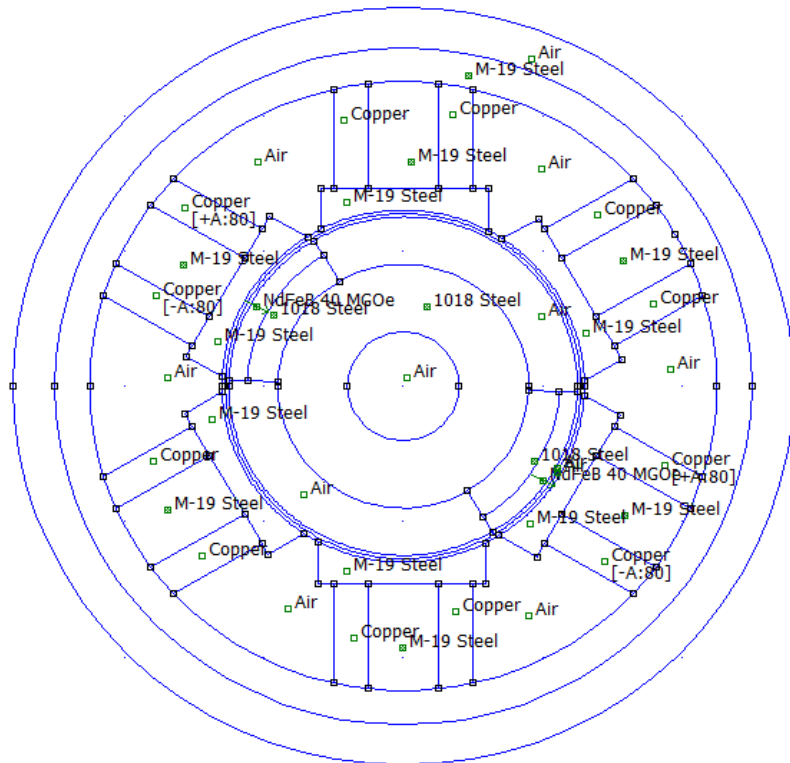
<i>PŘÍLOHA 1. VOLBA MATERIÁLŮ PRO MODEL Y KROKOVÝCH MOTORŮ VČETNĚ TVARU GEOMETRIE.....</i>	<i>1</i>
<i>PŘÍLOHA 2. MAGNETICKÁ INDUKCE PRO RŮZNÉ ÚHLY NATOČENÍ U NÁVRHU STROJE 1 .....</i>	<i>2</i>
<i>PŘÍLOHA 3. MAGNETICKÁ INDUKCE PRO RŮZNÉ ÚHLY NATOČENÍ U NÁVRHU STROJE 2 .....</i>	<i>9</i>
<i>PŘÍLOHA 4. GEOMETRIE A VYPOČTENÉ HODNOTY AKTIVNÍHO KROKOVÉHO MOTORU – MODEL 3 ...</i>	<i>16</i>
<i>PŘÍLOHA 5. GEOMETRIE A VYPOČTENÉ HODNOTY AKTIVNÍHO KROKOVÉHO MOTORU – MODEL 4 ...</i>	<i>17</i>
<i>PŘÍLOHA 6. GEOMETRIE A VYPOČTENÉ HODNOTY AKTIVNÍHO KROKOVÉHO MOTORU – MODEL 5 ...</i>	<i>18</i>
<i>PŘÍLOHA 7. GEOMETRIE A VYPOČTENÉ HODNOTY AKTIVNÍHO KROKOVÉHO MOTORU – MODEL 6 ...</i>	<i>19</i>
<i>PŘÍLOHA 8. ZÁVISLOST MOMENTU STROJE NA NATOČENÍ MOTORU – MODEL 3, 4, 5, 6.....</i>	<i>20</i>

**Příloha 1. Volba materiálů pro modely krokových motorů včetně tvaru geometrie**

(model stroje 1 obsahuje vzduchovou mezeru 0,5 mm a rotorové magnety jsou rovné, statorové póly bez rozdělení na dva zuby. Model stroje 2 se od modelu číslo 1 liší pouze zkosením rotorových magnetů.)



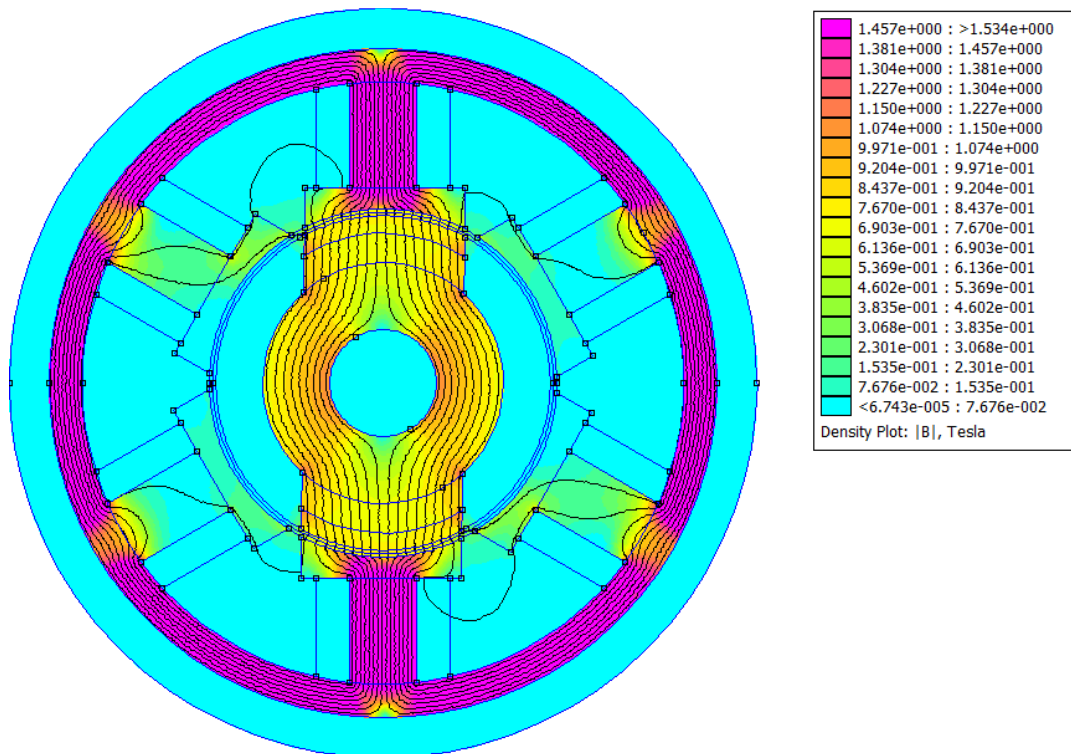
Obr. 1: Navržené materiály a tvar geometrie pro model 1 (vlastní zpracování)



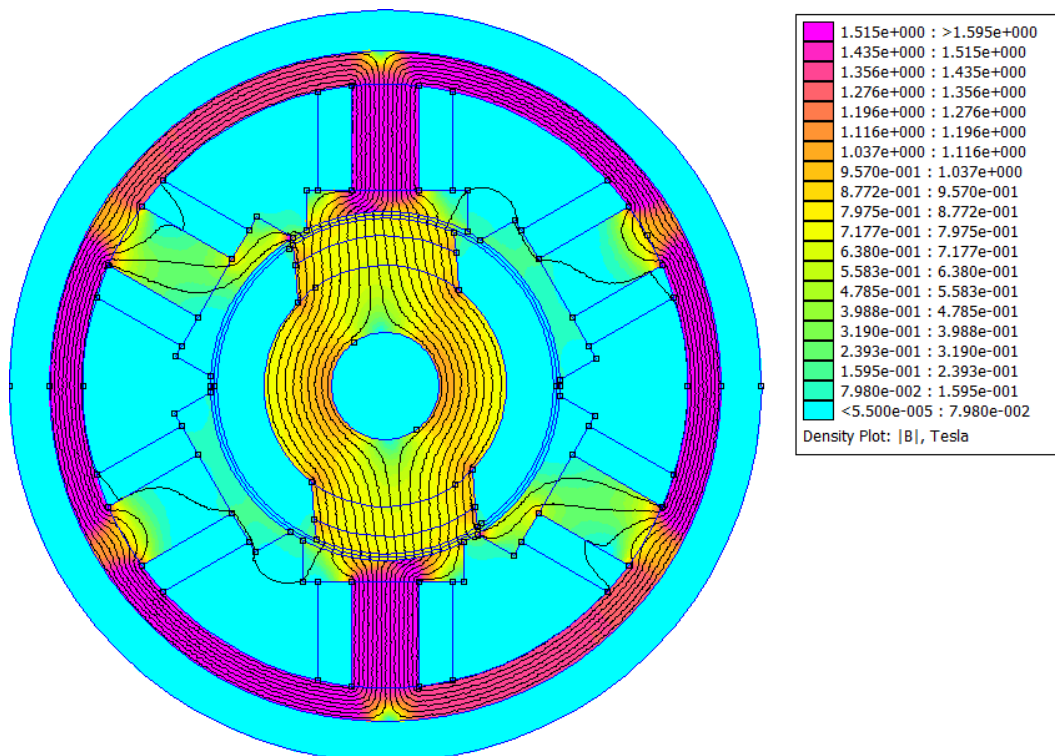
Obr. 2: Navržené materiály a tvar geometrie pro model 2 (vlastní zpracování)

**Příloha 2. Magnetická indukce pro různé úhly natočení u návrhu stroje 1**

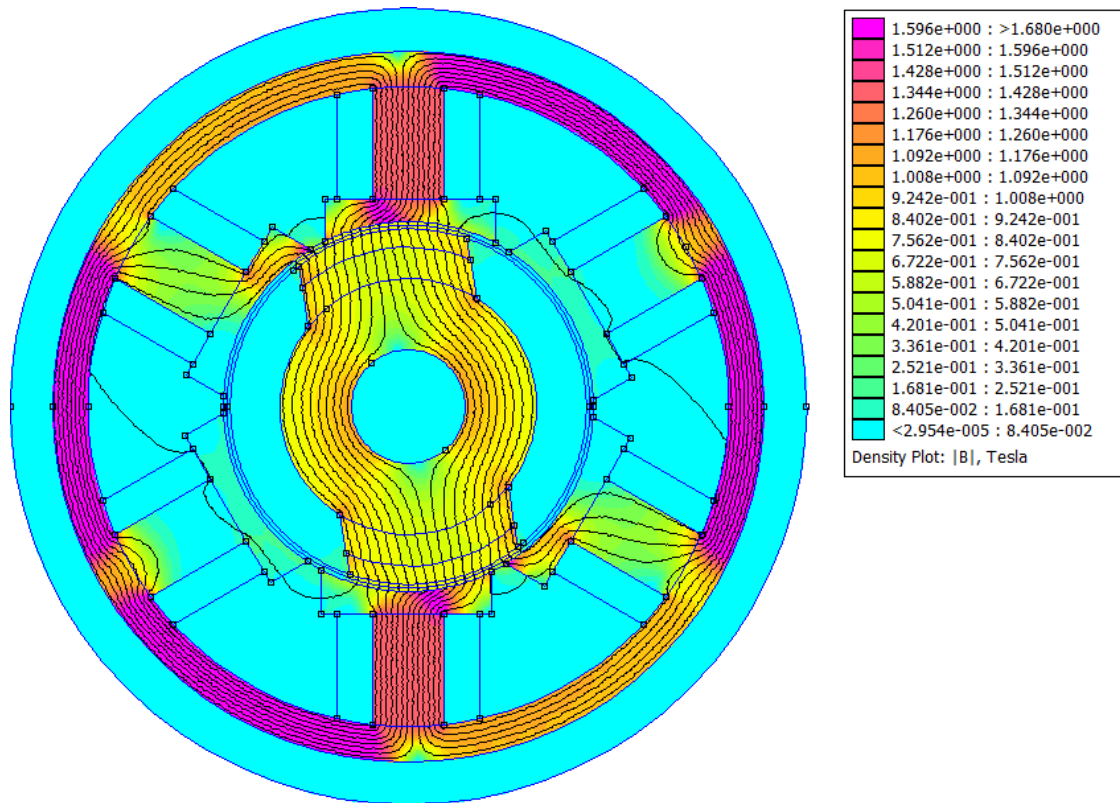
(model stroje 1 obsahuje vzduchovou mezeru 0,5 mm a rotorové magnety jsou rovné, statorové póly bez rozdělení na dva zuby)



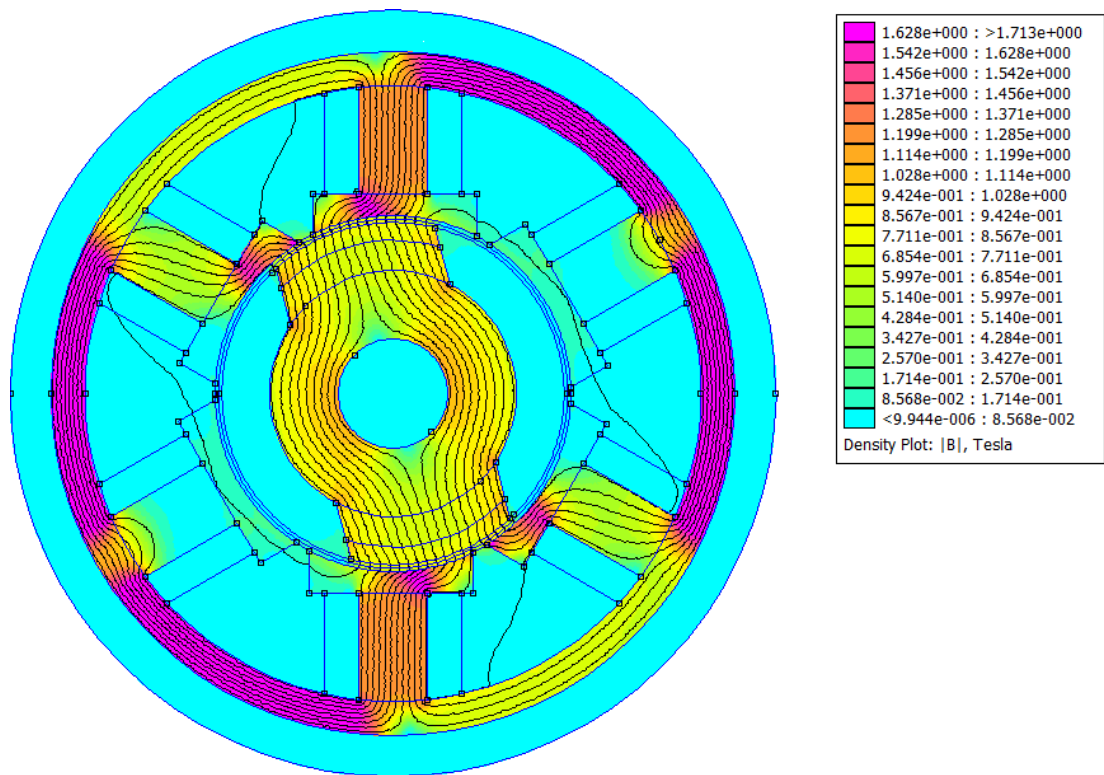
Obr. 1. Magnetická indukce úhel natočení 0°



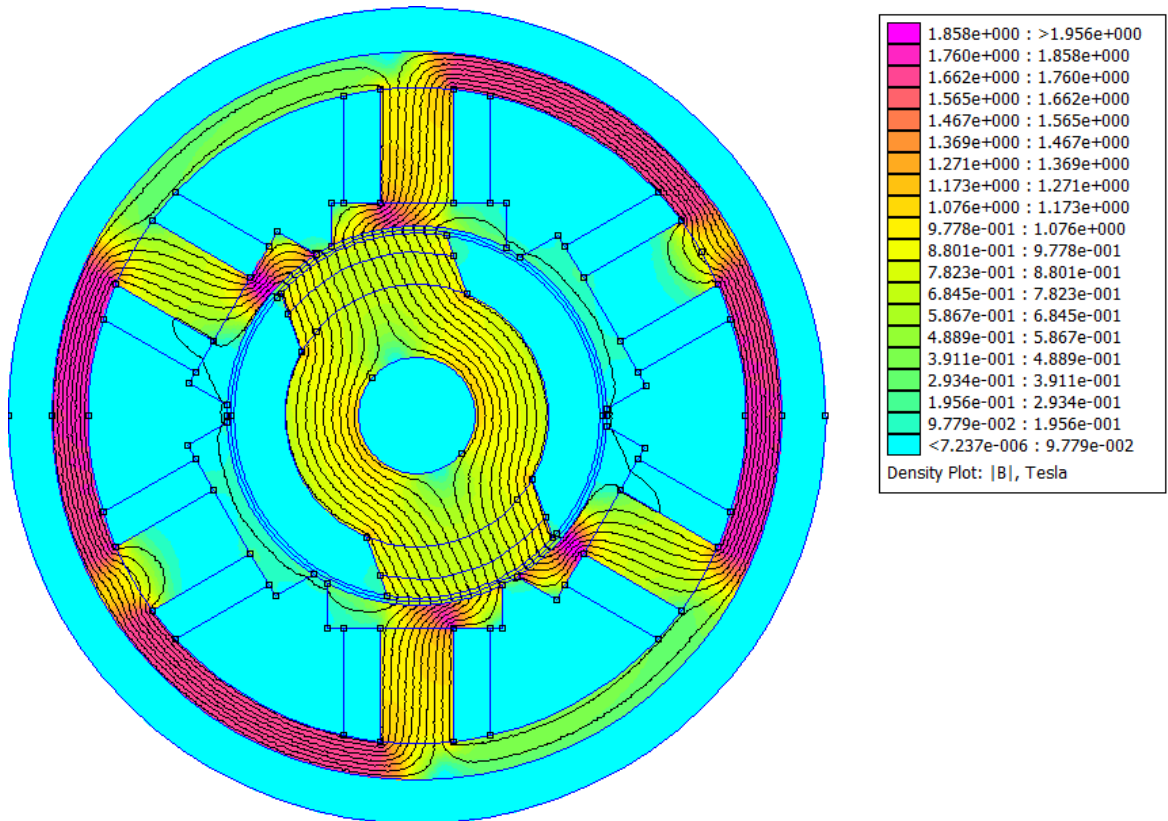
Obr. 2. Magnetická indukce úhel natočení 5°



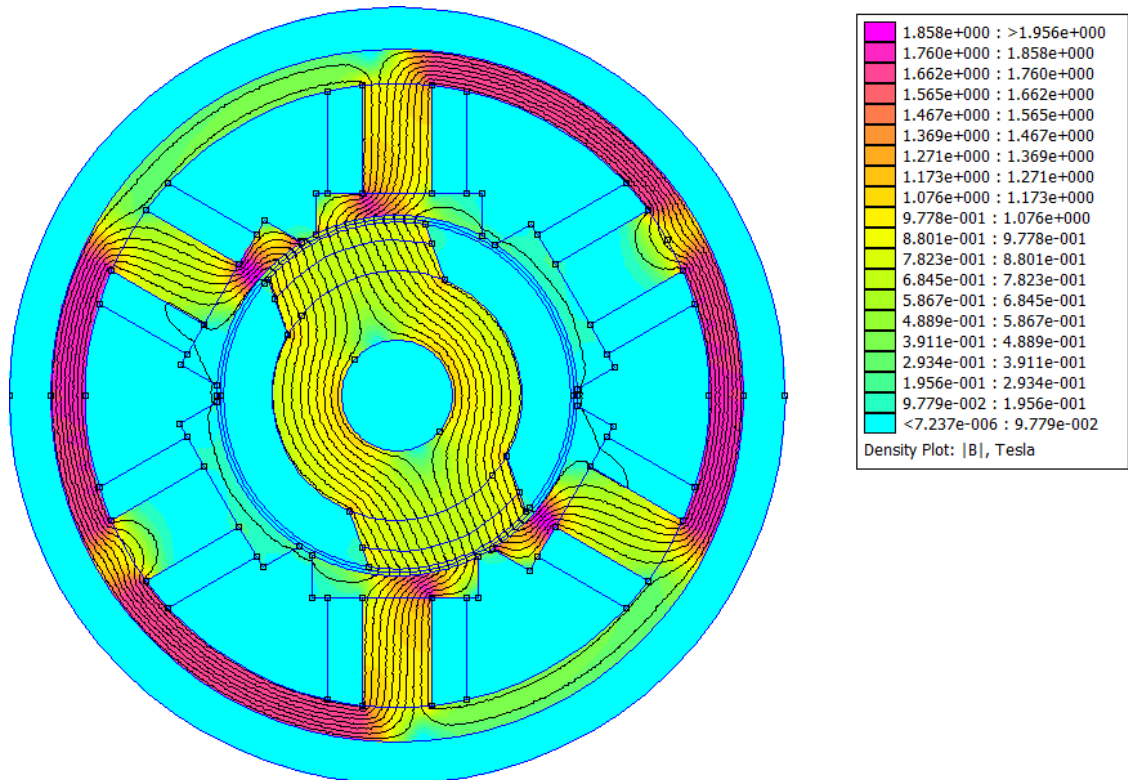
Obr. 3. Magnetická indukce úhel natočení 10°



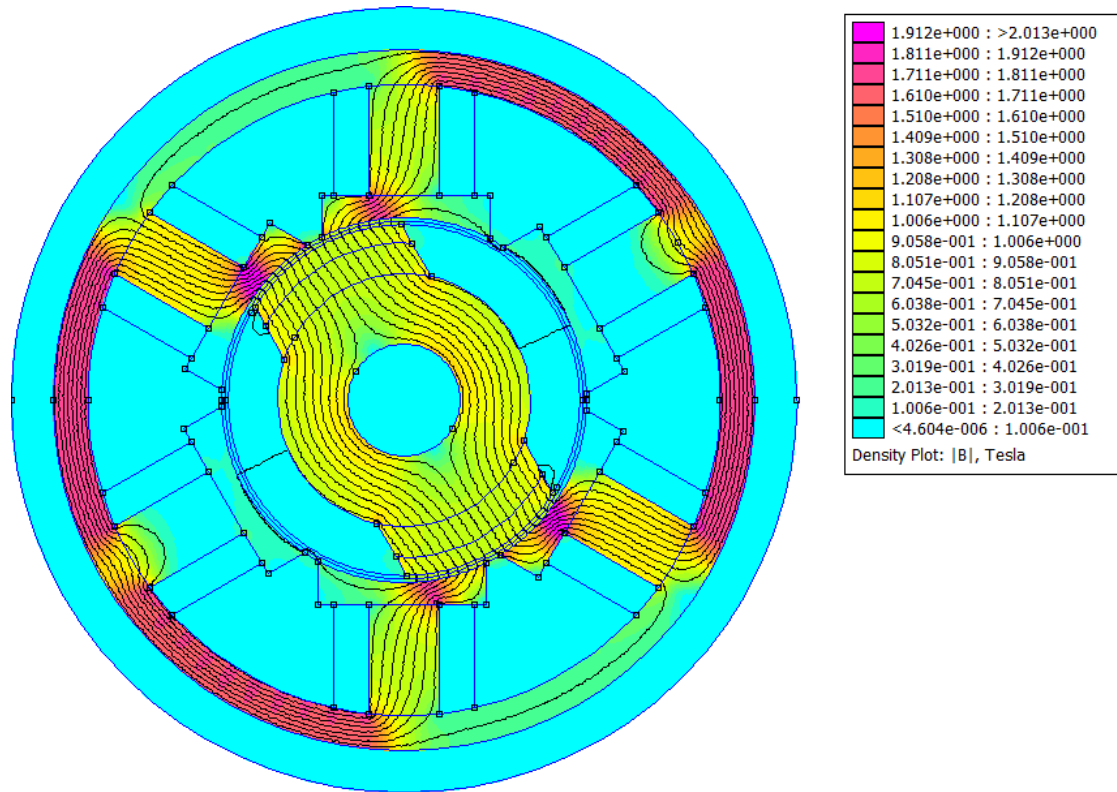
Obr. 4. Magnetická indukce úhel natočení 15°



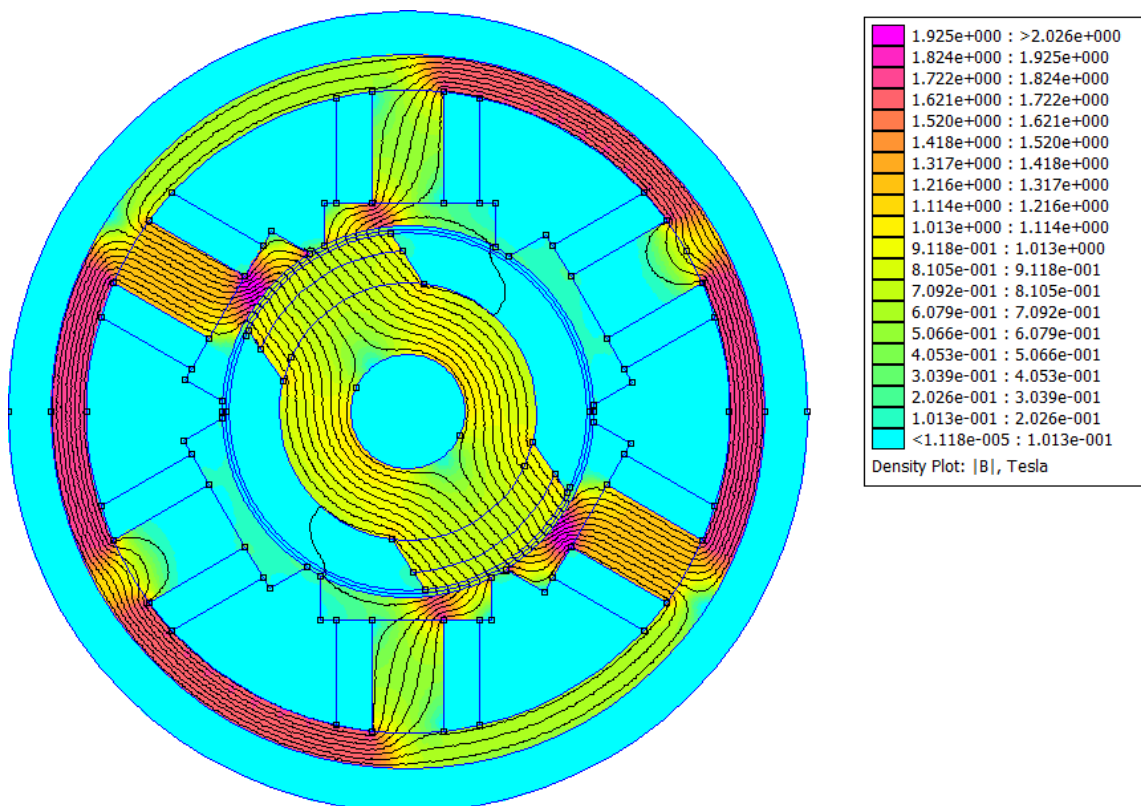
Obr. 5. Magnetická indukce úhel natočení 20°



Obr. 6. Magnetická indukce úhel natočení 25°

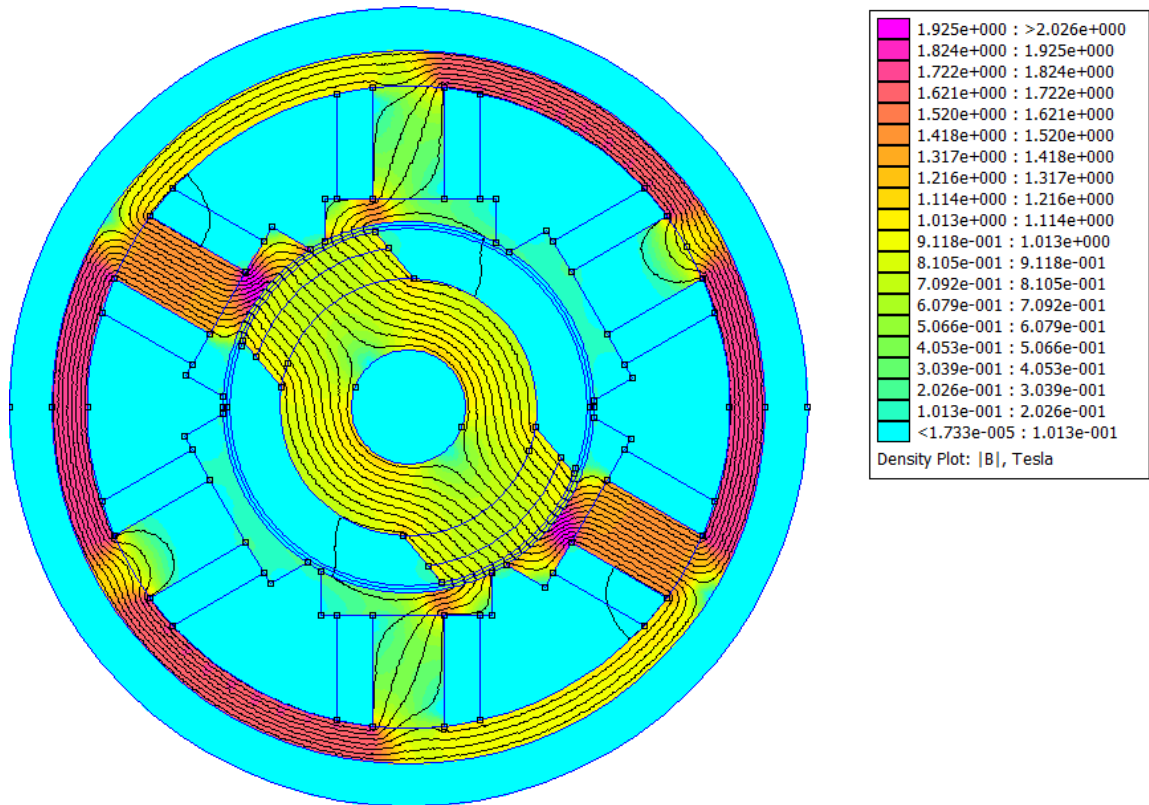


Obr. 7. Magnetická indukce úhel natočení 30°

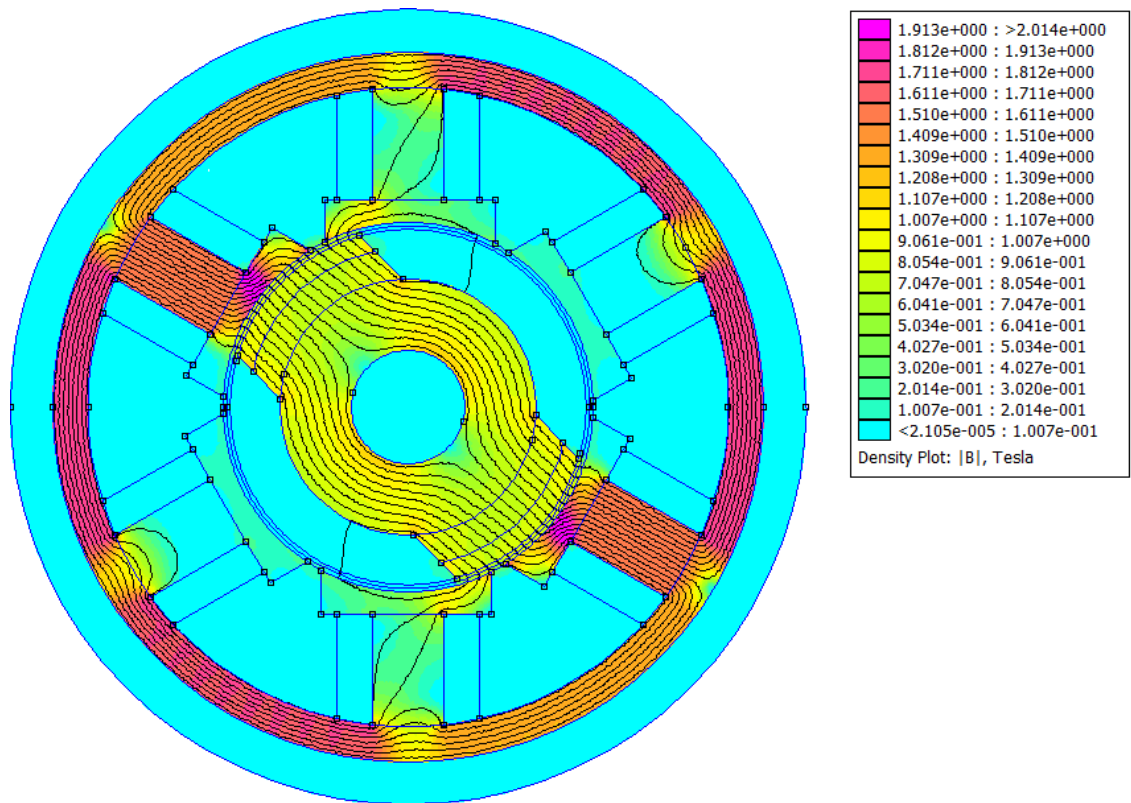


Obr. 8. Magnetická indukce úhel natočení 35°

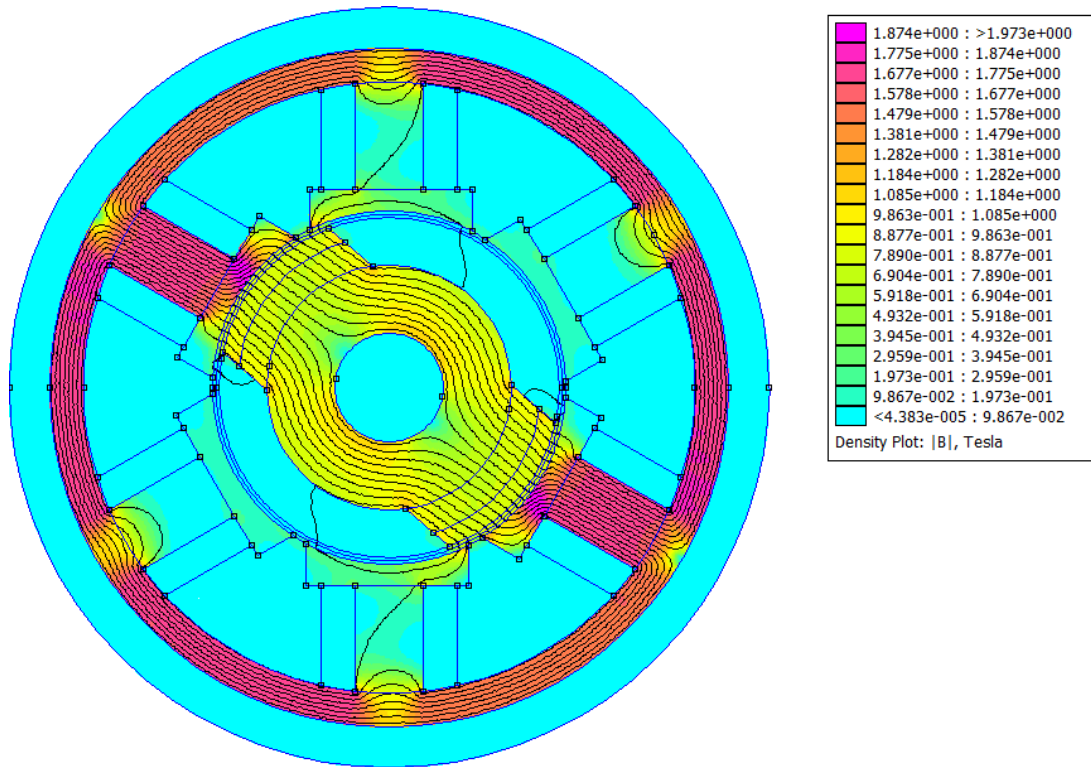




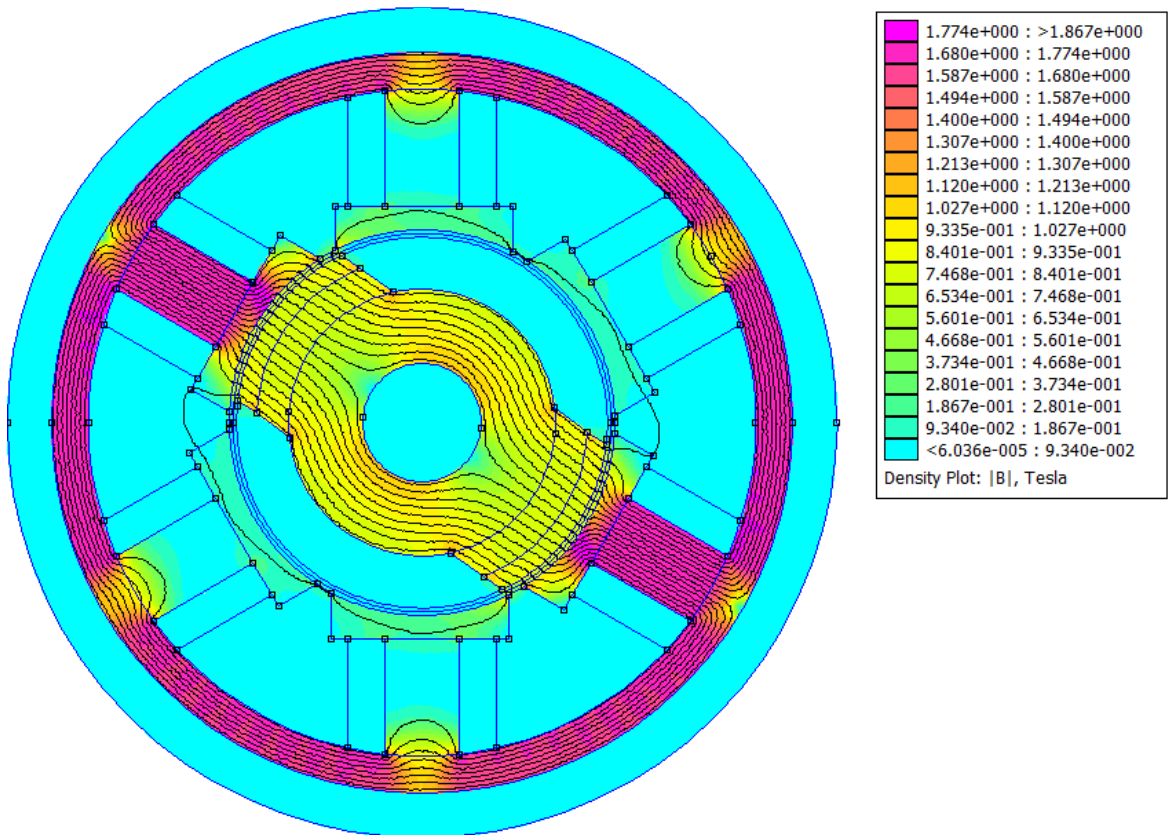
Obr. 9. Magnetická indukce úhel natočení 40°



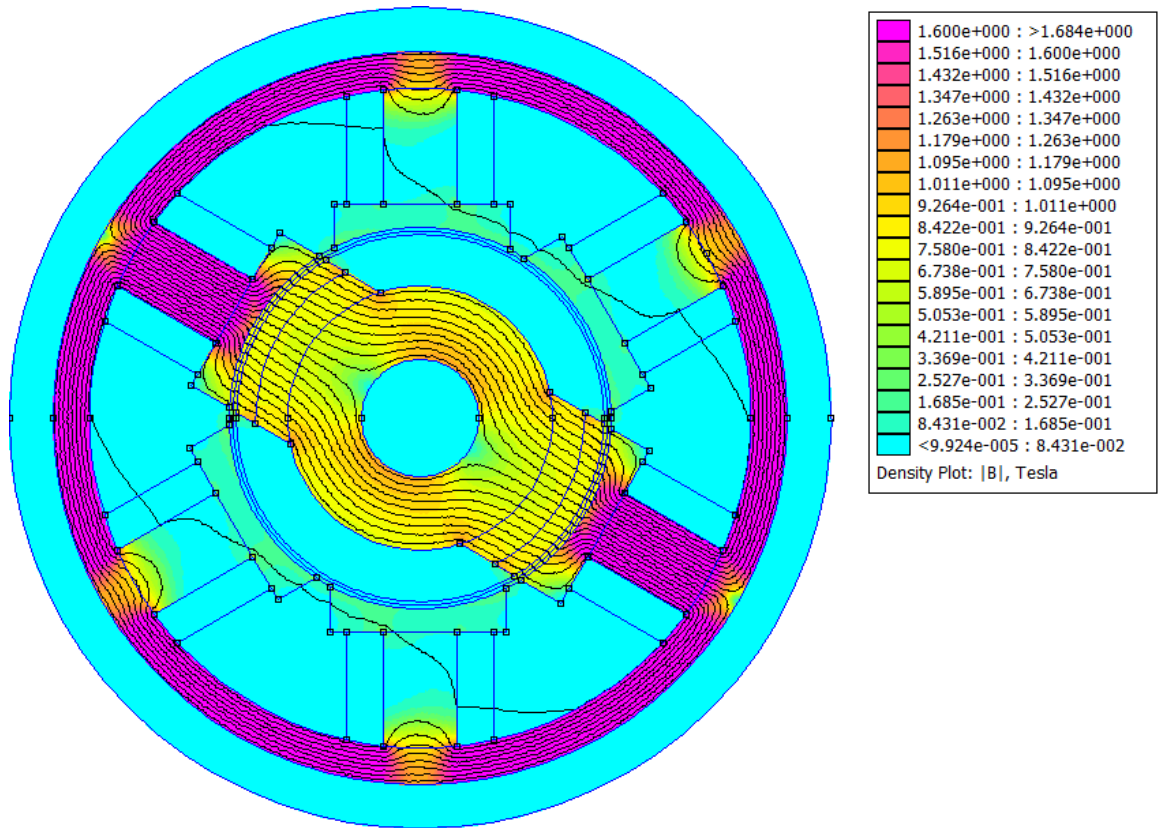
Obr. 10. Magnetická indukce úhel natočení 45°



Obr. 11. Magnetická indukce úhel natočení 50°



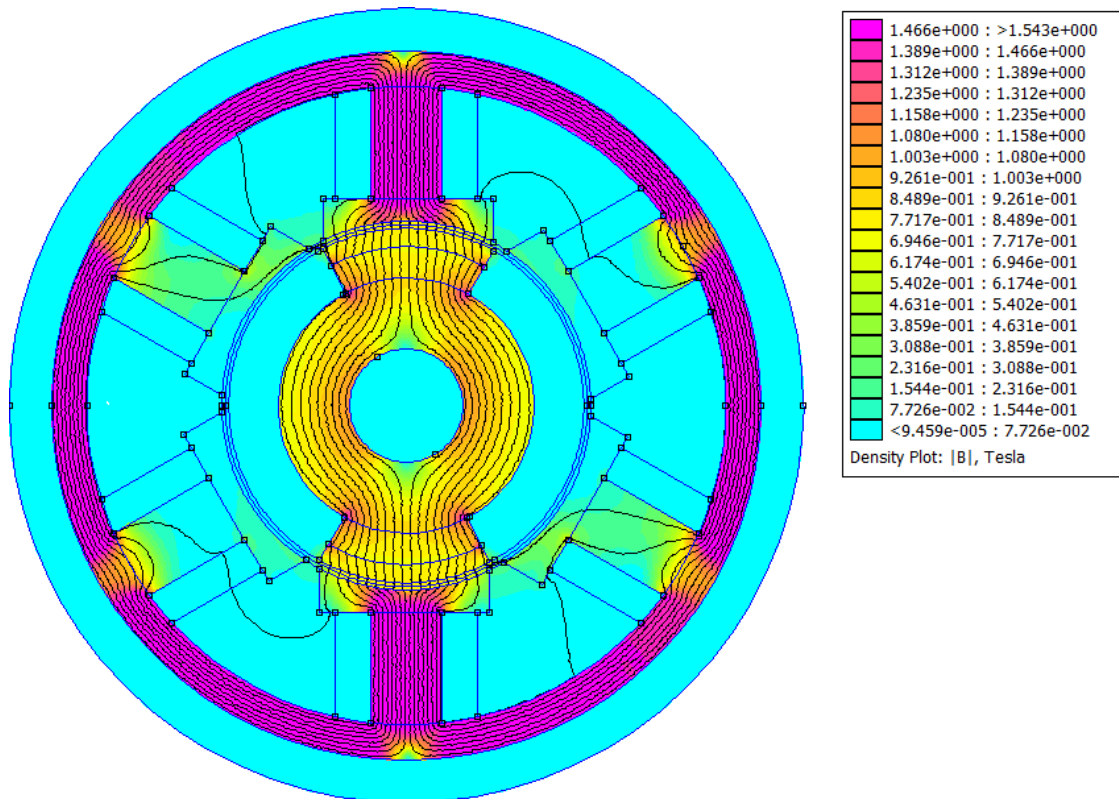
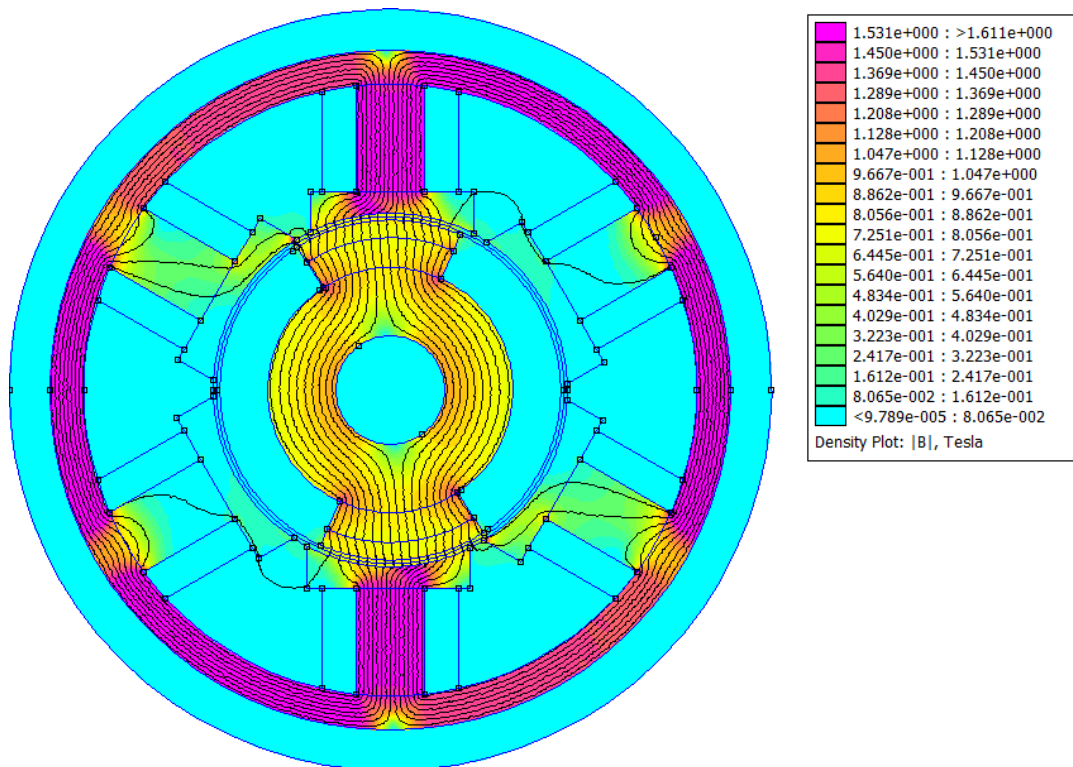
Obr. 12. Magnetická indukce úhel natočení 55°

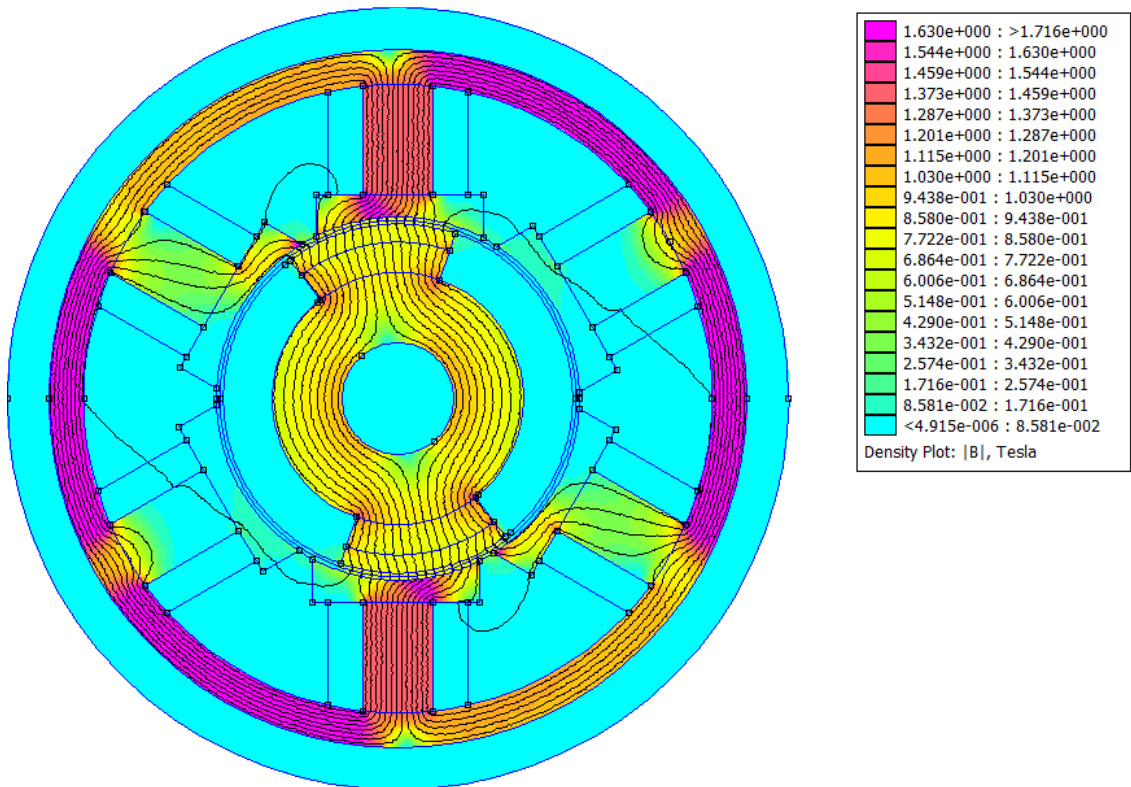


Obr. 13. Magnetická indukce úhel natočení 60°

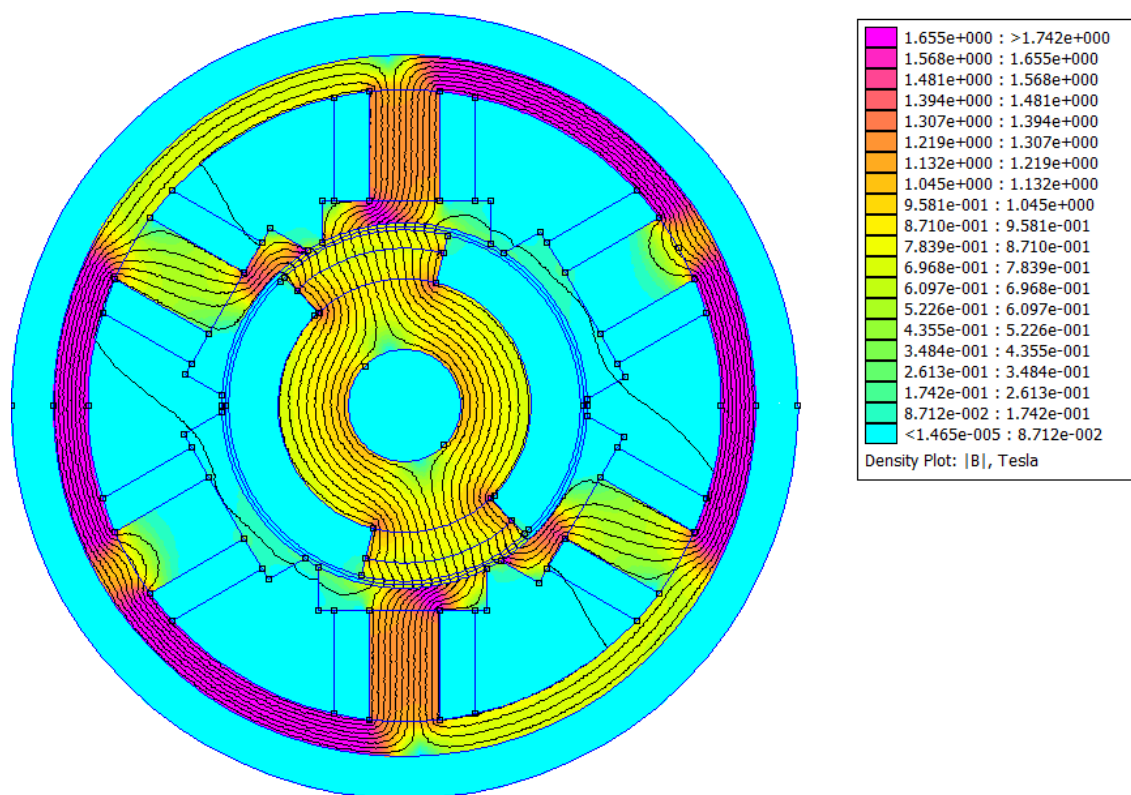
**Příloha 3. Magnetická indukce pro různé úhly natočení u návrhu stroje 2**

(model stroje 2 obsahuje vzduchovou mezeru 0,5 mm a rotorové magnety jsou zkosené, statorové póly bez rozdělení na dva zuby)

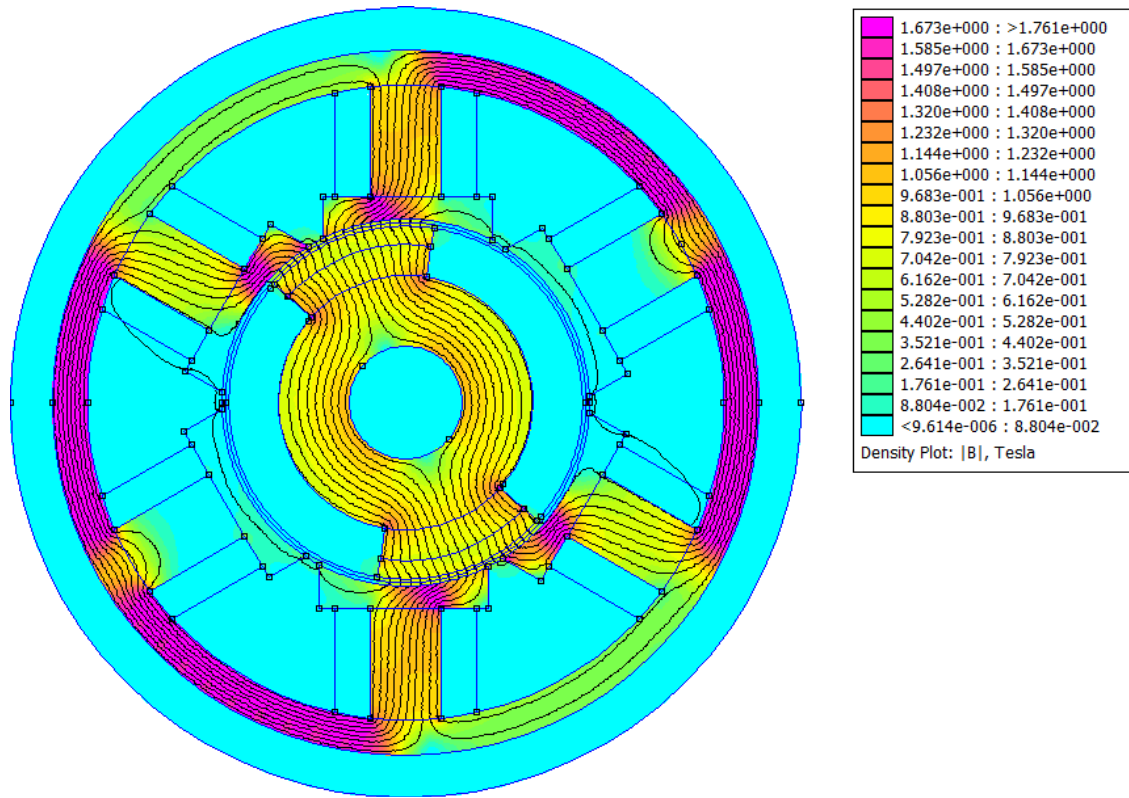
Obr. 1. Magnetická indukce úhel natočení  $0^\circ$ Obr. 2. Magnetická indukce úhel natočení  $5^\circ$



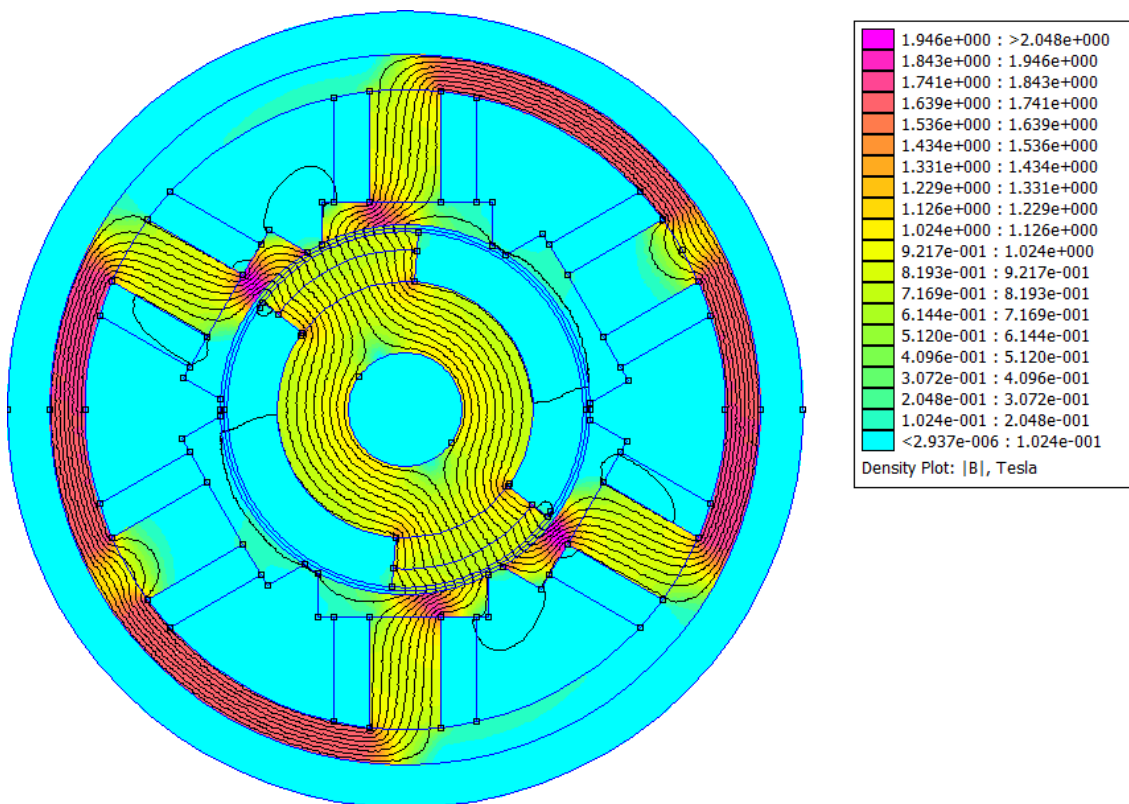
Obr. 3. Magnetická indukce úhel natočení 10°



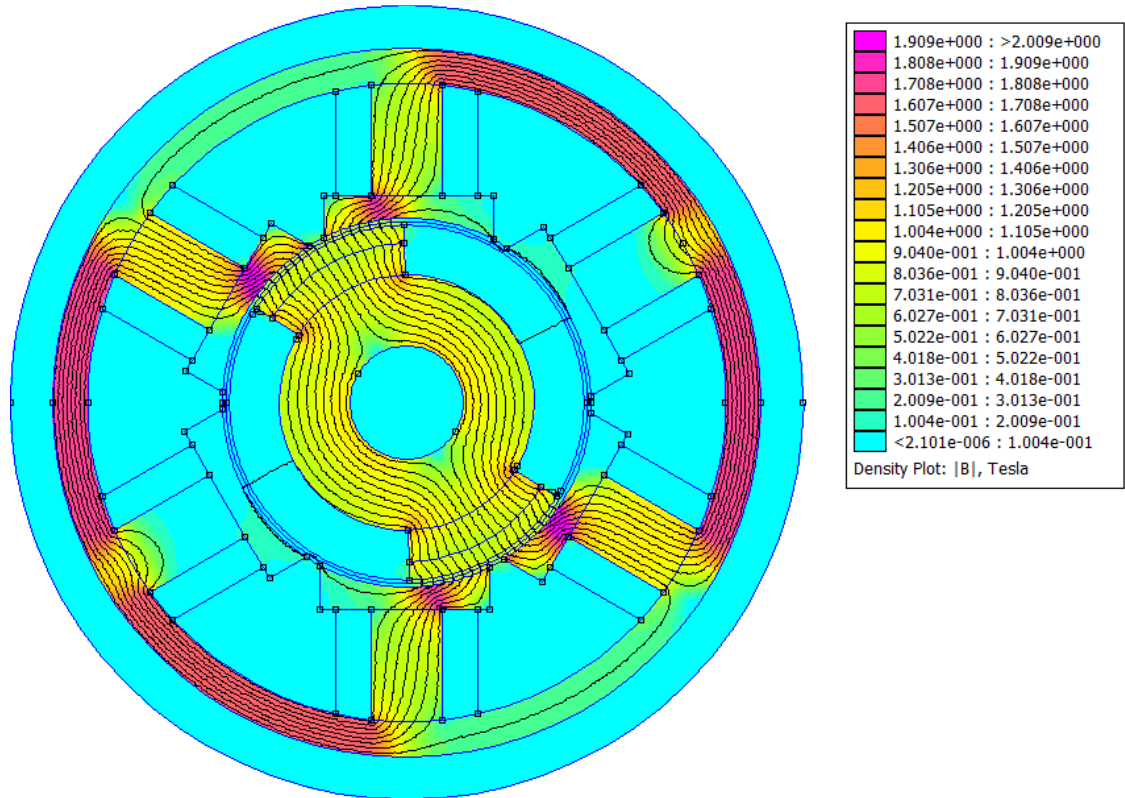
Obr. 4. Magnetická indukce úhel natočení 15°



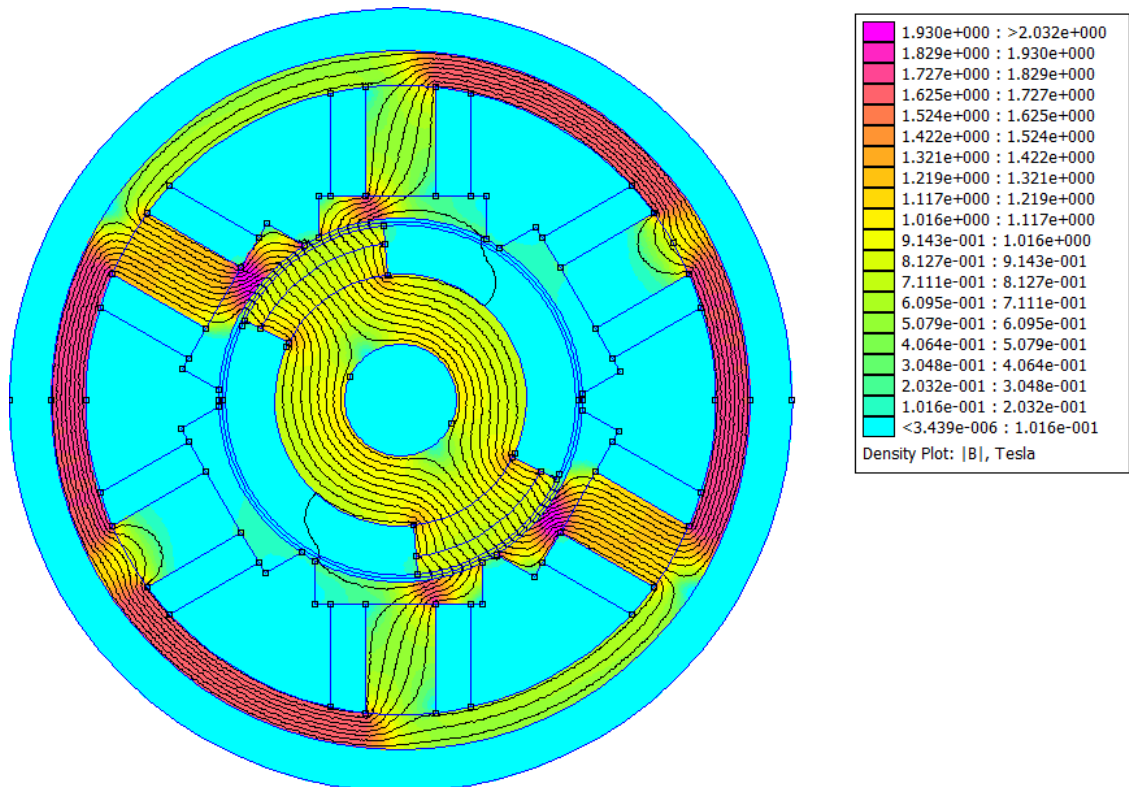
Obr. 5. Magnetická indukce úhel natočení 20°



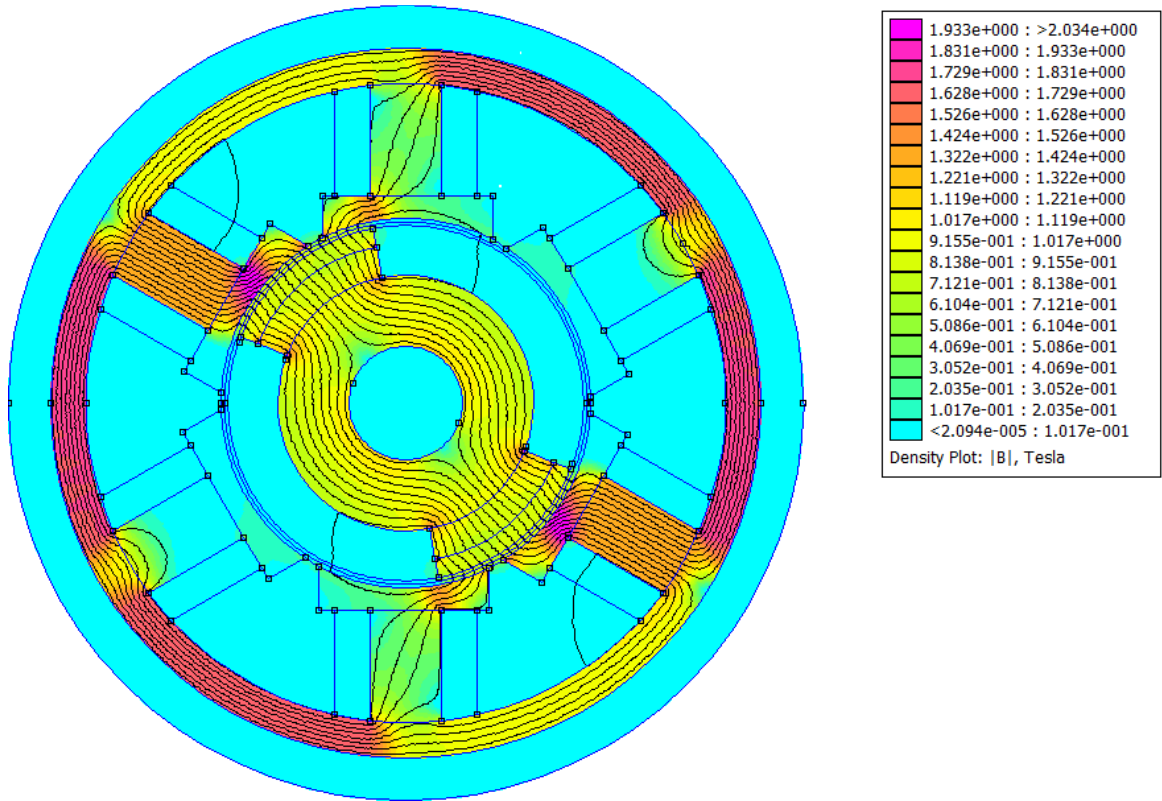
Obr. 6. Magnetická indukce úhel natočení 25°



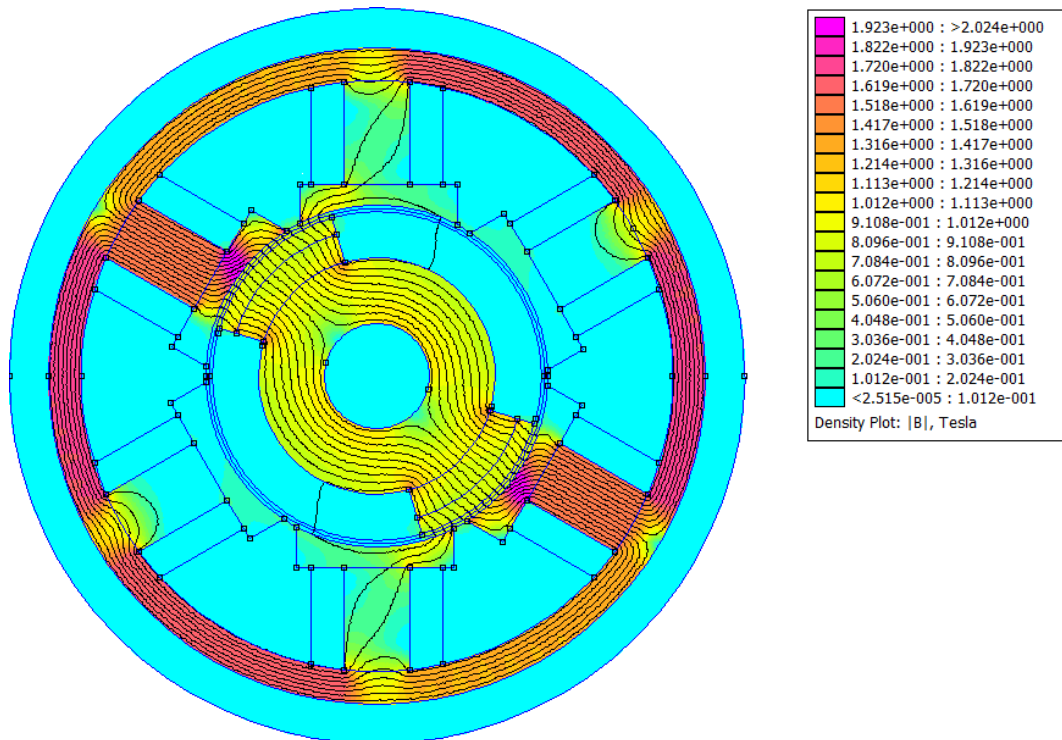
Obr. 7. Magnetická indukce úhel natočení 30°



Obr. 8. Magnetická indukce úhel natočení 35°

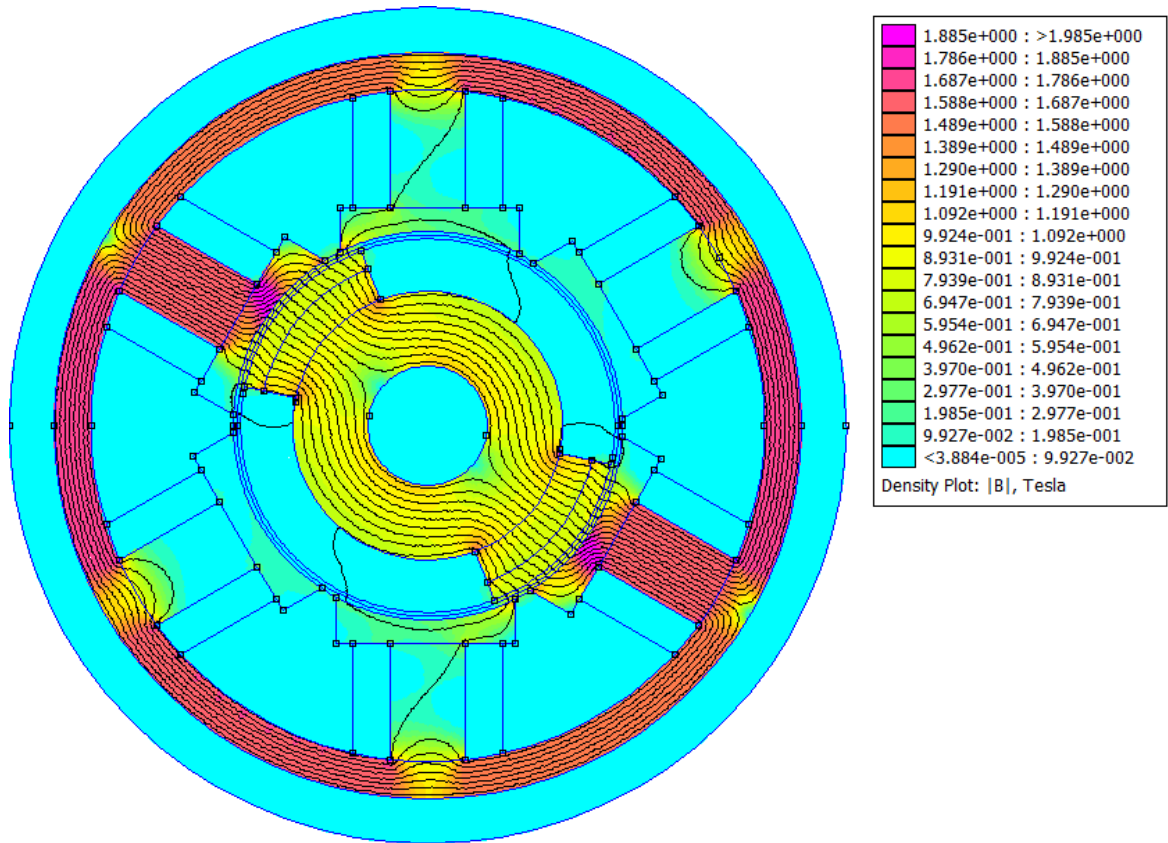


Obr. 9. Magnetická indukce úhel natočení 40°

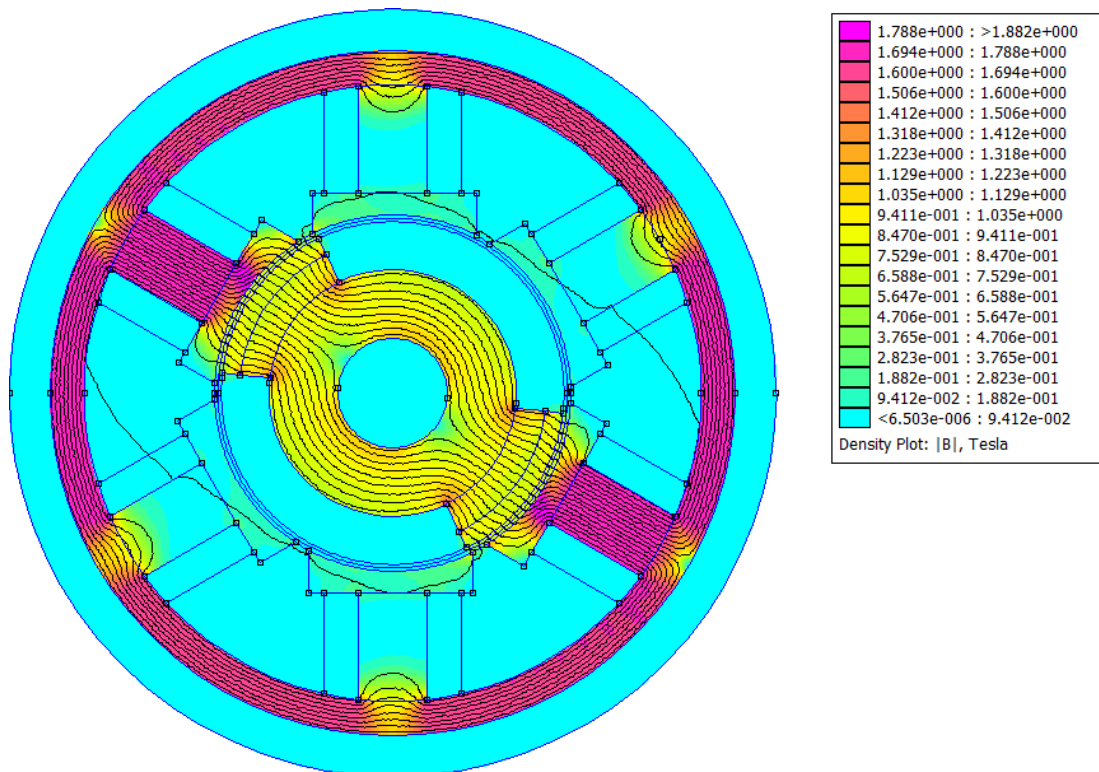


Obr. 10. Magnetická indukce úhel natočení 45°

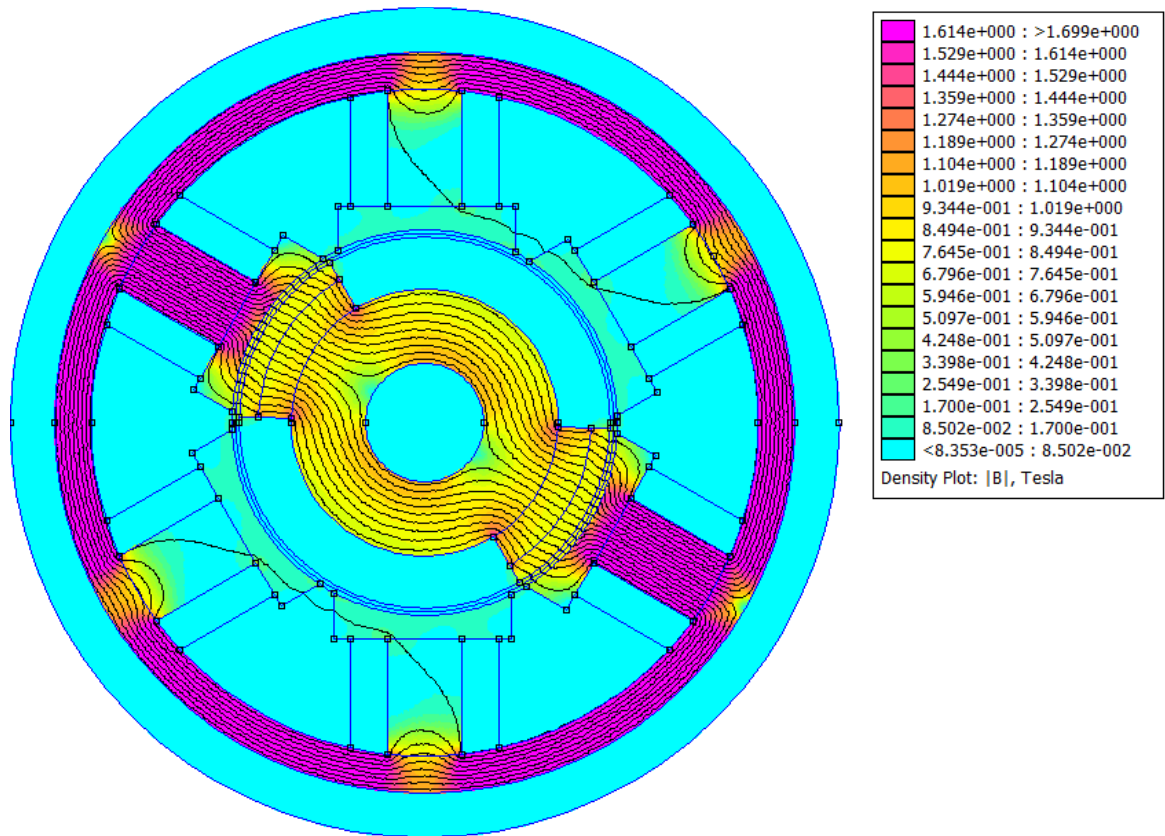




Obr. 11. Magnetická indukce úhel natočení 50°



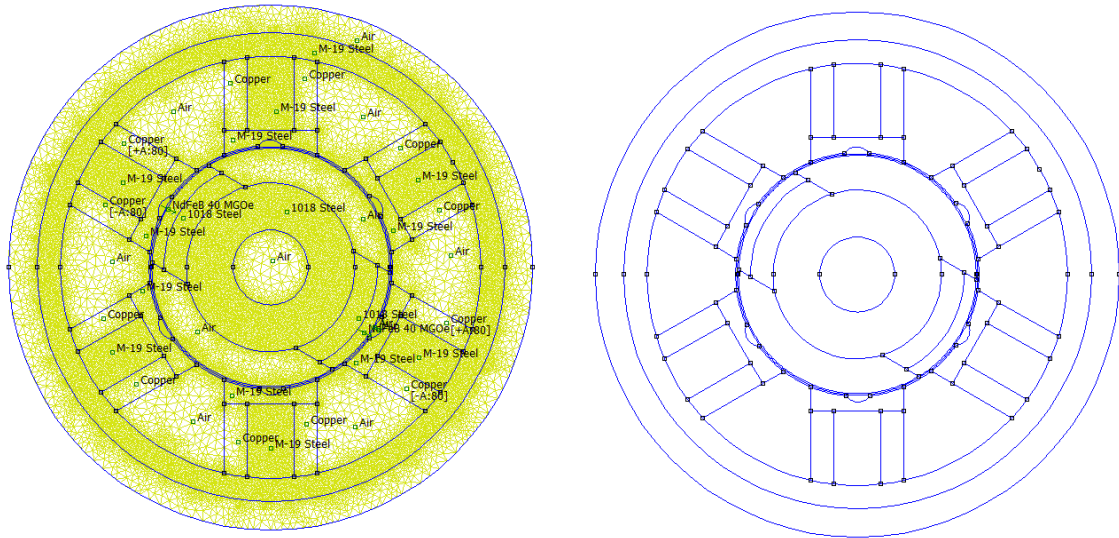
Obr. 12. Magnetická indukce úhel natočení 55°



Obr. 13. Magnetická indukce úhel natočení 60°

**Příloha 4. Geometrie a vypočtené hodnoty aktivního krokového motoru – model 3**

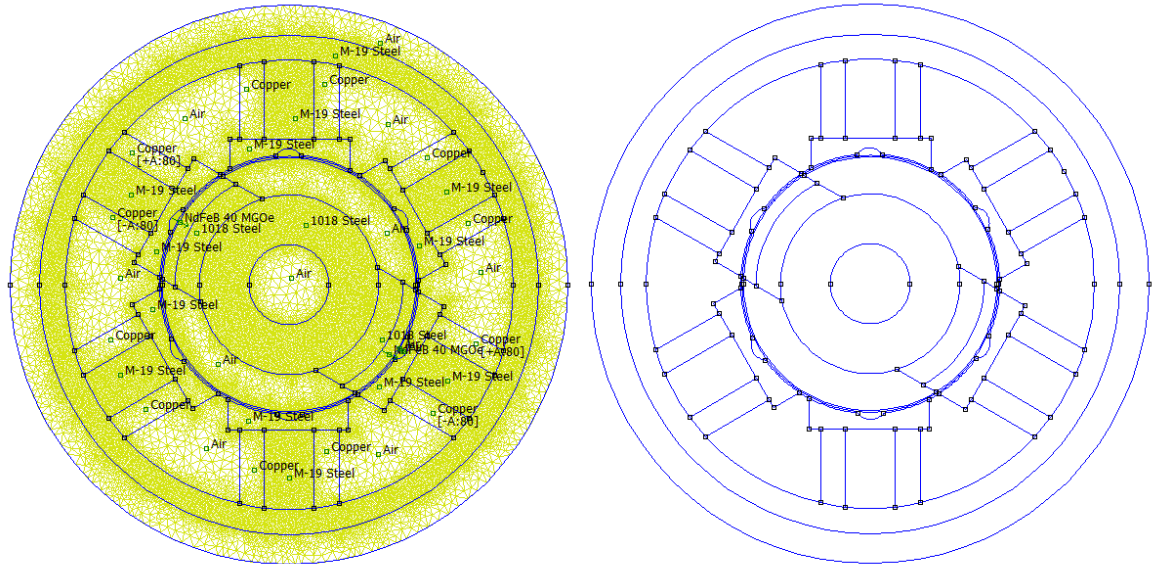
(model stroje 3 obsahuje vzduchovou mezeru 0,3 mm a rotorové magnety jsou rovné, statorové póly jsou zúženy a rozděleny na dva zuby)



$\theta$ [°]	$W_m$ [J]	M [Nm]	L [H]
0	0,294	0,035	0,147
5	0,302	0,121	0,151
10	0,317	0,055	0,1585
15	0,321	0,169	0,1605
20	0,322	0,188	0,161
25	0,322	0,188	0,161
30	0,31	0,171	0,155
35	0,314	0,06	0,157
40	0,32	0,175	0,16
45	0,319	0,188	0,1595
50	0,315	0,153	0,1575
55	0,303	0,233	0,1515
60	0,293	0,022	0,1465

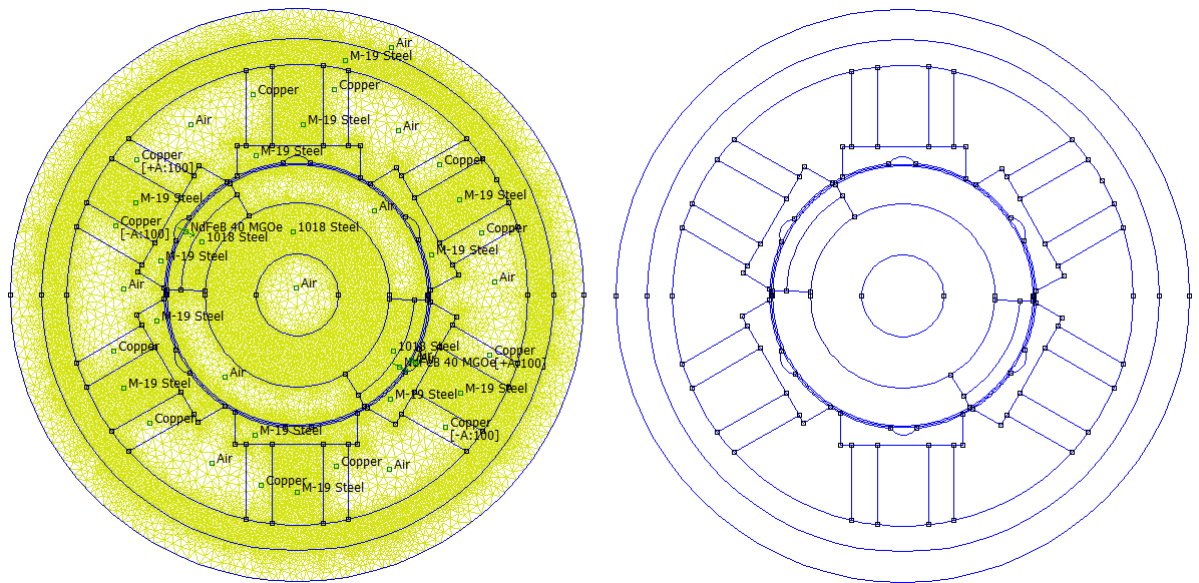
**Příloha 5. Geometrie a vypočtené hodnoty aktivního krokového motoru – model 4**

(model stroje 5 obsahuje vzduchovou mezeru 0,3 mm a rotorové magnety jsou rovné, statorové póly jsou rozděleny na dva zuby)



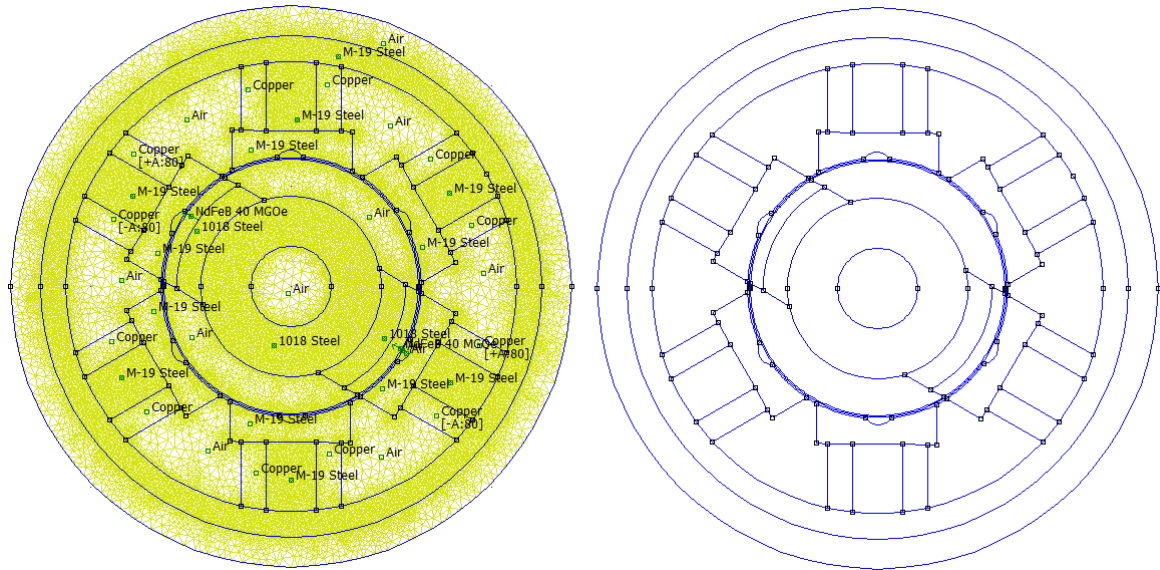
$\theta$ [°]	$W_m$ [J]	M [Nm]	L [H]
0	0,283	0,019	0,1415
5	0,2816	0,163	0,1408
10	0,279	0,197	0,1395
15	0,277	0,195	0,1385
20	0,275	0,151	0,1375
25	0,272	0,226	0,136
30	0,265	0,154	0,1325
35	0,269	0,051	0,1345
40	0,275	0,156	0,1375
45	0,276	0,156	0,138
50	0,276	0,08	0,138
55	0,279	0,001	0,1395
60	0,281	0	0,1405

**Příloha 6. Geometrie a vypočtené hodnoty aktivního krokového motoru – model 5**  
 (model stroje 6 obsahuje vzduchovou mezeru 0,3 mm a rotorové magnety jsou zkosené, statorové póly jsou rozděleny na dva zuby)

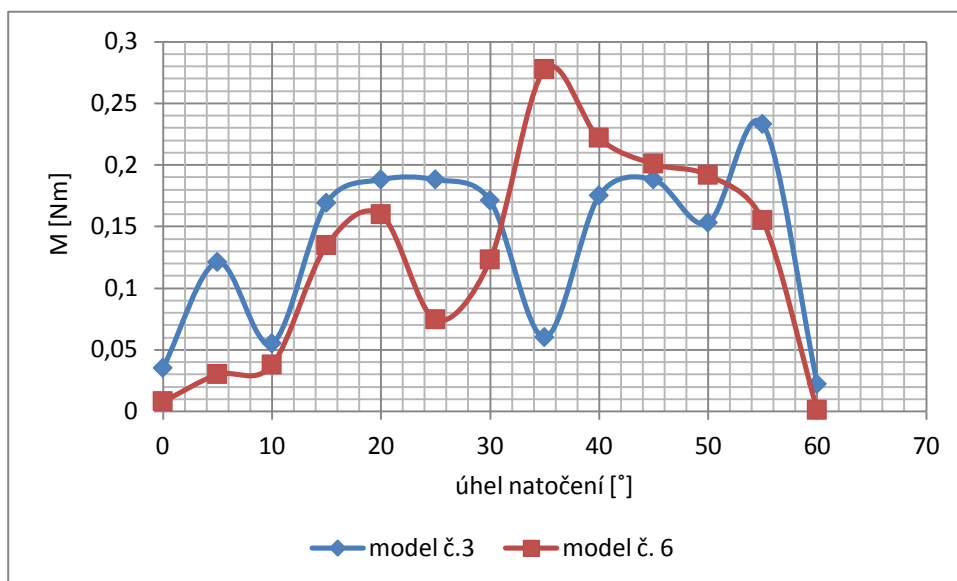


$\theta$ [°]	$W_m$ [J]	M [Nm]	L [H]
0	0,27	0,0084	0,135
5	2,27	0,115	1,135
10	0,268	0,185	0,134
15	0,268	0,201	0,134
20	0,265	0,1738	0,1325
25	0,259	0,235	0,1295
30	0,252	0,155	0,126
35	0,257	0,042	0,1285
40	0,265	0,127	0,1325
45	0,267	0,158	0,1335
50	0,266	0,091	0,133
55	0,268	0,036	0,134
60	0,269	0	0,1345

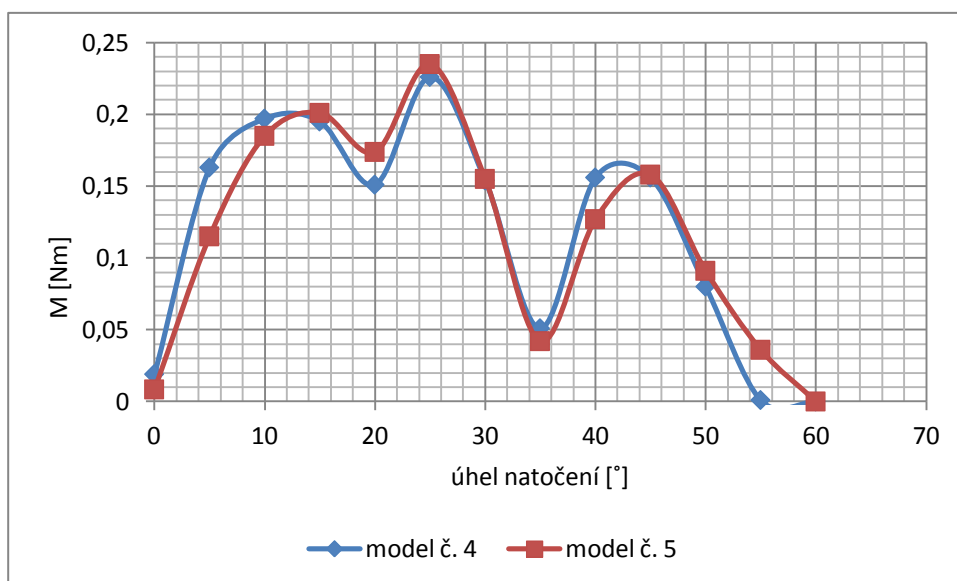
**Příloha 7. Geometrie a vypočtené hodnoty aktivního krokového motoru – model 6**  
(model stroje 7 obsahuje vzduchovou mezeru 0,3 mm a rotorové magnety jsou rovné, statorové póly jsou vyšší a rozděleny na dva zuby)



$\theta$ [°]	$W_m$ [J]	M [Nm]	L [H]
0	0,283	0,008	0,141
5	0,279	0,030	0,140
10	0,273	0,038	0,136
15	0,272	0,135	0,136
20	0,272	0,160	0,136
25	0,268	0,074	0,134
30	0,260	0,123	0,130
35	0,265	0,278	0,132
40	0,273	0,222	0,136
45	0,275	0,201	0,137
50	0,276	0,192	0,138
55	0,280	0,155	0,140
60	0,282	0,001	0,141

**Příloha 8. Závislost momentu stroje na natočení motoru – model 3, 4, 5, 6.**

Graf 1. Závislost momentu stroje na natočení motoru



Graf 2. Závislost momentu stroje na natočení motoru