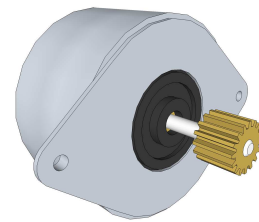
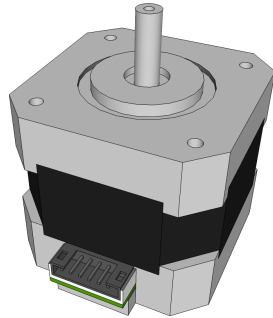


KROKOVÉ MOTORY

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.
- 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 moment.
- Aretace v zastaveném stavu.
- Obousměrný provoz.
- Krokový motor může být přetížen a zastaven bez poškození.
- Vyšší životnost, protože motor nemá kartáčky a komutátor.
- Rotor je u většiny motorů uložen v přesných kuličkových ložiscích

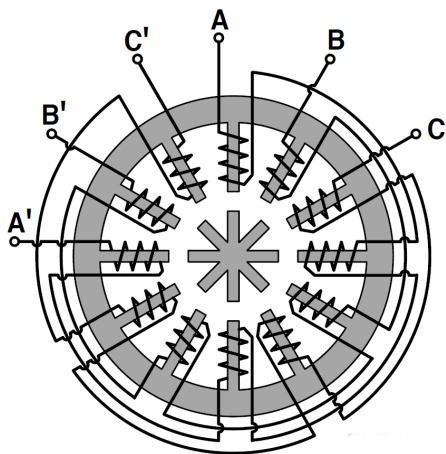
... a jejich nevýhody

- Jsou při určitých rychlostech otáčení náchylné k rezonancím.
- Nejsou vhodné pro extrémě vysoké rychlosti otáčení.
- Pokud dojde ke ztrátě kroku, je ztracena poloha poháněného stroje a systém musí být znovu inicializován.
- Mají menší točivý moment než AC nebo DC motory srovnatelné velikosti.

Typy krokových motorů

Na první pohled se krokové motory liší pouze velikostí, hmotností a počtem drátů nebo pinů konektoru. V praxi se ale můžeme setkat se třemi základními typy.

Motor s proměnnou reluktancí

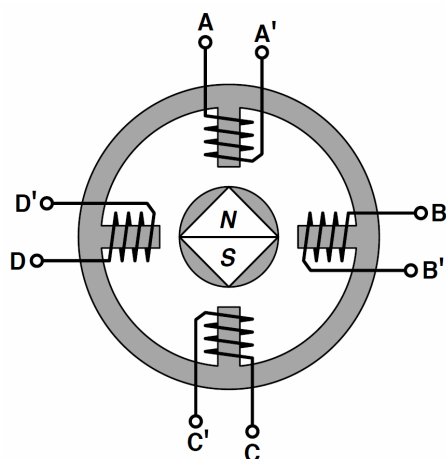


Toto je nejstarší konstrukce motoru, se kterou se dnes již setkáme málokdy.

Rotor tohoto typu motoru tvoří pouze svazek plechů s pólovými nástavci, nalisovaný na hřídel (rotor je bez vinutí). Stator tvoří také 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 jen pro aplikace, které nevyžadují velkou přesnost polohování.

Tento typ motoru nejsnáze poznáme podle toho, že rotor se při protáčení rukou prohýbá plynule, bez zřetelného „krokování“.

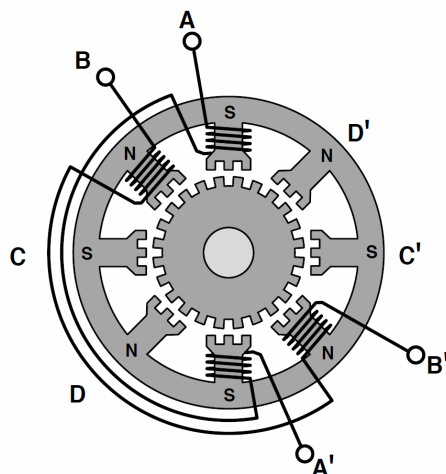
Motor s rotorem tvořeným permanentním magnetem



Na obvodu rotoru, vytvořeného z radiálně pólovaného permanentního magnetu, se u tohoto typu motoru střídají severní a jižní póly, jejichž počet je poloviční než počet pólů statoru.

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 výkon.

Hybridní 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 nalisovaný 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, jejichž počet určuje velikost kroku. Například pro počet rotorových zubů 50 vychází velikost kroku 1,8°. Rotorové pólové nástavce jsou proti sobě v osovém směru natočeny o polovinu rotorové zubové rozteče, proti zubům jednoho nástavce leží drážky druhého nástavce. Na statoru je 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 magnetickým 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

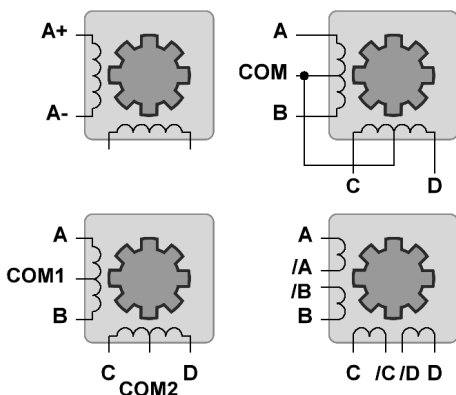
Počet magnetických obvodů statoru krokového motoru s příslušnými vinutími se označuje jako počet fází motoru. Většina krokových motorů je dvoufázová, i když existují i tři a pětifázové motory

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 buzení fázových vinutí
4	Bipolárně
5	Unipolárně
6	Unipolárně nebo bipolárně (vinutí spojena do série)
8	Unipolárně (vinutí spojena do série), bipolárně (vinutí spojena do série 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

$$n = \text{počet kroků motoru na jednu otáčku}$$

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 na hřídeli nabuzeného motoru, aniž by došlo k protočení.

Zbytkový moment (Detent Torque)

Maximální točivý moment, kterým může být zatížen hřídel nezapojeného motoru, aniž by došlo k protočení.

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 rozběhne a zastaví v režimu Start – Stop 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 dodat 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 vstupních impulsů, každý pulz způsobí rotor posune o krok. V průběhu 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 obvody, používající elektrické tlumení a mikrokrokování.

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 11 znamená přírubu rozměru 1,1×1,1 palce (přibližně 28×28 mm), NEMA 42 4,2×4,2 palce (107×107 mm). V nabídce výrobců jsou motory s hřídelem v palcových i metrických rozměrech různých tvarů, délek a provedení. Osová délka těchto 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 neznamená, že motory různých výrobců jsou shodné i v ostatních parametrech. Naopak, je nutno parametry velmi pečlivě srovnávat, protože především točivý moment se může lišit až řádově.

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

Způsoby řízení krokových motorů

Krokový motor může být řízen postupným spínáním fází v různých režimech:

Čtyřtaktní s magnetizací jedné fáze (Wave Drive)

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

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

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

Čtyřtaktní s magnetizací dvou fází (Full Step Drive)

V tomto režimu jsou v každém kroku buzeny dvě fáze.

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

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

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.

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

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.

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, nezvyšuje však přesnost polohování!

Řídicí obvody

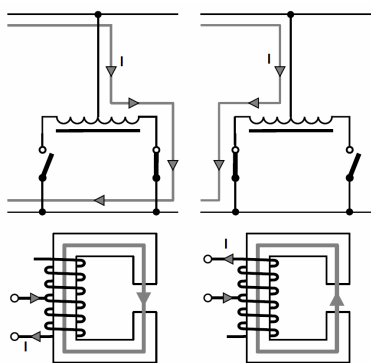
Řídicí obvod krokového motoru má dva hlavní úkoly:

1. Měnit směr magnetického toku obvodem motoru změnou směru toku proudu vinutím.
2. 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: unipolárním nebo bipolárním řízením.

Unipolární řízení



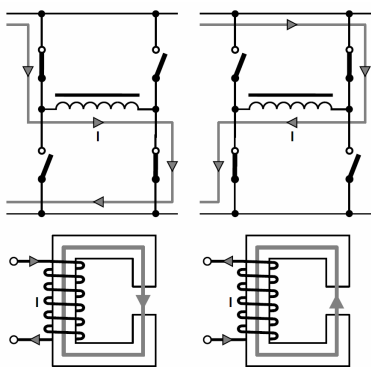
Pro tento způsob řízení je nutno každé fázové vinutí statoru krokového motoru rozdělit na dva segmenty a změny směru magnetického toku dosahovat jejich střídavým spínáním.

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 UNipolární.

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 Bipolární.

Napájení krokových motorů

Krokové motory můžeme v zásadě napájet dvěma způsoby:

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 setkáte 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.

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.

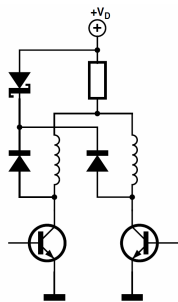
Ztrátový výkon motoru můžete zvýšit použitím přidavného chladiče nebo chlazením ofukem.

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: spojitě omezení proudu a pulsní řízení proudu. Oba způsoby je možno použít pro bipolární i unipolární výkonové budiče.

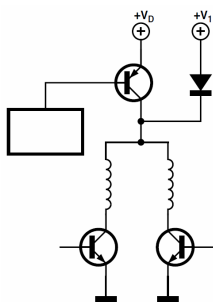
Omezení proudu předřadným rezistorem



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

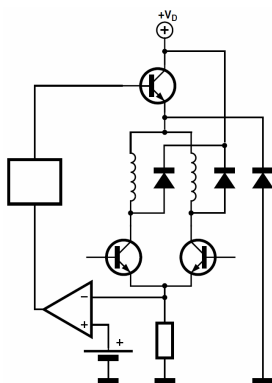
Zajímavým prvkem zapojení je zenerova dioda, zapojená do série s diodami, omezujícími přepěťové špičky na vinutích, díky níž je možno dosáhnout vyšších rychlostí otáčení, ovšem za cenu většího napěťového namáhání polovodičových spínacích prvků.

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 omezení 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, zařazeném v sérii s vinutím motoru. Toto napětí poskytuje zpětnou vazbu obvodu, řídícímu velikost proudu, protékajícího vinutím motoru.

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 výkon 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 výkon 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 integrované 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 integrované 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