

Krokové motory

Při konstrukci strojů a přístrojů se často setkáváme s potřebou přesného polohování jejich pohyblivých částí. Použijeme-li k pohonu stejnosměrné (DC) nebo střídavé (AC) motory, je přesné polohování bez použití koncových spínačů, enkodérů a často také brzdy nebo spojky obtížné. Proto se, zvláště v menších zařízeních, velmi často používají krokové motory.

Výhody krokových motorů...

- Úhel natočení hřídele je přímo úměrný počtu vstupních impulsů.
- Rychlost otáčení je úměrná frekvenci vstupních impulsů.
- Umožňují řízení v otevřené smyčce bez nutnosti polohové zpětné vazby.
- Rychlá a přesná reakce na zrychlení, zpomalení a změnu směru otáčení.
- Nekumulativní chyba polohování ($\pm 5\%$ z kroku úhlu).
- Velký točivý moment při nízkých rychlostech otáčení; není potřeba používat převodovky.
- Velký statický přídržný moment.
- Možnost aretace v zastaveném stavu.
- Obousměrný provoz bez složitějšího zapojení (oproti DC motorům).
- Přetížení a zastavení bez poškození.
- Vyšší životnost, protože motor nemá mechanické třecí kontakty (kartáčky a komutátor).
- Rotor je u většiny motorů uložen v přesných kuličkových ložiscích.

... a jejich nevýhody

- Při určitých rychlostech otáčení jsou krokové motory náchylné k rezonancím.
- Nejsou vhodné pro extrémě vysoké rychlosti otáčení.
- Pokud dojde ke ztrátě kroku, je bez použití systému pro měření skutečného otáčení motoru ztracena poloha poháněného stroje a systém musí být znovu inicializován.
- Krokové motory mají menší točivý moment než AC nebo DC motory srovnatelné velikosti a hmotnosti.

Typy krokových motorů

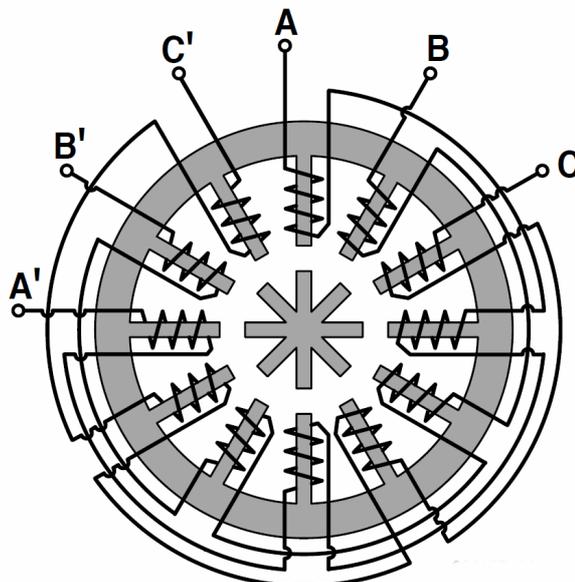
Na první pohled se krokové motory liší pouze svým, tvarem, rozměry, hmotností a počtem vodičů nebo kontaktů konektoru.



V současné době se můžeme setkat se třemi základními typy:

Motor s proměnnou reluktancí

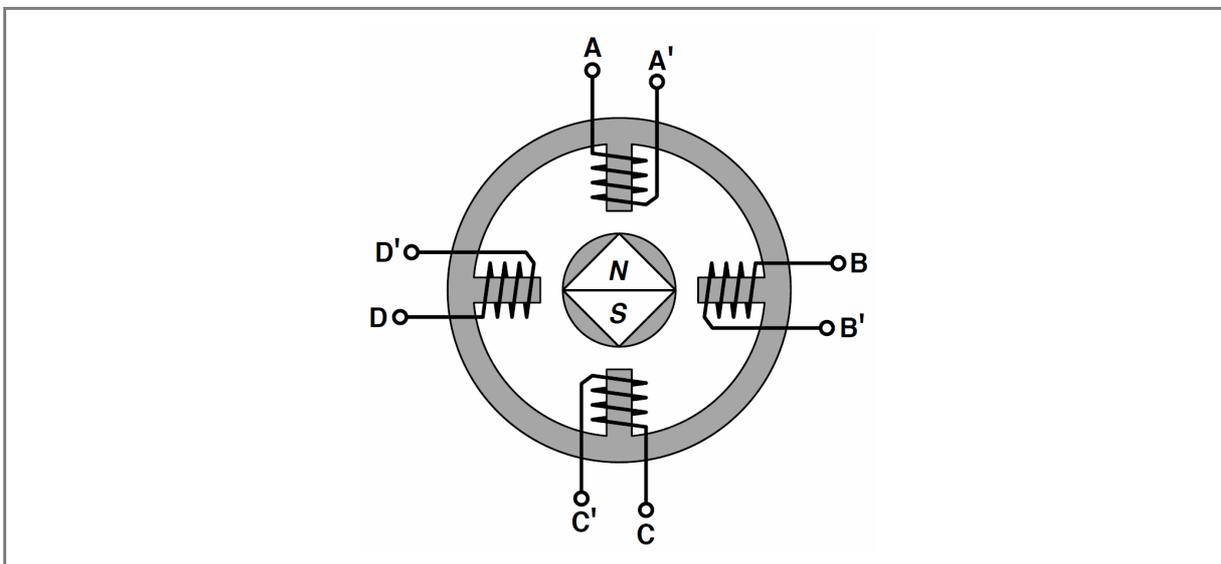
Toto je nejstarší konstrukce motoru a dnes se s ní setkáme již jen vyjimečně.



Rotor tohoto typu motoru tvoří pouze svazek plechů s pólovými nástavci, nalisovaný na hřídel (rotor je bez vinutí). Stator tvoří taktéž svazek plechů s pólovými nástavci, na nichž jsou uložena vinutí jednotlivých fází. Motor má v poměru ke své velikosti a hmotnosti malý točivý moment a je vhodný pouze pro aplikace, které nevyžadují velkou přesnost polohování. Tento typ motoru nejsnáze poznáme podle toho, že rotor se při protáčení rukou prohybuje plynule, bez zřetelného „krokování“.

Motor s rotorem tvořeným permanentním magnetem

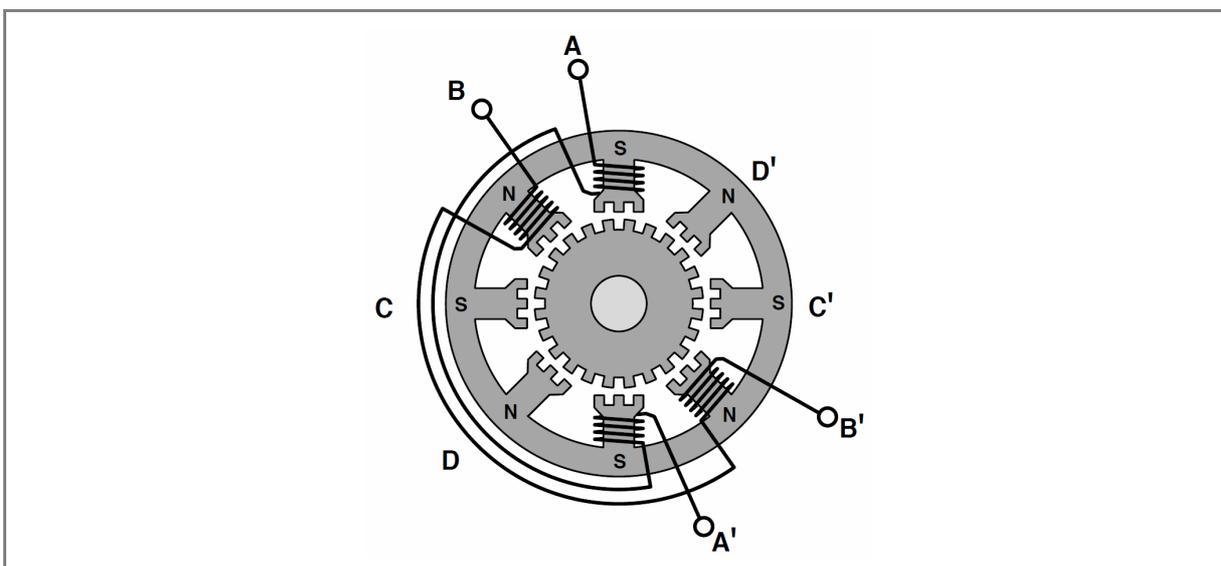
Jednoduchá konstrukce těchto motorů a tím pádem nízké výrobní náklady je předurčují k použití ve spotřební a automobilové elektronice, kde není překážkou velikost jejich kroku ($7,5$ nebo 15°) a malý dosažitelný točivý moment.



Na obvodu rotoru, který je tvořen radiálně pólovým permanentním magnetem, se u tohoto typu motoru střídají severní a jižní póly, jejichž počet je poloviční než počet pólů statoru.

Hybridní krokový motor

Motory této konstrukce vykazují nejlepší momentové i dynamické parametry a jsou dnes v průmyslových aplikacích používány téměř výhradně.



Rotor hybridního motoru má na hřídeli z nemagnetického materiálu nalisovány dva pólové nástavce. Mezi pólovými nástavci je uložen axiálně polarizovaný permanentní magnet, který zmagnetuje každý z pólových nástavců na opačnou polaritu. Rotorové pólové nástavce mají na svém obvodu drážky tvořící ozubení; počet zubů určuje velikost kroku. Například pro 50 rotorových zubů vychází velikost kroku $1,8^\circ$. Rotorové pólové nástavce jsou proti sobě v osové směru natočeny o polovinu rotorové zubové rozteče, proti zubům jednoho nástavce leží drážky druhého nástavce.

Na statoru hybridního motoru je většinou osm vyniklých pólů, které jsou na čele též opatřeny drážkováním. Počty zubů statoru a rotoru nejsou shodné; obvykle se volí počet rotorových zubů větší.

Používané názvosloví

Rotační magnetické pole

Průtokem proudu vinutím krokového motoru se v magnetickém obvodu statoru vybudí magnetický tok (zmagnetuje se). Magnetický tok se uzavře přes rotor motoru, který se v magnetickém poli nastaví do takové pozice, ve které klade magnetickému toku nejmenší odpor. Aby se mohl rotor začít otáčet, musí být statorová vinutí připojována k napájecímu zdroji v určitém pořadí a polaritě, aby se vytvořilo točivé magnetické pole.

Otáčení rotoru krokového motoru je způsobeno posouváním magnetických polí statoru a rotoru a jejich vzájemnou interakcí. Stator i rotor motoru jsou vyrobeny z materiálu s malým magnetickým odporem, takže intenzita magnetického toku je značná. Magnetický tok přestupuje ze statoru do rotoru prostřednictvím magnetických pólů, konstrukčně upravených do – pro tento účel – nejvýhodnějšího tvaru.

Točivý moment krokového motoru závisí na mnoha faktorech, především na konstrukci motoru, na způsobu řízení proudu statorovými vinutími, na rychlosti otáčení a je přímo úměrný intenzitě magnetického toku, generovaného právě napájeným vinutím.

Fáze

Počet magnetických obvodů statoru krokového motoru s příslušnými vinutími se označuje jako počet fází motoru. Většina krokových motorů je dvoufázová, i když existují i tři a pětifázové motory

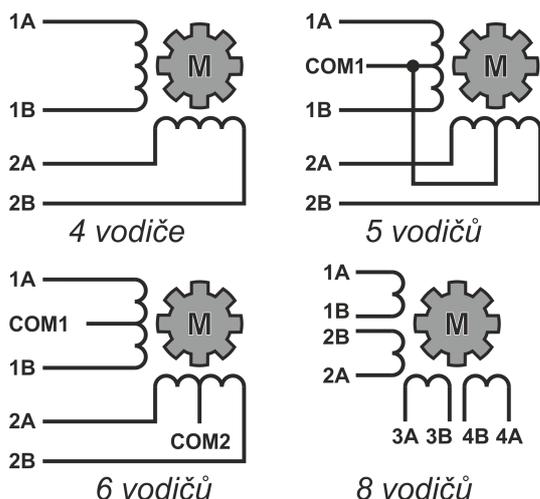
Bipolární motor má vždy jedno vinutí na fázi, vedou z něj tedy čtyři vodiče. Unipolární motor má dvě vinutí s vyvedeným středem, vede z něj tedy pět nebo šest vodičů.

Univerzální (bipolární / unipolární) motor má čtyři samostatná vinutí (dvě pro každou fázi), která je možno spojovat podle potřeby, vede z něj tedy osm vodičů.

Zapojení fázových vinutí

Krokové motory jsou vyráběny s různě zapojeným vinutím.

Mezi nejběžnější z nich patří:



Počet vodičů	Možné způsoby zapojení	
4	Bipolárně	
5	Unipolárně	
6	Unipolárně	
	Bipolárně	střed vinutí není zapojen
8	Unipolárně	vinutí spojena do série a střed je vyveden
	Bipolárně	vinutí spojena do série (střed není zapojen) nebo paralelně

Póly

Pól je definován jako oblast magnetického obvodu, kterou vystupuje magnetický tok z tohoto obvodu do okolního prostředí. Počet pólů statoru a rotoru krokového motoru závisí na jeho konstrukci; obecně lze říct, že čím je počet pólů větší, tím jemnější má motor krok.

Úhel kroku (Stepping Angle)

Je úhel, o který se motor pootočí po vykonání jednoho kroku a je dán vztahem:

$$\text{Úhel kroku} = 360 / n$$

kde

n = počet kroků motoru na jednu otáčku

Například u současného nejběžnějšího hybridního krokového motoru s 200 kroky na otáčku je tedy úhel jednoho kroku:

$$360 / 200 = 1,8^\circ$$

Statický moment (Holding Torque)

Maximální stálý točivý moment, kterým je možno působit na hřídel zastaveného nabuzeného motoru, aniž by došlo k protočení rotoru.

Zbytkový moment (Detent Torque)

Maximální stálý točivý moment, kterým je možno působit na hřídel nenabuzeného motoru, aniž by došlo k protočení rotoru.

Momentová charakteristika (Speed/Torque Curve)

Momentová charakteristika krokového motoru je funkcí budicího obvodu, způsobu buzení a momentu setrvačnosti zátěže.

Maximální rozběhová frekvence (Maximum Starting Frequency)

Maximální kmitočet budících pulsů (STEP), při kterém se krokový motor ještě rozběhne a zastaví v režimu Start – Stop (bez rozběhové a doběhové rampy) bez ztráty kroků.

Maximální točivý moment (Pull-out Torque)

Maximální točivý moment, který může motor poskytnout na hřídeli při běhu konstantní rychlostí, aniž by došlo ke ztrátě kroků.

Rozběhový točivý moment (Pull-in Torque)

Maximální točivý moment, který může krokový motor poskytnout v režimu Start – Stop bez ztráty kroků.

Opakovatelná přesnost polohování (Accuracy)

Tato přesnost je definována jako rozdíl mezi teoretickou a skutečnou polohou rotoru při jmenovitém zatížení, vyjádřený v procentech úhlu kroku.

Obvykle je to přibližně $\pm 5\%$ a tato chyba polohování se při běhu motoru nekumuluje.

Celková odchylka polohy (Hysteresis Error)

Je maximální akumulovaná odchylka od teoretické polohy rotoru pro oba směry otáčení.

Rezonance

Krokový motor reaguje na řadu impulsů, vstupujících do jeho řídicí jednotky; každým pulsem se rotor posune o jeden krok. V průběhu tohoto jediného kroku musí rotor motoru zrychlovat a zpomalovat až do zastavení. To způsobuje překmity a vibrace. Při určitých frekvencích signálu STEP (v závislosti na druhu a typu motoru), označovaných jako rezonanční, ztrácí motor točivý moment. Cílem každého konstruktéra je návrh systému, u kterého se v provozním režimu žádné rezonanční frekvence neobjeví. Problém s rezonančními frekvencemi lze odstranit mechanickým tlumením celého systému pomocí setrvačnicků a závaží, nebo použít pokročilejší řídicí jednotky, používající elektrické tlumení a mikrokrokování.

Jmenovité napětí

Převážná většina krokových motorů je napájena ze zdroje konstantního proudu. Vyskytují se samozřejmě i motory, které jsou napájeny konstantním napětím, které se většinou pohybuje v rozsahu od 5 do 24 V. Tyto motory jsou určeny pro speciální aplikace, kde není vyžadována velká rychlost otáčení a v nabídce výrobců jsou v menšině.

Normalizace motorů

Krokové motory s rotorem z permanentního magnetu se vyrábějí v mnoha různých velikostech a tvarech, které jsou poplatné způsobu jejich použití.

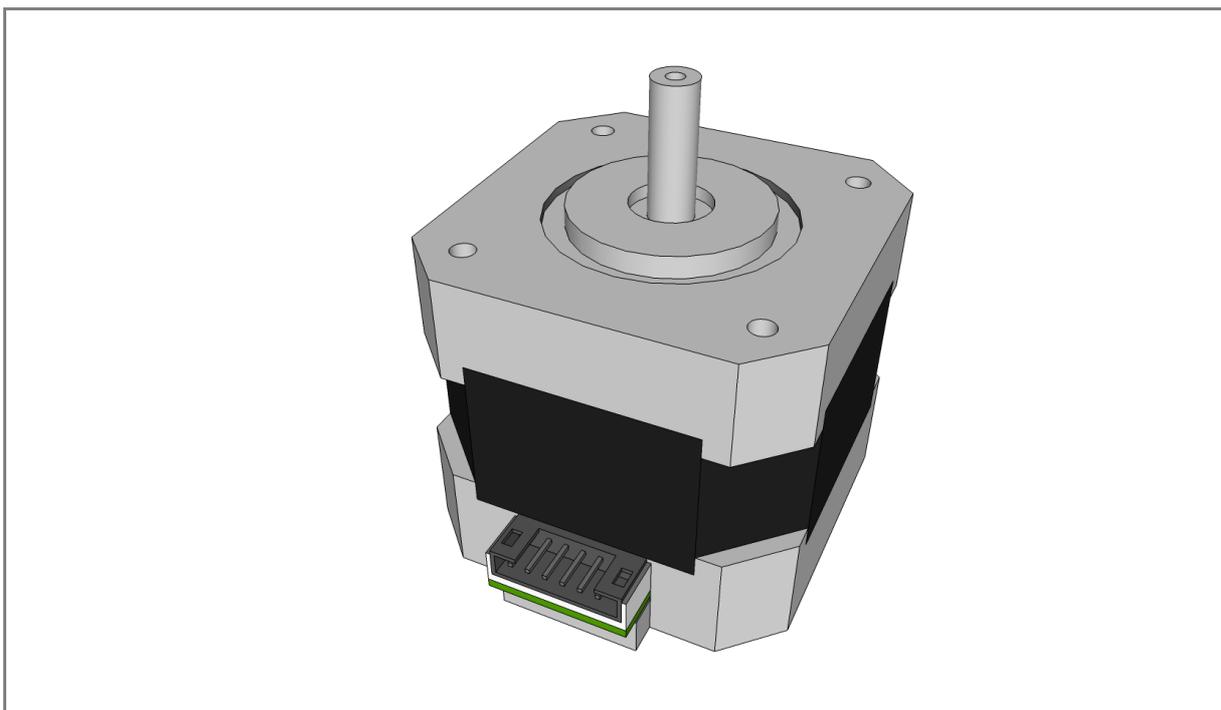
Hybridní krokové motory se naproti tomu vyrábějí většinou podle doporučení NEMA (National Electrical Manufacturers Association) ve standardním provedení se čtvercovou přírubou. Velikost motoru se určuje podle délky strany této příruby v palcích; velikost motoru NEMA 08 znamená přírubu rozměru 0,8×0,8 palce (přibližně 20×20 mm), NEMA 42 4,2×4,2 palce (107×107 mm).

V nabídce výrobců jsou motory s hřídelem v palcových i metrických průměrech a různých tvarů, délek i provedení.

Osová délka krokových motorů je různá a obecně se dá říci, že čím je motor delší, tím u něj můžeme očekávat větší točivý moment.

Normalizace velikosti příruby motoru ovšem neznámá, že motory různých výrobců jsou shodné i v ostatních parametrech. Právě naopak, parametry je nutno velmi pečlivě srovnávat, protože především točivý moment různých vzhledově podobných motorů se může lišit až řádově.

Běžné velikosti motorů jsou NEMA 8, 11, 14, 16, 17, 23, 24, 34 a 42.



*Typické provedení motoru s přírubou podle doporučení NEMA
(National Electrical Manufacturers Association)*

Způsoby řízení krokových motorů

Čtyřtaktní s magnetizací jedné fáze (Wave Drive)

V tomto režimu je v každém kroku vybuzena pouze jedna fáze.

V případě unipolárního motoru se využívá naráz jen 25% všech vinutí, u bipolárního motoru jen 50% všech vinutí.

Krok	Fáze A	Fáze B	Fáze A'	Fáze B'
1	•			
2		•		
3			•	
4				•

Čtyřtaktní s magnetizací dvou fází (Full Step Drive)

V tomto režimu jsou v každém kroku buzeny dvě fáze.

U unipolárního motoru se využívá naráz 50% všech vinutí, u bipolárního motoru se využívá 100% vinutí.

Krok	Fáze A	Fáze B	Fáze A'	Fáze B'
1	•	•		
2		•	•	
3			•	•
4	•			•

Osmitaktní (Half Step Drive)

Tento režim kombinuje oba předchozí způsoby. Jeho výhodou je, že takzvaně půlí krok, čili počet kroků na jednu otáčku je při tomto způsobu řízení dvojnásobný. Daní za to je ovšem je proměnný točivý moment motoru.

U unipolárních motorů se v tomto režimu využívá vždy v jednom kroku 25% a v druhém 50% vinutí, průměrně se tedy využívá 37,5% všech vinutí, u bipolárních motorů se v tomto režimu využívá vždy v jednom kroku 50% a v druhém 100% vinutí, průměrně se tedy využívá 75% všech vinutí.

Krok	Fáze A	Fáze B	Fáze A'	Fáze B'
1	•	•		
2		•		
3		•	•	
4			•	
5			•	•
6				•
7	•			•
8	•			

Mikrokrokování (Microstepping)

Při mikrokrokování se proudy ve vinutích mění po malých krocích (v jednom vinutí proud vzrůstá, v druhém zrcadlově klesá), a tím se jeden krok rozdělí na mnoho menších, takzvaných mikrokroků. Čím je mikrokroků více, tím se průběh proudu, protékajícího jednotlivými fázovými vinutími, více přibližuje ideálnímu sinusovému průběhu.

Při mikrokrokování se vždy využívají všechna vinutí naráz, i když nikoli s plným výkonem.

Na trhu jsou dostupné řídicí integrované obvody, které dovolují rozdělit jeden celý krok motoru až na 128 mikrokroků. Mikrokrokování dovoluje motoru dosáhnout vysokých otáček při dobrém průběhu točivého momentu a celkově uklidňuje chod motoru.

Výhody a nevýhody mikrokrokování jsou podrobněji rozebrány v příloze číslo 2.

Řídicí obvody

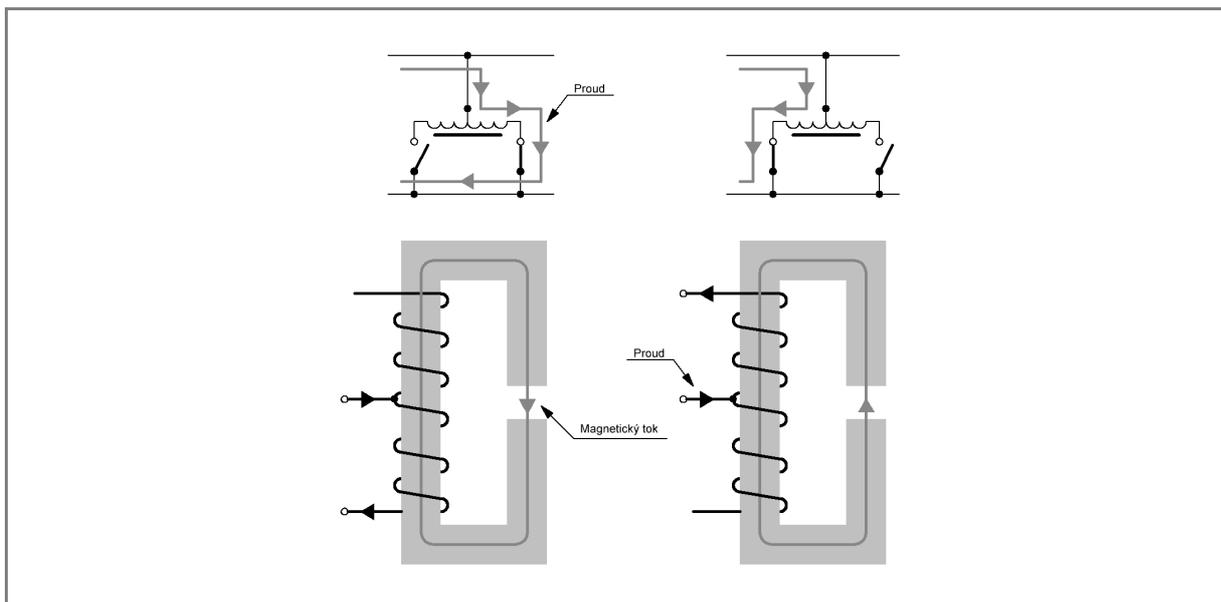
Řídicí obvod krokového motoru má dva hlavní úkoly:

- Měnit směr magnetického toku obvodem motoru změnou směru toku proudu vinutím.
- Omezit velikost proud vinutím na bezpečnou velikost a zároveň zajistit co nejrychlejší nárůst proudu ve vinutí, aby bylo dosaženo co nejvyššího výkonu a úplného využití možnosti motoru.

Změna směru magnetického toku

Aby se mohl krokový motor nepřetržitě otáčet, je třeba po každém kroku změnit směr magnetického toku magnetickým obvodem statoru. Toho se dosahuje obrácením směru toku proudu vinutím. Změny směru toku proudu je možno dosáhnout dvěma způsoby:

Unipolární řízení



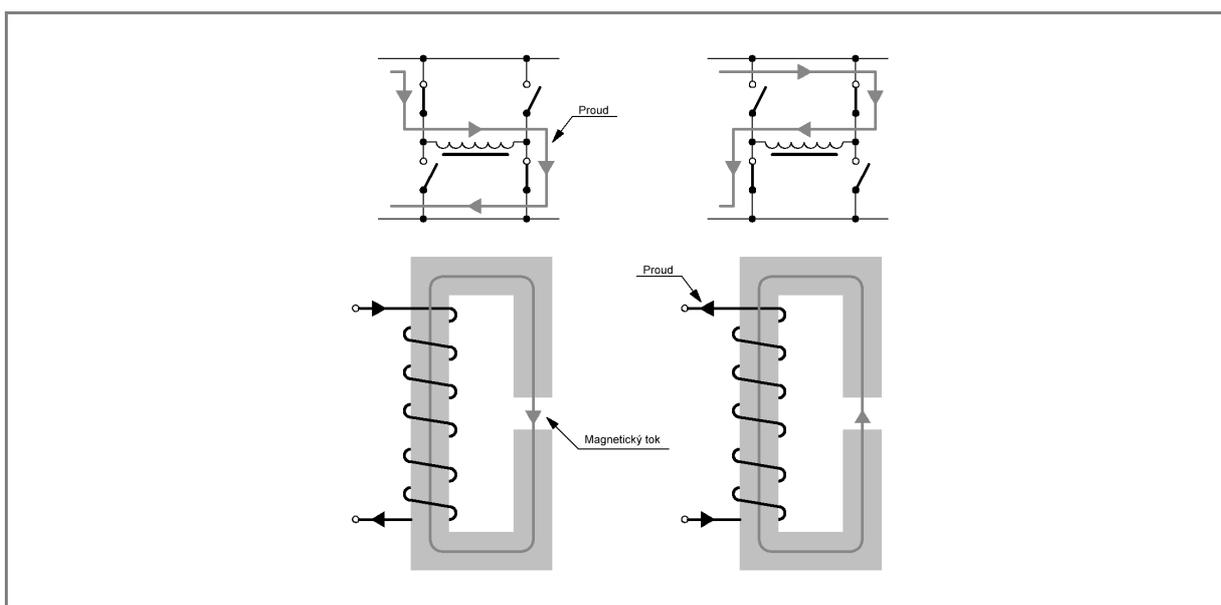
Pro tento způsob řízení je nutno každé fázové vinutí statoru krokového motoru rozdělit na dva segmenty a změny směru magnetického toku dosahovat jejich střídavým spínáním.

Protože poloviny vinutí jsou navinuty protisměrně, protéká proud každou polovinou opačným směrem.

Jak je zřejmé z obrázku, pro každou fázi jsou potřebné jen dva spínací prvky, zapojené na jednom konci (pólu) vinutí.

Proto je tento způsob spínání pojmenován **UN**ipolární.

Bipolární řízení



Každé fázové vinutí krokového motoru je zapojeno do úhlopříčky H-můstku. Podle způsobu sepnutí jednotlivých spínačů můstku se vinutí přepólovávají a tím se mění směr toku elektrického proudu a následně magnetického toku ve statoru, nebo se mohou úplně odpojit od napájecího napětí.

Jak je zřejmé z obrázku, pro každou fázi jsou potřebné čtyři spínací prvky, zapojené na obou koncích (pólech) vinutí.

Proto je tento způsob spínání pojmenován **BI**polární.

Napájení krokových motorů

Napájení jmenovitým napětím

Nejmenší krokové motory mají statorové cívky takových parametrů, že pracovní proud dosahuje jmenovité velikosti při standardizovaných napájecích napětích. Tyto motory jsou určeny jen pro nejjednodušší aplikace, protože tento způsob napájení nedovoluje dosáhnout vyšších rychlostí otáčení ani větších točivých momentů. Přesto se s těmito motory můžeme často setkat ve výrobcích, určených pro automobilový průmysl (nastavení zpětných zrcátek, nastavení světlometů) a ve spotřebním průmyslu, především ve starších tiskárnách.

V praxi se nejčastěji lze setkat s napájecími napětími 5, 12 a 24 V.

Napájení proudem jmenovité hodnoty

Aby se eliminovaly nevýhody, způsobené napěťovým napájením, převážná většina krokových motorů se napájí z proudového zdroje, jehož charakteristika zaručuje, že nárůst proudu statorovým vinutím bude co možná nejrychlejší. Napětí takového zdroje se používá co možná nejvyšší, běžné jsou hodnoty mezi 36 a 100 V.

Příkon motorů a provozní teplota

Příkon běžných krokových motorů se pohybuje od několika set miliwattů, až po několik desítek wattů (u větších motorů). Maximální ztrátový výkon krokového motoru je dán pouze tepelnou odolností jeho vinutí. Tento parametr je bohužel v údajích výrobce motoru uveden jen vzácně, proto se většinou musíme spokojit s empirickou zkušeností, která nám říká, že běžný krokový motor by se v provozu neměl ohřívat více, než o 65° C nad teplotu okolního prostředí.

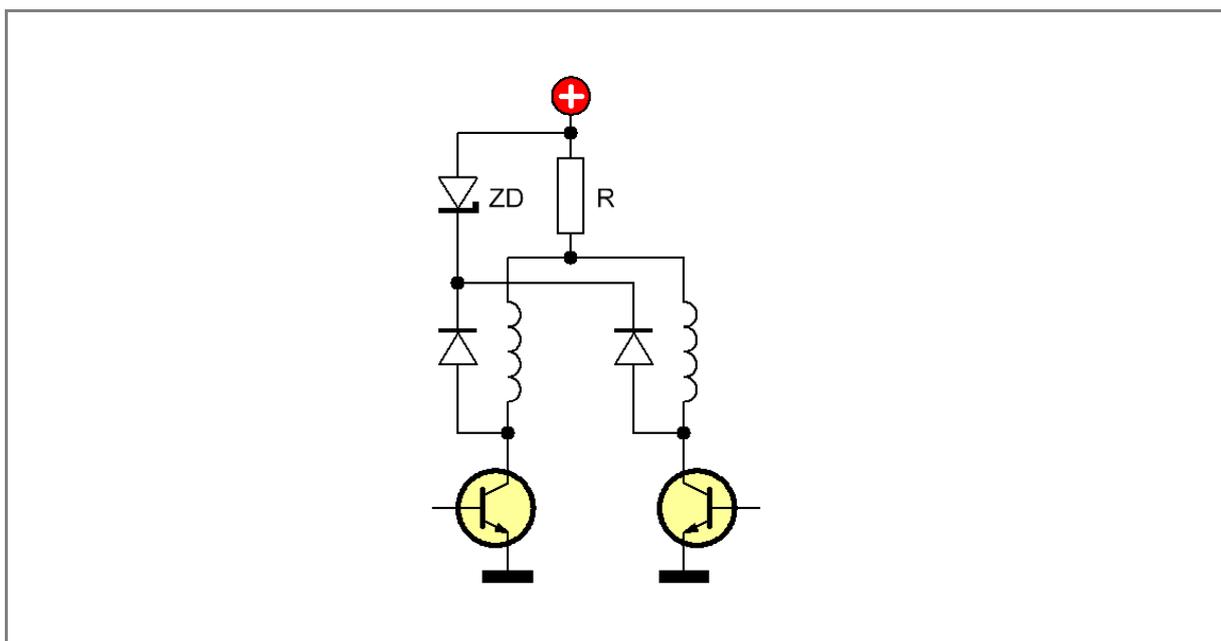
Ztrátový výkon motoru můžeme zvýšit použitím přídatného chladiče nebo chlazením ofukem.

Řízení velikosti proudu, protékajícího vinutím

Účelem řízení velikosti proudu, protékajícího vinutím, je omezit ztrátový výkon na odporu vinutí na přípustnou velikost a zároveň dosáhnout co nejlepších mechanických parametrů motoru.

Existují dva hlavní principy: lineární omezení proudu a pulsní řízení proudu. Oba způsoby je možno použít pro bipolární i unipolární výkonové budiče.

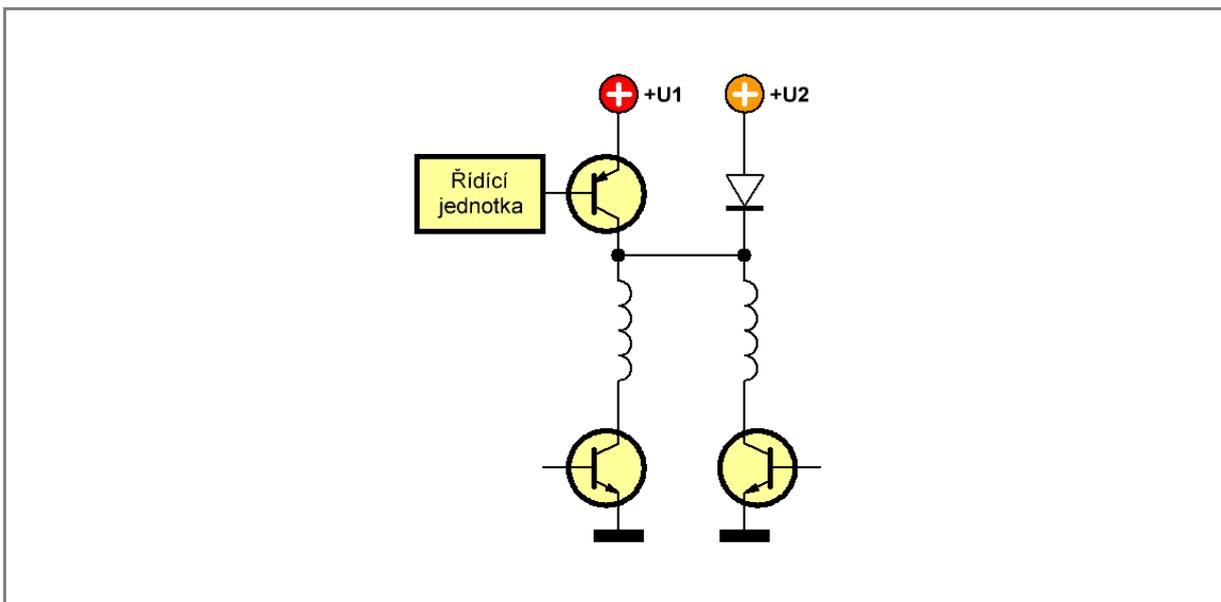
Omezení proudu předřadným rezistorem



Tento způsob řízení využívá k omezení proudu vinutím sériově zapojeného předřadného rezistoru R takové velikosti, která zaručí omezení proudu na přípustnou hodnotu. Díky tomu je možno použít pro napájení motoru mnohem vyšší napětí a nárůst proudu tekoucího vinutím na jmenovitou hodnotu je díky většímu poměru U / L mnohem rychlejší. Nevýhodou tohoto způsobu řízení je značný ztrátový výkon na předřadném rezistoru.

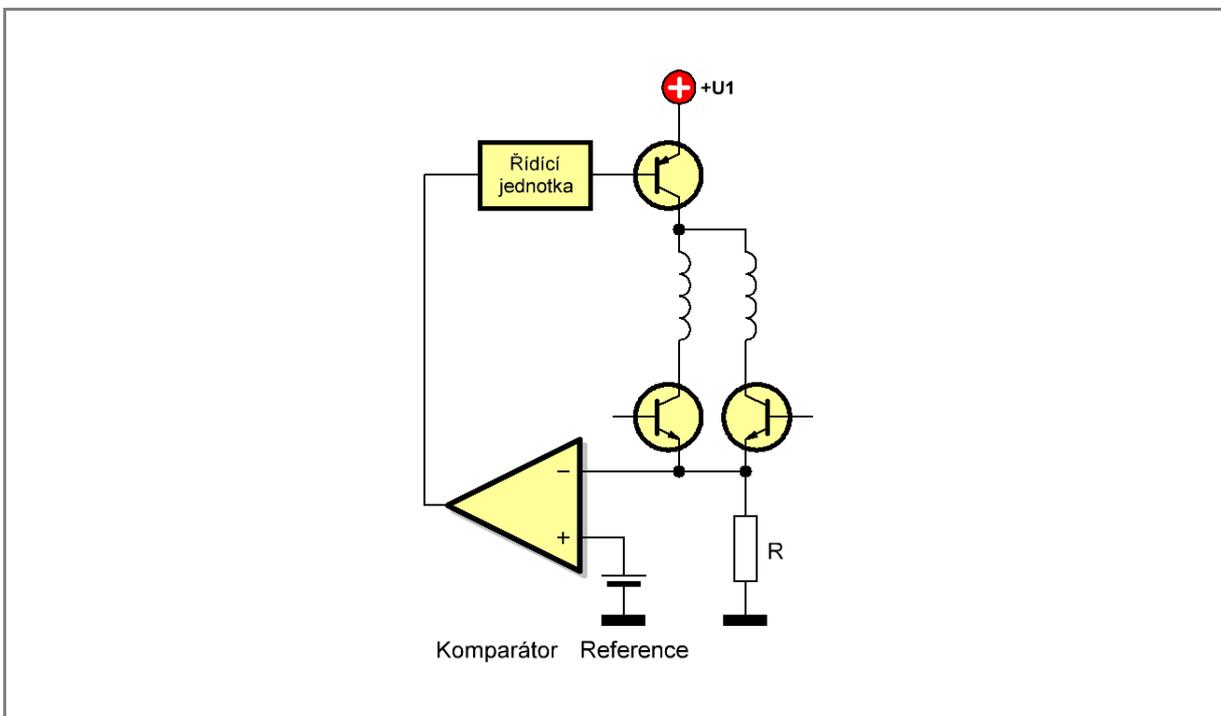
Zajímavým prvkem zapojení je zenerova dioda ZD, zapojená do série s diodami, které omezují přepětové špičky na vinutích, díky níž je možno dosáhnout vyšších rychlostí otáčení, ovšem za cenu většího napěťového namáhání polovodičových spínacích prvků.

Dvouhadinové řízení proudu



Pro napájení vinutí motoru se v tomto případě používá sekundární zdroj s vyšším napětím, který je k vinutí připojen jen do té doby, než proud vinutím naroste na požadovanou hodnotu. Po nastavené době nebo až proud dosáhne této hodnoty, se sekundární zdroj odpojí. Nevýhodou tohoto způsobu řízení je potřeba druhého napájecího zdroje.

Pulsní řízení proudu (Chopper Control)



Pulsní ovládání velikosti proudu je optimálním způsobem zajištění rychlého nárůstu proudu vinutím motoru a zároveň jeho omezením na bezpečnou velikost. Základní myšlenkou je použití co nejvyššího napájecího napětí, které mnohonásobně převyšuje nominální napětí motoru. Doba nárůstu napětí na vinutí je při tomto způsobu napájení podstatně kratší, než ve výše zmiňovaných zapojeních.

Díky pulsnímu řízení proudu je stále zachována jmenovitá střední hodnota napětí a tím i velikosti proudu vinutím motoru. Zpětné vazby, nutné k regulaci proudu na konstantní hodnotu je dosaženo tím, že se velikost proudu snímá jako úbytek napětí na rezistoru R , zařazeném v sérii s vinutím motoru a komparátorem porovnává s referenčním napětím. Toto napětí poskytuje zpětnou vazbu obvodu, řídícímu velikost proudu, protékajícího vinutím motoru.

Příloha 1:

Srovnání různých způsobů řízení krokových motorů

Způsob řízení	Cena Počet výkonových prvků	Úroveň elektrického rušení	Točivý moment Rychlost Rozlišení polohy	Účinnost	Poznámka k návrhu	Doporučené použití
Unipolární s konstantním napájecím napětím	Nízká 4 výkonové tranzistory pro motor	Nízká	Statický moment závisí na napájecím napětí a teplotě motoru Velké zvlnění točivého momentu v osmitaktním režimu	Nejnižší výkon Nízká účinnost Maximální příkon v klidovém stavu	Výkonové tranzistory musí být dimenzovány na dvojnásobek napájecího napětí Napájecí napětí musí odpovídat jmenovitému napětí vinutí motoru	Pro nízké rychlosti otáčení a pro motory malého výkonu
Unipolární s omezením proudu předřadným rezistorem	Nízká 4 výkonové tranzistory pro motor	Nízká	Statický moment závisí na napájecím napětí a teplotě motoru Velké zvlnění točivého momentu v osmitaktním režimu	Velmi nízká účinnost Maximální příkon v klidovém stavu	Komplikované chlazení předřadných rezistorů	Pro nízké a střední rychlosti otáčení a motory malého výkonu
Unipolární s dvouúrovňovým řízením proudu	Střední 6 výkonových tranzistorů pro motor Je nutno použít MCU nebo časovací obvod	Střední	Statický moment závisí na napájecím napětí a teplotě motoru	Střední účinnost	Pokud je poměr mezi úrovněmi napětí velký, snižuje se podstatně statický moment a může dojít ke ztrátě kroku	Pro nízké a střední rychlosti otáčení a motory malého a středního výkonu
Unipolární se zdrojem konstantního proudu	Vyšší 6 výkonových tranzistorů pro motor	Střední až vysoká	Optimální točivý moment ve vysokých rychlostech 70% točivého momentu v nízkých otáčkách Minimální zvlnění točivého momentu při použití v osmitaktním režimu	Střední až vysoká účinnost	Výkonové tranzistory musí být dimenzovány na dvojnásobek napájecího napětí Velikost indukčnosti vinutí je třeba vzít v úvahu při návrhu ochranných obvodů	Pro vysoké rychlosti otáčení a motory středního výkonu
Bipolární se zdrojem konstantního proudu	Vysoká 8 výkonových tranzistorů pro motor Nejvhodnější je použít specializované integrovane obvody	Vysoká	Optimální točivý moment při vysoké i nízké rychlosti	Vysoká účinnost Maximální O / P výkon Část výkonu se ztrácí na snímacích rezistorech	Při nesprávném návrhu zapojení může dojít k elektrickému kmitání a tím ke vzniku elektrického rušení	Pro vysoké rychlosti otáčení a pro motory s velkým výkonem
Bipolární s pulsním řízením proudu Mikrokrokování	Nejvyšší 8 výkonových tranzistorů pro motor Nejvhodnější je použít specializované integrovane obvody	Vysoká	Optimální točivý moment při vysoké i nízké rychlosti Klidný běh bez rezonancí při nízkých rychlostech Vysoká přesnost polohování	Vysoká účinnost Maximální výstupní výkon Část výkonu se ztrácí na snímacích rezistorech	Při nesprávném návrhu zapojení může dojít k elektrickému kmitání a tím ke vzniku elektrického rušení	Pro vysoké rychlosti otáčení a pro motory s velkým výkonem Používá se při potřebě přesného polohování a pro chod motoru bez rezonancí

Příloha 2:

Mikrokrokování: sny a skutečnost

Kterého konstruktéra by nelákala myšlenka využít při práci s krokovými motory mikrokrokování?

Vždyť mít možnost rozdělit 200 základních kroků o velikosti 1,8 úhlového stupně do dalších 256 poloh a získat tak 51 200 kroků na otáčku je na první pohled velmi lákavé.

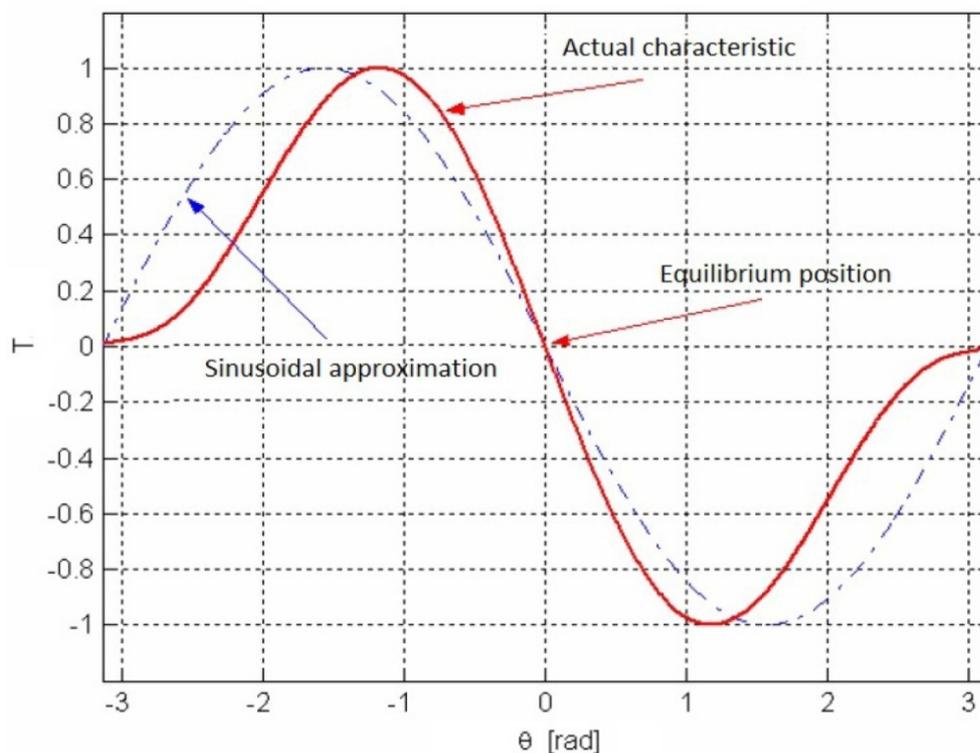
Takže kde je háček?

Ve skutečnosti ovšem, jakmile začnete mikrokrokováním zvětšovat počet poloh motoru, značně rychle klesat točivý moment motoru, který se ho snaží nastavit do poloh, vložených mezi jednotlivé celé kroky. Celkový počet poloh, do nichž můžete motor nastavit se sice zvýší, ovšem přesnost polohování se kupodivu nejen nezvýší, ale možná naopak i sníží.

Na grafu vidíte, jak by měl vypadat ideální průběh pohybu rotoru mezi dvěma úplnými kroky. Jak ale ukazuje druhá křivka, jeho pohyb se od ideálu hodně liší. Na začátku se rotor z polohy, která odpovídá celému kroku pohybuje “neochotně” protože ho brzdí přídržný moment magnetického obvodu, způsobený remanentním magnetismem, a jakmile se rotor přibližuje k následující celé poloze, tak ho naopak táhne magnetická síla urychluje. Na začátku cyklu jsou tedy skutečné mikrokroky kratší než by teoreticky měly být, na konci se naopak proti těm teoretickým prodlužují.

Protože se točivý moment motoru snižuje úměrně k tomu, jak se zvyšuje vzdálenost pólů rotoru a statoru a tím klesá okamžitý magnetický tok, nastupuje ještě skluz od ideální polohy, vyvolaný mechanickým zatížením rotoru.

Aby nebylo ještě dost potíží, tak pokud je frekvence krokování malá – tedy právě v okamžiku, kdy by měl rotor zaujmout přesnou stabilní polohu – začnou se dost výrazně uplatňovat mechanické rezonance motoru, způsobené mnoha vlivy, od velikosti zátěže a způsobu jejího připojení k motoru až po upevnění motoru k nosné konstrukci.



Čerchovaná čára: ideální poloha rotoru krokového motoru při pohybu mezi jednotlivými celými kroky.
 Plná čára: skutečná poloha rotoru.

A navíc, ačkoli drivery, které umožňující mikrokrokování se používají už dlouho, přesto prozatím málokterý z nich dokáže při tomto způsobu buzení motoru na svém výstupu produkovat průběh alespoň vzdáleně se podobající tomu ideálnímu.

Točivý moment pro jeden mikrokrok:

$$T_{INC} = T_{HFS} \times \sin(90/\mu PFS) \quad [1]$$

Přírůstek točivého momentu pro N mikrokroků:

$$T_N = T_{HFS} \times \sin((90 \times N)/\mu PFS) \quad [2]$$

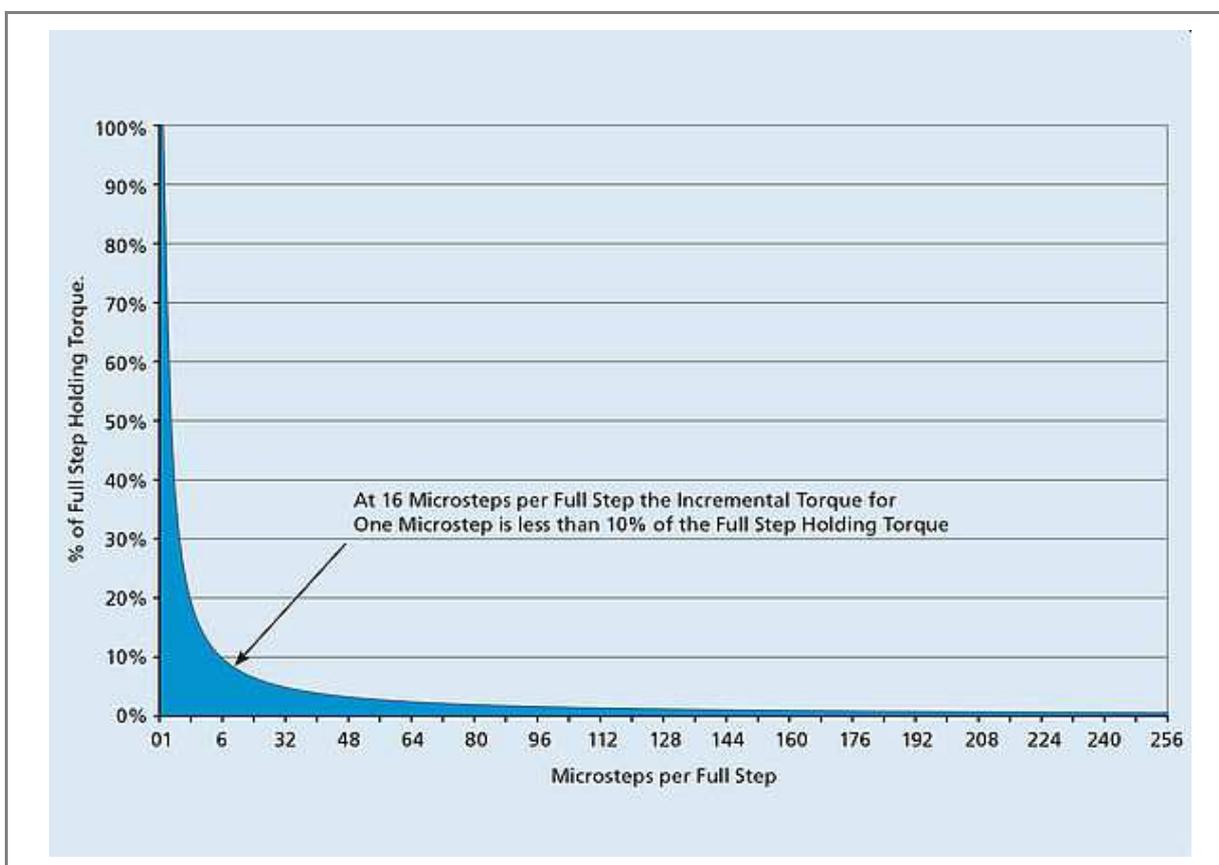
V rovnicích [1] a [2] se režim full-step považuje za jeden mikrokrok, režim half-step za dva mikrokroky.

Tabulka 1: význam jednotlivých symbolů

Symbol	Definice	Jednotky
μPFS	Počet mikrokroků na jeden plný (full) krok	bezrozměrné
N	Počet již vykonaných mikrokroků mezi dvěma celými kroky (N musí být méně nebo rovno μPFS)	bezrozměrné
T_{HFS}	Točivý moment při celokroku (full-step)	Nm
T_{INC}	Přírůstek točivého momentu na mikrokrok	Nm
T_N	Přírůstek točivého momentu pro N mikrokroků (N musí být méně nebo rovno μPFS)	Nm

Tabulka 2: rychlost snižování přídržného momentu motoru při zvětšení počtu mikrokroků.

Počet mikrokroků na jeden plný krok	Velikost točivého momentu, vztaženého k celokroku
1	100,00%
2	70,71%
4	38,27%
8	19,51%
16	9,80%
32	4,91%
64	2,45%
128	1,23%
256	0,61%



Co z to vyplývá?

Důsledkem toho je, že v případě, že pokud je točivý moment, potřebný k provedení kroku větší, než točivý moment, který může motor mezi dvěma mikrokroky vyvinout, nezačne se motor otáčet okamžitě, ale až tehdy, když proběhne několik dalších mikrokroků a točivý moment vzroste natolik, že překoná mechanické odpory a odpor zátěže.

Pokud má motor mezi jednotlivými kroky malý točivý moment, má též malý moment přídržný; síly vznikající na zátěži ho mohou tedy snadno vychýlit z přesné polohy a nekontrolovaně ho strhnout dokonce až do polohy, odpovídající nejbližšímu celému kroku.

A to ještě není vše – pokud budeme motor reverzovat, pak se k mechanickým odporům připojí ještě setrvačné síly rotoru a připojené zátěže a okamžitá odchylka od přesné polohy tak ještě vzroste.

Vyplývá z toho tedy především to, že přesná poloha motoru mezi jednotlivými celými kroky je nejistá a předem neodhadnutelná. Pro přesné dodržení žádané polohy je nutné, aby motor svůj pohyb začínal a končil vždy v poloze, odpovídající celému kroku.

Dosažitelná přesnost polohy a rozlišení

Ale co když motor není zatížen?

I nezatížený krokový motor musí stále překonávat odpor ložisek a především přídržnou sílu, která se ho snaží udržet v poloze, odpovídající celému kroku. A tato přídržná síla není nikterak zanedbatelná, činí 5 až 20 % momentu točivého. Naopak, když se rotor motoru konečně “utrhne” a začne se přibližovat k další poloze celého kroku, bude se tato přídržná síla přičítat k momentu točivému a tentokrát tedy bude rotor naopak do další celé polohy přitahován. A součet všech těchto sil má neblahý vliv na přesnou polohu rotoru motoru mezi jednotlivými celými kroky.

Výrobci jsou si dobře vědomi těchto vlastností a někteří z nich vyrábějí motory, které jsou pro mikrokrokování přímo určeny (ale nehelejte je, prosím, mezi desetidolarovými motory z Číny). Tyto motory mají skutečně lepší polohovou přesnost mikrokroků, ovšem daní za to je značné snížení statického přídržného momentu, což znamená, že takové motory jsou určeny jen pro běh s velmi malou a navíc pokud možno neměnnou zátěží.

Kdy tedy mikrokrokování použít?

Pokud potřebujeme:

- snížit mechanický hluk.
- přesně řídit malé polohovací mechanismy
- zmenšit pravděpodobnost rezonancí

Stručně řečeno, i když mikrokrokování zvyšuje počet kroků na otáčku, v žádném případě nezvyší přesnost polohování.

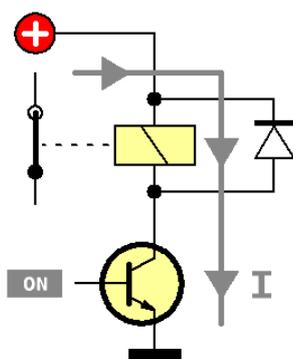
Jeho skutečným přínosem je snížení mechanických a magnetostrikčních hluků, hladší běh motoru a výrazné snížení rezonancí. To vše dohromady zmenšuje pravděpodobnost výpadku kroku a tím ztráty synchronizace systému, který pracuje v otevřené smyčce.

Hladší chod motoru se projeví také menším opotřebením celé mechanické přenosové soustavy.

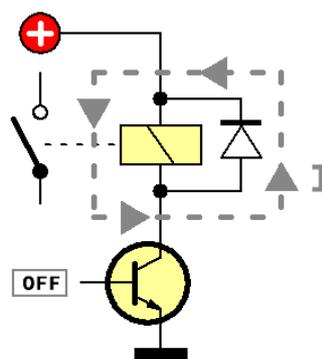
Řízený zánik budícího proudu

Cívka se při změně napětí snaží udržet stabilní velikost proudu¹. Když je odpojena od napájení, přestane jí proud protékat a protože se ho snaží udržet na původní hodnotě, musí generovat stále vyšší a vyšší napětí², které se pokoušíme už v zárodku potlačit.³

Impulzy vysokého napětí, které při rozpojení obvodu bez ochranných prvků vznikají ničí postupně mechanické spínací kontakty (jiskření), ale pokud cívku spínají polovodiče, jsou pro ně tyto vysokonapěťové impulzy jednoznačně smrtící, takže je jim třeba zabránit stůj co stůj. U běžné cívky, kterou na obrázcích 1 a 2 představuje elektromagnetické relé, vinutí stejnosměrného nebo krokového motoru se zvýšení napětí zabraňuje připojením opačně pólované diody paralelně k vinutí.



Obr. 1: Cívkou relé prochází budící proud



Obr. 2: Napájení je vypnuto a vzniklé elektromotorické napětí je zkratováno diodou

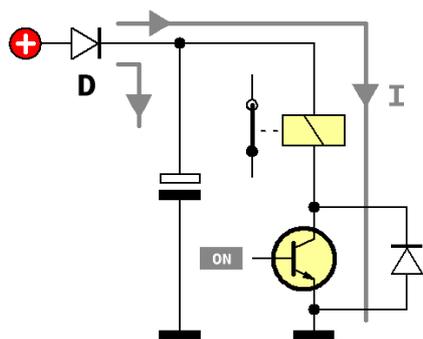
Ochranná dioda, která je připojena paralelně k vinutí cívky relé má za úkol zkratovat elektromotorické napětí opačné polaroty, které vznikne po odpojení napájení jako důsledek snahy cívky o zachování proudu. Proud zaniká rychlostí danou časovou konstantou L / R , přičemž R je součtem odporu vinutí a vnitřního odporu diody a energie takto zmařená se přemění v teplo.

Polovodičový spínač můžeme před přepětím chránit také diodou, paralelně zapojenou k němu. Je však třeba si uvědomit, že v tomto případě musíme zajistit proudu (vybuzenému vzniklým elektromotorickým napětím) cestu, kterou by mohl téct a zátěž, ve které by se mohl přeměnit v teplo.

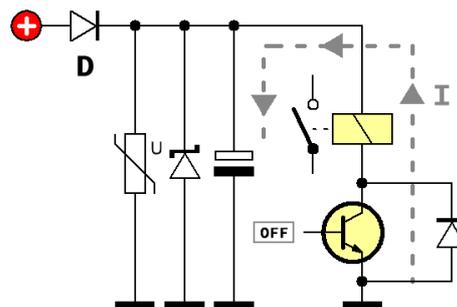
¹ Je opakem kondenzátoru, který se při změně proudu snaží udržet napětí.

² V ideálním případě až do nekonečna, což ale v praxi naštěstí nepřichází v úvahu, takže místo slova „nekonečno“ si dosadte jen „hodně velké“.

³ Naopak třeba v zapalování zážehových spalovacích motorů využíváme zvýšení napětí na odpojené cívce k vytvoření jiskry na svíčke.



Obr. 3



Obr. 4

Dioda D, na obrázcích 3 a 4 názorně demonstruje, že běžný napájecí zdroj dokáže proud jen dodávat a nikoli přijímat (není spotřebičem). Tím spotřebičem bude v tomto případě nejčastěji velký elektrolytický kondenzátor, který zároveň napájecí napětí filtruje a vykrývá proudové špičky. Pokud je ale na stejné napájecí větvi připojeno i další zařízení, které v daný okamžik proud spotřebovává, je zpětným elektromotorickým napětím napájeno, takže dochází k jednoduché rekuperaci. Rychlost zániku proudu je opět dána časovou konstantou L / R a v tomto případě je odpor R součtem všech vnitřních odporů zařízení, která jsou do tohoto obvodu zapojena.

V profesionálních zařízeních se pro vytvoření spotřebiče zpětného proudu používají buď napětově závislé rezistory (varistory), nebo rychlé přepětové ochrany (transil). Tyto prvky musí být samozřejmě správně dimenzovány s přihlédnutím k velikosti a tolerancím napájecího napětí a k velikosti energie, kterou mají pohltnout a přeměnit v teplo.

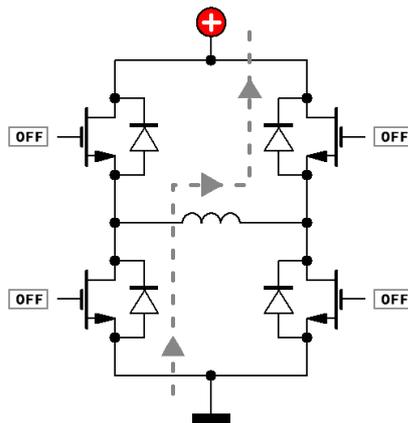
Vzhledem k tomu, že v amatérské praxi nebývá indukčnost cívek velká, je množství proudu celkem malé a jeho zánik trvá jen jednotky milisekund.

Odbuzení krokových motorů

U krokových motorů však jsou i jednotky (či dokonce jen zlomky) milisekund, po které proud v cívce zaniká, příliš dlouhá doba. Je tedy třeba najít způsob, jak zánik proudu urychlit.

V dalším textu předpokládáme, že vinutí motoru jsou buzena bipolárně, jak je to v současnosti zcela běžné.

První, v praxi příliš nevyužívanou možností je použít stejný způsob zániku proudu, jako na obrázku 4, tedy rekuperace.



Obr. 5

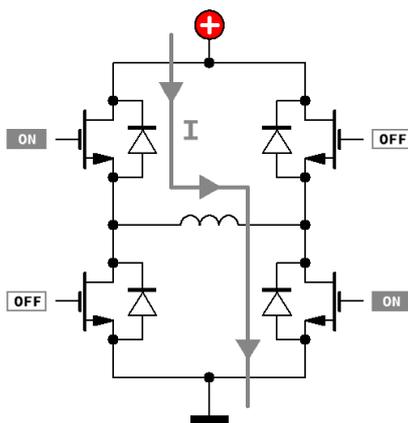
V tomto případě se uzavřou všechny čtyři spínače v můstku a proud zaniká tím, že vtéká do nějakého jiného spotřebiče. Rychlost zániku proudu je opět dána časovou konstantou L / R a v tomto případě je odpor R součtem všech vnitřních odporů zařízení, která jsou do tohoto obvodu zapojena.

Zmatek ovšem nastává v okamžiku, kdy někteří výrobci budičů pro indukční zátěže tento způsob odbuzení nazývají *slow decay* (viz dále).

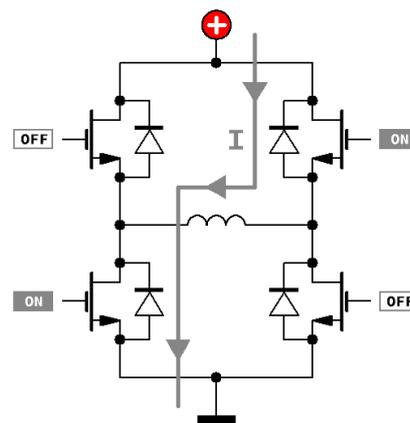
Aktivní odbuzení

Dva aktivní způsoby zrychlující zánik proudu ve vinutí krokového motoru jsou v literatuře nazývány rychlým odbuzením (*fast decay*) a pomalým odbuzením (*slow decay*). Názvy se vztahují k rychlosti zániku proudu ve vinutí, nikoli k intenzitě brzdění motoru.

Rychlé odbuzení



Obr.6: Vinutím prochází pracovní proud

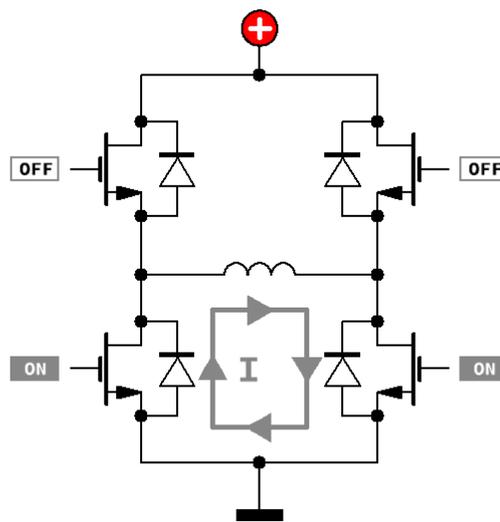


Obr. 7: Do vinutí je zaveden impuls napětí v opačném směru

Nejrychlejším způsobem odbuzení je přivedení opačně pólovaného napětí, které obrátí ve vinutí směr toku proudu. Rychlý pokles magnetického toku umožňuje zvýšit rychlost krokování, ale – protože impulsem proudu opačného směru rychle zanikne magnetický tok – brzdný moment je menší. Značnou nevýhodou tohoto způsobu odbuzení jsou velké proudové rázy v napájení.

Tento způsob odbuzení je neúčinnější, ale má největší energetické ztráty, které se projeví nejen velkým tepelným namáháním celého obvodu i motorů, ale také zvýšenou hlučností.

Pomalé odbuzení



Obr. 8

Při pomalém odbuzení jsou zapnuty dva protilehlé spínače v H-můstku, lhostejno zda dva spodní nebo dva horní. Tím je vinutí motoru zkratováno a proud v něm zaniká rychlostí určenou časovou konstantou L / R vinutí.

Smíšené odbuzení

Při použití mikrokrokování, kdy se řídicí obvod snaží, aby vinutím motoru protékal proud přibližně sinusového průběhu se pro odbuzení obvykle používá metoda smíšeného odbuzení (mixed decay).

Začíná se pomalým odbuzením, ale řídicí obvod zároveň měří skutečný proud, který vinutím protéká a pokud se příliš odlišuje od aktuálně nastaveného, teprve v tom okamžiku se v následujícím kroku motoru přejde k rychlému odbuzení.

Většinou se pomalé odbuzení používá během vzestupné části sinusovky, kdy rotor motoru zrychluje, protože při něm dochází k menším proudovým rázům v budícím obvodu. V sestupné části sinusovky, kdy je rotor motoru naopak třeba brzdit, už pomalé odbuzení nedokáže zajistit dostatečně rychlý zánik proudu k dodržení alespoň přibližného tvaru sinusovky a řídicí obvod přejde do režimu rychlého odbuzení. Tím se alespoň částečně minimalizují prudké změny proudu v napájecích obvodech.

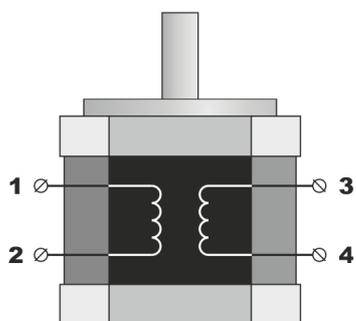
Závěr

Nastavení způsobu odbuzení ovlivňuje dynamiku pohonu, jeho celkové tepelné namáhání a také hluk, krokovými motory generovaný.

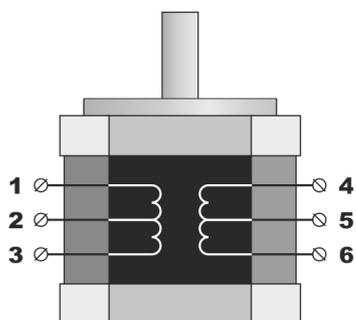
Popis způsobů odbuzení indukčních zátěží byl v tomto článku probrán jen přibližně, protože především u krokových motorů se vyskytuje mnoho různých (a bohužel též různě nazývaných), často patentovaných způsobů řízeného zániku proudu ve vinutí. Pro podrobnější pochopení konkrétního způsobu řízení zániku proudu je tedy vždy třeba podrobně prostudovat katalogový list příslušného budiče, nejlépe pak včetně aplikačních poznámek.

Příloha 4:

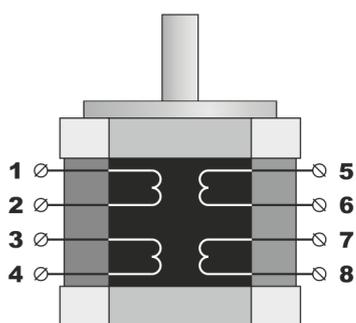
Barevné značení vývodů běžných krokových motorů



	1	2	3	4
I	rudá	modrá	zelená	černá
II	hnědá	oranžová	rudá	žlutá
III	rudá	modrá bílá	zelená	zelená bílá
IV	oranžová	černá	modrá	bílá



	1	2	3	4	5	6
I	rudá	bílá	modrá	zelená	žlutá	černá
II	hnědá	černá	oranžová	rudá	bílá	žlutá
III	rudá	černá	rudá bílá	zelená	bílá	zelená bílá



	1	2	3	4	5	6	7	8
I	modrá bílá	rudá bílá	modrá	rudá	zelená bílá	černá bílá	zelená	černá
II	rudá	žlutá bílá	rudá bílá	žlutá	oranžová	černá bílá	oranžová bílá	černá
III	rudá	černá bílá	rudá bílá	černá	zelená	žlutá bílá	zelená bílá	žlutá