

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Aplikace s krokovými motory**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2013/2014

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš BEZDĚK**  
Osobní číslo: **E11B0008P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Aplikace s krokovými motory**  
Zadávající 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. Porovnejte princip činnosti klasických KM s mikro KM.
3. Uveďte příklady použití KM.
4. Diskutujte možné použití těchto motorů pro aplikace vyšších výkonů.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Bartoš,V.: Elektrické stroje, ZČU v Plzni, Plzeň 2004
2. Rafajdus,P.,Ličko,M.: Moderné elektrické stroje,ŽU, Žilina 2001
3. Internetove zdroje

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. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



Prof. Ing. Václav Kús, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na druhy a konstrukci krokových motorů, na jejich vlastnosti, jejich použití a metody řízení. Velmi krátce je popsána historie užití těchto motorů až po současné výrobce. Jsou zde uvedeny základní funkční principy krokových motorů. Jedna podkapitola je věnována principu mikrokrokování a porovnání jeho využití oproti klasickým krokovým motorům. Nejzajímavější část bakalářské práce poukazuje na využití krokových motorů v oblasti zdravotnictví, průmyslu a kancelářské techniky. V závěru práce je diskutováno možné použití těchto motorů pro aplikace vyšších výkonů.

## **Klíčová slova**

Krokový motor, stator, rotor, krok, mikrokrokování, statický, moment, rotační, výhody

## **Abstract**

This bachelor work is focused on the types and design of stepper motors, on their properties, their application and methods of controlling. Very briefly is mentioned the history of the use of these motors up to current manufacturers. The basic operating principles of stepper motors are stated. One section of the work is devoted to the principle of microstepping and compare its use with classic stepper motors. The most interesting part of this bachelor's work refers to use of stepper motors in medicine, industry and office equipments. In the end of this work is discussed the possible application of these motors for applications with higher output.

## **Key words**

Stepper motor, stator, rotor, step, microstepping, static, moment, rotation, benefits

## **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 Horušanech dne 18.5.2014

Tomáš Bezděk

## **Poděkování**

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

## Obsah

<b>OBSAH .....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>9</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>10</b>
<b>1 HISTORIE KROKOVÝCH MOTORŮ .....</b>	<b>11</b>
<b>2 DRUHY A KONSTRUKCE KROKOVÝCH MOTORŮ .....</b>	<b>13</b>
2.1 KROKOVÝ MOTOR.....	13
2.2 PRINCIP KROKOVÉHO MOTORU .....	13
2.3 ROZDĚLENÍ KROKOVÝCH MOTORŮ .....	15
2.3.1 <i>Krokový motor s proměnnou reluktancí.....</i>	<i>15</i>
2.3.2 <i>Krokový motor s permanentními magnety .....</i>	<i>17</i>
2.3.3 <i>Krokový motor hybridní.....</i>	<i>19</i>
2.4 MIKROKROKOVÁNÍ.....	20
2.5 PERMANENTNÍ MAGNETY .....	21
<b>3 VLASTNOSTI KROKOVÝCH MOTORŮ .....</b>	<b>24</b>
3.1 STATICKÝ MOMENT KROKOVÉHO MOTORU.....	24
3.2 VÝHODY A NEVÝHODY KROKOVÝCH MOTORŮ .....	25
3.2.1 <i>Výhody .....</i>	<i>25</i>
3.2.2 <i>Nevýhody.....</i>	<i>26</i>
<b>4 METODY ŘÍZENÍ KROKOVÝCH MOTORŮ .....</b>	<b>27</b>
4.1 ŘÍZENÍ KM S PROMĚNNOU RELUKTANCÍ .....	27
4.2 UNIPOLÁRNÍ ŘÍZENÍ KM S PERMANENTNÍMI MAGNETY .....	27
4.3 BIPOLÁRNÍ ŘÍZENÍ KM S PERMANENTNÍMI MAGNETY.....	28
<b>5 PŘÍKLADY POUŽITÍ KM .....</b>	<b>29</b>
5.1 ELEKTRONICKÝ PSACÍ STROJ .....	29
5.2 PEVNÝ DISK.....	31
5.3 ROBOTI VE ZDRAVOTNICTVÍ .....	31
5.4 CNC STROJE .....	32
<b>6 APLIKACE VYŠŠÍCH VÝKONŮ .....</b>	<b>34</b>
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>35</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>36</b>



## Seznam symbolů a zkratk

$m$ .....	Počet fází
$PM$ .....	Permanentní magnet
$KM$ .....	Krokový motor
$M_{sv}$ .....	Statický vazební moment [ $Nm$ ]
$N_r$ .....	Počet zubů rotoru
$N_s$ .....	Počet zubů statoru
$\alpha$ .....	Úhel kroku

## Úvod

Tématem této bakalářské práce je aplikace s krokovými motory. Tyto motory se používají v mnoha aplikacích především pro menší výkony. Setkat se s nimi můžeme například v průmyslu u polohovacích zařízení, v lékařských přístrojích nebo v kancelářské technice. Krokové systémy používají levnější komponenty a jednodušší ovládací prvky oproti servopohonům. Díky těmto vlastnostem jsou nadále konkurenceschopné i na současném trhu. Cílem této bakalářské práce je seznámit se s problematikou a využitím krokových motorů.

Úvod práce se zabývá historií elektrických strojů a především vynálezu krokového motoru. Dále je popsán princip krokového motoru a rozdělení krokových motorů na motory s proměnnou reluktancí, s permanentními magnety a krokové motory hybridní. Také je zde vysvětlena metoda mikrokrokování, která se využívá pro plynulejší pohyb a citlivější ovládní aplikací. Poslední podkapitola této části nás seznamuje s pojmem permanentní magnet a zejména s těmi materiály, které se využívají při výrobě elektrických motorů. Třetí kapitola se zabývá vlastnostmi krokových motorů, uvedeny jsou jejich výhody a nevýhody. Další kapitola je stručně zaměřena na možnosti řízení krokových motorů. Závěr práce je věnován použití krokových motorů v praxi a diskuzi o možném použití těchto motorů pro aplikace vyšších výkonů.

# 1 Historie krokových motorů

Již od 1. poloviny 19. století se díky dostatečnému množství informací a zkušeností s elektromagnetickými jevy začalo využívat těchto principů k výrobě strojů, využívaných pro pohony výrobních strojů, v dopravě a dalších odvětvích. Bylo zapotřebí vymyslet a vyrobit elektrické generátory a motory dostatečných výkonů. To měly zajistit nově vznikající elektrotechnický a energetický průmysl. Vývoj elektrických strojů lze rozdělit do 3 etap. V první etapě se zkoumaly fyzikální principy elektrických točivých strojů. Od roku 1860 do roku 1910 se tyto prvotní stroje o malých výkonech a nízké účinnosti zdokonalovaly. V této etapě vznikaly první generátory a elektromotory. Od třetí etapy tj. od roku 1910 se elektrické stroje staly nezbytným článkem energetického a elektrotechnického průmyslu. [4]

Historie elektrických strojů s proměnlivou reluktancí, ke kterým patří i krokové motory již sahá do 1. poloviny 19. století.

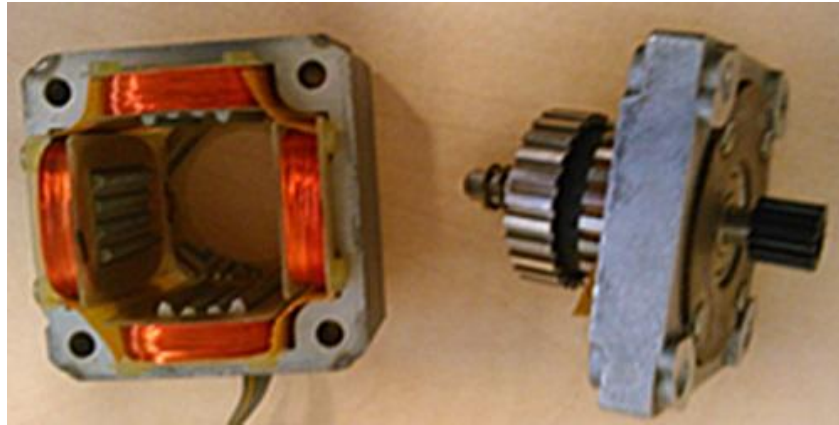
Jejich vývoj pokračoval i ve 20. století. Průmyslové využití krokových motorů nastává po roce 1919, kdy skotský inženýr C. L. Walker patentoval krokový motor s malým úhlem kroku. V roce 1920 představili C. B. Chicken a J. H. Thain sendvičovou strukturu krokového motoru. Moderní krokový motor poprvé popsali v roce 1957 Thomas a Fleischauer. Jednalo se o typ krokového motoru s proměnnou reluktancí, jehož výroba byla zahájena počátkem 60. let v USA. V 60. letech byly zkonstruované první krokové motory s permanentními magnety a také hybridní krokové motory. Mezi první výrobce krokových motorů se řadí japonská firma Sanyo Denki.



Obr. 1 Krokový motor Sanyo Denki [14]

V 70. letech se začaly používat krokové motory v NC obráběcích strojích. Výrobce byla japonská firma Fujitsu Fanuc, která do 80. let 20. století používala krokové motory pro CNC systémy. Tyto krokové motory poté nahradila vysoce výkonnými stejnosměrnými servomotory.

V současné době se mezi výrobce krokových motorů řadí například firma FASTECH, jejíž výrobky se vyznačují vysokou přesností, rychlostí a plynulým chodem. Díky těmto vlastnostem konkurují krokové motory klasickým servomotorům. Dalším světoznámým výrobcem krokových motorů je společnost MAE stepper motors – AMETEK. Kompletní výroba krokových motorů se provádí v České republice v momentovém rozsahu od 8,7 N.cm do 21 N.m. [1][3][10]



Obr. 2 Části krokového motoru

## 2 Druhy a konstrukce krokových motorů

### 2.1 Krokový motor

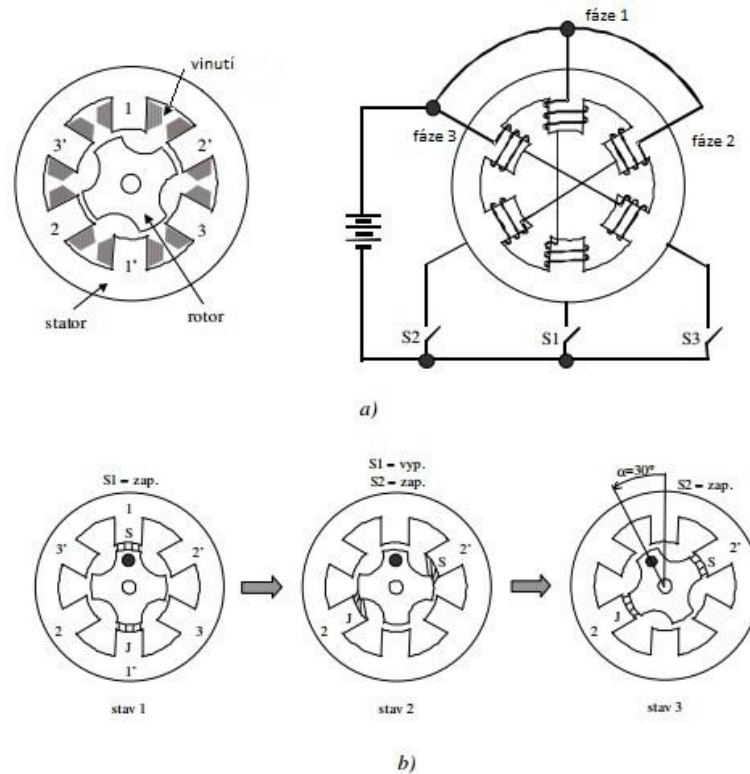
Krokový motor je impulsně napájený motor, který se pohybuje nespojitě po jednotlivých úsecích, tzv. krocích. Krok je mechanická odezva rotoru krokového motoru na jeden řídicí impuls. Rychlost otáčení motoru je dána frekvencí napájecích pulsů. Krokový motor je řízen pomocí elektronického měniče. Tento měnič řídí funkční pohyb a režimy chodu krokového motoru. [3][6]



*Obr. 3 Uložení rotoru ve statoru [15]*

### 2.2 Princip krokového motoru

Krokový motor si v principu lze zjednodušeně představit jako synchronní stroj, ve kterém je místo točivého pole generováno „poskakující“ magnetické pole postupným napájením jednotlivých pólových dvojic stejnosměrným proudem. [5]



Obr. 4 Princip činnosti krokového motoru s proměnnou reluktancí [3]

Princip činnosti krokového motoru je zobrazen na obr. 4. V části a) je znázorněn průřez krokového motoru s proměnnou reluktancí. Na statoru je 6 pólů. Povrch pólu je rozdělený na větší počet zubů. Na rotoru jsou 4 póly (zuby). Podmínkou činnosti krokového motoru je rozdílný počet pólů (zubů) na statoru a na rotoru. Tento počet je dán vztahem

$$N_r = N_s \pm \frac{N_s}{m} \quad (2.1.)$$

kde:

$m$  je počet fází

$N_r$  je počet zubů rotoru

$N_s$  je počet zubů statoru.

Na statoru jsou 3 dvojice cívek. Každá dvojice tvoří jednu fázi. Z toho vyplývá, že stroj na obr. 4 je třífázový.

Část b) na obr. 4 je rozdělena na 3 stavy, kdy ve stavu 1 je vypínač S1 zapnutý a fáze 1 je napájena. Při zapnutí vypínače S2 a současném vypnutí vypínače S1 se nabudí fáze 2 a fáze 1

se odpojí od zdroje. Vytvoří se magnetický tok fáze 2 současně s momentem, kolmém na směr toku, který otočí rotor do nové rovnovážné polohy (stav 3), ve které je magnetický odpor minimální.

Při změně spínacího stavu se rotor pootočí z jedné rovnovážné polohy do druhé rovnovážné polohy o určitý úhel. Tento úhel se nazývá úhel kroku a je dán vztahem

$$\alpha = \frac{360}{m * N_r} [^\circ] \quad (2.2.)$$

kde:

m je počet fází

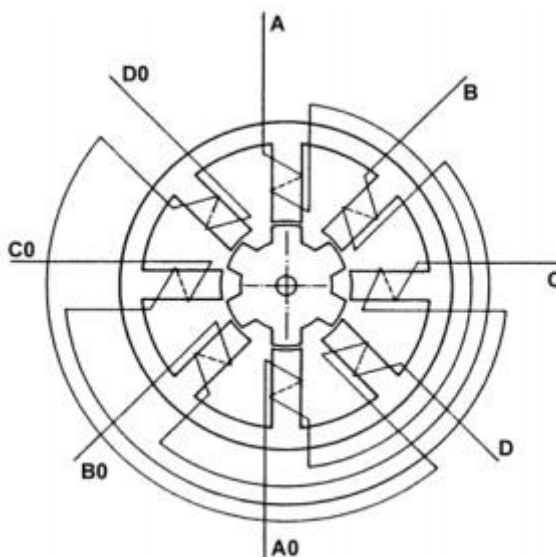
$N_r$  je počet zubů rotoru. [3]

## 2.3 Rozdělení krokových motorů

Krokové motory dělíme podle konstrukčního provedení na rotační a lineární. Vyrábí se s pasivním rotorem z feromagnetického materiálu. Tyto motory označujeme jako motory s proměnnou reluktancí (magnetickým odporem). Rotor může být i aktivní, pokud obsahuje permanentní magnet. Tyto nazýváme jako krokové motory s permanentními magnety. Při sloučení konstrukčních principů obou předcházejících typů vznikají krokové motory hybridní. [5]

### 2.3.1 Krokový motor s proměnnou reluktancí

Krokový motor s proměnnou reluktancí se považuje za základní typ krokového motoru. Stator i rotor krokového motoru s proměnnou reluktancí jsou složeny z plechů s vysokou permeabilitou. Motory mohou být tři a vícefázové. Zjednodušený řez magnetickým obvodem čtyřfázového krokového motoru s pasivním rotorem je uveden na obr. 5. Na statoru je 8 pólů, na kterých jsou navinuty cívky. Každá fáze je tvořena dvojicí cívek navinutých na protilehlých pólech. Fáze jsou označené písmeny A, B, C, D. Rotor je bez vinutí. Na obr. 5 je rotor se 6 póly.

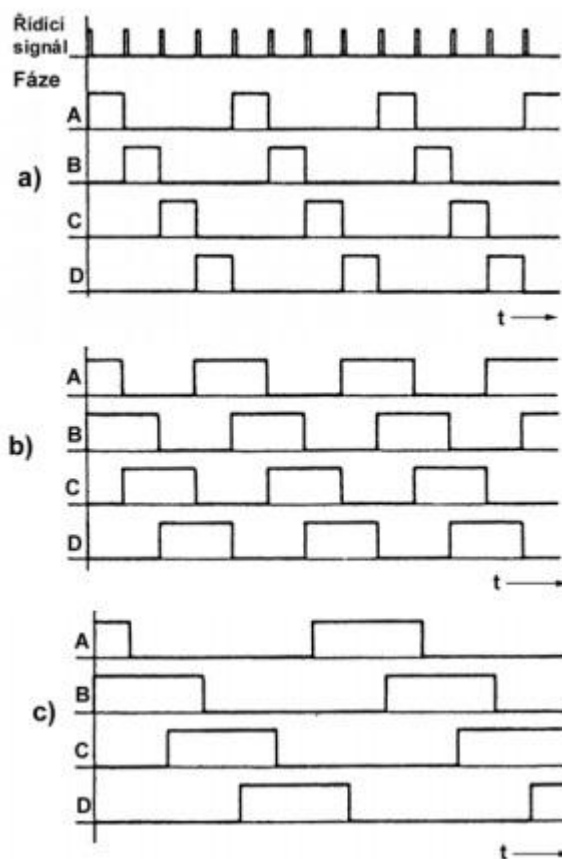


Obr. 5 Magnetický obvod čtyřfázového krokového motoru s proměnnou reluktancí [11]

Činnost tohoto krokového motoru spočívá ve změnách reluktance magnetického obvodu stroje při otáčení rotoru. Po přivedení napětí na cívku B-B0, dojde k natočení rotoru do polohy, ve které je reluktance minimální. Taková poloha se nazývá rovnovážná. Zatížením stroje vnějším momentem, se rotor z této rovnovážné polohy vychýlí o statický úhel zátěže. Ve stroji se vytvoří statický moment, který bude v rovnováze se zátěžovým momentem. Reluktance začne opět narůstat a opačně působící moment vrátí rotor do stabilní polohy. Přivedením napětí na cívku C-C0 po odpojení napájení cívky B-B0 se rotor opět natočí do polohy, kdy bude reluktance minimální. Výsledkem je posunutí motoru o jeden krok. Posunutí o další krok se docílí přivedením napětí na cívku D-D0. Spínáním cívek v opačném pořadí dojde k otáčení motoru na opačnou stranu.

Postupným spínáním fází dosáhne motor otáčivého pohybu. Elektrický měnič krokového motoru spíná fáze tak, aby se rotor pootočil o požadovaný počet kroků. Mezi nejčastější možnosti ovládání spínání fází patří čtyřtaktní spínání jedné fáze, čtyřtaktní spínání po dvou fázích a osmitaktní způsob spínání fází. Časové průběhy buzení čtyřfázového krokového motoru s pasivním rotorem jsou uvedeny na obr. 6. [6][7]

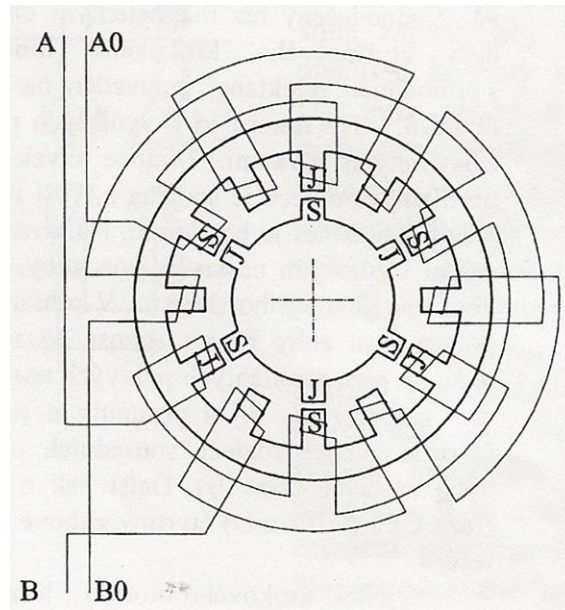




Obr. 6 Časové průběhy buzení čtyřfázového krokového motoru s pasivním rotorem [7]

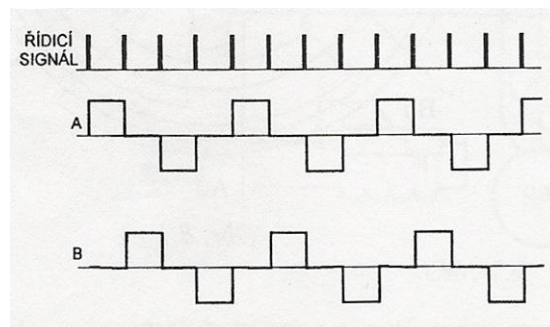
### 2.3.2 Krokový motor s permanentními magnety

Tyto krokové motory jsou také nazývány jako krokové motory s aktivním rotorem. Základní konstrukce tohoto motoru je znázorněna na obr. 7.



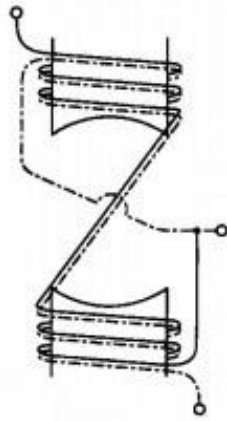
Obr. 7 Konstrukce krokového motoru s PM [7]

Na válcovém rotoru jsou vytvořené permanentními magnety severní a jižní póly. Na rozdíl od KM s proměnnou reluktancí, kde nezáleželo na polaritě pólů statoru, je u KM s aktivním rotorem přesně definovaný počet a polarita jednotlivých pólů. Při spínání fází je třeba měnit polaritu napětí. Spínání fází je naznačeno na obr. 8.



Obr. 8 Postup spínání fází [7]

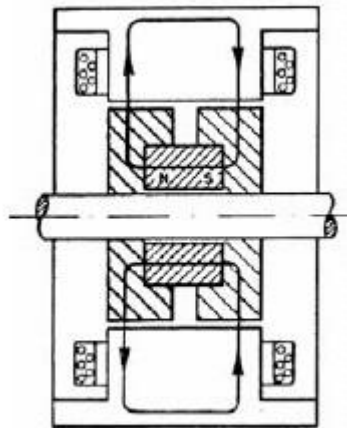
Statorové vinutí je navinuto dvoufázově. Obvykle má krokový motor s PM tzv. bifilární vinutí (obr. 9), které umožňuje změnu magnetické polarity statorového pólu. [6][7]



Obr. 9 Bifilární vinutí [3]

### 2.3.3 Krokový motor hybridní

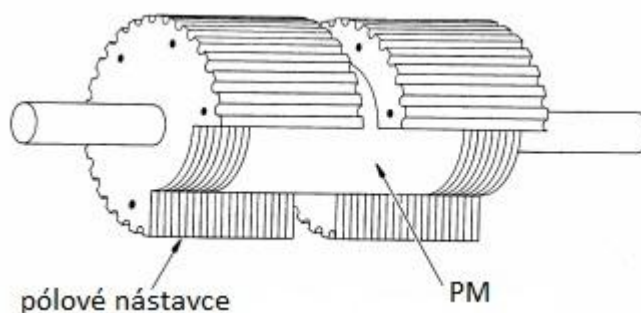
Krokový motor hybridní patří v současné době mezi nejrozšířenější KM. Slučuje konstrukční principy obou předcházejících typů. Na obr. 10 je znázorněna konstrukce hybridního motoru v řezu. Uspořádání statoru hybridního KM je podobné uspořádání statoru KM s proměnnou reluktancí.



Obr. 10 Konstrukce hybridního motoru [9]

Rotor (obr. 11) se skládá z válcového PM magnetizovaného v rovině rovnoběžné

s hřídělí. Na obou koncích magnetu jsou rotorové pólové nástavce, které mají po obvodě zuby vzájemně pootočené o polovinu zubové rozteče. Počty zubů na rotoru a na statoru se liší. Obvykle je počet zubů rotoru větší. Fáze vinutí jsou dle zadaného způsobu řízení buzeny a vzniká statorové magnetické pole. Rotor se nastaví tak, aby se nejbližší zuby sesouhlasily se směrem magnetického pole. [3][9]



Obr. 11 Částečný řez rotoru [3]

## 2.4 Mikrokrokování

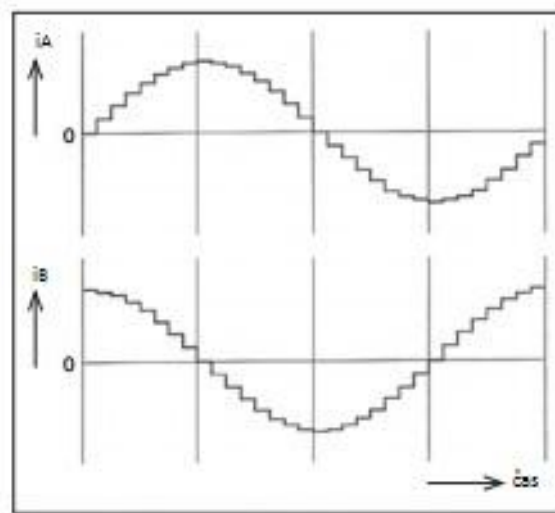
Mikrokrokování je metoda, při které dochází k rozdělení kroku motoru na menší kroky stejné délky tzv. mikrokroky. Nejčastěji se používá u hybridních krokových motorů, které se vyrábějí s kroky  $0,36^\circ$  až  $5^\circ$ . Díky řídicí mikroprocesorové technice je možné krok rozdělit až na 128 mikrokroků.

Pokud bychom měli například hybridní krokový motor s krokem  $1,8^\circ$ , znamená to, že každým krokem se motor posune o  $1,8^\circ$ . V tom případě by na jednu celou otáčku, která je  $360^\circ$ , bude potřebovat 200 kroků.

Pokud nastavíme budič na půlkrok, znamenalo by to, že s každým krokem by se motor posunul o  $0,9^\circ$ . Pak by potřeboval motor k vykonání jedné otáčky 400 kroků.

Při rozdělení kroku na 128 mikrokroků v praxi znamená, že každým krokem se motor posune o  $1,8^\circ / 128 = 0,014^\circ$ .

Při napájení hybridního motoru z dvojfázového sinusového zdroje a za splnění určitých podmínek jako je speciální provedení motoru a jeho ovládání dochází téměř k plynulému otáčení rotoru, což znamená, že se otáčí bez znatelného kroku. Toho nelze dosáhnout ve všech případech a může za to zejména vliv proměnné reluktance a vyšších harmonických u indukovaného napětí. Příklad mikrokrokování je zobrazen na obr. 12, kde je jeden krok rozdělen na 8 mikrokroků.



Obr. 12 Průběh fázových proudů  $i_A$ ,  $i_B$  při mikrokrokování [12]

Mikrokrokování se využívá všude tam, kde je potřeba motor zastavit po velmi malých úsecích, čehož nelze dosáhnout u klasických krokových motorů. Dalším rozdílem oproti klasickým KM je to, že dochází při vykonání kroku k minimálnímu rozkmitání. Mikrokrokový motor je proti klasickému i méně hlučný a to právě z důvodu menšího rozkmitání při vykonání kroku. Mikrokrokové motory se používají také tam, kde je potřeba plynulý a hladký pohyb bez viditelného krokování. [12][13]

## 2.5 Permanentní magnety

Permanentní magnet je předmět vyrobený z materiálu, který je magnetizován a vytváří vlastní magnetické pole. Mezi tyto materiály patří feromagnetika, která se vyznačují nenulovým magnetickým momentem i bez přítomnosti vnějšího magnetického pole. Feromagnetické materiály se dělí podle koercitivní intenzity magnetického pole na magneticky měkké a tvrdé.

Magneticky měkké materiály se vyznačují velkou počáteční i maximální permeabilitou, strmou křivkou prvotní magnetizace, úzkou hysterezní smyčkou, nízkou koercitivitou a malými magnetickými ztrátami. Obecně se používají v obvodech se střídavou magnetizací, kde se vyžaduje snadné zmagnetování a odmagnetování např. u transformátorů. Mezi magneticky měkké materiály patří například železo a jeho slitiny s křemíkem, niklem a kobaltem.

Magneticky tvrdé materiály se těžko magnetují a odmagnetují. Jsou citlivé na tepelné vlivy, mají vysokou koercitivitu a nejsou dlouhodobě stabilní. Tyto materiály se používají jako permanentní magnety a patří mezi ně materiály na bázi vzácných zemin (např. sloučeniny typu Sm-Co, NdFeB), slitiny typu AlNiCo a magneticky tvrdé ferity.

Při výrobě elektrických motorů se nejvíce používají magnety NdFeB. Díky obsahu neodymu, který je málo odolný korozi, se tyto magnety chrání nanášením protikorozních vrstev. V porovnání s materiály AlNiCo mají několik desítek násobně vyšší odolnost proti demagnetizaci, což patří mezi největší výhodu těchto magnetů. Motory vyrobené z NdFeB jsou rychlejší, mají lepší poměr výkon/hmotnost a větší moment na velikost magnetu. Přesto se při výrobě elektrických motorů používají díky nižší ceně také materiály feritové.



*Obr. 13 NdFeB magnet [8]*

Slitiny typu AlNiCo se používají v elektromotorech, akustických měničích, elektroměrech, měřicích přístrojích a dalších zařízeních, ve kterých je potřeba stabilní magnetické pole nezávislé na teplotě a konstrukční prostor umožňuje uložení tohoto typu magnetu. Materiály AlNiCo mají nejvyšší teplotní stabilitu ze všech magnetů a jsou odolné vůči korozi. [2][8]



*Obr. 14 AlNiCo magnet [8]*

### 3 Vlastnosti krokových motorů

Vlastnosti KM jsou dány konstrukcí a způsobem ovládání.

- a) KM s proměnnou reluktancí
  - malý krok  $1^\circ$  až  $5^\circ$
  - provozní momenty jednotky mN.m až N.m
  - konstrukce jednoduchá a levná
  
- b) KM s permanentním magnetem
  - složitější magnetický obvod
  - dražší
  - vyšší otáčky
  - provozní momenty jednotky mN.m až N.m
  - velikost kroku větší než  $15^\circ$  (nejčastěji  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  a  $60^\circ$ )
  - mikrokrokové motory s PM mají velice malý krok, ale je složitější výroba
  - lepší poměr výkon/hmotnost vůči KM s proměnnou reluktancí
  - motor může být zatížen momentem i v nenabuzeném stavu
  
- c) KM hybridní
  - kombinace výhod KM s PM a s proměnnou reluktancí tzn. velmi malý krok a vysoký výkon
  - velikost kroku od  $0,36^\circ$  až  $5^\circ$
  - provozní momenty jednotky mN.m až desítky N.m
  - 2x větší provozní moment než KM s proměnnou reluktancí [3][6]

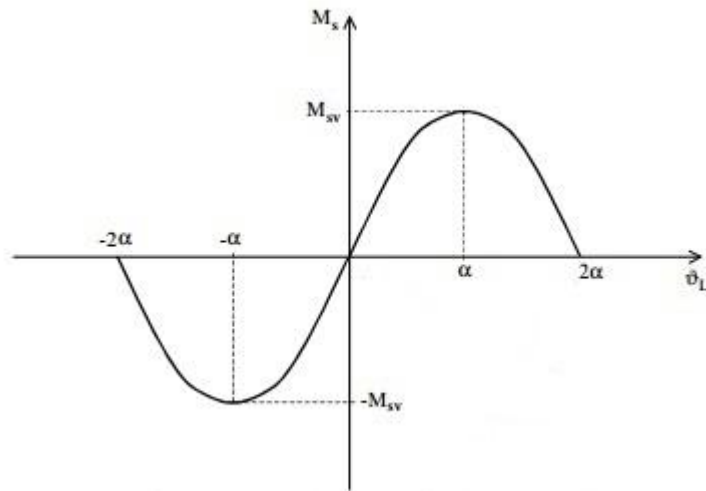
#### 3.1 Statický moment krokového motoru

Velikost statického momentu závisí na poloze rotoru vůči buzené cívice. U motorů s PM je průběh sinusový (obr. 15). U krokových motorů s proměnnou reluktancí je průběh trapézovitý s viditelnými zuby.

Statický vazební moment ( $M_{sv}$ ) je moment, kterým lze působit na hřídel stojícího



nabuzeného KM bez porušení magnetické vazby. Maximální statický moment je dosažen při vychýlení rotoru o velikost kroku  $\alpha$ . [7]



Obr. 15 Momentová charakteristika [3]

## 3.2 Výhody a nevýhody krokových motorů

### 3.2.1 Výhody

- krokové motory jsou kompatibilní s moderním digitálním řízením
- jednoduchá konstrukce
- pracuje v pohonech bez zpětné vazby
- neakumuluje se úhlová chyba
- otáčí se oběma směry
- minimální údržba
- velmi vysoký točivý moment
- velká mechanická odolnost
- dlouhá životnost
- snadné určení a řízení rychlosti KM – rychlost je dána počtem kroků na jednu otáčku vynásobeným počtem napájecích pulsů
- schopnost velkého zrychlení

### 3.2.2 Nevýhody

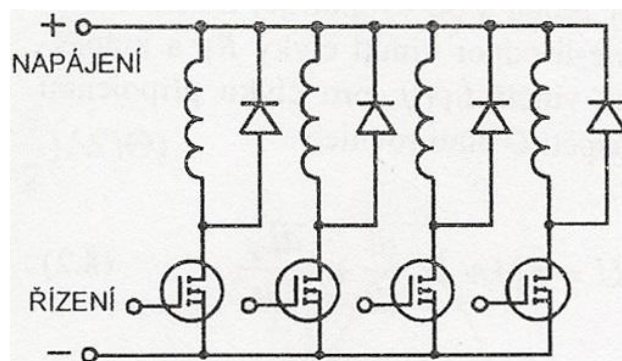
- velký pokles točivého momentu při zvyšování frekvence krokování, tj. při růstu otáček
- horší dynamické vlastnosti, při přechodu z jedné rovnovážné polohy do druhé vznikají tlumené kmity
- značná pravděpodobnost ztráty kroku při momentových přetíženích
- malá hodnota měrného výkonu, KM má při srovnatelném výkonu podstatně větší rozměry a hmotnost než motory stejnosměrné
- vysoká citlivost při přetížení [9][12]

## 4 Metody řízení krokových motorů

Pro jednotlivé typy krokových motorů se používají různé měniče. To, které měniče se použijí, závisí na počtu fází a jejich spojení a na potřebě změny polaroty proudu ve fázích. Nejjednodušší měniče jsou vytvořeny ze spínacích polovodičových součástek. Pro složitější obvody se používají s výkonovými součástkami také řídicí obvody, které generují posloupnosti impulsů pro spínání. [7]

### 4.1 Řízení KM s proměnnou reluktancí

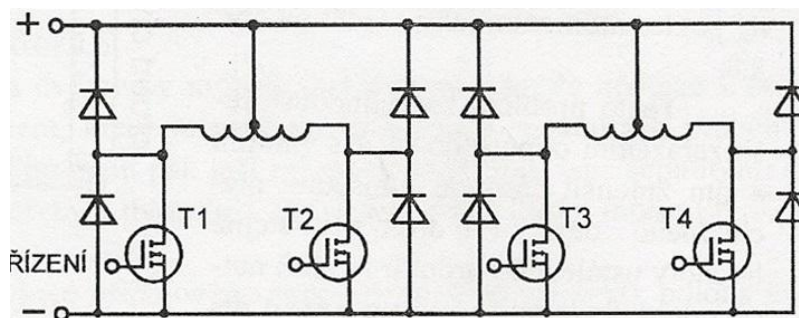
Řízení KM s proměnnou reluktancí je znázorněno na obr. 16, kde je zobrazeno schéma pro 4- fázový motor. Cívky jsou spínány výkonovými tranzistory, které je potřeba chránit proti přepětí paralelně zapojenými diodami, které vedou proud po vypnutí daného tranzistoru.



Obr. 16 Řízení KM s proměnnou reluktancí [7]

### 4.2 Unipolární řízení KM s permanentními magnety

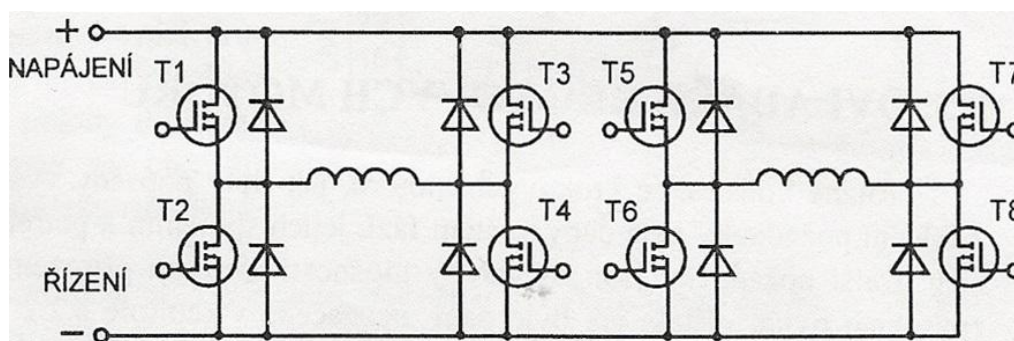
Vinutí pólů statoru u unipolárních motorů tvoří 2 cívky, pro každou polaritu jedna. Cívky jedné fáze jsou jedním koncem spojeny, což je zobrazeno na obr. 17. V obvodu jsou opět použity ochranné diody, které jsou připojeny na oba póly napájení.



Obr. 17 Unipolární řízení KM s permanentními magnety [7]

### 4.3 Bipolární řízení KM s permanentními magnety

Na obr. 18 je zobrazeno zapojení do H- můstku. Změna polarity pólů se provádí změnou směru toku proudu ve vinutí. Aby nedošlo ke zkratu, je potřeba spínat tranzistory např. T5 a T8 nikoliv tranzistory T5 a T6. Pro každou polaritu na jedné cívce jsou 2 tranzistory.



Obr. 18 Bipolární řízení KM s permanentními magnety [7]

## 5 Příklady použití KM

Krokové motory se používají jako pohon strojů nebo přístrojů, u kterých je zapotřebí přesné nastavení polohy jejich pohyblivých částí. S malými krokovými motory se můžeme setkat například v kancelářských zařízeních (PC, tiskárny), projekční technice a v lékařských přístrojích. Krokové motory s vyššími výkony se používají především v průmyslu. Jelikož je oblast použití KM široká, rozhodl jsem v následujících podkapitolách popsat základní principy těch nejzajímavějších zařízení.

### 5.1 Elektronický psací stroj

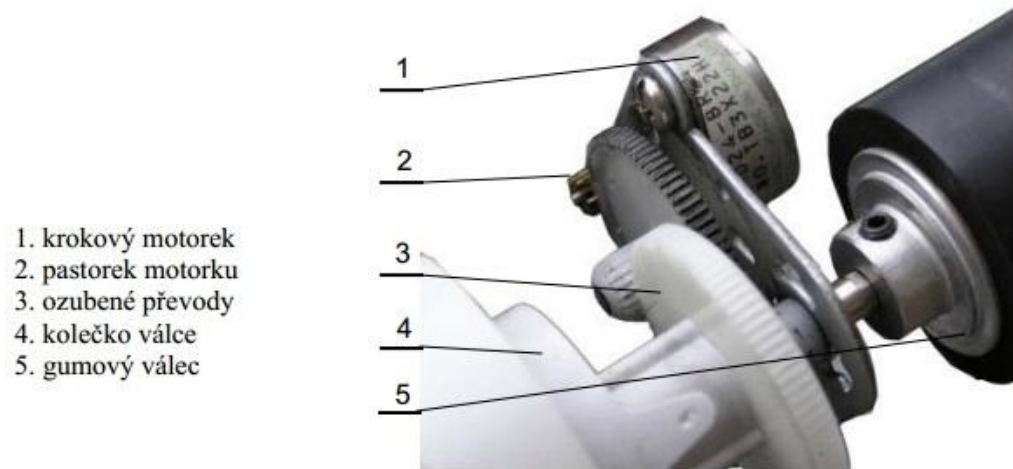
Historie psacího stroje sahá do 2. poloviny 19. století. Nároky na zapisovatele stále rostly, a proto docházelo k jeho zdokonalování. Počátkem 20. století byl vynalezen první elektronický psací stroj Remington. Výhodami elektronických psacích strojů (obr. 19) je v první řadě rychlost záznamu textu, korekce psaného textu v průběhu psaní i po kontrole textu před tiskem, volba typu tisku a mnoho dalších. [17]



*Obr. 19 Elektronický psací stroj*

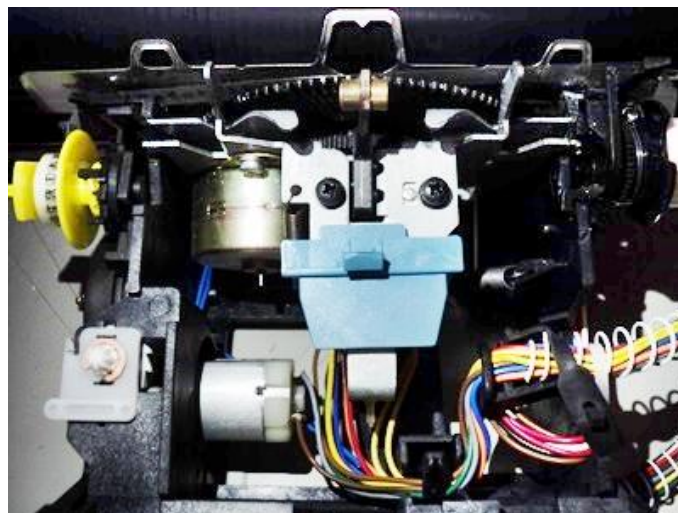
Psací stroj se skládá z několika částí. Ke své činnosti využívá hned několik krokových motorů. Jeden krokový motor se používá k posuvu tiskacího vozu. KM může být umístěn přímo na tiskové jednotce nebo mimo ní. Otáčením KM dochází k pohybu tiskové jednotky

vpravo nebo vlevo. Druhý krokový motor, znázorněný na obr. 20 ovládá posun papíru. Princip posunu papíru spočívá v tom, že KM přes ozubené převody otáčí válcem. [16]



Obr. 20 Pohon válce [16]

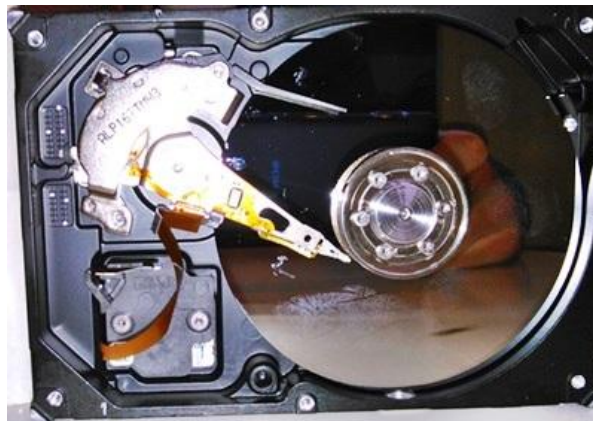
Nejsložitější elektromechanickou částí psacího stroje je tisková jednotka (obr. 21), která má za úkol hned několik činností. Mezi ně patří volba stylu písma, která se provádí pomocí typového kolečka, jehož pohon je opět proveden pomocí malého KM. Posledním pohonem, na který se pro chod psacího stroje využívá krokový motor, je pohon barvicí a korekční pásky a přiklepového mechanismu. Úkolem tohoto KM je posouvat barvicí pásku umístěnou v kazetě a její zdvižení v okamžiku příklepu.



Obr. 21 Tisková jednotka elektronického psacího stroje

## 5.2 Pevný disk

Součástí každého počítače je pevný disk (obr. 22). Ten slouží jako úložiště dat. Skládá se z několika součástí. Mezi nejdůležitější a nejcitlivější součásti uložené uvnitř disk patří diskové plotny a čtecí a zápisové hlavy. Pomocí nich se provádí čtení a zápis dat na magnetickou vrstvu. Tyto hlavy jsou umístěné na jednom společném rameni a jsou poháněny motorem. Ve starších typech se k tomu využívaly krokové motory. Princip spočívá v tom, že se tímto motorem dostane hlava disku nad povrch plotny a dochází ke čtení nebo zápisu dat. Při tom je zapotřebí veliké přesnosti. V současné době se díky zvýšeným požadavkům na přesnost, rychlost zápisu a čtení dat, rozměrům, kapacitě a také životnosti používají místo krokových motorů lineární elektromotory. Ty splňují tyto požadavky a jsou daleko spolehlivější než motory krokové. [18]



Obr. 22 Pevný disk

## 5.3 Roboti ve zdravotnictví

Koncem 90. let 20. století vznikl nový vědní obor robotická chirurgie. Tento obor propojuje práci chirurga s moderními technologiemi. Poprvé byl robotický systém použit v roce 1999 v USA. Těchto systémů bylo vyvinuto hned několik, ale nejvíce se osvědčil robotický systém da Vinci (obr. 23) americké firmy Intuitive Surgical. Tento operační počítačový systém se skládá z ovládací konzole a zařízení se čtyřmi robotickými rameny. Na jednom rameni jsou připevněny kamery, pomocí nichž se sleduje zákrok na obrazovce. Další ramena jsou zakončena pohyblivými klouby, ve kterých se uchycují operační nástroje.

Přesný pohyb těchto nástrojů zajišťují pohony s krokovými motory. Díky tomu je pohyblivost těchto mechanických zápěstí srovnatelná s pohyblivostí lidské ruky. Výhodou použití systému da Vinci je především to, že lze zákrok provádět s větší přesností a spolehlivostí. Hlavní nevýhodou tohoto systému je jeho pořizovací cena, která se pohybuje v řádu desítek milionů korun. [19][20]



Obr. 23 Systém da Vinci [19]

## 5.4 CNC stroje

Číslicově řízené stroje jsou stroje, které jsou řízené programem. Na rozdíl od ručního ovládání obráběcího stroje, kdy přesnost výroby a kvalita výrobku závisí jen na zkušenostech a zručnosti obsluhy, u CNC strojů je technikem sestaven program dle technické dokumentace a tvar obráběného výrobku je vyjádřen číselně v jednotlivých osách. Přesnost výroby u CNC strojů tedy závisí na přesnosti, s kterou je daný obráběcí stroj schopen pracovat. CNC stroje se můžeme rozdělit do dvou skupin podle vykonávané práce. První velkou skupinou jsou stroje pro obrábění, kam patří frézy, soustruhy nebo brusky. Do druhé skupiny CNC strojů patří lisy, ohýbačky nebo svařovací roboti. CNC stroj se skládá ze vstupní části, řídicího systému, odměřovacích zařízení, přizpůsobovacích obvodů a pohonů.

Jako hlavní pohon se nejčastěji používá stejnosměrný motor s tyristorovou regulací. Ten musí umožnit nastavení rychlosti v dostatečně velkém rozsahu a plynulou regulaci. Kromě hlavních pohonů obsahuje CNC stroj řadu vedlejších pohonů. Ty slouží pro nastavování posuvu a ovládání dalších pomocných nástrojů. Jednou z možností jak realizovat posuv, je použití krokového motoru. Ten se při jednom elektrickém impulsu pootočí o 1 krok.



Otáčivý pohyb se převádí na lineární pomocí kuličkových šroubů. Jako příklad uvádím CNC frézu (obr. 24) sloužící k výrobě desek plošných spojů, u které je pohon posuvu do os vyřešen krokovými motory. [21][22][23]



*Obr. 24 CNC fréza [24]*

## 6 Aplikace vyšších výkonů

Posledním úkolem mé bakalářské práce je diskutovat možné využití krokových motorů pro aplikace vyšších výkonů. Krokové motory lze z hlediska jejich výkonu rozdělit do dvou skupin. První skupinou je krokové motory s malými výkony do 50 W. Sem patří kancelářská zařízení a přístroje v lékařství, o kterých jsem psal v předchozí kapitole. Do skupiny s vyššími výkony patří stroje používané v průmyslu. Ty dosahují výkonu nad 50 W, ale například krokové polohovací systémy mohou mít výkon až 750 W. Většina aplikací se však provozuje s výkonem mnohem menším. Krokové motory představují jedinou technologii polohování, která pracuje v otevřené smyčce a to bez zpětné vazby. Díky své jednoduchosti, možnosti miniaturizace rozměrů a poměru cena/výkon konkurují KM servomotorům především v aplikacích s nižšími výkony. Krokové motory pracují dobře při rychlostech pod 900 otáček za minutu. Při vyšších rychlostech dochází k poklesu točivého momentu. Pokud je potřeba dosáhnout velkého momentu při vysokých otáčkách, je variantou použití servomotoru. Avšak díky zdokonalování vlastností materiálů a také konkurenčnímu boji firem, se daří zvyšovat točivý moment krokových motorů a to až o 30% oproti původním KM. Nejpoužívanějším druhem krokových motorů v průmyslových aplikacích jsou KM hybridní, které pracují s nejvyššími výkony. [25][26][27]

## Závěr

Cílem mé bakalářské práce bylo vyhledat a zpracovat informace na téma aplikace s krokovými motory. V první kapitole jsem se seznámil s historií a vývojem elektrických točivých strojů, kam patří i krokové motory. Dostal jsem se od vynálezu prvního krokového motoru až k současným výrobcům. V další kapitole jsem popsal princip krokového motoru, který si lze zjednodušeně představit jako synchronní stroj pohybující se po krocích. Dále jsem provedl rozdělení krokových motorů na tři základní druhy od nejjednoduššího KM s proměnnou reluktancí až po krokový motor hybridní, který spojuje principy a především výhody krokových motorů s proměnnou reluktancí a KM s permanentními magnety. Největší využití v současnosti mají hybridní krokové motory, které najdeme například v tiskárnách, lékařských přístrojích nebo průmyslové automatizaci. Principu mikrokrokování, jež se využívá pro plynulejší pohyb a potlačuje rozkmitání stroje při přechodu z jedné polohy do druhé, je věnována část druhé kapitoly. V závěru této kapitole jsem se zaměřil na permanentní magnety. K výrobě elektrických motorů se používají magneticky tvrdé materiály a to především slitina neodymu, železa a boru NdFeB, která má vysokou odolnost vůči demagnetizaci. Porovnání vlastností jednotlivých konstrukčních typů krokových motorů je věnován začátek třetí kapitoly. V této kapitole také poukazuji na výhody a nevýhody KM. Krokové motory se používají především díky možnosti práce v otevřené smyčce bez zpětné vazby. Jsou jednoduché, mají minimální nároky na údržbu a jsou kompatibilní s moderními digitálními zařízeními. Naopak velkou nevýhodou těchto elektrických točivých strojů je velký pokles točivého momentu při zvyšujících se otáčkách. K řízení chodu krokového motoru slouží elektronický měnič. Podle požadovaného točivého momentu a přesnosti polohování se volí některá z variant řízení KM, jež jsou popsány ve čtvrté kapitole. Nejzajímavější částí mé bakalářské práce bylo seznámení se s využitím krokových motorů v praxi. Díky tomu jsem si uvědomil, že krokové motory využíváme prakticky denně. Setkáváme se s nimi při práci na počítači, při tisku dokumentů, ale i v lékařství. Výkonnější stroje se používají hlavně v průmyslu. V současné době se krokové motory díky novým hybridním technologiím stále zdokonalují a dokážou tak držet krok s neustále se zvyšujícími nároky uživatelů.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ATHANI, V. V. *Stepper motors: fundamentals, applications and design*. Reprint. New Delhi: New Age International (P) Ltd., Publishers, 2008. ISBN 81-224-1006-5.
- [2] BARTOŠ, Václav. *Elektrické stroje*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. 140 s. ISBN 80-7043-444-9
- [3] HRABOVCOVÁ, Valéria, JANOUŠEK, Ladislav, LIČKO, Miroslav, RAFAJDUS, Pavol. *Moderné elektrické stroje*. 1. vyd. Žilina: Žilinská univerzita, 2001. 265 s. ISBN 80-7100-809-5.
- [4] MAYER, Daniel. *Pohledy do minulosti elektrotechniky*. 2. vyd. České Budějovice: KOPP, 2004. 427 s. ISBN 80-7232-219-2
- [5] SKALICKÝ, Jiří. *Elektrické servopohony*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1999. ISBN 80-214-1484-7.
- [6] UHLÍŘ, Ivan a kol. *Elektrotechnika*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1992. 283 s.
- [7] UHLÍŘ, Ivan a kol. *Elektrické stroje a pohony*. Praha: České vysoké učení technické, 2002. ISBN 80-01-02482-2
- [8] *Enes Magnesy*. [online]. [cit. 23. února 2014]. Dostupné z: <http://www.magnety-magnety.com>
- [9] *Princip - Krokový motor*. [online]. [cit. 1. prosince 2013]. Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/krokovy-motor>
- [10] *Raveo*. [online]. [cit. 17. února 2014]. Dostupné z: <http://raveo.cz/dodavatele>
- [11] RYDLO, Pavel. *Krokové motory a jejich řízení*. [online]. Liberec: Technická univerzita, 2000. [cit. 1. prosince 2013]. Dostupné z: <http://www.mti.tul.cz/files/ats/krok2.pdf>
- [12] SINGULE, Vladislav. *Vlastnosti a použití mikromotorů*. [online]. Brno: Fakulta strojního inženýrství VUT, 2008. [cit. 1. prosince 2013]. Dostupné z: [http://www.uzimex.cz/soubory/20080327\\_au\\_2008-03.pdf](http://www.uzimex.cz/soubory/20080327_au_2008-03.pdf)
- [13] *Speciální krokové motory na míru*. [online]. [cit. 1. prosince 2013]. Dostupné z: [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)
- [14] *Technik Brno*. [online]. [cit. 17. února 2014]. Dostupné z: [http://www.technikbrno.cz/index.php?option=com\\_virtuemart&view=productdetails&virtuemart\\_product\\_id=146&virtuemart\\_category\\_id=9](http://www.technikbrno.cz/index.php?option=com_virtuemart&view=productdetails&virtuemart_product_id=146&virtuemart_category_id=9)

- [15] *LMS Software*. [online]. [cit. 26. února 2014]. Dostupné z: <http://www.mylms.cz/text-krokovy-motor-princip/>
- [16] *Elektronický psací stroj*. [online]. [cit. 15. března 2014]. Dostupné z: <http://boucpe.wz.cz/me4a/eps.pdf>
- [17] *Psací stroj*. [online]. [cit. 15. března 2014]. Dostupné z: <http://www.quido.cz/objevy/psaci.htm>
- [18] SADÍLKOVÁ, Markéta. *Jak funguje pevný disk?* [online]. [cit. 16. března 2014]. Dostupné z: <http://notebook.cz/clanky/technologie/2007/HDD-technologie>
- [19] PETER, Roman. *Robotický systém da Vinci*. [online]. [cit. 17. března 2014]. Dostupné z: <http://inovace.cz/novinky/752-roboticky-system-da-vinci>
- [20] VEVERKOVÁ, Lenka. „*State of art*“ *robotické chirurgie*. [online]. [cit. 17. března 2014]. Dostupné z: [file:///C:/Users/Uzivatel/Downloads/Solen\\_end-201001-0006.pdf](file:///C:/Users/Uzivatel/Downloads/Solen_end-201001-0006.pdf)
- [21] POLÁŠEK, Jaromír. *Číslicově řízené stroje*. [online]. [cit. 21. března 2014]. Dostupné z: [http://moodle2.voskop.eu/download/teu/U31\\_Cislicove\\_rizene\\_stroje.pdf](http://moodle2.voskop.eu/download/teu/U31_Cislicove_rizene_stroje.pdf)
- [22] KRONUS, Petr. *Učební text pro programování CNC strojů - soustružení*. [online]. [cit. 21. března 2014]. Dostupné z: <file:///C:/Users/Uzivatel/Downloads/soustruzeni-2-rocnik.pdf>
- [23] STAVINOHA, Zdeněk. *Pohony NC strojů*. [online]. [cit. 21. března 2014]. Dostupné z: <http://coptel.coptkm.cz/index.php?action=2&doc=27921&instance=2>
- [24] *P2J Technology*. [online]. [cit. 21. března 2014]. Dostupné z: <http://www.vyroba-dps.cz/www-vyroba-dps-cz/eshop/11-1-CNC-frezky-DPS/0/5/193-CNC-freza-DPS-LaboFlex-HF>
- [25] MARTINEK, Radislav. *Krokové motory s ovladači*. [online]. [cit. 23. března 2014]. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=31366](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=31366)
- [26] *Evoluce krokových motorů*. [online]. [cit. 23. března 2014]. Dostupné z: <http://www.controlengcesko.com/hlavni-menu/artykuly/artykul/article/evoluce-krokovych-motoru/>
- [27] *Systémy na bázi krokových motorů zůstávají konkurenceschopné*. [online]. [cit. 23. března 2014]. Dostupné z: <http://www.controlengcesko.com/hlavni-menu/artykuly/artykul/article/systemy-na-bazi-krokovych-motoru-zustavaji-konkurenceschopne/>