

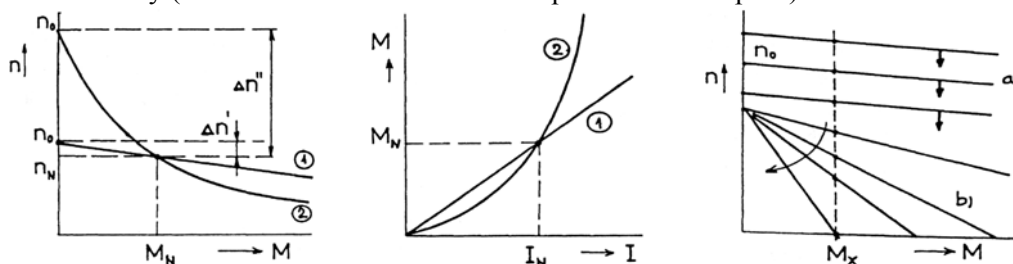
Téma 25

Jan Bednář bednaj1@fel.cvut.cz

mechanická charakteristika $n=f(M)$ závislost rychlosti n na elektromagnetickém momentu M vznikajícím ve stroji vzájemným působením vinutí protékanych proudem a magnetických polí, dle obr. 1a rozlišujeme (1) **tvrdá** snížení otáček Δn^I při jmen. momentu M_N je malé ve srovnání s otáčkami naprázdno n_0 ; (2) **měkká** vyšší rozdíl $\Delta n^{II} = n_0 - n_N$

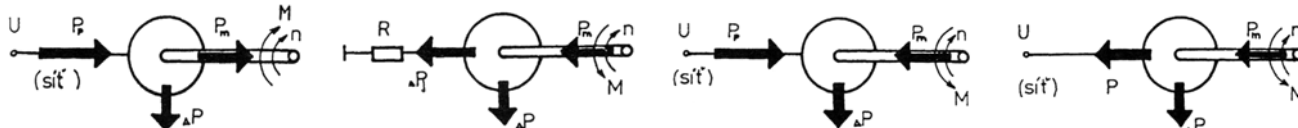
momentová charakteristika $M=f(I)$ proud I , který motor odeberá ze sítě; oba dodají při jmen. proudu I_N stejný moment, ale (2) dle obr. 1b umožňuje krátkodobě dodat $M > M_N$ (výhodné např. pro rozběh)

řízení rychlosti existují dvě možnosti dle obr. 1c (a) posouvat mechanickou charakteristiku (b) měnit sklon mechanické charakteristiky (změkčování char. zařazováním předřadného odporu)



Obrázek 1. (a) mechanická char.; (b) momentová char.; (c) řízení rychlosti

brzdění změna smyslu toku energie na hřídeli motoru, nutno změnit smysl elektromagnetického momentu, dle obr.2 rozlišujeme (b) **do odporu** je jednoduchý způsob, mechanický příkon se v odporu maří na Jouleovy ztráty; motor nejprve odpojit od sítě, připojit brzdný odpor R , je zachován smysl buzení, proud v kotvě změnil smysl (c) **protiproudem** záměnou přívodů ke kotvě změníme smysl proudu (a tím i momentu), problém je tepelné namáhání, napájecí a brzdný proud mařen v Jouleovy ztráty (d) **rekuperace** mechanická energie je vrácena zpět do sítě, energeticky výhodné



Obrázek 2. (a) motorický režim; (b) bzdění do odporu; (c) bzdění protiproudem; (d) bzdění rekuperací

1 Stejnosemnné stroje

Nepohyblivá část část **stator S** je z odlitku, má tvar dutého válce, na němž jsou uloženy póly P_1, P_2 zakončené pólovými nástavci N_1, N_2 . Budící vinutí na pólech z feromagnetického materiálu, napájené stejnosmnným budícím proudem I_B vytváří magnetický tok Φ_B . **Rotor R** je složen z izolovaných plechů (listěný pro potlačení vlivu vířivých a hysterezních ztrát otáčením kotvy v Φ_B) a opatřený vinutím. Nazývá se **kotva** \Rightarrow místo kam se indukuje napětí.

Vzduchová mezera δ mezi S a R je konstantní, pod N_1, N_2 vzniká homogenní magnetické pole. V místě **geometrické neutrály stroje** g_n (kolmá na osu pólů) je rovna nule (velká vzduchová mezera – velký rozptyl).

komutace je děj, kdy dochází ke změně smyslu proudu v komutující cívice při přechodu z jedné paralelní větve do druhé. Na výstupu je pak pulzující napětí u_{kart} se střední hodnotou U_i . K přepojování vodičů (komutaci) dochází v místě geometrické neutrální osy g_n , kde je magnetická indukce nulová ($B_\delta \rightarrow 0$). Cívka je v průběhu komutace kartáči spojena nakrátko. Vlivem zatížení motoru mech. Momentem dochází ke komutaci mimo osu g_n , indukované napětí vytváří elektrický oblouk (poškození komutátoru), lze potlačit

1. **natočení kartáčů do g_n** celé sbré ústrojí (brejle) nastavit aby při předpokládaném zatížení byl stav co nejméně špatný (natáčí se proti směru otáčení kotvy), vhodné pro malé motory s jedním směrem otáčení
2. **vytvořit komutační póly** úzké póly v mezeře mezi hlavními, jejich vinutí je v sérii a magnetické pole působí proti reakci kotvy, dobrá komutace je zajištěna pro libovolné zatížení a směry otáčení

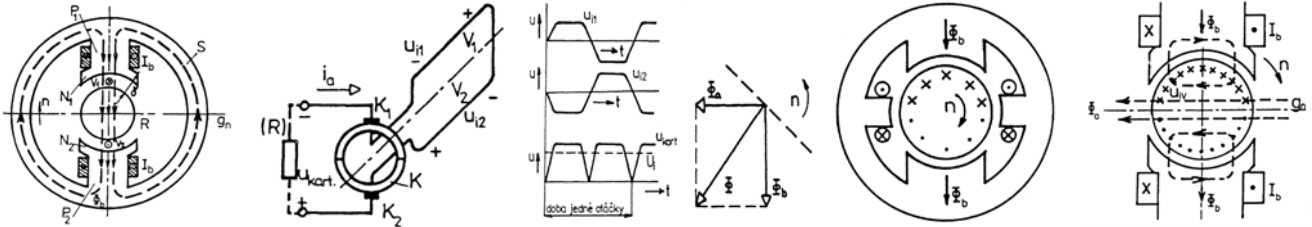
vztahy

svorkové napětí $U = U_i + R_a I_a$, kde indukované napětí kotvy $U_i = k \cdot I_a \cdot \Omega$, celkový moment pak

$$M = k \cdot I_a \cdot I_a. \quad (1)$$

Úpravou předešlých dostaneme vztah pro otáčky

$$n \approx \Omega = \frac{U - R_a I_a}{c \cdot \Phi_b} \approx \frac{U - R_a I_a}{k \cdot I_b} \quad (2)$$



Obrázek 3. (a) příčný řez; (b,c) komutátor, průběh napětí; (d) neutrální osa; (e) komutační póly; (f) složky reakce kotvy

1.1 Stejnsměrný motor s cizím buzením

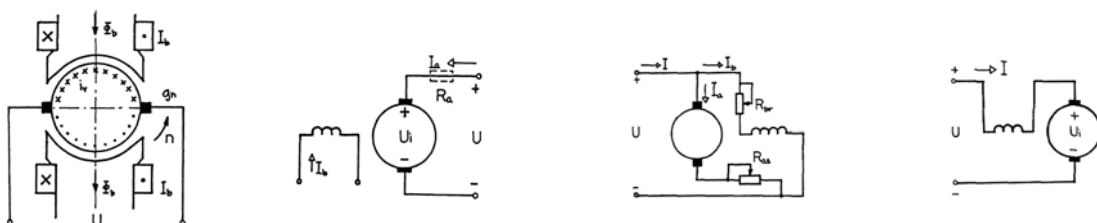
spouštění (rozběh) nutné splnit následující postup budící obvod připojit na zdroj napětí, nastavit jmenovitý budící proud, připojit napětí na kotvu (velký proudový náraz \Rightarrow na počátku se rotor neotáčí a není tedy indukované napětí U_i), pro velké motory zmenšit proudový náraz soustředícím odporem

regulace otáček změnou budícího proudu spojitě řízení, proud měnit odporem, při zmenšování I_b se rychlost zvyšuje (dle rovnice 2); změnou odporu v obvodu kotvy nespojitě, zaředit sadu odporů do obvodu kotvy a přepínat, velké Jouleovy ztráty, malá účinnost; změnou svorkového napětí výhodné, nutný regulovatelný zdroj

reverzace změna polarity svorkového napětí U , nebo budícího napětí U_b (záměna přívodů ke kotvě)

brzdění lze použít brzdění do odporu (ztrátové), protiproudem (pozor na reverzaci po $n=0$) i rekuperaci

zhodnocení umožňuje řízení rychlosti v celém rozsahu při optimální účinnosti (kombinace změny U , U_b) brzdění rekuperací v celém rozsahu otáček a snadná reverzace, nevýhodou je závislost proudu kotvy na zátěžném momentu (rovnice 1)



Obrázek 4. (a) proud a indukované napětí v kotvě; (b) cizí buzení; (c) paralelní buzení; (d) sériové buzení

1.2 Stejnsměrný motor s paralelním buzením

spouštění využívá se spouštěcí odpor R_{as} připojený přímo ke kotvě, aby se nesnížil budící proud I_b

regulace otáček změnou budícího proudu pomocí R_{br} (dle obr.4c)

reverzace záměna přívodů v klidovém stavu (současná změna I_a a I_b nevyvolá změnu v chodu)

brzdění rekuperace jen v omezeném rozsahu otáček, kdy $U_i > U$

zhodnocení výhodou je jednodušší napájení (jen jeden zdroj), nevýhodou omezené řízení otáček

1.3 Stejnsměrný motor se sériovým buzením

spouštění zmenšit napájení U , aby zkratový proud I_{ak} nepřekročil přípustnou hodnotu v klidovém stavu ($n=0$), nebo do série s motorem zařadit spouštěcí odpor R_{as}

regulace otáček změnou svorkového napětí využívá se pro elektrickou trakci, pohyb mechanickou charakteristikou; změna celkového odporu zhorší se účinnost, zvyšováním odporu obvodu kotvy se rychlost snižuje; zmenšování budícího toku bočník paralelně k budícímu vinutí, nebo kotvy

reverzace záměna přívodů k budícímu vinutí nebo kotvě

brzdění nelze použít rekuperaci, platí vždy $U_i < U$ a při zvýšení otáček se nejprve zvýší U_i , tím dojde ke snížení I a zmenšení budícího toku $\Phi \Rightarrow$ urychlováno (při použití pulzních měničů rekuperaci použít lze)

2 Asynchronní stroje

Rotor (dle obr.5b) se otáčí relativní rychlostí oproti statoru. Vlivem relativního pohybu magnetického pole vůči vodičům se v nich indukuje napětí, které vyvolá proud uzavírající se čelními kroužky. Dle Lenzova pravidla se síla jíž působí pole na vodiče snaží zabránit příčině svého vzniku (změně, která ji vyvolala) \Rightarrow rotor se začne otáčet ve směru pohybu statorového pole. Stator je složen z izolovaných plechů.

Souměrná trojfázová soustava dokáže vytvořit **točivé magnetické pole**. Soustavu proudů přivedeme na souměrné třířázové vinutí. Každé má dvě aktivní strany (U, U'). Zavedením proudu do cívky vzniká střídavé magnetické pole s magnetickou osou (po 120° - o_u, o_v, o_w). Pole každé fáze zůstává v prostoru nehybná (cívka jako statorové vinutí). Magnetická indukce každé fáze se v čase mění na jednotlivých místech úměrně průběhu sinusového proudu.

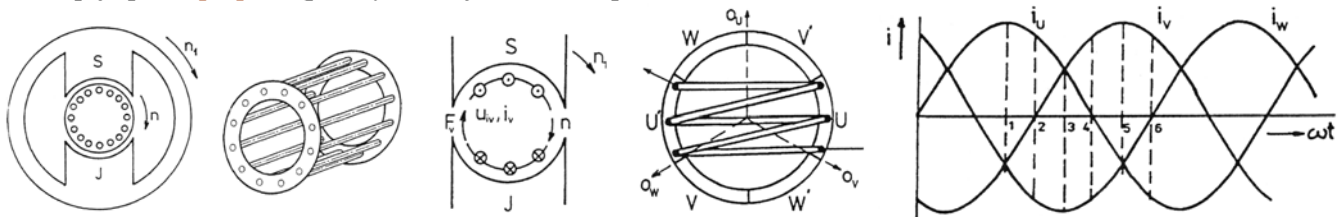
Rotor je táhnut statorovým polem (jeho otáčky jsou menší \Rightarrow **asynchronní**), proto je definován **skluz** dle

$$s = \frac{n - n_1}{n_1}, \quad (3.)$$

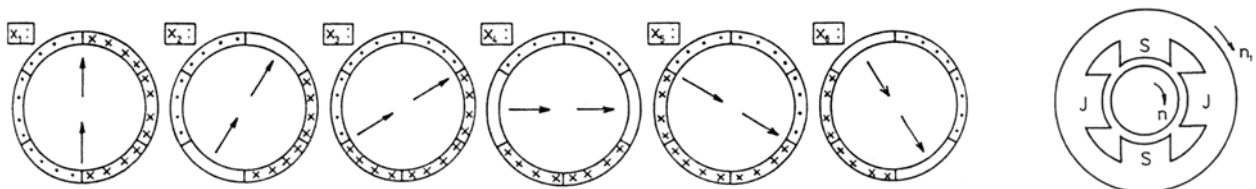
pro **rozběh** ($n = 0$) je skluz $s = 0$, pro **běžící** je $s = 1$, kdy otáčky n se blíží synchronním n_1 definovaným dle

$$n_1 = \frac{60f}{p}, \quad (4.)$$

kde p je počet **pólů** (pólových dvojic točivého pole) a f je frekvence sítě (ČR má $f = 50\text{Hz}$).



Obrázek 5. (a) točivé mag. pole; (b) klecová kotva; (c) indukované napětí v kotvě; (d) vinutí fáze U statoru



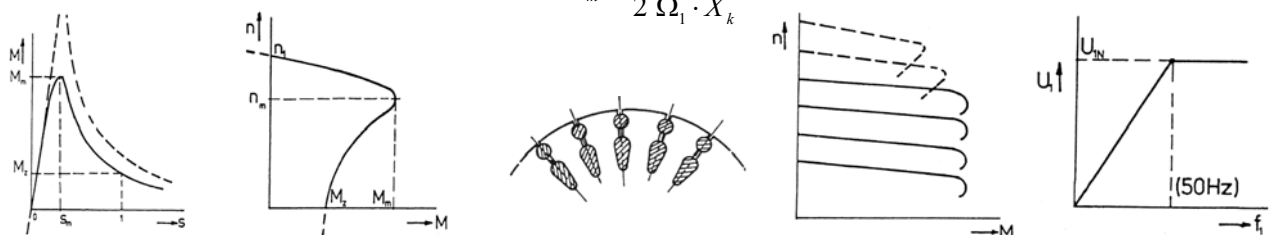
Obrázek 6. (a) směr výsledného pole statoru v jednotlivých okamžicích; (b) točivé pole $2p = 4$

2.1 Asynchronní motor s kroužkovou kotvou

Stator stejný, rotor je opatřen trojfázovým vinutím zapojeným do hvězdy. Vinutí je vyvedeno na sběrací kroužky. Lze tak měnit odpor obvodu rotoru (snížovat záběrný proud pro rozběh). Po rozběhu se kroužky zkratují a rotorové vinutí je jako klecové. Vykazuje velký záběrný moment M_z i při malém proudu (I_{ak} nepřekročí $3I_n$).

Moment zvratu je definován při daném napětí nejvyšší možný záběrný moment, lze určit z momentové rovnice

$$M_m = \frac{3}{2} \frac{U_1^2}{\Omega_1 \cdot X_k}, \quad (5.)$$



Obrázek 7. (a) $M=f(s)$; (b) momentová char.; (c) Boucherotova dvojitá klec; (d,e) řízení rychlosti změnou frekvence

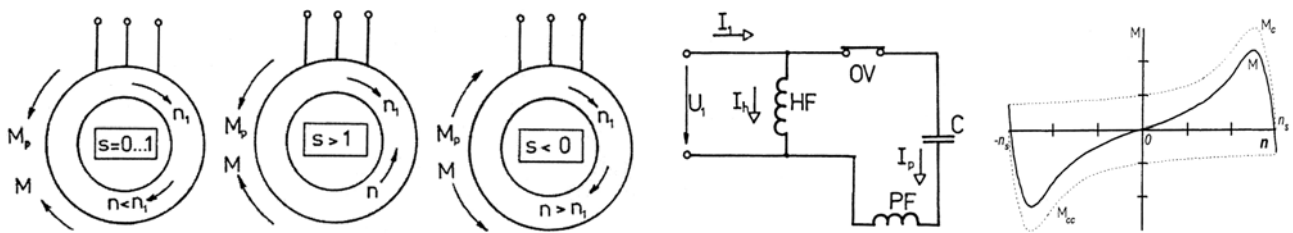
2.2 Asynchronní motor s klecovou kotvou (nakrátko)

Odpor vinutí je konstantní a s větším motorem se blíží k 0, robustní konstrukce, nemá vedení v rotoru
spouštění přímé připojení na síť pro **malé výkony** (kW), záběrný proud $4 \div 6 I_n$; **přepínání Y- Δ** pro **velké výkony**, pokud má statorové vinutí do Δ , přepojením do Y snížíme záběrný proud a moment 3x, po ustálení otáček nutno přepnout zpět do Δ ; **statorový spouštěč** zařazením rezistorů do obvodu statoru, pokles proudů, napětí 3x, **momentu 9x**; **dvojitá klec rotoru** (Boucherotova obr.7c) pracovní klec (dolní) má velkou mag. vodivost vede při rozběhu min. proud, rozběhová klec (horní s velkým odporem) konstruována pro **velký M_z** , v ustáleném stavu se proudy rozdělí v převráceném poměru odporů; **vírová kotva** vysoký poměr hloubky a šířky drážky, podobné předchozí

regulace otáček změnou svorkového napětí využívá se regulační transformátor, malý rozsah otáček, pro běžné motory nevhodné; přepínání počtu pólů statorového vinutí nespojitá změna relulace; změna napájecí frekvence metoda nejvýhodnější, dle obr.7d,e, měníme synchr. rychlost $f \in (0,50\text{Hz})$, prac. s malým skluzem s , proto je vysoká účinnost

reverzace záměna dvou přívodů statorového vinutí (změnit pořadí dvou fází)

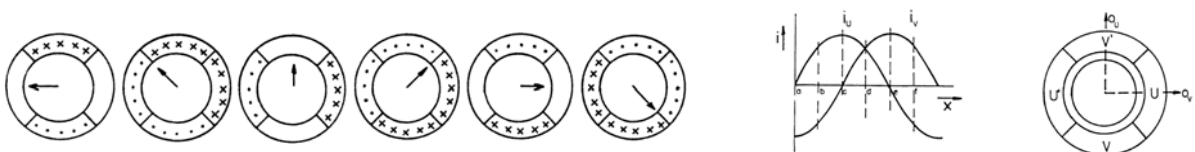
brzdění podsynchronní (protiproudem) přepojíme dvě statorová vinutí, změní se smysl točení stator. točivého pole (pozor na reverzaci točení po překročení $n = 0$), energeticky nevhodné, skluz $s > 1$; **nadsynchronní** (rekuperace) skluz $s < 1$, mechanická energie urychlí otáčky $n > n_s$, dobrzdění protiproudem; **stejnoseměrným proudem** stator odpojit a připojit k jedné fázi stejnosměrné napětí, dle Lenzova zákona vyvolán brzdny účinek, v rotoru se indukuje napětí a vznikají brzdné proudy



Obrázek 8. (a) brzdění asynchronního motoru; (b,c) jednofázový asynchronní motor

2.3 Jednofázový asynchronní motor

Jednofázová soustava **nedokáže vytvořit točivé magnetické pole** (pouze kruhové), proto pro rozběh je nutné vytvořit dvoufázový stroj (pomocná fáze úhlově posunuta o 90°). Záběrný moment je nulový (stejně momenty v opačném smyslu), motor lze rozběhnout na obě strany (momentová charakteristika je symetrická obr.8c), skluz naprázdno je větší (zpětná složka druhého rotačního pole) a menší maximální moment

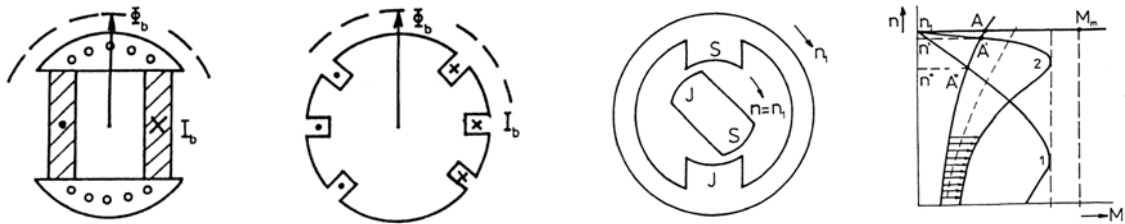


Obrázek 9. vznik kruhového pole ve dvoufázovém vinutí dle obr.8b

3 Synchronní stroje

Stator opatřen souměrným trojfázovým vinutím, které vytváří točivé magnetické pole. Rotor (vyčníklé póly nebo hladký) je opatřen budícím vinutím napájeným stejnosměrným budícím proudem I_b vytváří kruhové točivé pole. Statorové i rotorové pole se svými nesouhlasnými póly přitahují, přičemž statorové pole táhne rotor. Energie přechází ze statorového vinutí na rotor, kde koná mechanickou práci. Pole rotoru se pohybuje stejnou rychlostí n_l jako pole statoru \Rightarrow **synchronně**. Po rozběhu jsou při každém zatížení konstantní otáčky dle rovnice 4. Překročí-li moment M moment zvratu, vypadne ze synchronismu.

Vzniklé **točivé pole nedokáže roztočit hmotu rotoru**, proto se do pólových nastavců vkládá klecové vinutí. Rozběh je asynchronní (šrafovaná oblast je urychlující moment), při dostatečných n se rotor nabudí a synchronizuje.



Obrázek 10. (a) rotor s vyniklými póly; (b) hladký rotor; (c) řez strojem; (d) asynchronní rozběh synchronního stroje

3.1 Turbomotory

Rychlosti 3000 a 1500 ot/min, nemůže mít vyniklé póly kvůli velkým odstředivým silám. Turbogenerátory poháněny rychloběžnými parními turbinami.

3.2 Reakční motory

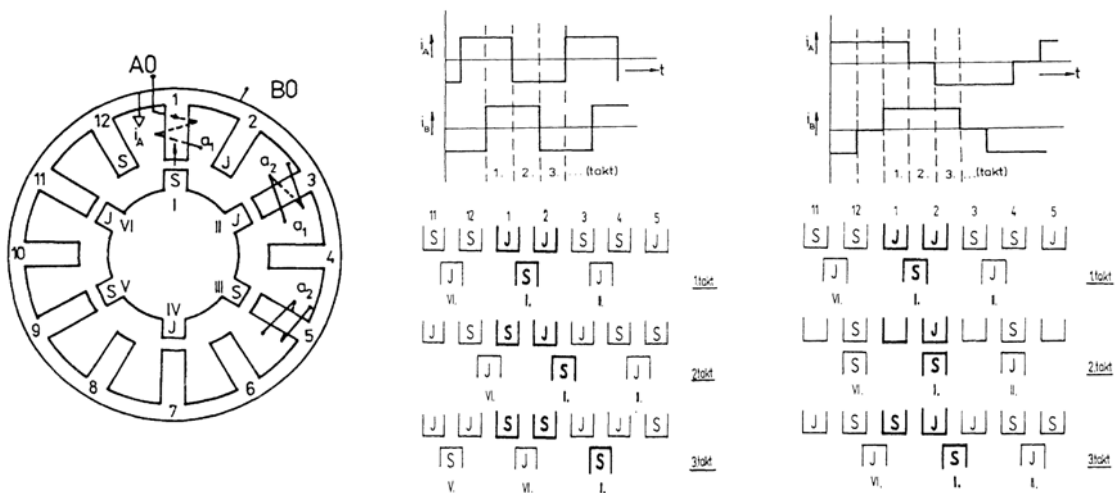
Pro přesné a konstantní rychlosti, rotor je nakrátko s vyfrézovanými drážkami, je tak tajištěna různá magnetická vodivost.

4 Krokové motory

Pro napájení a ovládání je nutný speciální elektrický obvod, který generuje sled napěťových pulzů, ty pak vyvolají krok (natočení) o přesně definovaný mechanický úhel α_n . Změnou sledu impulsů lze měnit smysl otáčení. Vstupní řídicí signál je zpracován řídicí logikou, přiveden do elektronického komutátoru a poté do výstupních budičů

Stator je opatřen několikařávkovým vinutím. **Rotor** může být **pasivní** (změna magnetické vodivosti po obvodu vzduchové mezery) nebo **aktivní** (obsahuje permanentní magnety – vytváří pole konstantní velikosti). Toto pole reaguje na statorové pole buzené ovladačem.

Dva sousední póly jedné fáze vytvoří tok opačného smyslu. Permanentní magnet rotoru vytváří střídavě S, J. Proudem do příslušné fáze pak otočíme rotor o jednu pozici.

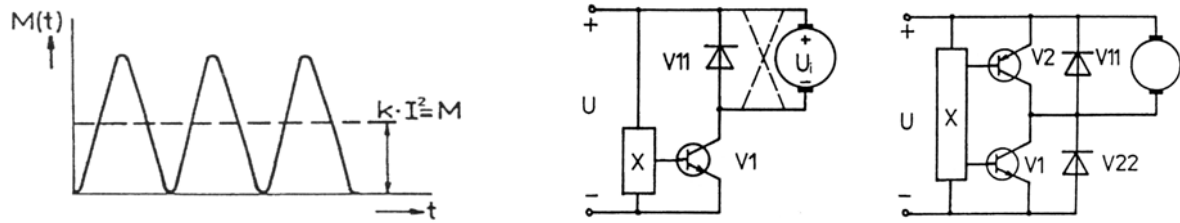


Obrázek 11. (a) uspořádání krokového motoru; (b) čtyřtaktní řízení; (c) osmitaktní řízení

5 Malé motory hromadného použití

sériový motor

Podobná konstrukce jako sériový stejnosměrný motor, stator je složen z izolovaných plechů (státorem i rotorem prochází střídavý magnetický tok). Používá se v drobných domácích spotřebičích (mixér, vysavač,...). Moment má sinusový průběh se střední hodnotou.



Obrázek 12. (a) průběh momentu sériového motoru; (b,c) řízení motoru tranzistorovým měničem

stejnoseměrný motor s permanentními magnety

Pro zařízení, kde není třeba velký výkon. Napájení je prováděno tranzistorovým měničem (zapojení se společným E, poloviční H můstek, plný H můstek). Díky nim je napájení vyhlazené a spínání vysokou frekvencí zajistí vysokou účinnost.

6 Servomotory

Používají se jako akční členy automatizovaných systémů.

sériový má budící vinutí rozděleno na dvě části, zapojují se do obvodu kotvy dle směru otáčení, výhodou je velký záběrný moment

dvoufázový má rotor klecový, stator má dvě vinutí fázově posunutá o 90° (jedno zapojeno na usměrněnou síť a druhé pak na zesílený signál od snímače)

- | | | | | | |
|------|---------------------------|--|------|-------|------|
| [1.] | Voženílek P., Janoušek J. | Základy silnoproudé elektrotechniky | ČVUT | Praha | 2005 |
| [2.] | Květ B., kolektiv | Elektrotechnika pro průmyslové školy strojnické a hutnické | SPN | Praha | 1961 |
| [3.] | Janoušek J., Vydra M. | Přednášky a cvičení z X12ZSE | ČVUT | Praha | 2005 |