

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Funkce a řízení krokových motorů

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Lukáš PETÝREK**

Osobní číslo: **E15B0082P**

Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**

Název tématu: **Funkce a řízení 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. Vysvětlete princip činnosti krokového motoru.
2. Popište motory reluktanční, s PM a hybridní.
3. Porovnejte způsoby řízení krokových motorů.
4. Vyhledejte nejnovější typy a aplikace krokových motorů.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. BARTOŠ, Václav: Elektrické stroje, Plzeň, Vydavatelství ZČU v Plzni, 1995, ISBN 80-7082-221-X.
2. BARTOŠ, Václav, ČERVENÝ, Josef, HRUŠKA, Josef, KOTLANOVÁ, Anna, SKALA, Bohumil: Elektrické stroje, Plzeň, Vydavatelství ZČU v Plzni, 2006, ISBN 80-043-444-9.
3. HRABOVCOVÁ, Valéria, JANOUŠEK, Ladislav, RAFAJDUS, Pavel, LIČKO, Miroslav: Moderné elektrické stroje, Žilina, Vydavatelství Žilinské univerzity v Žilině, 2001, ISBN 80-7100-809-5.
4. www.pohonnatechnika.cz.
5. www.nmbtc.com/step/motors/engineering.

Vedoucí bakalářské práce:

Doc. Ing. Anna Kotlanová, CSc.


Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: 10. října 2017

Termín odevzdání bakalářské práce: 7. června 2018


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na krokové motory. Nejprve je vysvětlen princip krokového motoru a poté je provedeno rozdělení krokových motorů na základní druhy. U každého druhu je uveden jeho princip, konstrukce a parametry. Dále práce popisuje jednotlivé druhy řízení krokových motorů, které jsou vysvětleny a následně porovnány. Závěr práce je věnován použití krokových motorů v praxi.

Klíčová slova

Krokové motory, krokové motory s proměnlivou reluktancí, hybridní krokové motory, krokové motory s permanentními magnety, lineární krokové motory

Abstract

Submitted bachelor's thesis presents the stepper motors. At first principle of the stepper motor is explained and then a division of the stepper motor into basic types is presented. For each type its principle, construction and parameters of the machine are given. The thesis also describes individual types of stepper motors control, which are explained and then compared. The conclusion of the thesis is devoted to the practice use of the stepper motors.

Key words

Stepper motors, variable reluctance stepper motors, hybrid stepper motors, permanent magnet stepper motors, linear stepper motors

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 1.6.2018

Lukáš Petýrek

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Anně Kotlanové, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 KROKOVÝ MOTOR	11
1.1 HISTORIE KROKOVÉHO MOTORU	11
1.2 VYSVĚTLENÍ ZÁKLADNÍCH POJMŮ	12
1.3 PRINCIP ČINNOSTI	13
1.4 CHARAKTERISTIKY KROKOVÉHO MOTORU	15
1.4.1 <i>Statické charakteristiky krokového motoru</i>	15
1.4.2 <i>Dynamické charakteristiky krokového motoru</i>	16
2 DRUHY KROKOVÝCH MOTORŮ	17
2.1 MOTORY S PROMĚNLIVOU RELUKTANCÍ	18
2.1.1 <i>Vícesvazkové typy krokových motorů s proměnlivou reluktancí</i>	19
2.2 MOTORY S PERMANENTNÍMI MAGNETY	21
2.3 HYBRIDNÍ KROKOVÉ MOTORY	23
2.4 LINEÁRNÍ KROKOVÉ MOTORY	25
2.4.1 <i>Lineární krokové motory s proměnnou reluktancí</i>	26
2.4.2 <i>Hybridní lineární krokové motory</i>	27
3 ŘÍZENÍ KROKOVÝCH MOTORŮ	27
3.1 TYPY VINUTÍ KROKOVÝCH MOTORŮ	27
3.2 PROUD VE FÁZI KROKOVÉHO MOTORU	30
3.3 ŘÍZENÍ KROKOVÉHO MOTORU V OTEVŘENÉ SMYČCE	32
3.4 ŘÍZENÍ KROKOVÉHO MOTORU V UZAVŘENÉ SMYČCE	33
3.5 DRUHY ŘÍZENÍ KROKOVÝCH MOTORŮ	34
3.5.1 <i>Jednofázové řízení</i>	34
3.5.2 <i>Dvoufázové řízení</i>	35
3.5.3 <i>Řežim řízení s polovičním krokem</i>	36
3.5.4 <i>Řízení třífázových a pětifázových hybridních krokových motorů</i>	37
3.5.5 <i>Mikrokrokový režim</i>	37
3.5.6 <i>Unipolární řízení</i>	39
3.5.7 <i>Bipolární řízení</i>	39
3.6 POROVNÁNÍ ZPŮSOBŮ ŘÍZENÍ	40
3.6.1 <i>Porovnání jednofázové a dvoufázového řízení</i>	40
3.6.2 <i>Porovnání bipolárního a unipolárního řízení</i>	40
3.6.3 <i>Porovnání řízení s plným a polovičním krokem</i>	40
3.6.4 <i>Porovnání řízení krokového motoru v otevřené a uzavřené smyčce</i>	41
4 NEJNOVĚJŠÍ APLIKACE KROKOVÝCH MOTORŮ	42
4.1 NEJNOVĚJŠÍ TYPY KROKOVÝCH MOTORŮ	43
ZÁVĚR	44
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	45

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na krokové motory, jejich princip činnosti, rozdělení s popisem jejich funkce a možné způsoby řízení. Práce se dále zabývá nejnovějšími typy krokových motorů a jejich využití v praxi.

Text bakalářské práce je rozdělen do čtyř částí. První část je věnovaná historickému vývoji krokového motoru, dále principu činnosti a základním momentovým charakteristikám stroje. Ve druhé části najdeme základní rozdělení krokových motorů, kde u každého druhu je uveden jejich princip činnosti a parametry. Ve třetí části je uvedeno řízení krokových motorů a celkové porovnání způsobů řízení. V poslední části je uvedena aplikace krokových motorů a nejnovější druhy motorů.

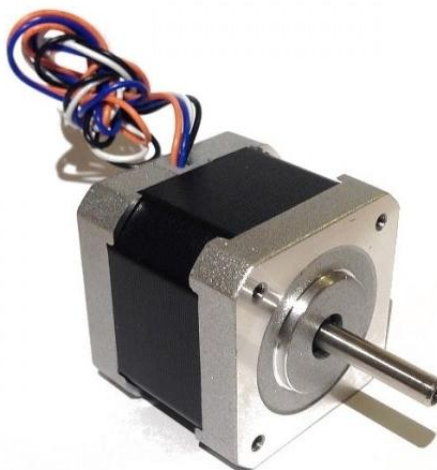
Seznam symbolů a zkratek

α	Velikost kroku
f_r	Řídicí frekvence
f_k	Frekvence kroku
f_{am}	Rozběhová frekvence
f_{bm}	Mezní provozní frekvence
M_S	Statický moment
M_{SV}	Statický vazební moment
M_{am}	Mezní rozběhový moment
M_{bm}	Mezní provozní moment
β	Statický úhel zátěže
S1, S2, S3	Spínače napájecí soustavy
N_r	Počet zubů na rotoru
N_s	Počet zubů na statoru
m	Počet fází statoru
p	Počet pólů na rotoru
L	Vlastní indukčnost
R	Elektrický odpor
τ	Časová konstanta
I_{b1}	Proud bez Zenerové diody
I_{b2}	Proud se Zenerovou diodou
M_A	Moment fáze A u řízení krokového motoru s mikrokrokováním
M_B	Moment fáze B u řízení krokového motoru s mikrokrokováním
k_T	Konstanta momentu motoru
θ	Poloha rotoru uvedená v elektrických stupních

1 Krokový motor

Jedná se o konstrukčně jednoduchý točivý stroj, který je speciálním druhem synchronního motoru. Krokový motor se liší od synchronního stroje hlavně napájením. Krokový motor je napájen pomocí řídicích napěťových impulsů stejnosměrného proudu, zatímco synchronní stroj je napájen třemi fázemi střídavého proudu.

Pohyb rotoru je po tzv. krocích. Poloha rotoru může být řízena pouze v násobcích kroku a to tak, že postupně napájíme jednotlivé pólové dvojice cívek ve statoru. K rozpořívování motoru je nutná řídicí elektronika, která umožňuje ovládat směr a rychlost otáčení. Při nízké rychlosti krokového motoru nedochází k plynulému pohybu.



Obr. 1-1 Krokový motor

1.1 Historie krokového motoru

Vývoj reluktančních strojů, kam patří i krokový motor sahá již od první poloviny 19. století, kde byly první snahy o jeho využití. V osmdesátých letech 19. století vývoj přešel na jiné motory, které byly na střídavý proud. Vývoj dále pokračoval a po roce 1919 C. L. Walker požádal o přidělení patentu na krokový motor s malým úhlem kroku. Rok poté C. B. Chickenom a J. H. Thainom uvedli sendvičovou strukturu krokového motoru. První konstrukce hybridních krokových motorů a motorů s permanentními magnety byly uvedeny v šedesátých letech a našly využití v počítačové technice. V sedmdesátých letech se začaly motory využívat i v CNC obráběcích strojích. Velký vliv na vývoj krokových motorů měla polovodičová technika. Motory reluktančního typu jsou impulsně napájené a soustředí se na řízení polohy. [1]

1.2 Vysvětlení základních pojmů

Krok

Je mechanická odezva rotoru krokového motoru na jeden řídicí impuls. Pootočení rotoru z magneticky klidové polohy do nejbližší magneticky klidové polohy. [1]

Velikost kroku α (°)

Je úhel, při kterém dojde k pootočení rotoru o jeden krok, kdy motor není zatížený. Velikost je dána konstrukcí motoru a způsobem ovládání. [1]

$$\alpha = \frac{360}{m \cdot N_r} \text{ (°)} \quad (1)$$

kde m je počet fází krokového motoru a N_r je počet zubů rotoru.

Řídicí frekvence f_r (Hz)

Frekvence řídicího signálu. [1]

Magnetická klidová poloha

Je to poloha, ve které se vyskytuje rotor nabuzeného krokového motoru, když je statický úhel zátěže roven nule. [1]

Frekvence kroku f_k (Hz)

Frekvence kroku je celkový počet kroků za jednu vteřinu, které provede rotor krokového motoru při konstantní řídicí frekvenci. [1]

Statický moment M_S (Nm)

Je moment motoru, který je v rovnováze s točivým momentem působícím na hřídel stojícího nabuzeného krokového motoru a vychyluje rotor z magneticky klidové polohy o statický úhel zátěže. [1]

Statický vazební moment M_{SV} (Nm)

Jedná se o největší statický moment, který je roven točivému momentu. Je to moment, který může působit na hřídel stojícího nenabuzeného krokového motoru, aniž by došlo k roztržení magnetické vazby. [1]

Statický úhel zátěže β (°)

Jde o úhel, o který se vychýlí rotor z magneticky klidové polohy nabuzeného krokového motoru působením vnějšího momentu. [2]

1.3 Princip činnosti

Krokový motor se i jako ostatní motory dělí na stator a rotor. Příklad jednosvazkového 3-fázového motoru je znázorněn na obr. 1-2. Stator je tvořen z vrstvených izolovaných ocelových plechů, které jsou poskládané do šesti vyjádřených pólů. Kolem každého pólu je navinut měděný drát. Každý pól může být rozdělen na určitý počet zubů. To nám způsobí zmenšení úhlu kroku. Rotor se liší dle druhu krokového motoru. Obvykle je vyroben z měkkého železa s určitým počtem zubů. Na obr. 1-2 máme čtyři zuby. Rotor je obvykle složen z izolovaných plechů, protože omezuje ztráty, které vznikají vířivými proudy.

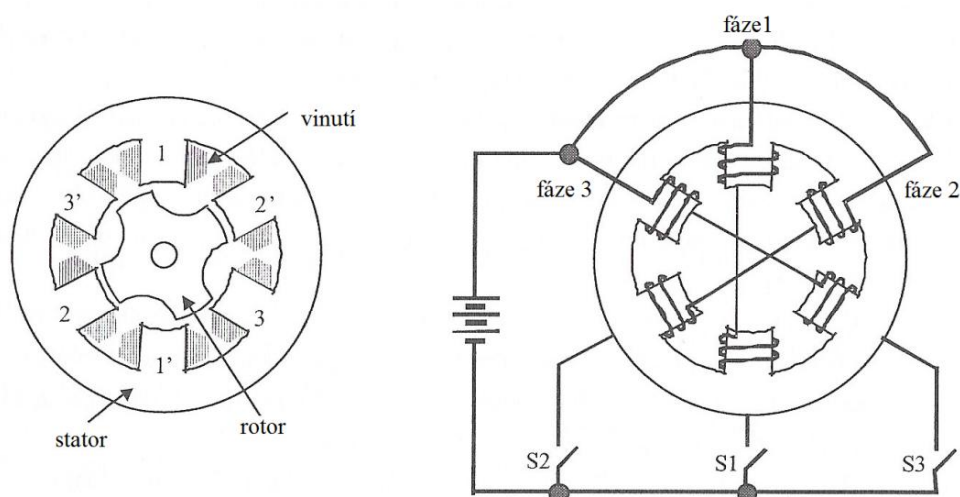
[1, 3, 4]

Vztah mezi počtem zubů statoru a rotoru nám udává vztah:

$$N_r = N_s \pm \frac{N_s}{m} \quad (2)$$

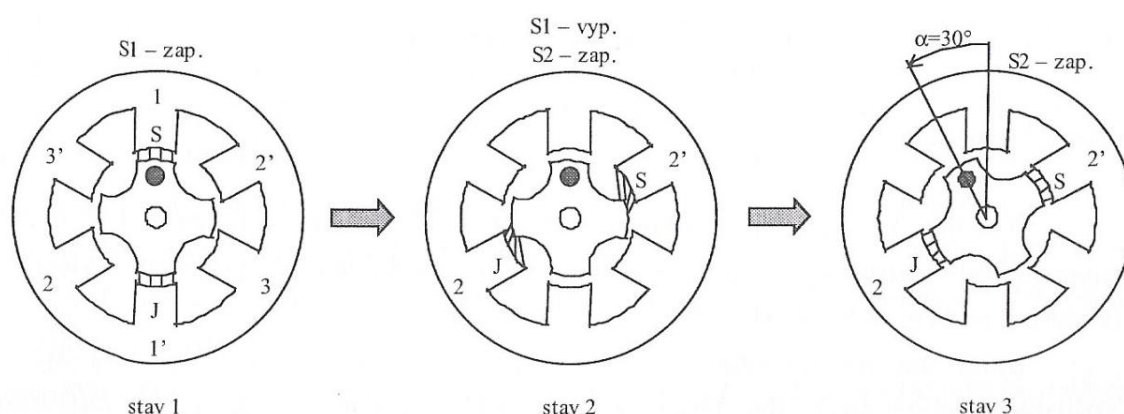
kde m je počet fází, N_r je počet zubů rotoru a N_s je počet zubů statoru

Stator motoru je tvořen ze tří dvojic cívek. Dvojčívka vznikne tak, že spojíme do série dvě cívky a ty nám tvoří fázi. Z obrázku je patrné, že zobrazený motor je třífázový ($m=3$). Propojení cívek je vedeno po obvodu statoru, nikoliv přes prostor rotoru (obr. 1-2 vpravo). [1]



Obr. 1-2 Řez krokovým motorem [1]

Napájení je ze stejnosměrného zdroje, které je vedeno přes vypínače S1, S2, S3. Při sepnutí vypínače S1 je napájena fáze 1 a dojde k nabuzení cívek (1, 1'). Tzn. rotorové zuby se seřadí se statorovými zuby. V tento moment je motor v rovnovážném stavu. Při zapnutí vypínače S2 a současném vypnutí vypínače S1 dojde k nabuzení fáze 2 a fáze 1 se odbudí. V tomto kroku je vypínač S1 a S3 rozepnut a budíme pouze fázi 2 a to cívkou (2, 2'). Průchodem proudu se vytvoří magnetický tok a s ním se vytvoří moment, který je kolmý na směr magnetického toku. Rotor se díky momentu otočí do nové rovnovážné polohy a tehdy má stroj nejmenší magnetický odpor. Pokud tedy napájíme určitou fází dojde k nabuzení cívkou a ve stroji se vytvoří určitý moment, který rotor natočí do nejbližší rovnovážné polohy. Tj. do polohy, kde je nejmenší reluktance (magnetický odpor). Rotor se pootočí z jedné rovnovážné polohy do druhé vždy o určitý úhel. Tento úhel se nazývá velikost kroku viz. kap. 1.2. V případě motoru na obrázku je tento úhel 30° . Když tedy nabudíme fázi 2 cívkou (2, 2'), tak po ustálení přechodového děje je rotor vůči stavu 1 (výchozí poloha) pootočen o $\alpha = 30^\circ$. Krokový motor řídíme postupným spínáním příslušných fází, aby výsledný pohyb rotoru byl v jednom směru otáčení. Průměrná rychlost otáčení se dá řídit spínáním jednotlivých cívek. [1]



Obr. 1-3 Princip činnosti [1]

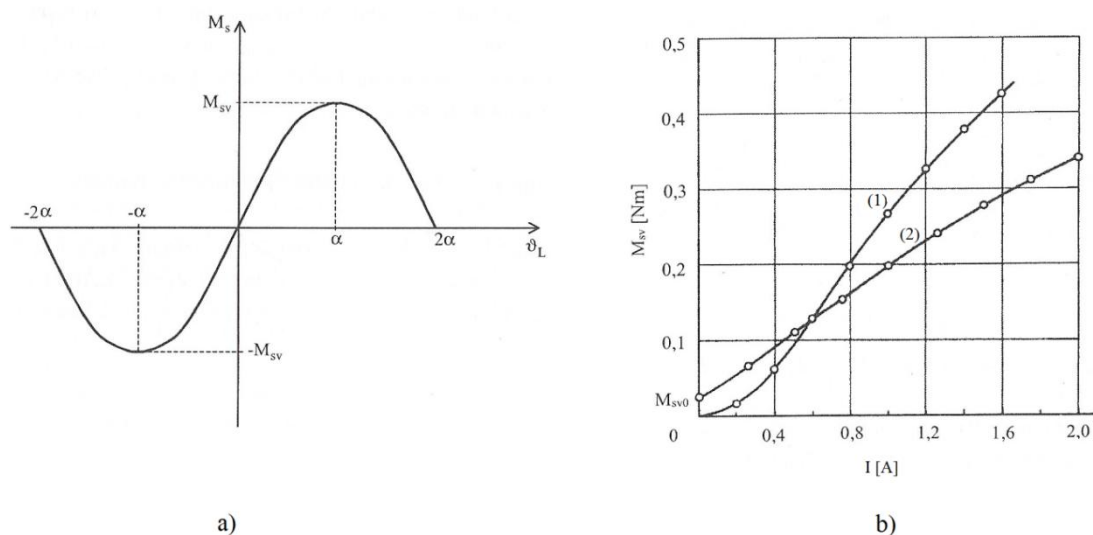
Z principu činnosti je patrné, že krokový motor mění elektrické impulsy na postupné otáčení hřídele. Dnes se využívají moderní integrované elektrické obvody. Impulsy vytvoříme například mikroprocesorem, logickými obvody nebo pomocným relé. Nejčastější je, že jeden puls pootočí rotor o jeden krok. [3]

1.4 Charakteristiky krokového motoru

Základní rozdělení charakteristik je na statické a dynamické.

1.4.1 Statické charakteristiky krokového motoru

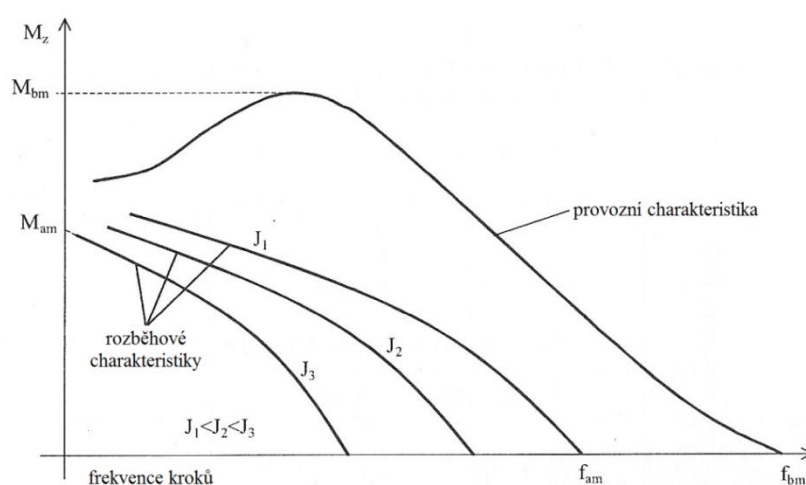
Tyto charakteristiky ukazují vlastnosti motoru v rovnovážném stavu. U nezátíženého krokového motoru s buzenou fází je motor v rovnovážné poloze. Pokud ho zatížíme vnějším momentem, dojde k vychýlení z rovnovážné polohy, který je označován jako statický úhel zátěže β . Statická charakteristika (Obr. 1-4 a) tedy udává závislost statického momentu M_S a statického úhlu zátěže. Z charakteristiky je patrné, že při zvyšování statického úhlu dochází ke zvyšování statického momentu. Maximum statického momentu se označuje jako statický vazební moment M_{sv} . Po překonání statického vazebního momentu dochází k pootočení k nové následující rovnovážné poloze. To je z toho důvodu, že motor nemůže vyvinout větší vnitřní moment a proto už nebude zabírat původní rovnovážnou polohu. Další ze statických charakteristik (Obr. 1-4b) je závislost statického momentu na proudu buzené fáze. Jsou zde zobrazeny dvě charakteristiky pro dva motory. První charakteristika (1) je čtyřfázový krokový motor s proměnlivou reluktancí (krok $1,8^\circ$) a druhá charakteristika (2) je dvoufázový hybridní krokový motor se stejným úhlem kroku. Z této charakteristiky si lze všimnout, že stroj má statický moment i v nenabuzeném stavu. Maximální hodnota je udávána jako statický moment nenabuzeného motoru. [1, 4]



Obr. 1-4 Statická $M_S=f(\beta)$ a $M_S=f(I)$ charakteristika [1]

1.4.2 Dynamické charakteristiky krokového motoru

Krokový motor má dvě dynamické charakteristiky - provozní a rozběhovou. Rozběhová charakteristika zobrazuje pásmo zátěže motoru a veškeré frekvence kroku, kde se motor musí rozběhnout a také zastavit, aniž by došlo ke ztrátě kroku. Oblast rozběhu krokového motoru závisí na momentu setrvačnosti. Z charakteristiky je patrné, že se zvyšujícím se momentem setrvačnosti dochází ke zmenšování oblasti rozběhu motoru. Z rozběhové charakteristiky je možné definovat další dva parametry. Prvním je mezní rozběhový moment M_{am} . Jedná se o moment, který nezatížený krokový motor překoná při definované frekvenci a momentu setrvačnosti. [1, 5]



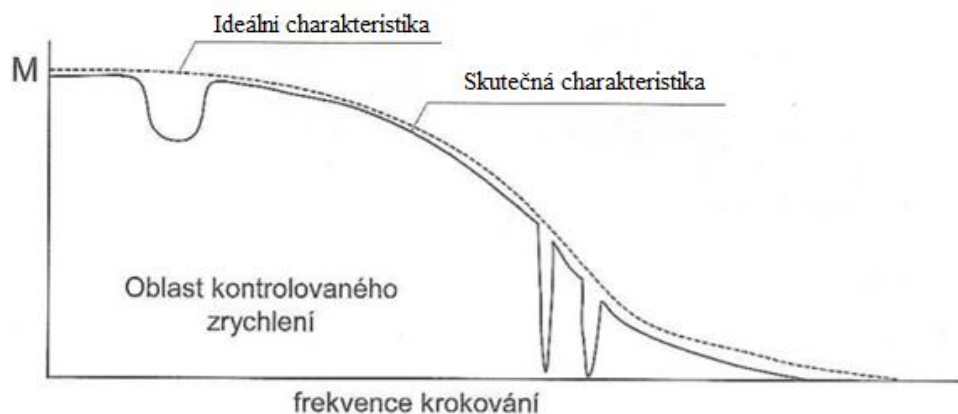
Obr. 1-5 Dynamické charakteristiky [1]

Druhým parametrem je rozběhová frekvence f_{am} . Je to nejvyšší řídicí frekvence, kdy se nezatížený krokový motor rozbíhá. Při této frekvenci nesmí dojít ke ztrátě kroku ani v případě, že není rychlost změny řídicí frekvence omezená. Provozní charakteristika je složena z rozběhové oblasti a oblasti omezené regulovatelnosti. Oblast omezené regulovatelnosti je zdola omezená rozběhovou charakteristikou a shora provozní charakteristikou. Jedná se o oblast zátěží krokového motoru s určitou frekvencí kroku, při kterých je motor schopen překonat zátěž pouze bez změny smyslu otáčení. Mezní provozní moment M_{bm} je definován jako maximální zátěžový moment, který motor překoná při provozní frekvenci. Mezní provozní frekvence f_{bm} je maximální řídicí frekvence, při které se krokový motor (bez zatížení) otáčí jedním směrem. [1, 5]

Důležité je podotknout, že tyto charakteristiky jsou ideální. Zobrazení skutečné charakteristiky je na obr. 1-6, kde dochází k ovlivnění rezonancemi a nestabilitou, která se projeví při určité frekvenci. Nestabilita a rezonance jsou navzájem opačné jevy a důsledek

těchto jevů může vést až ke ztrátě synchronismu krokového motoru. Velikosti poklesů v charakteristice jsou dány vlastnostmi motoru, budičem, zátěží a pracovním módem. Rezonance a nestabilita může vzniknout z následujících dvou důvodů. [1, 5]

- Vlastní rezonance se projevuje v nízkých oblastech krokovacích kmitočtů, okolo 100 Hz. Jev nastane tehdy, když se krokovací kmitočet rovná s vlastní frekvencí oscilace rotoru. Oscilace dále mohou narůstat a může dojít k výpadku krokového motoru se synchronismu. [5]
- Nestability při středních frekvencích, vznikají z důvodu vnitřní nestability motoru při hodnotách $\frac{1}{4}$ a $\frac{1}{5}$ jmenovité frekvence. V charakteristice jsou zobrazeny jako strmé poklesy momentu. Snížení těchto nestabilit je možné při použití odporu zařazeného v sérii s vinutím fází krokového motoru nebo pomocí mechanických tlumičů. [1, 5]



Obr. 1-6 Skutečná momentová charakteristika [5]

2 Druhy krokových motorů

Krokové motory rozdělujeme dle jejich pohybu na :

- rotační (otáčení rotoru),
- lineární (posuvný pohyb).

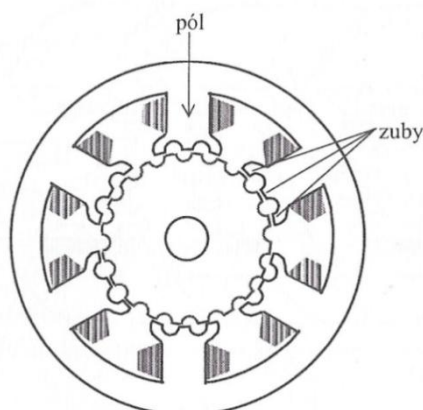
Základní rozdělení je podle jejich konstrukce a principu činnosti na :

- motory s proměnlivou reluktancí,
- motory s permanentními magnety,
- hybridní motory [1, 5]

2.1 Motory s proměnlivou reluktancí

Jedná se o nejstarší konstrukce motoru, se kterými se setkáváme již velmi málo. Velká výhoda toho druhu je, že dosahuje vysokých otáček při velmi malém točivém momentu. Při vypnutém motoru je jeho přídržný moment nulový, což plyne z jeho konstrukčního návrhu. Je zde daná podmínka funkčnosti, která musí být splněna. Stator a rotor musí mít rozdílný počet zubů. [1, 5, 6]

Jedná se o druh motoru zobrazený na obr. 1-2, kdy jeho velikost kroku je 30° . Motor je složen ze tří fází, který má na statoru 6 a na rotoru 4 zuby. Rotor i stator je složen z plechů s vysokou permeabilitou. Vinutí jedné fáze je uloženo na protilehlých statorových zubech. Cívky fáze bývají zapojené buď v sérii, nebo paralelně. Na obr. 1-2 jsou zapojeny v sérii. Polarita na statorových zubech je podle obr. 1-3 taková, že zuby (1, 2, 3) mají severní a zuby (1', 2', 3') jižní polaritu. Při buzení cívky 1 dochází k vytvoření toku (stav 1 na obr. 1-3) a rotor se pootočí do stavu rovnovážné polohy. Zuby statoru jsou seřazené se dvěma zuby rotoru a reluktance je v tomto stavu minimální. Když motor zatížíme vnějším momentem, dojde k vychýlení z rovnovážné polohy o statický úhel zátěže β . Ve stroji se vytvoří statický moment, který bude téměř v rovnováze se zátěžovým momentem. Vzduchová mezera, která se umísťuje mezi pólové nástavce statoru a rotoru je velmi malá, aby bylo možné dosáhnout velkého momentu motoru. Velký moment je zde žádaný, kvůli přesnosti polohování rotoru. [1, 5, 6]



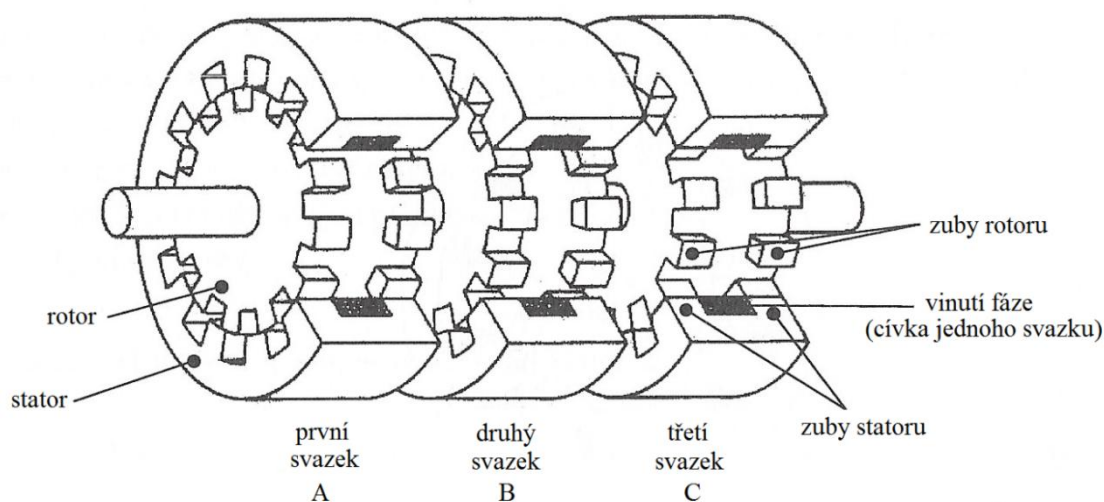
Obr. 2-1 Průřez krokového motoru s proměnlivou reluktancí [1]

Na obr. 2-1 je zobrazen průřez krokového motoru s menší velikostí kroku. Pro určení velikosti kroku použijeme vzorec (1). Stator je složen z 6 pólů. Na každém pólu jsou umístěny 3 zuby. Zuby jednoho pólu mají stejnou magnetickou polaritu. Rotor je

osazen 20 zuby, proto výsledná velikost kroku vychází 6° . Velká výhoda těchto motorů je, že mohou mít velmi malý krok. Pokud bychom tento krok chtěli zmenšit, musíme zmenšit velikost kroku. Ten je dán ze vztahu (1). Je tedy patrné, že musíme zvětšit počet zubů rotoru a počet fází. Počet zubů statoru, nemá vliv na tento parametr. [1]

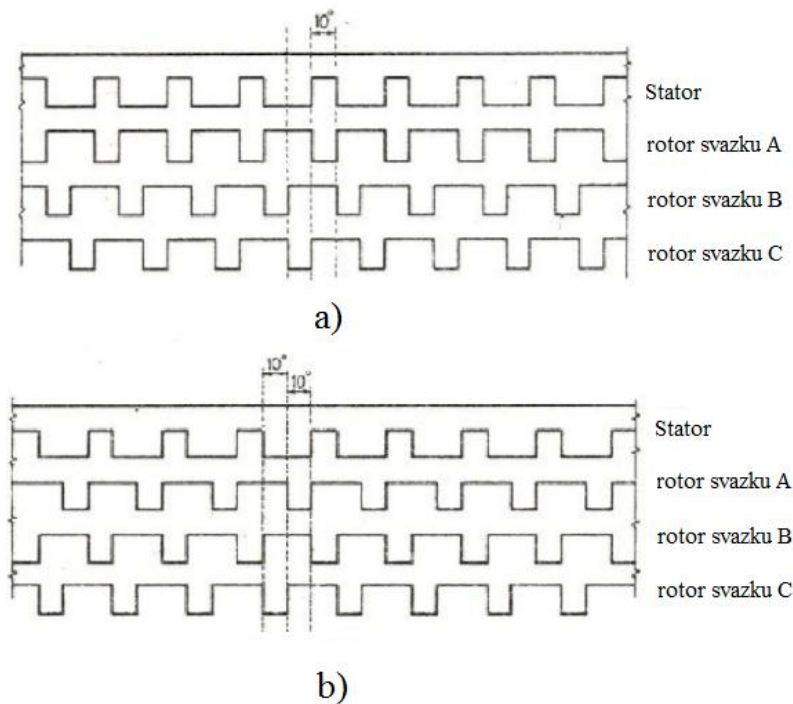
2.1.1 Vícesvazkové typy krokových motorů s proměnlivou reluktancí

Jedná se o motory kaskádového typu, které se používají k získání velikosti kroku v rozmezí 2 -15 stupňů. U tohoto typu motoru odpovídá každý svazek jedné fázi. Rozestup zubů statoru a rotoru je stejný. Na obr. 2-2 je zobrazen třífázový krokový motor, který je rozdělen na tři svazky. V každém svazku má stator i rotor 12 zubů. Třetí svazek je buzený, proto statorové i rotorové zuby leží přímo naproti sobě (osová poloha). Zuby statoru a rotoru prvních dvou fází jsou neseřazené a posunuté o jednu třetinu zubového rozestupu (vzhledem k 3. fázi). Velikost kroku odpovídá 10° . [1, 7, 8]



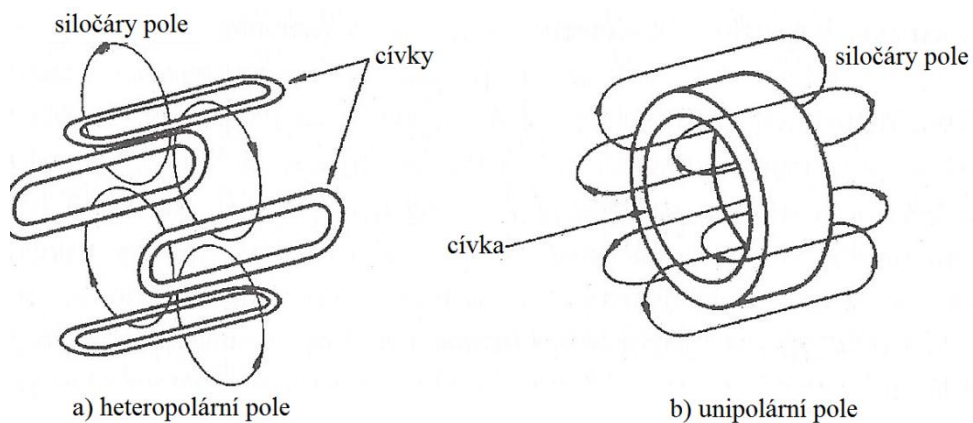
Obr. 2-2 Třífázový krokový motor s proměnlivou reluktancí [1]

Při buzení vinutí A dochází k zarovnání rotorových zubů svazku A se zuby statoru (Obr. 2-3 a). Pokud vypneme fázi A a vybudíme fázi B, jsou rotorové zuby svazku B vyrovnány se zuby rotoru (Obr. 2-3 b). Tímto se rotor pootočí o 10° proti směru hodinových ručiček. Následně odpojíme fázi B a začneme budit fázi C. Rotor se opět pootočí o 10° proti směru hodinových ručiček. Dále odpojíme fázi C a opět sepneme fázi A. Dochází k opakování tohoto procesu. Celkový pohyb (A - B - C - A) způsobí pootočení rotoru o jednu zubovou rozteč. [7, 8]



Obr. 2-3 Postup spínání fáze A a B u vícesvazkového krokového motoru [8]

Vícesvazkové motory mají na statoru umístěn solenoid. Uvnitř stroje se vytváří unipolární pole. V jednom svazku se nachází pouze jedna cívka, která je uložena po obvodě vnitřní plochy svazku mezi zuby. Při buzení cívky dojde k nabuzení jedné strany na určitou polaritu a na druhé straně na opačnou polaritu. [1]

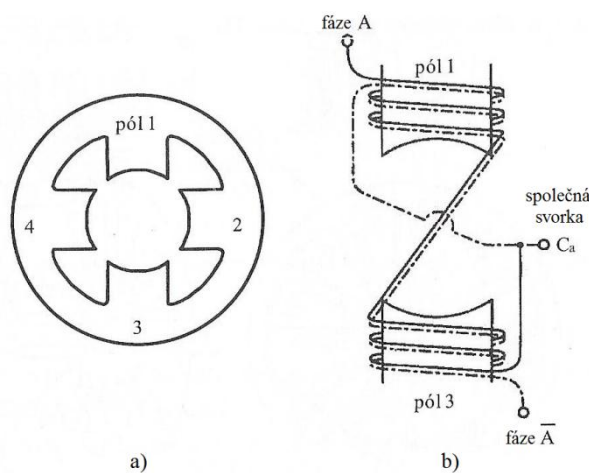


Obr. 2-4 Rozdíl mezi heteropolárním a unipolárním magnetickým polem [1]

Některé typy motorů mohou pracovat i s heteropolárním magnetickým polem. Svazek má po obvodě statoru umístěny celistvé zuby a na každém zubu má svou cívku. [1]

2.2 Motory s permanentními magnety

Na rozdíl od reluktančního krokového rotoru má tento typ stroje rotor magneticky aktivní, je tedy nutné měnit polaritu magnetického pole vytvářeného statorem. Stator má stejnou konstrukci jako předchozí typ. Obsahuje vyjádřené póly s bifilárním vinutím (Obr. 2-5 b). Jedná se o zdvojené překrývající se vinutí, které je navinuté ve stejném smyslu na pólech 1 a 3 (resp. 2 a 4), ale navzájem elektricky oddělené. Směr proudu ve fázi A je opačný ke směru proudu ve fázi \bar{A} , což umožňuje změny magnetických polarit jednotlivých pólů statoru. [1, 9]



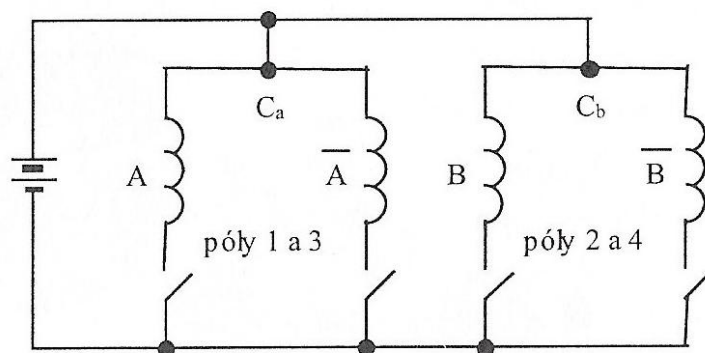
Obr. 2-5 Krokový motor s permanentními magnety [1]

Rotor již neobsahuje zuby, ale je složen z permanentních magnetů. Permanentní magnety jsou poskládané po obvodu rotoru tak, že dochází k prostřídání severního a jižního pólu. Upevnění magnetů na rotoru je řešeno lepením, nebo zapuštěním do rotoru. Výsledný počet pólů na rotoru je poloviční než počet pólů na statoru. Na rotoru je tedy přesně definován počet a polarita pólů. Aby se rotor otočil v daném směru, musíme měnit magnetickou polaritu pólů statoru. [1, 3, 9]



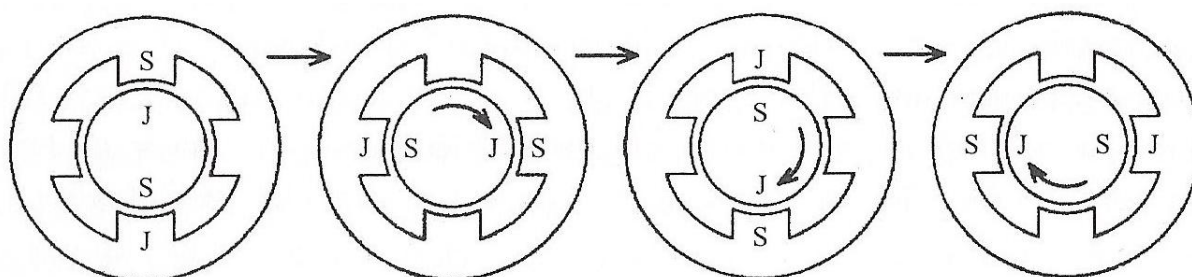
Obr. 2-6 Příklad rotoru krokového motoru s permanentními magnety

Tento druh motoru disponuje řadou výhod. Mezi výhody zahrnujeme například: vyšší hmotný výkon (poměr výkon / hmotnost), existenci vazebního momentu nenabuzeného stoje (tj. stroj může být zatížen i ve vypnutém stavu) a má větší intenzitu magnetického toku (vykazují lepší momentovou charakteristiku, než předchozí typ). I tento stroj má nevýhody a to např. : problém konstrukce s malým úhlem kroku, vyšší poměr moment / moment setrvačnosti a jeho teplotní závislost ve spojení s permanentními magnety. Nad Curieovou teplotou ztrácí magnety své vlastnosti. [1,11]



Obr. 2-7 Princip napájení bifilárního vinutí krokového motoru [1]

Na obr. 2-7 je znázorněno dvojfázové uspořádání vinutí statoru. Svorky C_a a C_b označují společné svorky A , \bar{A} a B , \bar{B} , které jsou připojené na kladný potenciál zdroje. Při buzení cívky A se na pólu 1 vytvoří potenciál severu a na pólu 3 potenciál jihu. Pokud budíme vinutí \bar{A} dojde k opačnému jevu. Na pólu 1 bude jižní polarita a na pólu 3 severní polarita. Při postupném spínání cívek v řadě $A \rightarrow B \rightarrow \bar{A} \rightarrow \bar{B}$ se bude rotor otáčet ve směru hodinových ručiček (Obr. 2-8). U motorů s permanentními magnety bývá úhel kroku 90° , ale pokud zdvojnásobíme počet statorových zubů a rotorových magnetických pólů, lze docílit úhel kroku 45° . [1]



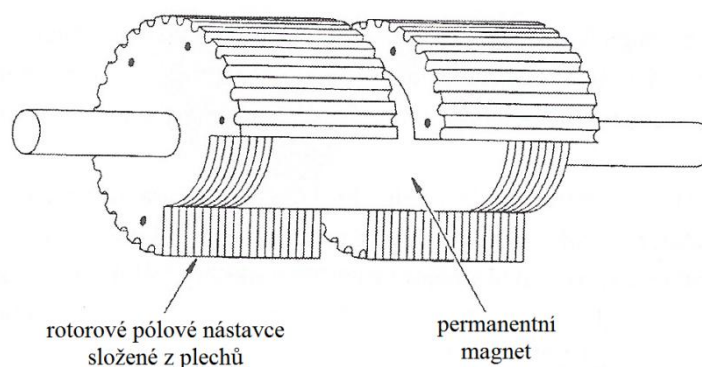
Obr. 2-8 Zobrazení pohybu rotoru u krokového motoru s permanentními magnety [1]

2.3 Hybridní krokové motory

Hybridní krokové motory vycházejí z principu jejich názvu, protože slovo hybrid znamená kombinace. Lze tedy říct, že hybridní krokové motory kombinují princip krokového motoru s proměnlivou reluktancí a s permanentními magnety. V současné době jde o nejpoužívanější typ krokového motoru. [1, 5]

Slučuje výhody obou předchozích typů motorů. Jeho výhody jsou: velmi malý úhel kroku, velký hmotný výkon, velký točivý moment a vyšší účinnost při nižší rychlosti. Mezi nevýhody můžeme zahrnout vyšší setrvačnost, hmotnost motoru (magnet na rotoru), složitější budicí obvody a také jejich cenu. Na obr. 2-10 je příklad uspořádání statoru hybridního motoru, na kterém si můžeme vysvětlit princip uspořádání a činnosti hybridního motoru. [1, 5, 12]

Stator je zde tvořen osmi pólovými nástavci, kde každý nástavec obsahuje 5 zubů. Na pólovém nástavci je navinutá cívka a stator obsahuje celkem 40 zubů. Stator vytváří heteropolární magnetické pole. Rotor (Obr. 2-9) je složen z válcového permanentního magnetu s podélnou magnetizací a uvnitř vzniká unipolární pole. Na koncích rotoru jsou nalisované pólové nástavce, které jsou složené z křemíkových plechů. Pólové nástavce jsou totožné, ale v osové směru natočené o polovinu rotorové drážkové rozteče (proti ose zubu jednoho pólu je umístěná osa drážky druhého). [1, 5]



Obr. 2-9 Částečný řez rotoru hybridního krokového motoru [1]

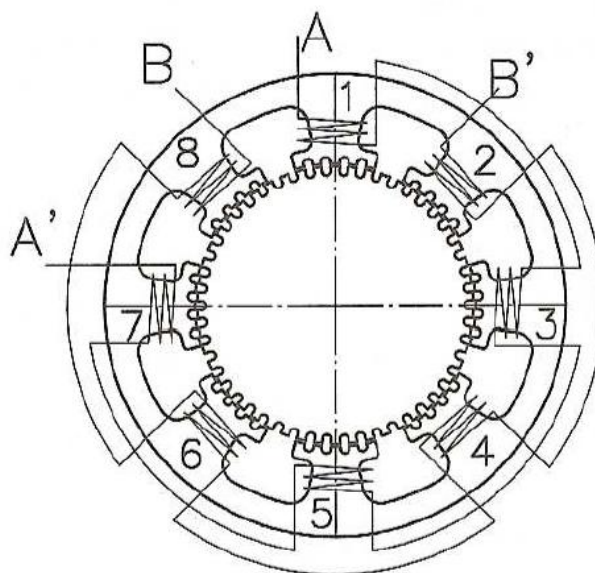
Nejčastěji používaný je dvoufázový hybridní krokový motor (Obr. 2-10). Pokud fázemi statoru neteče žádný proud, tak magnetický tok je tvořen jenom permanentním magnetem a rotor je aretován v klidové poloze (v poloze před vypnutím). Stator je tvořen z 8 cívek, které jsou rozdělené do dvoufázového vinutí. Cívky na pólech 1, 3, 5 a 7 jsou zapojené do série a tvoří fázi A. Stejně jsou zapojeny cívky 2, 4, 6 a 8, které tvoří fázi B. Pólové nástavce na rotoru jsou rozděleny na 50 zubů. [5, 12]

Krok motoru

$$\alpha = \frac{360}{m \cdot N_r \cdot p} = \frac{360}{2 \cdot 50 \cdot 2} = 1,8^\circ \quad (3)$$

kde p je počet pólů na rotoru.

Z úhlu kroku je patrné, že na jednu otáčku motoru je potřeba vykonat 200 kroků.



Obr. 2-10 Řez dvoufázovým hybridním krokovým motorem [5]

Pokud přivedeme na fázi A kladný proud, tak se statorové póly 1 a 5 zmagnetizují jižně a póly 3 a 7 severně. Rotorové zuby na severní straně rotoru se přitáhnou k pólu 1 a 5. Zuby na jižní straně rotoru, které jsou posunuté, se přitáhnou k pólům 3 a 7. Dalším krokem je odpojení fáze A a sepnutí fáze B. Zde závisí na požadovaném smyslu otáčení. Pokud chceme otáčení ve směru hodinových ručiček, tak na fázi B přivedeme záporný proud. Póly 2 a 6 se zmagnetizují jižně a póly 4 a 8 severně. Rotorové zuby na severní straně se přitáhnou k pólům 2 a 6 a na jižní straně k pólům 4 a 8. Rotor se otočí o úplný úhel kroku $1,8^\circ$. Dále bychom odpojili fázi B a napájeli fázi A záporným proudem. Zde budeme mít severní pól na 1 a 5 a jižní pól na 3 a 7. Opět dojde k pootočení o úhel kroku $1,8^\circ$.

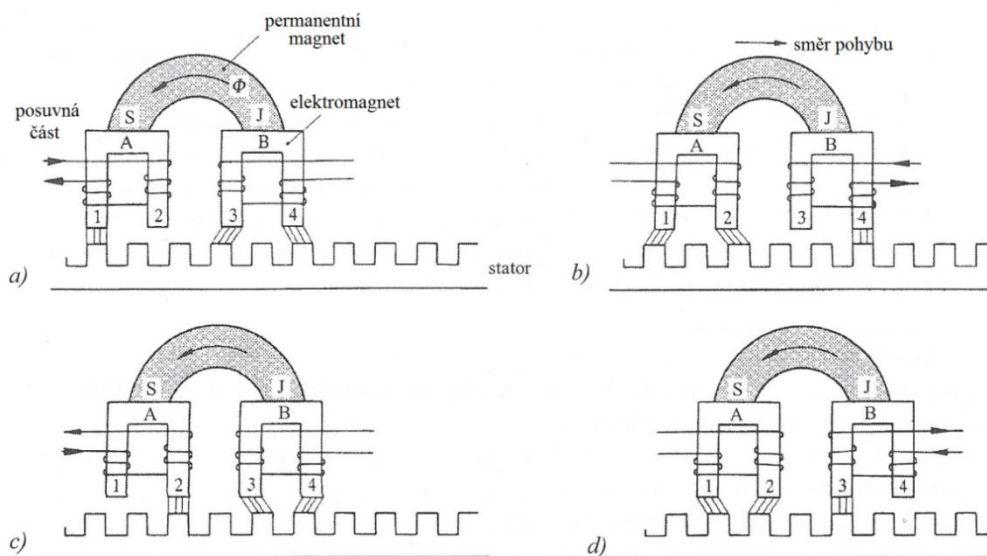
Pokud chceme, aby se rotor pohyboval ve směru hodinových ručiček, musíme fáze napájet v následujícím pořadí +A, -B, -A, +B, +A. Pro otáčení v opačném směru využijeme pořadí +A, +B, -A, -B, +A. [12]

Kromě dvoufázového napájení existují i vícefázové hybridní krokové motory, ale jejich elektronické obvody jsou o hodně dražší než pro dvoufázové provedení. Jejich

výhoda spočívá v lepších dynamických vlastnostech. V otevřené smyčce se používají dvoufázové a pětifázové hybridní krokové motory a třífázové krokové motory využívají řízení v uzavřené smyčce. [1, 5]

2.4 Lineární krokové motory

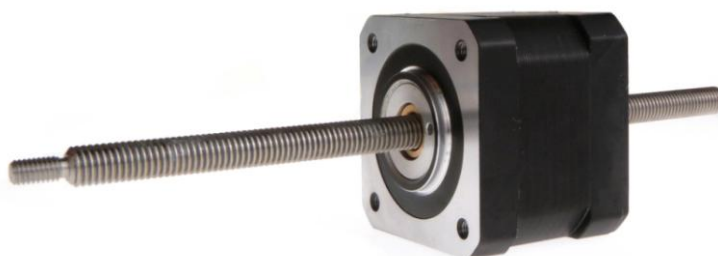
Lineární krokové motory se od předchozích typů liší v jejich pohybu. Lze si je představit jako rotační krokové motory, které rozřízneme a rozložíme do roviny. Výsledný pohyb, který lineární motor vykonává je posuvný. Dělíme je dle druhu na motory s proměnlivou reluktancí, s permanentními magnety a na hybridní lineární krokové motory. Motor je složen z pevného lineárního statoru a jeho vinutí je uloženo v drážkách. Na statoru je umístěn jezdec (běžec). Mezi státorem a běžcem je umístěna vzduchová mezera. Jezdec v mnoha případech obsahuje vzduchová ložiska, která pomáhají k vytvoření nepatrné vzduchové mezery. Menší vzduchová mezera zajišťuje účinnější magnetickou vazbu mezi rotorem a státorem, což vede k vyššímu krouticímu momentu. Používají se pro pomalé a přesné polohování menších břemen. Nevznikají mechanické ztráty, ani nedochází k opotřebení motoru. Motory mají velkou účinnost a jsou téměř bezúdržbové. Princip motoru předvedu na Sawyerovo lineárním motoru. Tento motor byl dříve vyráběn s jezdem z permanentních magnetů, ale v dnešní době už se vyrábí jako hybridní motor. [5, 13, 14]



Obr. 2-11 Princip činnosti Sawyerova lineárního krokového motoru [1]

Sawyerův motor je jako většina lineárních krokových motorů složen ze statoru a pohyblivé části (jezdce). Stator je složený z určitého počtu stejně velkých zubů. Jezdec je tvořen permanentním magnetem, na který přiléhají na dva elektromagnety A a B. Každý elektromagnet má dva zuby a jsou vůči sobě posunuty o 1,5 zubové rozteče.

Když nebudeme budít elektromagnet, tak tok permanentního magnetu prochází oběma přilehlými zuby jezdce. U elektromagnetu A je tento stav zobrazen na obr. 2-11 b) a d). Elektromagnet B má tento stav v a) a c). Pokud vybudíme cívku A, tak tok permanentního magnetu a elektromagnetu je směřovaný do jednoho zubu v pevné části stroje (Obr. 2-11 a). Zub 1 je ve stejné poloze jako zub statoru, tak pod tímto zubem je největší magnetická indukce. U zubu 2 je magnetická indukce téměř zanedbatelná. Přestaneme-li budít cívku A a začneme budít cívku elektromagnetu B (Obr. 2-11 b), dojde k posunutí jezdce vpravo o jednu čtvrtinu zubové rozteče. Tentokrát má zub 4 stejnou polohu jako zub statoru. Následně odpojíme elektromagnet B a připojíme cívku elektromagnetu A, kterou budeme budít proudem, který je opačný než ve stavu a). Dojde opět k posunutí motoru o jednu čtvrtinu pólové rozteče a zub 2 se seřadí se zubem statoru - stav c). Pokud budeme pokračovat v pohybu, tak odpojíme cívku elektromagnetu A a začneme napájet elektromagnet B opačnou polaritou proudu než v b). Opět proběhne posunutí o jednu čtvrtinu pólové rozteče. Tento stav je na obr. 2-11 d. Je tedy patrné, že opět musíme jednotlivé fáze budít bipolárně. [1, 5]

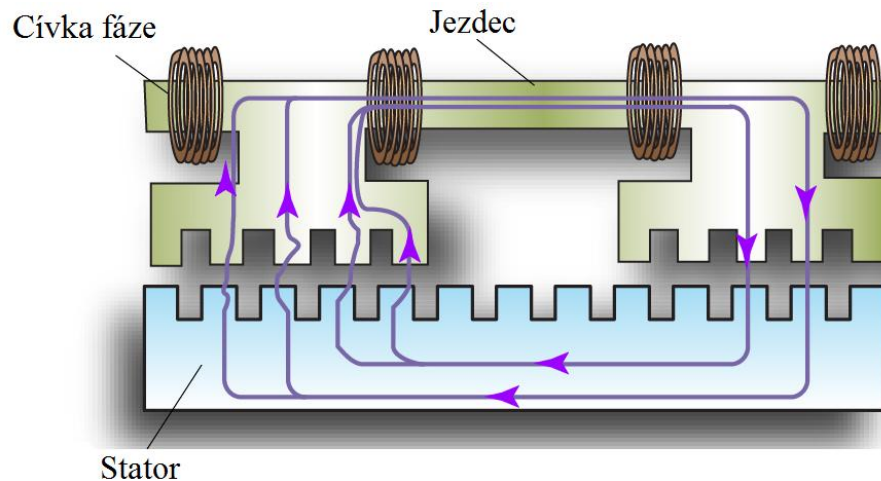


Obr. 2-12 Lineární krokový motor NEMA 17

2.4.1 Lineární krokové motory s proměnnou reluktancí

Lineární krokové motory s proměnnou reluktancí jsou technologicky starší než lineární hybridní krokové motory. Stejně jako rotační krokové motory s proměnlivou reluktancí mohou být i lineární krokové motory s proměnlivou reluktancí hlučné a obvykle jsou provozovány pouze v plném kroku. Nejčastěji bývají zapojené v uzavřené smyčce. Motory však mají své výhody:

- Elektromagnetická spojka minimalizuje ztráty .
- Vykazují menší pokles točivého momentu při vyšších rychlostech.
- Jsou levnější než hybridní lineární krokové motory.



Obr. 2-13 Lineární krokový motor s proměnnou reluktancí [15]

Jezdec je tvořen z vrstvené magnetické oceli, na kterém jsou umístěny cívky. Každá fáze obsahuje jeden nebo více zubů. Proud do cívek se spíná fázemi motoru, což generuje elektromagnetickou reluktanci a lineární sílu. [15]

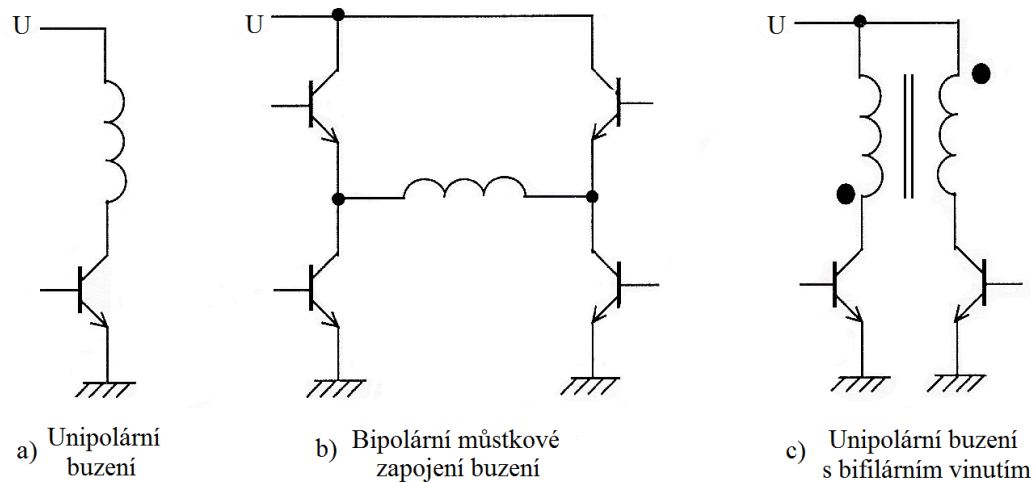
2.4.2 Hybridní lineární krokové motory

Hybridní lineární krokové motory mají vysoký zádržný moment a mohou pracovat při vysokých rychlostech. Jsou mechanicky jednoduché a spolehlivé - obvykle s nízkou setrvačností. Hybridní lineární krokové motory obvykle běží pod dvoufázovou regulací otevřené smyčky. Hlavním nedostatkem tohoto typu motoru je cena. [15]

3 Řízení krokových motorů

3.1 Typy vinutí krokových motorů

V minulých kapitolách jsou shrnuty jednotlivé druhy krokových motorů. U některých motorů je okrajově zmíněno jejich vinutí. Vinutí krokových motorů je podle základního rozdělení dělené na monofilární a bifilární. Monofilární vinutí obsahuje jednu cívku, u které je možné měnit její magnetickou polaritu tak, že obrátíme polaritu proudu ve vinutí. U bifilárního vinutí je cívka složená ze dvou vinutí, které jsou navzájem elektricky oddělené a magneticky zapojené proti sobě. U strojů s rotorem z permanentních magnetů musíme měnit polaritu na statoru, aby bylo možné docílit plynulosti pohybu. Při použití motorů s proměnlivou reluktancí se polarita pólů měnit nemusí, ale i to se u určitých strojů využívá. [1]

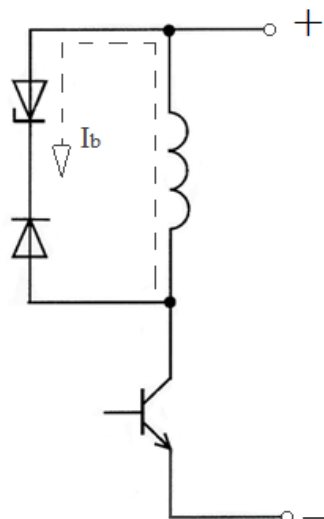


Obr. 3-1 Zapojení unipolárního a bipolárního druhu buzení [1]

Obr. 3-1 znázorňuje principiální zapojení buzení pólů, resp. fází krokového motoru, ale nerespektují všechny požadavky, které klademe na vinutí. U unipolárního buzení (Obr. 3-1 a) se nedá měnit polarita pólů. Využívá se pouze u krokových motorů s proměnlivou reluktancí. Schéma b) znázorňuje bipolární můstkové zapojení buzení s monofilárním vinutím. Proud ve vinutí může procházet dvěma směry, proto je možná změna polarita pólů. Z obr. 3-1 b) je patrné, že pro každou fázi je potřeba 4 elektronické spínače (např. tranzistory). Z důvodu použití většího počtu součástek se úměrně zvyšuje i jeho cena. Třetí způsob zapojení je zobrazen na obr. 3-1 c). Jde o unipolární buzení zapojení s bifilárním vinutím. Jedná se o levnější variantu, než když použijeme bipolární můstkové zapojení. Díky bifilárnímu vinutí je možné budit jednou cívkou severní a druhou jižní polaritu daného pólu.

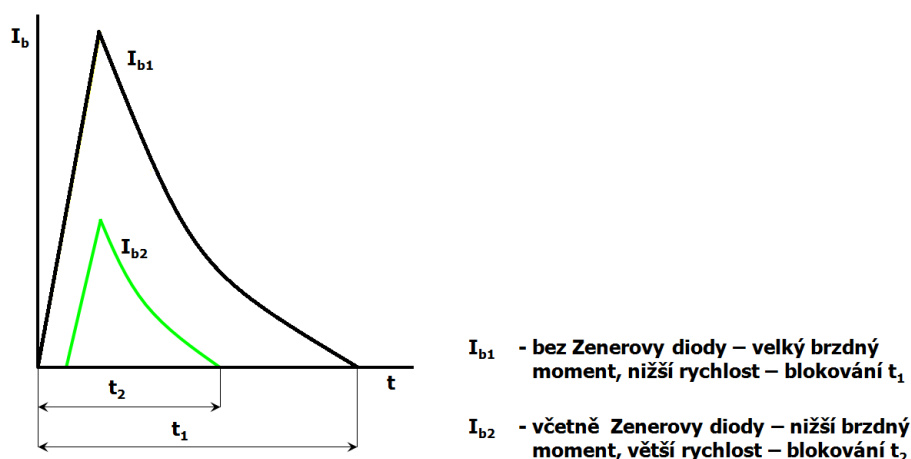
Na obvody buzení klademe i další důležité požadavky. Z důvodu maximalizace momentu musí budící obvody zabezpečit nárůst (pokles) proudu při zapnutí (vypnutí) buzení fáze a zabezpečit udržení proudu v buzené fázi na konstantní hodnotě. Důležité je správně zvolit velikost napájecího napětí, abychom zabezpečili správnou strmost nárůstu proudu ve vinutí. K zabezpečení konstantního proudu ve vinutí využijeme regulátor proudu (např. komparátor), který slouží k řízení spínání tranzistoru. Dále potřebujeme nulový obvod pro rychlé odbuzení dané fáze, ve kterém proud zanikne. [1]

Při vypnutí buzené fáze musí proud zaniknout velmi rychle. Zároveň nesmí dojít k extrémně rychlému zániku, protože můžeme zničit výkonové elektronické spínače velkým indukovaným napětím $L \frac{di}{dt}$. [1]



Obr. 3-2 Budící obvod s antisériovým zapojením Zenerovy a klasické diody [16]

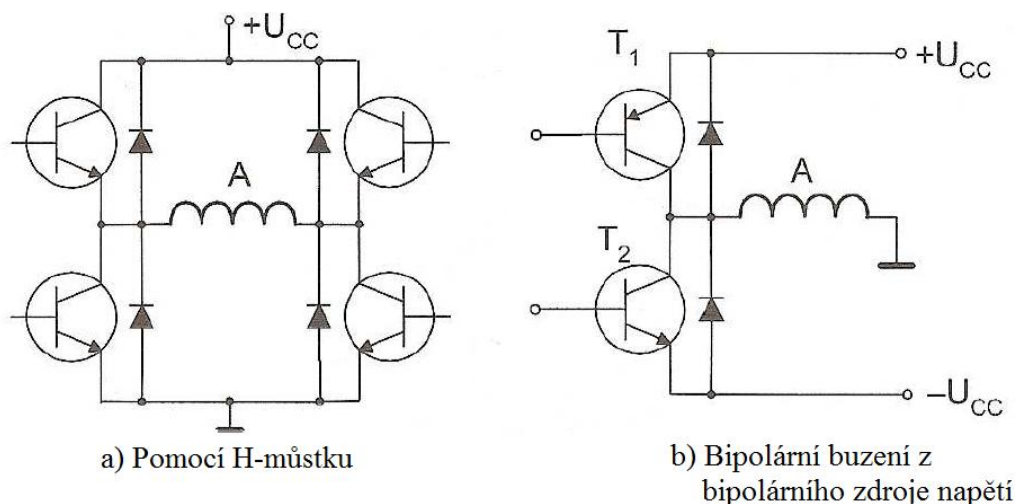
Zapojení na obr. 3-2 zabezpečí rychlý pokles proudu odbuzované fáze. Jedná se o antisériové zapojení klasické diody a Zenerovy diody. Při vypínání indukčnosti ve stejnosměrném obvodu vzniká velké přepětí. K snížení přepětí slouží nulová dioda, která je zapojena v závěrném směru paralelně k cívce krokového motoru. Energie magnetického pole se přemění na činném odporu vinutí v teplo. Obvodem prochází brzdny proud, který zabraňuje překmitu rotoru KM při velkém momentu setrvačnosti. Po dobu průchodu brzdného proudu je cívka blokována. Zenerova dioda pozdrží otevření ochranného obvodu. [16]



Obr. 3-3 Průběh brzdného proudu [16]

Například u hybridního krokového motoru využijeme buzení viz obr. 3-4. Každou fází musíme budít bipolárně. Tj. potřebuji fázi nejen vybudít, ale i změnit její polaritu. Ke změně polarity proudu nejčastěji využíváme H - můstkový spínač s unipolárním napájením (Obr. 3-4 a). Směr magnetického toku je také závislý na smyslu fázového vinutí, proto

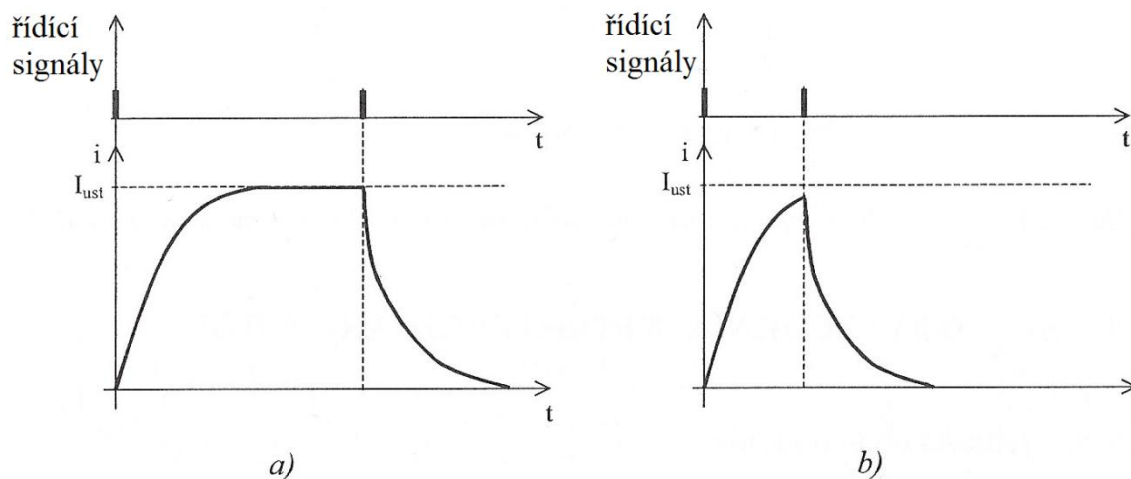
můžeme směr magnetického toku měnit i bez můstkového spínače (Obr. 3-4 b). [5]



Obr. 3-4 Buzení z unipolárního a bipolárního zdroje napětí u hybridního krokového motoru [5]

3.2 Proud ve fázi krokového motoru

Jak již bylo řečeno, tak vlastnosti krokových motorů výrazně ovlivňuje napájecí zdroj. Vinutí je tvořeno sériovou kombinací indukčnosti a odporu. Velikost napětí zdroje a časová konstanta fáze ovlivňuje nárůst (pokles) proudu při nabuzování (odbuzování) fáze. Na krokový motor, který se otáčí, působí proti napětí zdroje i vnitřní indukované napětí.



Obr. 3-5 Časové průběhy proudů ve fázi krokového motoru při různé frekvenci řídicího signálu [1]

Při nízkých frekvencích řídicího signálu je patrné (Obr. 3-5 a), že vzhledem k ustálenému stavu je jeho přechodový děj zanedbatelný (nárůst / pokles proudu). Pokud začneme zvětšovat frekvenci kroku, tak se doba přechodového děje bude stále víc přibližovat k době ustáleného stavu, až při určité frekvenci (Obr. 3-5 b) je tvar proudu dán pouze přechodovým dějem. Proud se nestihne ustálit a střední hodnota proudu buzené fáze se vzrůstající frekvencí klesá, proto klesá i statický moment stroje. [1]

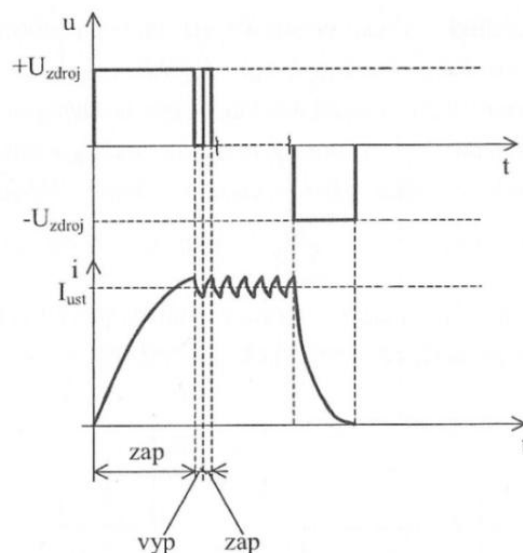
Prvním řešením pro zlepšení provozních vlastností je zkrácení doby přechodového děje. Musíme hlavně zkrátit dobu nárůstu proudu. Toho se dá dosáhnout zmenšením časové konstanty vinutí, proto do série s vinutím fáze přidáme odpor. [1]

Časová konstanta

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (4)$$

Pokud zvětšíme odpor, zmenší se časová konstanta. S větším odporem se musí zvětšit i napětí zdroje tak, abychom jsme dosáhli stejného proudu v ustáleném stavu. Takové řešení je velmi jednoduché, ale přidáním odporu zvýšíme ztráty. Druhé řešení lze realizovat s duálním napájením fází krokového motoru. Při nárůstu proudu v přechodovém ději napájíme fázi ze zdroje vyššího napětí, tím dojde ke zvýšení strmosti nárůstu proudu. Když proud dosáhne jmenovité hodnoty, tak se napájení přepne na zdroj s nižším napájením. Následně jen udržujeme nastavenou hodnotu proudu. [1]

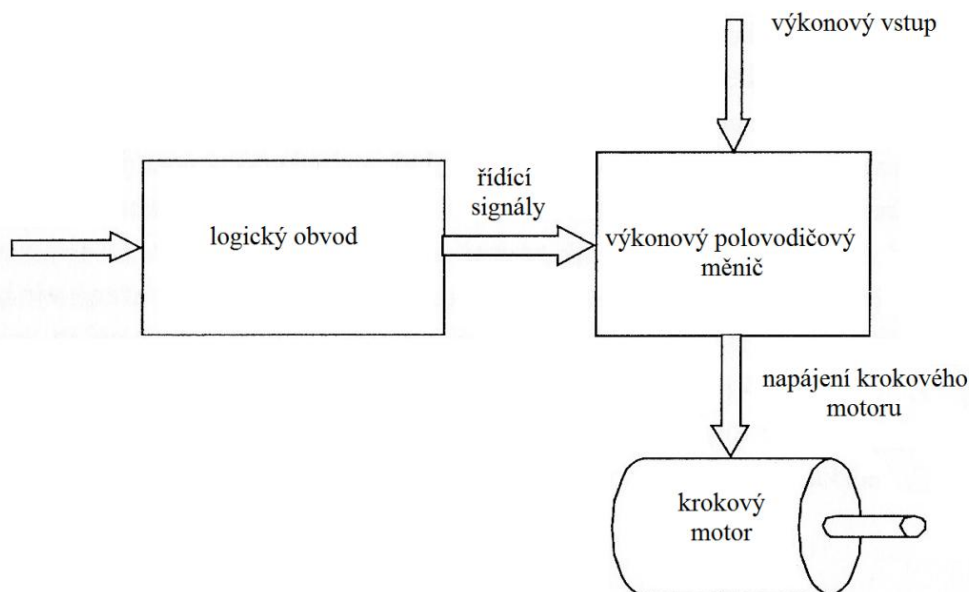
Nejideálnější způsob napájení je s použitím pulzní šířkové modulace. Snímáme skutečný proud fáze, který následně porovnáváme s referenční hodnotou proudu. K porovnání použijeme hysterezní komparátor. Následně porovnáním odpojujeme (připojujeme) fázi od zdroje. Napětí zdroje můžeme použít i vyšší, než je součin odporu obvodu fáze a jmenovitého proudu, což má vliv na zvýšení strmosti nárůstu proudu. Na obr. 3-6 je naznačen tvar proudu a spínání měniče.



Obr. 3-6 Proud a napětí fáze při napájení krokového motoru při pulzní šířkové modulaci [1]

3.3 Řízení krokového motoru v otevřené smyčce

Krokové motory se nejvíce používají na řízení polohy (motor reaguje na řídicí impuls pootočením o řídicí úhel bez ztráty kroku), proto není potřeba využívat zpětnou vazbu (provoz v uzavřené smyčce). Toto řízení je velmi často využíváno, ale je nutné počítat s omezenou pracovní oblastí. Důležité je poznamenat, že krokový motor může ztratit krok nebo vypadnout ze synchronismu (při velké frekvenci kroku nebo velkém momentu zátěže). Dále mezi nevýhody lze zahrnout oscilace rotoru, které se zde velmi často vyskytují. [1]



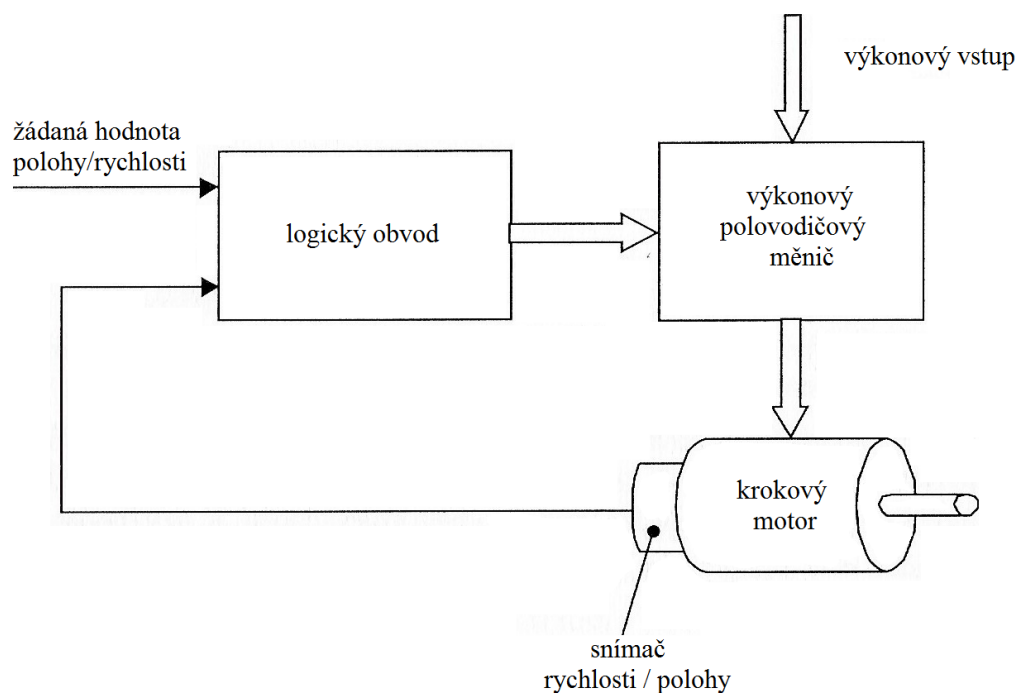
Obr. 3-7 Uspořádání pohonu s krokovým motorem v otevřené smyčce [1]

Principiální schéma je na obr. 3-7. První blok je logický obvod, který řídí postupné spínání jednotlivých fází. Zpracovává řídicí signál kroku a jeho výstupem jsou řídicí signály pro výkonový měnič. V dnešní době se už logické obvody nevyužívají a jsou nahrazeny mikroprocesory. Měnič budí jednotlivé fáze na základě řídicích signálů. V měniči může být umístěn i usměrňovač. Následně je krokový motor napájený napěťovými impulsy stejnosměrného proudu. [1]

3.4 Řízení krokového motoru v uzavřené smyčce

Řízení v uzavřené smyčce zvětšuje pracovní oblast a snižuje oscilace rotoru. Motor vykazuje lepší zrychlení a hladší chod. Řízení v uzavřené smyčce je dražší, protože je nutné přidat snímač rychlosti (resp. polohy). Je vyhodnocována skutečná poloha rotoru a logický obvod vyšle řídicí signál do měniče a následně dojde k napájení dané fáze. [1]

Při tomto řízení je také nutné definovat úhel vedení. Lze si to vysvětlit na třífázovém motoru, který se otáčí malou rychlostí. Nejprve budíme fázi 1, dojde k pootočení rotoru do rovnovážné polohy. Následně odpojíme fázi 1 a nabudíme fázi 2. U tohoto příkladu je úhel vedení roven jednomu kroku. Při zatíženém motoru se rotor nikdy nedostane do rovnovážné polohy, tím pádem nedojde k sepnutí další fáze, proto je nutné volit úhel vedení větší než 1 krok. Např. u čtyřfázového motoru se volí úhel vedení jeden a půl násobek kroku. [1, 5]



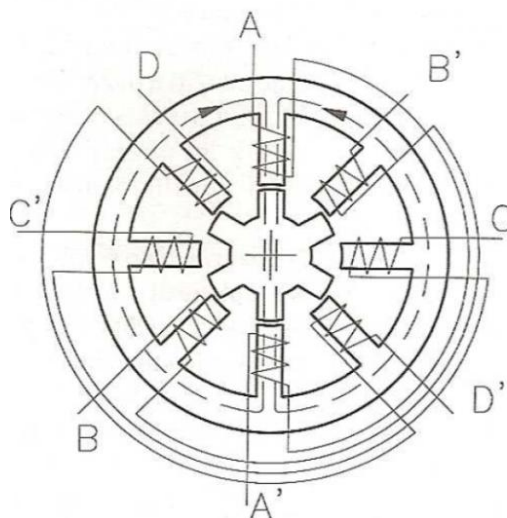
Obr. 3-8 Uspořádání pohonu s krokovým motorem v uzavřené smyčce [1]

3.5 Druhy řízení krokových motorů

Krokové motory lze řídit několika způsoby. Základní rozdělení řízení krokových motorů je podle napájení a to na bipolární a unipolární. Dále záleží na požadované přesnosti polohy, kroutícím momentu a počtu buzených cívek.

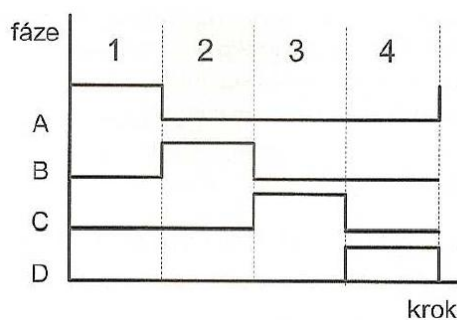
3.5.1 Jednofázové řízení

V určitém okamžiku budíme vždy jen jednu fázi a rotor se pootočí o přesně definovaný krok. Zuby statoru jsou vždy seřazeny se zuby rotoru dané fáze.



Obr. 3-9 Čtyřtaktní reakční krokový motor [5]

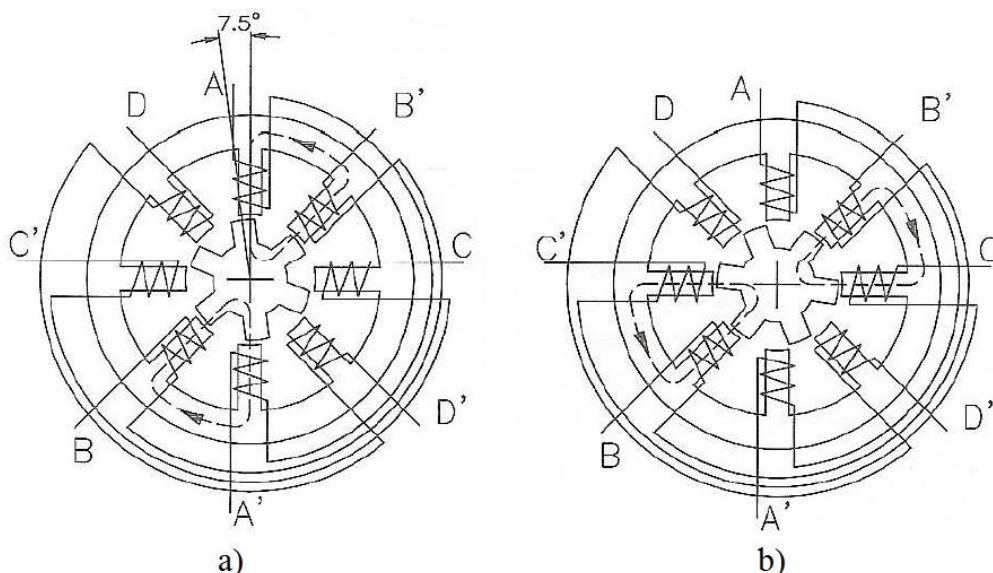
Princip vysvětlím na čtyřtaktním reakčním krokovém motoru, který je zobrazen na obr. 3-9. Motor je ve stavu, kdy je napájena fáze A. Rotor je natočen do stavu, kdy je jeho magnetický odpor nejmenší (rovnovážná poloha). Poté odpojíme fázi A a nabudíme fázi B. Dojde opět k pootočení rotoru (proti směru hodinových ručiček) do následující rovnovážní polohy. Úhel kroku činí 15° . Následně spínáme další fáze C-D-A a dostaneme točivý pohyb. Pokud potřebujeme rotor otáčet do opačného směru, tak zvolíme napájení cívek A-D-C-B-A. Důležité je poznamenat, že u tohoto řízení nezávisí na vzájemné polaritě napětí jednotlivých fází. [1, 5]



Obr. 3-10 Princip spínání jednotlivých fází u čtyřtaktního reakčního krokového motoru [5]

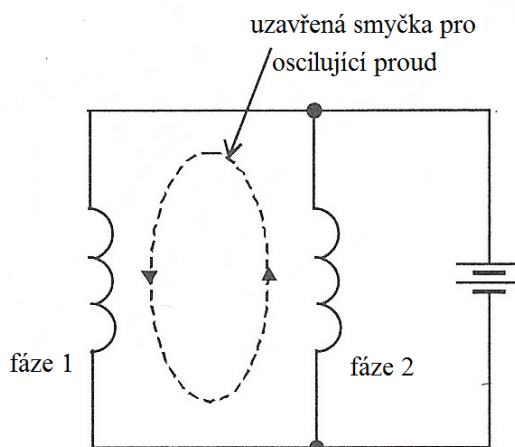
3.5.2 Dvoufázové řízení

Při dvoufázovém řízení současně napájíme dvě sousední fáze krokového motoru. Při dvoufázovém způsobu napájení je rovnovážná poloha umístěna mezi vybuzenými sousedními pólovými nastavci statoru. Velikost kroku je stejná jako u jednofázového napájení, ale rovnovážná poloha je vychýlená o polovinu kroku.



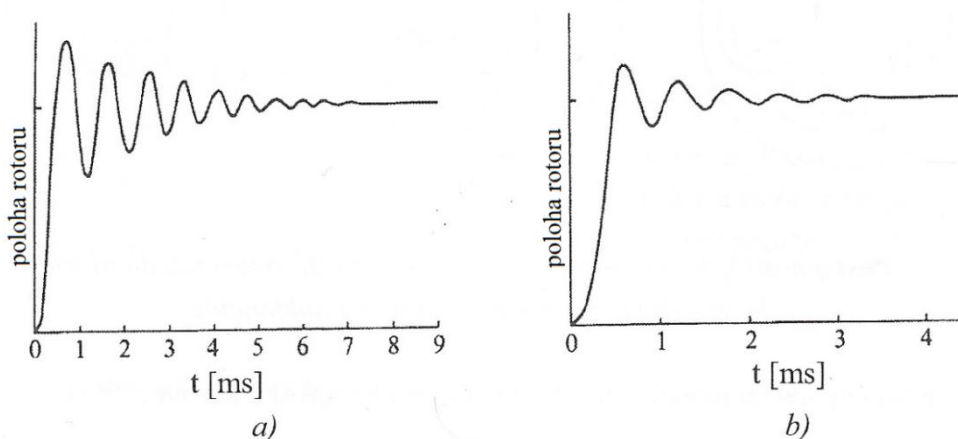
Obr. 3-11 Čtyřtaktní reakční krokový motor - první a druhý krok napájení [5]

Z obr. 3-11 je patrné, že rovnovážná poloha rotoru je vychýlená o $7,5^\circ$, ale úhel kroku se nemění a je stále 15° . Pro otáčení krokového motoru musíme spínat dvojice fází v pořadí: AB-BC-CD-DA. Opačný směr otáčení docílíme spínáním AD-CD-BC-AB. Na obr. 3-11 a) napájíme fáze A a B. Další rovnovážné polohy docílíme napájením fází B a C. Velkou výhodou oproti jednofázovému napájení je možnost tlumit oscilace rotoru, které vzniknou při přechodu rotoru z jedné do druhé rovnovážné polohy. [5]



Obr. 3-12 Smyčka proudu pro doznívání oscilujícího proudu při dvoufázovém buzení [1]

Na obr. 3-12 jsou zobrazeny dvě buzené fáze, které tvoří uzavřený obvod. Při oscilaci rotoru je objevení oscilační složka proudu, která se uzavírá tímto obvodem. Tato složka působí proti změně, která ji vyvolala. Lze tedy říci, že tato složka vytvoří moment, který působí proti oscilacím rotoru (tlumení oscilací rotoru). [1]



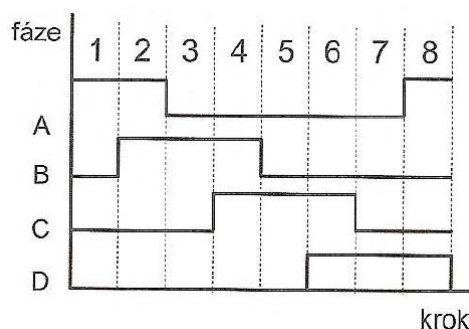
Obr. 3-13 Příklad oscilací rotoru pro jednofázové a dvoufázové buzení [1]

Na obr. 3-13 a) je znázorněna oscilace jednofázového buzení při přechodu rotoru z jedné do druhé rovnovážné polohy a obr. 3-13 b) je pro dvoufázové buzení.

Pokud toto chceme aplikovat na krokový motor s proměnlivou reluktancí, tak využijeme bifilární vinutí nebo bipolárně buzené monofilární vinutí. To způsobí zmenšení rozměrů stroje. [1]

3.5.3 Řežim řízení s polovičním krokem

Jedná se o buzení, ve kterém je kombinované jednofázové a dvoufázové buzení. Princip vysvětlím na osmitaktním řízení. Vznikne spojením čtyřtaktního řízení jedné a dvou fází. Budeme postupně střídat buzení jedné a dvou fází tak, aby nám vyšla sekvence spínání pro jeden směr takto: A-AB-B-BC-C-CD-D-AD- ... Pro druhý směr je tato sekvence opačná. Tímto se rotor pootočí pouze o polovinu kroku. Výhodou je dvojnásobný počet kroků na otáčku bez jakékoliv úpravy budících obvodů. [5]



Obr. 3-14 Spínání osmitaktního řízení u čtyřtaktního krokového motoru [5]

3.5.4 Řízení třífázových a pětifázových hybridních krokových motorů

Řízení třífázových a pětifázových hybridních krokových motorů je možné třemi způsoby:

- bipolární buzení každé fáze,
- zapojení vinutí do hvězdy (jednotlivé fáze)
- zapojení vinutí do trojúhelníka (jednotlivé fáze) - pro pětifázové do pětiúhelníka

Bipolární buzení každé fáze se používá velmi málo, protože je potřeba dvojnásobného množství elektronických spínačů než při zapojení do hvězdy, trojúhelníku nebo pětiúhelníku. Více než pětifázové řízení se nepoužívá, protože klesá účinnost celého systému. [1]

3.5.5 Mikrokrokový režim

Zmenšení kroku se dříve provádělo pomocí zvýšení počtu rotorových zubů nebo fází. Je nevýhodné pracovat se 4 a více fázemi. Dále jsme limitováni i počtem zubů, protože je velmi nákladné vyrábět motory s více než 100 zuby. Vlivem využití výkonových součástek a řídicí elektroniky v krokových motorech lze rozdělit plnou délku kroku do menších kroků. Tyto drobné kroky nazýváme mikrokroky a používáme je tam, kde je vyžadována velmi jemná rozlišitelnost polohy. Mikrokrokování ovlivňuje pouze počet kroků (rozlišení), ale na přesnost krokového motoru nemá vliv. Přesnost kroku ovlivňuje mechanická konstrukce motoru. Nejčastější využití je u hybridních krokových motorů.

[1, 5, 17]

Mikrokrokování vychází z principu magnetizace dvou fází a každý krok je rozdělen na stejný počet mikrokroků, přičemž proud procházející fázemi při mikrokrocích je odlišný. Správnou volbou a řízením velikostí proudu, lze dosáhnout libovolné rovnovážné polohy rotoru, který je umístěn mezi dvěma základními kroky. Při použití dvoufázového hybridního motoru je pro jeden krok nutné natočení magnetického pole o 90° elektrických. Moment motoru se mění sinusově v závislosti na natočení rotoru. [5, 17]

Proudy ve fázích

$$i_A = I_N \cdot \sin(\mu) \quad (5)$$

$$i_B = I_N \cdot \cos(\mu) \quad (6)$$

kde I_N je jmenovitá hodnota fázového proudu a μ velikost mikrokroku.

Momenty fáze A a B

$$M_A = -k_T \cdot i_A \cdot \sin(\theta) \quad (7)$$

$$M_B = k_T \cdot i_B \cdot \cos(\theta) \quad (8)$$

kde k_T je konstanta momentu motoru, θ je poloha rotoru uvedená v elektrických stupních a i_A , i_B jsou proudy ve fázích.

Pokud budíme fázi A i B dostaneme vztah, který je dán součtem obou momentů.

$$M_A = k_T \cdot (-i_A \cdot \sin(\theta) + i_B \cdot \cos(\theta)) \quad (9)$$

Dvoufázový hybridní motor bude mít tedy základní krok rozdělen na čtyři mikrokroky a jeho parametry jsou uvedeny v tabulce.

Tab. 1 Velikost proudů v jednotlivých fázích při mikrokrokování [17]

Poloha mikrokroku	Elektrický úhel (°)	Proud fázi A - i_A (A)	Proud fázi B- i_B (A)
0	0	I_N	0
1/4	22,5	$0,924 I_N$	$0,383 I_N$
2/4	45	$0,707 I_N$	$0,707 I_N$
3/4	67,5	$0,383 I_N$	$0,924 I_N$
1	90	0	I_N

V poloze 0 je fáze A buzená jmenovitým proudem a rotor je vyrovnán s fází A. Dále následuje poloha 1/4 základního kroku, kterou dostaneme současným buzením fáze A jmenovitým proudem $0,924 \cdot I_N$ a fáze B pouze částečným proudem $0,383 \cdot I_N$. Pro druhý mikrokrok budíme fáze A i B proudem $0,707 \cdot I_N$. Třetí mikrokrok dostaneme tak, že fázi A napájíme $0,383 \cdot I_N$ a fázi B napájíme $0,924 \cdot I_N$. Pro poslední krok vypneme fázi A a napájíme pouze fázi B proudem I_N . Pro tento případ je potřeba dvouhladinový napájecí zdroj. [17]

Mezi výhody mikrokrokování lze zařadit :

- klesá zvlnění momentu se vzrůstajícím počtem mikrokroků,
- pokles přirozené rezonance z důvodu omezení přechodových dějů mezi polohami kroku,
- menší hlučnost stroje s větším počtem kroků,
- větší účinnost vlivem zlepšení využití momentu. [17]

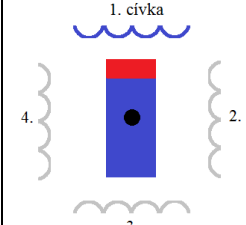
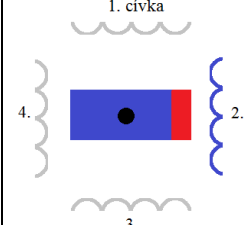
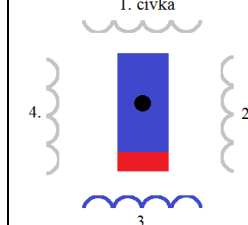
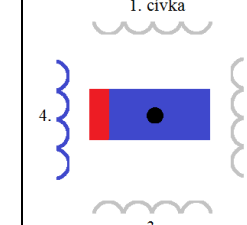
Při mikrokrokování se zvětšuje citlivost stroje, ale polohovací chyba (ze statické momentové charakteristiky) zůstává stejná jako u režimu plného kroku. [17]

3.5.6 Unipolární řízení

Unipolární režim řízení je zobrazen na obr. 3-1 a), c). Elektrický proud prochází v jedné časové oblasti pouze jednou cívkou. Výhodou je jednoduché zapojení řídicí elektroniky, kde stačí pouze jeden tranzistor na každou cívku. Dále má malý odběr, což způsobuje i malý krouticí moment, což je jeho nevýhoda. [18]

V tab. 2 je znázorněné postupné spínání cívek a pootáčení rotoru. Šedě je zobrazena cívka bez proudu. Magnetické pole modré cívky přitahuje červený konec magnetu (rotoru).

Tab. 2 Unipolární jednofázové řízení s plným krokem

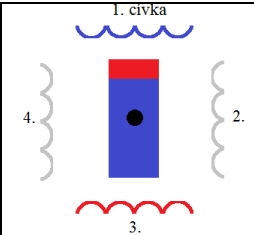
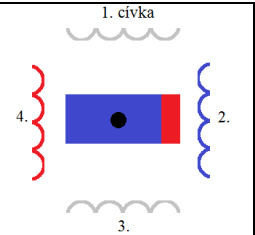
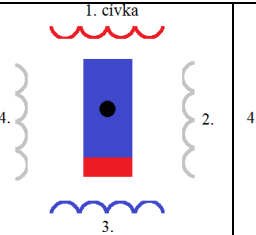
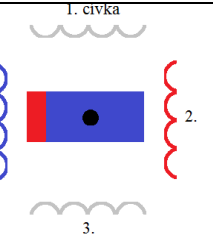
				
1. cívka	-I	0	0	0
2. cívka	0	-I	0	0
3. cívka	0	0	-I	0
4. cívka	0	0	0	-I

3.5.7 Bipolární řízení

Bipolární řízení je zobrazeno na obr. 3-1 b). Při tomto řízení prochází elektrický proud vždy dvěma protilehlými cívkami. Tyto cívky mají navzájem opačně orientované magnetické pole (dáno zapojením). Výhoda v tomto řízení je, že dosáhneme většího kroutícího momentu. Nevýhodou je větší spotřeba elektrické energie a složitější zapojení. [18]

V tab. 3 je znázorněné postupné spínání cívek a pootáčení rotoru. Šedě je zobrazena cívka bez proudu. Magnetické pole modré cívky (I-) přitahuje červený konec magnetu (rotoru). Červeně zobrazená cívka (I+) přitahuje modrý konec magnetu.

Tab. 3 Bipolární jednofázové řízení s plným krokem

				
1. cívka	-I	0	I+	0
2. cívka	0	I-	0	I+
3. cívka	+I	0	I-	0
4. cívka	0	I+	0	I-

3.6 Porovnání způsobů řízení

3.6.1 Porovnání jednofázové a dvoufázového řízení

Při jednofázovém řízení je napájena pouze jedna cívka statoru. Zuby statoru a rotoru jsou navzájem seřazené pro danou fázi.

Dvoufázové řízení využívá současně napájení dvou fází krokového motoru. Při dvoufázovém zapojení je větší krouticí moment, ale i dvojnásobná spotřeba oproti jednofázovému řízení. Velkou výhodou oproti jednofázovému napájení je možnost tlumit oscilace rotoru, které vzniknou při přechodu rotoru z jedné do druhé rovnovážné polohy. [18]

3.6.2 Porovnání bipolárního a unipolárního řízení

Bipolární řízení je nákladnější, zapojení je komplikovanější, ale výhodou je větší krouticí moment. Pro zapojení využijeme dva H-můstky. Proud prochází dvěma protilehlými cívkami a tyto cívky mají navzájem opačně orientované magnetické pole. [5, 18]

Unipolární zapojení je jednodušší a levnější. Prakticky stačí pouze jeden tranzistor na každou cívku. Na statoru je v jednom okamžiku buzená pouze jedna cívka. Motor s tímto řízením má menší odběr a malý krouticí moment. [1, 5]

3.6.3 Porovnání řízení s plným a polovičním krokem

Řízení s plným krokem je nejjednodušší varianta, ale nejméně přesná. Lze tedy říct, že motor na jednu otáčku musí vykonat tolik kroků, kolik zubů na statoru motoru. Je možné ho využít s kteroukoliv metodou řízení. [1, 18]

U motoru s polovičním krokem se rotor pootočí o poloviční úhel, než při řízení s plným krokem. Lze dosáhnout dvojnásobné přesnosti. Jedná se o střídání kroku s jednofázovým a dvoufázovým řízením. [1, 18]

3.6.4 Porovnání řízení krokového motoru v otevřené a uzavřené smyčce

Řízení v otevřené smyčce je velmi často využíváno, ale je nutné počítat s omezenou pracovní oblastí. U řízení bez zpětné vazby motor reaguje na řídicí impuls pootočením o řídicí úhel. Důležité je poznamenat, že motor neví, jestli je rotor pootočen a následně spíná další fázi. Dále se zde velmi často objevují oscilace rotoru, což je velká nevýhoda. [1, 18]

Řízení krokového motoru v uzavřené smyčce zvětšuje pracovní oblast a snižuje oscilace rotoru. Motor vykazuje lepší zrychlení a hladší chod. Výhoda řízení v uzavřené smyčce oproti otevřené je, že známe přesnou polohu rotoru. Motor obsahuje snímač polohy, proto můžeme přesněji řídit spínání fází. [1, 18]

4 Nejnovější aplikace krokových motorů

Krokové motory jsou v současnosti velmi často využívané téměř ve všech oblastech. Jejich aplikace je velmi rozšířená i ve výpočetní technice. Aplikují se i u mechanických pevných disků v počítačích, kde jsou využity pro polohování čtecí hlavy. Dále se využívají u tiskárenských zařízení, kde slouží: k posunu papíru, k pohybu tiskové hlavy a pro pohon fotocitlivého válce. Nejnovější aplikace krokových motorů v oblasti tiskárenského průmyslu je v 3D tiskárnách. [1]

Velmi často se používají ve zdravotní technice pro lékařské sondy, dávkovače léků, čerpadla na krev a v dentálních zařízeních.

Své využití krokové motory našly i v automobilovém průmyslu pro zlepšení komfortu. Zde se používají např. pro nastavení polohy sedaček, pro motorčky k ovládání dosahu světlometu a u zpětných zrcátek.

Našly využití i u letectví a kosmonautiky, kde sloužily k zaostřování a polohování kamer, u kosmických sond a u leteckých přístrojů. V roce 1966 byly použity i na Měsíci, kde pomáhaly filmovat.

V průmyslu se krokové motory využívají hlavně v CNC obráběcích strojích na polohování pracovního stolu, ve strojích pro osazování plošných spojů nebo ve strojích pro řezání a svařování laserem. Dále u papírenských a textilních strojů. Ať už se jedná o navíječky, řezačky, nebo vysekávačky materiálu. Velké využití je právě v textilním průmyslu a to u šicích strojů z důvodu velkého momentu, malých rozměrů a rychlé odezvě motoru. [1]

Velký zájem o využívání těchto motorů je i u robotů, hracích automatů, u modelů železnic, letadel a automobilů. Příklad využití krokových motorů je i u podvozků chytrých robotů.

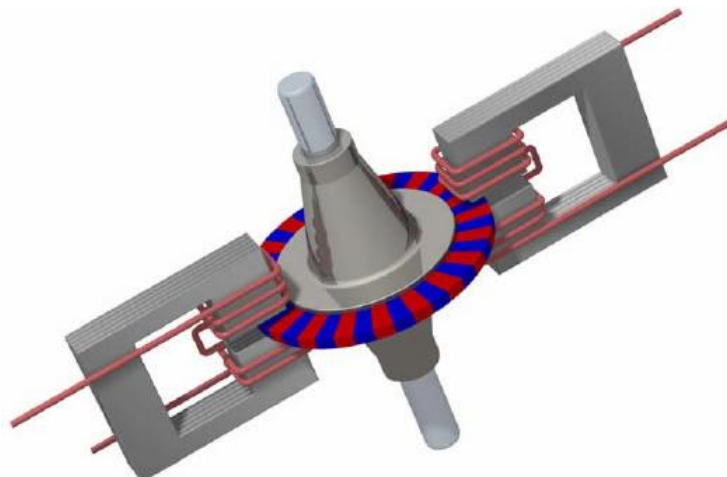
V běžném životě se s krokovými motory také velmi často setkáváme. Jedná se např. o použití v hodinových strojcích, kamerách a fotoaparátech, kde se využívají pro automatické zaostřování a na speciální animační efekty. Dále pro stroje na počítání bankovek, u bankomatů, etiketovacích strojů a u automatů na prodej jízdenek. [1]

Existují i speciální konstrukce krokových motorů pro aplikace ve vakuu při vysokých teplotách pro výrobu polovodičů apod. [1]

4.1 Nejnovější typy krokových motorů

Diskový krokový motor

Mezi novější typ lze zahrnout diskový krokový motor. Tento motor se vyrábí ve Švýcarsku a liší se od všech krokových motorů. Jeho největší rozdíl je, že je axiálně magnetizován. Lze ho využít i u hodinových strojků. [3]



Obr. 4-1 Diskový krokový motor [3]

Miniaturní krokové motory pro přenosné aplikace

Dnešní trend, který postihuje téměř všechna elektronická zařízení (od baterií až po motory) je zmenšování. Princip fungování motoru zůstává stejný. Součástky se stávají menší a menší, a proto krokové motory nejsou výjimkou. Na obrázku 4-2 je zobrazena miniaturní sestava krokového motoru s integrovanou čočkou. Motor zde působí jako lineární pohon pro pohyb laserové čočky v jednotce HP DVD. Celá sestava pohodlně zapadá na minci, který má průměr pouze 17,9 mm. [19]



Obr. 4-2 Krokový motor v DVD jednotce [19]

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo vytvořit přehlednou literární rešerši o krokových motorech, jejich principu, rozdělení, způsobu řízení a praktické využití motorů v praxi.

První kapitola této bakalářské práce je věnována obecnému popisu krokovému motoru. Důležité je zmínit i jeho historii a vývoj, který započal již v půlce 19. století. Dále tato kapitola vysvětluje důležité pojmy k pochopení principu a vymezení velikosti kroku. Princip je vysvětlen na třífázovém motoru, kde dochází k postupnému spínání fází a následnému pootočení o přesně definovaný krok. V závěru této kapitoly jsou uvedeny statické a dynamické charakteristiky krokového motoru.

Druhá kapitola popisuje jednotlivé druhy krokových motorů, ať už provádí rotační (kruhový) pohyb nebo lineární (posuvný) pohyb. Tyto motory lze ještě rozdělit dle jejich konstrukce na tři základní typy. První z nich je krokový motor s proměnlivou reluktancí, který je nejlevnější a nejjednodušší. Další je krokový motor s permanentními magnety, který již obsahuje aktivní rotor (permanentní magnety na rotoru). A poslední druh je hybridní krokový motor, který je v dnešní době nejčastěji využívaný a lze ho vyrobit pro velmi malé úhly kroku.

Třetí kapitola vysvětluje řízení krokových motorů. Řízení krokových motorů lze tedy rozdělit na bipolární a unipolární. Unipolární zapojení je jednodušší i levnější, ale jeho nevýhoda spočívá v malém kroutícím momentu. Bipolární zapojení je složitější, ale lze docílit většího kroutícího momentu. Krokový motor může být řízen v otevřené nebo v uzavřené smyčce. U řízení v otevřené smyčce pracujeme s omezenou pracovní oblastí a vznikají zde oscilace. Ve výsledku je toto řízení levné a velmi často využívané. Motor nedokáže ověřit skutečnou polohu rotoru, zda došlo k posunutí o definovaný krok. Tyto nevýhody odstraníme použitím uzavřené smyčky. Závěr této kapitoly je věnován porovnání jednotlivých druhů řízení.

Poslední kapitola je zaměřena na aplikaci motorů v praxi a dále nejnovějším typům krokových motorů. Lze tedy říci, že krokové motory jsou v dnešní době velmi často používané ve všech odvětvích. Nejznámější využití je například v hodinových strojcích, tiskárnách, u řízení naklápění světlometů u automobilů, v robotice a v CNC strojích. Mezi novější typy lze zahrnout diskový krokový motor a miniaturní krokové motory pro přenosné aplikace.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] HRABOVCOVÁ, Valéria, JANOUŠEK, Ladislav, RAFAJDUS, Pavol, LIČKO, Miroslav. *Moderné elektrické stroje*. Žilina : Žilinská Univerzita, 2001. ISBN 80-7100-809-5.
- [2] PETŘÍČEK, Ivo. [online]. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: https://www.pslib.cz/ivo.petricek/skola/studijni_materialy/prezentace/elektricke_stroje/4_rocnik/08_krok_motor.ppsx
- [3] *Portál o pohonné technice v průmyslu* [online]. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/krokovy-motor>
- [4] BARTOŠ, Václav, ČERVENÝ, Josef, HRUŠKA, Josef, KOTLANOVÁ, Anna, SKALA, Bohumil. *Elektrické stroje*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. ISBN 80-7043-444-9.
- [5] NOVÁK, Petr. *Mobilní roboty: pohony, senzory, řízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-730-0141-1.
- [6] *Robodoupě - Web nejen o robotice* [online]. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z : <http://robodoupe.cz/2013/krokovy-motory-1-typy-motoru>
- [7] *BrainKart Lecture Notes Study Material* [online]. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: http://www.brainkart.com/article/Multistack-Variable-Reluctance-Stepper-Motor_11746/
- [8] *Circuit Globe - All about Electrical and Electronics* [online]. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z : <https://circuitglobe.com/multi-stack-variable-reluctance-stepper-motor.html>
- [9] PISKAČ, Luděk. *Elektrické pohony: principy a funkce*. 2., Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008. ISBN 978-80-7043-688-2.
- [10] *Krokový motor – Wikipedie* [online]. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z : https://cs.wikipedia.org/wiki/Krokov%C3%BD_motor
- [11] SKALA, Bohumil. *Krokové motory* [online]. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z : <https://courseware.zcu.cz/portal/studium/courseware/kev/es/prednasky.html>
- [12] *Circuit Globe - All about Electrical and Electronics* [online]. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z : <https://circuitglobe.com/hybrid-stepper-motor.html>

- [13] NOVOTNÝ, Jan, HNÍZDIL, Jiří. *Rotační a lineární krokové motory* [online]. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z : <http://pavelr.xf.cz/texty%20ELE/Rota%20motory.html>
- [14] *Power Transmission Engineering - Stepper motor actuators* [online]. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z : https://www.powertransmission.com/articles/0615/Stepper_Motor_Actuators/
- [15] *Motion Control Tips - Variablerelectance linear stepper motors* [online]. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <https://www.motioncontroltips.com/?s=Variable-reluctance+linear+stepper+motors>
- [16] *Krokové motory II - Řízení a provoz KM* [online]. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z : <http://slideplayer.cz/slide/2929047/>
- [17] *Pohony s krokovými motorky* [online]. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z : http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/se/cast_C_el_pohony/se_eph_c1_krokac_02_teorie.pdf
- [18] ŘEZÁČ, Kamil. *Robotika-Krokové motory* [online]. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <https://robotika.cz/articles/steppers/cs>
- [19] Arrow - What's new in Stepper motors [online]. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z : <https://www.arrow.com/en/research-and-events/articles/whats-new-in-stepper-motors>