

Ćwiczenie 10

Stany awaryjne i niesymetryczne w układach napędowych z silnikami indukcyjnymi

10.1. Program ćwiczenia

1. Poznanie stanów awaryjnych i niesymetrycznych występujących w układach napędowych z silnikami indukcyjnymi.
2. Badanie właściwości i wyznaczenie charakterystyk silnika indukcyjnego dla stanów pracy z przerwą w jednej z faz zasilających uzwojenie stojana.
3. Badanie właściwości i wyznaczenie charakterystyk silnika indukcyjnego dla stanów hamowania jednofazowego.
4. Badanie właściwości i wyznaczenie charakterystyk silnika indukcyjnego dla stanów pracy z odwróconą fazą uzwojenia stojana.
5. Badanie właściwości i wyznaczenie charakterystyk silnika indukcyjnego dla stanów pracy z niesymetrią w obwodzie wirnika.

10.2. Wiadomości teoretyczne

10.2.1. Wprowadzenie

Stosowane w układach napędowych silniki indukcyjne, projektowane i wykonywane jako silniki o symetrycznych uzwojeniach, są przeznaczone do zasilania napięciem przemiennym z symetrycznej sieci trójfazowej. Podczas eksploatacji tych silników mogą wystąpić stany pracy niesymetrycznej, które można podzielić na dwie podstawowe grupy:

a) niepożądane – spowodowane brakiem symetrii napięć zasilających, następstwami stanów awarii, oraz niewłaściwej eksploatacji silnika,

b) wymuszone w sposób zamierzony – do sterowania prędkością kątową lub w celu uzyskania pożądanego stanu pracy silnika (np. hamowania elektrycznego).

Do niepożądanych przypadków niesymetrii należą stany awaryjne silnika spowodowane wystąpieniem przerwy w linii zasilającej (przepalenie bezpiecznika, przerwanie przewodu zasilającego itp.) oraz zwarć między przewodami linii lub uzwojeniami fazowymi stojana. Do tej grupy niesymetrii zaliczany jest również układ pracy symetrycznego silnika z odwróconą fazą uzwojenia stojana (przełączaną fazą stojana). Taką niesymetria może wystąpić przy nieprawidłowym podłączeniu zacisków uzwojenia do skrzynki zaciskowej silnika (np. podczas remontu lub przezważania silnika) lub jest stosowana celowo w celu uzyskania stanu hamowania elektrycznego.

W silnikach indukcyjnych pierścieniowych dodatkowo mogą wystąpić stany pracy niesymetrycznej silnika spowodowane niesymetrią obwodów wirnika (np. brakiem połączenia szczotki z pierścieniem ślizgowym lub przerwą w uzwojeniu fazowym wirnika). W silnikach tych do uzyskania dużej liczby stopni rozruchowych stosowany jest niekiedy rozruch z niesymetrycznie przełączanymi rezystancjami rozruchowymi w obwodzie wirnika.

10.2.2. Metoda składowych symetrycznych

Do analizy stanów ustalonych silnika indukcyjnego przy niesymetrii napięć zasilających lub niesymetrii parametrów jest stosowana metoda składowych symetrycznych [1], [2], [3]. W metodzie tej trójfazowy układ niesymetrycznych napięć i prądów silnika jest zastępowany przez trzy trójfazowe układy symetryczne tych wielkości: układ kolejności zgodnej (układ współbieżny), układ kolejności przeciwnej (układ przeciwbieżny) i układ kolejności zerowej (układ współfazowy).

Wartości skuteczne niesymetrycznych napięć fazowych oraz napięć składowych symetrycznych są powiązane:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{s1} \\ \underline{U}_{s2} \\ \underline{U}_{s0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_{sU} \\ \underline{U}_{sV} \\ \underline{U}_{sW} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \underline{U}_{sU} \\ \underline{U}_{sV} \\ \underline{U}_{sW} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_{s1} \\ \underline{U}_{s2} \\ \underline{U}_{s0} \end{bmatrix}, \quad (10.1)$$

gdzie:

$$\underline{a} = \exp(j\pi/3), \quad \underline{a}^2 = \exp(-j2\pi/3), \quad (10.2)$$

\underline{U}_{s1} , \underline{U}_{s2} , \underline{U}_{s0} – zespolone wartości skuteczne składowych symetrycznych napięć fazowych stojana: kolejności zgodnej, przeciwnej i zerowej,

\underline{U}_{sU} , \underline{U}_{sV} , \underline{U}_{sW} – zespolone wartości skuteczne napięć fazowych stojana w fazach U , V , W .

Przekształcenia macierzowe (10.1) obowiązują również w przypadku wyznaczania składowych symetrycznych innych wielkości, np. prądów stojana, wirnika.

Składowe symetryczne napięć i prądów stojana silnika są powiązane:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{s1} \\ \underline{U}_{s2} \\ \underline{U}_{s0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{s1} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_{s2} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_{s0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_{s1} \\ \underline{I}_{s2} \\ \underline{I}_{s0} \end{bmatrix}, \quad (10.3)$$

gdzie:

$\underline{I}_{s1}, \underline{I}_{s2}, \underline{I}_{s0}$ – zespolone wartości skuteczne składowych symetrycznych prądów fazowych stojana: kolejności zgodnej, przeciwnej i zerowej,

$\underline{Z}_{s1}, \underline{Z}_{s2}, \underline{Z}_{s0}$ – zespolone wartości impedancji silnika indukcyjnego dla składowych: kolejności zgodnej, przeciwnej i zerowej.

10.2.3. Analiza silnika indukcyjnego przy symetrii i niesymetrii napięć zasilających uzwojenie stojana

Niesymetryczny układ trójfazowych napięć zasilających uzwojenie stojana zastępuje się przez sumę układów składowych symetrycznych: o kolejności zgodnej, przeciwnej i zerowej. Każda ze składowych symetrycznych napięć stojana wymusza przepływ odpowiednich składowych prądów fazowych stojana.

Przepływ prądów fazowych stojana o kolejności zgodnej wytwarza w szczelinie silnika wirujące pole magnetyczne, nazywane polem współbieżnym. Pole to wiruje względem stojana z prędkością kątową równą prędkości synchronicznej ω_s

$$\omega_s = \omega_0 / p_b = 2\pi f_s / p_b, \quad (10.4)$$

gdzie:

ω_0, f_s – pulsacja i częstotliwość napięcia sieci zasilającej,

p_b – liczba par biegunów silnika.

Przy ruchu wirnika z prędkością kątową ω w kierunku zgodnym z kierunkiem ruchu pola wirującego poślizg s silnika

$$s = (\omega_s - \omega) / \omega_s = 1 - \omega / \omega_s. \quad (10.5)$$

Przepływ prądów fazowych stojana o kolejności przeciwnej wytwarza w szczelinie silnika pole wirujące względem stojana z prędkością synchroniczną ($-\omega_s$), czyli w kierunku przeciwnym do pola współbieżnego. Pole to jest nazywane polem przeciwbieżnym, a poślizg silnika s_2 względem pola przeciwbieżnego

$$s_2 = (-\omega_s - \omega) / (-\omega_s) = 1 + \omega / \omega_s = 2 - s. \quad (10.6)$$

Oddziaływanie pola współbieżnego i prądów fazowych wirnika indukowanych przez to pole powoduje powstanie składowej M_{e1} momentu elektromagnetycznego

silnika, a oddziaływanie pola przeciwbieźnego z prądami fazowymi wirnika indukowanymi przez to pole powoduje powstanie składowej momentu M_{e2} . Wypadkowy moment elektromagnetyczny silnika M_e jest sumą algebraiczną składowych M_{e1} i M_{e2} . Po pominięciu wpływu rezystancji uzwojenia stojana moment wypadkowy M_e może być wyznaczony z następującego, uproszczonego wzoru Klossa

$$M_e = M_{e1} + M_{e2} = \frac{2M_{k1}}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} - \frac{2M_{k2}}{\frac{2-s}{s_k} + \frac{s_k}{2-s}}, \quad (10.7)$$

w którym:

s_k – poślizg krytyczny silnika,

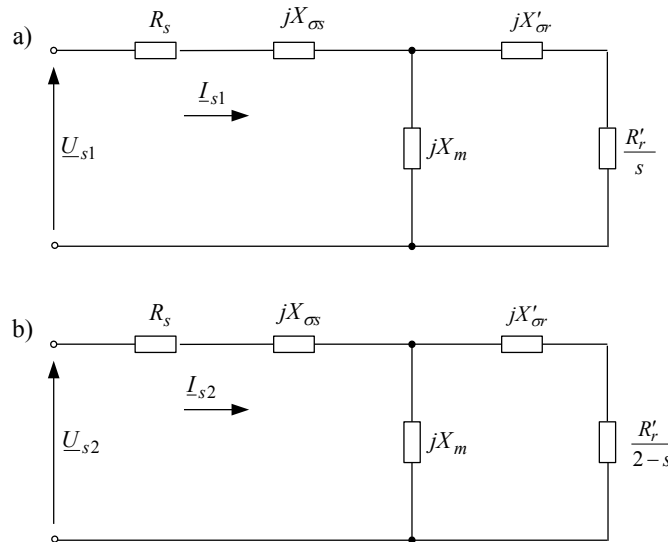
M_{k1}, M_{k2} – momenty krytyczne dla poszczególnych składowych momentu elektromagnetycznego silnika.

Z analizy równania (10.7) wynika, że dla poślizgów $0 \leq s \leq 1$, odpowiadających stanom pracy silnikowej, wartości $M_{e1} \geq 0$ i $M_{e2} \leq 0$, czyli M_{e1} jest momentem o działaniu silnikowym, a M_{e2} o działaniu hamującym.

Składowe kolejności zgodnej i przeciwnej prądów fazowych stojana są określone przez następujące wyrażenia:

$$\underline{I}_{s1} = \underline{U}_{s1} / \underline{Z}_{s1}, \quad \underline{I}_{s2} = \underline{U}_{s2} / \underline{Z}_{s2}. \quad (10.8)$$

Impedancje zastępcze silnika indukcyjnego $\underline{Z}_{s1}, \underline{Z}_{s2}$ dla prądów kolejności zgodnej i przeciwnej mogą być wyznaczone na podstawie przedstawionych na rysunku 10.1 schematów zastępczych silnika dla składowych symetrycznych.



Rys. 10.1. Schematy zastępcze silnika indukcyjnego dla zasilania napięciami:
a) o kolejności zgodnej, b) o kolejności przeciwnej

Dla silnika indukcyjnego zasilanego symetrycznie z sieci trójfazowej zespolone napięcia fazowe i składowe symetryczne napięć fazowych stojana wynoszą:

$$\underline{U}_{sU} = U_{fN}, \quad \underline{U}_{sV} = \underline{a}^2 U_{fN}, \quad \underline{U}_{sW} = \underline{a} U_{fN}, \quad (10.9)$$

$$\underline{U}_{s1} = U_{fN}, \quad \underline{U}_{s2} = 0, \quad \underline{U}_{s0} = 0. \quad (10.10)$$

Silnik indukcyjny zasilany symetrycznie można więc rozpatrywać jako silnik zasilany tylko układem napięć składowych symetrycznych o kolejności zgodnej. W uzwojeniu stojana jest wtedy wymuszany przepływ prądów fazowych stojana o kolejności zgodnej, wytwarzających pole współbieżne, a pole przeciwbieżne nie występuje. Wypadkowo moment silnika M_e jest więc równy tylko składowej momentu M_{e1}

$$M_e = M_{e1} = \frac{2M_{k1}}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}, \quad (10.11)$$

gdzie:

$$M_{k1} = M_k = \frac{3}{2} \frac{U_{fN}^2}{\omega_s X_k}, \quad s_k = \frac{R'_r}{X_k}, \quad X_k = X_{\sigma s} + X'_{\sigma r}, \quad (10.12)$$

M_k – moment krytyczny silnika zasilanego symetrycznie napięciami fazowymi o wartości znamionowej U_{fN} ,

$R'_r, X_{\sigma s}, X'_{\sigma r}$ – odpowiednio rezystancja fazowa wirnika oraz reaktancja rozproszenia stojana i wirnika.

Indeksem ' oznaczono parametry wirnika przeliczone na stronę stojana silnika.

Wartości momentu krytycznego M_k i poślizgu krytycznego s_k silnika mogą być obliczone na podstawie danych znamionowych i katalogowych silnika indukcyjnego z zależności:

$$M_k = p_M M_N, \quad s_k = s_N \left(p_M + \sqrt{p_M^2 - 1} \right), \quad (10.13)$$

$$M_N = P_N / \omega_N, \quad s_N = (\omega_s - \omega_N) / \omega_s = (n_s - n_N) / n_s, \quad (10.14)$$

w których:

p_M – przeciążalność momentem silnika,

P_N, M_N – moc znamionowa i moment znamionowy silnika,

ω_N, s_N – znamionowa prędkość kątowna i poślizg silnika,

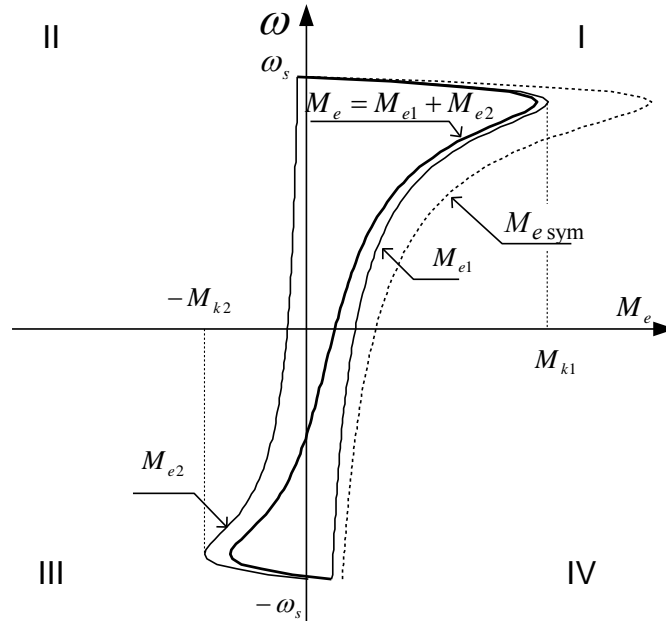
n_s, n_N – synchroniczna i znamionowa prędkość obrotowa silnika.

Przy znanej wartości momentu krytycznego silnika M_k , określonej przy zasilaniu symetrycznym, wartości momentów krytycznych M_{k1}, M_{k2} w równaniu (10.7) mogą być obliczone następująco:

$$M_{k1} = M_k \left(U_{s1} / U_{fN} \right)^2, \quad M_{k2} = M_k \left(U_{s2} / U_{fN} \right)^2, \quad (10.15)$$

gdzie: U_{s1}, U_{s2} – wartości skuteczne składowych napięcia fazowego stojana o kolejności zgodnej i przeciwnej.

Styczne charakterystyki mechaniczne silnika indukcyjnego $\omega = f(M_e)$, wyznaczone dla silnika indukcyjnego zasilanego symetrycznym i niesymetrycznym układem napięć trójfazowych, przedstawiono na rysunku 10.2.



Rys. 10.2. Charakterystyki mechaniczne $\omega = f(M_e)$ silnika indukcyjnego zasilanego napięciami symetrycznymi i niesymetrycznymi:

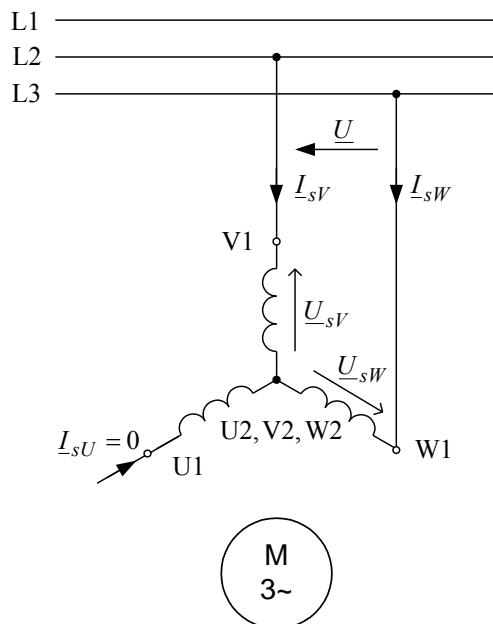
- M_{e1} – charakterystyka dla zasilania napięciami o kolejności zgodnej,
- M_{e2} – charakterystyka dla zasilania napięciami o kolejności przeciwnej,
- M_e – charakterystyka wypadkowa,
- $M_{e\text{sym}}$ – charakterystyka dla zasilania napięciami symetrycznymi

Z przebiegu tych charakterystyk wynika, że niesymetria napięć zasilających uzwojenie stojana ma działanie niekorzystne na pracę silnika. W kwadrancie I (dotyczącym pracy silnikowej) wartości wypadkowego momentu elektromagnetycznego silnika M_e są mniejsze od wartości momentu $M_{e\text{sym}}$, uzyskiwanych przy zasilaniu symetrycznym, co powoduje znaczne pogorszenie właściwości ruchowych silnika.

10.2.4. Analiza stanów niesymetrii w obwodach stojana silnika indukcyjnego

10.2.4.1. Analiza pracy silnika z przerwą w jednej z faz zasilania

Schemat układu zasilania uzwojeń fazowych stojana silnika indukcyjnego dla stanu pracy z przerwą w jednej z faz stojana przedstawiono na rysunku 10.3.



Rys. 10.3. Układ połączeń uzwojenia stojana silnika indukcyjnego dla stanu pracy z przerwą w jednej z faz zasilania uzwojenia stojana

Dla rozpatrywanego układu spełnione są następujące warunki:

$$\underline{I}_{sU} = 0, \quad \underline{I}_{sV} = -\underline{I}_{sW} = \underline{I}_{sf}, \quad \underline{U}_{sV} - \underline{U}_{sW} = \underline{U}, \quad (10.16)$$

w których:

$$U = \sqrt{3} U_f,$$

U, U_f – wartość skuteczna napięcia przewodowego i fazowego sieci zasilającej.

Składowe symetryczne prądów fazowych stojana, wyznaczone z uwzględnieniem warunków (10.16), wynoszą:

$$\underline{I}_{s1} = -\underline{I}_{s2} = j\underline{I}_{sf}/\sqrt{3}, \quad \underline{I}_{s0} = 0. \quad (10.17)$$

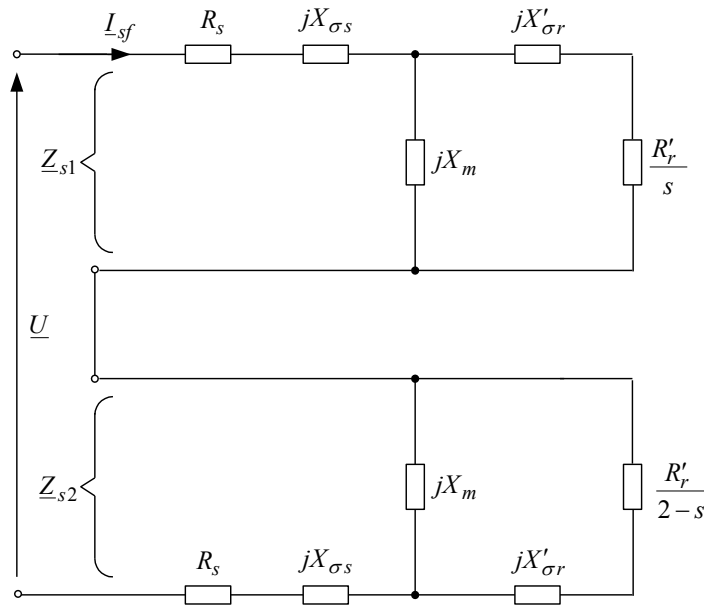
Z uwzględnienia zależności napięć fazowych od składowych symetrycznych otrzymuje się:

$$\underline{U} = \underline{U}_{sV} - \underline{U}_{sW} = -j\sqrt{3}(\underline{U}_{s1} - \underline{U}_{s2}) = (\underline{Z}_{s1} + \underline{Z}_{s2})\underline{I}_{sf}. \quad (10.18)$$

Z równania (10.18) otrzymuje się wyrażenie określające zespoloną wartość skuteczną prądu fazowego stojana I_{sf} dla tego rodzaju niesymetrii

$$I_{sf} = \frac{U}{|\underline{Z}_{s1} + \underline{Z}_{s2}|} = \frac{\sqrt{3}U_f}{|\underline{Z}_{s1} + \underline{Z}_{s2}|}. \quad (10.19)$$

Wartość prądu silnika I_{sf} podczas pracy z przerwą w jednej z faz stojana jest wprost proporcjonalna do wartości skutecznej napięcia przewodowego sieci, a odwrotnie proporcjonalna do wartości bezwzględnej sumy zespolonych impedancji fazowych silnika dla składowej zgodnej \underline{Z}_{s1} i składowej przeciwnej \underline{Z}_{s2} . Zależność (10.19) wyznacza schemat zastępczy trójfazowego silnika indukcyjnego dla pracy jednofazowej, który przedstawiono na rysunku 10.4.



Rys. 10.4. Schemat zastępczy silnika indukcyjnego dla stanu pracy z przerwą w jednej z faz zasilania uzwojenia stojana

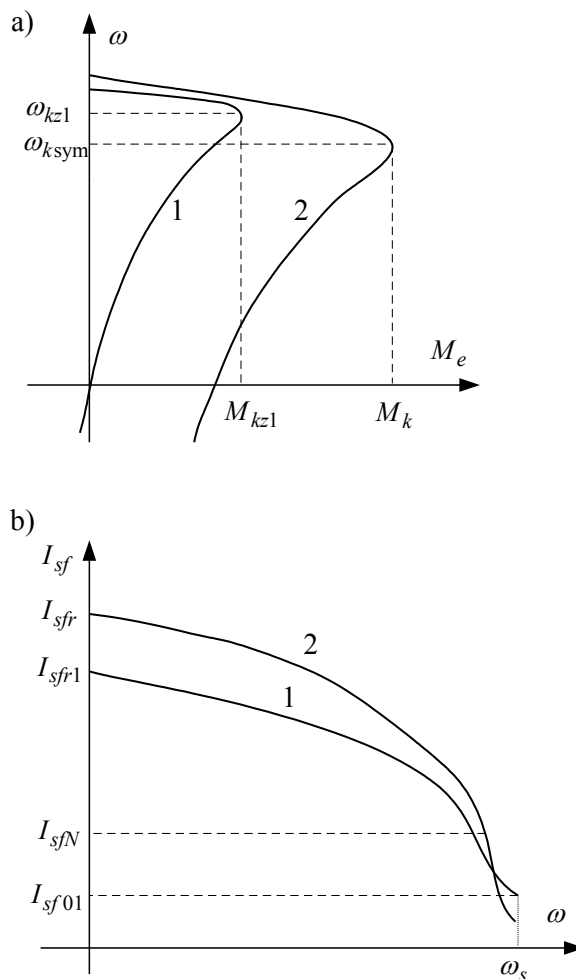
Składowe symetryczne napięć stojana silnika indukcyjnego zasilanego jednofazowo z sieci trójfazowej o napięciu fazowym U_{fN} wynoszą odpowiednio:

$$\underline{U}_{s1} = \underline{U}_{fN} \frac{|\underline{Z}_{s1}|}{|\underline{Z}_{s1} + \underline{Z}_{s2}|}, \quad \underline{U}_{s2} = \underline{U}_{fN} \frac{|\underline{Z}_{s2}|}{|\underline{Z}_{s1} + \underline{Z}_{s2}|}. \quad (10.20)$$

Na podstawie równań (10.7), (10.15) i (10.20) moment elektromagnetyczny silnika przy zasilaniu jednofazowym M_{ez1} można przedstawić następująco:

$$M_e = M_{ez1} = M_{e1} + M_{e2} = \left\{ \left(\frac{|\underline{Z}_{s1}|}{|\underline{Z}_{s1} + \underline{Z}_{s2}|} \right)^2 \frac{2}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} - \left(\frac{|\underline{Z}_{s2}|}{|\underline{Z}_{s1} + \underline{Z}_{s2}|} \right)^2 \frac{2}{\frac{2-s}{s_k} + \frac{s_k}{2-s}} \right\} M_k. \quad (10.21)$$

Porównanie charakterystyk mechanicznych silnika $\omega = f(M_e)$ przy symetrycznym zasilaniu trójfazowym i zasilaniu jednofazowym przedstawiono na rysunku 10.5a.



Rys. 10.5. Charakterystyki silnika indukcyjnego dla stanu pracy z przerwą w jednej z faz zasilania uzwojenia stojana:
 a) charakterystyki mechaniczne $\omega = f(M_e)$,
 b) charakterystyki prądu fazowego stojana $I_{sf} = f(\omega)$;
 1 – charakterystyka dla zasilania jednofazowego,
 2 – charakterystyka dla symetrycznego zasilania trójfazowego

Dla pracy jednofazowej silnika przy prędkości kątowej $\omega = 0$, czyli poślizgu $s = 1$, spełnione są warunki: $Z_{s1} = Z_{s2}$, $U_{s1} = U_{s2} = 0,5U_{fN}$. Z uwzględnienia tych warunków w równaniach określających moment wynika, że przy prędkości $\omega = 0$ moment wypadkowy silnika $M_{ez1} = 0$, czyli trójfazowy silnik indukcyjny zasilany jednofazowo nie

ma zdolności do rozruchu. Natomiast przy prędkościach różnych od zera ($\omega \neq 0$) silnik wytwarza moment wypadkowy, który – niezależnie od kierunku wirowania wirnika – jest zawsze momentem o działaniu napędowym. Oznacza to, że jeżeli silnik zasilany jednofazowo zostanie wytrącony w dowolnym kierunku ze stanu postoju, to nastąpi rozruch silnika w tym kierunku, aż do osiągnięcia prędkości ustalonej.

Z analizy równania (10.21) wynika, że w przypadku zasilania jednofazowego silnika

$$M_{kz1} \approx 0,5M_k, \quad s_{kz1} \approx 0,5s_k. \quad (10.22)$$

Wartość krytyczna momentu silnika M_{kz1} podczas zasilania jednofazowego jest równa około połowie momentu krytycznego silnika M_k przy symetrycznym zasilaniu trójfazowym i występuje przy poślizgu krytycznym s_{kz1} , który jest około dwukrotnie mniejszy od poślizgu s_k przy zasilaniu symetrycznym. Oznacza to, że silnik trójfazowy zasilany jednofazowo może być obciążony długotrwale tylko mocą mechaniczną o wartości równej około połowie mocy znamionowej silnika.

Na rysunku 10.5b przedstawiono charakterystyki wartości skutecznej prądu fazowego stojana $I_{sf} = f(\omega)$ przy zasilaniu jednofazowym i zasilaniu symetrycznym trójfazowym. Z równań (10.8) i (10.19) otrzymuje się następujące wartości stosunków prądów stojana silnika dla zasilania jednofazowego i trójfazowego:

- dla stanu biegu jałowego silnika ($\omega \approx \omega_s, s \approx 0$)

$$I_{sf01}/I_{sf0} \cong \sqrt{3}, \quad (10.23a)$$

- dla stanu zwarcia silnika ($\omega = 0, s = 1$)

$$I_{sfr1}/I_{sfr} \cong \sqrt{3/2}. \quad (10.23b)$$

Z równań (10.23) wynika, że przy zasilaniu jednofazowym silnika prąd pobierany z sieci podczas biegu jałowego jest większy, a podczas stanu zwarcia mniejszy od prądu pobieranego podczas tych stanów przy symetrycznym zasilaniu trójfazowym silnika.

10.2.4.2. Analiza pracy silnika w układzie hamowania jednofazowego

Układy połączeń i zasilania uzwojeń fazowych stojana silnika indukcyjnego stosowane podczas hamowania jednofazowego (hamowania dynamicznego prądem przemiennym) przedstawiono na rysunku 10.6. Wartości skuteczne napięć fazowych stojana dla rozpatrywanych układów połączeń spełniają następujące warunki:

- dla połączenia uzwojeń fazowych stojana w gwiazdę (rys. 10.6a)

$$\underline{U}_{sU} = 2\underline{U}/3, \quad \underline{U}_{sV} = \underline{U}_{sW} = -\underline{U}/3, \quad U = \sqrt{3}U_{fN}, \quad (10.24a)$$

- dla połączenia uzwojeń fazowych stojana w trójkąt (rys. 10.6b)

$$\underline{U}_{sU} = \underline{U}, \quad \underline{U}_{sV} = 0, \quad \underline{U}_{sW} = -\underline{U}, \quad U = U_{fN}. \quad (10.24b)$$

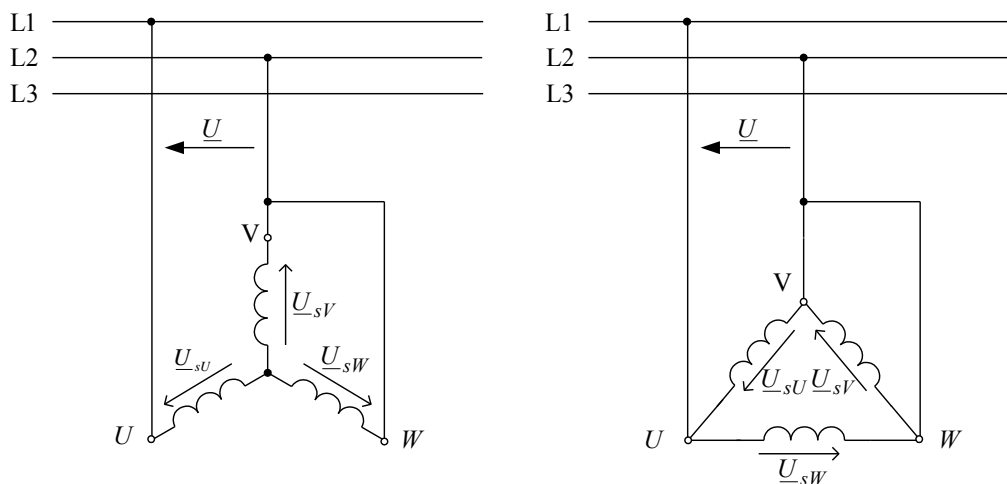
Składowe symetryczne napięć fazowych stojana dla tych rozpatrywanych układów połączeń uzwojenia stojana wynoszą:

$$\underline{U}_{s1} = \underline{U}_{s2} = U_{fN} / \sqrt{3}, \quad \underline{U}_{s0} = 0. \quad (10.25)$$

Po uwzględnieniu warunków (10.25) w równaniach (10.15) i (10.7) otrzymuje się następującą zależność określającą wypadkowy moment elektromagnetyczny silnika

$$M_e = M_{e1} + M_{e2} = \frac{M_k}{3} \left(\frac{2}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} - \frac{2}{\frac{2-s}{s_k} + \frac{s_k}{2-s}} \right). \quad (10.26)$$

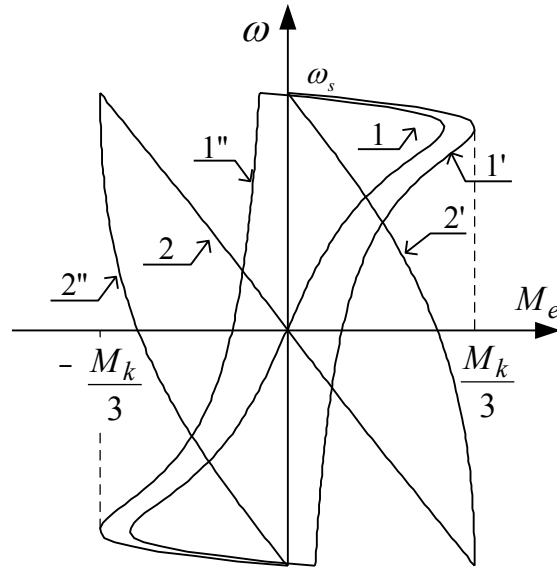
Z równania (10.26) wynika, że wartość maksymalna momentu elektromagnetycznego silnika podczas hamowania jednofazowego nie przekracza 1/3 wartości momentu krytycznego silnika występującego przy symetrycznym zasilaniu z sieci trójfazowej.



Rys. 10.6. Układy połączeń uzwojenia stojana silnika indukcyjnego podczas hamowania jednofazowego

Charakterystyki mechaniczne $\omega = f(M_e)$ silnika indukcyjnego pierścieniowego dla rozpatrywanych układów połączeń i zasilania uzwojeń fazowych stojana przedstawiono na rysunku 10.7. W przypadku pracy na charakterystyce naturalnej ($R_d = 0$) charakterystyka mechaniczna silnika ma podobny przebieg jak w układzie z przerwą w jednej z faz w linii zasilającej i nie ma możliwości uzyskania stanów hamowania elektrycznego. Dopiero po dołączeniu do obwodu wirnika trójfazowej rezystancji R_d o wartości spełniającej warunek $s_k = s_{kh} = (R'_r + R'_d) / X_k \geq 2$ wypadkowy moment elek-

tromagnetyczny silnika jest zawsze momentem hamującym, niezależnie od kierunku prędkości kątowej wirnika.



Rys. 10.7. Charakterystyki mechaniczne $\omega = f(M_e)$ silnika indukcyjnego podczas hamowania jednofazowego:

- 1', 1'', 1 – charakterystyki mechaniczne dla napięć o kolejności zgodnej, przeciwnej i charakterystyka wypadkowa przy zwartym obwodzie wirnika ($R_d = 0$);
 2', 2'', 2 – charakterystyki mechaniczne dla napięć o kolejności zgodnej, przeciwnej i charakterystyka wypadkowa przy włączonych do wirnika rezystorach R_h (dla których $s_k \geq 2$)

10.2.4.3. Analiza silnika indukcyjnego w układzie z odwróconą fazą uzwojenia stojana

Wybrane układy połączeń uzwojeń fazowych stojana z odwróconą jedną fazą uzwojenia stojana przedstawiono na rysunku 10.8. Dla tych układów zespolone wartości skuteczne napięć fazowych spełniają następujące warunki:

- dla układu połączeń z rysunku 10.8a

$$\underline{U}_{sU} = U_{fN}, \quad \underline{U}_{sV} = \underline{a}^2 U_{fN}, \quad \underline{U}_{sW} = -\underline{a} U_{fN}, \quad (10.27a)$$

- dla układu połączeń z rysunku 10.8b

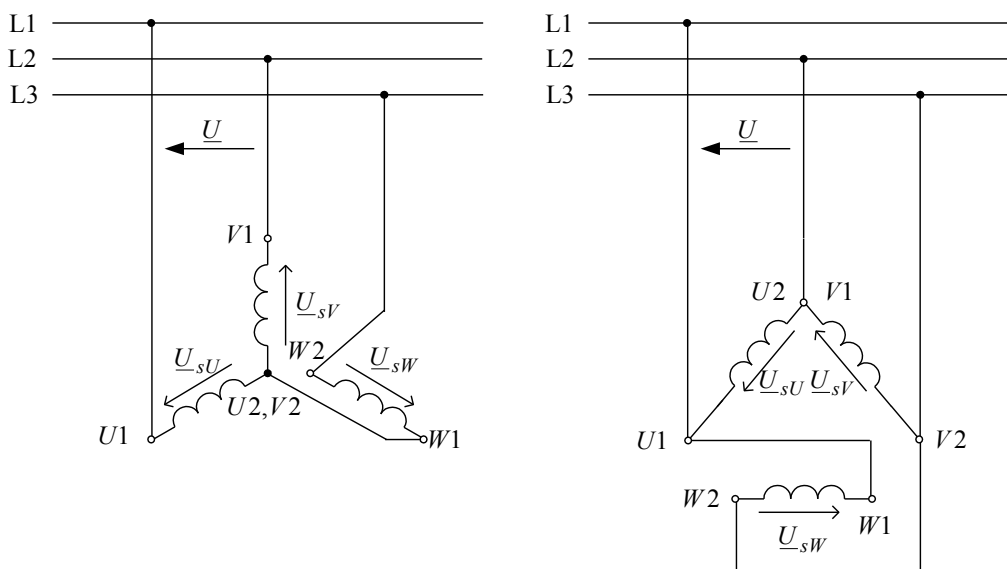
$$\underline{U}_{sU} = U_N, \quad \underline{U}_{sV} = \underline{a}^2 U_N, \quad \underline{U}_{sW} = -\underline{a} U_N, \quad U_N = \sqrt{3} U_{fN}. \quad (10.27b)$$

Składowe symetryczne napięć fazowych stojana dla tych układów wynoszą:

$$\underline{U}_{s1} = U_{fN}/3, \quad \underline{U}_{s2} = 2U_{fN}/3, \quad \underline{U}_{s0} = 2U_{fN}/3. \quad (10.28)$$

Po uwzględnieniu warunków (10.28) w równaniach (10.15) otrzymuje się następujące wartości momentów krytycznych dla składowych momentu elektromagnetycznego silnika:

$$M_{k1} = M_k/9, \quad M_{k2} = 4M_k/9 = 4M_{k1}. \quad (10.29)$$

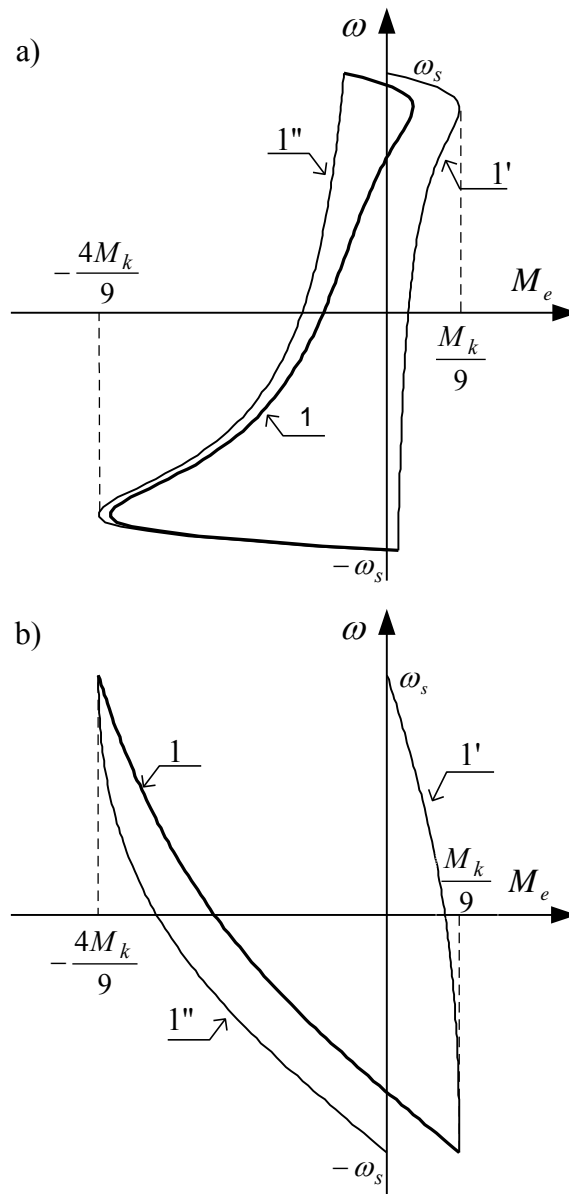


Rys. 10.8. Układy połączeń uzwojenia stojana z odwróconą (przełączoną) jedną fazą uzwojenia stojana

Wypadkowy moment elektromagnetyczny silnika indukcyjnego wynosi wtedy

$$M_e = M_{e1} + M_{e2} = \frac{2}{9} M_k \left(\frac{1}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} - \frac{4}{\frac{2-s}{s_k} + \frac{s_k}{2-s}} \right). \quad (10.30)$$

Na rysunku 10.9a przedstawiono charakterystyki mechaniczne $\omega = f(M_e)$ silnika indukcyjnego pierścieniowego z odwróconą jedną fazą uzwojenia stojana podczas pracy bez dodatkowej rezystancji w obwodzie wirnika ($R_d = 0$). Z przebiegu charakterystyki wypadkowej wynika, że w tym przypadku po załączeniu silnika do symetrycznej sieci trójfazowej nastąpi rozruch silnika w przeciwnym kierunku („do tyłu”), w porównaniu do rozruchu występującego przy normalnym układzie połączeń fazowych stojana.



Rys. 10.9. Charakterystyki mechaniczne $\omega = f(M_e)$ silnika indukcyjnego z odwróconą jedną fazą uzwojenia stojana:

- a) charakterystyki przy zwartym obwodzie wirnika ($R_d = 0$),
 b) charakterystyki z dodatkowymi rezystancjami w obwodzie wirnika (przy $s_k = 2$);
 1', 1'', 1 – charakterystyki mechaniczne dla napięć:
 o kolejności zgodnej, przeciwnej i wypadkowa

10.2.5. Analiza stanów niesymetrii w obwodach wirnika silnika indukcyjnego

Analityczny opis pracy silnika indukcyjnego z niesymetrią obwodów wirnika jest złożony i dlatego przedstawiono tylko opis podstawowych zjawisk elektromagnetycznych występujących podczas tego rodzaju niesymetrii.

Zasilane z symetrycznej sieci trójfazowej symetryczne uzwojenie stojana wytwarza w szczelinie silnika pole magnetyczne, wirujące względem stojana z synchroniczną prędkością kątową ω_s . Prędkość kątowa wirnika względem stojana jest równa $\omega = (1 - s)\omega_s$. Wirujące pole magnetyczne indukuje w uzwojeniach fazowych wirnika siły elektromotoryczne i prądy o częstotliwości równej $f_r = s f_s$.

Przy niesymetrii obwodów wirnika prądy fazowe wirnika są prądami niesymetrycznymi. Zgodnie z teorią składowych symetrycznych, układ niesymetrycznych prądów fazowych wirnika można zastąpić przez układy prądów symetrycznych o kolejności zgodnej i przeciwnej. Z powodu braku przewodu zerowego suma prądów fazowych wirnika jest zawsze równa zeru i składowa zerowa prądów wirnika nie występuje.

Prądy fazowe wirnika o kolejności zgodnej wytwarzają pole magnetyczne wirujące względem wirnika z prędkością kątową $s\omega_s$ w kierunku zgodnym z kierunkiem ruchu wirnika. Pole to wiruje względem stojana z prędkością kątową ω_1 , równą prędkości synchronicznej ω_s , ponieważ

$$\omega_1 = \omega + s\omega_s = (1 - s)\omega_s + s\omega_s = \omega_s, \quad (10.31)$$

czyli pole to jest nieruchome względem pola wirującego w szczelinie.

Prądy fazowe wirnika o kolejności przeciwnej wytwarzają pole magnetyczne wirujące względem wirnika z prędkością kątową $(-s\omega_s)$, czyli skierowaną przeciwnie do kierunku ruchu wirnika. Prędkość kątowa ω_2 wirowania tego pola względem stojana jest funkcją poślizgu s i wynosi

$$\omega_2 = \omega - s\omega_s = (1 - s)\omega_s - s\omega_s = (1 - 2s)\omega_s. \quad (10.32)$$

Przy poślizgach $0 \leq s < 0,5$ pole to wiruje względem stojana w kierunku zgodnym z kierunkiem ruchu wirującego synchronicznie pola stojana, a przy poślizgach $0,5 < s \leq 1$ – w kierunku przeciwnym. Pole to indukuje w uzwojeniach fazowych stojana siły elektromotoryczne i prądy o częstotliwości f_2 , która wynosi

$$f_2 = |(1 - 2s)|f_1. \quad (10.33)$$

Wypadkowy prąd fazowy stojana jest zatem złożony z dwóch składowych: składowej o stałej częstotliwości f_1 , równej częstotliwości napięcia sieci zasilającej, i składowej o zmiennej częstotliwości f_2 , zależnej od poślizgu silnika s , czyli od prędkości

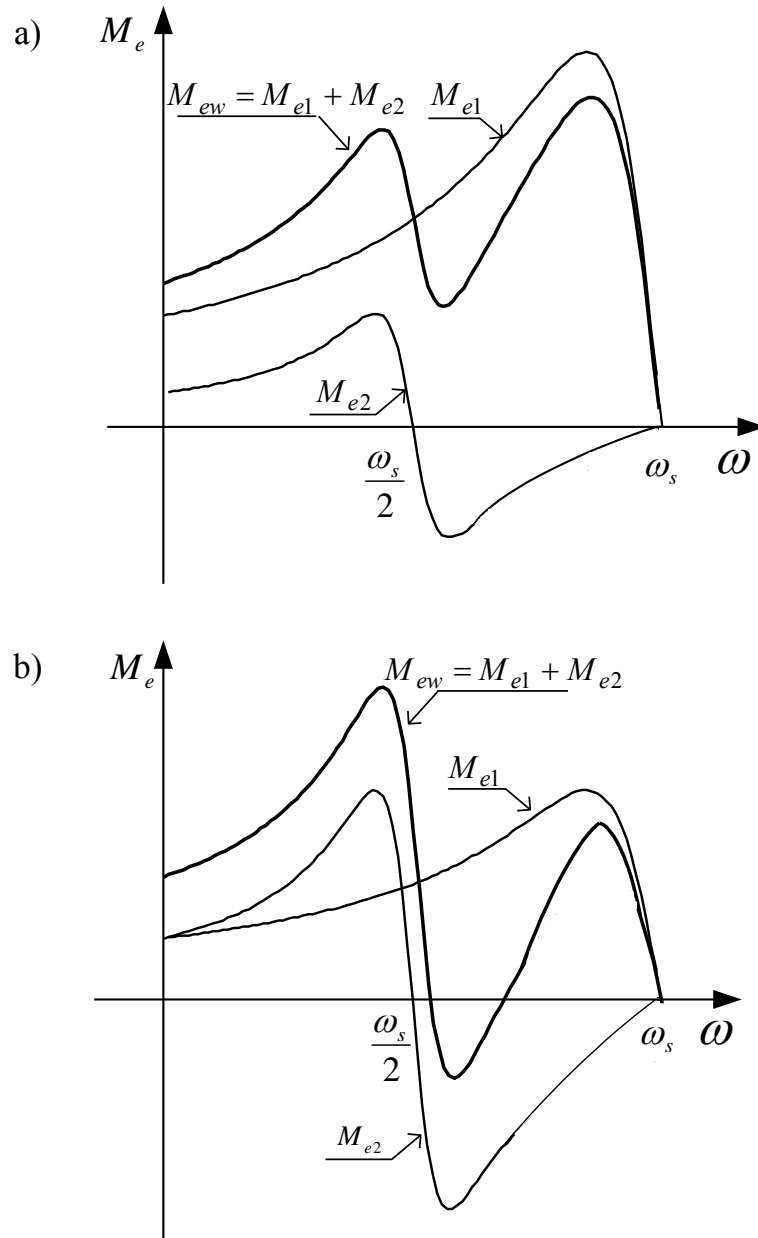
wirnika ω . Składowe prądów stojana o częstotliwości f_2 są generowane do sieci i powodują modulację prądów stojana o częstotliwości sieciowej f_1 .

Przy niesymetrii wirnika w szczelinie silnika występują więc dwa wypadkowe pola wirujące. Pierwsze pole wiruje względem stojana z prędkością synchroniczną ω_s i jest wytwarzane przez prądy fazowe stojana o częstotliwości sieciowej f_1 i prądy fazowe wirnika o kolejności zgodnej. Drugie pole wiruje względem stojana z prędkością kątową $(1 - 2s)\omega_s$ i jest wytwarzane przez prądy fazowe wirnika o kolejności przeciwnej i składowe prądów fazowych stojana o częstotliwości f_2 . Oddziaływanie pierwszego pola wirującego z prądami wirnika o kolejności zgodnej powoduje powstanie składowej momentu M_{e1} , a oddziaływanie drugiego pola wirującego z prądami stojana o częstotliwości f_2 powoduje powstanie składowej momentu M_{e2} . Wypadkowy moment elektromagnetyczny M_e jest sumą algebraiczną składowych momentu M_{e1} oraz M_{e2} .

Na rysunku 10.10a przedstawiono charakterystyki mechaniczne $M_{e1}(\omega)$, $M_{e2}(\omega)$ oraz charakterystykę wypadkową $M_e(\omega)$. Przebieg charakterystyki $M_{e1}(\omega)$ jest podobny do charakterystyki mechanicznej silnika o symetrycznych obwodach. Przebieg charakterystyki $M_{e2}(\omega)$ zależy natomiast od przedziału prędkości wirnika. Przy prędkościach wirnika zawartych w przedziale $0 \leq \omega < 0,5\omega_s$ kierunek składowej momentu M_{e2} jest zgodny z kierunkiem prędkości wirnika, czyli jest to składowa o działaniu silnikowym, natomiast przy prędkościach wirnika zawartych w przedziale $0,5\omega_s < \omega < \omega_s$ kierunek składowej M_{e2} jest przeciwny do kierunku prędkości wirnika, czyli jest to składowa o działaniu hamującym. Przy prędkości wirnika równej $\omega = 0,5\omega_s$, czyli poślizgu $s = 0,5$, składowa M_{e2} jest równa zero ($M_{e2} = 0$). Jest to spowodowane tym, że pole to wiruje wtedy z prędkością $\omega_2 = 0$, czyli jest nieruchome względem stojana i nie indukuje w nim sił elektromotorycznych i prądów.

Zmiana kierunku składowej momentu M_{e2} powoduje powstanie w charakterystyce wypadkowej $M_e(\omega)$ tzw. „siodła”, które występuje w przedziale prędkości wirnika zbliżonych do połowy prędkości synchronicznej silnika. W szczególnym przypadku niesymetrii wywołanej przez przerwę w jednej z faz wirnika (rys. 10.10b) charakterystyka wypadkowa momentu $M_e(\omega)$ kilkakrotnie przecina oś prędkości.

W przebiegu tej charakterystyki można wyróżnić dwie części, na których możliwe jest uzyskanie stabilnej pracy ustalonej. Podczas uruchamiania silnika z niesymetrią tego rodzaju, rozruch zakończy się „utknięciem” silnika przy prędkości wirnika równej około połowie wartości prędkości synchronicznej. Taki sam stan może wystąpić, jeżeli niesymetria ta powstała podczas pracy obciążonego silnika symetrycznego. Długotrwała praca silnika przy tej prędkości, odpowiadającej dużej wartości poślizgu, jest niedopuszczalna, gdyż ten stan pracy jest związany z poborem dużych prądów z sieci oraz z występowaniem dużych strat mocy i nagraniem silnika.



Rys. 10.10. Charakterystyki mechaniczne $M_e = f(\omega)$ silnika indukcyjnego z niesymetrią w obwodzie wirnika:
 a) z niesymetrią rezystancji fazowych wirnika,
 b) z przerwą w jednej z faz uzwojenia wirnika

10.3. Instrukcja

10.3.1. Opis stanowiska pomiarowego

Schemat ogólny układu pomiarowego do badań stanów niesymetrii silnika indukcyjnego przedstawiono na rysunku 10.11. Badany układ napędowy składa się z trójfazowego silnika indukcyjnego pierścieniowego M, sprzężonego mechanicznie z maszyną obcowzbudną prądu stałego M_p . Do pomiaru prędkości silnika zastosowano tachoprądnice TP z przyłączonym do niej miernikiem prędkości obrotowej n . Do pomiaru momentu mechanicznego na wale silnika może być zastosowany przetwornik momentu PM i miernik momentu mechanicznego (Nm). W razie braku takiego przetwornika i miernika wartość momentu silnika indukcyjnego należy określić na podstawie bilansu mocy dla maszyny pomocniczej prądu stałego.

Podczas badań stanów niesymetrii uzwojenie stojana silnika M jest zasilane z sieci trójfazowej przez autotransformator AT1, który zapewnia możliwość obniżenia napięcia zasilania w celu ograniczenia wartości prądów silnika. Do obwodu wirnika silnika M jest włączony nastawny rezystor trójfazowy R_d , który pełni rolę rozrusznika oraz umożliwia uzyskanie charakterystyk sztucznych silnika. Stany niesymetrii w obwodach stojana i wirnika silnika indukcyjnego są wywoływane za pomocą odpowiednich łączników dołączonych do obwodów stojana i wirnika silnika M.

Badania i pomiary charakterystyk silnika indukcyjnego w stanach niesymetrii należy wykonywać przy zasilaniu uzwojenia stojana napięciem obniżonym do takiej wartości, przy której prądy w uzwojeniu stojana nie przekraczają wartości znamionowej. Wartości prądów i momentu elektromagnetycznego silnika zmierzone lub obliczone przy obniżonej wartości napięcia zasilania silnika należy przeliczyć na wartości odpowiadające znamionowemu napięciu zasilania silnika według zależności

$$I|_{U=U_N} = I_p (U_N/U_p), \quad M|_{U=U_N} = M_p (U_N/U_p)^2, \quad (10.34)$$

w których: I_p , M_p – wartości prądu i momentu silnika indukcyjnego wyznaczone przy obniżonej wartości napięcia zasilania silnika U_p .

Wartość momentu na wale silnika indukcyjnego przy danej prędkości kątowej ω oblicza się na podstawie pomiarów wielkości maszyny pomocniczej z zależności

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{U_{tp} I_{tp} \pm (R_{tp} I_{tp}^2 + \Delta P_{Fe p} + \Delta P_m)}{\omega}, \quad (10.35)$$

w której:

+ – dla pracy prądnicowej maszyny pomocniczej,

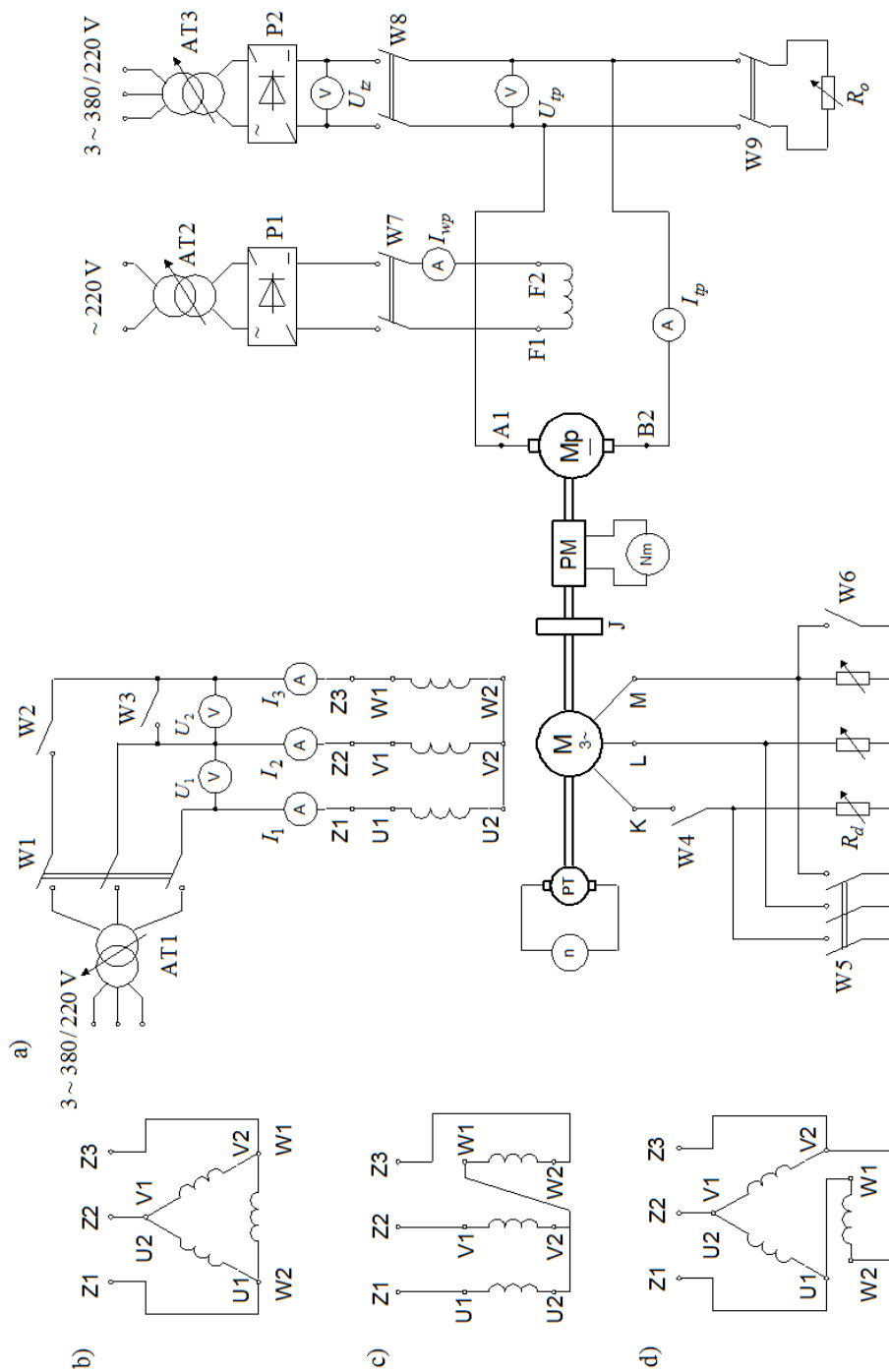
– – dla pracy silnikowej maszyny pomocniczej,

U_{tp} , I_{tp} – napięcie i prąd twornika,

R_{tp} – rezystancja twornika,

$\Delta P_{Fe p}$ – straty w żelazie,

ΔP_m – straty mechaniczne całego układu napędowego.



Rys. 10.11. Schemat układu pomiarowego do badań stanów awaryjnych i stanów niesymetrii w układzie napędowym z silnikiem indukcyjnym

10.3.2. Badanie stanów niesymetrii w obwodach stojana silnika indukcyjnego

10.3.2.1. Badanie pracy silnika z przerwą w jednej z faz uzwojenia stojana

Należy dokonać załączenia i rozruchu napięciowego silnika M, aż do znamionowej wartości napięcia zasilania ($U = U_N$). W stanie ustalonym silnik M powinien pracować na biegu jałowym przy symetrii obwodów i zasilania oraz przy zwartym obwodzie wirnika (zamknięte łączniki W4 i W5). Dla tego stanu pracy należy zmierzyć: prądy fazowe stojana, napięcia zasilające, prędkość obrotową wirnika i moment obrotowy silnika. Następnie przerwać obwód jednej z faz zasilających uzwojenie stojana silnika (przez otwarcie łącznika W2). Po wywołaniu tej niesymetrii zaobserwować, czy silnik nadal pracuje, a następnie wykonać pomiary prądów fazowych stojana, napięć zasilających, prędkości obrotowej i momentu obrotowego silnika. Porównać te wartości z wartościami zmierzonymi dla stanu pracy symetrycznej, wyznaczyć stosunek wartości prądów pobieranych z sieci przy zasilaniu symetrycznym trójfazowym i zasilaniu jednofazowym oraz sprawdzić, czy wartość tego stosunku jest zgodna z wynikami analizy teoretycznej podanymi w p. 10.2.4.1.

Pomiary części stabilnej charakterystyki mechanicznej silnika przy zasilaniu jednofazowym należy wykonywać po obniżeniu napięcia zasilania uzwojenia stojana do wartości $0,5 \div 0,7 U_N$. Podczas tych pomiarów silnik M jest obciążany maszyną pomocniczą M_p , która pracuje jak prądnica obcowzbudna i zasilą rezystor obciążenia R_o (łącznik W9 zamknięty, a W8 otwarty). Dla porównania wpływu niesymetrii celowe jest wykonanie pomiaru charakterystyki mechanicznej silnika przy trójfazowym zasilaniu symetrycznym.

W celu zbadania właściwości rozruchowych silnika indukcyjnego podczas zasilania jednofazowego należy w stanach symetrii dokonać kilku prób rozruchu silnika, w celu wyznaczenia minimalnej wartości napięcia zasilania, przy której zawsze następuje jego rozruch. Następnie dokonać próby załączenia silnika w układzie z przerwą w jednej z faz zasilających (łącznik W2 otwarty) i zaobserwować, czy przy tej wartości napięcia zasilania następuje rozruch silnika. W razie stwierdzenia braku rozruchu sprawdzić, czy zwiększanie napięcia zasilania silnika (aż do uzyskania krótkotrwale pobieranego z sieci prądu, równego około 1,5-krotnej wartości prądu znamionowego) zapewni rozruch silnika. Szczególną uwagę należy zwrócić na efekty akustyczne występujące podczas prób rozruchu przy zasilaniu jednofazowym uzwojenia stojana silnika indukcyjnego.

W następnej części badań należy załączyć do sieci silnik M przy zwartym obwodzie wirnika i autotransformatorem AT1 nastawić taką wartość trójfazowego napięcia zasilania, przy której – przy symetrii obwodów stojana i wirnika – nie będzie następować rozruch silnika (lub utrzymywać wirnik silnika w stanie zahamowanym). Przy tej wartości napięcia zasilania zmierzyć prądy pobierane z sieci przy symetrycznym zasilaniu trójfazowym, a następnie pomierzyć te prądy dla stanu zasilania jednofazowego uzwojenia stojana (łącznik W2 otwarty). Wyznaczyć stosunek prądów zwarcia

silnika przy zasilaniu trójfazowym i jednofazowym i sprawdzić, czy wartość tego stosunku jest zgodna z wynikami analizy teoretycznej podanymi w p. 10.2.4.1.

Przedstawiony program badań można powtórzyć dla przypadku połączenia uzwojeń fazowych stojana silnika w trójkąt (układ z rys. 10.11b).

10.3.2.2. Badanie pracy silnika podczas hamowania jednofazowego

Badanie silnika indukcyjnego podczas stanu hamowania jednofazowego wykonuje się w układzie pomiarowym przedstawionym na rysunku 10.11. Podczas tych badań do obwodu wirnika silnika indukcyjnego powinien być dołączony trójfazowy rezystor $R_d = R_h$ o rezystancji zapewniającej uzyskanie stanu hamowania jednofazowego. Wartość rezystancji R_h może być dobrana na drodze prób lub obliczona z zależności

$$R_h \geq [(2/s_k) - 1]R_r. \quad (10.36)$$

Wartość poślizgu krytycznego s_k oblicza się z zależności (10.13) na podstawie wartości poślizgu znamionowego s_N i przeciążalności momentem silnika p_M . Jeżeli rzeczywista przeciążalność silnika nie jest znana, można przyjąć orientacyjną wartość średnią z przedziału typowych wartości $p_M = 2,5 \div 3,5$. Wartość rezystancji fazowej wirnika R_r silnika indukcyjnego pierścieniowego może być wyznaczona pomiarowo lub obliczona na podstawie danych znamionowych z wzoru

$$R_r = \frac{1000 P_N s_N}{3 I_{rN}^2 (1 - s_N)}, \quad (10.37)$$

w którym:

P_N – moc znamionowa silnika, kW,

I_{rN} – znamionowy prąd wirnika.

Podczas wyznaczania charakterystyk hamowania jednofazowego silnik indukcyjny M jest napędzany maszyną pomocniczą Mp, pracującą jako obcowzbudny silnik prądu stałego o regulowanej prędkości (łącznik W8 zamknięty, a W9 otwarty). Uruchomienie układu należy rozpocząć od załączenia wzbudzonej maszyny Mp i przez stopniowe zwiększanie napięcia zasilania twornika doprowadzić układ napędowy do prędkości zbliżonej do prędkości synchronicznej silnika M. Po wyborze odpowiedniego połączenia uzwojenia stojana (łącznik W3 zamknięty, a W2 otwarty) załączyć uzwojenie stojana do układu jednofazowego zasilania napięciem przemiennym (łącznik W1 zamknięty). Podczas pomiarów charakterystyk hamowania autotransformatorem AT1 należy nastawiać takie wartości napięcia zasilania jednofazowego stojana, aby wartości prądów fazowych nie przekraczały 1,25-krotnej wartości znamionowej prądu stojana. Kolejne punkty charakterystyk wykonuje się po nastawieniu różnych wartości prędkości kątowych silnika przez zmniejszanie napięcia zasilania twornika maszyny pomocniczej Mp.

10.3.2.3. Badanie silnika indukcyjnego w układzie z odwróconą fazą uzwojenia stojana

Stany pracy silnika indukcyjnego w układzie z odwróconą fazą uzwojenia stojana bada się w układzie pomiarowym przedstawionym na rysunku 10.11.

Pierwsza część badań dotyczy porównania pracy silnika zasilanego z symetrycznej sieci trójfazowej i pracy silnika z odwróconą fazą stojana. W tym celu należy uruchomić symetrycznie połączony silnik indukcyjny M i zaobserwować kierunek wirowania silnika. Następnie, po wyłączeniu silnika, przełączyć zaciski jednego uzwojenia fazowego stojana do układu połączeń z odwróconą fazą. Koniecznie zachować takie samo przyłączenie faz sieci zasilającej do poszczególnych faz uzwojenia stojana. Po załączeniu silnika M należy autotransformatorem AT1 stopniowo zwiększać napięcie zasilania aż do chwili uruchomienia silnika. Zaobserwować kierunek wirowania silnika i sprawdzić, czy jest on przeciwny do występującego przy normalnym połączeniu i zasilaniu uzwojenia stojana. Następnie nastawić taką wartość napięcia zasilania uzwojenia stojana, przy której żaden z prądów w uzwojeniach fazowych stojana nie przekracza jeszcze 1,25-krotnej wartości prądu znamionowego stojana. Zmierzyć prądy pobierane z sieci, napięcie zasilania i prędkość obrotową silnika. Pomiary przy tej wartości napięcia powtórzyć dla stanu pracy symetrycznej silnika. Porównać wyniki pomiarów silnika podczas pracy w stanie symetrii i w układzie niesymetrii z odwróconą fazą stojana.

Druga część badań dotyczy pomiarów stanów hamowania elektrycznego silnika indukcyjnego w układzie z odwróconą fazą. Podczas badań uzwojenie stojana połączone w układzie z odwróconą fazą jest zasilane z symetrycznej sieci trójfazowej. Do obwodu wirnika silnika indukcyjnego powinien być włączony trójfazowy rezystor o rezystancji $R_d = R_h$, dobranej w sposób podany w p. 10.3.2.2 dla hamowania 1-fazowego. Napięcie zasilające uzwojenie stojana podczas tych pomiarów należy nastawiać autotransformatorem AT1 na taką wartość, aby prądy pobierane z sieci nie przekraczały 1,25-krotności prądu znamionowego stojana silnika. W trakcie wyznaczania charakterystyk hamowania silnika indukcyjnego z odwróconą fazą silnik M jest napędzany maszyną pomocniczą Mp. Podczas tych pomiarów należy zachować taką samą procedurę postępowania, jaką podano w p. 10.3.2.2 do wyznaczania charakterystyk hamowania jednofazowego.

10.3.3. Badanie stanów niesymetrii w obwodzie wirnika silnika indukcyjnego

Badania stanów pracy silnika indukcyjnego z niesymetrią obwodów wirnika wykonuje się w układzie pomiarowym przedstawionym na rysunku 10.11. W celu uzyskania niesymetrii rezystancji w obwodzie wirnika należy, po nastawieniu odpowiedniej wartości rezystancji trójfazowej R_d , zamknąć łącznik W6, zawierający rezystancję dodatkową w jednej z faz wirnika. Układ niesymetrii obwodu wirnika z przerwą w jednej z faz wirnika uzyskuje się po otwarciu łącznika W4 przy zwartym łączniku W5 ($R_d = 0$). Podczas badań tych stanów niesymetrii uzwojenie stojana silnika jest zasilane napięciem obniżonym z symetrycznej sieci trójfazowej. Obciążenie silnika stanowi maszyna pomocnicza Mp, pracująca jako prądnica obcowzbudna, zasilająca rezystor obciążenia R_o .

Pierwsza część badań ma na celu eksperymentalne sprawdzenie, czy praca silnika indukcyjnego w rozpatrywanych stanach niesymetrii jest zgodna z wynikami analizy

teoretycznej. Przez stopniowe zwiększanie autotransformatorem AT1 napięcia zasilającego aż do wartości znamionowej dokonać rozruchu napięciowego silnika M na biegu jałowym. Przy zwartej rezystancji R_d wykonać pomiary prądów fazowych, napięć zasilających i prędkości obrotowej silnika. Następnie łącznikiem W4 wywołać przerwę w jednej z faz uzwojenia wirnika. Zaobserwować stan pracy silnika po powstaniu przerwy w obwodzie wirnika podczas pracy ustalonej silnika. Dla tego stanu niesymetrii wykonać pomiary prądów fazowych, napięć zasilających i prędkości kątownej silnika oraz porównać z pomiarami dla stanu pracy symetrycznej.

W następnej części badań dokonać rozruchu napięciowego silnika M z uprzednio dokonaną przerwą w jednej fazie wirnika (łącznik W4 otwarty). Podczas rozruchu stopniowo zwiększać napięcie zasilania uzwojenia stojana aż do wartości równej około $0,5U_N$. Sprawdzić, czy po zakończeniu rozruchu nastąpiło utknięcie silnika przy prędkości kątownej zbliżonej do połowy prędkości synchronicznej silnika. Zaobserwować wskazania wskazówek amperomierzy mierzących prądy fazowe stojana i sprawdzić, czy wykazują one oscylacje wokół ustalonej wartości świadczące o modulacji prądów pobieranych z sieci. Zmierzyć czas trwania określonej liczby okresów oscylacji prądów i na tej podstawie wyznaczyć częstotliwość składowych prądów stojana indukowanych w uzwojeniu stojana przez prądy fazowe wirnika o kolejności przeciwnej.

Dalsze badania mają na celu wyznaczenie stabilnych części charakterystyki mechanicznej $\omega = f(M_e)$ silnika indukcyjnego podczas pracy z przerwą w jednej z faz uzwojenia wirnika. W trakcie badań obciążenie silnika stanowi prądnicą obcowzbudna M_p , zasilająca rezystor obciążenia R_o o nastawianej wartości. Pomiary stabilnej części charakterystyki mechanicznej silnika w przedziale prędkości kątownych wirnika zbliżonych do prędkości synchronicznej silnika wykonuje się przy zasilaniu uzwojenia stojana napięciami symetrycznymi o wartości równej lub zbliżonej do znamionowego napięcia stojana. W czasie pomiarów należy stopniowo zwiększać obciążenie silnika maszyną M_p . Pomiary zakończyć, gdy prądy fazowe w uzwojeniu stojana przekroczą 1,25-krotnie wartość prądu znamionowego stojana silnika. Pomiary stabilnej części charakterystyki mechanicznej silnika położonej w przedziale prędkości kątownych wirnika zbliżonych do połowy prędkości synchronicznej silnika wykonuje się w taki sam sposób. Podczas tych pomiarów konieczne jest obniżenie wartości napięcia zasilania uzwojenia stojana do wartości równej około $0,5 \div 0,6$ napięcia znamionowego silnika. Wyniki pomiarów należy następnie przeliczyć na wartość napięcia znamionowego silnika.

10.4. Sprawozdanie

Sprawozdanie powinno zawierać:

1. Parametry i dane znamionowe badanego układu napędowego.
2. Wykaz aparatury pomiarowej.
3. Schematy ideowe układów pomiarowych zastosowanych do badań.
4. Tabele z wynikami pomiarów oraz wielkości obliczonych na podstawie pomiarów.

5. Charakterystyki mechaniczne silnika indukcyjnego przeliczone do wartości znamionowej napięcia zasilania ($U = U_N$):

a) charakterystyka mechaniczna $\omega = f(M_e)$ dla pracy silnika z przerwą w jednej z faz zasilających uzwojenie stojana (przy $R_d = 0$),

b) charakterystyki mechaniczne $\omega = f(M_e)$ dla pracy silnika podczas hamowania jednofazowego ($R_d = R_h \neq 0$),

c) charakterystyki mechaniczne $\omega = f(M_e)$ dla pracy silnika podczas hamowania z odwróconą fazą stojana ($R_d = R_h \neq 0$),

d) charakterystyki mechaniczne $\omega = f(M_e)$ dla pracy silnika z przerwą w jednej fazie uzwojenia wirnika ($R_d = 0$). Celowe jest przedstawienie tych charakterystyk w układzie wielkości względnych: $\omega/\omega_s = f(M_e/M_N)$.

6. Opis pracy silnika indukcyjnego w stanach niesymetrii oraz porównanie wartości wielkości w tych stanach z wartościami dla stanów symetrycznych.

7. Wnioski i własne spostrzeżenia.

10.5. Zagadnienia kontrolne

1. Wymienić rodzaje stanów niesymetrycznych i awaryjnych występujących podczas pracy silników indukcyjnych oraz przyczyny ich powstawania.

2. Opisać zasadę metody składowych symetrycznych i jej zastosowanie do analizy stanów niesymetrii silnika indukcyjnego.

3. Przedstawić i uzasadnić wpływ niesymetrii napięcia zasilania na pracę silnika indukcyjnego oraz przebiegi charakterystyk mechanicznych silnika.

4. Przedstawić przebiegi charakterystyk składowych i wypadkowej charakterystyki mechanicznej silnika indukcyjnego dla stanu pracy z przerwą w jednej z faz zasilających uzwojenie stojana. Uzasadnić, dlaczego silnik indukcyjny dla tego rodzaju niesymetrii nie ma zdolności do rozruchu.

5. Omówić układy połączeń i zasilania uzwojeń fazowych stojana silnika indukcyjnego podczas hamowania jednofazowego. Przy jakich wartościach rezystancji hamowania w obwodzie wirnika możliwe jest uzyskanie stanu hamowania jednofazowego.

6. Opisać stan niesymetrii podczas pracy silnika indukcyjnego z odwróconą fazą stojana i możliwość praktycznego wykorzystania tego stanu niesymetrii.

7. Przedstawić charakterystyki składowe i wypadkową charakterystykę mechaniczną silnika indukcyjnego dla stanu pracy z niesymetrią rezystancji fazowych wirnika oraz z przerwą w jednej z faz uzwojenia wirnika. Omówić niekorzystne następstwa tego rodzaju niesymetrii.

Literatura

[1] Bielawski S., *Teoria napędu elektrycznego*, WNT, Warszawa 1978.

[2] Gogolewski Z., Kuczewski Z., *Napęd elektryczny*, WNT, Warszawa 1972.

[3] Kurdziel R., *Podstawy elektrotechniki*, WNT, Warszawa 1972.