

## 5. ASYNCHRÓNNE STROJE

### 5.1 Všeobecne

Asynchrónny stroj sa skladá zo statora a rotora, ktoré sú zložené z plechov a majú v drážkach uložené vinutie. V trojfázovom vyhotovení má stator trojfázové rozložené vinutie, vinutie na rotore–kotve môže mať dvojakú konštrukciu. V prípade kotvy vinutej je trojfázové vinutie vyvedené na krúžky, motory s kotvou nakrátko majú v drážkach rotora tyče buď vkladané alebo liate, ktoré sú na oboch stranách kotvy spojené kruhmi nakrátko, takže vzniká tzv. klieťka nakrátko.

Ak je na rotore vinutá kotva, tak asynchrónny stroj v stave pokoja a pri rozpojení sekundárnom obvode sa chová – ak je na statore pripojený na sieť – ako transformátor naprázdno. Berie zo siete prúd naprázdno, ktorého jalová zložka sa podieľa na vytvorení magnetického toku (magnetizácii), jeho činná zložka sa spotrebuje jednak na krytie strát v železe statora a rotora, jednak na krytie nepatrných strát vo vinutí statora v stave naprázdno. Prúd naprázdno je značne väčší ako v transformátore, pretože oproti transformátoru sa spotrebuje magnetické napätie aj na pretlačenie magnetického toku cez vzduchovú medzeru.

Kmitočet napätia na krúžkoch  $f_r$  je v stave pokoja rovný kmitočtu siete  $f_s$ , lebo

$$f_r = sf_s \quad (5.1)$$

a  $s$  je sklz daný vzťahom

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (5.2a)$$

kde  $n_s$  je synchronná rýchlosť točivého magnetického poľa a  $n$  sú otáčky rotora. Udávame ho buď ako bezrozmernú veličinu, alebo po vynásobení 100 v percentách. Sklz môžeme vyjadriť aj pomocou elektrickej uhlovej rýchlosti takto:

$$s = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \quad (5.2b)$$

kde  $\omega_s$  je elektrická uhlová rýchlosť statorového elektromagnetického poľa,  $\omega$  je elektrická uhlová rýchlosť rotora, alebo pomocou mechanickej uhlovej rýchlosti  $\Omega$  takto:

$$s = \frac{\omega_s / p - \Omega}{\omega_s / p} \quad (5.2c)$$

kde  $\Omega$  je mechanickej uhlová rýchlosť rotora a  $p$  je počet pólových dvojíc.

V stave pokoja je  $n=0$ ,  $s=1$  a  $f_r=f_s$ . Asynchrónny stroj v tomto stave pôsobí ako transformátor. Zásadný rozdiel proti transformátorom spočíva v tom, že natáčaním rotora

možno meniť fázu napätia na krúžkoch. Na tejto vlastnosti spočíva pôsobenie indukčného regulátora (kap. 5.14).

Ak roztočíme rotor a vinutie rotora je uzavreté, mení sa veľkosť napätia v rotorovom vinutí, aj jeho frekvencia. Ak sa otáča rotor v zmysle otáčania točivého poľa, klesá veľkosť týchto hodnôt lineárne so sklzom podľa vzťahu:

$$U_{ir} = sU_{ir0} \quad (5.3)$$

kde  $U_{ir}$  je indukované rotorové napätie a  
 $U_{ir0}$  indukované rotorové napätie naprázdno

Aj kmitočet tohto rotorového napätia závisí od konkrétnej hodnoty sklzu podľa vzťahu (5.1). Synchronna otáčavá rýchlosť je závislá od kmitočtu siete  $f_s$  a od počtu pólov  $2p$  stroja (resp. počtu pólových dvojíc  $p$ ) takto:

$$n_s = \frac{60f_s}{p} \quad (5.4)$$

V synchronizme (t. j. keď  $n = n_s$ ) je napätie rotora a kmitočet rotora rovný nule podľa vzťahov (5.1) a (5.2).

Názov „asynchronný“ znamená, že otáčky rotora nie sú synchronne (súčasné, súdobé) s otáčkami točivého magnetického poľa. Často sa však používa aj názov „indukčný“, ktorý je odvodený na základe faktu, že energia sa prenáša zo statora na rotor na princípe elektromagnetickej indukcie bez galvanického spojenia. V ďalšom budeme používať obidva názvy. V cudzojazyčnej literatúre sa viac používa ekvivalent názvu indukčný.

## 5.2 Rozdelenie výkonov asynchronného stroja

$$\text{Motor odoberá zo siete príkon} \quad P_p = m_s U_{sf} I_{sf} \cos \varphi_s \quad (5.5)$$

kde  $m_s$  je počet fáz na statore a index  $f$  znamená fázové hodnoty.

Časť príkonu hradí straty vo vinutí statora

$$\Delta P_j = m_s R_s I_{sf}^2 \quad (5.6)$$

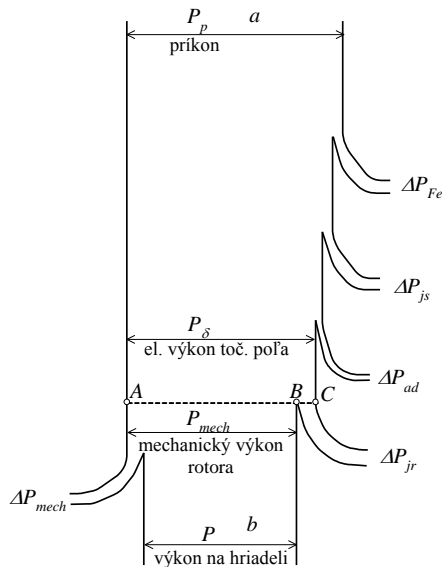
V statore železa sa na teplo premení výkon, ktorý pokladáme za straty v železe:

$$\Delta P_{Fe} = m_s \frac{U_{sf}^2}{R_{Fe}} \quad (5.7)$$

Predpokladajme, že tzv. prídavné (dodatočné) straty  $\Delta P_{ad}$  vznikajú len v statore, aj keď v skutočnosti sa rozdeľujú, podobne ako straty v železe, v určitom pomere na stator a rotor (podrobnejšie je to uvedené v literatúre venovanej teórii elektrických strojov). Na obr. 5.1 je znázornené rozdelenie výkonov indukčného motora v oblasti menovitého zaťaženia

(pozri tiež náhradnú schému na obr. 5.18). Vzduchovou medzerou sa odvádza výkon zo statora na rotor ako tzv. výkon točivého poľa vo vzduchovej medzere  $P_\delta$ , ktorý sa rovná rozdielu výkonu odoberaného zo siete a celkových strát v statore a rovná sa

$$P_\delta = m_s \frac{R'_r}{s} I_r'^2 \quad (5.8)$$



Obr. 5.1 Tok činného výkonu asynchrónneho stroja v motorickom stave. Úsečka AC zodpovedá synchronnej rýchlosti, úsečka AB skutočnej rýchlosti stroja, účinnosť je daná

$$\eta = \frac{b}{a} = \frac{P}{P_p}$$

Tento výkon sa prenáša na rotor, kde sa delí na dve časti. Jedna časť kryje straty vo vinutí rotora, ktoré sú dané buď hodnotami odporu a prúdu prepočítanými na stator, s počtom fáz na statore, alebo so skutočnými hodnotami na rotore:

$$P_{jr} = m_s R'_r I_r'^2 = m_r R_r I_r^2 = s P_\delta \quad (5.9)$$

Druhá časť predstavuje celkový mechanický výkon, konvertovaný z elektrickej formy energie na mechanickú:

$$P_{mech} = m_s \frac{1-s}{s} R'_r I_r'^2 = (1-s) P_\delta \quad (5.10)$$

Skutočný mechanický výkon prenášaný na hriadeľ  $P$  je oproti celkovému mechanickému výkonu menší o straty mechanické  $\Delta P_{mech}$  samotného motora:

$$P = P_{mech} - \Delta P_{mech} \quad (5.11)$$

Sklz  $s$  je teda činiteľom, ktorý ukazuje rozdelenie elektrického výkonu  $P_\delta$  na straty v rotore  $\Delta P_{jr} = s P_\delta$  a mechanický výkon  $P_{mech} = (1-s) P_\delta$ .

### 5.3 Program skúšok asynchrónneho motora

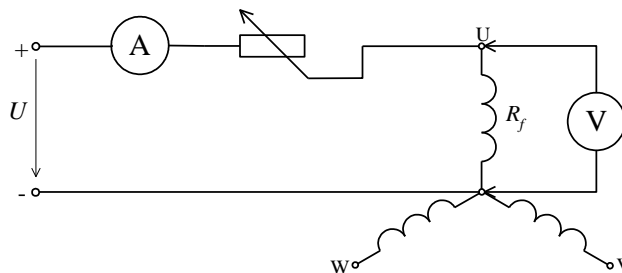
Rozsah typovej a kusovej skúšky sa uvádza v STN 35 0300. Tu sa budeme zaoberať len niektorými z nich, a uvedieme ďalšie merania, ktorými skúmame vlastnosti asynchrónnych strojov:

- Meranie odporov všetkých vinutí za studena jednosmerným prúdom
- Meranie prúdu a strát naprázdno
- Meranie prúdu a strát nakrátko
- Pracovné (zaťažovacie) charakteristiky

- e) Meranie momentovej charakteristiky motorov s kľetkou nakrátko
- f) Konštrukcia kruhového diagramu a určenie momentu zvratu
- g) Výpočet prvkov náhradnej schémy a simulácie prechodových javov
- h) Meranie asynchrónneho generátora
- i) Meranie jednofázového asynchrónneho motora
- j) Meranie na indukčnom regulátore

## 5.4 Meranie odporov vinutí

Meranie robíme V–A metódou jednosmerným prúdom v studenom stave, pritom rotor musí byť v pokoji. Podľa STN 35 0301, ak nie je možné odmerať teplotu vinutia, považuje sa za rovnakú ako teplota okolia vtedy, ak je nezohriaty motor do 10 kW v danom prostredí aspoň 5 hodín, motor s výkonom od 10 kW do 100 kW aspoň 8 hodín a nad 100 kW aspoň 16 hodín. Schéma zapojenia je na obr. 5.2. Prúd pri meraní musí byť zvolený tak, aby sa vinutie počas merania nezohrialo. Spravidla býva  $(0,1 \div 0,2)I_N$ . Meranie urobíme pri minimálne troch rôznych hodnotách prúdu a z vypočítaných hodnôt stanovíme strednú hodnotu pre každú fázu.



Obr. 5.2 Schéma zapojenia na meranie odporu vinutia

V strojoch, kde sú vyvedené začiatky a konce vinutí jednotlivých fáz, meriame každú fázu zvlášť (obr. 5.2). V niektorých prípadoch (tam, kde je stroj len na jedno napätie) je spojenie vinutí do hviezdy, alebo do trojuholníka urobené natrvalo a na svorkovnici sú vyvedené len tri vývody. V týchto strojoch meriame odpor medzi svorkami ( $R_{sv}$ ) a odpor jednotlivých fáz počítame. Podľa zapojenia na obr. 5.3, kde je zapojenie do hviezdy, platí:

$$R_f = \frac{1}{2} R_{sv}, \text{ pričom } R_{sv} = \frac{U}{I} \quad (5.12)$$

Pri zapojení do trojuholníka (obr. 5.4) platí:

$$R_f = \frac{3}{2} R_{sv} \quad (5.13)$$

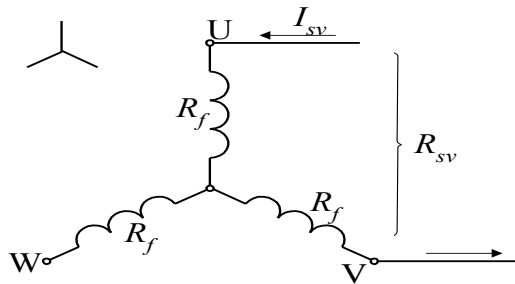
Pomocou hodnoty  $R_{sv}$  môžeme však počítať straty vo vinutí, aj keď nepoznáme vnútorné zapojenie stroja, pretože tieto straty sú rovnaké pre zapojenie do hviezdy i pre zapojenie do trojuholníka a rovnajú sa

$$\Delta P_j = 1,5R_{sv}I_{sv}^2 \quad (5.14)$$

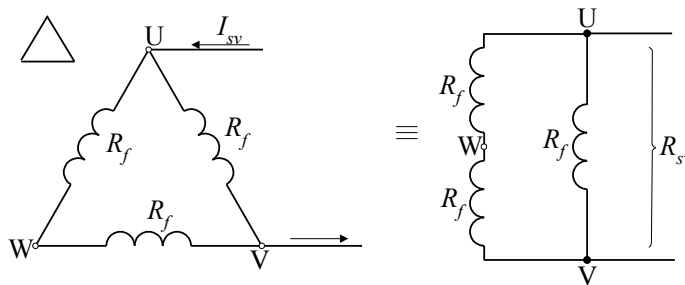
pričom  $I_{sv}$  je združený prúd meraný na prívodoch ku svorkám. Pri meraní odčítame teplotu okolia a strednú hodnotu odporu prepočítame na 20°C podľa vzťahu pre medené vinutie:

$$R_{20} = R_\theta \frac{235 + 20}{235 + \theta} \quad (5.15)$$

$R_\theta$  - odpor nameraný pri teplote  $\theta$ .



Obr. 5.3 Meranie odporov vinutí na svorkách pri zapojení do hviezdy



Obr. 5.4 Meranie odporov vinutí na svorkách pri zapojení do trojuholníka

Odpor rotora môžeme merať len v krúžkových motoroch. Meriame priamo na krúžkoch. Odpor rotorov nakrátko sa nemeria.

## 5.5 Meranie naprázdno

Účelom merania naprázdno je zistiť prúd naprázdno, účinník naprázdno, straty v železe, straty mechanické a určiť prvky priečnej vetvy náhradnej schémy  $X_\mu$  a  $R_{Fe}$  (kap. 5.10). Chodom naprázdno asynchrónneho motora rozumieme ustálený chod pri napájaní statorového vinutia  $U_{sN}$  a  $f_{sN}$  a rotor je spojený nakrátko. Motor sa točí samotný, bez zaťaženia, takmer synchronnou rýchlosťou.

Pri meraní naprázdno je stator napájaný súmerným regulovateľným napätím so stálym kmitočtom. Pred vlastným meraním sa určitú dobu zabeháva, aby sa ustálili straty v ložiskách. Pre presnejšie meranie je potrebné uvažovať s korekciou wattmetrov.

Po rozbehu odoberá motor zo siete len malý príkon  $P_0$ , ktorý sa spotrebuje na krytie strát naprázdno  $\Delta P_0$  (straty v železe  $\Delta P_{Fe}$  a straty mechanické  $\Delta P_{mech}$ ) a strát vo vinutí statora  $\Delta P_{js0}$ , spôsobených prúdom naprázdno  $I_0$ .

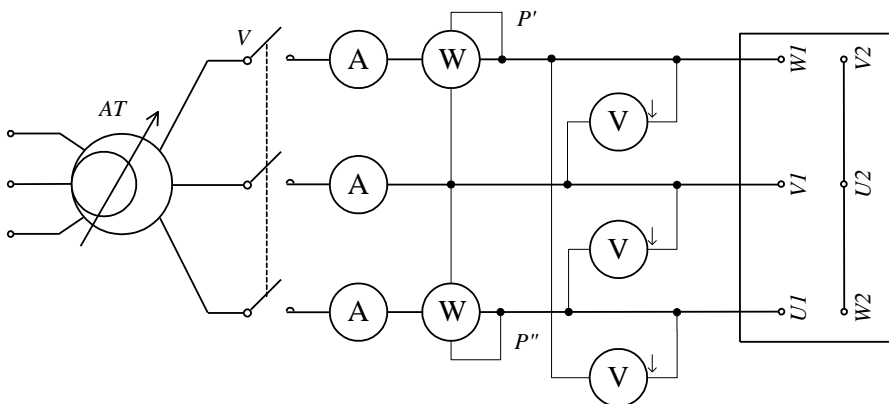
Straty naprázdno teda sú

$$\Delta P_0 = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} = P_0 - \Delta P_{js0} \quad (5.16)$$

Straty vo vinutí statora prechodom prúdu naprázdno

$$\Delta P_{js0} = 3R_{sf} I_{0f}^2 \quad (5.17)$$

kde  $R_{sf}$  je odpor jednej fázy statora pri teplote zmeranej pri meraní naprázdno.



Obr. 5.5 Meranie naprázdno asynchrónneho motora

Schéma zapojenia je na obr. 5.5 pri zapojení statorového vinutia motora do hviezdy. Napätie najprv zvýšime asi na  $1,2U_N$ , kedy odčítame prvú hodnotu. Meriame prúdy naprázdno vo všetkých fázach, všetky združené napätia a príkon naprázdno wattmetrami zapojenými v Aronovom zapojení, alebo digitálnym trojfázovým wattmetrom, ktorý ako

univerzálny merací prístroj meria prúdy, napätia, výkony, účinníky a ďalšie dôležité veličiny (pozri obr. 2.4c). Ďalej meriame pri znižovaní napätia 6 až 8 hodnôt, pričom najnižšia hodnota napätia je odôvodnená takto:

Pri veľmi zníženom napätí nastáva značné zväčšenie sklzu (ktorý je pri vyšších hodnotách napätia nepatrný), značné stúpnutie prúdu vo vinutí rotora a tým aj statora, ktorý najprv pri znižovaní napätia klesá. Tento jav určuje najnižšiu medzu napätia pri skúške naprázdno. Zvýšenie prúdu  $I_0$  už neberieme do úvahy, lebo to nie je korektný stav naprázdno (pozri obr. 5.6).

Prípravíme tabuľku pre merané a následne počítané veličiny v tomto poradí:

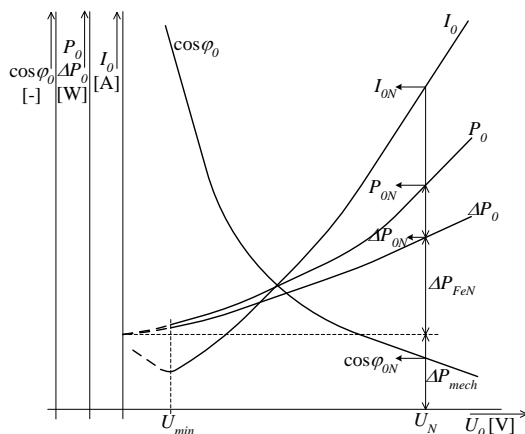
- $U_0$  je stredná hodnota nameraných združených napätí
- $I_0$  je stredná hodnota prúdov v jednotlivých fázach
- $P_0 = P' + P''$  je trojfázový príkon naprázdno (súčet údajov obidvoch wattmetrov v Aronovom zapojení, alebo údaj trojfázového wattmetra). Pri presnejšom výpočte treba urobiť aj korekciu na vlastnú spotrebu wattmetrov.

$$\Delta P_0 = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} = P_0 - \Delta P_{js0} \quad \text{straty naprázdno}$$

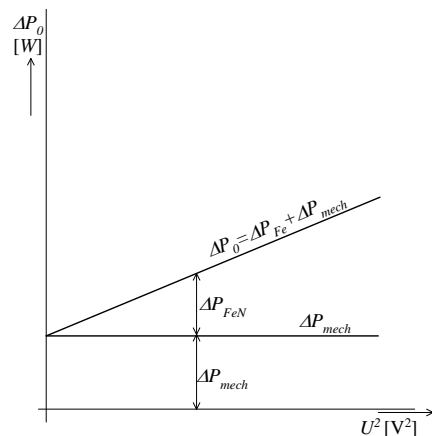
$$\Delta P_{js0} = 3R_{sf} I_0^2 \quad \text{straty vo vinutí statora prechodom prúdu naprázdno}$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} U_0 I_0} \quad \text{účinník naprázdno} \quad (5.18)$$

Výsledky skúšky naprázdno sa spracujú graficky ako tzv. charakteristiky naprázdno. V závislosti od napätia  $U_0$  vynášame hodnoty  $I_0$ ,  $P_0$ ,  $\Delta P_0$  a  $\cos \varphi_0$  (obr. 5.6). Straty naprázdno  $\Delta P_0$  predstavujú súčet strát v železe a strát mechanických. Straty mechanické  $\Delta P_{mech}$  získame extrapoláciou krivky  $\Delta P_0$  do osi strát pri nulovom napätí, keďže  $\Delta P_{mech}$  od napätia nezávisia. Pre hodnotu  $U_N$  odčítame veľkosť  $I_{0N}$ ,  $P_{0N}$ ,  $\Delta P_{0N}$ ,  $\Delta P_{FeN}$ ,  $\Delta P_{mech}$  a  $\cos \varphi_{0N}$  (obr. 5.6), kde inex „ $0N$ “ znamená v stave naprázdno pri menovitom napätí.



Obr. 5.6 Charakteristiky naprázdno asynchrónneho motora



Obr. 5.7 Straty naprázdno v závislosti od kvadrátu napätia

Ak treba vyjadriť veľkosť magnetizačného prúdu  $I_\mu$ , ktorý tvorí jalovú zložku prúdu naprázdno, vypočítame ju nasledovne:

$$I_\mu = I_{0N} \sin \varphi_{0N}, \quad \text{kde} \quad \sin \varphi_{0N} = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{0N}} \quad (5.19)$$

kde index „0N“ znamená v stave naprázdno pri menovitom napätí.

Na obr. 5.6 je znázornený priebeh charakteristík naprázdno. Straty v železe závisia od štvorca napätia. Preto v súradniciach s  $U^2$  je závislosť  $\Delta P_0$  lineárna (obr. 5.7). Na tomto grafe možno presnejšie určiť  $\Delta P_{mech}$ . Prúd naprázdno má priebeh obdobný ako krivka nasýtenia, pokiaľ  $\cos \varphi_0$  je menší než 0,1 až 0,15. Účinník s klesajúcim napätím rastie. To je spôsobené tým, že konštantné straty mechanické sú percentuálne stále väčšie.

Výsledkom merania naprázdno sú hodnoty, odčítané pri menovitom napätí  $U_N$ :

$I_{0N} =$	A	prúd naprázdno pri $U_N$
$P_{0N} =$	W	príkion naprázdno pri $U_N$
$\cos \varphi_{0N} =$	-	účinník naprázdno pri $U_N$
$\Delta P_{FeN} =$	W	straty v železe pri $U_N$
$\Delta P_{mech} =$	W	straty mechanické (od napätia nezávislé).

## 5.6 Meranie nakrátko

Účelom merania nakrátko je zistiť prúd nakrátko, straty nakrátko, účinník nakrátko a prvky pozdĺžnej vetvy náhradnej schémy  $R$  a  $X_\sigma$  (kap. 5.10). Stavom nakrátko asynchrónneho motora rozumieme ustálený stav pomerov v statorovom vinutí, ak je rotor spojený nakrátko a zabrzdnený. Prechodový stav nakrátko vzniká aj pri pripojení motora nakrátko k sieti pri spúšťaní. Preto z výsledkov skúšky nakrátko môžeme zistiť hodnoty charakteristické pri spúšťaní, t. j. ustálené hodnoty záberového prúdu a záberového momentu.

Pri skúške nakrátko neodoberáme ani nedodávame žiadnu mechanickú energiu, takže celý príkon odoberaný zo siete sa spotrebuje na krytie strát, ktoré sa v stroji premenia na teplo.

Všeobecné ustanovenia o meraní nakrátko uvádza STN 35 0010. Meranie nakrátko je náročné tým, že pri pripojení menovitého napätia na svorky motora pretečie jeho vinutím niekoľkonásobný prúd oproti menovitému. Celá energia dodávaná motoru sa mení na teplo, ktoré veľmi rýchlo zvyšuje teplotu statorového i rotorového vinutia, čo predstavuje veľké nebezpečenie zničenia izolácie stroja.

Z tohto dôvodu sa skúška nakrátko nerobí pri menovitom napätí, ale pri takom, aby prúd nakrátko nepresiahol prúd menovitý (podrobnejšie je to uvedené v STN 35 0010).

Odčítanie údajov z meracích prístrojov musí byť dostatočne rýchle, aby chyba merania spôsobená zmenou odporu zahrievaním vinutia bola čo najmenšia. Na statorové vinutie sa priviede znížené napätie, potom sa rýchlo zvýši na zvolenú hodnotu a po zistení hodnôt na



meracích prístrojoch sa motor ihneď vypne. Pri meraní ďalších bodov charakteristiky sa postup opakuje. Meria sa 6 až 8 bodov pri rozličných hodnotách napätia. Prvý bod charakteristiky sa meria pri najvyššom napätí.

Čítanie bodov charakteristiky sa robí ihneď po ustálení meraných hodnôt na prístrojoch, aby sa zabránilo nadmernému zohriatiu vinutia prúdom nakrátko.

Schéma zapojenia pre meranie nakrátko je tá istá ako pre meranie naprázdno (obr. 5.5), ak vhodne upravíme rozsahy a pripojenie prístrojov tak, aby sa minimalizovali chyby pri meraní vplyvom strát v meracích prístrojoch.

Výsledky merania spracujeme tak, že pripravíme tabuľku pre merané a následne počítané veličiny v tomto poradí:

$U_k$  je stredná aritmetická hodnota údajov všetkých troch voltmetrov (združená hodnota napätia)

$I_k$  je stredná aritmetická hodnota všetkých troch ampérmetrov

$P_k$  je algebraický súčet údajov obidvoch wattmetrov v Aronovom zapojení, alebo údaj trojfázového wattmetra. Pri presnejšom výpočte treba urobiť aj korekciu na vlastnú spotrebu wattmetrov.

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3}U_k I_k} \quad \text{je účinník nakrátko} \quad (5.20)$$

$\Delta P_{jrk} = 3R_{sf75} I_k^2$  sú straty vo vinutí statora, kde  $R_{sf75}$  je odpor vinutia jednej fázy pri 75°C, čo sa považuje za prevádzkovú teplotu vinutia motora s izoláciou A, alebo B, alebo 115°C pre izoláciu H.

$\Delta P_{jrk} = P_k - \Delta P_{jrk} - \Delta P_{Fe}$  sú straty vo vinutí rotora, kde  $\Delta P_{Fe}$  sú straty v železe odčítané z charakteristiky naprázdno pri napätí  $U_o = U_k$  (obr. 5.6 a obr. 5.7). Nezodpovedá to úplne skutočnosti, pretože pri rovnakom napätí na svorkách statora je tok nakrátko značne menší, než tok naprázdno. Pri spojení nakrátko vznikajú však straty v železe rotora, ktoré pri chode naprázdno sú zanedbateľné.

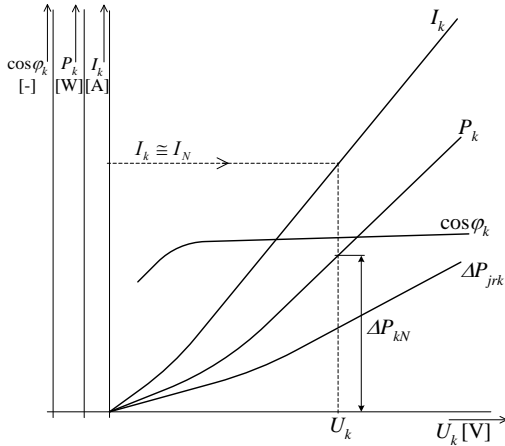
Výsledky merania nakrátko sa spracujú graficky ako tzv. charakteristiky nakrátko (obr. 5.8). V závislosti od napätia  $U_k$  vynášame krivky prúdu  $I_k$ , príkonu  $P_k$ , strát v rotorovom vinutí  $\Delta P_{jrk}$  a účinníka  $\cos \varphi_k$ . Podobne môžeme graf vyniesť ako funkciu  $I_k$ .

Ku konštrukcii kruhového diagramu potrebujeme hodnotu  $I_{kN}$ , t. j. prúdu nakrátko pri menovitom napätí. Pretože meranie nakrátko robíme pri zníženom napätí  $U_k$ , hodnotu  $I_{kN}$  získame prepočítaním na hodnotu  $U_N$  podľa obr. 5.9 takto:

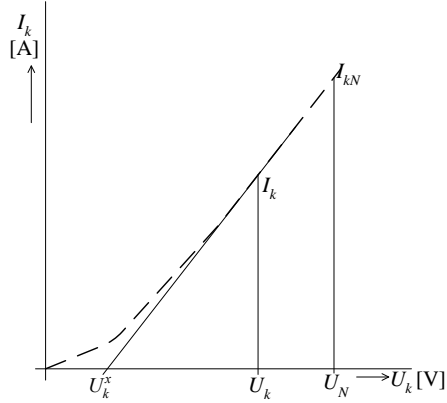
$$I_{kN} = \frac{U_N - U_k^x}{U_k - U_k^x} I_k \quad (5.21)$$

kde  $U_k$  a  $I_k$  sú ostatné namerané hodnoty napätia a prúdu pri meraní nakrátko,  $U_k^x$  je

hodnota napätia, v ktorej pretína dotyčnica k priebehu  $I_k = f(U)$  os napätia (obr. 5.9).



Obr. 5.8 Charakteristiky nakrátko asynchrónneho motora



Obr. 5.9 Určenie prúdu  $I_{kN}$  vzhľadom na sýtenie stroja

Účinník nakrátko  $\cos \varphi_k$  závisí od napätia nevýrazne, okrem počiatočnej časti charakteristiky nakrátko, kde vzrastá rýchlo so zvyšovaním napätia v dôsledku zníženia indukčného odporu stroja. V ďalšom priebehu účinník vzrastá pomalšie jednak vplyvom ďalšieho znižovania indukčného odporu, jednak zvýšením činných (ohmických) odporov vinutia statora a rotora.

Výsledkom merania nakrátko sú hodnoty:

- $I_{kN} = \dots$  A      prúd nakrátko pri  $U_N$ , podľa (5.21),
- $\Delta P_{kN} = \dots$  W      straty nakrátko pri menovitom prúde, obr. 5.8,
- $\cos \varphi_k = \dots$       stredná hodnota nameraných hodnôt v okolí menovitého prúdu.

Z týchto hodnôt môžeme určiť celkový činný odpor

$$R_k = \frac{U_{sNf} \cos \varphi_k}{I_{kN}} \quad (5.22)$$

Tento odpor sa skladá z odporu fázy statorového vinutia  $R_s$  a odporu jednej fázy rotorového vinutia prepočítaného na stator  $R'_r$ :

$$R_k = R_s + R'_r \quad (5.23)$$

Preto

$$R'_r = R_k - R_{sf75^\circ} \quad (5.24)$$

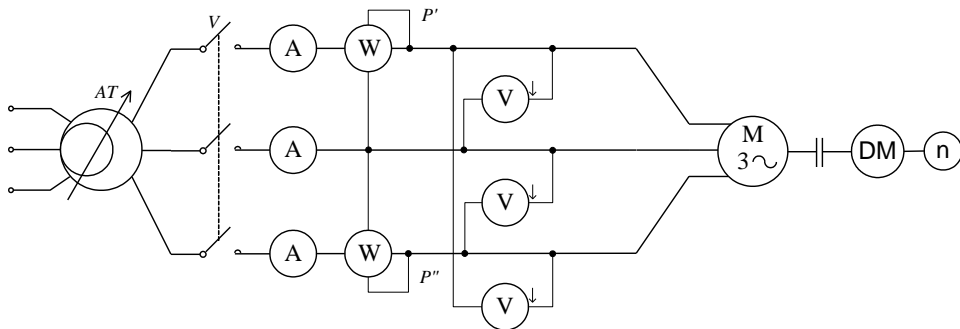
Túto hodnotu budeme potrebovať pri konštrukcii kruhového diagramu (kap. 5.9). Výpočet rozptylovej reaktancie je v kap. 5.10.

## 5.7 Zaťažovacia skúška

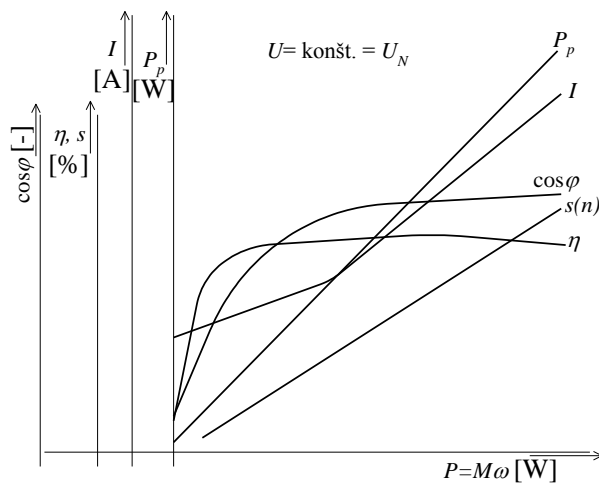
Pracovné (zaťažovacie) charakteristiky asynchrónneho stroja vyjadrujú závislosť rôznych veličín (príkonu, prúdu, sklzu, účinnosti, účinníka) od výkonu pri konštantnom statorovom napájanom napätí a kmitočte. Určuje sa postupnou zmenou záťaže stroja v medziach od určitého preťaženia (asi  $1,5P_N$ ) až do chodu naprázdno.

Pred začiatkom merania charakteristiky sa odporúča motor dôkladne prehriať pri 75% menovitého zaťaženia, aby sa teplota vinutia statora a rotora ustálila. Aby sa tieto teploty udržiavali na rovnakej úrovni, je účelné urobiť skúšku od vyššieho zaťaženia k nižšiemu a nie naopak.

Skúšané motory stredných a malých veľkostí zaťažujeme obvykle elektrickým dynamometrom alebo brzdou, veľké asynchrónne motory dynamom, synchronným alebo asynchrónnym generátorom. Schéma zapojenia je na obr. 5.10.



Obr. 5.10 Schéma zapojenia pri zaťažovacej skúške asynchrónneho motora



Obr. 5.11 Pracovné (zaťažovacie) charakteristiky asynchrónneho motora

Výsledky merania spracujeme takto (obr. 5.11):

$U$  je aritmetický stred troch nameraných hodnôt napätí

$I$  je aritmetický stred troch nameraných hodnôt prúdov

$P_p$  je algebraický súčet údajov dvoch wattmetrov pri Aronovom zapojení, alebo údaj trojfázového wattmetra a udáva príkon motora. Pri presnejšom výpočte treba urobiť korekciu na vlastnú spotrebu wattmetrov.

$$\cos \varphi = \frac{P_p}{\sqrt{3}UI} \text{ je účinník} \quad (5.25)$$

$$\eta = \frac{P}{P_p} 100 \text{ [%]} \text{ je účinnosť} \quad (5.26)$$

$n$  [ $\text{min}^{-1}$ ] je otáčavá rýchlosť, snímaná otáčkomerom

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} 100 \text{ [%]} \text{ je sklz, kde synchronná rýchlosť } n_s = \frac{60f_s}{p} \quad (5.27)$$

$M$  [ $\text{Nm}$ ] je zaťažovací moment, údaj stupnice dynamometra, alebo ho získame pomocou tzv. kalibrovaného stroja (pozri kap. 4.2.3)

$P$  je výkon na hriadeli motora, ktorý počítame z momentu na hriadeli a otáčavej rýchlosti takto:

$$P = M\Omega = M \frac{2\pi n}{60} = \frac{Mn}{9,55} \quad (5.28)$$

Niekedy sa jednotlivé veličiny zaťažovacích charakteristík vynášajú v závislosti od príkonu, pretože táto hodnota sa určuje priamym meraním a neskôr v prevádzke sa dá jednoducho skontrolovať zapojením wattmetra do prívodu stroja.

Pracovné (zaťažovacie) charakteristiky sú graficky spracované na obr. 5.11. Odporúčame čitateľovi analyzovať a zdôvodniť priebehy všetkých veličín v závislosti od výkonu.

Kvôli prehľadnosti nemusíme vynášať všetky závislosti do jedného diagramu, ale odporúča sa takéto rozdelenie: prúd, sklz a otáčavá rýchlosť do jedného diagramu a účinnosť, účinník a príkon do druhého.

Meranie robíme tak, že pri každom nastavení zaťaženia kontrolujeme a doregulujeme napätie na konštantnú menovitú hodnotu.

## 5.8 Mechanická (momentová) charakteristika $M = f(n, s)$

Mechanická charakteristika (v teórii asynchrónnych strojov sa používa aj názov momentová charakteristika, a tak ju budeme nazývať v tejto kapitole) udáva závislosť elektromagnetického momentu točivého poľa od sklzu  $s$ , alebo od otáčok  $n$ . Skutočný

moment na hriadeli je v motoroch menší o moment vlastných mechanických strát a o časť prídavných strát. Tvar týchto charakteristík závisí jednak od druhu použitej klietky nakrátko, t. j. tvaru drážok, resp. tyče, ktoré tieto drážky vyplňajú, a tiež od akosti a čistoty surovín materiálu klietky, i od správnej technológie výroby celého rotora, resp. celého stroja. V motoroch s krúžkovým rotorom závisí aj od veľkosti odporu spúšťača.

Momentovú charakteristiku môžeme experimentálne zistiť dvoma spôsobmi:

- a) Staticky – zmenou brzdného momentu  $M_{br}$ , ak je zrýchľujúci moment  $M_a = 0$ , t. j. meraním bod po bode. Statická momentová charakteristika je závislosť  $M = f(n)$  v ustálenom stave.
- b) Dynamicky – zmenou  $M_a$  pri  $M_{br} = 0$ , t. j. pri rozbehu nezaťaženého motora pripojeného k tvrdej sieti, a to buď priamym meraním momentu, alebo deriváciou rýchlosti.

Presnosť merania je ovplyvňovaná nepresnosťou pri prepočítavaní nameraných veličín na  $U_{sN}$ , zmenou odporu vinutia oteplením a krátkou dobou, v ktorej sa musí meranie uskutočniť. Snímanie momentovej charakteristiky je jedno z najnáročnejších meraní asynchrónnych motorov. Vyžaduje zručnosť a skúsenosť.

### 5.8.1 Statické meranie momentovej charakteristiky

Toto meranie v celom rozmedzí rýchlosti urobíme pri zníženom napätí  $U'_s = (0,5 \text{ až } 0,6)U_{sN}$ . Toto napätie  $U'_s$  udržiavame konštantné, motor dynamometrom zaťažime až takmer do stavu nakrátko, kedy sa točí veľmi pomaly a odčítame hodnoty momentu  $M'$ , prúdu  $I'$  a otáčok. Postupne motor odľahčujeme, t. j. dynamometrom zvyšujeme otáčky (asi po  $100 \text{ min}^{-1}$ ) a pri každej nastavenej hodnote  $n$  odčítame  $M'$  a  $I'$ . Pri menovitom napätí  $U_{sN}$  meriame – ak máme tú možnosť – len jeden – dva body pre kontrolu. Tým dostaneme presnejšie výsledky ako keby sme merali celú momentovú charakteristiku pri  $U_{sN}$ , kedy zmena odporu oteplením spôsobí väčšie chyby (až 30%). Pretože v oblasti veľkých sklzov je rýchlosť stroja malá a ventilácia je neúčinná, môže sa asynchrónny motor prehriať. Preto je nutné vychladiť ho, najlepšie po každom odčítaní hodnôt. Chladíme ho odľahčením od záťaže (zvýšením otáčok).

Pri tomto meraní prejdeme aj do generátorickej oblasti asynchrónneho stroja. Postupným znižovaním záťaže asynchrónneho motora a zvyšovaním otáčok dynamometra, dosiahnu otáčky rotora synchronnú rýchlosť  $n_s$ , čo je ideálny stav naprázdno. Stroj ťahá zo siete len magnetizačný prúd, straty v železe sú kryté pohonným strojom.

Ďalším zvyšovaním otáčok dynamometra sa stroj dostane do nadsynchronných otáčok, pri ktorých asynchrónny stroj pracuje ako asynchrónny generátor (pretože je pripojený na sieť, odoberá magnetizačný prúd zo siete). Prúd sa opäť zvyšuje. Zaznamenávame opäť všetky merané hodnoty a vynesieme do grafov na obr. 5.12.

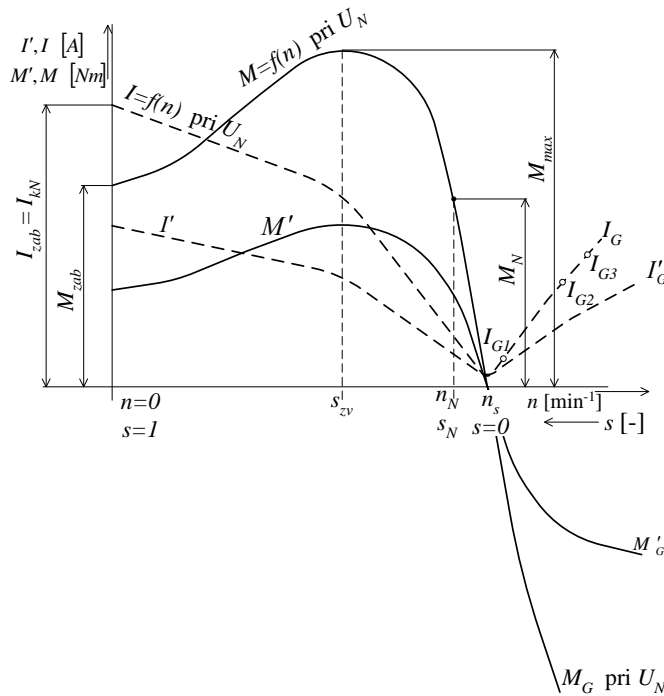
Po prepočítaní hodnôt na menovité napätie doplníme body aj do kruhového diagramu v generátorickej oblasti (obr. 5.21).

Prepočítanie meraného momentu  $M'$  a prúdu  $I'$  pri zníženom napätí  $U'_s$  na hodnoty, ktoré by dosahovali pri menovitom napätí  $U_{sN}$  robíme na základe úvahy, že moment je úmerný štvorcu napätia a prúd rastie lineárne s napätím. Teda moment na hriadeli  $M$  a prúd  $I$  pri  $U_{sN}$  zistíme takto:

$$\frac{M}{M'} = \left[ \frac{U_{sN}}{U'_s} \right]^2 \quad M = M' \left[ \frac{U_{sN}}{U'_s} \right]^2 \quad (5.29)$$

$$\frac{I}{I'} = \left[ \frac{U_{sN}}{U'_s} \right] \quad I = I' \left[ \frac{U_{sN}}{U'_s} \right] \quad (5.30)$$

Schéma zapojenia je taká istá ako pri meraní zaťažovacích charakteristík (obr. 5.10). Do tabuľky zapíšeme napätie, pri ktorom meranie prebehlo a napätie menovité, ďalej  $M'$ ,  $M$ ,  $I'$ ,  $I$ ,  $n$ .



Obr. 5.12 Momentová charakteristika asynchrónneho motora s presahom do generátorického stavu

Výsledky merania spracujeme graficky podľa obr. 5.12, kde vynesieme  $M'$ ,  $M$ ,  $I'$ ,  $I$  ako funkcie  $n$  a sklzu  $s$ , aj v generátorickej oblasti. Určíme moment zvratu  $M_{max}$ , záberový moment  $M_{zab}$  a záberový prúd  $I_{zab} = I_{kN}$ , ktorý má súhlasiť s meraním nakrátko (výpočet podľa (5.21)). Vypočítame momentovú preťažiteľnosť  $M_{max}/M_N$ , kde  $M_N$  je menovitý moment vypočítaný z menovitej rýchlosti  $n_N$  a menovitého výkonu  $P_N$ , uvedených na štítku

takto:

$$M_N = \frac{P_N}{\Omega_N} = 9,55 \frac{P_N}{n_N} \quad (5.31)$$

Do charakteristiky  $M = f(n)$  zakreslíme hodnoty momentov nameraných pri zaťažovacej skúške (kap. 5.7), ktorá bola vykonaná tiež pri menovitom napätí. Porovnáme hodnoty získané obidvoma spôsobmi merania.

## 5.9 Kruhový diagram asynchrónneho motora (ASM) s jednoduchou kľetkou

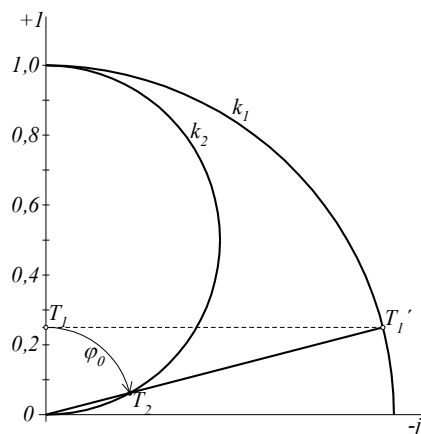
Geometrické miesto koncov fázorov primárneho prúdu  $I_s$  pri zaťažení asynchrónneho motora alebo generátora, ktorého rotorový obvod je uzavretý, je kružnica. Kružnica prechádza bodom naprázdno a nakrátko za predpokladu nepremenných parametrov, t. j. odporov a reaktancií (v skutočnosti sa tieto „parametre“ menia so zaťažením), a pri konštantnom napätí a frekvencii.

Z kruhového diagramu možno odčítať  $I_s$ ,  $I_r$ ,  $\cos\varphi_s$ ,  $P$ ,  $P_p$ ,  $\Delta P$ ,  $M$ ,  $s$  a vypočítať  $n$ ,  $\eta$ . Tento diagram znázorňuje prehľadne a dosť uspokojivo prevádzkové vlastnosti motora a pre stredný a veľký výkon možno z neho s dobrou presnosťou zistiť všetky pracovné charakteristiky. Treba však zdôrazniť, že všetky konštrukcie kruhového diagramu sú len približné. Kreslenie kruhového diagramu je teoreticky zdôvodnené napr. v [15] a [21].

Kruhový diagram kreslíme obvykle pre fázové napätia a prúdy. Z praktického hľadiska pri zapojení do trojuholníka je výhodnejšie kresliť združené prúdy. Celý diagram kreslíme pre menovité napätie  $U_{sN}$ . Preto musíme mať výsledky z merania naprázdno pre  $U_{sN}$ :  $I_{s0N}$ ,  $\cos\varphi_{0N}$  a z merania nakrátko prepočítané na  $U_{sN}$ :  $I_{kN}$ ,  $\cos\varphi_k$  a hodnotu odporu jednej fázy statora pri 75°C, čo pokladáme za pracovnú strednú teplotu vinutia s izoláciou A alebo B, alebo 115°C pre izoláciu H.

Postup pri konštrukcii kruhového diagramu:

- Nakreslíme osi súradnicovej sústavy; reálna os  $+I$  s fázorom  $U_{sN}$  je zvislá smerom hore, imaginárna os  $-j$  (os jalových magnetizačných prúdov) je k nej kolmá a smeruje doprava (obr. 5.13, 5.14).
- Volíme mierku sieťového prúdu  $I_s$ :  $m_I$  [A/cm] a to so zreteľom na veľkosť  $I_{kN}$ ,



Obr. 5.13 Kružnica na zostrojenie účinníkov

aby sa kruh vhodne umiestnil na obvyklý formát  $A_4$  alebo  $A_3$  teda napr.  $m_l = 1$  A/cm.

- c) Zostrojíme pomocnú štvrtkružnicu  $k_l$  z počiatku  $0$  s polomerom 10 cm na vynášanie malých účinníkov. Napr.:  $\cos \varphi_0 = 0,25 = \frac{OT_1}{r} = \frac{0,25}{1,0}$  (obr. 5.13), z čoho vyplýva, že

$OT_1$  je smer fázora pod uhlom  $\varphi_0$ .

- d) Pod uhlom  $\varphi_0$  nakreslíme v zvolenej mierke prúd  $I_{0N}$  (bod  $A_0$ ) a pod uhlom  $\varphi_k$  prúd  $I_{kN}$  (bod  $A_k$ ), pozri obr. 5.14. Prúd  $I_{0N}$  je fázovým súčtom prúdu magnetizačného  $I_\mu$  s fázovým posunom  $90^\circ$  za napätím  $U_{sN}$ , a prúdu strát v železe  $I_{Fe}$ , ktorý je vo fáze s  $U_{sN}$ . Vypočítame mierku výkonu  $m_p = \sqrt{3}U_{sN}m_l$ . Os  $-j$  je priamkou príkonovou. To znamená, že úsek každého bodu kružnice po túto priamku v mierke výkonovej predstavuje príkon motora pre príslušný stav, zodpovedajúci danému bodu kružnice.

- e) Pretože na zostrojenie máme len dva body, a to  $A_0$  a  $A_k$ , a teda jednu tetivu  $\overline{A_0A_k}$ , úloha zostrojiť kružnicu je nejednoznačná. Preto napr. môžeme použiť približnú konštrukciu s pomocným bodom  $B$  a tak vytvoriť dve tetivy:  $\overline{A_0B}$  a  $\overline{A_0A_k}$ . Osi týchto dvoch tetív sa pretínajú v strede kružnice. Preto zostrojíme stred kružnice takto: Bodom  $A_0$  vedieme zvislicu, ktorá pretína fázor prúdu nakrátko v bode  $B$ . Hľadaná kružnica musí prechádzať  $A_0$ ,  $A_k$ , a  $B$  a stred kružnice musí ležať jednak na symetrále tetivy  $\overline{A_0A_k}$ , jednak na symetrále bodov  $\overline{A_0B}$ , ktorá je rovnobežná s vodorovnou osou (obr. 5.14).

Táto konštrukcia predpokladá, že straty v medi statora a rotora sú približne rovnaké. Ak tieto straty nie sú v pomere 1:1, táto konštrukcia platí len približne. V priesečníku týchto dvoch symetrál leží stred kružnice a kružnicu môžeme nakresliť, ako to vidno na obr. 5.14 (Príloha 3 v STN 35 0301 opisuje zostrojenie kruhového diagramu pre jednotlivé typy motorov iným spôsobom).

- f) Určíme bod  $A_\infty$  pre  $s = \infty$ . Bodom  $A_k$  vedieme zvislicu, ktorá pretne vodorovnú os  $-j$  v bode  $C$ . Úsečka  $\overline{A_kC}$  sa rovná v mierke výkonov celkovému príkonu v stave nakrátko, ktorý sa rovná celkovým stratám v stave nakrátko pri menovitom napätí, t. j.  $\Delta P_{jskN} + \Delta P_{jrkN} + \Delta P_{FeN}$ , pretože  $\Delta P_{mech} = 0$ . Najprv oddelíme  $\Delta P_{FeN}$  v stave pokoja a to tak, že vedieme rovnobežku s vodorovnou osou z bodu  $A_0$  t.j. na úrovni prúdu  $I_{Fe}$ . Na úsečke  $\overline{A_kC}$  vytne táto rovnobežka bod  $D$ . Úsečka  $\overline{CD}$  predstavuje  $\Delta P_{FeN}$  v mierke výkonov (úsek je úmerný  $I_{Fe}$  pri menovitom napätí). Vypočítame straty vo vinutí statora v teplom stave pri  $75^\circ\text{C}$  (alebo  $115^\circ\text{C}$ ) v mierke výkonov pri menovitom napätí, t. j. pri prúde  $I_{kN}$ :

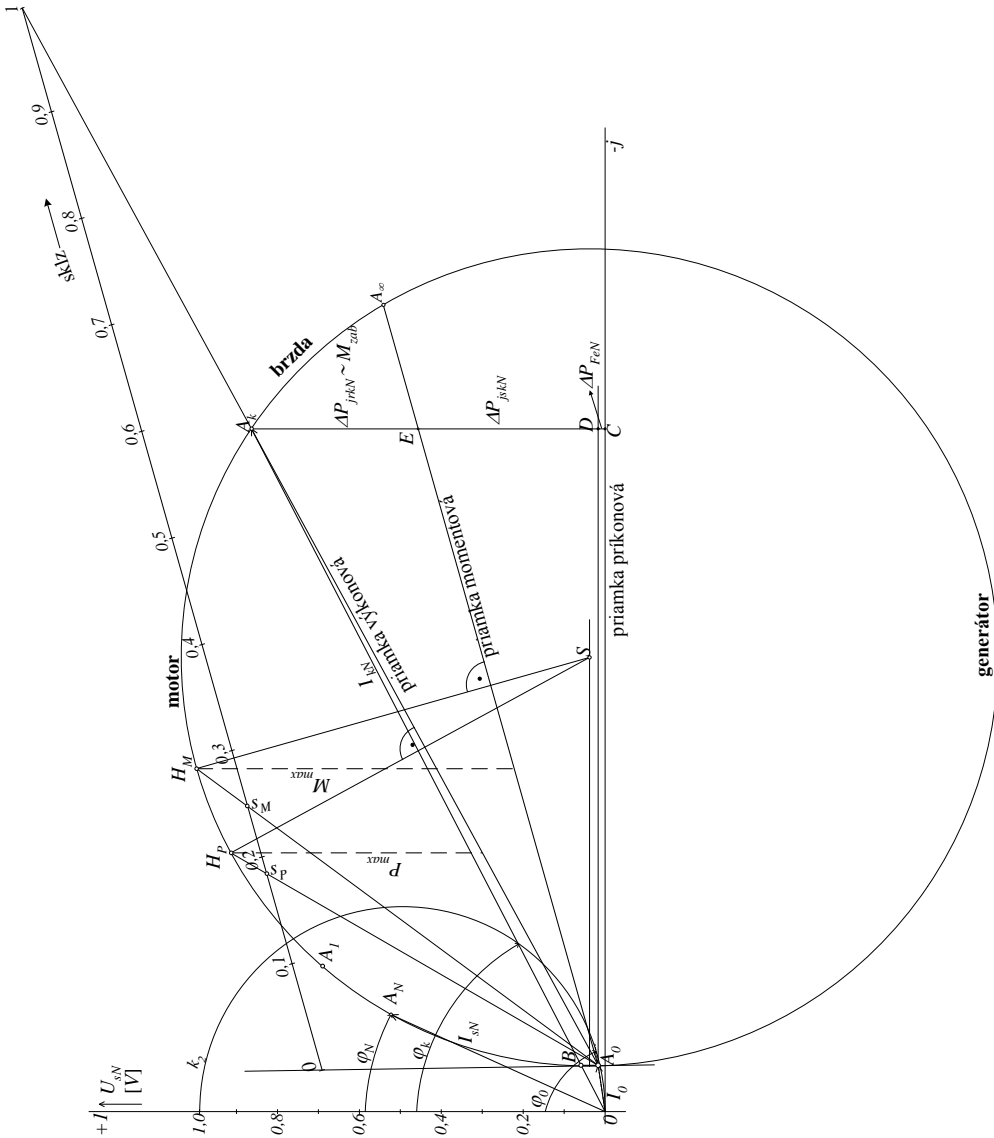
$$\Delta P_{jskN} = \frac{3R_{sf75}I_{kN}^2}{m_p} \quad (5.32)$$

a vynesieme nad bod  $D$ . Koncový bod tohto úseku je bod  $E$ . Zostávajúca časť  $\overline{EA_k}$  by



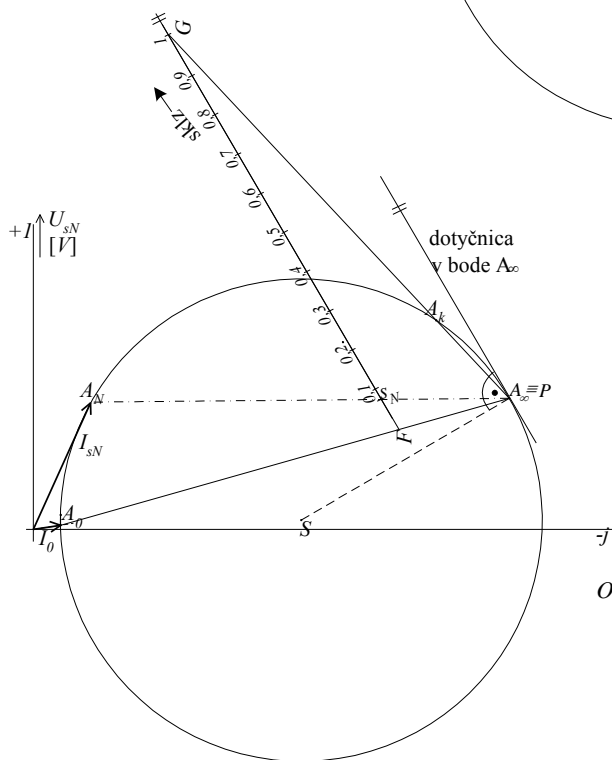
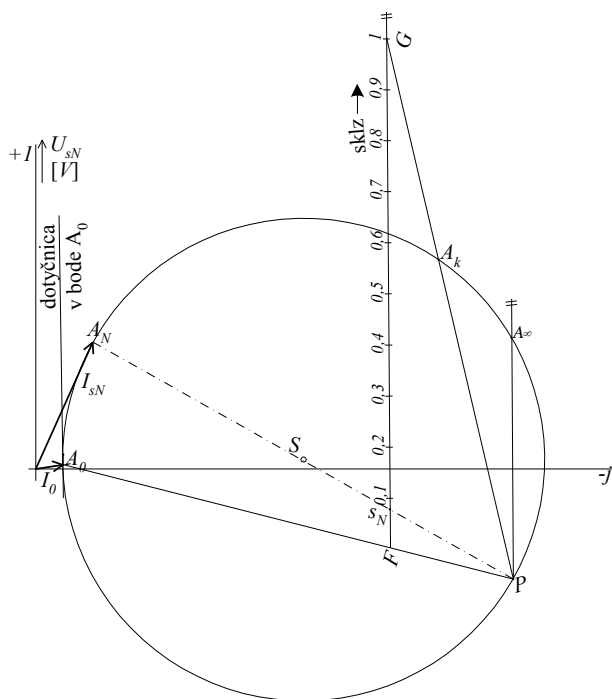
mala zodpovedať stratám vo vinutí rotora v stave pokoja  $\Delta P_{jrKN}$ .

Bod  $E$ , ktorý je dôležitý pre určenie momentovej priamky a bodu  $A_\infty$  môžeme určiť aj pomocou hodnôt odporov vinutí, takýmto postupom: úsečku  $\overline{DA_k}$ , reprezentujúcu celkové straty nakrátko rozdelíme v pomere odporov statora  $R_s$  a prepočítaného odporu  $R_r'$ , určeného pri meraní nakrátko vzťahom (5.24), ak úsečku  $\overline{DA_k}$  považujeme za celý odpor  $R_k$ . Touto konštrukciou potvrdíme polohu bodu  $E$ .



Obr. 5.14 Kruhový diagram asynchrónneho motora, určenie príkonovej, výkonovej a momentovej priamky

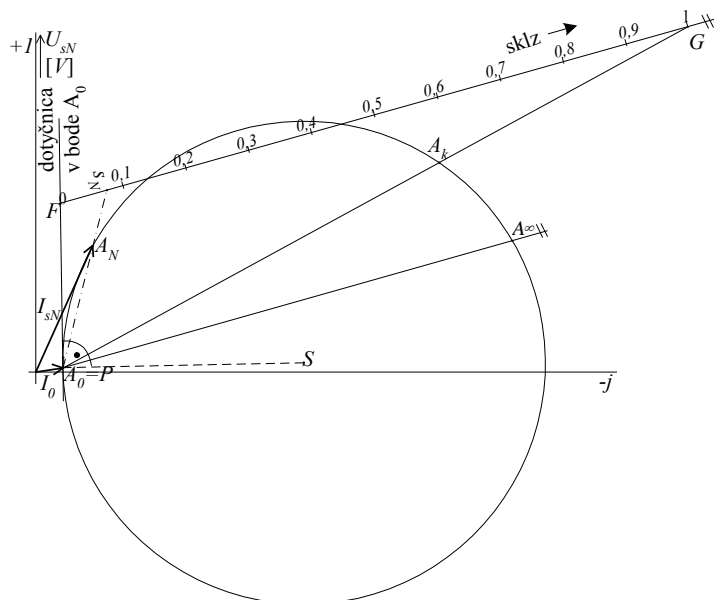
Obr. 5.15 Zostrojenie stupnice sklzu. Bod  $P$  volený ľubovoľne. Stupnica je rovnobežná so spojnicou  $\overline{PA_\infty}$



Obr. 5.16 Stupnica sklzu pre malé sklzy. Stupnica je rovnobežná s dotyčnicou v bode  $A_\infty$

- g) Záberový moment  $M_{zab}$  je úmerný stratám v rotore, v stave nakrátko, t. j. pri  $n = 0$  a  $s = 1$ , teda úsečky  $\overline{EA_k}$ . V bode  $A_0$  je moment  $M = 0$ . Preto spojnica  $\overline{A_0E}$  je priamka momentová, ktorá pretína kružnicu v bode  $A_\infty$ . Vypočítame mierku momentov  $m_M = 9,55m_p/n_s$  [Nm/cm]. Úsečky od jednotlivých bodov kružnice po priamku momentovú v smere kolmice na

- vodorovnú os, resp. presnejšie v smere dotyčnice ku kružnici v bode  $A_0$ , predstavujú v mierke momentov veľkosť momentu na hriadeľi pri jednotlivých sklzoch. V mierke výkonov udávajú tieto úsečky výkon točivého poľa vo vzduchovej medzere  $P_\delta$ .
- h) V bode  $A_k$  sa *celý* príkon zo siete mení na straty, pretože užitočný výkon  $P=0$ , podobne ako v bode  $A_0$ . Preto spojnica  $\overline{A_0A_k}$  je priamka výkonová. Úsečky od jednotlivých bodov kružnice po priamku výkonovú v mierke výkonov predstavujú výkon motora v danom prevádzkovom stave. Aby sme vedeli v akom prevádzkovom stave, treba určiť stupnicu sklzu.
- i) Zostrojíme stupnicu sklzu. Na kružnici zvolíme ľubovoľný bod  $P$  a vedieme spojnice  $\overline{PA_0}$ ,  $\overline{PA_k}$ ,  $\overline{PA_\infty}$ . Stupnicu sklzu dostaneme potom na ľubovoľnej rovnobežke so spojnicou  $\overline{PA_\infty}$  (obr. 5.15). Bod  $F$  zodpovedá sklzu  $s=0$ , bod  $G$  sklzu  $s=1$ . Stupnica sklzu medzi týmito bodmi je lineárna, rozdelíme ju napr. na 10 častí pre  $s=0,1; 0,2; \dots$  až 1. Sklz pre ľubovoľný bod  $A_N$  určíme, ak vedieme spojnicu  $\overline{PA_N}$ . Jej priesečník so stupnicou sklzu udáva sklz pre daný bod. Ak splynie bod  $P$  s bodom  $A_\infty$ , prejde spojnica  $\overline{PA_\infty}$  v dotyčnicu v bode  $A_\infty$  a stupnica sklzu  $\overline{FG}$  je s touto dotyčnicou rovnobežná (obr. 5.16). Táto konštrukcia je výhodná pre malé sklzy. Na obr. 5.14 ÷ 5.17 je bod  $A_N$  bodom pre menovitý stav. Ak splynie bod  $P$  s bodom  $A_0$ , dostávame konštrukciu podľa obr. 5.17. Stupnica sklzu je rovnobežná s momentovou priamkou  $\overline{A_0A_\infty}$ . Táto konštrukcia sa používa pre stredné sklzy, je použitá aj na obr. 5.14.



Obr. 5.17 Stupnica sklzu pre stredné sklzy. Stupnica je rovnobežná s momentovou priamkou  $\overline{A_0A_\infty}$

Z diagramu na obr. 5.14 vidíme, že v bode  $A_k$  má moment ešte určitú hodnotu, a je to moment záberový, ale užitočný mechanický výkon je nulový. Mechanický výkon i moment budú súčasne nulové v bode  $A_0$ . Teda na oblúku medzi bodom  $A_0$  a  $A_k$  leží vlastná pracovná oblasť pre motorickú prevádzku. Prevádzka je však stabilná len medzi bodom  $A_0$  a bodom  $H_M$  momentu zvratu  $M_{max}$ , ktorý ľahko nájdeme, ak spustíme zo stredu kruhu  $S$  kolmicu na momentovú priamku a predĺžime ju až do priesečníka s kružnicou.

Maximálny výkon na hriadeli dosiahne motor o niečo skôr, pri menšom sklze. Príslušný bod kružnice  $H_P$  nájdeme ako priesečník kružnice s kolmicou z bodu  $S$  na výkonovú priamku (obr. 5.14).

Pre ktorýkoľvek pracovný bod  $A_l$  na obr. 5.14 môžeme z kruhového diagramu určiť na úsečkách kolmých k ose  $-j$  príkon, kolmých k  $\overline{A_0S}$  (alebo rovnobežných s dotyčnicou v bode  $A_0$ ) výkon a moment motora. Ďalej môžeme určiť prúd statora (úsečka  $\overline{OA_1}$ ), prúd rotora prepočítaného na stator (úsečka  $\overline{A_0A_1}$ ), účinník (priesečník kružnice  $k_2$  s úsečkou  $\overline{OA_1}$ ) a sklz (napr. na obr. 5.14 je to priesečník priamky vedenej cez body  $A_0$  a  $A_l$  s osou sklzovou). Urobíme kontrolu menovitých hodnôt: Pre menovitý prúd  $I_{sN}$  (bod  $A_N$  na obr. 5.14÷5.17) odčítame všetky spomínané hodnoty z kruhového diagramu a skontrolujeme ich s hodnotami udanými na štítku.

Z kruhového diagramu nakreslíme momentovú charakteristiku  $M = f(s)$ . Pre určité hodnoty sklzov (napr. 0,1; 0,2; atď. až po 1,0) zistíme príslušné hodnoty momentov a vynesieme do súradníc  $M = f(s)$ . Osobitne zhotovíme bod pre  $M_{max}$  a príslušný  $s_{Mmax}$ . Túto momentovú charakteristiku porovnáme s tou, ktorá bola nameraná v kap. 5.8. Pre kontrolu ich obe nakreslíme do jedného grafu.

Do toho istého grafu nakreslíme aj priebeh  $P = f(s)$  a vyznačíme  $P_{max}$  pri príslušnom sklze  $s_{Pmax}$ . Určíme momentovú a výkonovú preťažiteľnosť  $M_{max}/M_N$  a  $P_{max}/P_N$ .

## 5.10 Výpočet prvkov náhradnej schémy a simulácie prechodových javov

### 5.10.1 Prvky náhradnej schémy

Náhradná schéma indukčného motora je na obr. 5.18.

Hodnoty jednotlivých prvkov určíme z merania naprázdno pri menovitom napätí a z merania nakrátko prepočítaného na menovité napätie. Podobne ako pri meraní transformátorov určíme z fázových hodnôt merania naprázdno, (kedy je sklz  $s \equiv 0$ ), pri zanedbaní odporu a rozptylovej reaktancie statora, magnetizačnú reaktanciu  $X_\mu$  (magnetizačnú indukčnosť  $L_\mu$ ) a odpor  $R_{Fe}$ , ktorý v tomto prípade reprezentuje straty v železe aj straty mechanické.

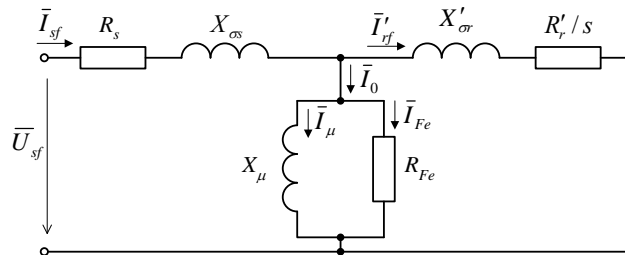
$$X_{\mu} = \frac{U_{sfN}}{I_{\mu}} \quad L_{\mu} = \frac{X_{\mu}}{2\pi f_s} \quad (5.33)$$

$$R_{Fe} = \frac{U_{sfN}}{I_{Fe}} \quad (5.34)$$

$$\text{kde } I_{\mu} = I_{0N} \sin \varphi_{0N} \quad (5.35)$$

$$\text{a } I_{Fe} = I_{0N} \cos \varphi_{0N} \quad (5.36)$$

pričom  $I_{0N}$  a  $\cos \varphi_{0N}$  sú hodnoty pri menovitom napätí (obr. 5.6).



Obr. 5.18 Náhradná schéma indukčného motora

Z merania nakrátko, kedy je  $s = 1$ , určíme pri zanedbaní magnetizačnej reaktancie celkový činný odpor, ktorý sme vypočítali pomocou vzťahu (5.22) a zároveň odpor  $R_s$  máme určený Ohmovou metódou (kap. 5.4), takže môžeme vypočítať odpor rotorového vinutia prepočítaný na stator:

$$R'_r = R_k - R_s \quad (5.37)$$

Z hodnôt nakrátko určíme aj celkovú rozptylovú reaktanciu  $X_{\sigma}$ , ktorá je súčtom rozptylovej reaktancie statora  $X_{\sigma s}$  a rozptylovej reaktancie rotora prepočítanej na stator  $X'_{\sigma r}$ :

$$X_{\sigma} = X_{\sigma s} + X'_{\sigma r} = \sqrt{\left(\frac{U_{Nf}}{I_{kN}}\right)^2 - R_k^2} \quad (5.38)$$

Rozdeliť  $X_{\sigma}$  na  $X_{\sigma s}$  a  $X'_{\sigma r}$  môžeme len odhadom, obvykle na dva rovnaké diely  $X_{\sigma s} = X'_{\sigma r} = X_{\sigma}/2$ . Z týchto hodnôt vypočítame hodnoty rozptylových indukčnosti, ktoré budeme potrebovať pri simuláciách prechodových javov:

$$L_{\sigma} = \frac{X_{\sigma}}{2\pi f_s} \quad L_{\sigma s} = L'_{\sigma r} = \frac{L_{\sigma}}{2} \quad (5.39)$$

Všetky prvky náhradnej schémy vyjadríme pomernými hodnotami, t. j. vzťahujeme ich k menovitej impedancii, ktorá je daná vzťahom:

$$Z_N = \frac{U_{Nf}}{I_{Nf}} \quad (5.40)$$

### 5.10.2 Simulácie prechodových javov

Na simulovanie prechodových javov asynchrónneho motora s výhodou použijeme všeobecnú teóriu elektrických strojov, v rámci ktorej sa súmerná trojfázová sústava statora transformuje do dvojsovej sústavy. Ako je známe [28], [29], [27], pre simulovanie asynchrónneho motora je najvýhodnejšie stotožniť vzťažnú sústavu s polohou statorovej fázy „a“, pretože v tom prípade je priebeh prúdu statora v transformovanej sústave  $i_{\alpha s}$  zhodný s priebehom statorového prúdu  $i_s$  vo fáze „a“, čo je jedna z vyšetovaných veličín.

Takto definovaná vzťažná sústava sa označuje  $\alpha, \beta, 0$  (na stator), a tieto grécke písmená sa zároveň používajú ako indexy príslušných transformovaných prúdov a napätí.

Bez odvodu uvádzame rovnice simulačného matematického modelu asynchrónneho stroja v sústave  $\alpha, \beta, 0$ . Tieto rovnice vyjadrujú časovú zmenu prúdov a uhlovej rýchlosti pri konštantnom napätí a konštantných parametroch stroja.

Sústava statorových a rotorových napäťových diferenciálnych rovníc pri použití konštant

$$k_d = k_q = \frac{2}{3} :$$

$$u_{\alpha s} = R_s i_{\alpha s} + \frac{d\psi_{\alpha s}}{dt} \quad (5.41)$$

$$u_{\beta s} = R_s i_{\beta s} + \frac{d\psi_{\beta s}}{dt} \quad (5.42)$$

$$u_{\alpha r} = R_r i_{\alpha r} + \frac{d\psi_{\alpha r}}{dt} + \omega \psi_{\beta r} \quad (5.43)$$

$$u_{\beta r} = R_r i_{\beta r} + \frac{d\psi_{\beta r}}{dt} - \omega \psi_{\alpha r} \quad (5.44)$$

Aby bol model ASM kompletný, k napäťovým rovniciam sa pripojí elektromechanická rovnica:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} \left( p \frac{3}{2} (i_{\beta s} \psi_{\alpha s} - i_{\alpha s} \psi_{\beta s}) - m_{\tau} \right) \quad (5.45)$$

kde  $\omega$  je elektrická uhlová rýchlosť rotora,

$$\psi_{as} = L_S i_{cs} + L_\mu i_{cr} \quad (5.46)$$

$$\psi_{\beta s} = L_S i_{\beta s} + L_\mu i_{\beta r} \quad (5.47)$$

$$\psi_{ar} = L_R i_{cr} + L_\mu i_{cs} \quad (5.48)$$

$$\psi_{\beta r} = L_R i_{\beta r} + L_\mu i_{\beta s} \quad (5.49)$$

sú spriahnuté magnetické toky,

$R_s$  odpor jednej fázy statora pri prevádzkovej teplote motora (pozri kap. 5.6),

$L_S = L_\mu + L_{cs}$  celková indukčnosť statora,

$L_R = L_\mu + L'_{\sigma r}$  celková indukčnosť rotora prepočítaná na stator,

$R_R$  odpor rotorového vinutia prepočítaný na stator,  $R_R = R'_r$  – pozri vzťah (5.24),

$J$  moment zotrvačnosti [ $kgm^2$ ]. Jeho určenie je stručne opísané v kap. 9 a kap. 3.6.4,  $m_{zr}$  je okamžitý záťažovací moment, ktorý je rovný v stave naprázdno momentu strát  $M_{strát}$  (moment na krytie vlastných strát v stave naprázdno) a vypočítame ho zo stavu naprázdno pri  $U_N$  (pozri obr. 5.6) takto:

$$M_{strát} = \frac{\Delta P_{0N}}{\frac{2\pi n_s}{60}} \quad (5.50)$$

Hodnoty napájacích napätí  $u_{cs}$  a  $u_{\beta s}$  získame aplikáciou Parkovej transformácie na trojfázové napájacie napätia  $u_a, u_b, u_c$  takto.

Ak

$$u_a = U_m \sin \omega_s t \quad (5.51)$$

$$u_b = U_m \sin \left( \omega_s t - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (5.52)$$

$$u_c = U_m \sin \left( \omega_s t + \frac{2\pi}{3} \right) \quad (5.53)$$

potom

$$u_{cs} = U_m \sin \omega_s t \quad (5.54)$$

$$u_{\beta s} = -U_m \cos \omega_s t \quad (5.55)$$

$u_{cr} = u_{\beta r} = 0$  pre stroj s kliečkou nakrátko.

Priebehy  $i_{\alpha s}$ ,  $i_{\beta s}$  sú výsledkom riešenia uvedených diferenciálnych rovníc (5.41÷5.45). Priebehy skutočných fázových prúdov potom získame tak, že  $i_a = i_{\alpha s}$ , a prúdy vo fázach  $b$  a  $c$  sú posunuté o  $\pm 120^\circ$ , alebo ich vypočítame spätnou transformáciou.

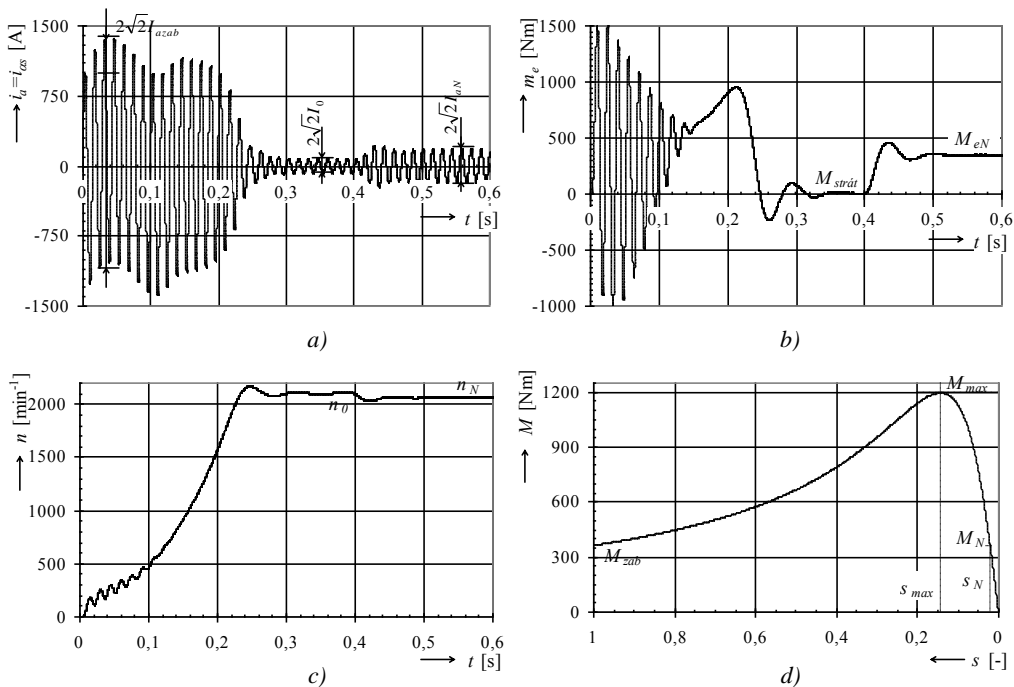
Tieto rovnice treba naprogramovať v ľubovoľnom simulačnom jazyku.

Riešenie týchto rovníc umožňuje vykresliť časové priebehy fázového prúdu statora  $i_a = f(t)$ , okamžitej hodnoty elektromagnetického momentu  $m_e = f(t)$ , elektrickej a mechanickej uhlovej rýchlosti  $\omega = f(t)$ ,  $\Omega = f(t)$ , a otáčok  $n = f(t)$ . V ustálenom stave, kedy  $M_e = M_{zt} = M$  môžeme uviesť závislosti  $M = f(n)$ , resp.  $M = f(s)$ , ktoré sú zložené z bodov ustálených stavov pre jednotlivé záťažee.

### 5.10.2.1 Príklad simulácie prechodových javov ASM

Na obr. 5.19 je ukážka simulačných priebehov pre ASM s týmito štítkovými údajmi:

$P_N = 75 \text{ kW}$ ;  $n_N = 2064 \text{ min}^{-1}$ ;  $U_N = 400 \text{ V}$  pri zapojení do hviezdy;  $I_N = 127 \text{ A}$ ;  $f_N = 70 \text{ Hz}$ ;  $2p = 4$ .



Obr. 5.19 Simulačné priebehy ASM ( $t_l = 0,4 \text{ s}$ ) a)  $i_{\alpha s} = f(t)$ , b)  $m_e = f(t)$ , c)  $n = f(t)$ , d)  $M = f(s)$ .

Simulovaný asynchrónny motor je priamym pripojením na sieť s menovitým napätím a frekvenciou rozbehnutý do stavu naprázdno, kedy je zaťažovaný len momentom naprázdno ( $M_{zt} = M_{strát}$  pozri vzťah (5.50)). Po ustálení jednotlivých veličín je napr. v čase  $t_l = 0,4 \text{ s}$  motor skokom zaťažovaný menovitým momentom (menovitý moment určený zo štítku).



V jednotlivých intervaloch simulácie prechodových dejov ASM (obr. 5.19) je možné určiť resp. skontrolovať dôležité hodnoty stroja (záberový prúd  $I_{azab}$ , prúd naprázdno  $I_0$ , menovitý prúd  $I_{aN}$ , otáčky naprázdno  $n_0$ , menovité otáčky  $n_N$ , menovitý elektromagnetický moment  $M_{eN}$ ), ktoré je možné porovnať so štítkovými hodnotami stroja a s hodnotami získanými z meraní stroja. Na obr. 5.19d je charakteristika  $M = f(s)$  tohto motora získaná simuláciou pre ustálené stavy.

Parametre ASM a príklad programu v jazyku BorlandC v3.1 sú v prílohe D. Sledovať detailný priebeh simulovaných veličín presahuje rámec tejto knihy.

### 5.10.2.2 Porovnanie hodnôt získaných z merania, výpočtu a simulácie

Je veľmi dôležité uvedomiť si vzájomnú súvislosť jednotlivých metód skúmania dôležitých vlastností ASM. Preto je užitočné zhrnúť dôležité hodnoty získané jednotlivými metódami do tabuľky (Tab. 5.1) a navzájom ich porovnať.

**Tab. 5.1**

*Porovnanie hodnôt získaných z merania, výpočtu a simulácie*

$$U_s = ; f_s = ; R_s = ; R'_r = ; L_\mu = ; L_{\sigma s} = ; L'_{\sigma r} = ; L_s = ; L_R = ; J = ;$$

Metóda	$I_0$	$I_N$	$I_{kN}$	$M_N$	$M_{zab}$	$M_{max}$	$P_{max}$	$P_N$	$n_N$	$s_N$	$s_{Mmax}$	$s_{Pmax}$
Štítok (napätie a zapojenie)												
Kruhový diagram												
Char. $I, M = f(n)$ (nameraná)												
Náhradná schéma												
Simulácia												

Tab. 5.1 treba vyplniť príslušnými hodnotami takto:

- Štítok: uvedieme  $I_N$ ,  $P_N$ ,  $n_N$ ,  $s_N$ . Menovitý moment  $M_N$  vypočítame z výkonu a otáčok.
- Kruhový diagram: Po zhotovení kruhového diagramu vynesieme v mierke prúdov statorový menovitý prúd  $I_{sN}$  a tým vymedzíme pracovný bod  $A_N$  v menovitom chode. Pre tento bod odčítame  $\cos\varphi_N$ ,  $P_{PN}$ ,  $P_N$ ,  $n_N$ ,  $s_N$  a porovnáme so štítkovými údajmi. Odčítame tiež  $I'_{rN}$ ,  $I_0$ ,  $I_{kN}$ ,  $M_{zab}$ ,  $M_{max}$ ,  $P_{max}$ , a príslušné hodnoty sklzu a otáčok porovnáme s nameranými hodnotami (charakteristík  $M = f(n)$ ).
- Nameraná charakteristika  $I = f(n)$ ,  $M = f(n)$ : Pre menovité otáčky  $n_N$  odčítame  $I_N$ ,  $M_N$ , a pre ostatné stavy ďalšie hodnoty:  $I_0$  ( $I_\mu$ ),  $I_{kN}$  ( $I_{zab}$ ),  $M_{zab}$ ,  $M_{max}$ ,  $s_{Mmax}$ ,  $n_{Mmax}$ . Do charakteristiky  $M = f(n)$  dopočítame a dokreslíme  $P = f(n)$  a odčítame  $P_{max}$ ,  $s_{Pmax}$  a porovnáme.
- Výpočet podľa náhradnej schémy: Hodnoty prvkov náhradnej schémy považujeme za známe. Hodnotu  $s_N$ , vypočítanú zo štítkového údaja  $n_N$ , považujeme za základ pre výpočet  $I'_{rN}$ , výpočtom dostaneme statorový menovitý prúd  $I_{sN}$ ,  $I_{sN} = I_{rN} + I_0$ , ktorý

skontrolujeme so štítkovým údajom. Podľa známych vzťahov vypočítame ostatné hodnoty prúdov, momentov, sklzu, otáčok a výkonu a vpišeme do tabuľky

- e) Simulácia: Z časových priebehov prúdov odčítame amplitúdy a z nich efektívne hodnoty prúdov pri zábere, v stave naprázdno a pri menovitom zaťažení. Zapišeme do tabuľky a porovnáme s ostatnými metódami. V stave naprázdno skontrolujeme otáčky naprázdno, t. j. synchronne otáčky a pri zaťažení menovitým momentom menovité otáčky. Z priebehu  $M = f(s)$  odčítame  $M_{max}$  a  $s_{Mmax}$  a porovnáme s ostatnými metódami. Pri zhode veličín učených jednotlivými metódami môžeme konštatovať, že parametre boli správne určené a merania a výpočty správne vykonané. Ak sa veličiny získané simuláciou zhodujú s meranými a počítanými, môžeme konštatovať, že simulačný model je správny a že ho možno využiť na podrobnejšie skúmanie vlastností asynchronných strojov, aj v takých stavoch, ktoré nemožno merať, resp. už v predvýrobnej etape pri navrhovaní nových strojov.

## 5.11 Meranie asynchronného generátora

Asynchronným generátorom (ASG) sa môže stať každý asynchronný motor, ak ho poháňame nadsynchronnou rýchlosťou a zaisťujeme jeho striedavé budenie buď z trojfázovej siete, kedy hovoríme, že pracuje na tvrdej sieti, alebo z kondenzátorov, kedy môže pracovať samostatne, t. j. v tzv. ostrovnej prevádzke. Môže slúžiť na výrobu elektrickej energie, alebo na brzdenie s rekuperáciou do siete.

### 5.11.1 ASG na tvrdej sieti

Pod pojmom „tvrdá sieť“ rozumieme sieť s konštantným napätím a frekvenciou, ktoré sa nezmenia, ak tam pripojíme náš skúmaný elektrický stroj a meníme jeho zaťaženie.

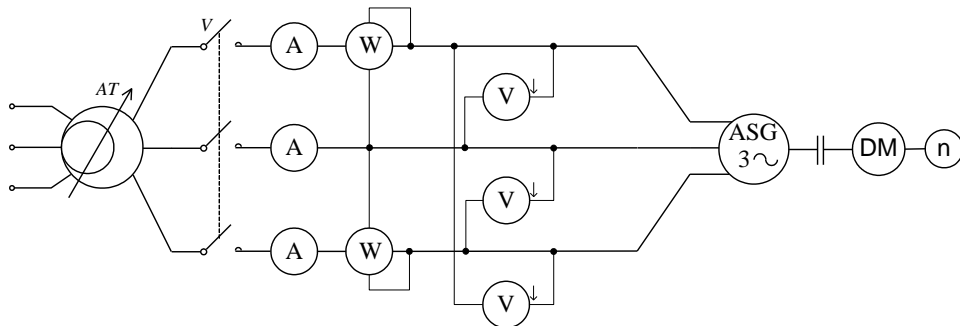
Meranie ASG je rovnaké ako meranie motora. Budeme overovať platnosť kruhového diagramu pre generátorickú oblasť zaťažovaním stroja do siete v generátorickom chode.

Pohonným motorom, napr. dynamometrom *DM* roztočíme asynchronný stroj približne na synchronne otáčky. Rotorové vinutie je spojené nakrátko a stator pripojíme na sieť. Pri ďalšom zvýšení rýchlosti do nadsynchronnej oblasti začne asynchronný generátor odovzdávať do siete elektrický výkon, ktorý meriame wattmetrami v Aronovom zapojení (obr. 5.20), alebo trojfázovým wattmetrom (pozri obr. 2.4c). Veľkosť prúdu meriame v každej fáze ampérmetrom. Účinník počítame z výkonu, prúdu a napätia

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3}UI}$$

kde  $P$  je súčet údajov obidvoch wattmetrov, alebo údaj trojfázového wattmetra  
 $U$  stredná hodnota meraných združených napätí

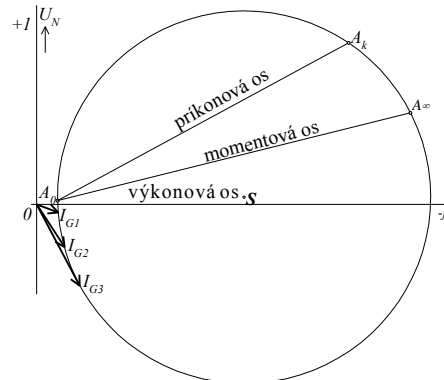
$I$  stredná hodnota prúdov v jednotlivých fázach



Obr. 5.20 Meranie na asynchrónnom generátore

Pre nastavenú záťaž zistíme sklz buď pomocou merania otáčok, alebo pomocou stroboskopu. V tom prípade zistíme sklz odmeraním času  $t$ , za ktorý sa obrazec stroboskopického kotúča zdanlivo  $z$ -krát otočí (v smere skutočných otáčok).

Takto postupujeme pri rôzne nastavených zaťaženiach. Fázory prúdov vynesieme do kruhového diagramu (obr. 5.21), pričom príkonová a výkonová os si navzájom vymenia polohu voči motorickému režimu. Koncové body fázorov prúdov majú ležať na kružnici. Kruhový diagram zostrojený na obr. 5.14 rozšírime do generátorickej oblasti. Skontrolujeme body namerané v kap. 5.8 v generátorickej oblasti, prepočítané na  $U_N$  (prúdy  $I_{G1}$ ,  $I_{G2}$ ,  $I_{G3}$ ).



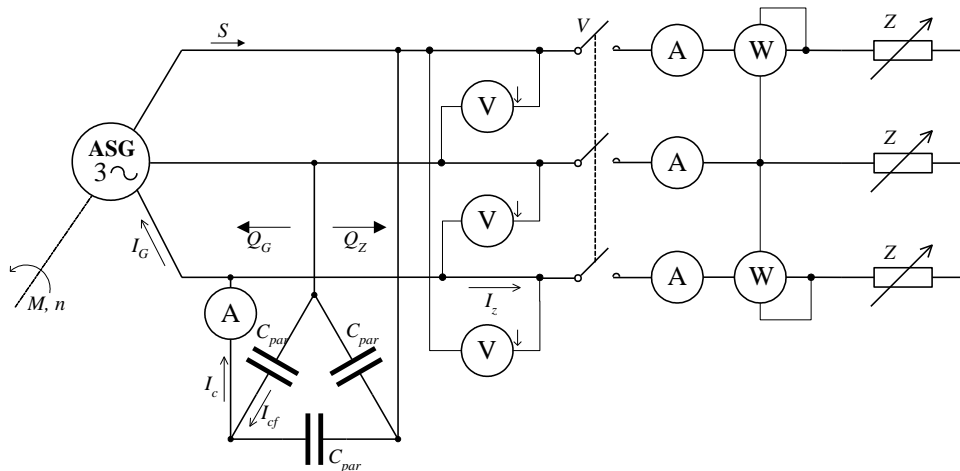
Obr. 5.21 Kruhový diagram pri meraní asynchrónneho generátora na tvrdej sieti

### 5.11.2 ASG v ostrovej prevádzke (pracujúci samostatne)

ASG môže pracovať samostatne s pasívnou záťažou, t. j. bez pripojenia na sieť, ak je budený z trojfázového kondenzátora, pripojeného paralelne k satoru a dodávajúceho potrebný jalový výkon (obr. 5.22). Kmitočet indukovaného napätia a prúdu je daný rýchlosťou hnacieho motora a počtom pólových dvojíc

$$f = \frac{pn}{60} \quad (5.56)$$

Vonkajšia charakteristika pri zaťažení (obr. 5.26, 5.27) pripomína závislosť  $U_a = f(I_a)$  derivačného dynamu, čo bude opísané neskôr (kap. 5.11.2.2). Nevyhnutnou podmienkou činnosti ASG je existencia remanentného magnetizmu, podobne ako v derivačnom dynamu. Pri pohone otáčkami  $n$  sa vybudí malé remanentné napätie, ktoré pretlačí prúd a nabije kondenzátory. Následným vybitím kondenzátorov vzniká kapacitný prúd, ktorý je pre ASG prúdom magnetizačným a zvyšuje indukované napätie. Toto väčšie indukované napätie pretlačí väčší prúd a spôsobí ďalšie nabitie kondenzátorov väčším prúdom a ich ďalším vybitím sa ďalej zvýši napätie atď., proces je podobný vybudeniu napätia v derivačnom dynamu. Táto podobnosť ASG, ktorý pracuje do samostatnej siete, s derivačným dynamom je oveľa širšia, ako uvidíme pri meraní jednotlivých charakteristík.

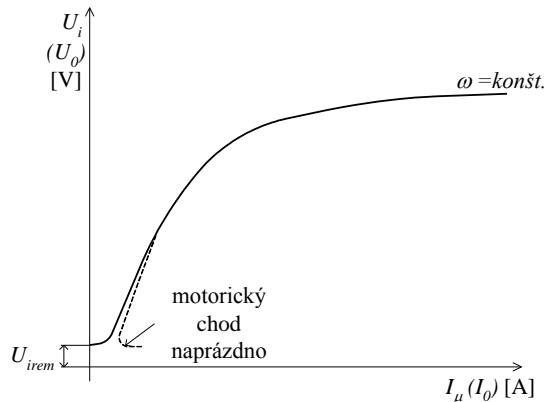


Obr. 5.22 Asynchrónny generátor pracujúci samostatne

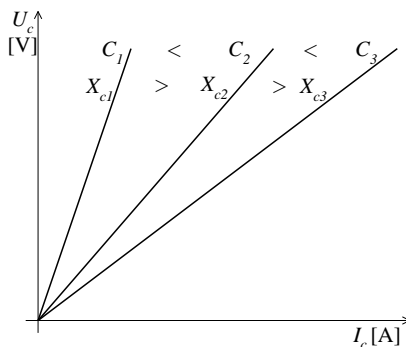
### 5.11.2.1 Charakteristika naprázdno

Charakteristika naprázdno je vo všetkých zdrojoch elektrickej energie, a teda aj v ASG daná závislosťou indukovaného napätia a budiaceho prúdu. V ASG je vhodnejšie nazvať prúd budiaci prúdom magnetizačným, lebo lepšie zodpovedá teórii asynchrónneho stroja:  $U_i = f(I_\mu)$ , pozri obr. 5.23. Ako z obrázku vidno, táto charakteristika sleduje profil magnetizačnej charakteristiky, a má určitú hodnotu indukovaného napätia  $U_{irem}$  od nevyhnutného remanentného magnetického toku. Pre úplnosť treba povedať, že v určitej oblasti je táto charakteristika zhodná s priebehom charakteristiky naprázdno meranej v motorickom režime  $I_0 = f(U_0)$  pre rovnaké otáčky, resp. frekvenciu. Pre vyššie (nižšie) otáčky by charakteristika bola posunutá vyššie (nižšie).

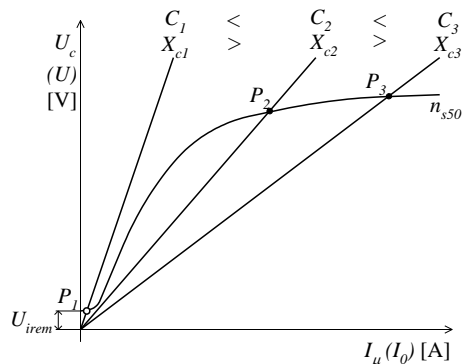
Pre jednu sadu kondenzátorov, zapojených podľa obr. 5.22 s určitou hodnotou kapacity kondenzátorov by sme dostali len jeden bod charakteristiky, ktorý je priesečníkom zaťažovacej charakteristiky kondenzátora  $U_c=f(I_c)$  a charakteristiky naprázdno. Napr. na obr. 5.24 sú zaťažovacie charakteristiky kondenzátorov s troma rôznymi hodnotami kapacít  $C_1, C_2, C_3$ .



Obr. 5.23 Charakteristika naprázdno ASG



Obr. 5. 24 Zaťažovacie charakteristiky kondenzátorov

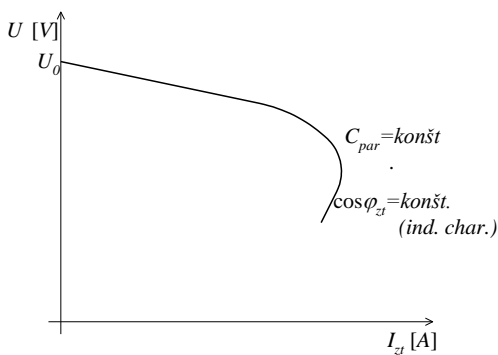


Obr. 5. 25 Charakteristika naprázdno a zaťažovacie charakteristiky kondenzátorov

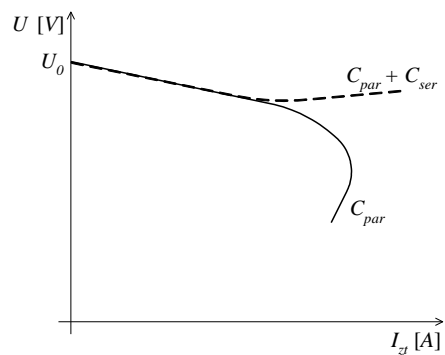
Na obr. 5.25 sú tieto charakteristiky nakreslené spolu s charakteristikou naprázdno, aby sme videli ich priesečníky  $P_1, P_2, P_3$ . Na prvý pohľad vidno podobnosť s charakteristikou naprázdno derivačného dynama a priesečníkmi s charakteristikami pre jednotlivé hodnoty odporov v obvode budenia dynama. Na obr. 5.25 vidno, že ak je  $C_1$  príliš malé, a teda  $X_{c1} = 1/\omega C_1$  príliš veľké, priesečník  $P_1$  je v tej časti charakteristiky, ktorá dáva napätie na úrovni remanentného napätia  $U_{rem}$  a ASG nevytvorí vyššie napätie. Pri hodnotách  $C_2$  a  $C_3$  sa vybudí napätie zodpovedajúce priesečníkom  $P_2$  a  $P_3$ .

### 5.11.2.2 Vonkajšia charakteristika

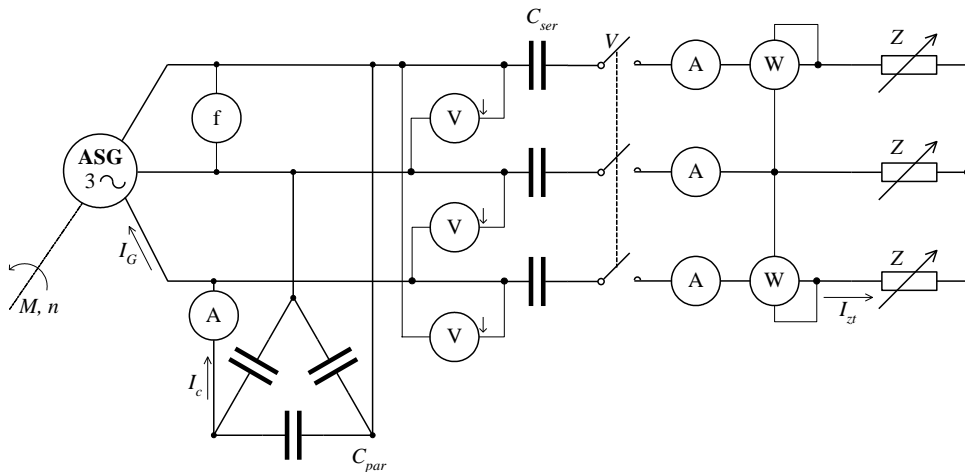
Vonkajšia charakteristika ASG, t. j. závislosť svorkového napätia od zaťažovacieho prúdu sa tiež nápadne podobá vonkajšej charakteristike derivačného dynamo. Tvrdosť napätia ASG závisí od druhu záťaže. Ak je záťaž silne induktívneho charakteru (napr. indukčný motor), paralelne zapojené kondenzátory musia zásobovať magnetizačnou energiou nielen ASG, ale aj záťaž, preto napätie prudko klesá (obr. 5.26). Na vytvorenie zdroja s tvrdšou vonkajšou charakteristikou je potrebné zapojiť kondenzátory aj do série (obr. 5.28), čo pripomína súhlasné kompaudovanie sériovými závitmi v dynamo (kompaudné dynamo). Príslušná vonkajšia charakteristika je na obr. 5.27.



Obr. 5. 26 Vonkajšia charakteristika ASG pri záťaži silne induktívneho charakteru



Obr. 5. 27 Vonkajšie charakteristiky ASG



Obr. 5.28 Asynchrónny generátor so sadou kondenzátorov zapojených paralelne  $C_{par}$ , aj sériovo  $C_{ser}$ .

Určitou nevýhodou činnosti ASG, ktorá je daná povahou charakteristiky  $M = f(n)$ , je fakt, že frekvencia vyrábaného napätia ASG sa mení so zmenou záťaže. Vysvetlíme to na konkrétnom príklade.

### 5.11.2.3 Zmena frekvencie ASG v závislosti od záťaže

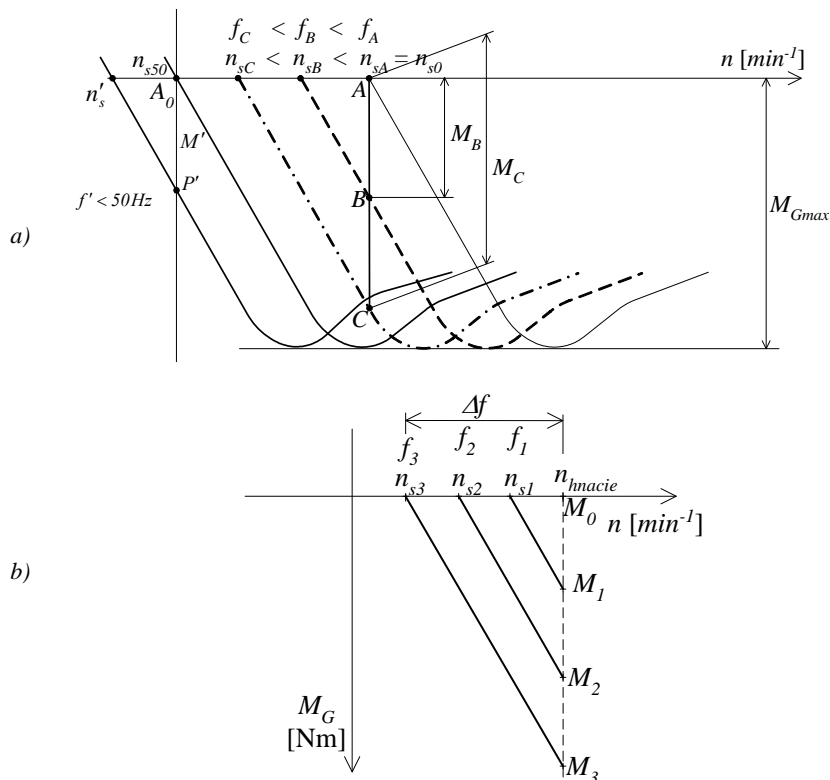
V stave naprázdno je frekvencia indukovaného napätia

$$f = \frac{pn_{s0}}{60} \text{ [Hz]} \quad (5.57)$$

kde  $n_{s0}$  sú otáčky pohonného stroja, ktoré sú zároveň synchronnými otáčkami pre stav naprázdno ASG. Ak sa ASG teraz zaťaží, vyvinie určitý generátorický moment. Zodpovedajúci pracovný bod je už na inej charakteristike, ktorej patria iné a to menšie synchronné otáčky a teda aj iná frekvencia indukovaného napätia. Podrobnejšie to opíšeme podľa obr. 5.29. Bodom  $A_0$  prechádza charakteristika nameraná v motorickom i generátorickom režime, ak je asynchrónny stroj pripojený na sieť s frekvenciou 50 Hz. Preto v bode  $A_0$  sú synchronné otáčky  $n_{s50}$ .

Teraz ASG pracuje samostatne a otáčky pohonného stroja stúpili nad  $n_{s50}$ , napr. do bodu  $A$  na hodnotu  $n_{sA}$ , ktoré sú totožné s  $n_{s0}$ , lebo ASG je zatiaľ v stave naprázdno. Frekvencia indukovaného napätia je

$$f = \frac{pn_{sA}}{60} = \frac{pn_{s0}}{60} \quad (5.58)$$



Obr. 5.29 Charakteristiky  $M = f(n)$  asynchrónneho stroja v generátorickom chode

Ak teraz ASG zaťažíme určitou elektrickou záťažou, ASG vyvinie generátorický moment  $M_B$  síce pri tých istých otáčkach rotora (predpokladáme, že pohonný stroj dokáže udržať otáčky na konštantnej hodnote), ale pracovný bod  $B$  je už na inej charakteristike, ktorej patria iné synchronné otáčky  $n_{sB} < n_{sA}$ . Z toho vyplýva, že pri tejto záťaži bude ASG dodávať napätie s frekvenciou  $f_B$  menšou ako  $f_A$ :

$$f_B = \frac{pn_{sB}}{60} < f_A \quad (5.59)$$

Ak zaťažovací moment pri tých istých otáčkach rotora stúpne na hodnotu  $M_C$ , pracovný bod  $C$  patrí charakteristike so synchronnými otáčkami  $n_{sC}$  a frekvenciou  $f_C < f_B$ . Tak sme ukázali, že frekvencia ASG sa mení so záťažou. Ak je charakteristika dostatočne strmá, zmena frekvencie nie je veľká a predstavuje menej ako  $5\%f_N$ . Tento princíp merania a zaťažovania ASG platí aj pre oblasť pod  $n_{s50}$  (zaťažovanie momentom  $M'$ , pracovný bod  $P'$ ; príslušné synchronné otáčky  $n'_s$  a frekvencia indukovaného napätia  $f'$ ).

Zostáva vysvetliť, ako pre jednotlivé záťaže zistíme príslušné synchronné otáčky:

Ak ASG pracuje samostatne, jalovú energiu v podobe magnetizačného kapacitného prúdu mu dodáva sada kondenzátorov, ktoré pri určitej hodnote kapacít použitých kondenzátorov predstavujú konštantné budenie, čiže konštantný magnetický tok. Z teórie frekvenčnej regulácie rýchlosti ASM vieme, že ak zanedbáme činný odpor statorového vinutia, ostáva pri dodržaní  $\phi = \text{konšt.}$  aj konštantný  $M_{max}$  a konštantný sklon jednotlivých charakteristík. Túto skutočnosť využijeme pri určovaní synchronných otáčok jednotlivých pracovných bodov a výpočte frekvencie indukovaného napätia. Sklon charakteristiky známy z merania v motorickom ale aj generátorickom režime pri pripojení na sieť s frekvenciou 50 Hz teraz považujeme za základ a s použitím úmery pre jednotlivé pracovné body urobíme príslušné výpočty. Frekvenciu indukovaného napätia skontrolujeme meraním frekventomerom.

#### 5.11.2.4 Pokyny pre meranie

1. Pripravíme meranie ASG podľa schémy zapojenia na obr. 5.22. Pohonným strojom ASG bude dynamometer, s ktorým sme predtým zaťažovali asynchronný stroj v motorickom režime. Otáčky dynamometra nastavíme na synchronné otáčky zodpovedajúce 50 Hz,  $n_{s50}$ , aby sme mohli využiť charakteristiku naprázdno nameranú v motorickom režime  $I_0 = f(U_0)$ .
2. Z merania naprázdno v motorickom režime pripravíme charakteristiku naprázdno  $U_0 = U_i = f(I_0)$ .
3. S kondenzátormi s vhodnou kapacitou a pohonom s otáčkami  $n_{s50}$  necháme vybudieť ASG na zodpovedajúce napätie. Hodnotu tohto napätia skontrolujeme podľa obr. 5.25 ako priesečník hodnoty kapacitnej reaktancie použitých kondenzátorov a charakteristiky naprázdno.



4. Na svorky ASG pripojíme záťaž, ktorú postupne meníme a meriame vonkajšiu charakteristiku, ktorú vynesieme do grafu  $U = f(I)$  podľa obr. 5.26. Pri každej záťaži odčítame okrem príslušných hodnôt napätia, prúdu, výkonu, frekvencie, aj hodnotu hnacieho generátorického momentu (z dynamometra).
5. Hodnoty momentov pri jednotlivých zaťaženiach použijeme na výpočet príslušných synchronných otáčok, podľa obr. 5.29a, a podrobnejšie obr. 5.29b, a frekvencie indukovaného napätia, ktorú porovnáme s hodnotou meranou frekventometrom. Vyhodnotíme zmenu frekvencie ASG v závislosti od záťaže a uvedieme veľkosť tejto zmeny v percentách  $f_N$ . Všetky hodnoty usporiadame vhodne do tabuľky, z ktorej by bolo vidno zhodu vypočítaných a meraných hodnôt frekvencie.
6. Meranie vonkajšej charakteristiky zopakujeme s tým, že kondenzátory zapojíme aj sériovo podľa obr. 5.28. Namerané hodnoty vynesieme do grafu podľa obr. 5.27.
7. Vyhodnotenie urobíme aj podľa pokynov v bode 5 (výpočet frekvencie indukovaného napätia).

## 5.12 Synchronizovaný asynchrónny motor

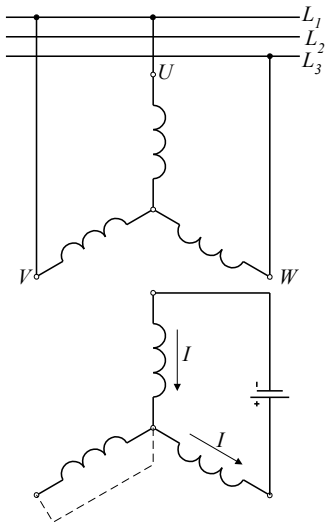
Každý asynchrónny stroj s vinutým rotorom vyvedeným na krúžky sa dá synchronizovať jednosmerným budením rotora. Stroj sa spustí ako normálny asynchrónny motor, po rozbehu sa rotorové vinutie rozpojí a pripojí na zdroj jednosmerného prúdu. Pri dostatočne veľkom budiacom prúde vpadne stroj do synchronizmu. Synchronizovaný asynchrónny stroj má vlastnosti synchronného stroja. Ak je vhodne nabudený, neberie zo striedavej siete magnetizačný výkon, ale pracuje s účinníkom blízky jednotke ( $\cos\varphi = 1$ ). Ak je prebudený, dodáva do siete jalový výkon a zlepšuje účinník.

Jednosmerné budenie rotora je možné v dvoch zapojeniach a síce v zapojení „sériovom“ cez dva krúžky (obr. 5.30) a „paralelnom“ cez všetky tri krúžky (obr. 5.31).

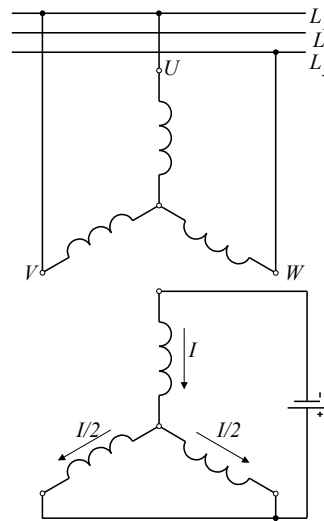
Stroj sa skúša jednak ako asynchrónny motor (odpory vinutí, naprázdno, nakrátko, zaťažovanie, otepľovanie), jednak ako synchronný generátor – meranie reaktancií, meranie naprázdno, nakrátko (pozri kap. 6). Môžeme tiež merať krivky tvaru V (pozri kap. 6.7) a zostrojiť kruhový diagram. Preťažiteľnosť momentová je značne menšia ako v asynchrónnom motore. Účinnosť sa počíta obvykle z jednotlivých meraných strát. (Pozri tiež kapitolu o reluktančnom synchronnom motore kap. 8).

## 5.13 Meranie na jednofázovom asynchrónnom motore

Normálny trojfázový asynchrónny motor beží ďalej ako jednofázový, ak sa preruší za chodu jeden prívod zo siete. Výkon vzhľadom na dovolené oteplenie klesne asi o 30 - 40 % a účinník bude tiež horší. Moment zvratu klesne asi na polovicu, preto musíme výkon stroja znížiť podľa okolností o 40 – 50 %.



Obr. 5.30 „Sériové budenie“  
synchronizovaného asynchrónneho motora

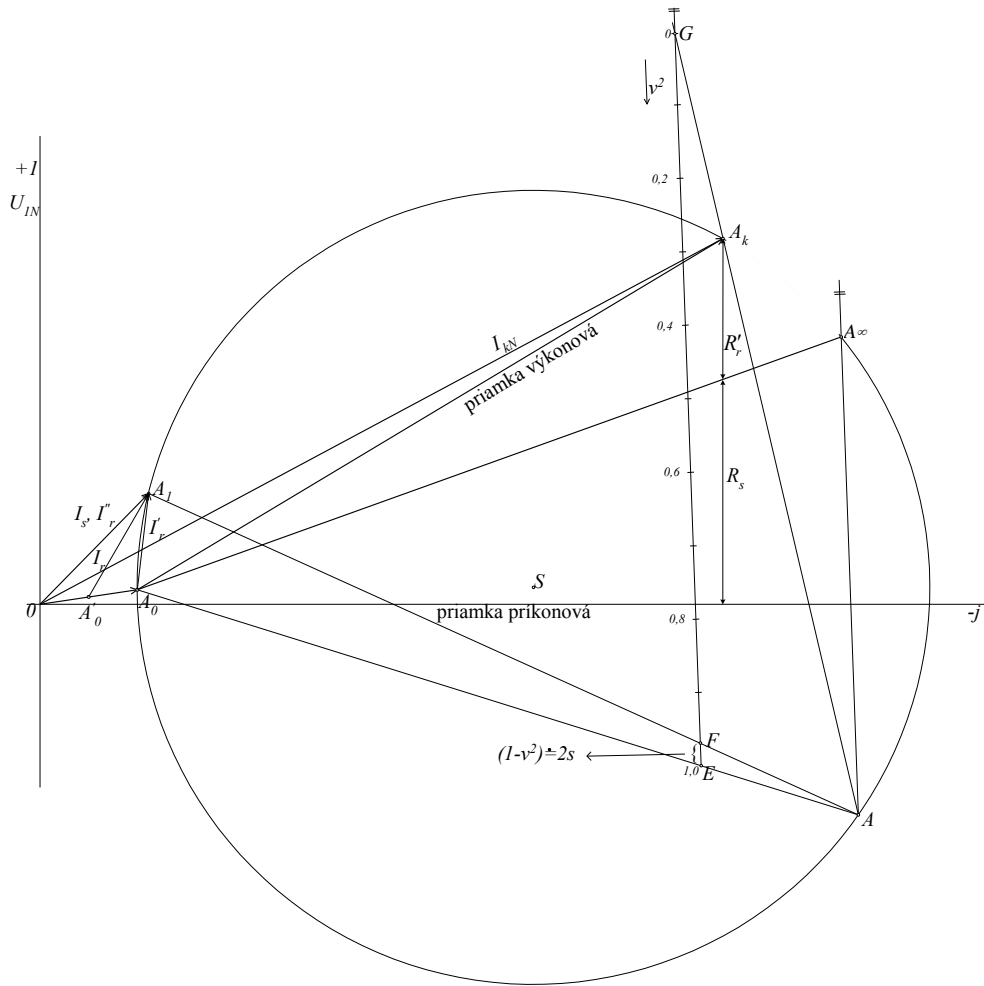


Obr. 5.31 „Paralelné budenie“  
synchronizovaného asynchrónneho motora

### 5.13.1 Jednofázový motor bez pomocného vinutia

Jednofázový motor bez pomocnej fázy, pripojený na sieť, nevyvinie v stave pokoja moment. Pulzujúce magnetické pole môžeme rozložiť na dve točivé polia, rotujúce rovnakou rýchlosťou proti sebe. Obe pôsobia rovnako veľkým, ale opačným momentom na rotor. Akonáhle sa rotor nejakým vonkajším impulzom roztočí v ľubovoľnom smere, súbežné točivé pole vzrastá, protibežné sa znižuje a objaví sa prebytok momentu v smere točenia, ktorý kotvu ďalej urýchľuje. Točivý moment dosiahne maximálnu hodnotu a tesne pred synchronnými otáčkami platnými pre trojfázové napájanie klesne na nulu. Jednofázový motor má v stave pokoja čisto striedavé pulzujúce pole, pri rozbehu eliptické točivé pole a pri behu naprázdno a prevádzkovej otáčavej rýchlosti približne kruhové točivé pole.

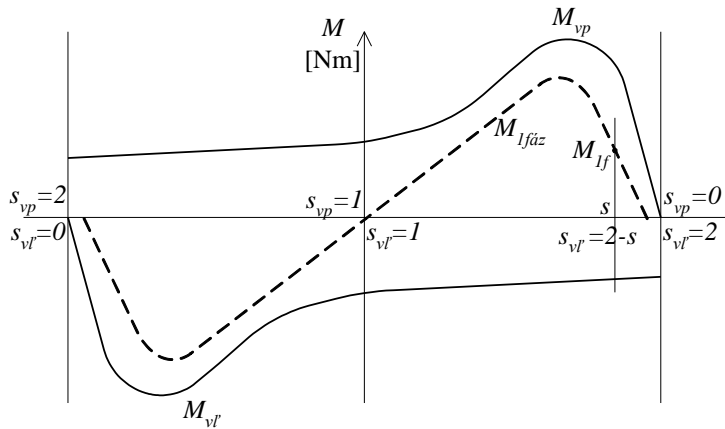
Na jednofázovom stroji bez pomocného vinutia robíme tie isté merania ako na trojfázovom stroji: meranie odporov, meranie naprázdno a nakrátko. Z týchto meraní dostaneme fázory prúdov naprázdno a nakrátko s príslušnými účinníkmi  $\cos \varphi_0$  a  $\cos \varphi_k$  pre kruhový diagram jednofázového stroja. Zásadný rozdiel medzi kruhovým diagramom jednofázového stroja a rovnocenného trojfázového je, že oblúk medzi bodmi  $A_k$  a  $A_\infty$  chýba, pretože jednofázový motor nemôže bežať proti magnetickému poľu, keďže pole sa otáča vždy v smere mechanického otáčania rotora. Preto neexistuje ani priamka momentov. Moment môžeme presne vypočítať až po určení účinnosti. Priamka výkonov je daná približne  $\overline{A_0 A_k}$  (obr. 5.32).



Obr. 5.32 Kruhový diagram jednofázového asynchrónneho motora

Namiesto sklzovej priamky, ako ju poznáme z teórie trojfázového asynchrónneho stroja, vystupuje tu priamka kvadrátu rýchlosti  $v^2$ , pričom  $v$ , tzv. rýchlostný parameter, t. j. otáčky motora vzťahnuté na synchronné otáčky (pomerná rýchlosť), je definovaný ako pomer  $v = n / n_s$ , pričom  $n$  je rýchlosť motora,  $n_s$  je jeho synchronná rýchlosť. Priamku druhých mocnín rýchlosti  $v^2$  kreslíme takto: na kružnici volíme ľubovoľne bod  $A$ , spojíme ho s  $A_0$  a  $A_k$  a vymedzíme na rovnobežke s  $\overline{AA_\infty}$  úsek napr. 100 mm, rovný druhej mocnine rýchlosti rotora  $v^2$  a rozdelíme stupnicou od nuly v bode  $G$  po 1,0 v bode  $E$ . Stupnicu  $v^2$  je výhodné použiť preto, že to tak vychádza z teórie jednofázového magnetického poľa. Ako bolo povedané vyššie, toto pole je pulzujúce a môžeme ho rozložiť na dve proti sebe sa točiace polia. Ako vidno z obr. 5.33, má sklz jednofázového asynchrónneho motora  $s_{1f}$  voči súbežnému, vpravo sa točiacemu poľu hodnotu  $s$ , ale voči protibežnému, vľavo sa

točiacemu poľu hodnotu  $(2-s)$ .



Obr. 5.33 Moment a sklz jednofázového asynchrónneho motora

Ak rozpišeme definíciu sklzu:

$$s = \frac{n_{syn} - n}{n_{syn}} = 1 - \frac{n}{n_{syn}} = 1 - v$$

potom pre sklz protibežne sa točiaceho poľa vychádza vzťah

$$(2-s) = 2 - (1-v) = 1+v$$

a pre sklz jednofázového motora

$$s_{1f} = s(2-s) = (1-v)(1+v) = 1-v^2 = 2s-s^2 \quad (5.60)$$

kde hodnoty  $s$  sú hodnotami sklzu súbežne vpravo sa točiaceho poľa, t. j. ako v trojfázovej prevádzke.

Preto v oblasti blízko synchronizmu, až po menovité zaťaženie, kde je sklz veľmi malý, môžeme člen  $s^2$  zanedbať a uvažovať, že:

$$s_{1f} \cong 2s \quad (5.61)$$

t. j. že sklz v jednofázovej prevádzke odčítame na stupnici sklzu ako v trojfázovej prevádzke, ale hodnotu podelíme dvoma. Toto vysvetlíme bližšie na konkrétnom príklade podľa obr. 5.32.

Pre pracovný bod  $A_1$  spojnice  $\overline{A_1A}$  vytína na stupnici  $v^2$  bod F. Úsek  $\overline{GF}$  má hodnotu  $v^2$  a zvyšný úsek  $\overline{FE}$  má hodnotu  $(1-v^2)$ , čo podľa vzťahu (5.60) je hodnota sklzu jednofázovej prevádzky  $s_{1f}$ , a ako sme odvodili ďalej, je to hodnota približne rovná  $2s$  (vzťah 5.61). Preto ak podľa obr. 5.32 bod F vytína hodnotu  $v^2 = 0,965$ ; potom  $1-v^2 = 1-0,965 = 0,035$  a hodnota sklzu v jednofázovej prevádzke je

$$s_{1f} = \frac{0,035}{2} = 0,0175$$

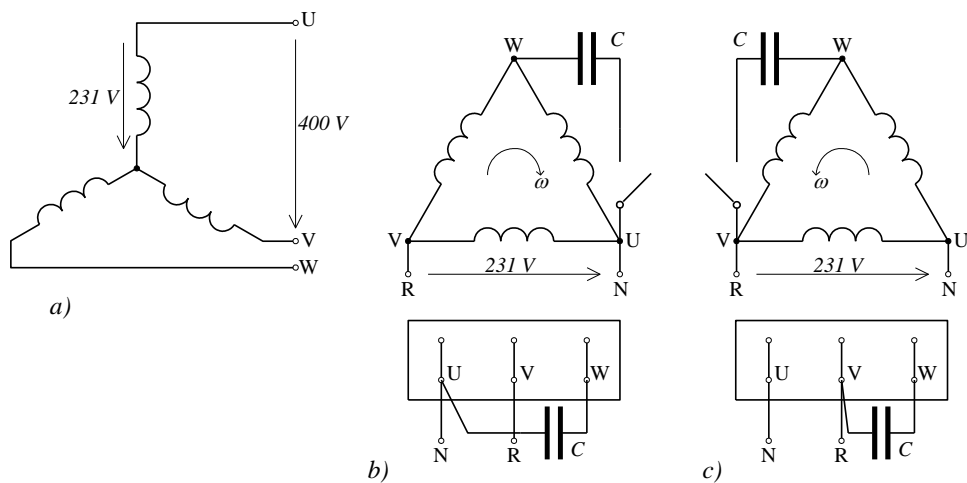
Straty vo vinutí rotora sú úmerné sklzom oboch polí, preto hodnotou  $(1-v^2)$  násobíme výkon vo vzduchovej medzere

$$\Delta P_{jr} = (1-v^2)P_{\delta} = (1-v^2)(P_P - \Delta P_{js} - \Delta P_{mech} - \Delta P_{Fe}) \quad (5.62)$$

Pri malých sklzoch je  $\Delta P_{jr} \sim 2sP_{\delta}$ . Tak môžeme určiť výkon na hriadieli motora a účinnosť.

### 5.13.2 Trojfázový asynchrónny motor napájaný z jednofázovej siete

V prípade potreby možno každý trojfázový asynchrónny motor pripojiť na jednofázovú sieť viacerými spôsobmi. Osvedčený spôsob, použiteľný pre motory s napätím 400/231 V Y/D je znázornený na obr. 5.34.



Obr. 5.34 Trojfázový asynchrónny motor napájaný z jednofázovej siete a) Trojfázový motor zapojený do hviezdy, b) Zapojenie kondenzátora pre jeden smer točenia (schéma a svorkovnica) c) Zapojenie kondenzátora pre opačný smer točenia (schéma a svorkovnica)

Dôvod na použitie kondenzátora je ten istý ako v jednofázových motoroch s kapacitným rozbehom. Hodnotu kondenzátora odporúčajú rôzni autori odlišne, napr.

$$C = 10 \mu\text{F na } 100 \text{ W menovitého výkonu motora } P_N$$

$$C = 50 \div 70 \mu\text{F na } 1 \text{ kW } P_N$$

$$C = 68P_N [\mu\text{F}; \text{kW}]$$

Predpokladá sa, že výkon trojfázového motora sa zníži o jeden výkonový rad, napr.

2200 W → 1500 W

1500 W → 1100 W

1100 W → 750 W.

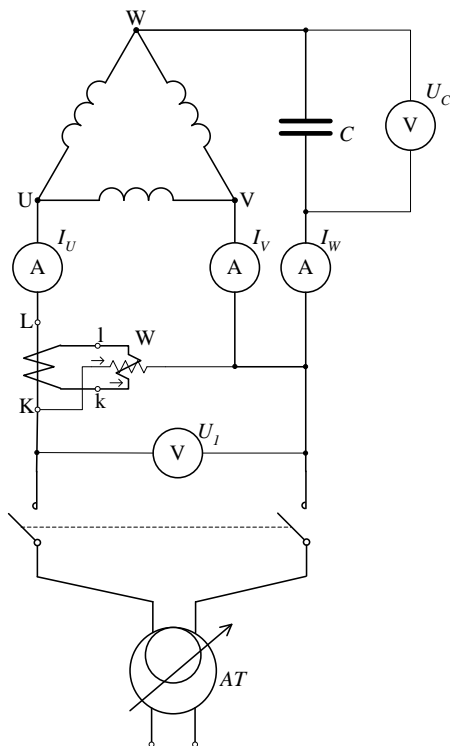
Odporúča sa použiť zapojenie motora do trojuholníka.

### 5.13.2.1 Meranie trojfázového motora napájaného z jednofázovej siete

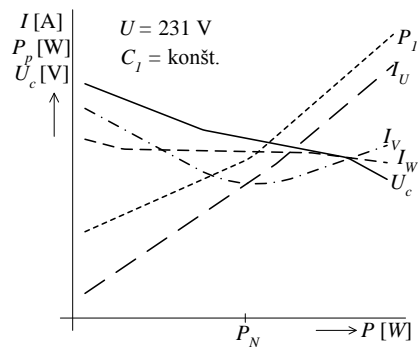
Schéma zapojenia je na obr. 5.35. Motor je na dynamometri, ktorým ho zaťažujeme. Schéma je nekreslená tak, aby sa zdôraznili osobitosti tohto zapojenia a merania.

Úlohou je zmerať:

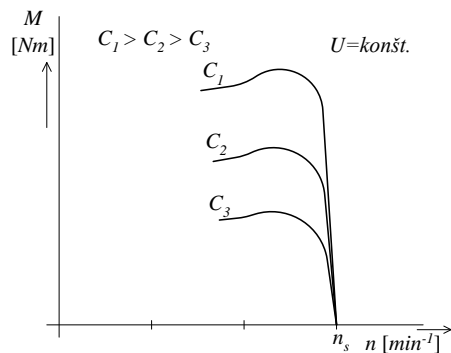
1. Závislosť fázových prúdov, príkonu a napätia na kondenzátore  $U_c$  od výkonu pri konštantnom napájacom napätí a konštantnej kapacite kondenzátorov. Očakávané priebehy sú na obr. 5.36.
2. Priebehy  $M = f(n)$  pri rôznych hodnotách kapacity kondenzátorov a konštantnom napätí. Očakávané priebehy sú na obr. 5.37.



Obr. 5.35 Schéma zapojenia pri meraní trojfázového motora napájaného z jednofázovej siete (prúdové cievky wattmetra zapojené cez merací transformátor prúdu)



Obr. 5.36 Zaťažovacie charakteristiky pri jednofázovom napájaní



Obr. 5.37 Mechanické charakteristiky  $M = f(n)$  pri rôznych hodnotách kondenzátorov

## 5.14 Indukčné regulátory

### 5.14.1 Princíp činnosti

Tieto stroje sa nazývajú aj natáčavé transformátory, alebo boostre (z angličtiny boost [búst] – zvyšovať). Tieto názvy vyplývajú zo skutočnosti, že indukčný stroj s vinutým rotorom možno použiť ako zdroj premenlivého striedavého napätia. Keď je rotor zabrzdený,  $n = 0$ ,  $s = 1$ , potom frekvencia rotorového indukovaného napätia je totožná s frekvenciou statora, teda frekvenciou siete.

Veľkosť indukovaného napätia je pre každú polohu rotora síce konštantná, ale keď zapojíme toto vinutie do série s napájacím napätím, výsledné napätie je fázorovým súčtom týchto dvoch napätí. Pretože s natáčaním rotora sa mení fáza indukovaného napätia, výsledné napätie  $U_{20}$  sa bude meniť v závislosti od polohy rotora od  $U_{20min}$  po  $U_{20max}$ , ako to ukazuje fázorový diagram na obr. 5.38b. Z neho je zrejmé, že koncový bod fázora výsledného napätia

$$U_{20} = U_1 + U'_{20} \quad (5.63)$$

(buď v združených, alebo fázových hodnotách), sa pohybuje pri natáčaní rotora po kružnici a napätie na regulovanej strane sa súvisle mení od ich rozdielu po ich súčet (v absolútnych hodnotách):

$$U_{20min} = U_1 - U'_{20} \quad (5.64)$$

$$U_{20max} = U_1 + U'_{20} \quad (5.65)$$

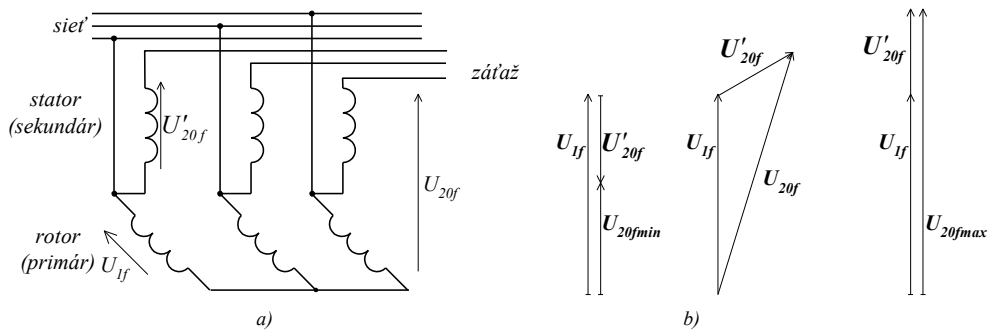
### 5.14.2 Meranie na indukčnom regulátore (IR)

Meranie urobíme na základe schémy vysvetľujúcej princíp činnosti (obr. 5.38a). Primárna strana, ktorou je obvykle rotor, sa pripojí na sieť s konštantným napätím  $U_1$ , sekundárna strana sa spojí s touto sieťou do série. Schéma prekreslená na účely merania je na (obr. 5.39).

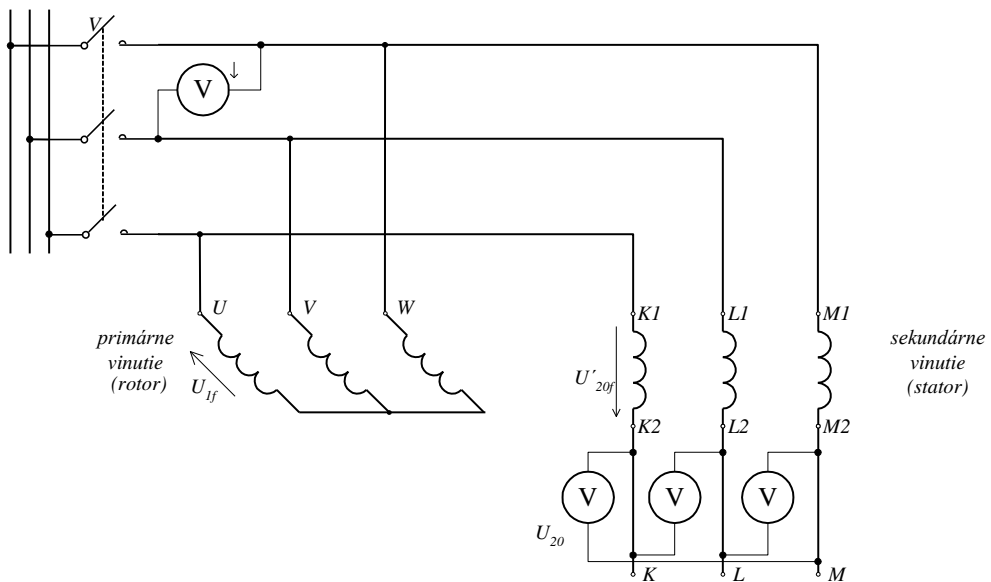
Priebeh merania:

1. Jedným voltmetrom meriame napätie  $U_1 = \text{konšt.}$ , ak IR napájame z trojfázovej súmernej sústavy. Ak nie, tak je potrebné merať všetky tri kombinácie združených napätí a vypočítať strednú hodnotu  $U_{1str.}$ . Kvôli bezpečnosti pri práci pracujeme so znížením napätím  $U_1 \cong 0,1 U_N$ .
2. Na toto meranie treba pripraviť pomôcku, ktorou by sa nastavovala poloha rotora po určitých stupňoch (napr. kotúč tvaru medzikružia, s označením lúčov po  $15^\circ$ , nasadený na hriadeľ).

3. Rotor nastavíme do ľubovoľnej počiatkovej polohy  $\theta_r = 0^\circ$  a meriame všetky tri kombinácie združených napätí na výstupe sekundárneho (statorového) vinutia (svorky K, L, M). Vypočítame ich strednú hodnotu.
4. Rotor postupne natáčame o určitý uhol, napr. po  $15^\circ$  a meriame výstupné napätia, z ktorých vždy počítame strednú hodnotu  $U_{20}$ . Všetky merané hodnoty zapisujeme do tabuľky.
5. Do grafu vynesieme závislosť  $U_{20} = f(\theta)$  a vyznačíme  $U_{20min}$  a  $U_{20max}$ .



Obr. 5.38 a) Schéma trojfázového jednoduchého indukčného regulátora  
b) Fázorové diagramy indukovaných napätí



Obr. 5.39 Merania regulovaného napätia indukčného regulátora



