

KROKOVÉ MOTORY

Bakalářská práce

Ladislav Schön

Jihočeská univerzita

Pedagogická fakulta

Katedra fyziky

Měřicí a výpočetní technika

Knihovna JU - PF



3115172525

České Budějovice 2006

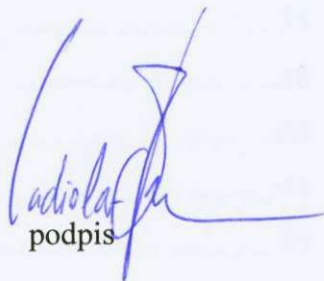
Poděkování

Prohlášení, že jsem touto knihou přečetl, vypracoval a odevzdal jako svou
části závěrečnou práci a že jsem se seznámil s obsahem této knihy a
s tím, že jsem se seznámil s obsahem této knihy a s tím, že jsem se seznámil
s obsahem této knihy a s tím, že jsem se seznámil s obsahem této knihy.

Děkuji doc. PaedDr. Petru Adámkovi, Ph. D., RNDr. Vítězslavu Straňákovi a Ing.
Michalu Šerému za jejich cenné rady a připomínky.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně a veškeré zdroje, ze kterých jsem čerpal nebo z nichž je v této bakalářské práci citováno, jsem řádně uvedl do seznamu použité literatury.


podpis

Obsah

1	Úvod	9
2	Krokové motory a jejich rozdělení	10
2.1	Výhody krokových motorů:.....	11
2.2	Nevýhody krokových motorů:	12
2.3	Rozdělení dle druhu pohybu.....	13
2.3.1	Rotační.....	13
2.3.2	Lineární.....	13
2.4	Rozdělení krokových motorů dle konstrukčního uspořádání	13
2.4.1	Rotační krokové motory s pasivním rotorem	14
2.4.2	Rotační krokové motory s permanentním magnetem	18
2.4.3	Rotační krokové motory hybridní.....	19
2.5	Rozdělení krokových motorů dle způsobu zapojení.....	21
2.5.1	Unipolární krokové motory	22
2.5.2	Bipolární krokové motory.....	23
2.5.3	Bifiliární krokové motory	25
2.6	Řízení krokových motorů	27
2.6.1	Plný krok (čtyř-taktní)	27
2.6.2	Půl-krokové (osmi-taktní) řízení.....	28
2.6.3	Mikrokrokování	29
2.6.4	Řízení krokového motoru se sníženou energetickou náročností	31
2.7	Vlastnosti krokových motorů	32
2.7.1	Momentová charakteristika krokového motoru.....	32
2.7.2	Statická momentová charakteristika	32
2.8	Budící obvody krokového motoru	33
2.8.1	Buzení z napěťového zdroje	34
2.8.2	Buzení vnuceným proudem	34
2.8.3	Buzení z pulzního proudového zdroje	35
2.8.4	Budící obvody pro režim mikrokrokování	38
2.9	Určení krokovacích intervalů	40
2.9.1	Lineární rychlostní charakteristika	41
2.9.2	Lineární akcelerace	43
2.9.3	Dosažení provozní rychlosti v daném kroku	43

2.9.4	Lineární deakcelerace	43
3	Budící obvod a software pro jeho řízení.....	45
3.1	Budící obvodu.....	45
3.1.1	Zdroj budícího obvodu	45
3.1.2	Budící obvod.....	45
3.2	Software.....	46
3.2.1	Paralelní port.....	46
3.2.2	Připojení ovladače k paralelnímu portu.....	48
3.2.3	Řídící sekvence.....	48
3.2.4	Přímý přístup na IO port pod operačním systémem MS-DOS	49
3.2.5	Přímý přístup na IO port pod operačním systémem MS Windows (98,ME,2000,XP, NT)	50
3.2.6	Použití knihovny io.dll	52
4	Terminologie:	54
4.1.1	Přidržený moment - <i>Holding torque</i>	54
4.1.2	Vlastní přidržený moment– <i>Detent torque</i>	54
4.1.3	Reluktance	54
5	Závěr.....	55
6	Literatura a odkazy	56

1 Úvod

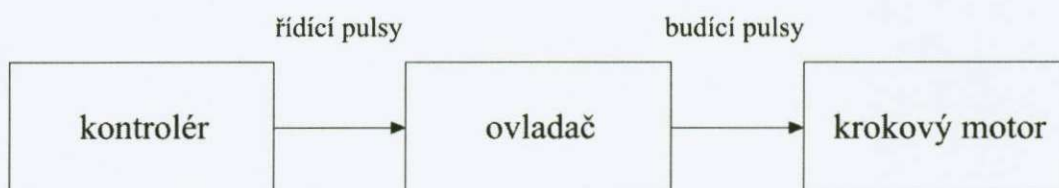
Cílem této bakalářské práce je zaměřit se na problematiku užití krokových motorů. Současně také vznikla potřeba řídit polohování stolku substrátu v plazmatickém reaktoru tryskového typu za účelem homogenního opracování povrchu a pro toto řízení jsou krokové motory ideální. Krokové motory jsou v současné době častým prvkem při řízení polohování v laboratorních i výrobních podmínkách. Diplomová práce bude v podstatě složena ze dvou částí: teoretického úvodu a praktické realizace. V teoretickém úvodu budou popsány a vysvětleny základní vlastnosti KM, jejich výhody a nevýhody. V úvodní kapitole budou KM rozděleny dle konstrukčního uspořádání a dle způsobu zapojení. Dále bude popsáno řízení KM včetně určení krokovacích intervalů a nebudou opomenuty ani jednotlivé způsoby buzení KM. Část druhá, praktická, bude zaměřena na realizaci řízení přesné polohy při plazma chemických procesech. Celá problematika bude řešena komplexně od návrhu budicího obvodu až po řídicí program. Pro řízení XY polohy fyzikálních pokusů jsou pro své vlastnosti vhodné bipolární motory. Motory budou pomocí budicího obvodu řízeny z PC přes paralelní port. Toto řešení je pro laboratorní podmínky vhodné s ohledem na jeho jednoduchost. V průmyslové sféře je takové řízení řešeno složitými řídicími jednotkami. V práci bude vysvětleno softwarové řízení navrženého obvodu v jazyce C++. Součástí bude přiložené CD se zdrojovými kódy aplikace pro řízení XY polohy pomocí dvou bipolárních KM pro Microsoft Visual C++ .NET 2003. Celou práci uzavře krátký slovník termínů používaný v oblasti KM.

2 Krokové motory a jejich rozdělení

Krokové motory (KM) jsou zvláštní formou synchronních motorů. Jsou řazeny mezi servomotory. To znamená, že jsou to převážně motory menších výkonů, určené k přesné, digitálně řízené regulaci polohy. Jejich vlastnosti umožňují přesné řízení úhlu a rychlost natočení. Proto naleznou uplatnění ve velkém množství různých aplikací. Pohyb je nespojitý - pohybují se po jednotlivých úsecích tzv. krocích.

Pulzní řízení předurčuje krokové motory pro použití především v číslicově řízených technologiích. Jelikož krokové motory umožňují nejen přesné nastavování rychlosti, ale i polohování, mohou pracovat jako polohová, případně rychlostí serva v otevřené smyčce. Veškerá vinutí krokového motoru jsou obvykle umístěna ve statoru a motor nemá žádné kluzné kontakty. Komutace, nutná pro vznik točivého magnetického pole, se provádí v elektronickém ovladači. Bez tohoto ovladače není činnost krokového motoru možná. Elektronický ovladač není součástí motoru. Krokový motor nelze sice ovládat přímo číslicovou veličinou, avšak obejde se bez D/A převodníku - postačí logické signály z číslicového řídicího systému. Počtu impulsů přivedených do krokového motoru pak za ideálních podmínek odpovídá počet kroků, tj. poloha či úhel natočení. Poloha rotoru se mění v úhlových přírůstcích – krocích. Krok je mechanická odezva rotoru na jeden puls napájecího obvodu. Frekvenci napájecích impulsů odpovídá rychlost (otáčky). Změně frekvence odpovídá zrychlení (úhlové zrychlení) hřídele krokového motoru.

Systémy využívající krokových motorů se skládají ze tří základních elementů, často kombinovaných s různými typy uživatelských rozhraní.



Obr. 1 Blokové schéma řízení krokového motoru

- Kontrolér – je mikroprocesor schopný generovat krokové pulsy pro ovladač. Kromě toho je kontrolér využíván, pro zavedení různých sofistikovaných

ovládacích příkazů. V jednodušších aplikacích může být nahrazen počítačem

- Ovladač (zesilovač) – převádí řídicí signály kontroléru na požadovaný výkon na buzení vinutí motoru. Ovladače se liší podle typu motoru, který bude ovládán.
- Krokový motor - druhu použitého krokového motoru musí odpovídat i druh ovladače.

2.1 Výhody krokových motorů:

- Rychlost otáčení je úměrná frekvenci vstupních pulsů (frekvence krokování).
- Digitální řízení rychlosti a pozice.
- Práce v otevřené smyčce bez nutnosti zpětné vazby – řízení v otevřené smyčce je jednodušší a méně nákladné, než řízení v uzavřené smyčce. Při řízení v uzavřené smyčce jsou používány čítače (encodéry) pro načítání počtu kroků. Počet načtených kroků je porovnáván s počtem řídicích vstupních pulsů. Tato zpětná vazba je využita na případnou korekci pozice, nebo ke spínání výstražných signálů. Čítač a k němu náležející elektronika však zvyšuje cenu kontrolního systému. Pokud krokový motor správně řídíme, nepřetěžujeme jej a je vhodně vybrán pro danou aplikaci, nemělo by dojít ke ztrátě kroku. V takovém případě se lze obejít bez zpětné vazby a encodér není potřebný. Při vyšších nárocích na dynamické parametry a spolehlivost pohonu je nezbytné i u KM použít zpětnou vazbu, zavedenou z vhodného snímače (např. optoelektrického snímače úhlu natočení hřídele) do řídicí elektroniky (kontroléru).
- Velmi dobré odezvy na zrychlení, zpomalení a změnu směru – mají nízkou setrvačnost, což jim dovoluje téměř okamžitou změnu rychlosti. Tato vlastnost předurčuje krokové motory pro krátké a rychlé pohyby.
- Nekumulativní chyba pozice – chyby se nenačítají s každým krokem. Standardně prodávané kvalitní krokové motory pracují s přesností $\pm 3\text{--}5\%$ z úhlu kroku. To znamená, že pokud motor udělá jeden krok a pootočí se o $1,8^\circ$ bude výsledná chyba $\pm 0,09^\circ$. Stejnou chybu však motor udělá i při jednom milionu kroků a natočení o $1\,800\,000^\circ$. Tato charakteristika dává

tomuto druhu pohonu výbornou schopnost přesného návratu na výchozí pozici.

- Výborný točivý moment při nízkých rychlostech – krokové motory mají nejvyšší točivý moment na jeden mm^3 objemu motoru ze všech ostatních typů.
- Přidržený moment buzeného motoru – narozdíl od ostatních typů motorů, krokové motory drží klidovou pozici.
- Vlastní přidržený moment – i nebuzený motor má tzv. vlastní přidržený moment. Tato vlastnost je charakteristická pro motory s aktivním rotorem (s permanentním magnetem, hybridní motory).
- Obousměrný pohyb – jednoduchá změna směru otáčení motoru jen změnou posloupnosti řídicích pulsů.
- Brždění nepoškodí motor.
- Konstrukčně jednoduché – stejně jako asynchronní motory nemají kartáče ani komutátory.
- Cena a spolehlivost – tato technologie je spolehlivá a prověřená. Jedná se o finančně nejefektivnější metodu přesného řízení pozice.
- Vysoká životnost a bezúdržbovost.

2.2 Nevýhody krokových motorů:

- Rezonance a nestabilita – v praxi zjištěné průběhy momentových charakteristik se liší od katalogových. Tyto odlišnosti se projevují jako poklesy momentové charakteristiky při určitých krokovacích frekvencích.
- Trvalý odběr proudu. Je asi nejzávažnějším nedostatkem krokového motoru, jelikož motor odebírá proud i když se neotáčí.
- Malý výkon – krokové motory jsou určeny pro relativně malé výkony. Ty se pohybují od desetin wattu u nejmenších k maximálně stovkám wattů u velkých KM.
- Nutnost použít elektronický kontrolér a ovladač pro řízení a chod krokového motoru.
- Cena – krokový motor je dražší v porovnání s jinými stejnosměrnými motory.

Možné využití krokových motorů je široké. Používají se nejen v běžné kancelářské praxi, ale i v obráběcích strojích, průmyslových robotech, zdravotnických přístrojích a vojenských zařízeních.

- automatizace výroby – ploterová polohovací zařízení, NC stroje, řízení elektrického výboje, řízení laserů, automatické šicí stroje,
- zařízení pro výrobu polovodičů – mikrosvářečky integrovaných obvodů, kontrolní zařízení IO atd.
- automatizace provozu – pokladní automaty, laboratorní systémy, prodejní automaty, třídače atd.
- zdravotnická zařízení – krevní čerpadla, odstředivky, spektrografy atd.
- administrativa – kopírky, faxy, tiskárny, scannery, čtečky čárových kódů, elektrické psací stroje, optické a magnetické disky atd.

2.3 Rozdělení dle druhu pohybu

2.3.1 Rotační

Rotační krokové motory svou konstrukcí příliš neliší od běžných synchronních motorů. Tato bakalářská práce se zabývá převážně tímto typem KM.

2.3.2 Lineární

Lineární krokové motory mají pevný lineárně rozvinutý stator. Rotor je nahrazen běžcem, který se nad statorem pohybuje po tenkém vzduchovém polštáři. Při pohybu běžce nedochází k žádným mechanickým ztrátám ani opotřebení. Lineární KM mají vysokou účinnost, jsou bez-údržbové a mají dlouhou životnost. Nemají tak velké nároky na prostor jako klasická polohovací zařízení se šroubovicí nebo řemenem. Princip funkce lineárního KM je v podstatě shodný s rotačním KM. Stejně tak způsob řízení je obdobný. Další podrobné informace lze nalézt na [9] a v českém jazyce [1-7]

2.4 Rozdělení krokových motorů dle konstrukčního uspořádání

Z hlediska konstrukčního provedení je lze rozdělit do dvou hlavních skupin. Na motory s pasivním rotorem a aktivním rotorem. S aktivním rotorem se dále dělí na 2 typy: s permanentním magnetem a hybridní. Motory s permanentním magnetem

mají magnetický rotor, zatímco motory s pasivním rotorem mají rotor z měkkého feromagnetického materiálu. Hybridní krokové motory jsou kombinací dvou výše uvedených typů. Typické pro všechny druhy krokových motorů je, že vinutí je umístěno na statorové části magnetického obvodu. Následující kapitola sumarizuje základní rysy zmíněných krokových motorů [1-5,10].

2.4.1 Rotační krokové motory s pasivním rotorem

Jedná se o historicky nejstarší typ krokového motoru. První patent na tento typ motoru byl podán v roce 1919 a běžně komerčně dostupné jsou již od padesátých let. Používán je dodnes, nicméně podstatně rozšířenější jsou v současné době motory s aktivním rotorem.

Rotor tohoto motoru z magneticky měkkého materiálu je bez vinutí. Typicky je tvořen jednodílným ocelovým jádrem, nebo ocelovými plechy nalisovanými na hřídel. Proto jsou tyto motory označovány jako krokové motory s pasivním rotorem. Taktéž bývají označovány jako reakční či reluktanční, případně s proměnnou reluktancí (toto označení vychází z anglického variable reluctance – VR). Po obvodu rotoru jsou vyjádřené póly (zuby). Díky těmto pólům je vzduchová mezera mezi rotorem a statorem proměnná a tím je proměnný i magnetický odpor (reluktance) po obvodu rotoru. Stator je tvořen svazkem ocelových plechů, na nichž jsou vyniklé pólové nástavce nesoucí jednoduchá vynutí jednotlivých fází. Mezi zuby statoru a rotoru je velmi malá vzduchová mezera (0,02 až 0,2 mm). Protilehlá vinutí tvoří vždy jednu fázi. Tyto motory mají od 3 do 5 fází, které jsou standardně vyvedeny. Počet statorových pólových nástavců je dvojnásobný proti počtu fází. Vzhledem k tomu, že v těchto motorech není použit permanentní magnet, nemají tyto motory vlastní přídržný moment. Krouťací moment je v rozsahu mN. m. Tento konstrukční typ není vhodný pro průmyslové použití a pro aplikace vyžadující velký moment. Jejich konstrukce je jednoduchá a levná.

Činnost tohoto krokového motoru je založena na změnách reluktance magnetického obvodu stroje při otáčení rotoru. Rotor se natáčí do polohy, v níž je magnetický odpor obvodu, tvořeného rotorem a póly statoru vybuzenými vinutími, minimální. Při zanedbání reluktance železa vůči vzduchu, rozptylu a zakřivení magnetických indukčních čar ve vzduchové mezeře je reluktance obvodu fáze statoru lineární funkcí překrytí zubů statoru a rotoru. Indukčnost fázové cívky je tedy největší, jsou-li osy zubů rotoru a statoru natočeny proti sobě. Minimální je v poloze posunuté o

polovinu zubové rozteče. Pootočení motoru odpovídající jednomu kroku je dáno rozdílem mezi úhlovým rozestupem zubů statoru a rotoru. Lze jej vyjádřit vztahem [10]

$$\theta_k = 360 \cdot \left| \frac{1}{N_r} - \frac{1}{N_s} \right|,$$

kde N_s počet zubů statoru a N_r počet zubů rotoru. V případě motoru z obrázku Obr. 2 je $N_s = 8$ a $N_r = 6$, velikost jednoho kroku je tedy 15° . Princip činnosti motoru dále předpokládá, že má-li motor N_f vinutí (fází), bude potřeba N_f kroků k tomu, aby se motor pootočil o úhel odpovídající rozestupu zubů rotoru. Jinými slovy to znamená, že zuby statoru, které byly v určitém okamžiku vyrovnány se zuby rotoru, budou s dalšími zuby rotoru vyrovnány právě po N_f krocích. Délka kroku tedy rovněž odpovídá vztahu [10]

$$\theta_k = \frac{360}{N_f \cdot N_r}.$$

Počet fází a zubů statoru a rotoru tak nemůže být libovolný, ale musí splňovat podmínku vyjádřenou vztahem [10]

$$360 \cdot \left| \frac{1}{N_r} - \frac{1}{N_s} \right| = \frac{360}{N_f \cdot N_r} \Rightarrow N_s - N_r = \pm \left(\frac{N_s}{N_f} \right).$$

Velikost základního kroku bývá u tohoto typu KM 15° , $7,5^\circ$, $3,6^\circ$, $1,8^\circ$. Běžnému kroku $1,8^\circ$ odpovídá 200 kroků na 1 otáčku, což dokazuje vztah [3]:

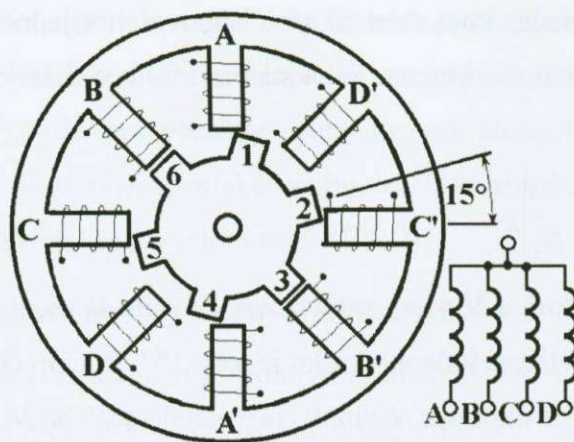
$$N_k = \frac{360}{\theta_k},$$

případně podle [3,10]

$$N_k = N_s \cdot N_r$$

KM je tím kvalitnější, čím menší velikost kroku může dosáhnout.

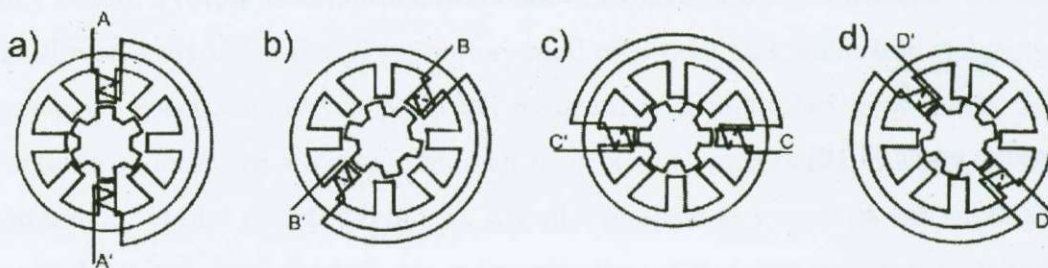
Funkce bude vysvětlena na čtyřfázovém motoru. Příčný řez motoru je znázorněn na obrázku Obr. 2.



Obr. 2 Příčný řez

KM s proměnnou reluktancí

Stator má osm pólových nástavců. Na každém z nich je umístěno statorové vinutí. Dvojice vinutí na protilehlých nástavcích jsou spojeny a tvoří vždy jednu fázi. Celkem jsou na obrázku čtyři fáze označené A, B, C, D. Rotor má na svém povrchu směrem do vzduchové mezery 6 zubů a je bez vinutí. Šířka rotorových a statorových zubů je stejná. V případě napájení fáze protéká příslušným vinutím budící stejnosměrný proud. Na obrázku Obr. 2 je znázorněna situace před připojením pohonu k napájecímu zdroji. Rotor se nachází v jedné z náhodných poloh, která je dána zbytkovým (remanentním) magnetizmem rotoru (nepředpokládáme stav prvotní magnetizace).

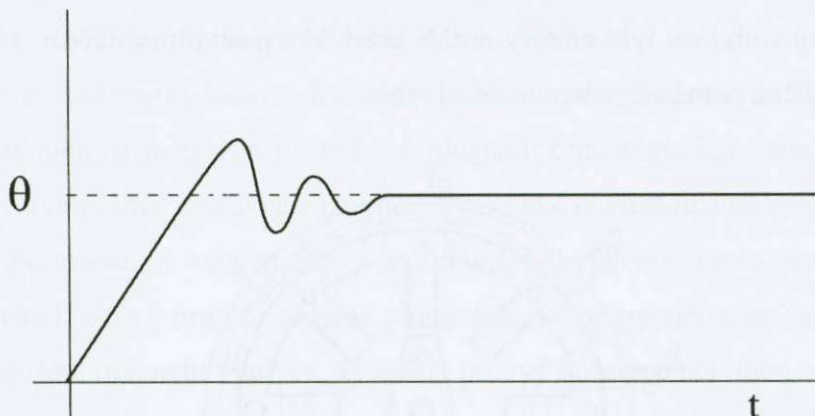


Obr. 3 Pohyb rotoru KM s proměnnou reluktancí v závislosti na přepínání buzení fází vinutí

Předpokládejme, že první kombinaci sepnutí fází bude (1,0,0,0), což odpovídá průtoku budícího proudu fází A. Ostatní fáze nejsou buzené. Tento stav je na obrázku a). Z obrázku je zřejmé, že se rotor pootočí tak, aby zaujal místo minimálního magnetického odporu. Jinými slovy lze také říci, že se proti statorovým pólům, které jsou buzeny fází A nastaví nejbližší rotorové zuby do souhlasné polohy. Po dobu buzení fáze A se rotor bude nacházet v magneticky

klidové poloze, až do doby změny kombinace sepnutých fází. Znovu je třeba upozornit na rozdílný počet zubů motoru a statoru z nichž je zřejmé, že se rotorové zuby nekryjí se statorovými postupně o $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ a $\frac{3}{4}$ rotorové zubové rozteče. Pokud dojde nyní ke změně kombinace buzených fází ze současné (1,0,0,0) na (0,1,0,0), tzn. bude buzena pouze fáze B, rotor se bude snažit zaujmout takovou polohu, aby protékal maximální magnetický tok. Na základě toho se rotor pootočí skokem vlevo o jeden krok. Pro náš uvažovaný případ to je o jednu čtvrtinu zubové rozteče. Stav motoru je znázorněn nyní na obrázku b). Při další změně kombinace buzení na stav (0,0,1,0) se pootočí magnetické pole do osy statorových zubů buzené fáze C. Rotor se pootočí obdobným způsobem do nové magnetické klidové polohy, která je nyní zobrazena na obrázku c). Dalším řídicím impulzem (0,0,0,1) se začne budit fáze D a rotor se opět pootočí o jeden krok podle obrázku d). Následující impuls nastaví kombinaci buzení fází na (1,0,0,0), která odpovídá výchozí situaci a celý děj se následně cyklicky opakuje. Pro námi uvažovaný KM je velikost kroku 15° . Nebo-li tento KM vyžaduje 24 kroků na jednu otáčku.

Krokování motoru ovšem neprobíhá skokovou změnou, ale přibližně podle obrázku Obr. 4. Rotor se nejprve překmitne a teprve poté se ustálí v klidové poloze. Velikost tohoto překmitu a časové ustálení závisí na momentu setrvačnosti poháněného zařízení a tedy i na momentu setrvačnosti rotoru s hřídelí. Více informací lze nalézt v [1,10,11]



Obr. 4 Přejchodová charakteristika krokového motoru

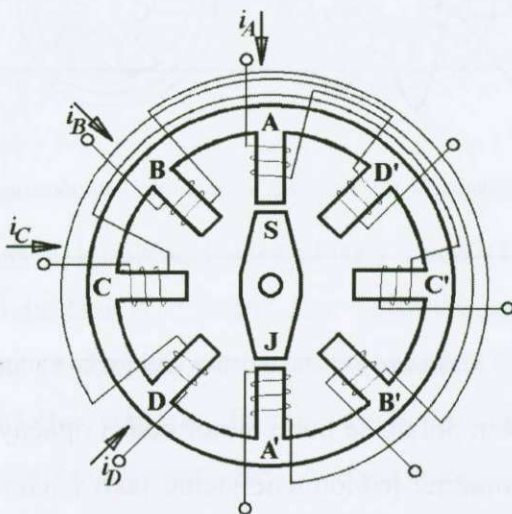
Při spínání fází v opačném pořadí se bude motor otáčet opačným směrem. Ovládání tohoto motoru je tak poměrně jednoduché stejně jako i jeho elektrické připojení. Cívky jednotlivých fází jsou na jedné straně spojeny dohromady. Tento společný

vývod je obvykle spojen s kladným pólem napájecího zdroje. Druhé strany cívek jsou ve vhodném pořadí spínány proti zemi. Zde by bylo dobré upozornit na to, že u tohoto typu KM nezáleží na směru proudu budícího fáze.

2.4.2 Rotační krokové motory s permanentním magnetem

Rotor je tvořen permanentními magnety, které jsou na rotoru buď nalepeny, nebo jsou do něj zapuštěny. Tyto motory bývají také označovány jako krokové motory s aktivním rotorem. Na obvodu rotoru se střídají severní a jižní póly permanentních magnetů. Počet statorových zubů je závislý na počtu fázových vinutí. Stator má tolikrát více zubů než rotor pólů kolik má motor fází (např. stator dvoufázového KM má 2krát tolik zubů než rotor pólů). Rotor se po přepnutí fází nastavuje tak, aby souhlasila polarita magnetů s tokem statoru. Na rozdíl od reluktančního KM je polarita proudu v buzených cívkách důležitá. Jejich nedostatkem je relativně velký krok, který se u běžných typů pohybuje nejčastěji mezi $7,5$ až 15° (48 až 24 kroků na otáčku).

Proto je častěji používáno hybridních KM. Jejich momentová zatížitelnost je větší, než u motorů s proměnnou reluktancí - jednotky N. m. Poměrně běžně jsou používány především v neprůmyslových aplikacích jako jsou počítačové periferie apod. Časová konstanta vlivem zařazení permanentního magnetu je kratší. Tento typ umožňuje vyšší provozní kmitočty, než u motoru s pasivním rotorem (jednotky až desítky kHz). S ohledem na použití aktivního rotoru, který vyžaduje složitější magnetický obvod, jsou tyto motory dražší než KM s pasivním rotorem, avšak jsou stále konstrukčně poměrně jednoduché a levné.

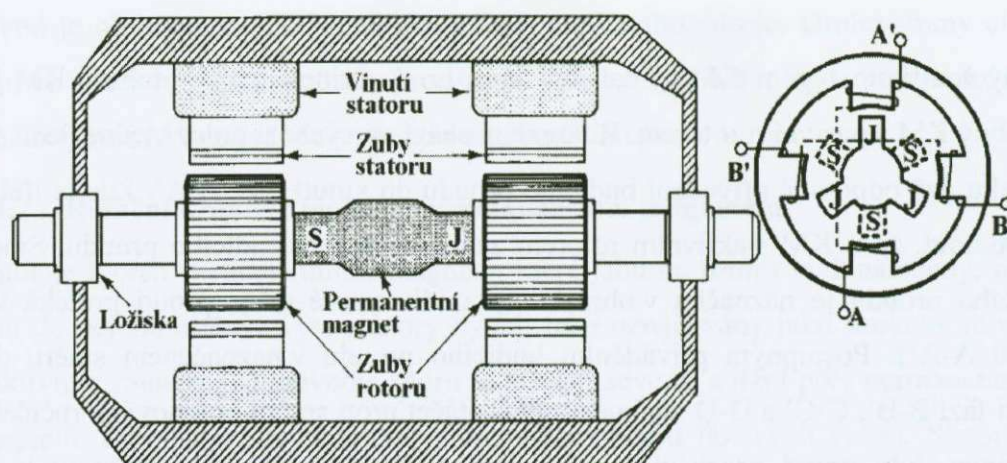


Obr. 5 Příčný řez KM s permanentním radiálně polarizovaným magnetem

Příčný řez tímto typem KM je na obrázku Obr. 5. Princip funkce tohoto KM je podobný KM s pasivním rotorem. Rotor se nachází ve výchozí poloze zakreslené na obrázku, jež odpovídá přivedení budícího proudu do vinutí fáze A-A'. Zde je třeba podotknout, že u KM s aktivním rotorem záleží na směru budícího proudu. Směr budícího proudu je naznačen v obrázku (pravidlo pravé ruky, proud protéká ve směru A-A'). Postupným přiváděním budícího proudu v naznačeném směru do vinutí fází B-B', C-C' a D-D' se bude motor otáčet proti směru hodinových ručiček. Ve stavu, kdy proud prochází vinutím fáze D-D' a severní pól magnetu je u pólového nástavce statoru D', je pro pokračování otáčení proti směru hodinových ručiček potřebné přivést budící proud znovu do vinutí fáze A-A' ovšem s obrácenou polaritou (tzn. proud bude protékat vinutím ve směru A'-A). Otáčení bude pokračovat zapojováním vinutí B-B', C-C', D-D' s opačnou polaritou proudu (proud bude protékat ve směru B'-B, C'-C, D'-D). Následně bude opět připojeno vinutí fáze A-A' s původní (výchozí) polaritou proudu (směr proudu A-A'). Děj se bude dále cyklicky opakovat. Ovládání tohoto typu motoru je tudíž komplikovanější, neboť musí docházet ke změnám směru proudu budícího jednotlivé fáze statoru.

2.4.3 Rotační krokové motory hybridní

V současné době je to nejpoužívanější typ krokového motoru a kombinuje konstrukci a vlastnosti obou předchozích druhů. Je proto označován jako hybridní KM. Rotor motoru je tvořen hřídelí z nemagnetického materiálu. Na hřídeli jsou nalisovány dva pólové nástavce z magneticky měkké oceli. Mezi pólovými nástavci je uložen permanentní magnet, který je axiálně polarizován, proto je tento motor také nazýván krokový motor s axiálně polarizovaným permanentním magnetem. Ze způsobu uložení magnetu vyplývá, že každý pólový nástavec má jinou magnetickou polaritu a jsou vzájemně v osové směru natočeny o polovinu rotorové zubové rozteče. Proti zubům jednoho pólového rotorového nástavce jsou drážky druhého. To je zřejmé i ze zjednodušeného příčného řezu viz obrázek Obr. 6.



Obr. 6 Podélný a příčný řez hybridním KM s axiálně polarizovaným permanentním magnetem

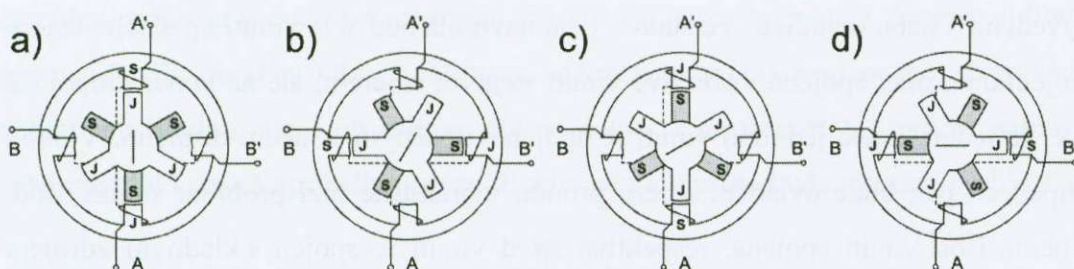
Obě části statoru jsou oproti tomu vyrovnány. Na příčném řezu je tedy nelze rozlišit. Vinutí statoru jsou provedena tak, že ty pólové nástavce statoru, které na příčném řezu splývají, jsou buzeny vždy stejným vinutím a vytvářejí magnetický krok stejného směru. Počet pólů skutečného motoru je samozřejmě vyšší než je zobrazeno na obrázku. . Počet zubů po obvodu rotorového pólového nástavce, určuje velikost kroku (např. pro 50 rotorových zubů vychází velikost kroku 1. 8°). Což je zřejmé ze vztahu

$$\theta_k = 360 \cdot \frac{|N_s - N_r|}{|N_s \cdot N_r|}.$$

Základní krok těchto motorů je malý. V současné době se nejrozšířenější hybridní motory konstruují s typickou velikostí kroku od 0,36° do 5° (1000 až 72 kroků na jednu otáčku).

Stejně jako na obrázku jsou hybridní motory nejčastěji dvoufázové. Lze se však setkat i s tří- a pětifázovým provedením. Běžně vyráběné pětifázové motory mají plný krok 0,72° a rotují hladce s menším kolísáním otáček. To znamená snadnější řešení rezonančních problémů při aplikacích, kde vibrace a hluk činí problémy. Nespornou výhodou pětifázových KM je výhodnější charakteristika „start-stop“, v důsledku které se zkracuje odezva. Ve srovnání s předchozími dvěma typy jsou hybridní motory schopné vyvinout větší moment a mají větší rozběhový i provozní kmitočet. Moment je od jednotek mN. m do desítek N. m. Tento druh motoru vykazuje při daném objemu 2 až 2,5krát větší krouticí moment než motory s proměnnou reluktancí. Především v průmyslových aplikacích jsou

nejrozšířenějším typem krokových motorů. Vzhledem ke své konstrukční náročnosti patří však mezi nejdražší typ KM.



Obr. 7 Pohyb rotoru hybridního KM v závislosti na přepínání buzení fází vinutí

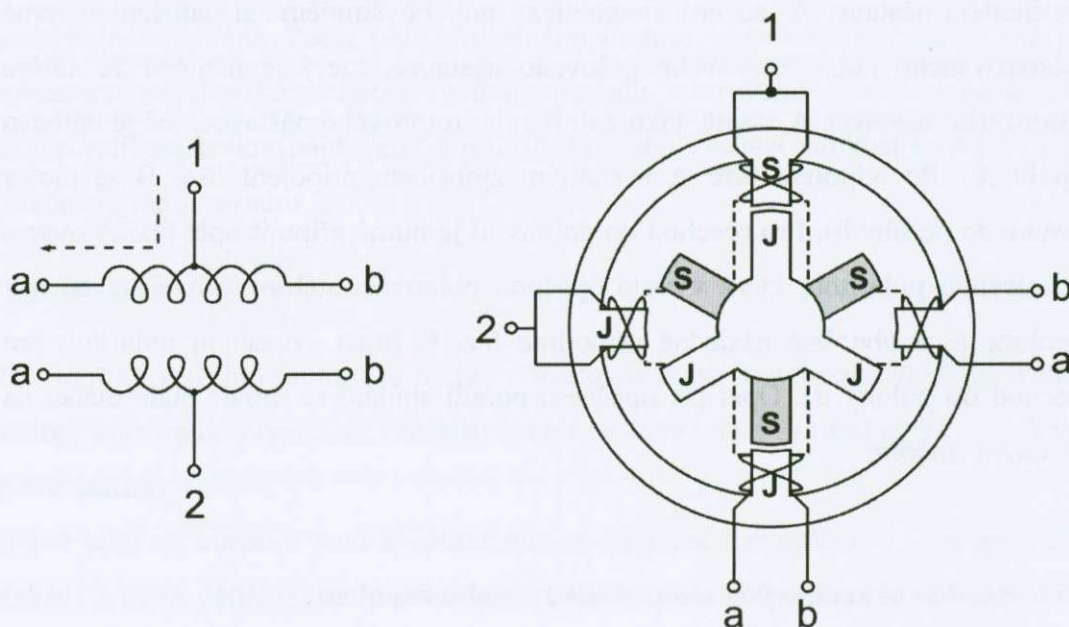
Způsob řízení hybridního KM je znázorněn na obrázku Obr. 7. Poloha a) odpovídá stavu, kdy vývod A připojíme na kladný pól zdroje a A' je zemněno. Vinutím tedy protéká proud v dohodnutém směru $A-A'$. Takto protékající proud vytvoří na vnitřním okraji statorového pólového nástavce A jižní magnetický pól, na protilehlém nástavci A' severní magnetický pól. Povšimněme si natočení severně polarizovaného zubu rotorového pólového nástavce, který je natočen ve směru statorového nástavce A stejně, jako zub jižního rotorového nástavce, jež je natočen k pólu A' . Po odpojení fáze A a stejným způsobem připojení fáze B se motor posune do polohy b). Pro přechod do polohy c) je nutné připojit opět fázi A ovšem s obrácenou polaritou, která vyvolá opačnou polarizaci statorových nástavců než v poloze a) a obdobně následně připojíme fázi B (opět s opačnou polaritou pro přechod do polohy d). Opět při opačném pořadí spínání se motor bude otáčet na opačným směrem.

2.5 Rozdělení krokových motorů dle způsobu zapojení

Narozdíl od motoru s proměnnou reluktancí se v řídicích sekvencích motorů s aktivním rotorem (hybridní i s permanentním magnetem) objevuje požadavek na změnu směru proudu v jednotlivých fázích. Podle toho, jak je realizován, rozlišujeme unipolární, bipolární a bifilární krokové motory. Při unipolárním zapojení jsou jednotlivá vinutí zdvojená s vyvedeným středem (bifilární vinutí). V bipolárním zapojení je vinutí jednoduché. Podle požadovaného kroutícího momentu, přesnosti nastavení polohy a přípustného odběru volíme některou z těchto variant (další informace je možné nalézt v [1-6,10]).

2.5.1 Unipolární krokové motory

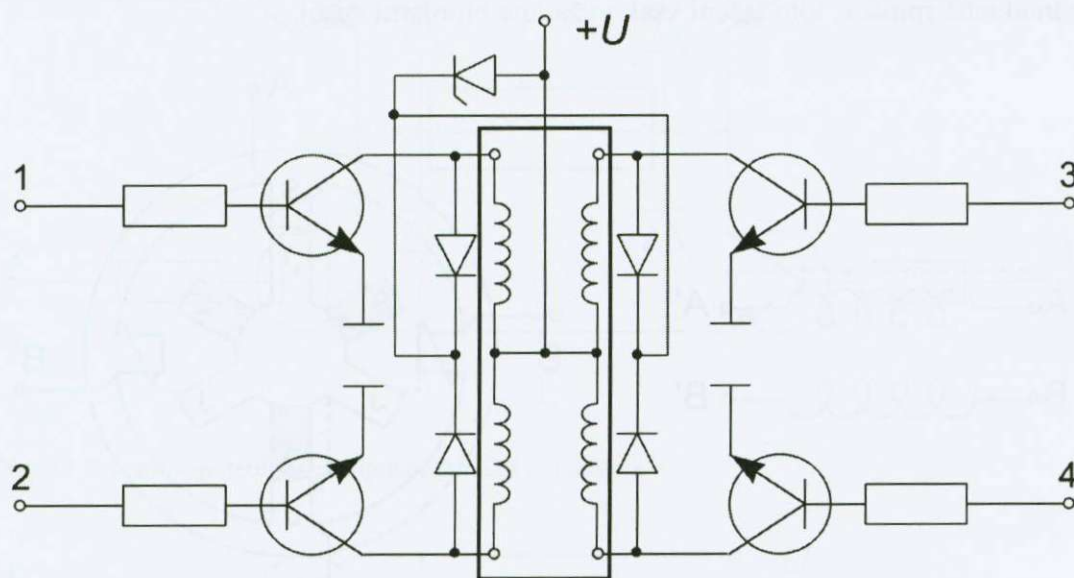
Uvažujeme-li 2-fázový unipolárně zapojení krokový motor, má takový motor vyvedeno 5 nebo 6 vodičů. Ve statoru jsou navinuta buď dvě vinutí opačného směru na jednom konci spojená, nebo dvě vinutí stejným směrem, ale na konci propojená tak, že jeden konec jednoho vinutí je spojen s opačným koncem druhého. V obou případech pak bude ovládání směru proudu v příslušné fázi probíhat stejně. Bod, v němž jsou vinutí spojená, respektive střed vinutí je spojen s kladným zdrojem napájecího zdroje a směr magnetického toku záleží na tom, kterou částí vinutí prochází proud. Nebo-li který z obou zbývajících vývodů je spojen se zemí. Střed jednotlivých fází jsou často spojeny již přímo uvnitř motoru a vyvedeny jako jeden vodič. Počet vývodů motoru je pak roven dvojnásobku počtu fází zvětšeném o jednu. Nejběžnější dvoufázový motor tedy bude mít 5 vývodů a bývá někdy mylně považován za čtyřfázový reluktanční motor.



Obr. 8 Schéma unipolárního KM

Elektronické obvody potřebné pro unipolární způsob buzení jsou jednodušší a tedy i levnější, jelikož není nutné měnit polaritu napětí na cívce, ale postačí spínat její jednu, či druhou polovinu proti zemi. Stojí také za zmínku, že vinutí jedné fáze nejsou nezávislá, ale jsou propojená a navinutá na stejných pólových párech. Fungují tedy podobně jako autotransformátor a v důsledku toho se mezi kolektorem a emitorem spínacích výkonových tranzistorů mohou objevit záporné napěťové

špičky. Bývá proto doporučováno použít čtveřici ochranných diod zapojených tak, že jejich katoda je spojena s kolektorem spínacího tranzistoru a anoda se zemí. Pro zrychlení poklesu proudu po rozeptnutí tranzistoru je možné použít Zenerovu diodu zapojenou dle obrázku Obr. 9. Díky ní indukčnost vinutí není pouze zkratována ochrannou diodou, ale v obvodu se objeví navíc i „protinapětí“, které by samo o sobě vyvolalo proud opačného směru. Pokles proudu proto bude výrazně rychlejší.



Obr. 9 Schéma zapojení unipolárního KM

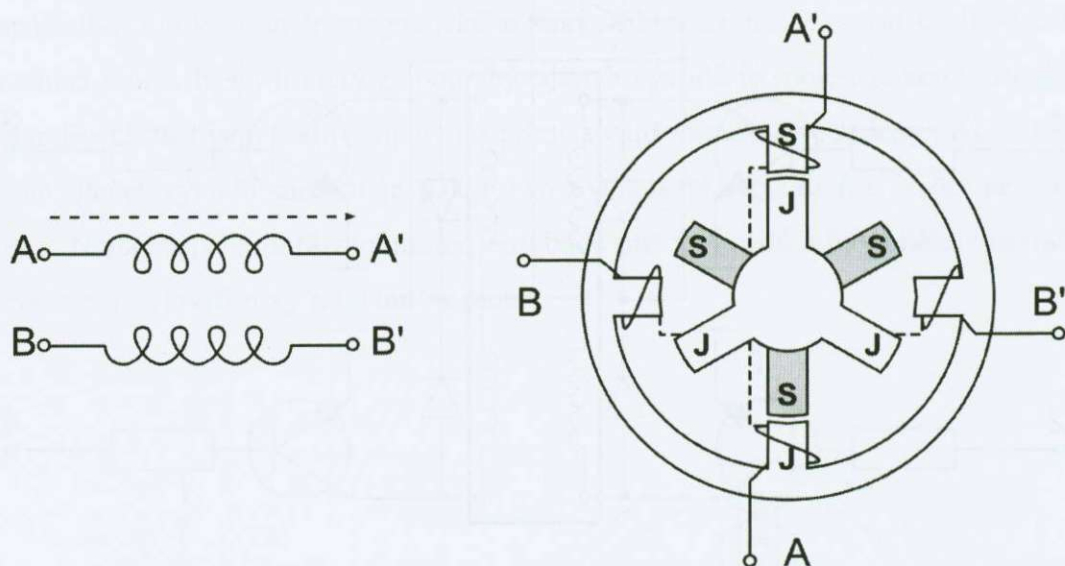
Zvláště u motorů menších výkonů, jejichž proudový odběr se pohybuje ve stovkách mA či jednotkách A je nejvýhodnějším a nejlevnějším řešením výkonové části použít integrované obvody například ULN2803A nebo ULN2064B a jim podobné. Tyto IO obsahují skupiny spínačů v Darlingtonově uspořádání spolu s ochrannými diodami a bázovými odpory vhodně zvolenými tak, aby mohly být buzeny přímo z výstupů obvodů TTL. Výkonový obvod s použitím těchto součástek je pak velmi jednoduchý a levný.

Je-li motor buzen unipolárně, pak v oblasti nižších krokovacích frekvencí vykazuje nižší krouticí moment. Naopak v oblasti vyšších krokovacích frekvencí je jeho krouticí moment nižší, než v případě bipolárního buzení.

2.5.2 Bipolární krokové motory

U bipolárních krokových motorů každé fázi odpovídá jedno vinutí, které je podle konstrukce příslušného motoru navinuto na jednom či více pólových párech a oba jeho konce jsou vyvedeny. Počet vývodů motoru je tak dvojnásobkem počtu fází. U

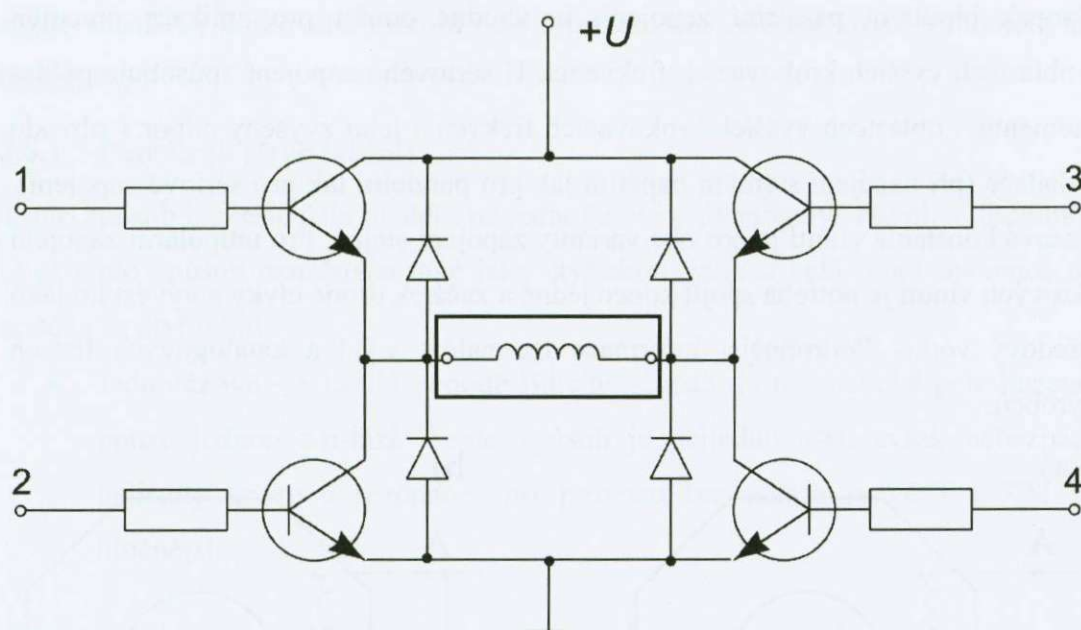
dvoufázového bipolárního KM jsou tedy vyvedeny 4 vodiče. Pokud zapojení motoru vyžaduje bipolární buzení, musíme zajistit kromě buzení dané fáze také změnu polarity protékajícího budícího proudu. Z tohoto důvodu je toto uspořádání označováno jako bipolární. Změnou polarity proudu měníme směr magnetického toku generovaného fázovým vinutím. Tuto polaritu ovládáme nejčastěji tzv. H-můstkovým spínačem s unipolárním napájením viz. Obr. 11. Případně lze použít jednoduché spínače, toto řešení však vyžaduje bipolární zdroj.



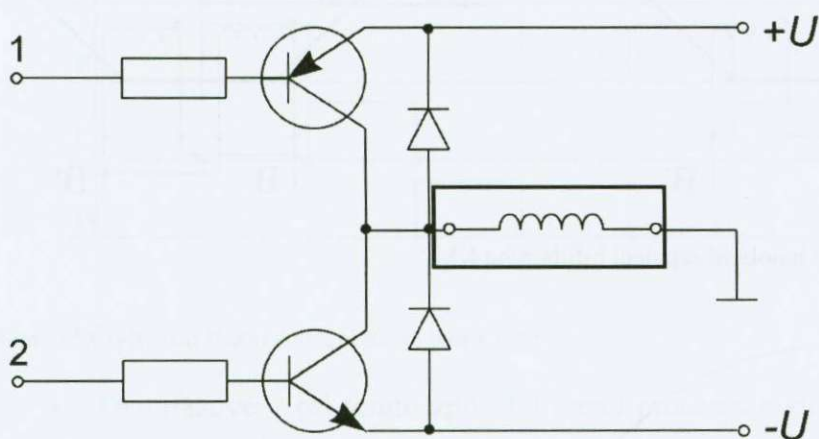
Obr. 10 Schéma bipolárního KM

Vinutí, které lze vtěsnat do motoru určité velikosti, je omezeno velikostí motoru. Proto jsou unipolárně a bifiliárně vinuté motory v nevýhodě oproti bipolárním, jelikož mají ve stejném prostoru místo jednoho vinutí dvě. Z tohoto důvodu musí být provedena vodičem menšího průřezu. Důsledkem je větší odpor vinutí a tedy při stejném napájecím napětí menší proud a menší moment na hřídeli motoru. Obojí lze zvýšit použitím vyššího napájecího napětí. Nepřekročitelným omezením je však vzrůstající výkonová ztráta, která je při stejném proudu a větším odporu samozřejmě úměrně větší a způsobuje zahřívání vinutí motoru. Při stejné výkonové ztrátě na motoru tak bipolární motory vytvářejí asi o 40 % větší moment. Bipolární motor se stejnou výkonovou zatížitelností bude menší s nižší výkonovou ztrátou než jemu odpovídající motor unipolární. Z těchto důvodů se v současnosti motory s bipolárním vinutím jeví obvykle jako výhodnější a to i přes jejich relativně složitější řízení. Bipolární vinutí dosahuje vyšších momentů. Pro aplikace

preferující vyšší krouticí moment při nižších krokovacích kmitočtech, bipolární buzení poskytne lepší výsledky.



Obr. 11 Schéma zapojení vinutí bipolárního KM - H můstek

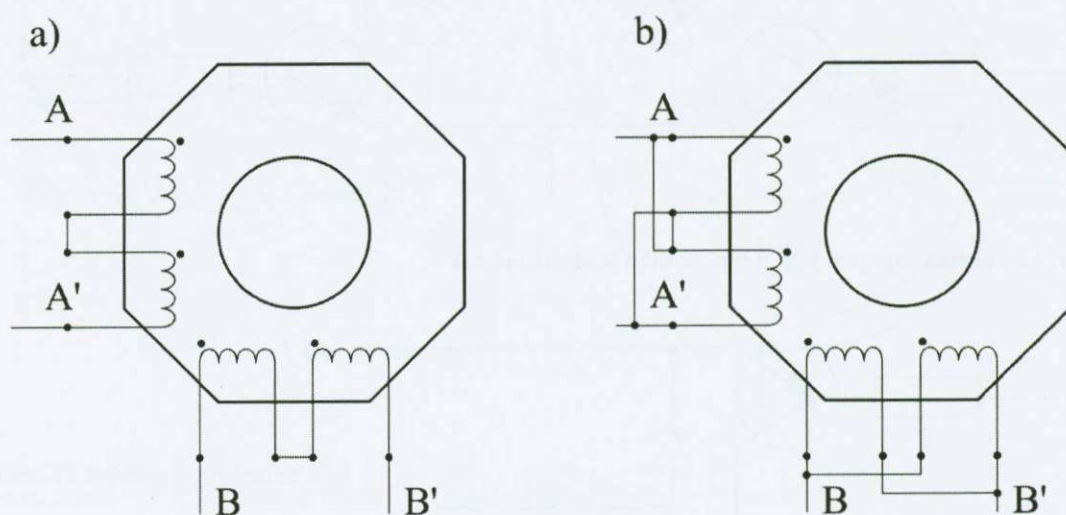


Obr. 12 Schéma zapojení vinutí bipolárního KM s bipolárním zdrojem

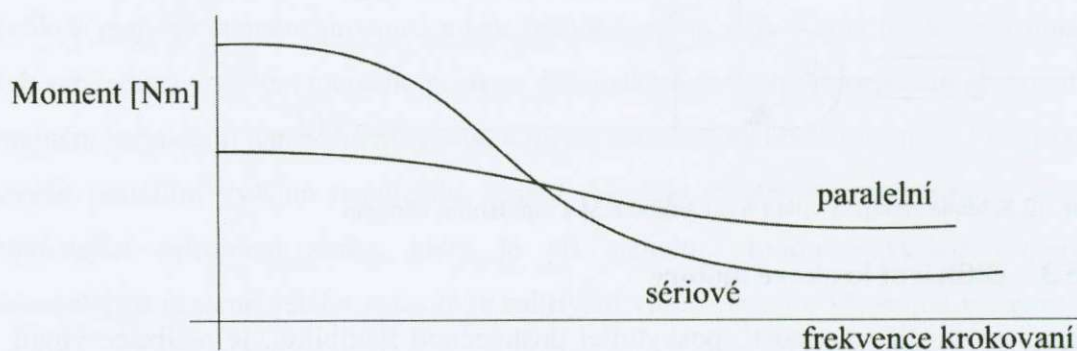
2.5.3 Bifiliární krokové motory

Nejuniverzálnější možností, poskytující dostatečnou flexibilitu, je realizace vinutí jako bifiliární někdy označované jako univerzální. Místo jednoho vinutí s jedním vodičem, se tak ve statoru objeví dvě vinutí (stejně jako u unipolárně zapojených KM). Takovýto motor můžeme následně zapojit bipolárně nebo unipolárně. Pokud jej budeme budit bipolárně, můžeme jednotlivé části vinutí spojit sériově Obr. 13a nebo paralelně Obr. 13b. Při sériovém zapojení je výsledný odpor vinutí a

indukčnost čtyřnásobný oproti paralelnímu zapojení. To se projeví zvýšením momentu v oblastech nižších krokovacích frekvencí momentové charakteristiky. Naopak bipolární paralelní zapojení, je vhodné použít pro aplikace pracující v oblastech vyšších krokovacích frekvencí. U sériového zapojení způsobuje pokles momentu v oblastech vyšších krokovacích frekvencí jeho zvýšený odpor v obvodu ovladače (při napájení stejným napětím jak pro paralelní tak pro sériové zapojení). Časová konstanta vinutí je pro obě varianty zapojení stejná. Pro unipolární zapojení fázových vinutí je potřeba spojit konec jedné a začátek druhé cívky a vyvést ho jako středový vodič. Podrobnější informace lze nalézt v [1] a katalogových listech výrobců.



Obr. 13 Sériové a paralelní bipolární zapojení bifiliárního KM



Obr. 14 Srovnávací momentová charakteristika sériového a paralelního zapojení

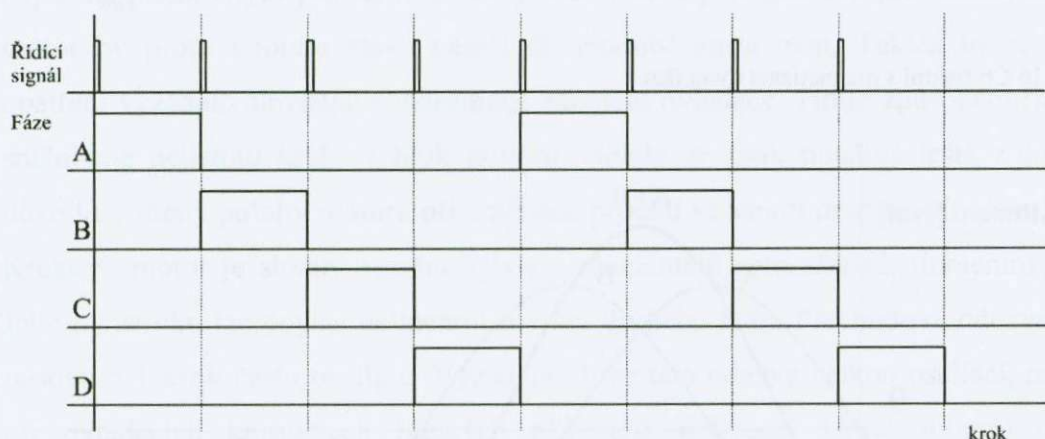
2.6 Řízení krokových motorů

Pohyb krokového motoru lze řídit několika způsoby. Jednotlivé způsoby ovlivňují různé vlastnosti krokového motoru jako je především velikost kroku a moment na hřídeli.

2.6.1 Plný krok (čtyř-taktní)

Tento způsob lze ještě dále rozdělit na jednofázové a dvoufázové řízení. V literatuře bývá tento způsob označován také jako čtyřtaktní, jelikož celá řídicí sekvence se sestává ze čtyř taktů.

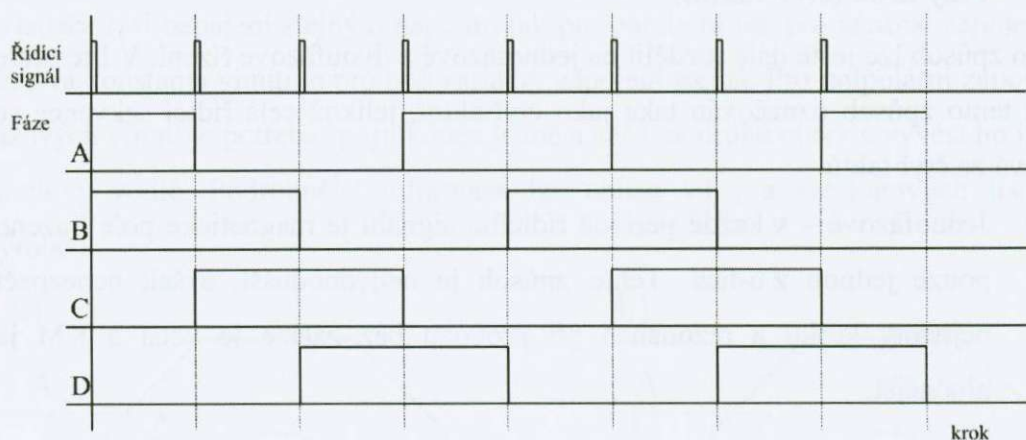
- Jednofázové – v každé periodě řídicího signálu je magnetické pole buzeno pouze jednou z n -fází. Tento způsob je nejjednodušší, avšak nebezpečí nejistoty kroku a rezonance při provozu bez zátěže je větší a KM je hlučnější.



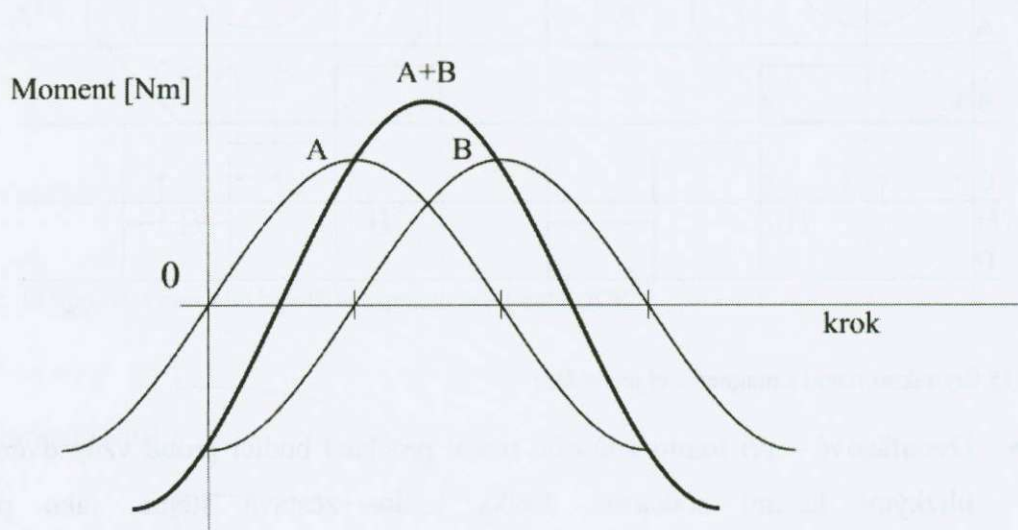
Obr. 15 Čtyřtaktní řízení s magnetizací jedné fáze

- Dvoufázové – při tomto způsobu řízení prochází budící proud vždy dvěma blízkými fázemi současně. Délka kroku zůstává stejná, jako při jednofázovém buzení (celý krok). Změní se pouze klidová magnetická poloha rotoru. Rotor se nastaví do takového stavu, aby silová působení od obou pólových párů statoru byla v rovnováze. Při stejném buzení obou fází je tato poloha přesně v polovině mezi statorovými póly. Výhodou dvoufázového řízení je větší magnetický tok v motoru, vznikající v důsledku buzení dvou vinutí zároveň a následně i větší moment na hřídeli motoru. Moment je v porovnání s předchozím způsobem řízení přibližně dvakrát větší. Proto je dvoufázové řízení používáno podstatně častěji než

jednofázové. Další výhodou jsou větší tlumící účinky mechanických oscilací rotoru při krokování, způsobené vyšší strmostí výsledné statické momentové charakteristiky, což dovolí dosáhnout vyšších krokovacích frekvencí viz Obr. 17. Toto řešení má nevýhodu v dvojnásobné proudové spotřebě, která má z následků větší ohřev KM.



Obr. 16 Čtyřtaktní s magnetizací dvou fází



Obr. 17 Statická momentová charakteristika s buzením dvou fází

2.6.2 Půl-krokové (osmi-taktní) řízení

Někdy též označován jako osmi-taktní způsob řízení KM. Toto řízení vznikne sloučením jednofázového a dvoufázového způsobu řízení. Mezi jednotlivé kombinace jednofázového řízení jsou vloženy prvky řízení dvoufázového. Při tomto způsobu řízení jsou střídavě buzeny jedna a dvě fáze současně. Výhodou je zmenšení základní velikosti kroku na polovinu. Toto zmenšení s sebou přináší

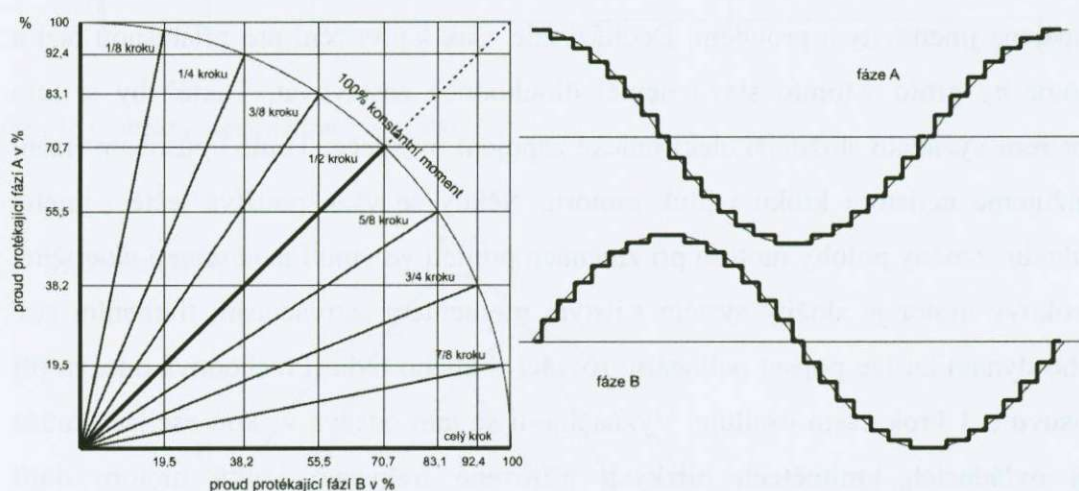
zdvojnásobení počtu kroků na jednu otáčku. Je dobré si uvědomit, že toho dosahujeme bez jakékoliv úpravy stávajících budících obvodů. Jelikož dochází ke střídání buzení jedné nebo dvou fází, mění se v tomto rytmu i hodnota provozního momentu na hřídeli KM z důvodu vektorového součtu magnetických toků obou pólových nástavců. Moment na hřídeli je v polohách, kdy jsou zapnuty obě fáze, asi o 40% větší (násoben faktorem $\sqrt{2}$) než v těch případech, kde je zapojená pouze jedna. Tuto skutečnost nelze zanedbat. Rovnoměrnosti vytvářeného momentu však lze dosáhnout tak, že v těch polohách, kdy je zapojená pouze jedna fáze, zvětšíme její proud o 40% ve srovnání s proudem procházejícím každou ze zároveň zapnutých fází. Tím dosáhneme průběhu, který bude přibližně rovnoměrný. Z hlediska motoru to neznamena úhrnné tepelné přetížení, neboť výkon ztracený na jednom vinutí při proudu zvětšeném na 140% je stejný, jako když jsou obě vinutí napájena jmenovitým proudem. Dochází zde však k přetížení pro příslušnou fázi a motor by proto v tomto stavu neměl dlouhodobě zastavovat. Taktéž by si toto opatření vyžádalo složitější elektronické zapojení ovladače. Tímto způsobem řízení snižujeme nejistotu kroku i hluk motoru. Někdy se však používá ještě z jiného důvodu. Změny polohy motoru při změnách proudu ve vinutí nenastávají okamžitě. Krokový motor je složitý systém s jistým momentem setrvačnosti, tlumením atd. Jeho dynamiku lze popsat nelineární rovnicí druhého řádu. Přechodová odezva při posuvu o 1 krok často osciluje. Vyznačuje-li se tato odezva velkou oscilací, může při ovládacích kmitočtech blízkých přirozené frekvenci kmitů motoru dojít k problémům s rezonancí. Ty se navenek projeví vynecháním kroků či výpadkem synchronizace. Velikost kmitání a překmitů závisí na velikosti kroku (systém je nelinerární). Možným přístupem jak omezit tyto problémy s rezonancí je řízení s polovičním krokem.

2.6.3 Mikrokování

Při některých aplikacích (tiskárny, fototechnika, mikromechanika, robotika atd.) je požadováno velice jemné krování (například zlomky stupně). Úhel kroku je dán konstrukcí krovového motoru. Může být zmenšen zvětšením počtu fází nebo rotorových zubů. Je však nevýhodné pracovat s větším počtem fází než 4 a je nákladné vyrobít rotor s více než 100 zuby. Krovové motory s úhlem pod 1° jsou

tedy výjimkou. Dalšího zmenšení kroku je tedy možné dosáhnout způsobem řízení známým jako mikrokrokování při kterém je možno každý krok rozdělit na určitý počet mikrokroků stejné délky. V praxi je možno krok rozdělit do maximálního počtu 64 až 128 mikrokroků.

Princip mikrokrokování je rozšířením řízení s polovičním krokem, v němž byly použity dva shodné proudy, v jejichž důsledku se v motoru vytvořil tok, odpovídající výslednici jednotlivých dílčích toků a způsobil odpovídající natočení rotoru. Změnou amplitud obou proudů lze spojitě natáčet směr výsledného toku a polohovat tak motor daleko jemněji, než odpovídá jeho základní velikosti kroku. Tímto způsobem lze rovněž omezit problémy s rezonancí a polohovat motor velmi přesně, téměř spojitým nikoli trhaným pohybem. Jsou k tomu však zapotřebí podstatně složitější řídicí obvody.



Obr. 18 Průběhy proudů při mikrokrokování (8 mikrokroků)

Pro buzení je nutno použít vícehladinový napájecí zdroj a zajistit potřebné řídicí impulzy pro řízení tohoto zdroje. V současné době se vyrábějí speciální integrované obvody určené k buzení krokových motorů, které zajišťují i mikrokrokování až do 128 mikrokroků.

Nevýhodou mikrokrokování je vzrůst relativní nepřesnosti mikrokroků, vzhledem k tomu, že absolutní chyba kroku je stále stejná a mikrokrokováním se nezmenšuje. Jak již bylo řečeno, dalším velmi důležitým přínosem mikrokrokování je snížení mechanických rezonancí. Tyto rezonance také závisí na charakteristikách poháněné zátěže a způsobu buzení jednotlivých fází krokového motoru. Rezonance mohou způsobit ztrátu synchronizace rotoru, což v důsledku způsobí ztrátu kroku.

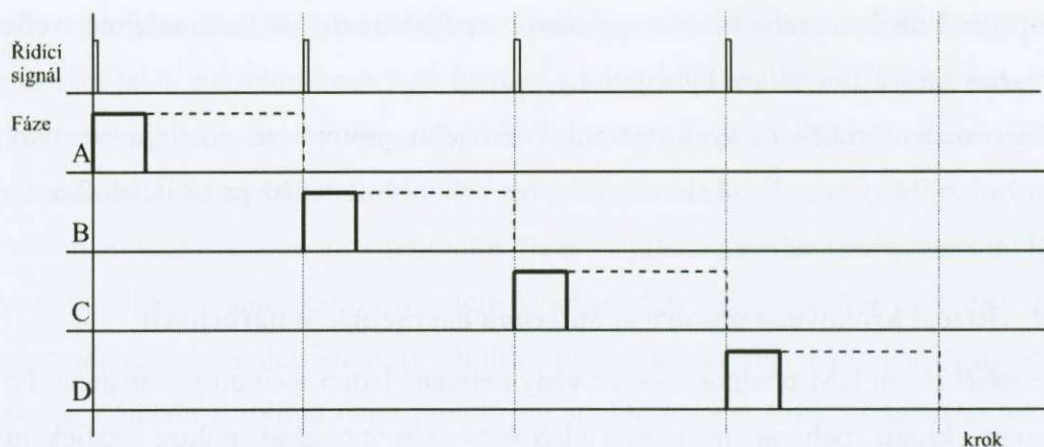
V případě řídicího systému bez polohové zpětné vazby to samozřejmě vede k závažné a neodstranitelné chybě polohy.

Dalšího snížení mechanických vibrací krokového motoru se docílí různými časovými průběhy proudů od sinusových přes lichoběžníkové až po trojúhelníkové.

Další informace lze nalézt v [1,12].

2.6.4 Řízení krokového motoru se sníženou energetickou náročností

Nejčastější řízení KM předpokládá, že vždy nejméně jedno z vinutí je napájené. Po vykonání kroku pohonu je tento udržovaný v rovnovážné poloze statickým synchronizačním momentem, který vyvíjí napájený KM. Odezva celého pohonu na jediný řídicí impuls představuje tlumivý kmitavý děj. Poměr doby přechodu t_p , kdy pohon poprvé překmitne novým rovnovážným stavem a dobu ustálení t_u , po které se pohon trvale přiblíží k novému rovnovážnému stavu s odchylkou pod $\pm 5^\circ$, je mírou tlumení systému. Z uvedeného plyne, že čas ustálení t_u je možné považovat za dobu aktivní činnosti pohonu. Pokud v podobě ustálení t_u mechanická zátěž nevyvolává zpětné silové působení na pohon, napájení vinutí po době ustálení pouze zvyšuje celkovou energetickou spotřebu pohonu a proto je zbytečné v těchto případech po ustálení napájet vinutí. Dosažená poloha se tedy udržuje pouze působením zbytkového momentu, způsobeného vlivem vnitřního magnetického pole v nenapájeném KM, nebo připojením indexované zátěže. Tento způsob ovládání je tedy energeticky tím výhodnější, čím je frekvence řídicích impulsů menší. U jiného než jednofázového způsobu řízení je nutno zvážit toto energeticky úsporné opatření jelikož by v polohách, kdy je rotorový zub natočen mezi dva statorové pólové nástavce (typicky u dvoufázového řízení) mohlo dojít vlivem vlastního přídržného momentu k pootočení rotoru. V praxi toto uspořádání může vést k zjednodušení napájecího zdroje pro fázová vinutí krokového motoru a snížení tepelné zátěže spínacích prvků pro jednotlivá fázová vinutí. Časový diagram napájení vinutí čtyřfázového reluktančního KM je uveden na obrázku Obr. 19. Přerušovanou čarou je vyznačeno buzení krokového motoru při napájení příslušného fázového vinutí během celé periody řídicích impulsů. Šrafováním je vyznačen režim impulzního buzení se sníženou energetickou náročností.

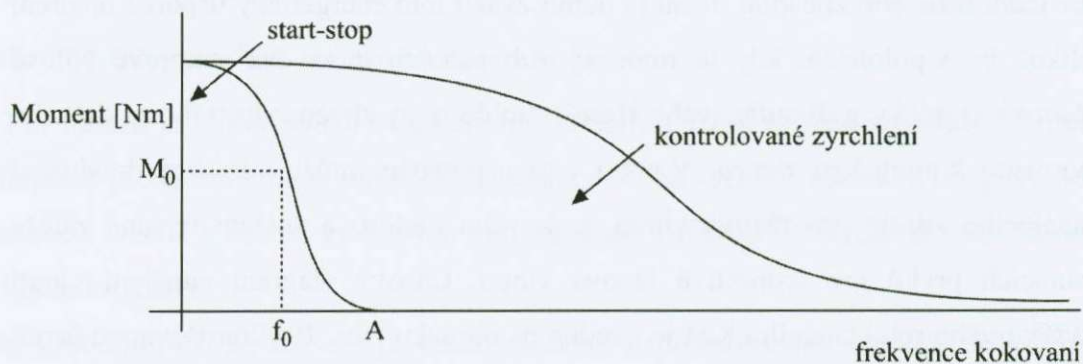


Obr. 19 Buzení se sníženou energetickou náročností

2.7 Vlastnosti krokových motorů

2.7.1 Momentová charakteristika krokového motoru

Pro momentovou charakteristiku krokového motoru je charakteristické rozdělení na dvě oblasti. První oblast se nazývá „start-stop“ a zahrnuje stavy, do kterých se může KM dostat z klidu po připojení řídicích impulsů bez ztráty jediného kroku (např. při zatěžovacím momentu M_0 můžeme ihned přivést řídicí frekvenci f_0). Bod A označuje kmitočet, při kterém již nelze ke KM připojit žádnou zátěž. Druhá oblast momentové charakteristiky se nazývá „oblast kontrolovaného zrychlení“. Té dosáhne KM při plynulém zvyšování řídicí frekvence. Složitějším způsobem řízení lze tedy KM lépe využít.

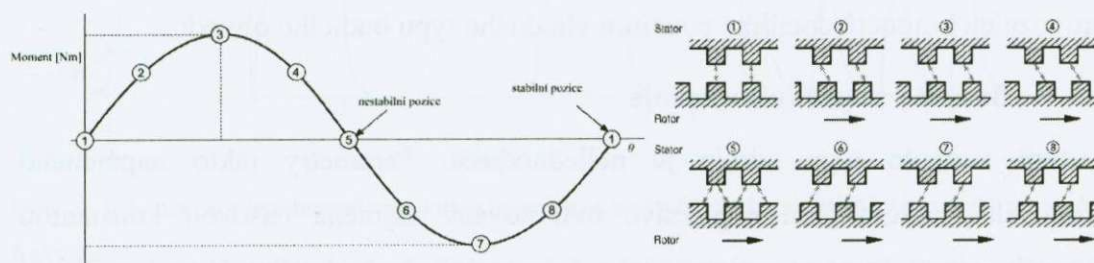


Obr. 20 Momentová charakteristika

2.7.2 Statická momentová charakteristika

Závislost úhlu rozladění hřídele θ (od jeho rovnovážné polohy kdy $\theta = 0$) na kroutícím momentu zátěže se nazývá „statická momentová charakteristika“. Pro ideální KM je její průběh sinusový. Čím menší krok tím strmější průběh

charakteristiky. Při změně natočení hřídele se její poloha rychleji ustálí díky lepším tlumícím účinkům mechanických oscilací rotoru. Maximální krouťící moment, jímž lze působit na hřídel stojícího nabuzeného KM, aniž by došlo k roztržení magnetické vazby a přeskoku rotoru do následující rovnovážné polohy, se nazývá statický vazební moment. Tato maximální hodnota je na obrázku Obr. 21 označena 3 a 7. Pokud je tato hodnota překročena rotor se dostává do polohy 5. Tato poloha je extrémně nestabilní. Rotorové a statorové zuby se nekryjí a jsou pootočený o polovinu zubové rozteče. Rotor se z této polohy vždy pootočí pokud externí síly na něj působící zeslábnu. Poloha označená 1 je naopak velice stabilní a v ní se vždy rotor ustálí pokud na něj nepůsobí žádné externí síly. Je to poloha v níž jsou statorové a rotorové zuby přímo proti sobě.



Obr. 21 Statická momentová charakteristika

2.8 Budící obvody krokového motoru

Vlastnosti krokových motorů ovlivňuje kvalita budících výkonových obvodů. Budící obvody slouží ke konverzi vstupních napětových impulsů odpovídajících jednotlivým krokům na vhodný průběh proudu v jednotlivých fázích vinutí KM. Vinutí KM představuje do série zapojená indukčnost L a činný odpor R a chová se tedy jako RL zátěž. Označíme-li tedy odpor a indukčnost vinutí jako R_v a L_v a jeho budící napětí U_v , lze chování vinutí po připojení k napájecímu napětí popsat rovnicí

prvního řádu s časovou konstantou $\tau_v = \frac{L_v}{R_v}$ a odpovídajícím způsobem vyjádřit i

průběh proudu vinutím při nulových počátečních podmínkách[10]

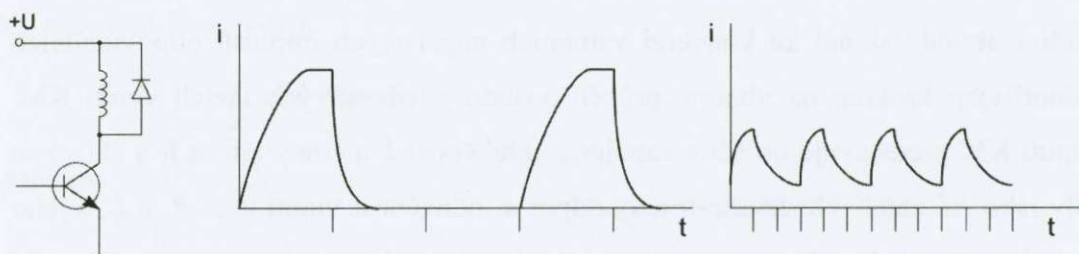
$$\frac{L_v \cdot di_v}{R_v \cdot dt} + i_v = \frac{1}{R_v} U_v \Rightarrow i_v = \frac{U_v}{R_v} (1 - e^{-t/\tau_v}).$$

Jinými slovy při zapnutí a vypnutí proudu do fáze KM, proběhne přechodový děj, jehož doba je určena časovou konstantou τ_v .

Při běžném způsob řízení bude KM bude doba přechodového děje zanedbatelná a KM bude pracovat dobře při frekvenci řídicích impulsů, která bude dostatečně malá na to, aby během doby zapnutí spínače stačil jmenovitý (stejnoseměrný) proud dosáhnout ustálené hodnoty U_v / R_v . S rostoucím kmitočtem však doba přechodového děje bude mít stále větší vliv. Bude-li se však frekvence zvyšovat, může nastat situace, že časová konstanta τ_v bude natolik velká vzhledem k době sepnutí spínače, že k jeho opětovnému vypnutí dojde dříve, než se proud stačí této ustálené hodnotě přiblížit. Od určitého kmitočtu bude tedy tvar proudového impulsu při sepnutí fáze určen pouze přechodovým dějem a střední hodnota proudu ve vinutí bude s kmitočtem klesat. Proud vinutím tak bude nižší a spolu s ním bude se vzrůstající frekvencí klesat i dosažitelný moment na hřídeli motoru. Zvýšení pásma provozních kmitočtů docílíme použitím vhodného typu budicího obvodu.

2.8.1 Buzení z napětového zdroje

Buzení z tohoto typu zdroje je nejjednodušší. Parametry takto napájeného krokového motoru jsou nepříznivě ovlivňovány zejména časovou konstantou fázového vinutí, která se projevuje jako doba trvání přechodového děje při zapínání nebo vypínání buzení vinutí. Z obrázku Obr. 22 je také patrné, že tato časová konstanta se bude nepříznivě projevovat zejména v oblastech středních a vyšších krokovacích frekvencí.

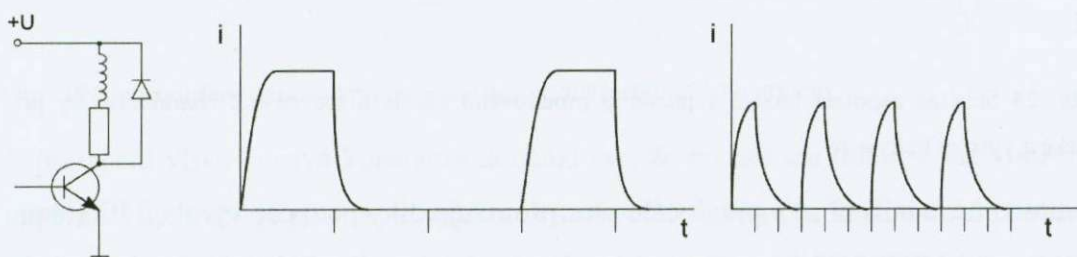


Obr. 22 Schéma zapojení buzení z napětového zdroje a srovnávací charakteristiky pro nízké a vysoké frekvence

2.8.2 Buzení vnuceným proudem

Způsob buzení fází tímto zdrojem (jedná se vlastně o zdroj konstantního proudu) zvyšuje strmost přechodového zdroje (tedy ho zkracuje) při zapnutí nebo vypnutí fáze. Zkrácení časové konstanty je docíleno tím, že se napájenému vinutí předradil odpor R_f . Velikost časové konstanty je pak $\tau = L / (R + R_f)$. Nevýhodou tohoto způsobu buzení je zejména jeho vysoká energetická náročnost, neboť na přídavném

odporu se bude ztrácet značný výkon. Většina dodané elektrické energie se totiž spotřebuje formou tepla na odporu R_f . Hodnoty odporu R_f se pohybují od 2 do 10 R . Přibližně také platí, že velikost hraniční provozní frekvence je úměrná poměru R a R_f . Je-li například R_f desetinásobné než R , pak i momentová charakteristika bude desetkrát vyšší než při nepoužití odporu R_f . Budicí obvod spolu s časovými průběhy pulsů je zobrazen spolu s průběhem momentové charakteristiky na obrázku Obr. 23. V některých případech je tento typ budiče označován jako „L/R“. Často je v momentové charakteristice uváděno značení například $L/R = 5, (10)$. To znamená, že křivka platí pro budič s odporem $R_f = 5R, (10R)$.

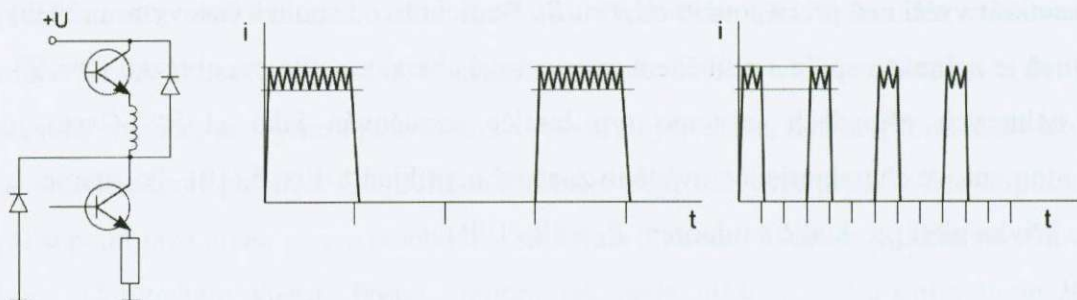


Obr. 23 Schéma zapojení budiče vnuceným proudem a srovnávací charakteristiky pro nízké a vysoké frekvence

2.8.3 Buzení z pulzního proudového zdroje

Řešením pro vysoké provozní kmitočty krokování je tento typ budiče, jehož princip je znázorněn na obrázku Obr. 24. Vinutí motoru je nejprve připojeno k vyššímu napětí U_{cc} a počáteční nárůst proudu je tedy velmi rychlý. Na obrázku Obr. 25 lze porovnat průběh s vyšším napětím U_{cc} oproti U_{jm} . Ve vhodný okamžik je toto vyšší napětí odpojeno a k vinutí je připojeno pouze napětí schopné s ohledem na odpor vinutí udržet potřebnou hodnotu proudu. Okamžik přepnutí může být určen buď pevně například monostabilním klopným obvodem na základě známé časové konstanty vinutí nebo může být do série s vinutím zařazen ještě malý proudoměrný odpor a k přepnutí pak dojde v okamžiku dosažení nastavené proudové hodnoty. Tato metoda zabezpečuje, že při vyšších řídicích frekvencích bude motor schopen vyvíjet větší moment, než při použití běžného způsobu řízení. Z hlediska výsledného chování motoru však nejlepší výsledky dává budič pracující s konstantní střední hodnotou proudu. Jelikož tato konstantní hodnota je udržována pomocí dvupolohového regulátoru, který spíná a rozpíná tranzistory, jsou příslušné budiče označovány také jako přerušovací. Přerušován je ovšem přívod napětí,

nikoliv proudu. Použitím konstantního zdroje proudu namísto konstantního zdroje napětí dosáhneme rychlého náběhu proudu bez nebezpečí proudového přetížení vinutí a vyhneme se použití rozměrných předřadných odporů, který snižuje účinnost KM. Zřejmou výhodou proudového zdroje je výrazné snížení časové konstanty τ .

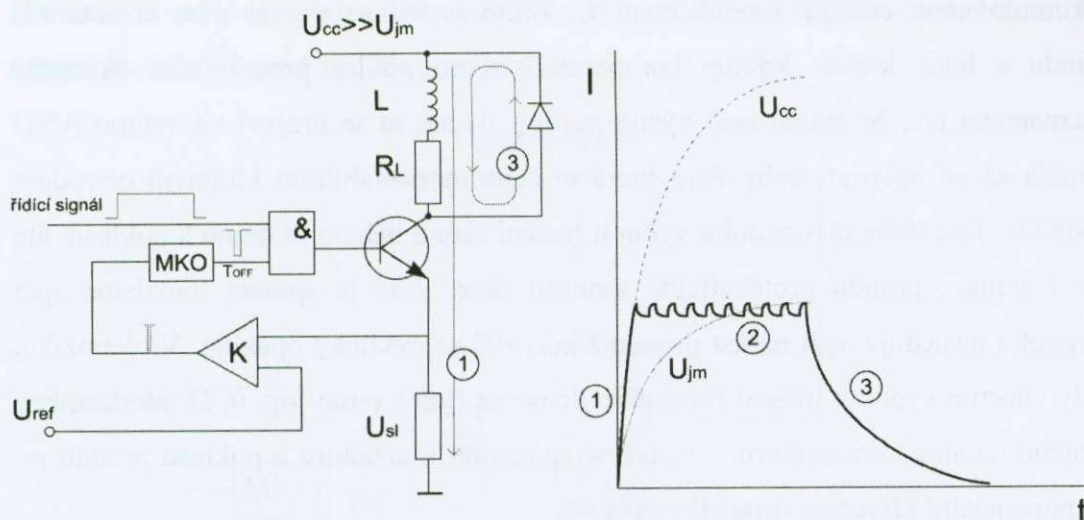


Obr. 24 Schéma zapojení buzení z pulsního proudového zdroje a srovnávací charakteristiky pro nízké a vysoké frekvence

Tento způsob buzení se v praxi stále více prosazuje díky podpoře výrobců IO (např. L297 nebo L289 SGS Thomson). Jsou dostupné IO realizující tento typ buzení do proudu 4 A, případně karty do proudu až 10 A. . I u tohoto zapojení samozřejmě platí, že hlavní příčinou poklesu momentové charakteristiky při vyšších krokovacích frekvencích je nízká strmost nárůstu proudu protékajícího fází KM. Strmost je úměrná časové konstantě τ přechodového děje, která je rovna době kdy proud dosáhne přibližně 63 % ustálené hodnoty dle vztahu

$$\tau = \frac{L}{R_L + R_S}.$$

Na obrázku Obr. 25 je znázorněno zjednodušené schéma proudového zdroje pro unipolární motor popisující jeho princip.



Obr. 25 Zjednodušené zapojení proudového zdroje znázorňující jeho princip

K potlačení vlivu časové konstanty dochází tak, že po určitou dobu je fáze buzena napětím U_{cc} , které je podstatně vyšší než jmenovité napětí U_{jm} . Časová konstanta je stále stejná, ale vzhledem k tomu, že je aplikováno vyšší napětí je sklon tečny průběhu proudu strmější. Při přivedení řídicího signálu o logické úrovni 1 na řídicí vstup, respektive na vstup součinnového hradla je tento násoben hodnotou na druhém vstupu. Hodnota druhého vstupu hradla je ovlivněna výstupem komparátoru, respektive monostabilního klopného obvodu (MKO) a je ve chvíli kdy fáze nebyla buzena nastavena na logickou 1. Na výstupu AND hradla se tedy objeví logická 1, kterou je otevřen spínací tranzistor. V tomto okamžiku začne fází protékat proud s exponenciálním nárůstem v čase (je-li zanedbán vliv zpětného elektromotorického napětí při otáčení motoru)

$$i(t) = \frac{U}{R + R_s} \left(1 - e^{-\frac{t}{L}} \right).$$

Tento proud také protéká odporem R_s a vytváří na něm úbytek napětí U_s úměrný velikosti protékajícího proudu. Toto napětí je porovnáváno komparátorem s referenčním napětím U_{ref} , které odpovídá vztahu

$$U_{ref} = I_{JM} \cdot R_s.$$

Je-li $U_s > U_{ref}$ výstup komparátoru změní úroveň na log. 0 a tento signál je přes MKO ve formě pulsu logické 0 o pevné době T_{OFF} přiveden na vstup součinnového hradla. Výstup hradla, bez ohledu na logickou hodnotu na druhém vstupu, se uvede do stavu log. 0. Dojde tím k uzavření spínacího tranzistoru. Proud I je nyní dodáván

akumulovanou energií v indukčnosti L . Tento proud se uzavře přes reluktanční diodu a bude klesat. Výstup komparátoru tento pokles proudu sice okamžitě zaznamená tak, že změní svůj výstup na log. 1, ale to se projeví na vstupu AND hradla až po uplynutí doby T_{OFF} , která je dána monostabilním klopným obvodem (MKO). Tato doba určuje dobu vypnutí buzení fáze a během ní dojde k poklesu, ale ne k zániku, proudu protékajícího vinutím fáze. Poté je spínací tranzistor opět sepnut a následuje opět nárůst proudu a celý děj se cyklicky opakuje. V okamžiku, kdy chceme vypnout buzení fáze, přivedeme na řídicí vstup log. 0. Dojde tím, bez ohledu na stav komparátoru, k uzavření spínacího tranzistoru a poklesu proudu po exponenciální křivce se strmostí v počátku

$$\frac{U_{CC}}{L}.$$

Střední hodnotu proudu lze měnit změnou napětí U_{ref} , což může být užitečné při řízení s poloviční délkou kroku a konstantním momentem nebo při mikrokrokování viz. Budící obvody pro režim mikrokrokování.

Pomalý pokles proudu (v anglické literatuře nazývaný slow decay) při vypnutí buzení fáze je v praxi odstranitelný několika způsoby. První možností je sériové zařazení odporu R_D s reluktanční diodou, které zkrátí časovou konstantu

$$\tau = \frac{L}{R_L + R_D}.$$

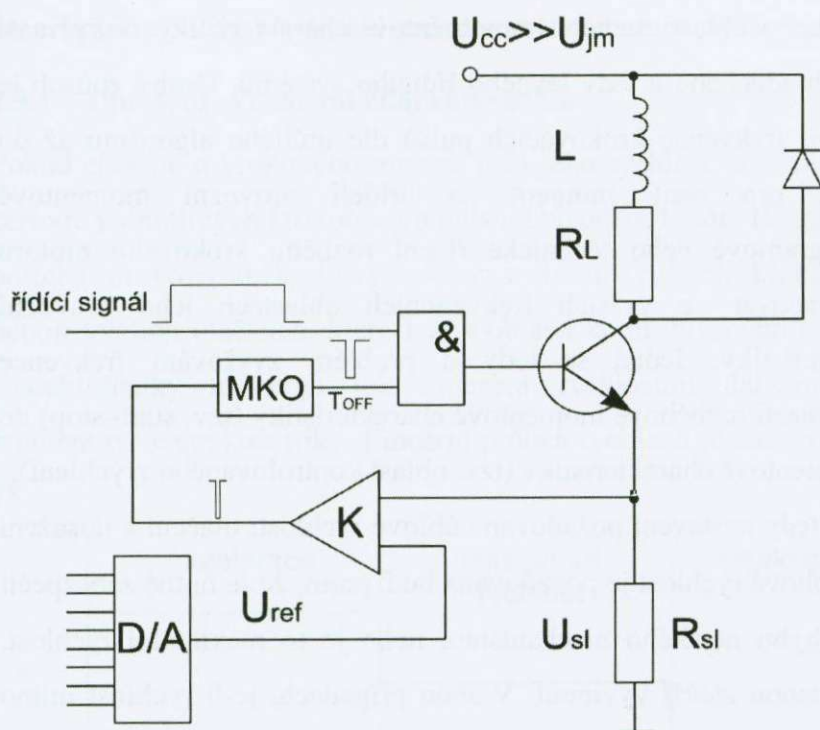
Zařazením tohoto odporu se však zvýší nároky na spínací tranzistor, konkrétně na jeho kolektorové závěrné napětí.

Druhou možností je zařazení Zenerovy diody do série s reluktanční diodou. Zánik proudu bude mnohem strmější, než v prvním případě. V současné době je již buzení fází KM nejčastěji realizováno pulzním frekvenčně modulovaným proudovým zdrojem.

2.8.4 Budící obvody pro režim mikrokrokování

Buzení KM pro mikrokrokování může vycházet z pulzního proudového zdroje, který frekvenčně moduluje budící proud. Úbytek napětí úměrný proudu protékajícímu vinutím je komparátorem porovnáván s požadovaným referenčním napětím. Bude-li toto referenční napětí programovatelné D/A převodníkem, můžeme zároveň velice snadno realizovat mikrokrokování. Poznamenejme, že výstup komparátoru je veden na vstup monostabilního klopného obvodu

s konstantní periodou řádově desetiny milisekund. Princip tohoto druhu buzení je znázorněn na obrázku Obr. 26



Obr. 26 Princip režimu mikrokrovní

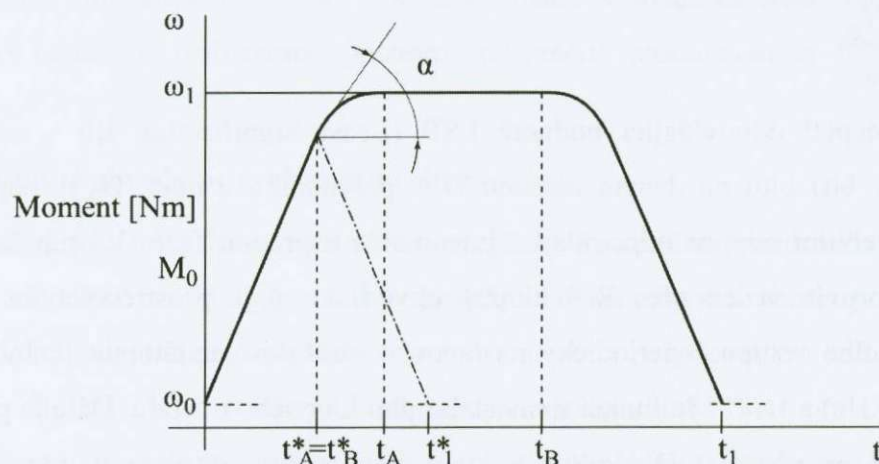
Jako představitele jednoduššího obvodu pro řízení proudu fázemi krokového motoru lze uvést například integrovaný obvod L6506 od firmy SGS-Thomson. Díky tomu, že tento obvod má referenční vstupy komparátorů REF. 1 a REF. 2 vyvedeny odděleně, můžeme přivedením napětí na tyto dva vstupy z D/A převodníku jednoduše realizovat mikrokrovní. Teoretický počet mikrokroků je pak roven vztahu

$$n = \frac{\max U_{SL}}{U_{LSB}}$$

U_{LSB} je napětí odpovídající hodnotě LSB (Least Signification Bit – nejméně významný bit) bitu na daném rozsahu D/A převodníku a $\max. U_S$ je napětí na zpětnovazebním odporu odpovídající jmenovitému proudu fáze. Výstup každého komparátoru je veden přes R/S klopný obvod, který je prostřednictvím svého nastavovacího vstupu S periodicky nastavován vnitřním oscilátorem (s frekvencí jednotek kHz) a tvoří zde funkci monostabilního klopného obvodu. Dále je potřeba brát zřetel na přesnost D/A převodníku a jeho schopnost nastavit odpovídající hodnoty. Další informace lze nalézt [1, 3] a podrobněji v anglickém jazyce [8, 12].

2.9 Určení krokovacích intervalů

Krokový motor můžeme provozovat ve dvou základních režimech. První způsob je, že motor krokuje pouze v oblasti rozběhové momentové charakteristiky, což přináší výhodu v použití jednoduchého a tedy levného řídicího systému. Druhý způsob je založen na zvyšování frekvence krokovacích pulsů dle určitého algoritmu až do dosažení frekvence pro daný moment na hřídeli provozní momentové charakteristiky. Programové nebo technické řízení rozběhu krokového motoru přináší možnost pracovat ve vyšších frekvenčních oblastech jeho provozní momentové charakteristiky. Jedná se tedy o problém zvyšování frekvence krokových pulsů z oblasti rozběhové momentové charakteristiky (tzv. start-stop) do oblasti provozní momentové charakteristiky (tzv. oblast kontrolovaného zrychlení). Úkolem ovladače je tedy nastavení požadované úhlové rychlosti otáčení a dosažení polohy φ_1 . Určitá úhlová rychlost je požadována buď proto, že je nutné zabezpečit přesnou rychlost pohybu nějakého mechanismu, nebo je to maximální rychlost, kterou může KM s danou zátěží vyvinout. V obou případech, je-li rychlost mimo oblast start-stop, lze jí dosáhnout pouze plynulým zvyšováním a před ukončením pohybu je potřeba ji opět plynule snížit. Průběh řízení je znázorněn na obr. Obr. 27 a vyjadřuje závislost rychlosti resp. řídicí frekvence na čase. Na začátku pohybu se skokově nastaví určitá počáteční úhlová rychlost, která nejprve roste se zrychlením ϵ_1 . Při větších rychlostech je nutné zrychlení snižovat na hodnotu $\epsilon = \tan \alpha$. Po dosažení maximální rychlosti v čase t_A pohyb pokračuje až do času t_B , kdy je nutno začít rychlost snižovat, aby v čase t_1 mohl být pohyb ukončen zastavením z rozběhové rychlosti s pootočením φ_1 .

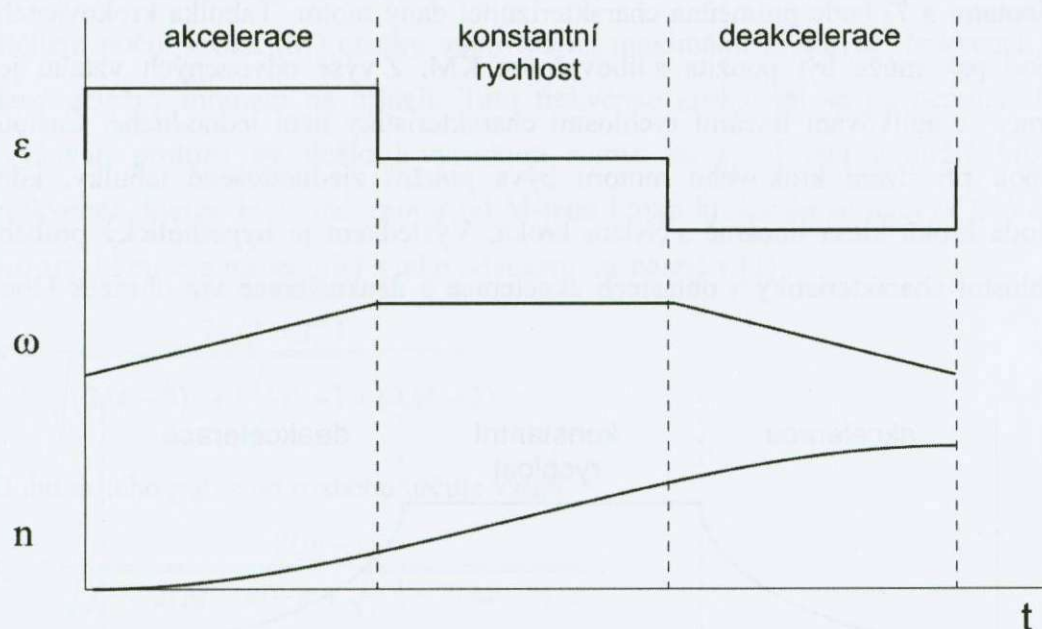


Obr. 27 Průběh řízení zrychlení a zpomalení KM

Na Obr. 27 je rovněž zachycen případ, kdy by rychlost KM mohla být vysoká, ale požadovaná změna φ^*_1 není velká. Pak se KM do okamžiku rozbíhá, aby vzápětí začal brzdít a v čase t^*_1 dosáhl požadovaného pootočení φ^*_1 .

2.9.1 Lineární rychlostní charakteristika

Pokud chceme u krokového motoru řídit jeho rychlost, musíme programově měnit periodu jednotlivých krokovacích pulsů. Důvodem tohoto řízení rychlosti je typicky potřeba provozovat krokový motor v oblasti vyšších krokovacích frekvencích neboli vyšších otáčkách, které leží v oblasti kontrolovaného zrychlení momentové charakteristiky a nebýt tak omezeni rychlostmi danými částí „start-stop“ momentové charakteristiky. Lineární průběh rychlosti je znázorněn na obrázku Obr. 28.



Obr. 28 Lineární rychlostní charakteristika

Z charakteristiky je patrné, že v rozběhové části rychlost vzrůstá lineárně, akcelerace je kladná a větší než 0. Poté co rychlost dosáhne maximální požadovanou provozní hodnotu je akcelerace nulová. Následně při brzdění klesá rychlost lineárně a akcelerace je záporná a konstantní. Průběh polohy, respektive úhlu natočení je v částech rozběhu a brzdění nelineární a je popsán tzv. „S křivkou“. Periody jednotlivých kroků při rozběhu motoru z klidu na provozní hodnotu tvoří tabulku krokovacích period. Perioda T_n kroku je definována jako rozdíl času mezi dvěma sousedními kroky dle vztahu

$$T_n = t_{n+1} - t_n.$$

Úhlová rychlost a zrychlení vycházejí ze základních vztahů:

$$\omega = \varepsilon t_n$$

$$n = \frac{1}{2} \varepsilon t_n^2 \Rightarrow t_n = \sqrt{\frac{2n}{\varepsilon}}.$$

Z uvedených vztahů lze vyjádřit vztah pro periodu

$$T_n = t_{n+1} - t_n = T_0 (\sqrt{n+1} - \sqrt{n}).$$

Hodnota T_0 určuje periodu kroku s periodou $n = 0$ a je určena vztahem

$$T_0 = \sqrt{\frac{2}{\varepsilon}}.$$

Díky tomu můžeme použít jednu tabulku krokovacích period s konstantními hodnotami a T_0 bude proměnná charakterizující daný motor. Tabulka krokovacích period pak může být použita s libovolným KM. Z výše odvozených vztahů je patrné, že aplikování lineární rychlostní charakteristiky není jednoduché. Častou chybou při řízení krokového motoru bývá použití zjednodušené tabulky, kde perioda kroků klesá lineárně s číslem kroku. Výsledkem je hyperbolický průběh rychlostní charakteristiky v oblastech akceleraace a deakceleraace viz obrázek Obr. 29.



Obr. 29 Nelineární průběh rychlostní charakteristiky

Rovněž průběh zrychlení je nelineární. V praxi se pak motor, který je řízen takovouto tabulkou, rozbíhá velice pomalu. V závěru rozběhové tabulky je pak nárůst rychlosti naopak velice strmý s vysokou hodnotou zrychlení. Podobné chyby se dopustíme, když periodu kroku snižujeme převrácenou hodnotou čísla kroku. Výsledkem je lineární rychlost, ale vzhledem k číslu kroku a ne k času. Závislost rychlosti na čase je opět nelineární a roste s druhou mocninou času. Motor se při

rozběhu chová podobně, pomalý rozběh a strmý závěr rozběhu rychlostní charakteristiky.

2.9.2 Lineární akcelerace

V některých případech se také používá při řízení KM zrychlení s lichoběžníkovou charakteristikou. Tvar rychlostní charakteristiky je pak „S křivka“. Tento způsob řízení má výhodnější dynamické vlastnosti, ale na druhou stranu přináší komplikace s výpočtem period kroků. Není možné použít jednu univerzální tabulku jako v případě lineární rychlosti. Odvození vzorců pro výpočet hodnot takového zrychlení lze nalézt [1].

2.9.3 Dosažení provozní rychlosti v daném kroku

Během rozběhu krokového motoru s konstantním zrychlením dosáhne motor po určitém počtu kroků (M) otáčky odpovídající maximální krokovací frekvenci pro daný zátěžný moment na hřídeli. Tato frekvence krokování se již nemůže dále zvyšovat, protože by došlo k vypadnutí rotoru ze synchronu a ztrátě kroku. Frekvence, kterou bude pak motor od M -tého kroku krokován se nazývá f_s . Vztah pro zrychlení ε je následující a jeho odvození lze nalézt v [1]

$$\varepsilon = \frac{2(f_s^2 - f_1^2)}{\sqrt{(2M-3)^2 + \left(\frac{f_s}{f_1}\right)^2 - 1} + (2M-3)}.$$

Dobu m -tého pulzu od rozběhu určuje vztah

$$t_m = \frac{2(m-1)}{\sqrt{f_s^2 - 2(M-m) \cdot \varepsilon} + \sqrt{f_s^2 - 2(M-1) \cdot \varepsilon}}.$$

Perioda a frekvence m -tého pulzu je určena vztahem

$$\Delta t_m = \frac{2}{\sqrt{f_s^2 - 2(M-m-1) \cdot \varepsilon} + \sqrt{f_s^2 - 2(M-m) \cdot \varepsilon}},$$

$$\Delta t_m = t_M + \frac{(m-M)}{f_s} \Rightarrow f_m = \frac{1}{\Delta t_m}$$

2.9.4 Lineární deakcelerace

Nejjednodušším způsobem určování intervalů kroků při brzdění je postupovat opačným směrem v tabulce hodnot pro Δt_m TM. Protože ale brzdění může být větší (v absolutní hodnotě) než zrychlování a perioda posledního pulsu může být kratší

než výchozí (tedy Δt_1) je někdy užitečné určit hodnoty časovacích pulsů pro brzdění zvlášť. Získáme tím rychlejší zastavení nebo snížení otáček krokového motoru. Zde je však nutné podotknout, že není vždy možné předvídat zastavení motoru (brzdění). Například při detekci překážky nebo mezního stavu je důležité, aby motor zastavil okamžitě. V takovém případě nebude zřejmě vhodné aplikovat lineární deakceleraci a musíme počítat s tím, že k zastavení motoru nedojde zcela korektním způsobem.

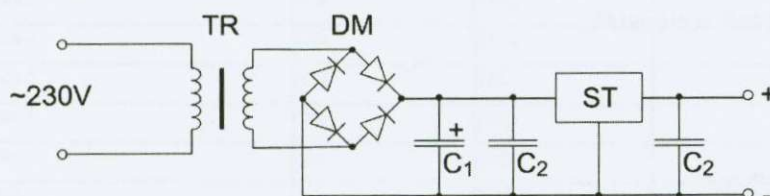
3 Budící obvod a software pro jeho řízení

3.1 Budící obvodu

Pro buzení bipolárních krokových motorů bylo potřeba navrhnout a vyrobit budící obvod, který by budil jednotlivá vinutí KM. Tento budič bude připojen přes paralelní port k počítači, který bude plnit funkci kontroléru.

3.1.1 Zdroj budícího obvodu

Nejprve bylo potřeba vytvořit zdroj pro napájení budícího obvodu. Na obrázku Obr. 30 je schéma zapojení tohoto zdroje.



Obr. 30 Schéma zapojení zdroje

Rozpis použitých součástek:

TR TRHEI541-1x9 - 230 V / 1x9 V / 1,77 A

DM B250R

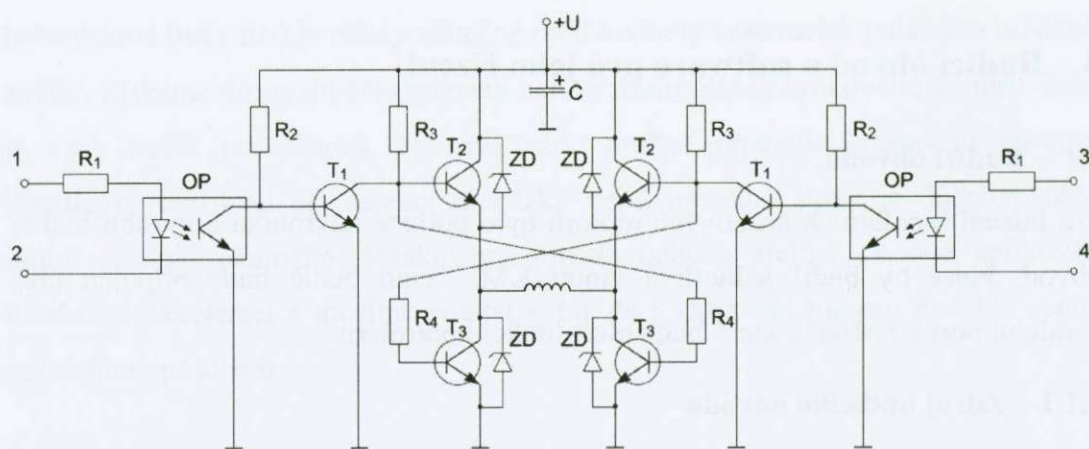
C₁ 2200 μ F / 35 V

C₂ 100nF / 65 V

ST 78S12

3.1.2 Budící obvod

Na obrázku Obr. 31 je schéma zapojení části budícího obvodu pro jednu cívku KM. Pro jeden krokový motor budeme potřebovat takové části 2. Vývody 1 a 3 budou připojeny na datové piny paralelního portu a vývody 2 a 4 na zem paralelního portu. Budič je od paralelního portu oddělen optočleny, aby se předešlo jeho případnému poškození. Zapojení budiče bylo navrženo ve spolupráci s doc. PaedDr. P. Adámkem, Ph. D.



Obr. 31 Schéma zapojení budicího obvodu pro jednu cívku KM

Rozpis použitých součástek:

R ₁	470 Ω
R ₂	100 Ω
R ₃	120 Ω/2 W
R ₄	1 kΩ
OP	TP817
T ₁	BC546
T ₂ , T ₃	BD243C
ZD	BZX85VD56 1,6 W / 56 V
C	100 μF / 35 V

3.2 Software

Při řízení krokového motoru pomocí výše uvedeného ovladače připojeného přes paralelní port k PC musíme zasílat na adresu paralelního portu řídící sekvence. Řídící sekvence je v tomto případě posloupnost decimálních čísel, jejichž binární podoba reprezentuje, které cívky KM. budou sepnuté.

3.2.1 Paralelní port

Paralelní port (LPT) je standardní součástí běžných počítačů PC pro paralelní komunikaci (paralelní přenos bitů signálu) s periferiemi pomocí 17 digitálních linek, které lze rozdělit na 8 datových signálů a 9 signálů pro řízení komunikace (handshaking). PC s periferií lze spolehlivě propojit na vzdálenost 2m, v praxi lze komunikovat i na vzdálenost max. 5m, při správném stínění datových vodičů komunikačního kabelu.

Původně byl paralelní port pro PC účelově vytvořen pro komunikaci s tiskárnou, tedy jednosměrný přenos dat od PC do tiskárny. Později však byl dalšími módy uzpůsoben i pro obousměrný přenos dat rychlostí až jednotek MB/s. Paralelní port byl v roce 1994 standardizován pod IEEE 1284.

V tabulce je popis jednotlivých pinů, signálů, které je reprezentují, a příslušnost k danému ovládacímu registru PC (Data, Status, Control) LPT konektoru.

Pin číslo	Signál	Směr In/out	Registr	Hardverově invertovaný
1	nStrobe	In/Out	Control	Ano
2	Data 0	Out	Data	
3	Data 1	Out	Data	
4	Data 2	Out	Data	
5	Data 3	Out	Data	
6	Data 4	Out	Data	
7	Data 5	Out	Data	
8	Data 6	Out	Data	
9	Data 7	Out	Data	
10	nAck	In	Status	
11	Busy	In	Status	Ano
12	Paper-Out / Paper-End	In	Status	
13	Select	In	Status	
14	nAuto-Linefeed	In/Out	Kontrol	Ano
15	nError / nFault	In	Status	
16	nInitialize	In/Out	Kontrol	
17	nSelect-Printer / nSelect-In	In/Out	Kontrol	Ano
18 – 25	Ground	Gnd		

V našem případě budeme používat pouze datový registr paralelního potu, který se běžně nachází na adrese 387h.

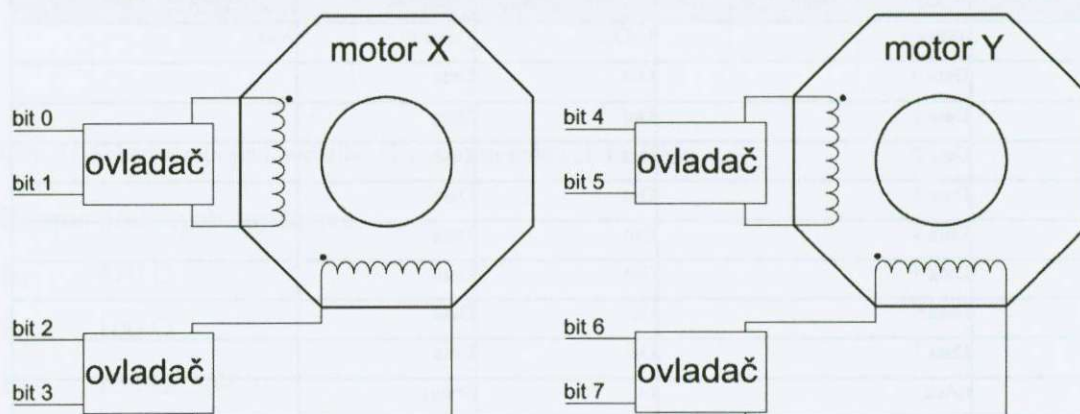
Paralelní port je možné docela snadno nevědomky zničit, protože výstupy nejsou obvykle chráněny proti přetížení a statické elektřině. Proto je vhodné dodržovat následující bezpečnostní opatření:

- Zařízení se smějí k paralelnímu portu připojovat jen při vypnutém napájení počítače.
- Na vstupy se smí přivést jen napětí mezi hodnotami +0 až +5V.
- Výstupy se nesmí zkratovat nebo připojit na jiné výstupy.
- Výstupy nesmí přijít do styku s cizím napětím.
- Při práci s paralelním portem dodržovat zásady pro minimalizaci statické elektřiny.

Z tohoto důvodu je ovladač oddělen od paralelního portu optočleny. Další informace o paralelním portu lze nalézt na [13,14]

3.2.2 Připojení ovladače k paralelnímu portu

Nejprve je potřeba si definovat jak budou krokové motory zapojeny k ovladači a následně k paralelnímu portu, aby bylo možné správně navrhnout řídicí sekvence. Při nesprávném zapojení se krokové motory nebudou otáčet.



Obr. 32 Připojení ovladače na paralelní port

Při zapojení uvedeném na obrázku Obr. 32 je první cívka motoru X ovládána nultým a prvním bitem datového registru, přičemž logická 1 na bitu 0 a logická 0 na bitu 1 znamená, že cívka je zapojena s polaritou $+-$. Opačná hodnota těchto dvou bitů znamená polaritu $-+$. Zde je potřeba podotknout, že by nemělo dojít s současným uvedením nultého a prvního bitu do stavu logická 1. Druhá cívka motoru X je ovládána na 2. a 3. bit. A obdobně u motoru Y je první cívka ovládána 4. a 5. bitem a druhá pak 6. a 7. bitem.

3.2.3 Řídicí sekvence

Pro řízení motorů X a Y zapojených dle obrázku Obr. 32 lze sestavit následující řídicí sekvenci, která zajistí spojitě otáčení motoru X jedním směrem režimem plného kroku s buzením jedné fáze. Jelikož se má otáčet pouze motor X, jsou bity ovládající motor Y nulové. Při prvním kroku tak bude na první cívce polarita $+-$, při druhém kroku bude stejná polarita na druhé cívce. Třetí krok budí první opět cívku, avšak s opačnou polaritou $-+$ a poslední čtvrtý krok budí druhou cívku také s polaritou $-+$. Aby bylo možné ovládat KM pomocí této sekvence je potřeba nastavovat jednotlivé bity datového registru. Nejjednodušeji toho dosáhneme zápisem celého čísla do datového registru na adrese 387h.

	Krok			
bit	1	2	3	4
0 ($2^0=1$)	1	0	0	0
1 ($2^1=2$)	0	0	1	0
2 ($2^2=4$)	0	1	0	0
3 ($2^3=8$)	0	0	0	1
4 ($2^4=16$)	0	0	0	0
5 ($2^5=32$)	0	0	0	0
6 ($2^6=64$)	0	0	0	0
7 ($2^7=128$)	0	0	0	0
Decimální hodnota	1	4	2	8

Pro současné otáčení motoru jedním směrem a současně motoru Y opačným směrem slouží následující tabulka.

	Krok			
bit	1	2	3	4
0 ($2^0=1$)	1	0	0	0
1 ($2^1=2$)	0	0	1	0
2 ($2^2=4$)	0	1	0	0
3 ($2^3=8$)	0	0	0	1
4 ($2^4=16$)	0	0	0	1
5 ($2^5=32$)	0	1	0	0
6 ($2^6=64$)	0	0	1	0
7 ($2^7=128$)	1	0	0	0
Decimální hodnota	129	36	66	24

3.2.4 Přímý přístup na IO port pod operačním systémem MS-DOS

Přímý přístup na paralelní port půjde nejnázve popsat na operačním systému MS-DOS, který žádným způsobem nezakazoval přímý přístup na IO port. V programovacím jazyce C++ by zapsání hodnoty bylo jednoduchým příkazem.

```
int outp(unsigned portid, int value);
```

Při použití jazyka C++ nesmíme zapomenout na deklaraci knihoven. Ovládání motoru X by pak mohlo vypadat následovně.

```
#include <stdio. h>
#include <dos. h>

void main (void)
{
    outportb(0x378,1); /* 1. krok motoru X*/
    outportb(0x378,4); /* 2. krok motoru X*/
    outportb(0x378,2); /* 3. krok motoru X*/
    outportb(0x378,8); /* 4. krok motoru X*/
}
```

Uvedený program by měl pootčit krokový motor o 4 kroky, ale zřejmě by nefungoval zcela korektně jelikož s největší pravděpodobností by KM nestihl zareagovat na budící impulsy. Proto je nutné mezi kroky vložit nějaké zpoždění buď přes funkci `void sleep(unsigned seconds)` nebo nějakou prázdnou `for` smyčku.

3.2.5 Přímý přístup na IO port pod operačním systémem MS Windows (98,ME,2000,XP, NT)

Přímý přístup na LPT pod MS Windows stejným způsobem jako u MS-DOS je možný pouze u verzí 98 a ME. Verze založené na jádře NT (NT, 2000, XP) tento způsob nepodporují.

Problém přímého přístupu na vstupně/výstupní porty počítače sice vzniká při používání operačních systémů založených na jádře NT, tedy Windows NT/2000/XP, ale svůj původ má zcela jinde. Zodpovědný je totiž za něj tzv. chráněný režim činnosti procesorů, jenž je systémy založenými na jádře NT využíván a který de facto sám vykonává operace spojené s využíváním portů, adresováním paměti apod., tedy operace dříve realizované prostřednictvím operačního systému či samotných aplikací.

Chráněný režim procesorů pochází již z doby 8386 a poskytuje čtyři různé úrovně přístupu k hardware. Tyto úrovně, nazývané ring, jsou číslovány od nuly do tří, kdy ring 0 má nejvyšší úroveň zpracování a pod Windows v něm běží pouze samotné jádro operačního systému spolu s ovladači zařízení. Kód v ring 0 zpracováváný může obsahovat libovolné instrukce včetně instrukcí pro přímý přístup do paměti a k portům, neboť ochranu těmito instrukcím poskytuje samotný mikroprocesor. Běžné aplikace pak běží vždy na vyšších úrovních.

Procesory Intel 386 a vyšší mapují každý port ring 3 programů pomocí IOPM (Input/Output Privilege Mask), tzv. povolovací masky. každý z bitů této masky odpovídá jedné vstupně/výstupní adrese. Když se ring 3 program pokusí provést instrukci in nebo out, testuje procesor povolovací masku proto, aby určil, zda lze k portu přistoupit. Pokud přístup k danému portu není povolen, generuje procesor výjimku. Když tuto výjimku operační systém zachytí, nedovolí daný proces dokončit. Pokud se ring 3 programy pokoušejí přistoupit k portu, chovají se Win95/98/ME a WinNT/2000/XP odlišně:

- Win95/98/ME reaguje povolením přístupových práv úpravou povolovací masky. První použití instrukce in nebo out nad daným portem sice vyvolá výjimku, která je však odchycena operačním systémem a následně zpracována tak, že je daný bit povolovací masky upraven pro povolení přístupu k danému portu. Další volání in a out pak již probíhá bez jakéhokoli zpoždění.
- WinNT/2000/XP je více striktní, protože se jedná o robustnější systém se zvýšenou bezpečností. Je-li operačním systémem detekována výjimka, vyvolaná pokusem o přístup na port, je provinilý ring 3 program přerušen a instrukce přístupu na port není provedena.

U operačních systémů založených na jádře NT nejsou využívány úrovně ring 1 a ring 2, ale až ring 3. Instrukce prováděné na této úrovni mají velmi výrazně omezené pravomoci. Chtějí-li využívat vstupně/výstupních portů, musí žádat ovladače zařízení běžící v ring 0. Tyto aplikace přistupují k ovladačům pomocí tzv. povolovací masky, kde každý z bitů odpovídá jedné IO adrese. Pokud se aplikace běžící v ring 3 pokusí provést instrukci podléhající povolovací masce, procesor otestuje, zdali je příslušný bit nastaven, či nikoliv, a podle toho povoluje či zakazuje přístup k portům. Operační systém poté nepovolí zpracování instrukce.

Chceme-li proto ve Windows 2000 či XP realizovat přímý přístup na IO porty, lze tak učinit pouze takto:

- Napsat si vlastní ovladač zařízení (tzv. Kernel driver) toto řešení je nejčistší, avšak velmi náročné.
- Využít ovladač zařízení vytvořený pro jiný podobný hardware, nebo použít některý z nabízených univerzálních ovladačů – rovněž čisté řešení, avšak finančně velmi náročné.
- Použít pro přístup některý z univerzálních „ovladačů“, které jsou volně šířené internetem, avšak o jejich bezpečnosti a stabilitě by bylo možné vést polemiky. Přesto je jejich požití nejjednodušším způsobem jak umožnit přímý přístup na IO port pod NT systémy.

Další informace je možné nalézt na [15,16].

3.2.6 Použití knihovny io.dll

Knihovna io.dll je volně šířitelná knihovna umožňující přímý přístup na IO porty pod MS Windows NT. Tato knihovna nabízí několik užitečných funkcí pro práci s IO porty. Pro nás bude nejvhodnější funkce `void (WINAPI *PORTOUT) (short int Port, char Data)`, která má stejnou syntaxi jako funkce `outportb()`.

```
#include <stdio. h>
#include "io. h"

PORTOUT PortOut;

HMODULE hio;

void UnloadIODLL() {
    FreeLibrary(hio);
}

int LoadIODLL() {
    hio = LoadLibrary("io");
    if (hio == NULL) return 1;

    PortOut = (PORTOUT)GetProcAddress(hio, "PortOut");
    return 0;
}

int main(int argc, char *argv[])
{
    LoadIODLL();
    PortOut(0x378,0);
}
```

```

char sekvence[8];
    sekvence [0]=1;
    sekvence [1]=4;
    sekvence [2]=2;
    sekvence [3]=8;
    sekvence [4]=1;
    sekvence [5]=4;
    sekvence [6]=2;
    sekvence [7]=8;

int ii=0;
int pocetkroku=100;
for(int krok=0;krok<pocetkroku;krok++){
for(int kk=0;kk<25000000;kk++){
    /* prazdna smycka zpomalujici krokovani */
}
ii ++;
if(ii >7){
    ii =0;
}
PortOut(0x378,sekvence[ii]);
}
UnloadIODLL();
return 0;
}

```

V programu je využito pole `sekvence` pro uložení řídící sekvence. Toto pole má osm prvků tak aby se dalo využít i pro řízení s polovičním krokem. Pro řízení s polovičním krokem by vypadala definice tohoto pole následovně

```

char sekvence[8];
    sekvence [0]=1;
    sekvence [1]=5;
    sekvence [2]=4;
    sekvence [3]=6;
    sekvence [4]=2;
    sekvence [5]=10;
    sekvence [6]=8;
    sekvence [7]=9;

```

Proměnná `pocetkroku` udává kolik kroků má motor vykonat.

4 Terminologie:

4.1.1 Přídržný moment - *Holding torque*

Maximální moment, kterým může být staticky zatížena hřídel vybuzeného motoru, aniž by se začala plynule otáčet.

4.1.2 Vlastní přídržný moment– *Detent torque*

Maximální moment, kterým může být staticky zatížena hřídel nevybuzeného motoru, aniž by se začala plynule otáčet. Tento jev je podstatný jen u motorů s rotorem z permanentního magnetu.

4.1.3 Reluktance

Je magnetický odpor zn. R_m , koeficient úměrnosti mezi magnetomotorickým napětím F_m a magnetickým indukčním tokem Φ v daném magnetickém obvodu.

Platí: $R_m = F_m / \Phi$. . Jednotkou je 1 H^{-1}

5 Závěr

V bakalářské práci byly popsány druhy krokových motorů a různé aspekty spojené s jejich využitím a řízením. Toto rozdělení by mělo pomoci se snadno zorientovat v možných typech KM a pomoci s výběrem vhodného KM při návrhu řídicího systému. Bylo popsáno řízení KM pomocí počítače propojeného s KM řídicí jednotkou připojenou na paralelní port. Jsou zde popsány problémy, které mohou nastat při přímém softwarovém řízení paralelního portu na NT verzích operačního systému Microsoft Windows. Současně s tím jsem popsal i řešení těchto problémů. K bakalářské práci je přiloženo CD se zdrojovými kódy aplikace, která zajišťuje řízení polohování stolku substrátu v plazmatickém reaktoru tryskového typu. Pomocí této aplikace se homogenně opracovává povrch testovaných vzorků. Úpravou přiložených zdrojových kódů aplikace napsané v Microsoft Visual C++ .NET 2003 může případný zájemce vytvořit vlastní aplikaci, která by lépe vyhovovala jeho požadavkům.

6 Literatura a odkazy

- [1] Petr Novák: Mobilní roboty – pohony, senzory, řízení, Technická literatura BEN, Praha 2005
- [2] P. Novák: Experimentální metody v robototechnice, Vysoká škola báňská v Ostravě, 1993
- [3] L. Piskač, Průmyslové roboty, Západočeská universita v Plzni, 2004
- [4] L. Piskač, Elektrické pohony – Principy a funkce, Západočeská universita v Plzni, 2003
- [5] P. Rydlo: Krokové motory a jejich řízení. Liberec, Technická univerzita v Liberci, 2000
- [6] K. Řezáč: Krokové motory, 2002
URL: <http://robotika.cz/articles/steppers/cs>
- [7] J. Novotný, J. Hnízdil: Rotační a lineární krokové motory, Brno, VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, 2005
URL: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05043/>
- [8] D. W. Jones: Control of Stepping Motors, THE UNIVERSITY OF IOWA Department of Computer Science
URL: <http://www.cs.uiowa.edu/~jones/step/index.html>
- [9] I. Viorel, L. Szabo, J. Dobai, Modular hybrid linear and surface stepper motors, DEPARTMENT OF ELECTRICAL MACHINES, MARKETING & MANAGEMENT of the Technical University of Cluj-Napoca
URL: http://bavaria.utcluj.ro/~szabol/Research_Results/Modular_hybrid_linear_and_surface_stepper_motor/Modular_hybrid_linear_and_surface_stepper_motor.htm
- [10] J. Hlava, Prostředky automatického řízení, ČVUT, 2000
URL: http://www.fm.vslib.cz/~krtsb/fm/par/Skripta_PAR.pdf
- [11] Oriental Motor GmbH, The Basics of Stepping Motors,
URL: <http://www.orientalmotor.de/de/uploads/documents/21122005144800.pdf>
- [12] R. Laidman, Stepper Motors a Control, Part IV-Microstepping of Stepper Motors, 2001

- [13] Paralelní port - LPT (IEEE 1284)
URL: <http://www.hw.cz/externi/1204/>
- [14] S. Zhahai, IBM Parallel Port FAQ/Tutorial
URL: <http://www.timgoldstein.com/CNC/ParallelPortPrimer.htm>
- [15] O. Mrázek, Přímý přístup na IO porty počítače pod Windows
2000/XP
URL: <http://new.hw.cz/Teorie-a-praxe/Programovani/ART1044-Primy-pristup-na-IO-porty-pocitace-pod-Windows-2000-XP.html>
- [16] IO. DLL dokumentace, URL: <http://www.geekhideout.com/iodll.shtml>