

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Využití krokových motorů

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Filip ČELOVSKÝ**
Osobní číslo: **E13B0007P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Využití krokových motorů**
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 :

1. Popište druhy a konstrukci krokových motorů (KM).
2. Uveďte příklady využití KM.
3. Vytvořte a porovnejte modely krokových motorů s a bez permanentních magnetů.
4. Diskutujte získané výsledky.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

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

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Pavel Světlík

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2016**

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



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Anotace

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na využití krokových motorů v praxi, popis jejich konstrukce a druhů. Použití krokových motorů, dále také vytvoření modelů krokových motorů s permanentními magnety a bez permanentních magnetů. V závěru bych rád provedl diskuzi výsledků jednotlivých modelů krokových motorů.

Klíčová slova

Krokové motory, konstrukce, permanentní magnet, elektromagnet, moment, stator, rotor, model, metoda konečných prvků

Annotation

The presented bachelor thesis is focused on the use of stepper motors in practice, a description of their structure and design possibilities. The use of a stepper motor, also the creation of models of stepper motors with permanent magnets and without permanent magnets. In conclusion, I would like to made the discussion of the results of individual models of stepper motors.

Key words

Stepper motor, construction, permanent magnet, electromagnet, moment, stator, rotor, model, finite element method

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 31.5.2016

Filip Čelovský

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlu Světlíkovi, za cenné profesionální rady, připomínky a vstřícný přístup při vedení bakalářské práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1. KROKOVÝ MOTOR	11
1.1 OBEČNÝ POPIS KROKOVÉHO MOTORU	12
1.1.1 Výhody krokového motoru	15
1.1.2 Nevýhody krokového motoru	16
1.1.3 Charakteristiky krokových motorů	17
2 DRUHY A VYUŽITÍ KROKOVÝCH MOTORŮ	19
2.1 ROZDĚLENÍ KROKOVÝCH MOTORŮ	19
2.2 KROKOVÉ MOTORY S PROMĚNLIVOU RELUKTANCÍ	19
2.3 KROKOVÉ MOTORY S PERMANENTNÍMI MAGNETY	23
2.4 HYBRIDNÍ KROKOVÉ MOTORY	26
2.5 MIKROKROKOVÉ MOTORY	30
2.6 VYUŽITÍ KROKOVÝCH MOTORŮ	32
3 MODELY KROKOVÝCH MOTORŮ	34
3.1 SIMULAČNÍ PROGRAM FEMM	34
3.2 NÁVRH MOTORŮ	34
3.3 ROZMĚRY MOTORU	35
3.4 REALIZACE SIMULACE	36
3.5 VYHODNOCENÍ SIMULACE A VÝSTUPNÍ HODNOTY	38
4 ZÁVĚR	44
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	45
PŘÍLOHY	1

Seznam symbolů a zkratek

$S1, S2, S3$	Spínače napájecí soustavy
N	Počet zubů (rotor/stator dle indexu)
m	Počet fází statoru
Φ	Magnetický tok
α	Úhel kroku [$^{\circ}$]
μ	permeabilita materiálu [Hm^{-1}]
M_Z	Moment zátěže [Nm]
β	Úhel zátěže (úhel rozladění hřídele) [$rads^{-1}$; $^{\circ}$]
f	Frekvence [Hz]
θ	úhel odklonu hřídele [$^{\circ}$]
θ_s	úhel natočení statorových pólů [$^{\circ}$]
B	Magnetická indukce [T]
δ	Vzduchová mezera [mm]

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na popis a konstrukci krokových motorů, jejich příklady a využití. Návrh dvou modelů krokových motorů s permanentními magnety a bez permanentních magnetů.

Text je rozdělen do tří částí; první se zabývá obecně krokovým motorem, jeho principem, popis konstrukce, výhod a nevýhod. Část druhá uvádí druhy krokových motorů, konstrukční parametry a jejich využití. Třetí část popisuje modelování krokových motorů pomocí programů SolidWorks a FEMM, popis jednotlivých modelů s permanentními magnety a bez nich. Závěr práce obsahuje diskuzi získaných výsledků z měření jednotlivých modelů krokových motorů.

1. KROKOVÝ MOTOR

Historie elektrických strojů s proměnlivou reluktancí, ke kterým patří i krokový motor, sahá až do první poloviny 19. století. Jako první publikoval svoji práci o elektromagnetických principech ruský vědec Moritz Hermann Jacobi v roce 1834 pro ruskou akademii věd. Princip elektromagnetu, díky kterému pracují stroje s proměnlivou reluktancí, je nejstarším využívaným typem elektromechanické přeměny. První reluktanční motor byl použit pro pohon elektrické lokomotivy roku 1842, která tehdy jezdila rychlostí 6 km/h na trati Edinburg-Glasgow. První krokový motor tak nahradil dříve používaný stroj parní. Roku 1845 G. Froment sestrojil krokový motor pracující na principu proměnlivé reluktance. Tento motor se již podobal motorům tak, jak je známe dnes. Vývoj krokových, nebo-li reluktančních motorů pokračoval a jejich využití se dostavilo záhy po roce 1919. V roce 1920 pak byla představena první struktura krokového motoru sendvičové konstrukce a v 60-tých letech 19. století pak první motory s permanentními magnety. Léta 1970 znamenaly rozvoj krokových motorů v oblasti obráběcích NC strojů. V historii krokových motorů bychom také měli zmínit datum 1980, toto datum je důležité z hlediska vývoje nových typů motorů na střídavý proud, které postupem času začaly krokové motory nahrazovat. Krokové motory však nikdy nevytizely úplně a používají se dodnes. [2]

Internetový server popisuje krokový motor následovně: „Krokový motor dostal své jméno, protože dělá “krok za krokem” i když tyto kroky obvykle vedou k točivému pohybu” [1].

1.1 Obecný popis krokového motoru

Krokový motor je elektromechanické zařízení, jež mění pulzy vytvářené elektronickým zařízením na mechanický pohyb. Hřídel se otáčí po krocích, proto název krokový motor.

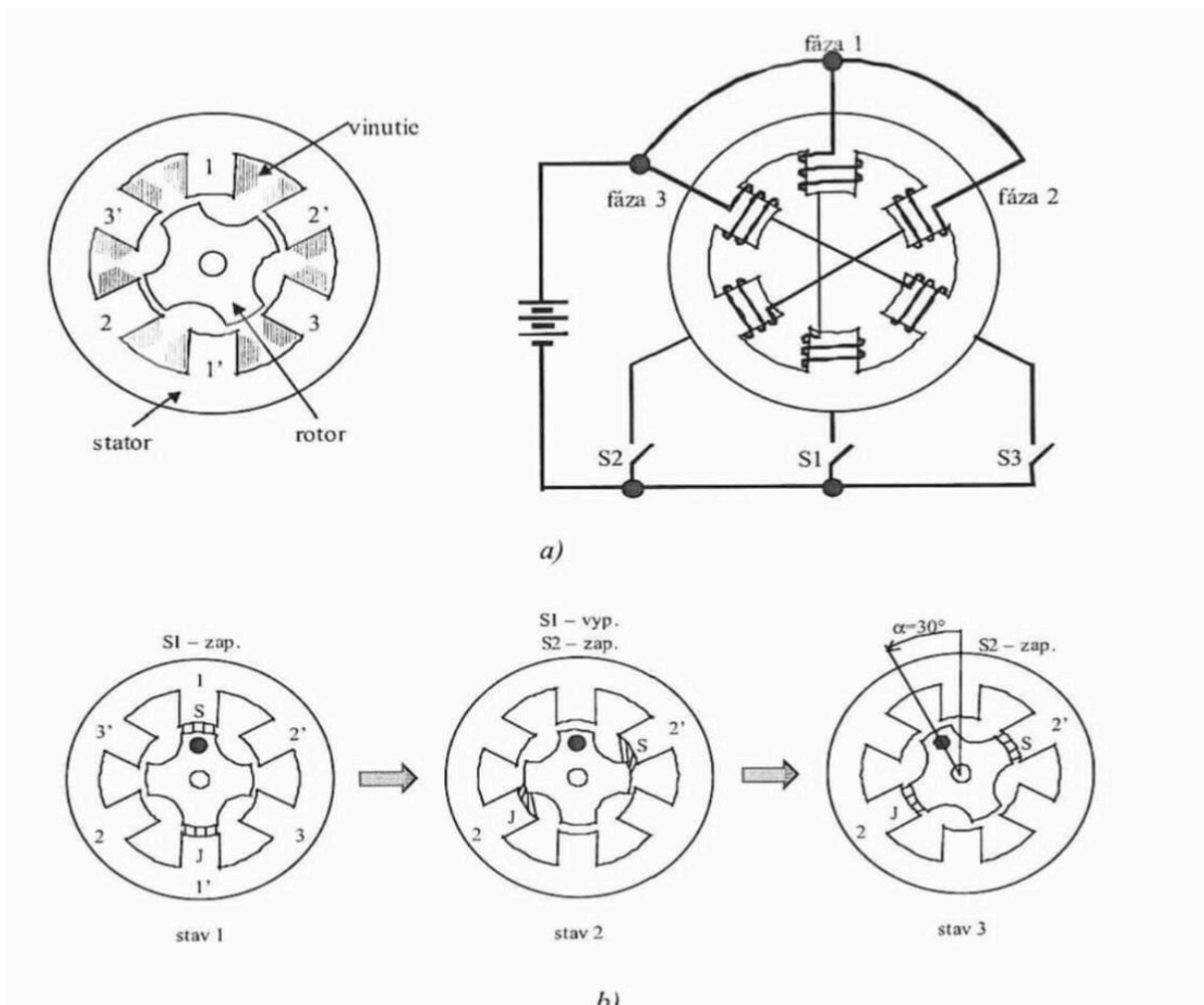
Krokový motor je bezkomutátorový stejnosměrný synchronní elektrický motor, který dokáže rozdělit celou otáčku na množství malých kroků. Pozice hřídele KM může být přesně kontrolována bez jakéhokoliv mechanismu zpětné vazby (tzv. řízení s otevřenou smyčkou). [6]

Základní princip je jednoduchý. Pokud cívkou statoru začne procházet proud, vytvoří se magnetické pole, které přitáhne pól rotoru. Vhodnou kombinací zapojení cívek vytvoříme magnetické pole, které otáčí rotorem. Kvůli přechodovým magnetickým jevům je omezena rychlost otáčení motoru obvykle na několik stovek kroků za sekundu. To se liší dle typu motoru a při překročení motor začíná ztrácet kroky. [4] Mezi další jevy patří výskyt rezonančního pásma způsobující nestabilitu chodu a ztrátu kroků. Při změně proudu řídicího statorového vinutí dochází k přechodnému jevu, který je charakterizován zakmitáním rotoru kolem nové polohy. Vlastní frekvence motoru poté odpovídá frekvenci těchto tlumených kmitů. Nejsilnější rezonance nastávají při nízkých frekvencích krokování. Snížení těchto rezonančních pásem je možné realizovat konstrukcí motoru nebo způsobem řízení. Jeden z možných způsobů řízení motoru mikrokrokováním vede k odstranění nežádoucích jevů (viz kapitola 2.5). Mezi faktory, které ovlivňují tyto jevy, patří hodnoty budících proudů vinutí při rozběhu a konstantní rychlosti, celkový moment setrvačnosti a oteplování motoru. [26]

Části krokového motoru jsou stejně jako u motorů ostatních druhů stator a rotor. Stator je tvořen cívkami a dále také magnetickým obvodem, jež při napájení cívek vytváří spřažený magnetický tok Ψ , kterým se vytvoří magnetické pole. Tento obvod funguje na principu elektromagnetu – cívky s jádrem z magneticky měkké oceli. Materiálem používaným při výrobě statoru tedy bývá magnetická ocel [33]. Rotor je tvořen hřídelí, která je usazena na kuličkových ložiskách. Rotor se poté liší dle daného typu stroje (viz jednotlivé druhy motorů). Konstrukce těchto motorů je možno realizovat pomocí plechů, které mohou být válcovány za tepla nebo za studena - orientované, obdobně jako u

transformátorů, čímž navyšujeme hodnotu magnetické indukce. Plechy používáme jak v rotorovém, tak i ve statorovém magnetickém obvodu a omezujeme tak ztráty, které vznikají vířivými proudy. Jednotlivé plechy jsou od sebe izolovány pomocí speciálních laků, lze také použít speciální impregnovaný papír. U rotorového obvodu je nutno brát na zřetel síly, jež působí na rotor během jeho namáhání při pohybu, a proto je třeba volit vhodnou strukturu této konstrukce. Například při vyšší frekvenci krokování – větší rychlosti hřídele bude na rotor působit vyšší odstředivá síla, kterou při spojování používaných plechů musíme brát v úvahu. [30]

Princip činnosti si vysvětlíme na obrázku č. 1, kde je znázorněný jednosvazkový krokový motor s proměnlivou reluktancí.



Obr. 1 Princip činnosti krokového motoru (převzato z [2])

Stator má na vnitřní straně šest vyniklých pólů. Rotor motoru z obrázku č. 1 má na vnější straně čtyři zuby. Počet zubů na straně rotoru se značí N_r a nerovná se počtu zubů na statoru, který se značí N_s . [2]

$$\text{Platí mezi nimi vztah: } N_r = N_s \pm \frac{N_s}{m} \quad (1.1)$$

kde m je počet fází statoru, N_r je počet zubů na straně rotoru, N_s je počet zubů na straně statoru.

Na statoru se nachází šest cívek. Každé dvě sériově zapojené cívky tvoří jednu dvojčívku, což vytváří příslušnou fázi a poté platí, že stroj na obrázku č.1 je trojfázový ($m = 3$). Stroj je napájený z jednostranného zdroje přes vypínače S1, S2, S3. Spínače spínáme dle požadavku na napájení jednotlivých fází. Například při stavu 1 je sepnut spínač S1 a ostatní spínače jsou rozepnuty, budíme tak cívku 1, 1'. V dalším kroku pak sepne spínač S2 a současně s ním rozepneme spínač S1 (spínač S3 zůstává stále rozepnut), což má za následek nabuzení cívky 2, 2'. V tomto stavu se při nabuzení cívky zároveň odpojí od zdroje cívka 1, 1' a následně se odbudí. Cívkami 2, 2' začne protékat magnetický tok Φ a sním se vytvoří i moment kolmý na směr toku Φ . Moment otočí rotorem do nové rovnovážné polohy (v našem případě stav 3). V tuto chvíli má stroj minimální reluktanci. Pokud je tedy některá cívka buzená, vytvoří se ve stroji takový moment, který se snaží pootočit rotor do nejbližší rovnovážné polohy, ve které je nejmenší magnetický odpor (reluktance). Tím se dostáváme k úhlu kroku označovanému α . Jak již bylo řečeno, při změně stavu se rotor otáčí z jedné polohy do nové rovnovážné polohy. Tento posun o určitý úhel nazýváme právě úhel kroku. [2]

$$\text{Pro úhel kroku } \alpha \text{ platí vztah: } \alpha = \frac{360}{m * N_r} \text{ [}^\circ\text{]} \quad (1.2)$$

kde m je počet fází statoru, N_r je počet zubů na straně rotoru.

Když tedy opět aplikujeme tento poznatek na motor z obrázku č.1, vyjde nám, že úhel kroku, dále jen $\alpha = 30^\circ$. Nebo-li po nabuzení fáze 2, cívky 2, 2' a ustálení celého děje (stav 3) je rotor pootočený vůči původní poloze (stav 1) o 30° . Poloha rotoru může být řízená v násobcích α a to spínáním příslušných fází. Pokud jednotlivé fáze, cívky spínáme postupně tak, aby se dosáhlo pohybu rotoru jedním směrem, rotor se bude otáčet po krocích a průměrná rychlost otáčení se dá řídit právě spínáním cívek. Krokový motor je tedy elektrický motor, který mění vstupní elektrické impulzy na mechanický pohyb rotoru. V dnešní době tyto impulzy generujeme například pomocí moderních integrovaných elektronických obvodů. [2]

Krokové motory se konstrukčně liší podle druhu motoru, o který se jedná. Stator motoru se skládá z vrstvených izolovaných plechů. Měděný drát je navinut kolem každého z pólů. Rotor bývá vyroben z magneticky měkkého železa s řadou zubů. Hřídel je upevněna k rotoru a sedí v ložiskách na obou koncích. Motor s permanentními magnety nemá na straně rotoru zuby, pouze permanentní, nebo-li trvalý magnet. Hybridní motor, jak již název napovídá, je kombinací obou předchozích typů motorů. [1]

Krokový motor má významnou vlastnost umožňující realizaci velmi malých kroků. Pokud tak chceme učinit, musíme zvýšit počet zubů na rotoru N_r . Počet zubů na statoru N_s úhel kroku neovlivňuje, což vyplývá ze vztahu (1.2). Důležitou roli však hraje počet fází statoru m . [2]

1.1.1 Výhody krokového motoru

Strojů, které plní podobnou funkci jako krokový motor, je celá škála. Krokový motor však vyniká řadou výhod: [1; 2; 6]

- *Chyba polohy není kumulativní (rostoucí)*
- *Přesné polohování a opakovatelnost přesného pohybu*
- *Jednoduše řízený, levný a zcela digitální*
- *Bezkartáčový, bezúdržbový – vysoká životnost a spolehlivost*
- *Vysoký točivý moment*
- *Moment i při nulových otáčkách (v klidové poloze, je-li na cívky přiveden proud)*

- *Motor nelze mechanicky přetížit*
- *Otáčí se oběma směry, velký rozsah otáčení*
- *Nepotřebuje zpětnou vazbu*
- *Motor může pracovat i v systému řízení s otevřenou smyčkou*

Nejsilnější výhodou krokového motoru je digitální řízení bez zpětné vazby a jeho mechanická nepřetížitelnost. Mezi další významné výhody patří také to, že motor je kompatibilní s většinou moderních digitálních zařízení, což předurčuje použití v zařízeních vyžadujících řízení polohy a přesnost polohování. [2]

1.1.2 Nevýhody krokového motoru

Mezi hlavní nevýhody krokového motoru patří: [1; 2; 6]

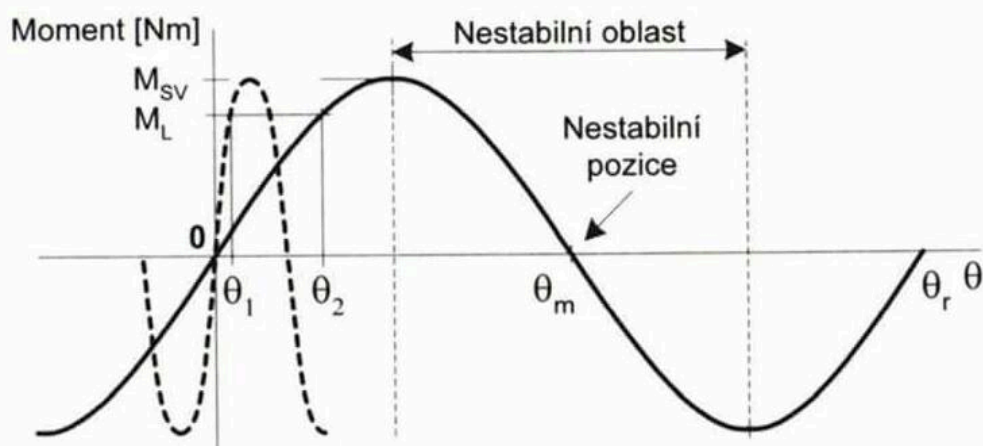
- *Žádná zpětná informace o skutečné poloze*
- *Složitější ovládání při vyšších rychlostech*
- *S rostoucím momentem M_Z dochází k překmitu*
- *Hlučnost, vyšší cena ve srovnání s DC motory*
- *S rostoucími otáčkami ztrácí moment*
- *Některé motory vyžadují speciální řídicí obvod*

Mezi hlavní nevýhody patří mimo jiné překmit krokového motoru. Překmit, nebo-li Overshoot (převz. z anglického jazyka), je pozice, kterou rotor překročí vůči nové rovnovážné pozici. Překmit může nastat permanentní (stálý), kdy se rotor nedostane do správné pozice a setrvává v pozici překmitu, nebo transietní (dočasný). Zde se rotor vyrovná do rovnovážné polohy. [1] Nevýhoda překmitu roste se zátěžným momentem označovaným M_Z , lze jej však odstranit vhodným řízením krokového motoru.

1.1.3 Charakteristiky krokových motorů

Pokud budeme popisovat krokový motor pomocí momentových charakteristik, pak je třeba definovat dvě základní: statickou momentovou charakteristiku a jeho přirozenou momentovou charakteristiku.

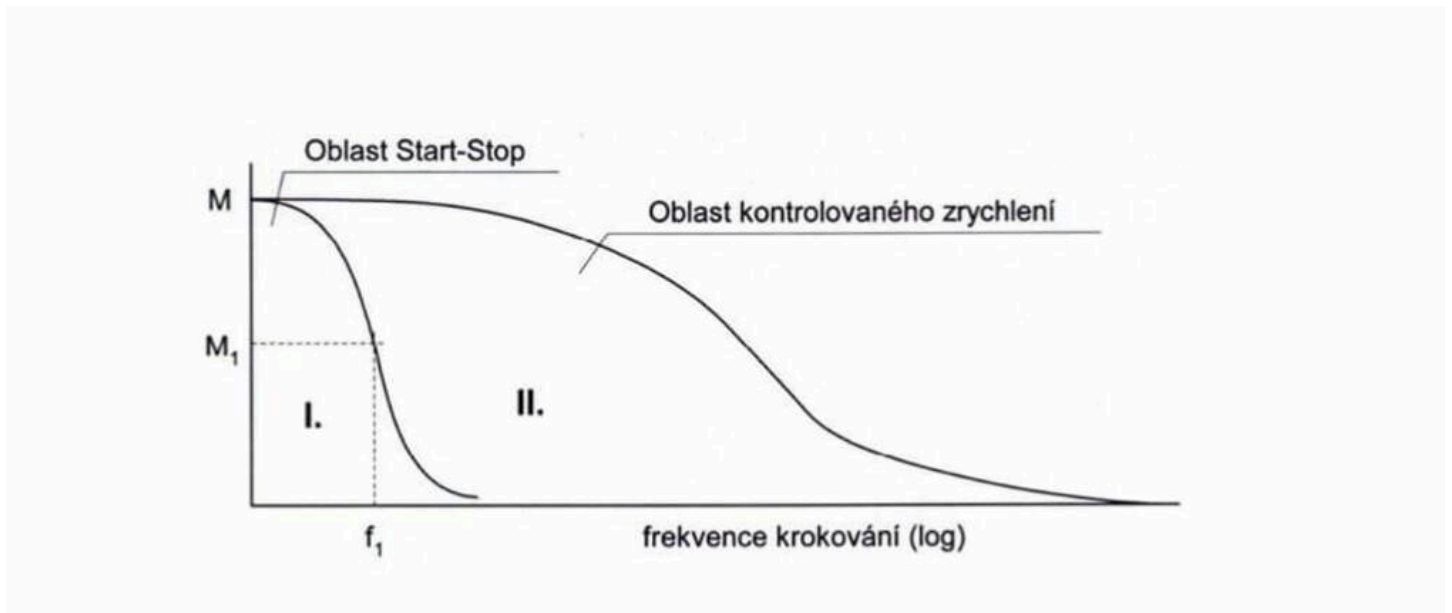
Statická momentová charakteristika udává závislost statického momentu M_S na statickém úhlu zátěže β . Ideální statická charakteristika krokového motoru má sinusový průběh jak je naznačeno na obrázku č. 2, kde je zátěžný úhel značen jako θ (dále také úhel rozladění hřídele). Moment krokového motoru znázorněn přerušovanou čarou je pro motor s menším úhlem kroku, plnou čarou pak motor s úhlem kroku větším. Oba motory jsou zatíženy stejným momentem (na obrázku značeným M_L). Krokový motor s menším úhlem kroku, který se pootočí o úhel θ_1 , má strmější průběh charakteristiky a proto se i jeho poloha hřídele rychleji ustálí díky lepším tlumícím účinkům mechanických oscilací rotoru. Maximální hodnota kroutícího momentu nazývána vazebný statický moment M_{SV} , vyjadřuje moment, kterým lze působit na hřídel buzeného stojícího krokového motoru, aniž by došlo k přerušení magnetické vazby, a tím i k přeskoku rotoru do následující ustálené polohy. [3]



Obr. 2 Statická momentová charakteristika krokového motoru
(převzato z [3])

Momentová charakteristika je závislost momentu M_Z na krokovací frekvenci f_k , tedy na otáčkách krokového motoru, který je nabuzen, otáčí se a je zatěžován. Nejčastěji se s touto charakteristikou setkáme v katalogových listech krokových motorů, kde bývá vykreslena pro různá zapojení vinutí a napájení odlišným napětím.

Momentová charakteristika je znázorněna na obrázku č. 3. Typické pro tuto charakteristiku je rozdělení do dvou oblastí. [3]



Obr. 3 Momentová charakteristika krokového motoru (převzato z [3])

Oblast I. nazývána „start – stop” nebo také „rozběhová”, popisuje stavy, do nichž se motor dostává z klidového stavu po připojení řídicích impulsů beze ztráty kroku. Z obrázku je patrné, že při zatěžovacím momentu M_1 lze přivést řídicí kmitočet f_1 .

Oblast II. nazývána „provozní” nebo také „oblast kontrolovaného zrychlení”. Této oblasti dosahuje krokový motor při plynulé regulaci řídicí frekvence (jejím postupným zvyšováním). Tento způsob provozu je složitější, ovšem lze při něm krokový motor lépe využít.

V případě dalšího zvyšování frekvence může vzniknout nestabilita celého systému, příčinou je zpětná vazba mezi motorem a budičem. Tento jev nastává v oblasti vyšších kmitočetů, naopak v oblasti kmitočetů nižších může být škodlivá vlastní rezonance. [3]

2 Druhy a využití KROKOVÝCH MOTORŮ

2.1 Rozdělení krokových motorů

Hlediska dělení krokových motorů jsou různá, např. základní dělení druhů vzhledem k jejich konstrukci a principu činnosti.

Základní kategorie krokových motorů jsou:

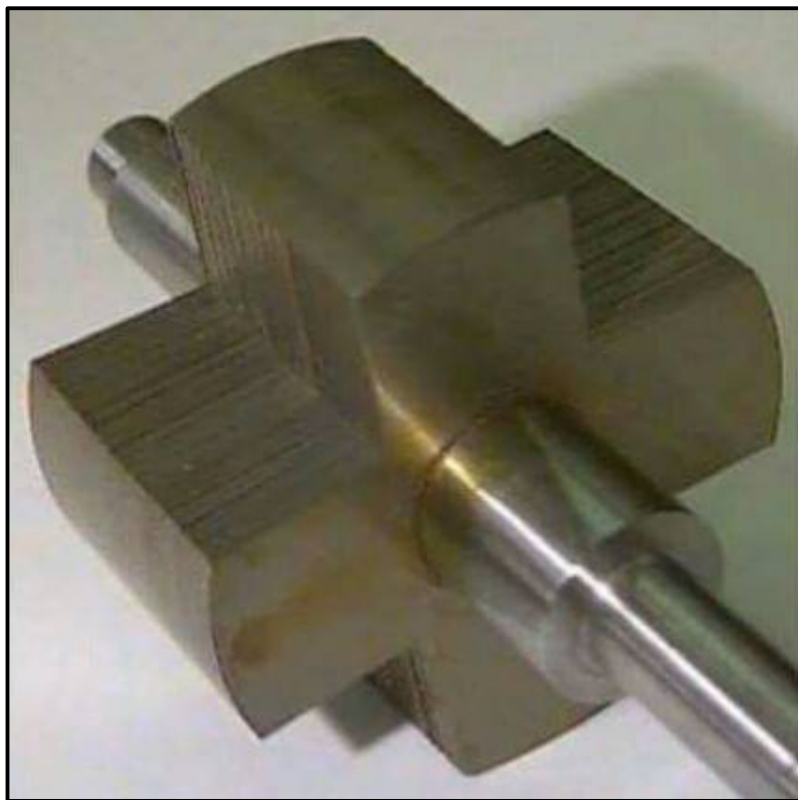
- *Motory s proměnlivou reluktancí*
- *Motory s permanentními magnety*
- *Hybridní motory*
- *Mikrokrokové motory*

2.2 Krokové motory s proměnlivou reluktancí

Krokový motor s proměnlivou reluktancí je považován za základní typ krokového motoru. Patří k první generaci krokových motorů, i proto je konstrukčně již překonán novějšími modely a jeho uplatnění je nižší [1]. Přes vysoké otáčky rotoru, kterých může tento typ krokového motoru dosáhnout, má relativně nízký točivý moment (mNm až jednotky Nm). Nízký točivý moment zapříčiňuje, mimo jiné, i menší přesnost polohování kroků. Nulový přídržný moment za vypnutého stavu je další důležitou vlastností tohoto typu motoru. [21]

Rotor i stator jsou složeny z plechů s vysokou permeabilitou, lze se však také setkat i s verzí rotoru, která není složena z plechů [9]. Vinutí jedné z fází je uloženo na pólech statoru, které leží proti sobě. Jednotlivé cívky mohou být zapojeny sériově nebo paralelně. Zuby statoru mohou mít také kladnou i zápornou polaritu. Vzduchová mezera motoru by měla být co nejmenší z důvodu dosáhnutí co největšího momentu při co nejmenším objemu rotoru a co nejpřesnějším polohování rotoru.

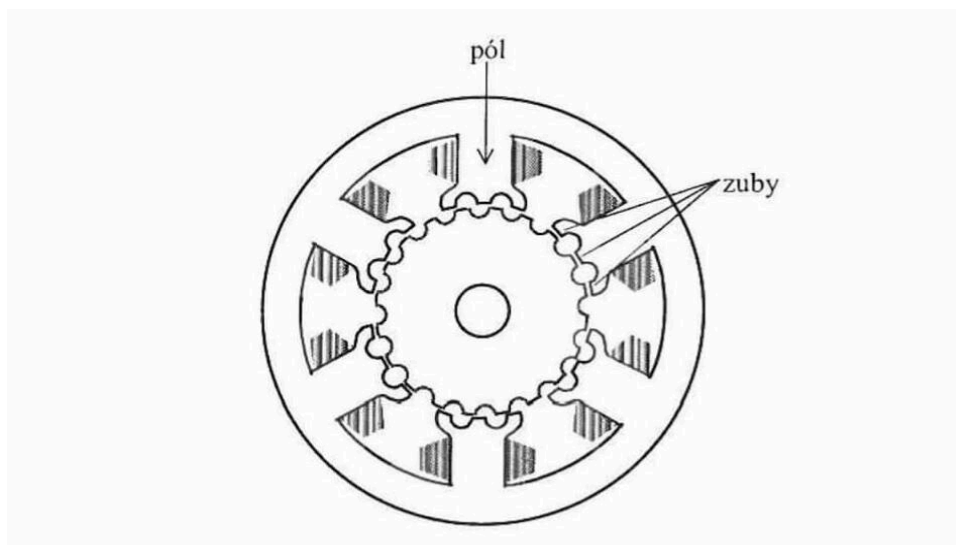
Princip činnosti reluktančního stroje, který byl zmíněn již v obecném popisu krokového motoru, je založen na působení reluktančního momentu. Pokud napájíme dva protilehlé statorové póly, uzavře se mezi nimi magnetický tok, který teče přes rotor. Působení magnetického toku má za následek natočení rotoru tak, aby cesta toku byla co nejpříznivější – vyrovnání siločar magnetického pole. Vhodným spínáním pólů poté docílíme požadovaného natáčení rotoru. [34] Dnes se s tímto typem motoru setkáme již velmi zřídka, používá se hlavně pro aplikace, kde není kladen velký důraz na přesné polohování [12]. Na obrázku č. 4 si můžeme prohlédnout rotor takového motoru detailněji.



Obr. 4 Rotor krokového motoru s proměnlivou reluktancí
(převzato z [8])

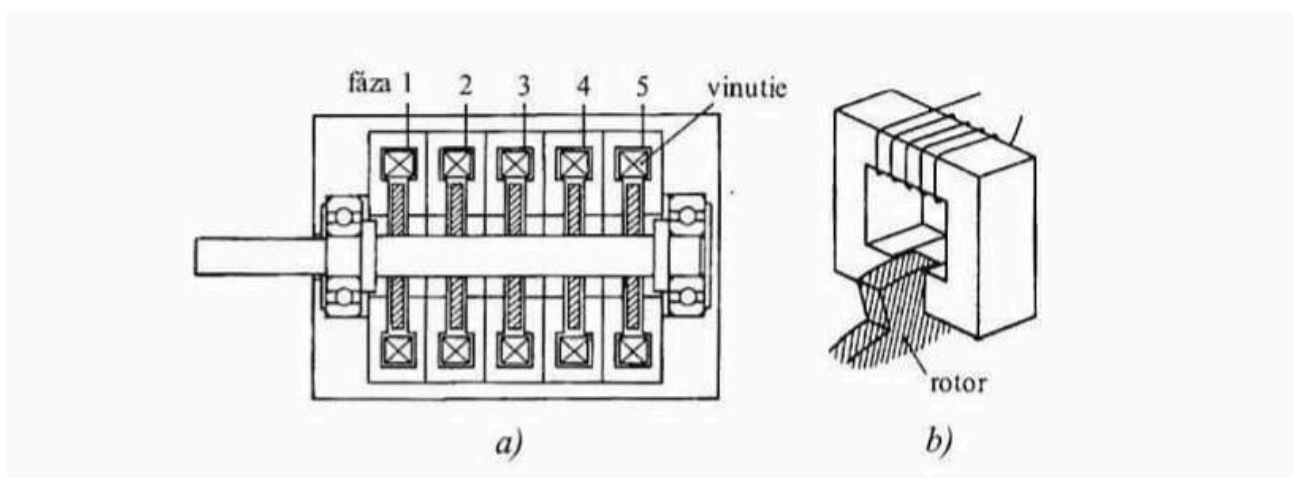
U reluktančních motorů lze docílit menšího kroku pomocí vhodných úprav konstrukce zvýšením počtu drážek nebo drážkováním na pólech obecně. Motor s proměnlivou reluktancí je na obrázku č. 5. Motor má složené statorové póly ze tří zubů, zuby mají stejnou magnetickou polaritu a na každém z pólů je cívka. Rotor má dvacet zubů, úhel kroku je roven 6° .

Tento typ motoru lze provést v široké škále konstrukčních možností. Různé druhy provedení rotorových a statorových zubů, také počet fází lze měnit dle přání odběratele, což následně vede k motorům s různým úhlem kroku [10]. Nejčastější hodnoty úhlu kroku těchto motorů jsou od 1° až do 5° [11]. Rozpoznat motor s takovým úhlem kroku je snadné, neboť malý úhel kroku má za následek, že “krokování” nelze na hřídeli takřka pozorovat a pozorovateli se tak zdá, že hřídel motoru se otáčí plynule [12]. Přesným řízením motoru lze také docílit plynulého otáčení hřídele i u motorů s vyšším úhlem kroku.

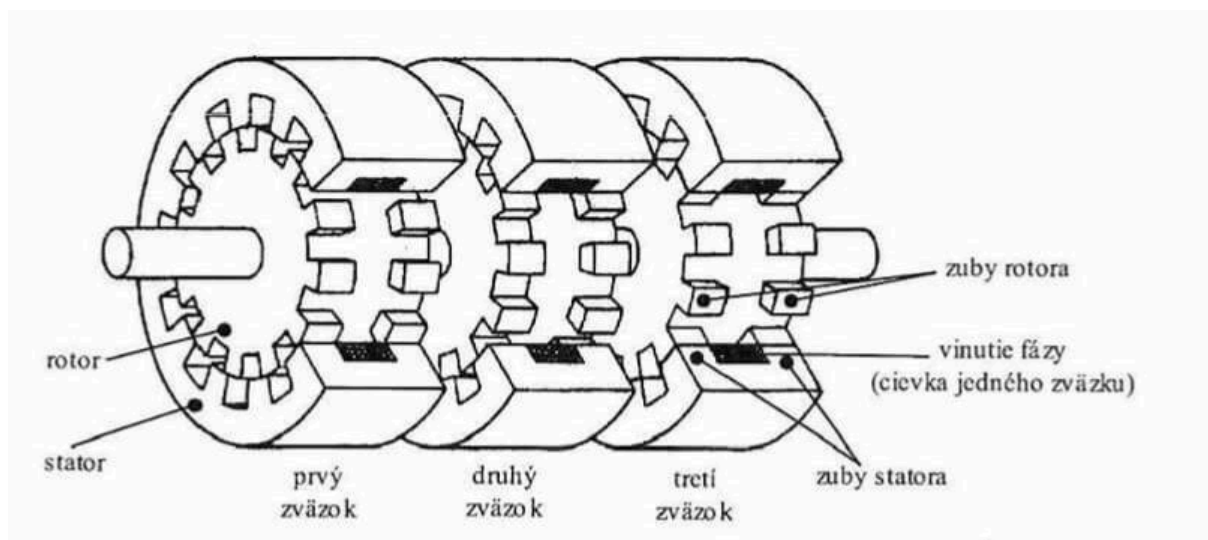


Obr. 5 Průřez krokového motoru s proměnlivou reluktancí a úhlem kroku 6° (převzato z [2])

Krokové motory s proměnlivou reluktancí mohou být také vícesvazkové sendvičové struktury. Motor sendvičové struktury je na obrázku č. 6. Trojsvazkový motor je detailněji znázorněn na obrázku č. 7. Zde každý svazek odpovídá jedné fázi, zuby statoru a rotoru mají stejný odstup. [2]

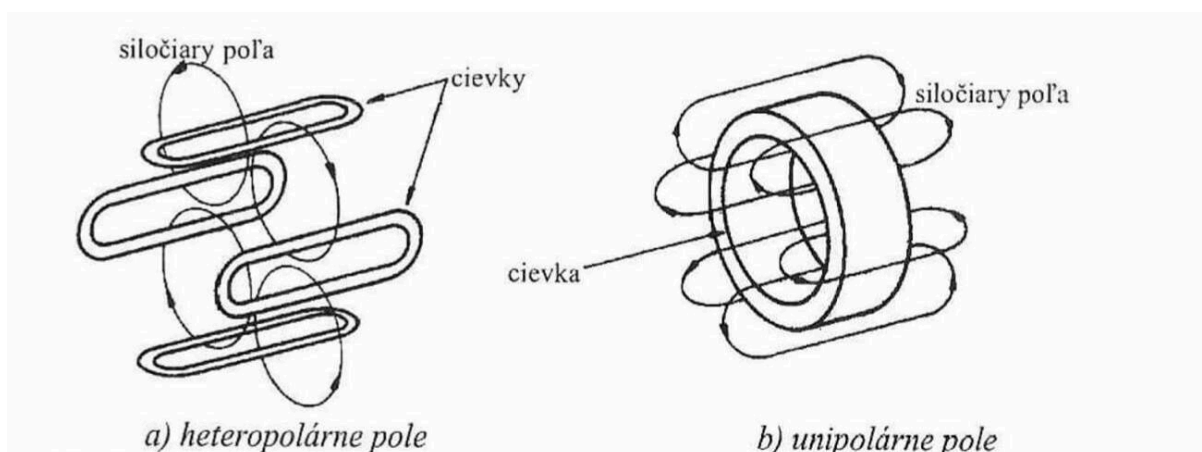


Obr. 6 Trojfázový krokový motor s proměnlivou reluktancí (převzato z [2])



Obr. 7 Trojfázový krokový motor s proměnlivou reluktancí (převzato z [2])

Ve vícesvazkových motorech se vytváří pole unipolární oproti poli heteropolárnímu, které se vytváří v jednosvazkových motorech. Unipolární pole vícesvazkových motorů tvoří jedna cívka namotaná po obvodu solenoidu motoru. Heteropolární pole jednosvazkových motorů vytváří cívky umístěny na protilehlých pólech. Jednosvazkové motory z předchozích obrázku jsou typické tím, že tři, resp. čtyři fáze mají na jednom svazku. [2]



Obr. 8 Pole jednosvazkového a vícesvazkového krokového motoru (převzato z [2])

2.3 Krokové motory s permanentními magnety

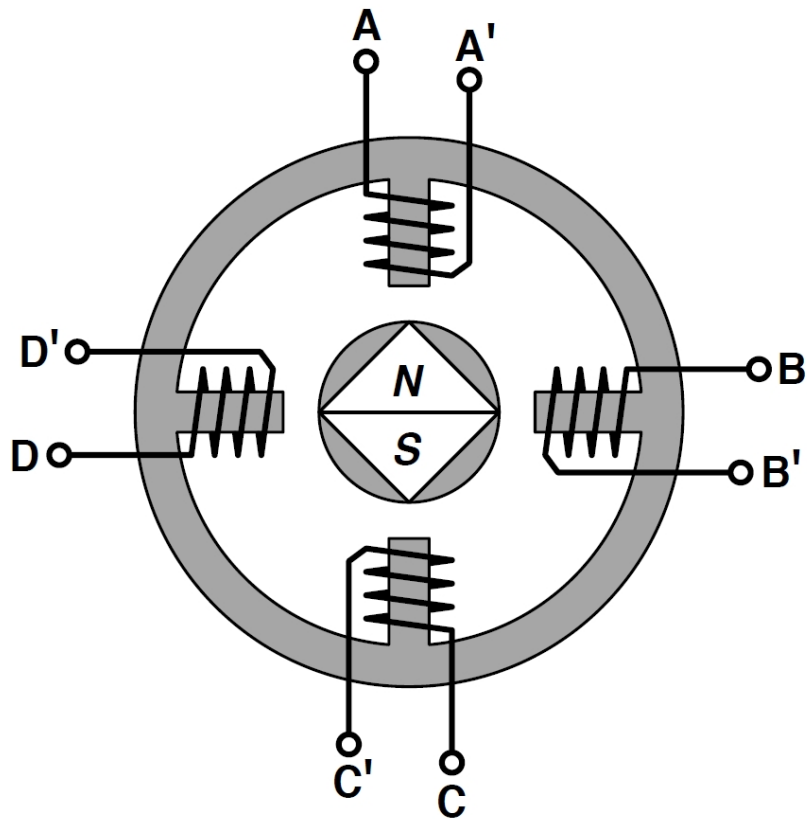
„Jednoduchá konstrukce těchto motorů a tím pádem nízké výrobní náklady je předurčují k použití ve spotřební a automobilové elektronice, kde není překážkou velikost jejich kroku (7,5 nebo 15°)” [12]. Krokový motor s permanentními magnety bývá označován jako „plechovka“ (převzato z angl. ozn. tin can, canstock). Motory tohoto typu mají nízké rozlišení kroků a bývají i levné. Obvyklé úhly jsou od 7,5° do 15° na krok (48 – 24 kroků na otáčku). [4]

Konstrukčně se stator nijak neodlišuje od stroje předchozího typu, ovšem rotor je poskládán z permanentních magnetů, které jsou na hřídeli uspořádány vedle sebe tak, že se střídá severní a jižní magnetický pól. Počet pólů rotorové strany je u tohoto typu vždy poloviční oproti straně statorové [12]. Rotor má tedy definovaný přesný počet a polaritu jednotlivých pólů, které vytvářejí vlastní magnetické pole rotoru. Proto se můžeme v literatuře setkat i s jiným názvem toho typu motorů, a to: Krokové motory s aktivním rotorem. Konstrukce magnetů na straně rotoru je realizována nalepením nebo přímým zapuštěním magnetů do rotoru. [13]

Oproti předchozímu typu motorů tento typ disponuje řadou výhod. Mezi hlavní z nich patří vyšší hmotný výkon (poměr cena/výkon) a existence vazebního momentu nenabuzeného stroje (stroj může být zatížen určitým momentem i v nenabuzeném stavu) [2]. Další výhodou je, že magnetizované póly rotoru poskytují větší intenzitu magnetického toku, a tím pádem je i lepší momentová charakteristika v porovnání s krokovými motory s proměnlivou reluktancí.

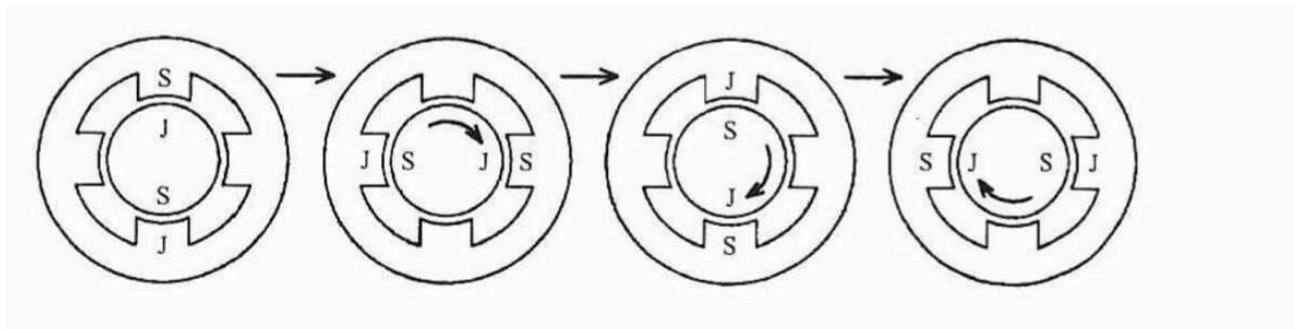
Nevýhodou motoru s permanentním magnetem v jeho konstrukci je jeho teplotní závislost. Působením vyšších teplot dochází při Curiově teplotě k narušení pravidelného uspořádání, látka poté přestává být magnetem. [20, 27] Motor tedy přestává pracovat, neboť na rotoru již neexistuje severní ani jižní magnetický pól a rotor se tak přestává natáčet podle magnetického pole vytvářeného statorem. Tento jev lze považovat za nedostatek tohoto druhu motorů, ovšem Curieova teplota má sice rozdílnou hodnotu dle materiálu ale tyto hodnoty jsou poměrně vysoké a pro běžný provoz motoru nepoužitelné [35]. Běžné neodymové a feritové magnety ztrácejí magnetické vlastnosti při teplotě okolo 300 °C [38].

Řez motorem lze vidět na obrázku č. 9, kde je znázorněno i napájení jednotlivých fází.



Obr. 9 Řez krokového motoru s permanentními magnety
(převzato z [2])

Točení motoru tedy zajistíme postupným spínáním jednotlivých cívek na straně statoru s respektováním trvalých magnetických pólů na straně rotoru. Tento princip můžeme vidět na obrázku č. 10.



Obr. 10 Otáčka krokového motoru s permanentními magnety
(převzato z [2])

Zde magnetický pól statoru, vytvořený magnetickým tokem, leží proti magnetickému pólu rotoru protější orientace (sever proti jihu). Poté vhodným sepnutím cívek vytvoříme magnetický pól opačné orientace o zub dál, a rotor, který má pevně danou orientaci magnetických pólů je opět přitažen do nové rovnovážné polohy, tedy dochází k posunu o krok. [2] Jako materiál pro výrobu permanentních magnetů se používá vzácných zemin, jako jsou například samarium - kobalt, nebo neodým - železo – bor. Také lze použít tvrdé ferity, které jsou levnější, avšak s horšími magnetickými vlastnostmi. [29]



Obr. 11 Pohled na rotor obsahující permanentní magnety (převzato z [36])

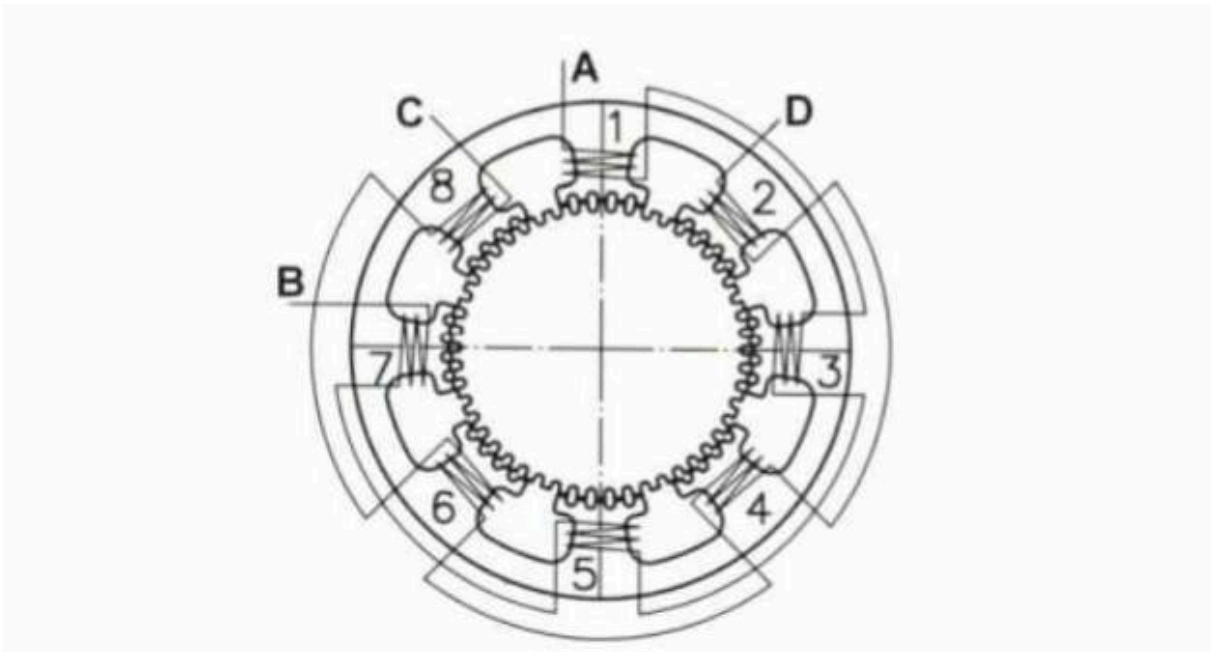
Příklad celkové konstrukce krokového motoru lze vidět na obrázku č. 12, kde je krokový motor, který byl používán pro pohon staré jehličkové tiskárny, ty v současné době prakticky již vymizely nebo se s nimi můžeme setkat jen velmi zřídka. [19]



Obr. 12 Konstrukce krokového motoru pro pohon starší jehličkové tiskárny (převzato z [36])

2.4 Hybridní krokové motory

Hybridní krokové motory jsou dražší, ovšem poskytují lepší parametry než předchozí dva typy. Jedná se o kombinaci nejlepších vlastností předešlých dvou typů motorů. Lepší parametry mají ať už jde o krokové rozlišení, krouticí moment nebo rychlost. Typické krokovací úhly takového motoru jsou pak v rozmezí od $3,6^\circ$ do $0,9^\circ$ (což odpovídá 100 až 400 krokům na otáčku). [3] V současné době je tento motor nejvyužívanějším krokovým motorem vůbec, vzhledem k velice malému krokovacímu úhlu.

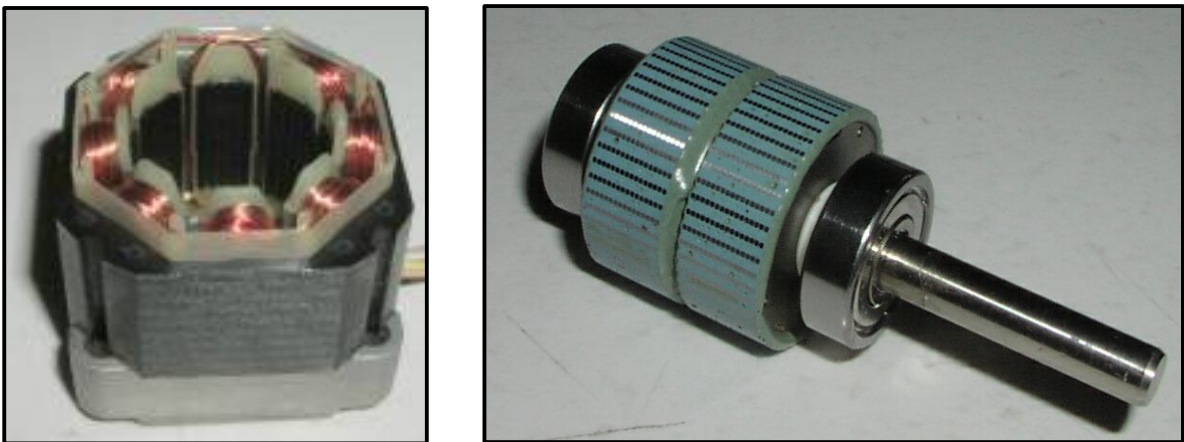


Obr. 13 Řez hybridním krokovým motorem s úhlem kroku $1,8^\circ$
(převzato z [3])

Na obrázku č. 13 je zachycen řez hybridním krokovým motorem s úhlem kroku $1,8^\circ$ s dvoufázovým napájením. Stator tvoří osm hlavních pólových nastavců, z nichž je každý rozdělen na pět shodných zubů a na každém z nastavců je navinuta cívka. Když není žádné z vinutí statoru napájeno, magnetický tok, který je tvořen permanentním magnetem, drží rotor v klidové poloze. Dle obrázku tvoří cívky pólových nastavců 1, 3, 5 a 7 fázi AB, zbylé cívky tvoří fázi CD. Při průchodu kladného proudu fázi A jsou statorové póly 1 a 5 magnetovány jižně a póly 1 a 7 magnetovány severně. Zuby na severním konci rotoru jsou přitahovány póly 1 a 5 a zuby na jižním konci póly 3 a 7. K pootočení je potřeba, aby se fázové vinutí AB přestalo napájet a začalo se napájet fázové vinutí CD proudem kladného nebo záporného smyslu podle požadovaného směru otáčení hřídele. Spínání

+AB, -CD, -AB, +CD, +AB pro otáčení ve směru hodinových ručiček nebo +AB, +CD, -AB, -CD, +AB pro opačný směr otáčení. [3]

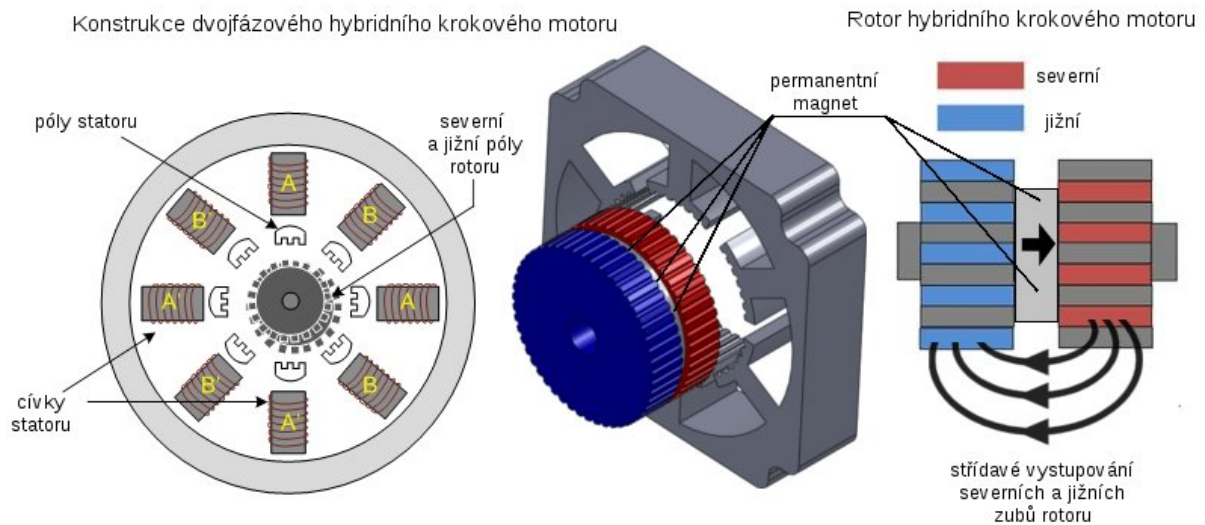
Díky ozubenému rotoru, stejně jako u motoru s proměnlivou reluktancí, dochází ke zlepšení krokování, statické a dynamické momentové charakteristiky ve srovnání s ostatními druhy. Ozubení na rotoru má za následek zlepšení magnetického toku ve vzduchové mezeře – magnetický tok se lépe uzavírá do rotorové části [5]. Na rotoru jsou nalisovány dva pólové nástavce složené z plechů. Vnitřní část rotoru je ovšem z nemagnetické oceli. Mezi nástavci nalezneme magnet, který zmagnetizuje každý z pólových nástavců na opačnou polaritu [12], tzn. rotor je axiálně polarizován [7]. Nástavce krokového motoru z obrázku č. 13 mají různou magnetickou polaritu a jsou rozděleny na 50 zubů se stejnou šířkou jako nástavce rotorové. Rotorové nástavce jsou vzájemně osově natočeny tak, že proti osám zubu jednoho jsou osy drážek druhého – natočení o polovinu rotorové drážkové rozteče (zuby jednoho nástavce vůči druhému jsou natočeny o polovinu zubu). [3]



Obr. 14 Pohled na stator (vpravo) a rotor (vlevo) hybridního krokového motoru (převzato z [2])

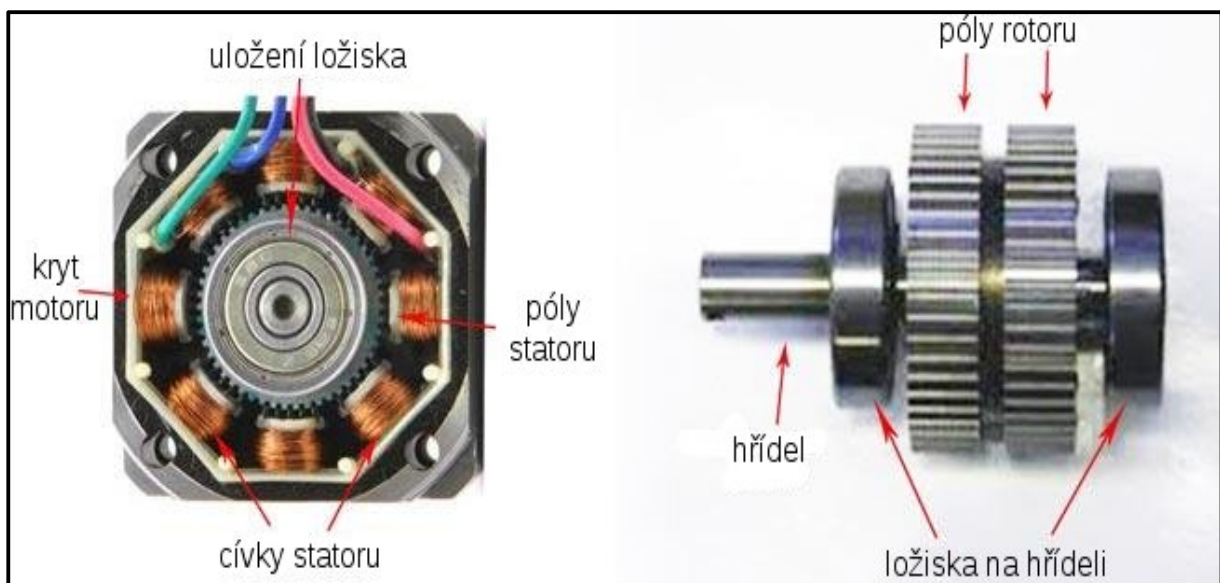
Dvoufázové hybridní krokové motory jsou nejpoužívanější, známé jsou i troj-, resp. pětifázové hybridní krokové motory, které jsou samozřejmě dražší, ovšem vynikají lepšími dynamickými vlastnostmi. [2]

Konstrukční uspořádání dvoufázového hybridního krokového motoru můžeme vidět na obrázku č. 15, kde je zobrazeno rozložení statorových a rotorových pólů.



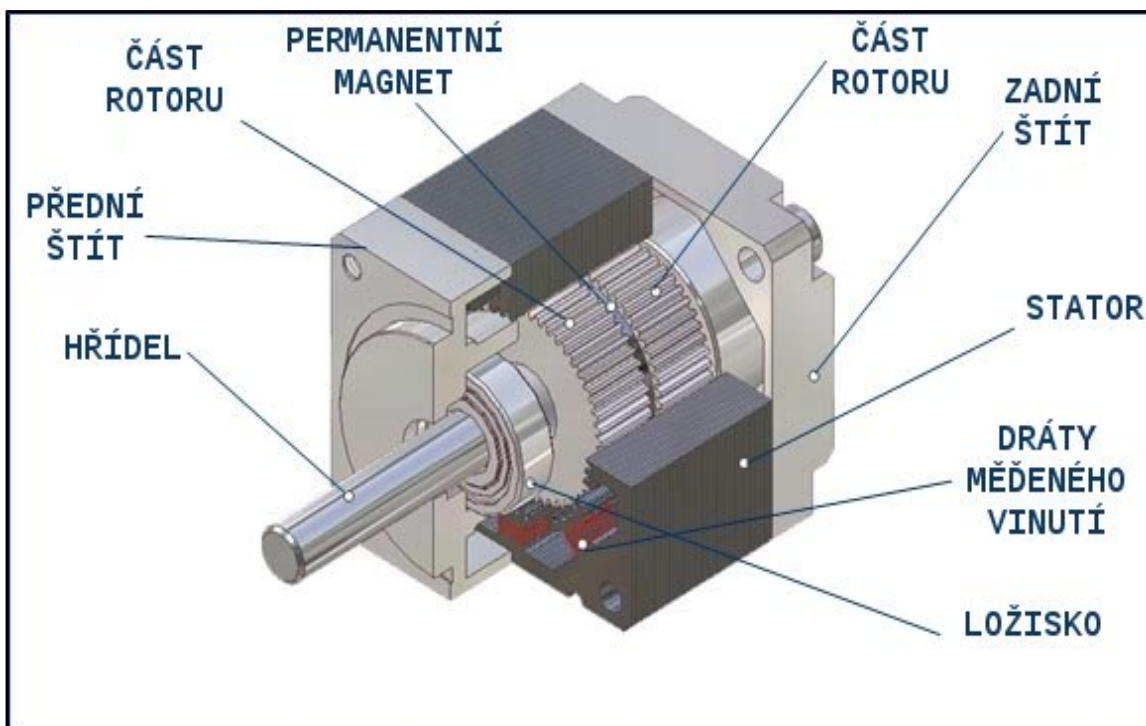
Obr. 15 Konstrukční uspořádání dvoufázového hybridního krokového motoru (převzato z [8])

Na obrázku č. 16 nalezneme reálnou konstrukci taktěž dvoufázového krokového motoru. Na pravé straně pohled na rotor a na straně levé přední pohled na stator s rotorem zasazeným dovnitř statoru.



Obr. 16 Reálná konstrukce dvoufázového hybridního krokového motoru (převzato z [8])

Na následujícím obrázku č. 17 vidíme motor i s jeho vnější konstrukcí, která chrání jak rotorovou, tak statorovou část. Vnější plášť u veškerých typů motorů (elektrických strojů) definuje stupeň krytí. „Stupeň krytí (IPX) udává odolnost elektrospotřebiče proti vniknutí cizího tělesa a vniknutí kapalin. Vyjadřuje se v tzv. IP kódu (z anglického *ingress protection*) definovaném českou technickou normou ČSN EN 60529 *Stupeň ochrany krytem*” [22]. Stupeň krytí je volen s ohledem na použití daného motoru, prostředí, ve kterém se motor nachází a také vnějších vlivů jež mohou na motor působit. Například krokové motory řady 4218 a 5718 jsou vyráběny v České republice a nabízejí je firmy RAVEO s.r.o. a Servo – Drive s.r.o. Používané jsou jako náhrada moderních servopohonů a mají stupeň krytí IP65, což odpovídá úplné ochraně proti vniknutí prachu a ochraně před tryskající vodou ve vzdálenosti 3 metrů po dobu 3 minut. Motory řady 5718 mohou být vybaveny i krytím IP7. To zajišťuje kompletní ochranu proti prachu a vydrží ponoření do kapaliny hloubky 15 cm až 1 m po dobu 30 minut. Motory této řady lze plně použít i v potravinářském průmyslu pro pohon linek, jejich nátěry odpovídají předpisům i pro tuto oblast. [23]

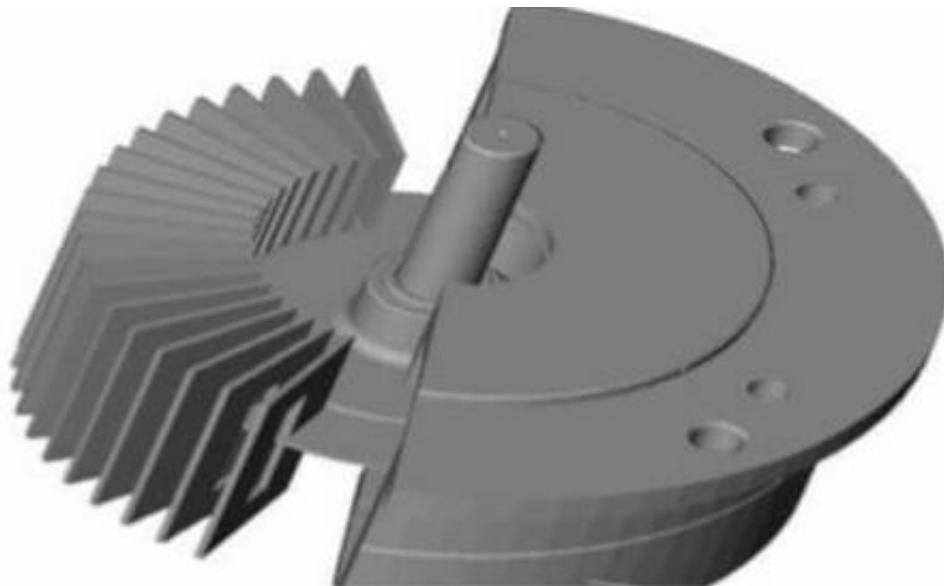


Obr. 17 Pohled na konstrukci s vnějším pláštěm
(převzato z [8])

2.5 Mikrokrokové motory

Odlišnost od předchozích typů krokových motorů je v kombinaci fáze a buzení a také v rozsahu aplikovaného proudu. Mikrokrokování je založeno na magnetizaci dvou fází. Dělí každý krok na mikrokroky o zpravidla stejné délce, velikosti proudů v jednotlivých mikrokrocích jsou odlišné. Vhodnou volbou a řízením vzájemných velikostí proudů lze dosáhnout libovolné rovnovážné polohy mikrokroku mezi dvěma sousedními “základními” kroky, což určuje poměr proudů. Moment je dán velikostí proudů. [5] Kontrolní krokovací systém zlepšuje přesnost polohování, eliminuje nízkorychlostní zvlnění a také rezonanční jevy v pohonu krokového motoru. [15] Řídící systémy pro tyto motory jsou ovšem nákladné a proto jsou používány jen velmi omezeně [14].

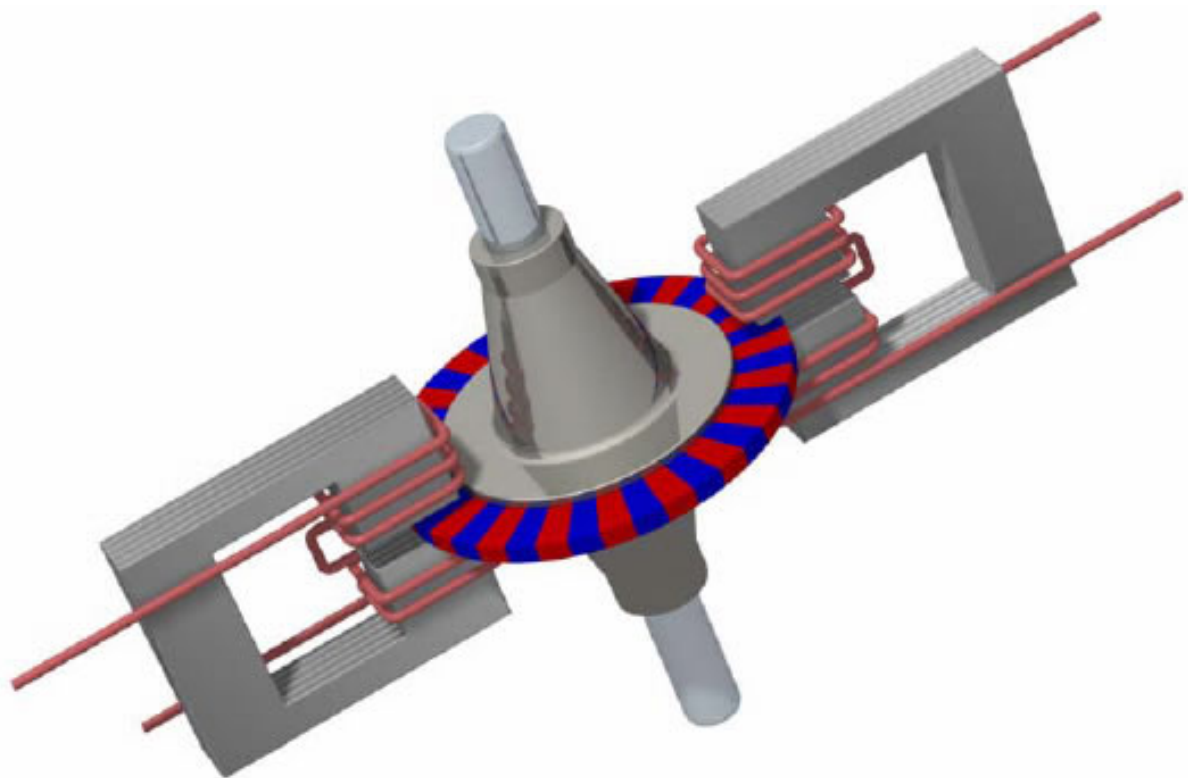
Od „klasických“ krokových motorů se liší jak rotorem, tak i jeho buzením, čili statorem. Uspořádáním je motor mnohem složitější a jeho řídicí obvody také. Z konstrukčního hlediska jde o motor hybridní, ovšem ovládaný tak, že jej lze použít pro mikrokrokování. Rotor je tzv. diskový. Konstrukci lze vidět na obrázku č. 18.



Obr. 18 Rotor diskového krokového motoru použitého pro mikrokrokování
(převzato z [14])

Krokový motor s diskovým rotorem pracuje na provozních principech obou zmíněných druhů motorů (motoru s permanentními magnety a motoru s proměnlivou reluktancí). Rotor pro tento motor je magnetický disk, který je ze vzácných zemin. Uspořádání rotorových zubů napomáhá usměrňovat magnetický tok do příznivějších míst vzduchové mezery mezi statorem a rotorem motoru. Díky konstrukčně “vybraným” oblastem, kudy magnetický tok protéká, lze motor dále lépe řídit a docílit tak jeho mikrokrokování. Tok proudu vinutí je obousměrný, což vyžaduje změnu polarity každého konce vinutí. [17] Motor diskového typu má dvě fáze, a proto se ovládá pomocí kontrolního obvodu H-můstku. Díky tomuto řídicímu obvodu (H-můstku), lze donutit motor k „mikrokrokování” [16].

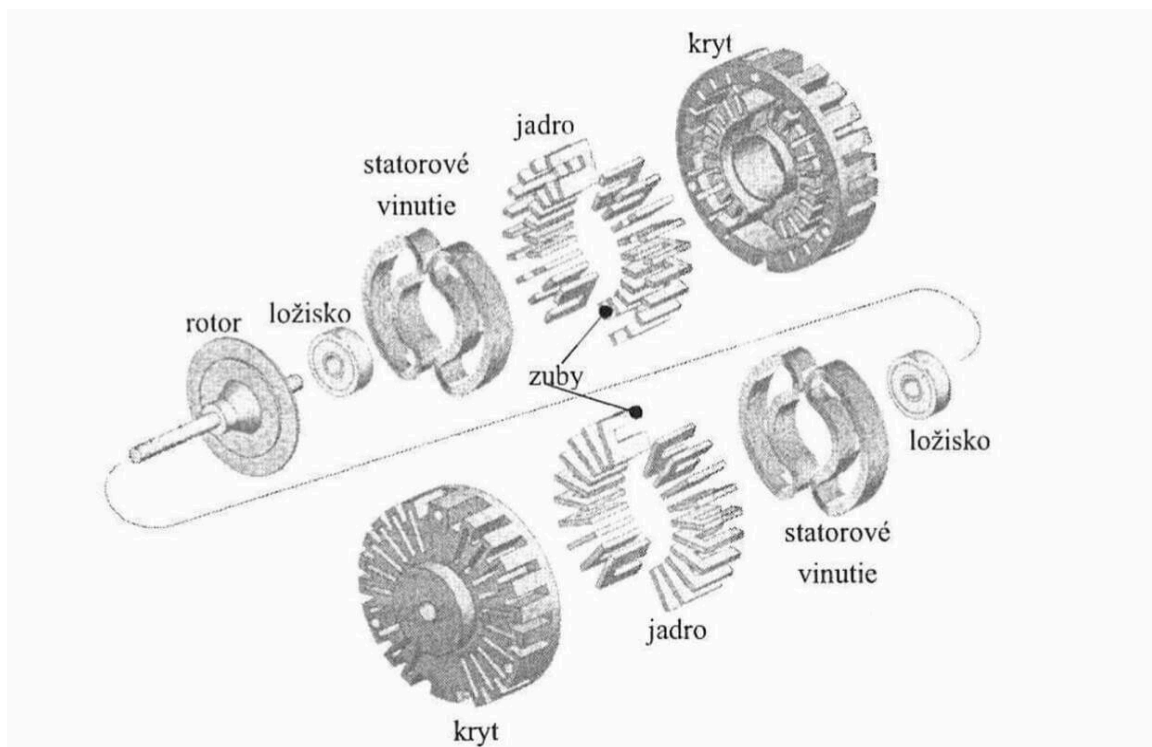
Krokový motor s diskovým rotorem vyrábí firma Portescap International S.A. ve Švýcarsku. Jeho konstrukci můžete vidět na obrázku č. 19. Permanentní magnet rotoru je zde buzen axiálně. [1]



Obr. 19 Konstrukce krokového motoru s diskovým rotorem
(převzato z [1])

2.6 Využití krokových motorů

Nejrozšířenější využití našly krokové motory ve výpočetní technice. Dále se používají v tiskárnách na pohon fotocitlivých válců, posun papíru, náplně a v grafických zapisovačích na posun per. Krokové motory najdeme i v (hard) discích a v mechanikách pružných (floppy) disků, kde jsou využity pro pohon čtecí hlavy. V průmyslu uplatňujeme krokové motory také, a to například v obráběcích strojích pro polohování pracovního stolu. Samozřejmě nemůžeme opomenout ani použití těchto motorů v hodinových strojkách, fotopřístrojích a kamerách pro zaostřování. Dnes krokové motory, jež pomáhaly filmové technice zaostřovat, pomalu vytlačily piezoelektrické motory. Lze se také setkat se speciálními konstrukcemi pro práci ve vakuu při vysokých teplotách. Krokové motory byly použity také ve vesmíru právě pro již zmíněné zaostřování kamer a roku 1966 i na měsíci, kde pomáhaly opět filmovat. Na obrázku č. 20 je naznačena konstrukce krokového motoru, který se využívá v hodinových strojcích. Je to speciální disková konstrukce s permanentními magnety. [2]



Obr. 20 Diskový krokový motor s permanentními magnety pro použití v hodinových strojkách
(převzato z [2])

V současnosti krokové motory také nalezneme v automobilové technice, kde se používají pro nastavení světlometů z důvodu jasně daných kroků a tím i jejich velké přesnosti [32]. Také bychom se mohli setkat s těmito motory ve stěračích automobilů a dalších vozidel či přepravních prostředků.

Krokové motory, díky metodě řízení v otevřené smyčce bez nutnosti zpětné vazby, využívají servopohonové systémy. Kromě výhody v řízení je atraktivnější také cena samotných motorů [24]. Velmi zajímavou alternativou k servomotorům jsou krokové motory s enkodérem, kterými lze nahradit servomotor. Do motoru pouze vyšleme informaci o frekvenci, počtu pulsů a směru otáčení a poté motor sám najede na požadovanou polohu. Tyto motory je výhodné použít tam, kde je třeba velkého rozběhového momentu. [25]



Obr. 21 Krokový motor s enkodérem vhodný jako náhrada servopohonů
(převzato z [25])

Na obrázku č. 21 je možno vidět krokový motor s inkrementálním optickým snímačem a inteligentním řízením, který má i enkodér pro přesné polohování bez ztráty kroku. Moment těchto motorů se pohybuje od 120 mNm až do 12 Nm , přičemž proud fází motoru při nejnižším momentu dosahuje 0,95A a při nejvyšším 6A. [25]

3 Modely krokových motorů

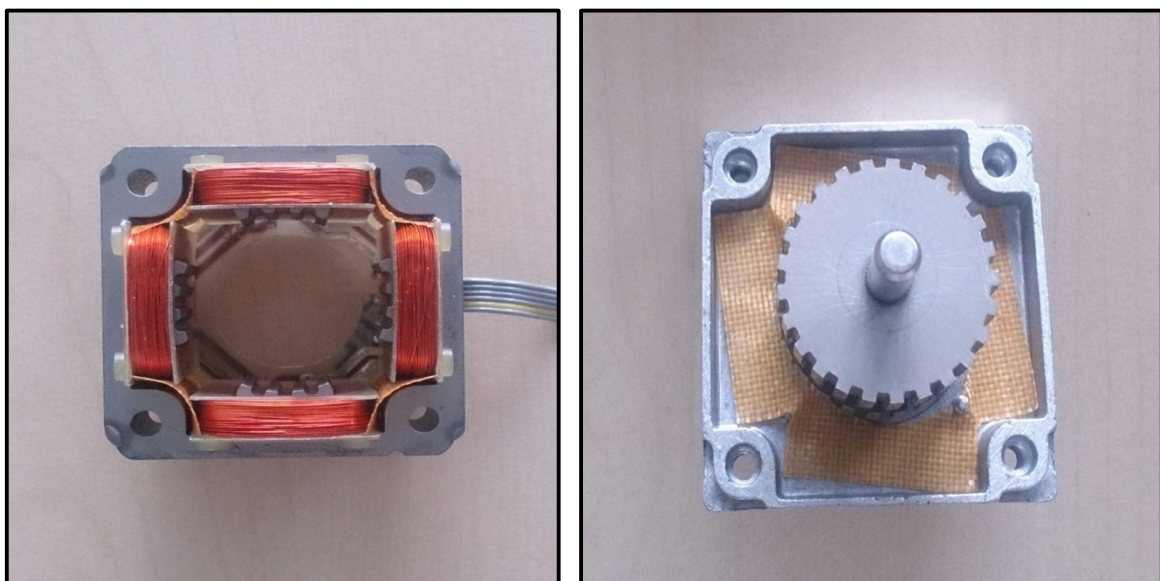
V této kapitole se detailněji podíváme na dva modely krokových motorů s permanentními magnety a bez nich. Pro zhotovení těchto modelů byl volen program FEMM, který řeší problematiku magnetického pole modelů. Návrh obou modelů byl zpracován v programu SolidWorks. Prvním krokem bylo seznámení se simulačním programem a návrh jednotlivých modelů, dále následoval náčrt motorů a jejich samotná simulace. Na závěr porovnání a zhodnocení dosažených výsledků.

3.1 Simulační program FEMM

FEMM, nebo-li Finite Elements Method Magnetics, je simulační program používaný k řešení problému magnetického či elektrostatického pole. Lze s ním také řešit problémy tepelných nebo proudových toků daným modelem. Používá MKP (metodu konečných prvků), díky které vykreslí například rozložení siločar magnetického pole [28].

3.2 Návrh motorů

Při návrhu motorů jsem čerpal inspiraci z hybridního krokového motoru, který slouží na katodě ZČU/KEV pro výukové účely. Rozměry tohoto motoru byly voleny do návrhu obou modelů, ve kterých se následně upravovaly některé části z důvodu přehlednosti provedení motorů s permanentními magnety a bez nich.



Obr. 22 Stator a rotor krokového motoru KEV/ZČU 2016

3.3 Rozměry motoru

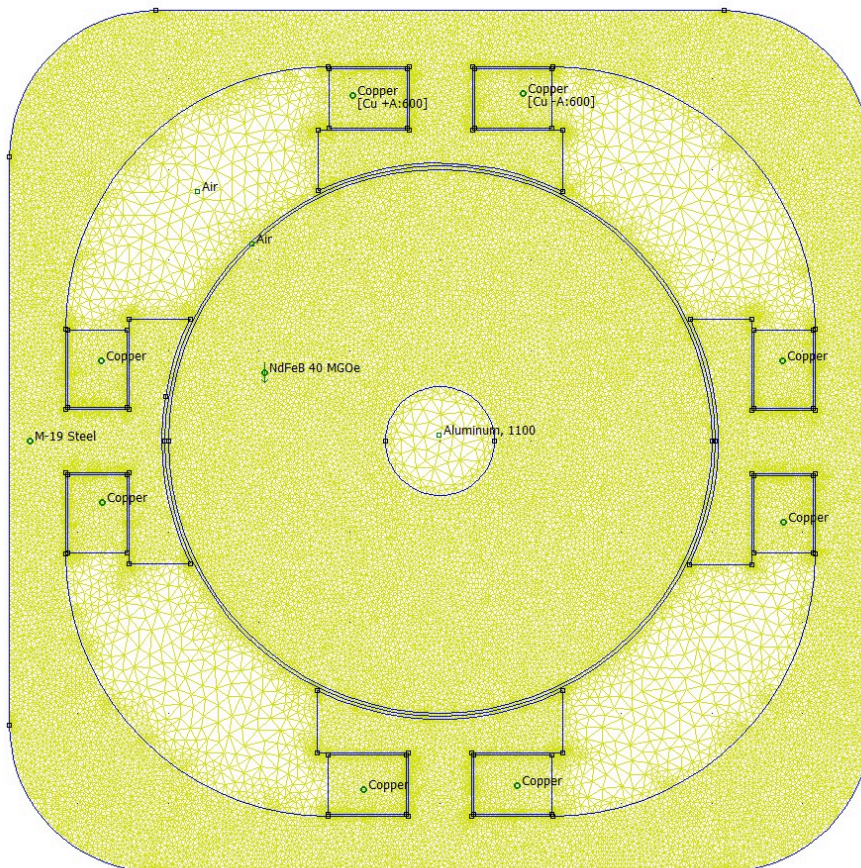
Základní rozměry motoru, které byly použity v obou modelech měly tyto hodnoty.

Hloubka motoru:	21 <i>mm</i>
Poloměr rotoru:	30.5 <i>mm</i>
Poloměr statoru (na vnitřní straně):	31 <i>mm</i>
Vzduchová mezera:	0.5 <i>mm</i>
Šířka hřídele:	6 <i>mm</i>
Počet závitů (cca):	600 z.
Napájecí proud jednoho závitů (zvoleno):	1 <i>A</i>
Šířka pólových nástavců:	25 <i>mm</i>
Výška pólových nástavců:	7 <i>mm</i>

Dále byly modely modifikovány z důvodu přehlednosti a realizace samotné simulace. Vyzkoušeno bylo více typů konstrukcí s různými provedeními zubů.

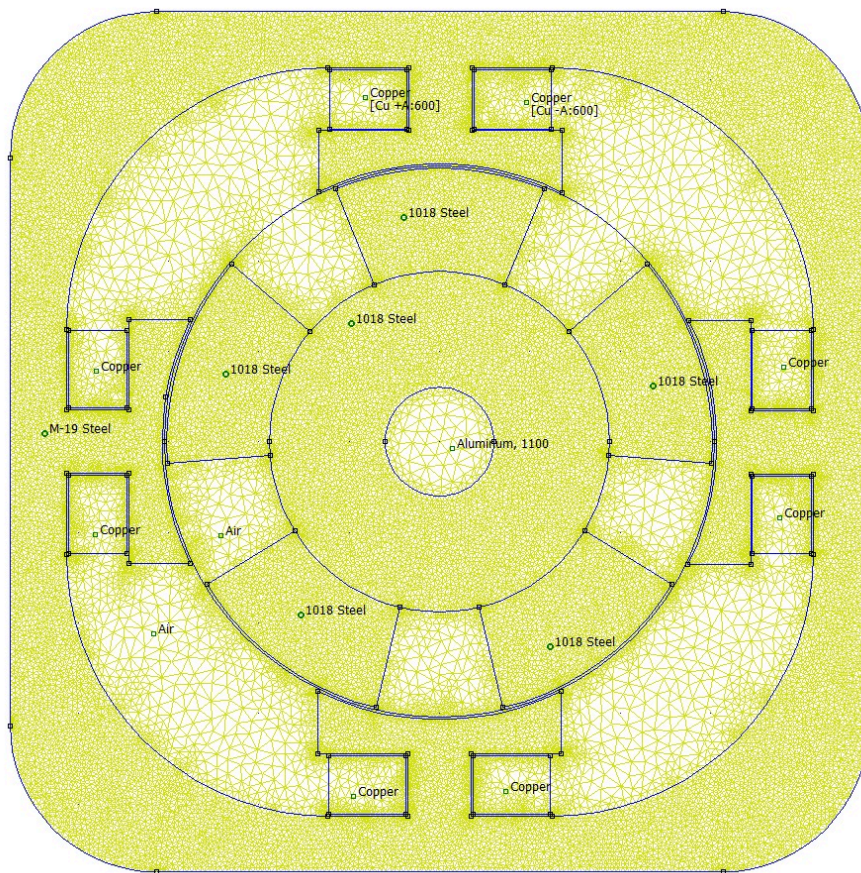
3.4 Realizace simulace

Náčrt obou modelů byl proveden v programu SolidWorks, který dokáže náčrt motoru pohodlně přenést do programu FEMM pro výpočet magnetického pole. Dále byly přímo v programu FEMM definovány body, kterým byl přiřazen materiál. Veškeré použité materiály byly převzaty z knihovny materiálů programu FEMM. Použity byly materiály pro konstrukci statoru, vinutí a rotoru (resp. hřídele). Stator motorů byl konstruován z magnetické oceli M19 (ocel s nízkým obsahem uhlíku s 19% ztrát vířivými proudy) a jeho vinutí z mědi. Rotor motoru s permanentními magnety byl z materiálu neodým – železo – bór (NdFeB) a hřídel stroje byla z hliníku, kvůli uzavření magnetické indukce mimo ní. Model motoru bez permanentních magnetů měl stator totožný, ovšem rotor už neobsahoval materiál neodým – železo – bór, ale pouze magnetickou ocel označenou 1018 - Steel. Tato ocel byla volena s ohledem na její lepší mechanické vlastnosti, mezi které patří její takřka ideální rovnováha mezi pevností a tažností [37]. Z těchto důvodů se mi zdála jako lepší volba pro konstrukci rotoru.



Obr. 23 Síť modelu motoru s permanentním magnetem na rotoru

Sít' motoru je možné vidět na obrázku č. 23, kde sít' odpovídá modelu motoru s permanentním magnetem na rotoru. Modely byly poté vloženy do vzduchu. Statorové konstrukci byla definována podmínka na rozhraní, kde se magnetický potenciál rovná nule. V oblastech konstrukce, kudy procházel magnetický tok modelem, byla sít' zhuštěna pro přesnější výpočet simulace motoru. Takto zhuštěnou sít' je možno pozorovat na obrázcích modelů v rotorové části, pólových nástavcích a statorového paketu.

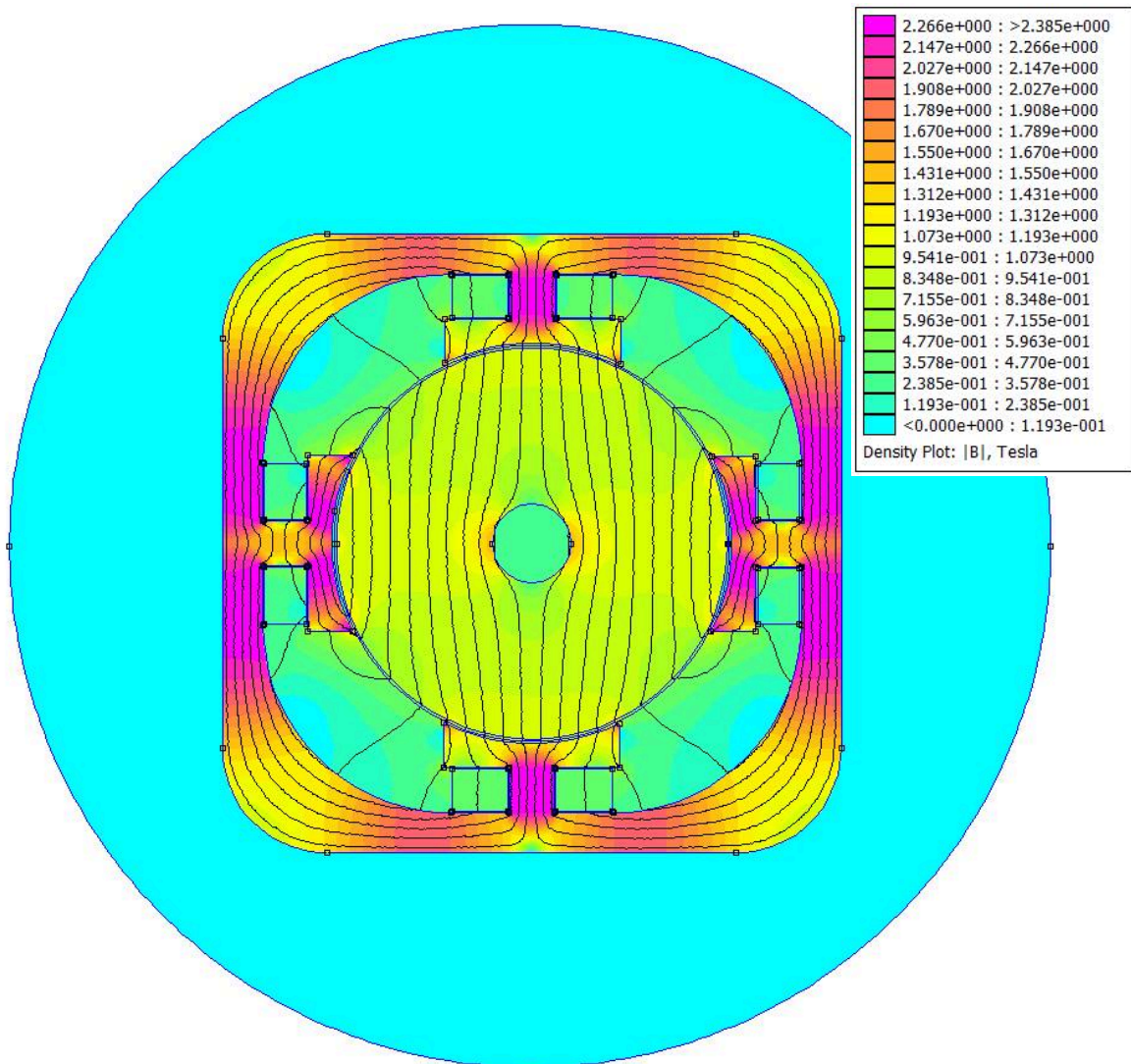


Obr. 24 Sít' modelu motoru reluktančního

Obrázek č. 24 ukazuje stejnou sít' motoru reluktančního. Na obrázcích lze také vidět, že napájen byl vždy jen horní pól statoru. Dále byla vytvořena kružnice, která byla přidána do vzduchové mezery. Na této kružnici byla měřena magnetická indukce B a moment motoru M , k jehož měření byl použit skript pro natáčení rotoru o 360° elektrických.

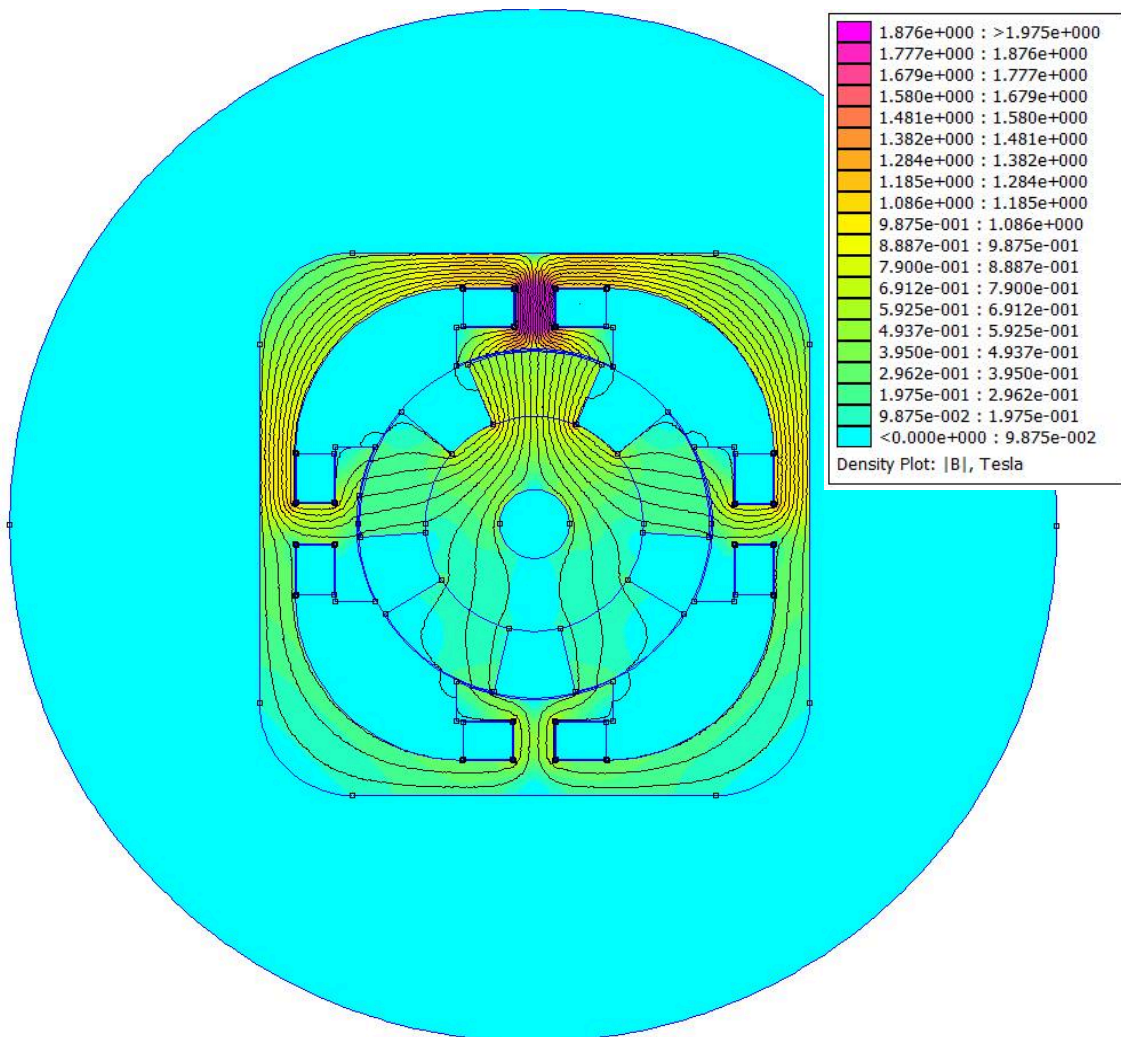
3.5 Vyhodnocení simulace a výstupní hodnoty

Program FEMM zjišťoval změny magnetické indukce, indukovaného napětí a také byl změřen zmíněný moment. Rozložení magnetické indukce a její uzavření v konstrukci motoru zobrazují následující dva obrázky.



Obr. 25 Zobrazení magnetické indukce v konstrukci motoru s permanentními magnety programem FEMM

V konstrukci motoru reluktančního bylo na rotoru voleno pět pólů. Zde jsme vycházeli ze vztahu, který je zmíněn již v první kapitole – vztah č. 1.1, o počtu zubů na straně rotoru N_r a na straně statoru N_s .



Obr. 26 Zobrazení magnetické indukce v konstrukci motoru reluktančního programem FEMM

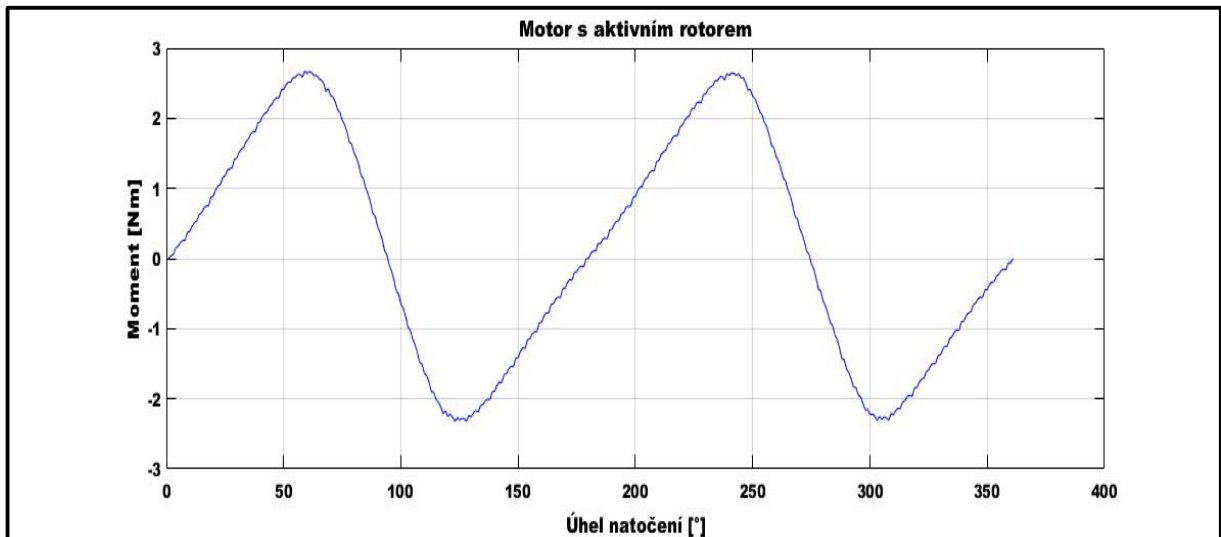
Největší magnetická indukce na obrázku č. 26 je mezi napájeným vinutím. Na obrázku č. 25 se průběh indukce značně liší, což je způsobeno permanentním magnetem na rotoru.

Při měření momentu obou motorů byl postupně natáčen rotor motoru. Během natáčení byl zaznamenáván moment, který byl poté vyneseno do grafu. Natáčení obou motorů probíhalo vždy po 1° elektrickém až do hodnoty 360° elektrických, v přepočtu na stupně mechanické platí následující vztah.

$$\text{Hodnota úhlu: } \alpha_{mech} = \frac{\alpha_{ele}}{p_p} \quad [^\circ] \quad (1.3)$$

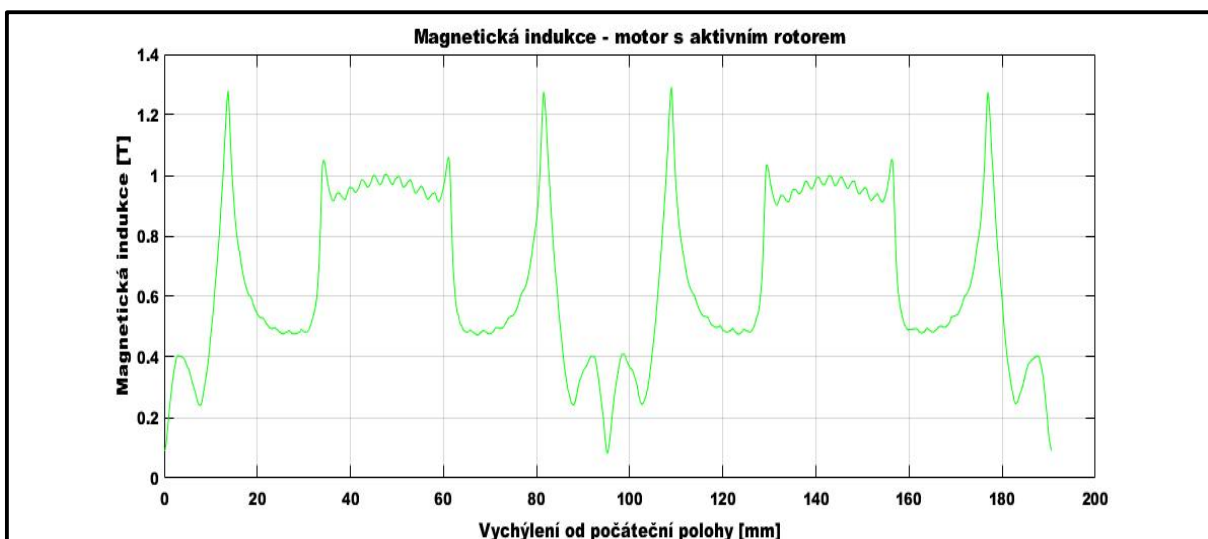
kde p_p je počet pól párů, α_{mech} je mechanický úhel a α_{ele} úhel elektrický.

Zaznamenána v grafech je i magnetická indukce motorů a také její normálová složka. Obrázky magnetického toku v závislosti natočení rotoru nalezneme v přílohách 1. a 2. Při konstrukci všech grafů byl použit výpočetní program Matlab.



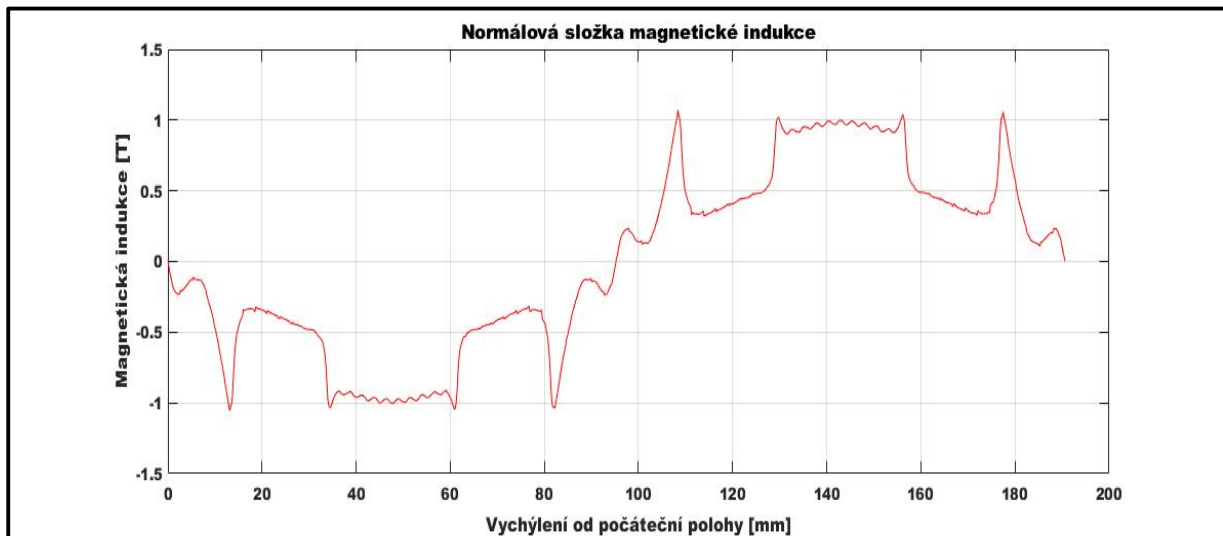
Obr. 27 Průběh Momentu motoru s aktivním rotorem v závislosti na poloze rotoru

Obrázek č. 27 ukazuje moment motoru v závislost na úhlu natočení jeho rotoru. Průběh momentu je zaznamenán ve dvou otáčkách. V nejvyšší hodnotě zde moment dosahuje 2,67 Nm. Tato hodnota odpovídá úhlu natočení rotoru 59° elektrických. Naopak nejnižší hodnota momentu je patrná při úhlu natočení 123° elektrických, kdy je rovna -2,32 Nm. V následující otáčce se moment opakuje. Moment byl vybuzen pouze horním statorovým pólem, který byl napájen. V případě změření momentu pro každý statorový pól bychom mohli odvodit vhodné řízení motoru.



Obr. 28 Průběh Magnetické indukce motoru s aktivním rotorem

Je patrné, že magnetická indukce ve vzduchové mezeře se periodicky střídá, což odpovídá pravidelnému uspořádání rotoru. Špičky magnetické indukce nastávají, pokud se rotor nachází pod statorovým pólem a směr magnetování rotoru je v podélné ose s magnetickým tokem. Popis osy y byl volen s ohledem na zmíněnou přidanou kružnici jako vychýlení. Změřené hodnoty odpovídají obvodu dané kružnice, s definovaným počátečním bodem (polohou) uprostřed levého statorového pólu ve směru hodinových ručiček (směrem k hornímu statorovému pólu).

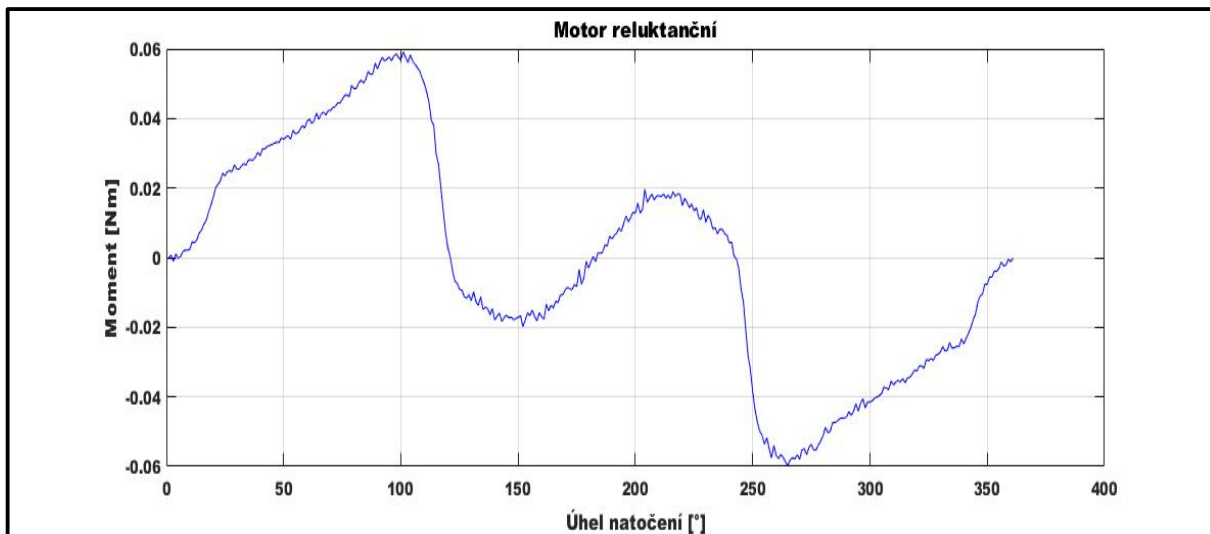


Obr. 29 Průběh Normálové složky magnetické indukce motoru s aktivním rotorem

Normálová složka magnetické indukce, jenž je zobrazena na obrázku č. 29, odpovídá předpokladům. V poloze rotoru pod horním pólem statoru má nejnižší záporné hodnoty neboť směr magnetování byl volen v tomto ohledu kolmo dolů, čili proti ose těchto pólů a tím pádem i proti směru normálové složky magnetické indukce. Naopak pod dolním pólem má hodnotu nejvyšší, protože v tu chvíli je směr magnetování rovnoběžný se směrem toku a tudíž i s normálovou složkou indukce.

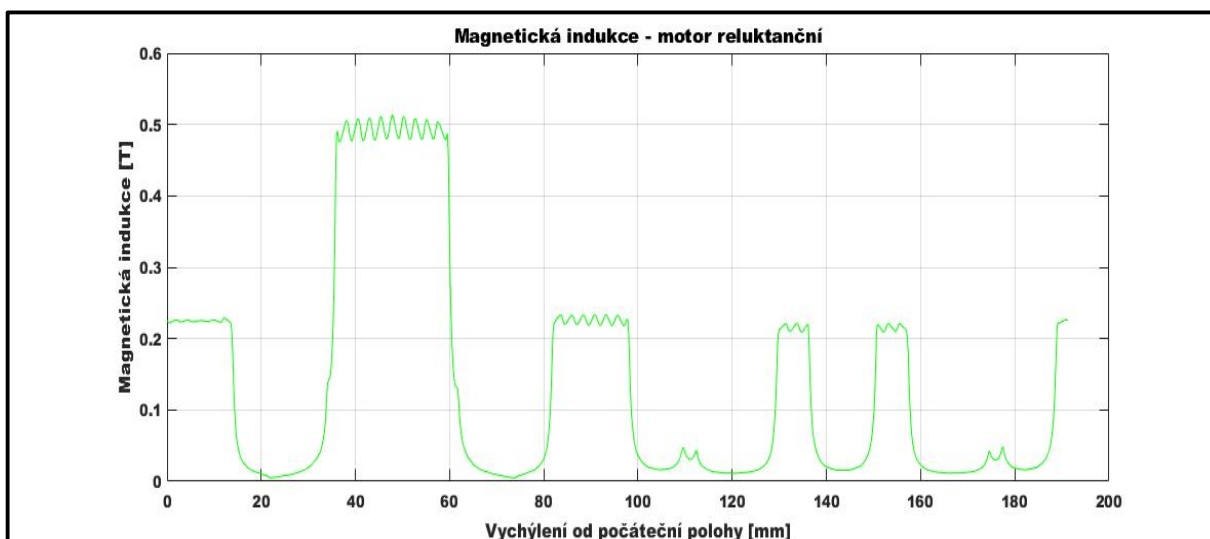
Další tři grafy jsou pro motor reluktanční. Jako první opět obrázek č. 30 – Moment motoru reluktančního stroje. U tohoto motoru byl největší moment změřen v okamžiku, kdy byl pětipólový rotor natočen v poloze 100° elektrických, což odpovídalo natočení z původní polohy o 20° mechanických. V tomto bodu byl moment roven $0,059$ Nm. Nejnižší moment je při rotorovém pootočení 53° mechanických a odpovídá přesně opačné hodnotě kladného momentu $-0,059$ Nm. V porovnání s předchozím modelem zde došlo k značnému

snížení momentu, jelikož rotor není konstruován z permanentních magnetů a nenapomáhá tudíž tak značnou mírou natáčení rotoru a tím pohybu hřídele.



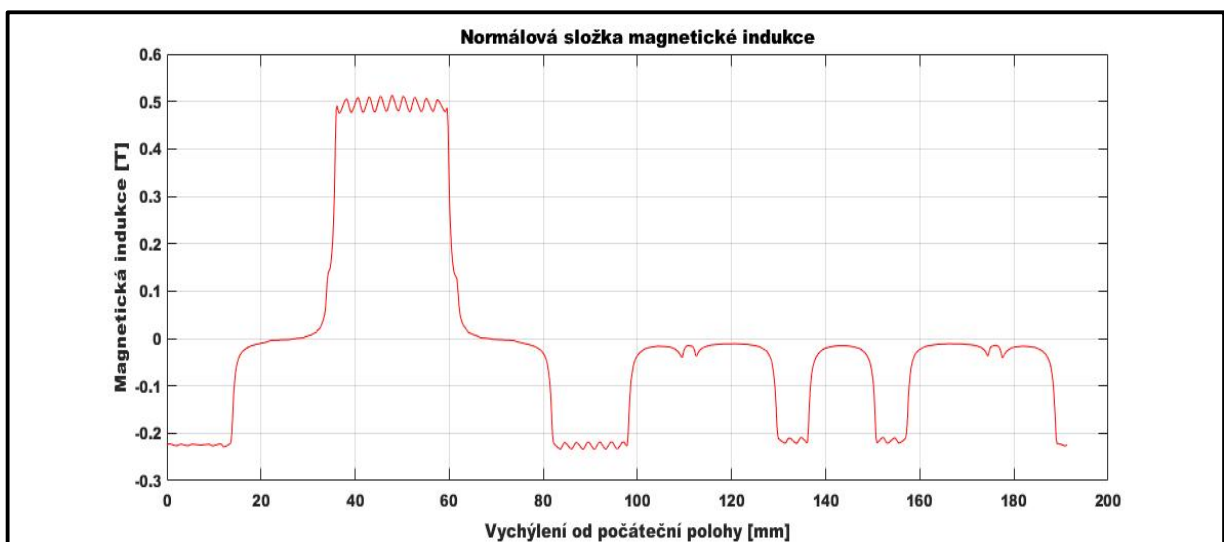
Obr. 30 Průběh Momentu motoru reluktančního v závislosti na poloze rotoru

V grafu magnetické indukce můžeme opět vidět velké změny oproti předchozímu motoru. Nejvyšší indukce zde byla naměřena pod horním pólovým nástavcem statoru, kde veškerý magnetický tok vystupuje z rotoru přes vzduchovou mezeru do statoru. Magnetická indukce poklesla stejně jako moment. Tento předpoklad jsme očekávali, protože v rotorové konstrukci se nachází mezi zuby vzduch. Vzduch tvoří pro magnetický tok větší odpor, a proto se při natáčení rotoru magnetický tok nemůže uzavírat neustále. Z těchto důvodů zde proto klesá indukce a s ní i moment.



Obr. 31 Průběh Magnetické indukce motoru reluktančního

Poslední graf normálové složky magnetické indukce dokládá předchozí tvrzení. Je zde vidět, že s postupným natáčením rotoru pod horní pól stoupne normálová složka magnetické indukce na nejvyšší kladnou hodnotu z důvodu magnetického toku, který teče směrem z rotoru do statoru (přímo ve směru normálové složky magnetické indukce). Nejnižší hodnoty normálové složky magnetického toku jsou pod nástavci na horizontální ose motoru. V těchto pólech se tok, který teče směrem ze statoru, uzavírá přes vzduchovou mezeru do rotoru (tedy proti směru normálové složky), proto si můžeme všimnout dvou symetrických křivek na grafu pro pravý a levý pól. V dolním statorovém pólu je hodnota toku nejnižší. Zde teče zbylý tok, který nevstoupil do rotoru skrz nástavce na horizontální ose, čemuž odpovídá nejužší oblouk v grafu.



Obr. 32 Průběh Normálové složky magnetické indukce motoru reluktančního

4 Závěr

V počáteční kapitole práce je rozebrán základní princip krokových motorů. Při shrnutí tedy platí, že krokový motor spadá do kategorie motorů synchronních z hlediska principu. Jsou zde také zhodnoceny jednotlivé výhody krokových motorů a samozřejmě také jejich nevýhody. Nejsilnější výhodou krokového motoru je digitální řízení bez zpětné vazby a jeho mechanická nepřetížitelnost, naopak nevýhodou je překmit.

Následující kapitola je zaměřena na jednotlivé druhy krokových motorů. Popisuje tři základní druhy krokových motorů kterými jsou: Krokový motor s proměnlivou reluktancí, krokový motor s aktivním rotorem a hybridní krokové motory. Čtvrtým a posledním druhem motoru, který je zde zmíněn je tzv. mikrokrokový motor, který je z konstrukčního hlediska motorem hybridním, ovšem liší se v jeho řízení, které motor donutí dělat “mikrokroky”. Využití krokových motorů nalezneme na samotném konci celé kapitoly, kde je celá řada aplikací, kde byly krokové motory použity. Z této části plyne, že krokové motory jsou velmi dobrou konkurencí servo-pohonů dnešní doby.

Poslední kapitola této práce se zabývá jednotlivými modely motorů. Jedná se o model motoru s aktivním rotorem a model reluktačního motoru s pěti póly na rotoru. Oba modely mají stejný stator a sledujeme u nich změny magnetického toku, indukované napětí a také jejich moment. K návrhu modelů sloužil hybridní motor z katedry KEV/ZČU, který byl modifikován a následně použit v rozměrech obou motorů. Při vyhodnocení výsledků zde byly velké rozdíly v typech motorů. Motor s aktivním rotorem měl výsledky co se týče momentu i magnetické indukce lepší. Motor reluktační oproti tomu vyniká levnější výrobou a z ekonomického hlediska pořízení motoru předčí svého konkurenta. V současnosti se konstruktéři ubírají cestou kombinace obou dvou modelů a nejpoužívanějším modelem tak je krokový motor hybridní.

Seznam literatury a informačních zdrojů

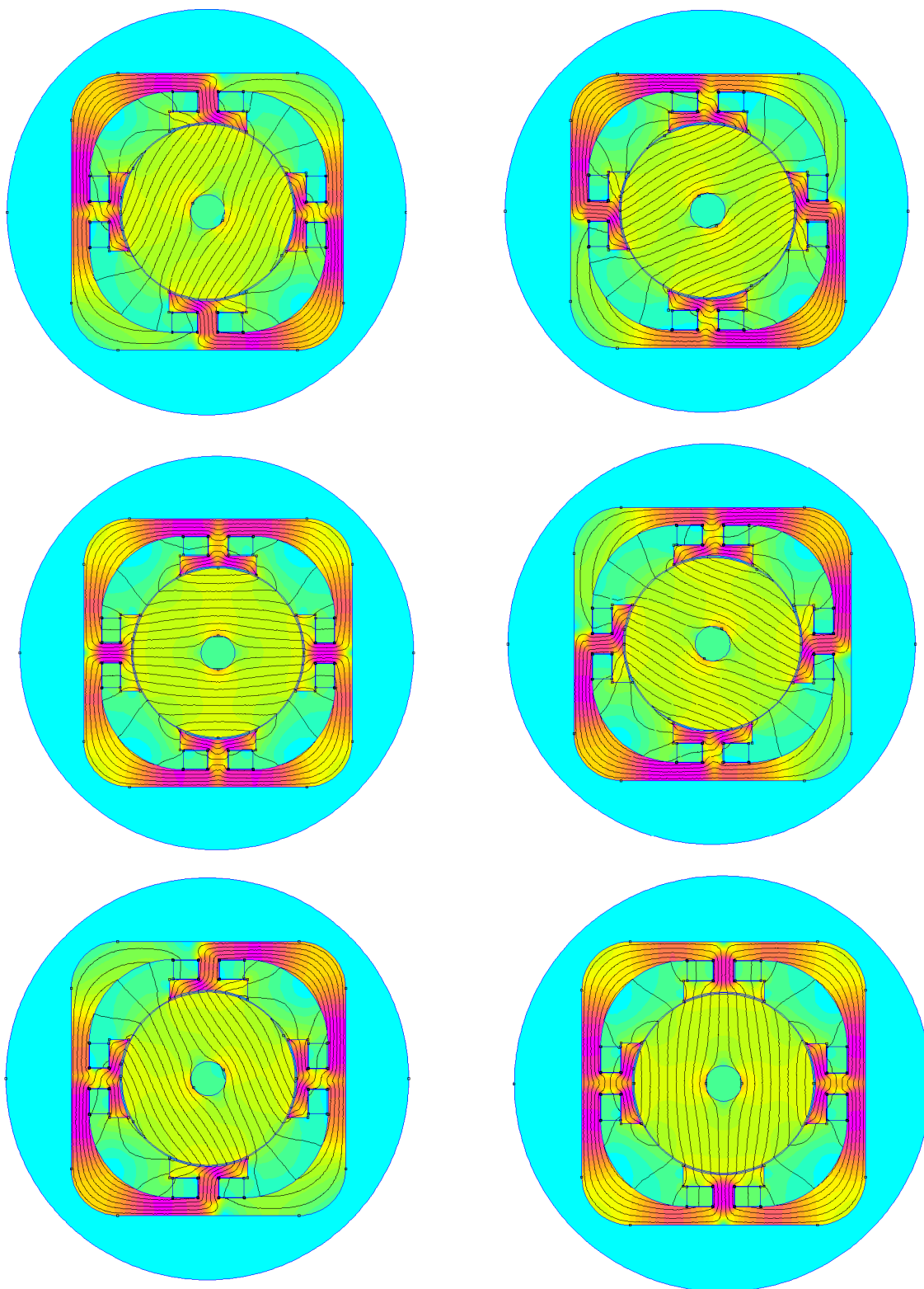
- [1] *Pohonnatechnika. Škola - Motory. Krokový motor* [online]. Pohonnatechnika.cz, ©2007-2016. [Cit. 25.2.2016]. Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/krokovy-motor>
- [2] HRABAVCOVÁ, Valéria. *Moderné elektrické stroje*. 1. vyd. Žilina: EDIS – vydavateľstvo ŽU, 2001. 265 s. ISBN 80-7100-809-5
- [3] NOVÁK, Petr. *Mobilní roboty: pohony, senzory, řízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-730-0141-1.
- [4] *Stepper motor Basics*, Industrial Circuits Application Note
- [5] WIJFFELS, T. *Stepping motors*. Elektor, 1985, č. 4, s. 60-65.
- [6] *Wikipedia. Stepper motor*. [online]. en.wikipedia.org. [Cit. 29.2.2016]. Dostupné z www: http://en.wikipedi.org/wiki/Stepper_motor
- [7] ŘEZÁČ, Kamil. *Krokové motory: princip funkce, metody řízení* [online]. 2002. Dostupné z www: <http://robotika.cz/articles/steppers/cs>
- [8] *Servo-drive. Speciální krokové motory na míru* [online]. Servo-drive.com, [Cit. 12.3.2016]. Dostupné z: [http://www.servo-drive.com/specialni_krokov_e_motory_krokov_e_motory_na_miru.php#Krokové motory se speciální úpravou hřídele](http://www.servo-drive.com/specialni_krokov_e_motory_krokov_e_motory_na_miru.php#Krokové%20motory%20se%20speciální%20úpravou%20hřídele)
- [9] NOVOTNÝ, Ondřej. *Krokové motory*. Plzeň, 2014. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Pavel SVĚTLÍK.
- [10] 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
- [11] UHLÍŘ, Ivan. *Elektrické stroje a pohony*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02482-2.
- [12] *Robodoupe. Krokové motory 1 – typy motorů*. [online]. Robodoupe.cz. [cit 23.4.2016]. Dostupné z www: http://robodoupe.cz/2013/krokov_e_motory-1-typy-motoru/
- [13] PISKAČ, Luděk. *Elektrické pohony: principy a funkce*. 2., upr. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2008. 119 s. ISBN 978-80-7043-688-2.
- [14] Patel, A., Denpiya K. S., Patel A. N., Chetwani S. H. "Novel microstepping technique for disc rotor type stepper motor drive," [online]. IPEC, 2010 Conference Proceedings, Singapore, 2010. [Cit. 24.3.2016]. Dostupné z www: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5696953>

- [15] Reston Condit, Douglas W. Jones, “*Stepping motors fundamentals.*” Microchip Technology Inc, 2004.
- [16] Sheng-Ming Yang, Feng-Chieh Lin, and Ming-Tsung Chen, “*Micro-stepping control of a two-phase linear stepping motor with three-phase VSI inverter for high-speed applications.*” IEEE Transactions on Industrial Applications, Vol. 40, No. 5, pp. 1257-1264, September/October 2004.
- [17] Pizzutelli, A.; Saggini, S.; Ghioni, M.; “*Novel low-cost microstepping driving technique with digital current estimation.*” Twenty second annual IEEE applied power electronics conference, APEC 2007. Page(S): 851-855. Feb 25 2007-March 1 2007.
- [18] *Wikipedia. Krokový motor.* [online]. cs.wikipedia.org. [Cit. 26.3.2016]. Dostupné z www: https://cs.wikipedia.org/wiki/Krokový_motor
- [19] *352lab.vsb.cz Laboratoře. “Návody do cvičení H303.” Sběrnice INTERBUS.* [online]. Jaromír Škuta, ©2005 [Cit. 26.3.2016]. Dostupné z www: <http://352lab.vsb.cz/ServerFinalVer/ParWEB/Interbus.htm>
- [20] *fyzmatik.pise.cz Magnetismus. Curieho teplota aneb jak zrušit magnet.* [online]. FYZMATIK, Copyright ©fyzmatik [Cit. 10.4.2016]. Dostupné z www: <http://fyzmatik.pise.cz/868-curieho-teplota-aneb-jak-zrusit-magnet.html>
- [21] ŠKOFIC, Jan, KOBLAR, David, BOLTEŽAR, Miha. *Permetric Study of Permanent-Magnet Stepper Motor’s Stepping Accuracy Potential.* Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering 60 (2014), pp. 255-264. DOI:10.5545/sv-jme.2013.1526
- [22] *Wikipedia. Stupeň krytí.* [online]. cs.wikipedia.org. [Cit. 13.4.2016]. Dostupné z www: https://cs.wikipedia.org/wiki/Stupeň_krytí
- [23] *Servo-drive. Speciální krokové motory na míru* [online]. Servo-drive.com, [Cit. 13.4.2016]. Dostupné z: [http://www.servo-drive.com/specialni_krokov_e_motory_krokov_e_motory_na_miru.php#Krokové motory chráněné proti prachu a kapalinám - IP65 a IPX7](http://www.servo-drive.com/specialni_krokov_e_motory_krokov_e_motory_na_miru.php#Krokové%20motory%20chráněné%20proti%20prachu%20a%20kapalinám%20-%20IP65%20a%20IPX7)
- [24] *Controlengcesko. Evoluce krokových motorů* [online]. controlengcesko.com, Copyright © 2007-2016 Trade Media International s. r. o. [Cit. 14.4.2016]. Dostupné z: <http://www.controlengcesko.com/hlavni-menu/artykuly/artykul/article/evoluce-krokovych-motoru/>
- [25] *Raveo. Krokové motory, Ezi-SERVO Plus R* [online]. raveo.cz, © RAVEO s.r.o. [Cit. 14.4.2016]. Dostupné z: http://www.raveo.cz/krokov_e_motory-zpetna-vazba-fastech
- [26] *Pslib. Škola, Studijní materiály, motory, Rotační a lineární korokové motory* [online]. pslib.cz, © pslib. [Cit. 15.4.2016]. Dostupné z: https://www.pslib.cz/pe/skola/studijni_materialy/motory/linear/Rota%C4%8Dn%C3%AD%20a%20line%C3%A1rn%C3%AD%20krokov%C3%A9%20motory.doc

- [27] *Wikipedia. Curieova teplota.* [online]. cs.wikipedia.org. [Cit. 15.4.2016].
Dostupné z www: https://cs.wikipedia.org/wiki/Stupeň_krytí
- [28] *FEMM. info.* [online]. David Meeker, Ph.D. [Cit. 21.4.2016].
Dostupné z www: <http://femm.info/wiki/HomePage>
- [29] *Přednáška, předmět EP. ZČU, LS 2016,* Doc. Ing. Karel Zeman, CSc.
- [30] *Přednáška, předmět ES. ZČU, LS 2015,* Doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.
- [31] *Přednáška, předmět MSE. ZČU, LS 2016,* Doc. Ing. Radek Polanský, Ph.D.
- [32] VANÍK, František. *TML - vývoj světlometů.* [online] Elektronika světlometů, Škoda auto. [Cit. 16.5.2016].
Dostupné z www:
http://k616.fd.cvut.cz/full/download/pdp2015/vanik_svetlomety.pdf
- [33] *Wikipedia. Elektromagnet.* [online]. cs.wikipedia.org. [Cit. 25.5.2016].
Dostupné z www: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromagnet>
- [34] *Přednáška, předmět TES. ZČU, ZS 2016,* Doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.
- [35] *Wikipedia. Curieova teplota.* [online]. cs.wikipedia.org. [Cit. 25.5.2016].
Dostupné z www: https://cs.wikipedia.org/wiki/Curieova_teplota
- [36] *eluc. Krokový motor.* [online]. eluc.kr-olomoucky.cz [Cit. 25.5.2016].
Dostupné z www: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/809>
- [37] *Azo Materials. Steel - 1018.* [online]. AZoM.com Copyright 2000-2016 [Cit. 26.5.2016]. Dostupné z www: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6115>
- [38] *Wikipedia. Neodymové magnety.* [online]. cs.wikipedia.org. [Cit. 30.5.2016].
Dostupné z www:
https://cs.wikipedia.org/wiki/Neodymov%C3%BD_magnet#Nev.C3.BDhody_a_rizika

Přílohy

Příloha 1. Natočení rotoru motoru s permanentním magnetem :



Příloha 2. Natočení rotoru motoru reluktančního :

