ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1975

Seria: Elektryka z. 47 Nr kol. 428

Walery Potapow

Zakład Maszyn Elektrycznych
Politechniki Śląskiej

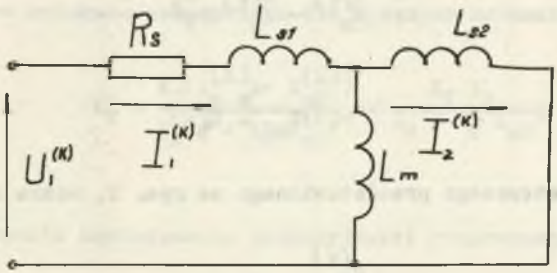
ANALIZA ZAWARTOŚCI HARMONICZNYCH W PRADZIE STOJANA SILNIKA INDUKCYJNEGO Z WIRNIKIEM KLATKOWYM ZASILANEGO Z TYRYSTOROWEGO KOMUTATORA NAPIĘCIA

Streszczenie. W artykule przeprowadzono analizę zawartości harmonicznych prądu stojana silnika indukcyjnego z wirnikiem klatkowym zasilanego z tyrystorowego komutatora napięcia. Obliczono wartości harmonicznych prądu stojana w funkcji poślizgu przy różnych kątach otwarcia tyrystorów przy α = const. Przeprowadzono porównanie obliczonych charakterystyk z charakterystykami zmierzonymi.

Przy nastawie prędkości obrotowej silnika indukcyjnego zasilanego z tyrystorowego komutatora napięcia do uzwojeń silnika jest przyłożone niesinusoidalne symetryczne napięcie trójfazowe, powodujące zniekształcenie krzywej prądu. Prądy (napięcia) silnika zasilanego z tyrystorowego komutatora napięcia zawierają oprócz podstawowej harmonicznej (50 Hz) również wyższe harmoniczne. Przy połączeniu uzwojeń stojana w gwiazdę z izolowanym punktem zerowym, w prądzie (napięciu) stojana silnika indukcyjnego występują harmoniczne zgodnej kolejności faz rzędu k = (6g - 5) i harmoniczne przeciwnej kolejności faz rzędu k = (6g - 1), przy czym g = 1, 2, 3...

Wartość poszczególnych harmonicznych w prądzie silnika zależy od:

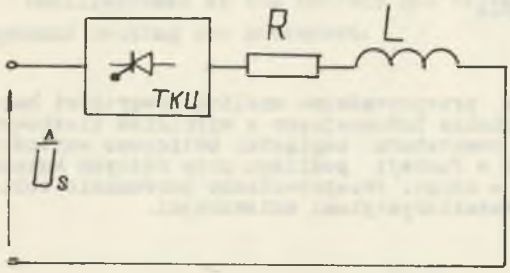
a) układu połączeń uzwojeń,
b) prędkości obrotowej wirnika,
c) momentu obciążenia silnika.



Rys.1. Schemat zastępczy silnika indukcyjnego dla wyższych harmonicznych

Znajomość zawartości harmonicznych w prądzie silnika indukcyjnego jest potrzebna nie tylko ze względu na ich wpływ na charakterystyki silnika, lecz również ze względu na oddziaływanie na sieć zasilania, przez którą zamykają się wyższe harmoniczne prądu silnika.

Przyjmując, że rezystancja wirnika klatkowego dla wyższych harmonicznych jest mała w porównaniu z reaktancją rozrproszenia, można dla wyższych harmonicznych przyjąć schemat zastępczy przedstawiony na rys. 1.



Rys. 2. Schemat zastępczy silnika indukcyjnego zasilanego z tyrystorowego komutatora napięcia

Uwzględniając, że $R_2 = 0$ dla wyższych harmonicznych można przejść do schematu zastępczego silnika indukcyjnego przy niesinusoidalnym napięciu zasilającym (o kształcie spełniającym warunki Dirichleta).

Taki schemat zastępczy jest przedstawiony na rys. 2.

W schemacie tym przyjęto oznaczenia:

$$X = X_{s1} + \frac{X_{s2} \quad X_m}{X_{s2} + X_m}$$

$$\hat{U}_z = \hat{U}_s - \hat{E}_r$$

$$\hat{E}_r = \hat{E}_r^{(1)} \quad k_r$$

$$\hat{E}_r^{(1)} = \hat{I}_2^{(1)} \quad \frac{R_2}{S}$$

$$k_r = \frac{L_m}{L_{s2} + L_m}$$

Dla schematu zastępczego przedstawionego na rys. 2, można obliczyć charakterystyki typu:

$$\frac{U_k^{(k)}}{U_z} = F_1(\alpha)$$

k = 1, 5, 7, 11...

Charakterystyki te oblicza się wg wzorów podanych w pracy [2] przy obciążeniu rezystancyjno-indukcyjnym o kącie

$$\varphi = \operatorname{arc\,tg} \frac{X}{R_{s1}}$$

Kąt α' jest kątem zapłonu tyrystorów w odniesieniu do napięcia $\hat{U}_z$. Można posłużyć się relacjami:

$$\frac{I^{(k)}}{I^{(1)}} = F_2(\alpha'),$$

które można obliczyć na podstawie następujących związków:

$$\frac{I^{(k)}}{U_z}(\alpha') = \frac{U^{(k)}}{\sqrt{R_{s1}^2 + K_f' X_k^2}\, U_z}(\alpha')$$

$$\frac{I^{(1)}}{U_z}(\alpha') = \frac{U_{\prime}^{(1)}}{U_z \sqrt{R_{s1}^2 + X^2}}(\alpha') \qquad (1)$$

$$\frac{I_{\prime}^{(k)}}{I_{\prime}^{(1)}} = \frac{U_{\prime}^{(k)}}{U_{\prime}^{(1)}} \frac{\sqrt{R_{s1}^2 + X^2}}{\sqrt{R^2 + K_f' X_k^2}}(\alpha')$$

gdzie:

K_f' - współczynnik uwzględniający zmniejszenie indukcyjności rozproszenia wirnika.

Jak wynika ze schematu zastępczego dla wyższych harmonicznych (rys.1)

$$K_f' = \frac{K_f(X_m^{(k)} + X_{s2}^{(k)})}{X_m^{(k)} + K_f X_{s2}^{(k)}} = \frac{K_f L_2}{L_m + K_f L_{s2}};$$

gdzie:

K_f - współczynnik zmniejszenia indukcyjności rozproszenia.

Współczynnik zmniejszenia indukcyjności rozproszenia wirnika powinien ć uwzględniony nawet dla silników ze zwykłą klatką.

Częstotliwości harmonicznych w wirniku:

$$f_2^{(k)} = s^{(k)} \; f_1^{(k)} \cong f_1^{(k)}$$

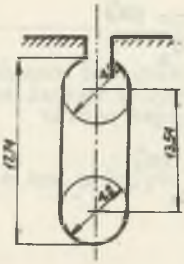
$$s^{(k)} \cong 1$$

gdzie:

$f_1^{(k)}$ - częstotliwość harmonicznych w stojanie,

$f_2^{(k)}$ - częstotliwość harmonicznych w wirniku,

$s^{(k)}$ - poślizg wirnika silnika względem k-tej harmonicznej.



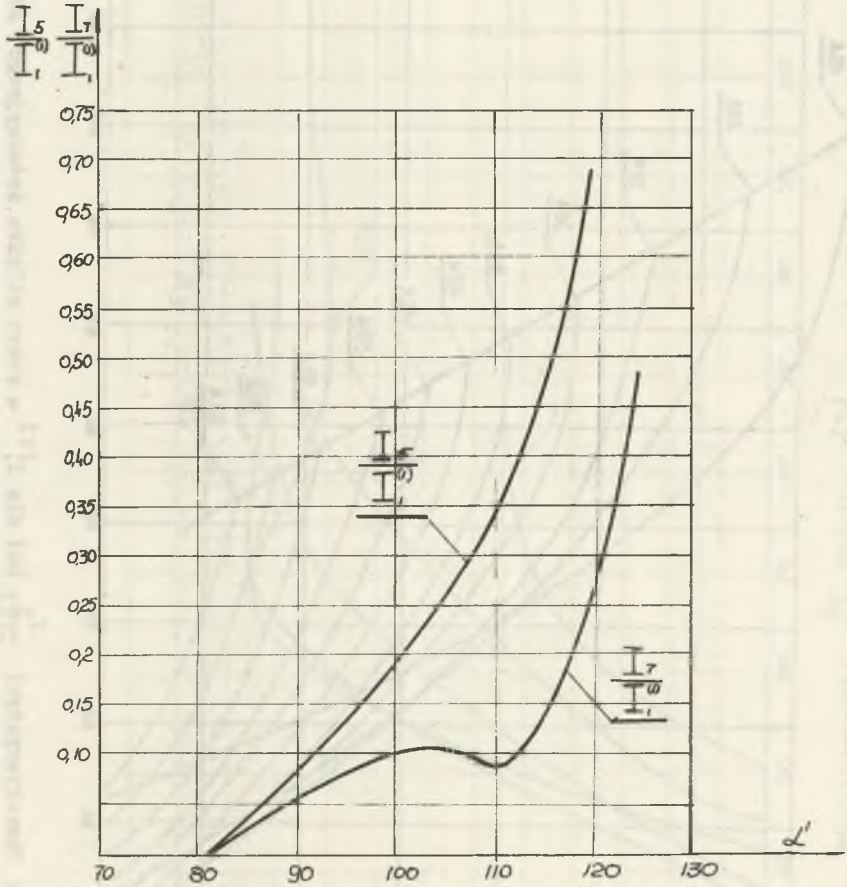
Rys. 3. Kształt żłobka wirnika silnika indukcyjnego SE-160

Na podstawie obliczeń silnika indukcyjnego SE-160 (dane znamionowe i parametry schematu zastępczego podane są w pracy [3]) z klatką aluminiową w wirniku o kształcie żłobka pokazanym na rys. 3, otrzymano następujące wartości:

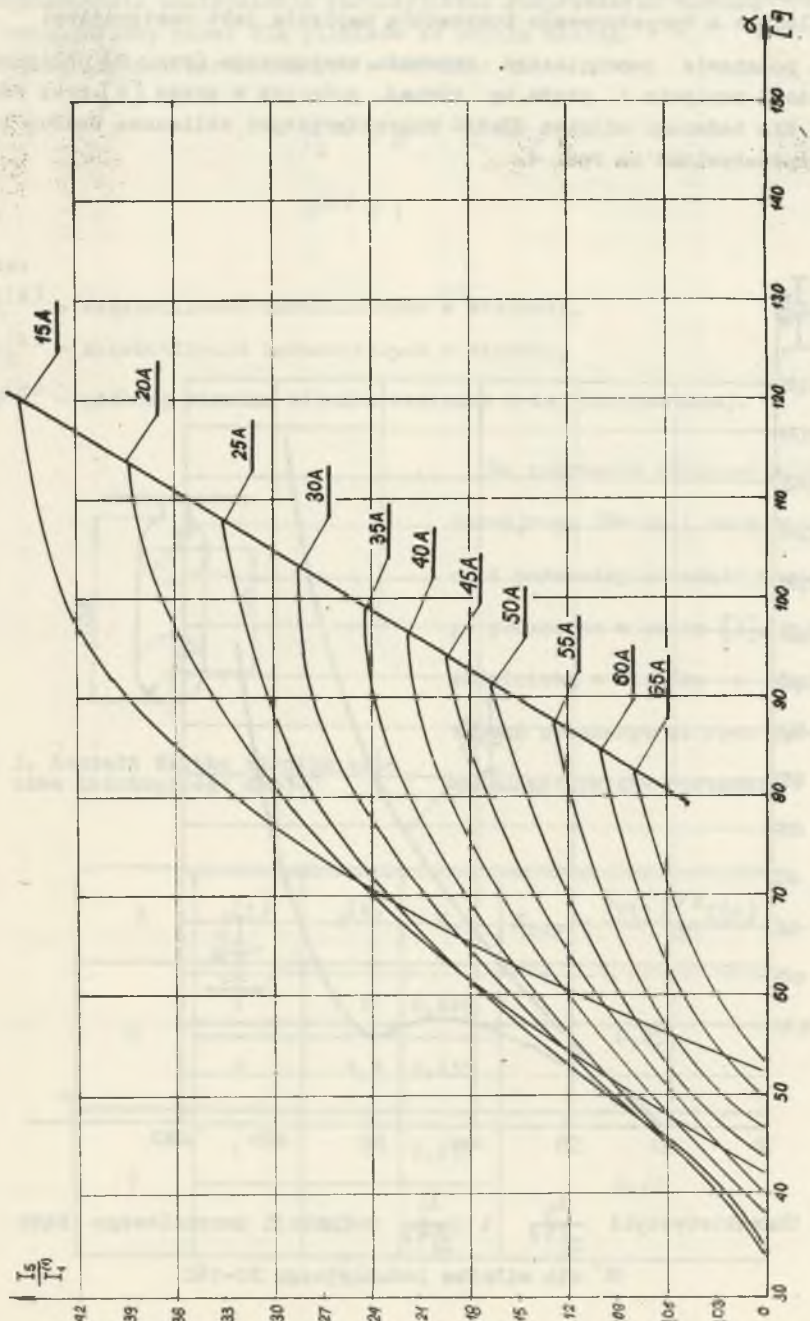
K	$s^{(1)}$	$s^{(k)}$	K_f	$K_{fsr} = \frac{K_{f(1)} + K_{f(o)}}{2}$
5	1	1	0,465	0,45
	0	1,2	0,435	
7	1	1	0,435	0,42
	0	0,857	0,405	

Tok obliczeń wyższych harmonicznych prądu stojana silnika indukcyjnego, zasilanego z tyrystorowego komutatora napięcia jest następujący:

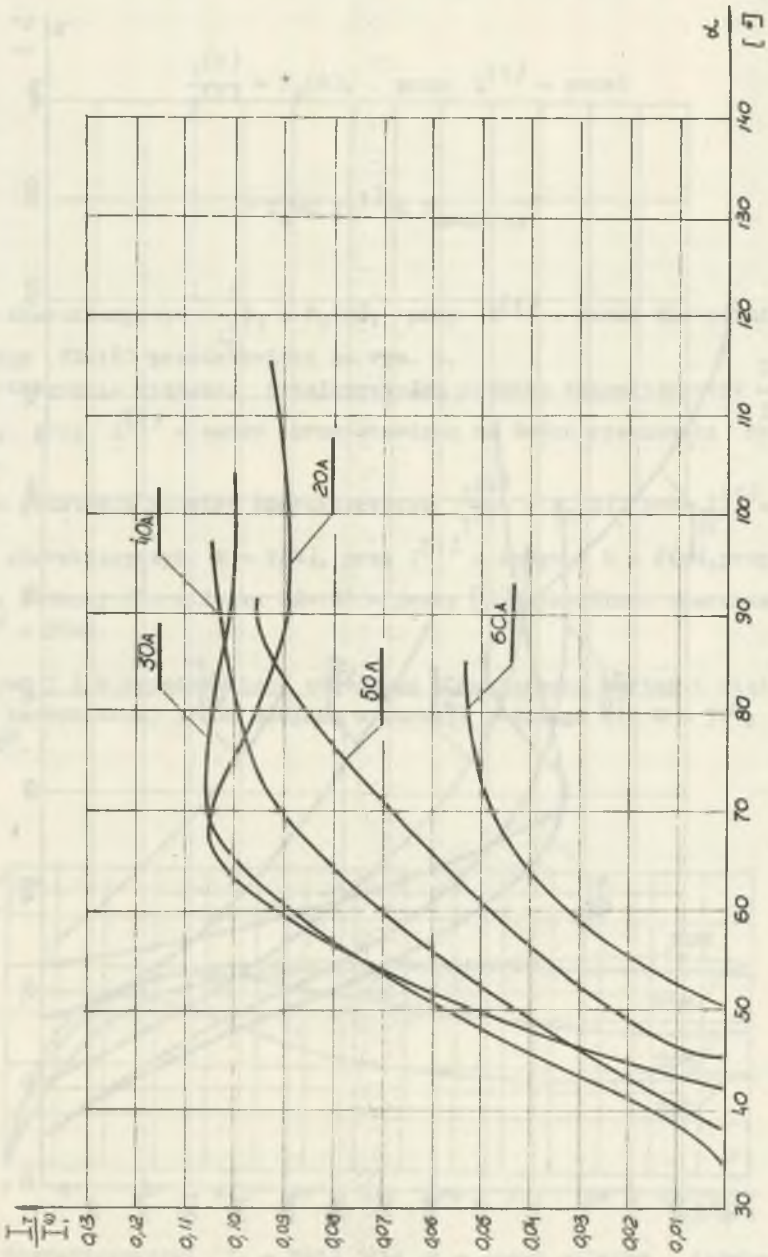
1) Na podstawie pomocniczego schematu zastępczego (rys. 2) obliczono harmoniczne napięcia i prądu wg równań podanych w pracy [2] oraz równań (1). Dla badanego silnika SE-160 charakterystyki obliczone według tej metody przedstawiono na rys. 4.



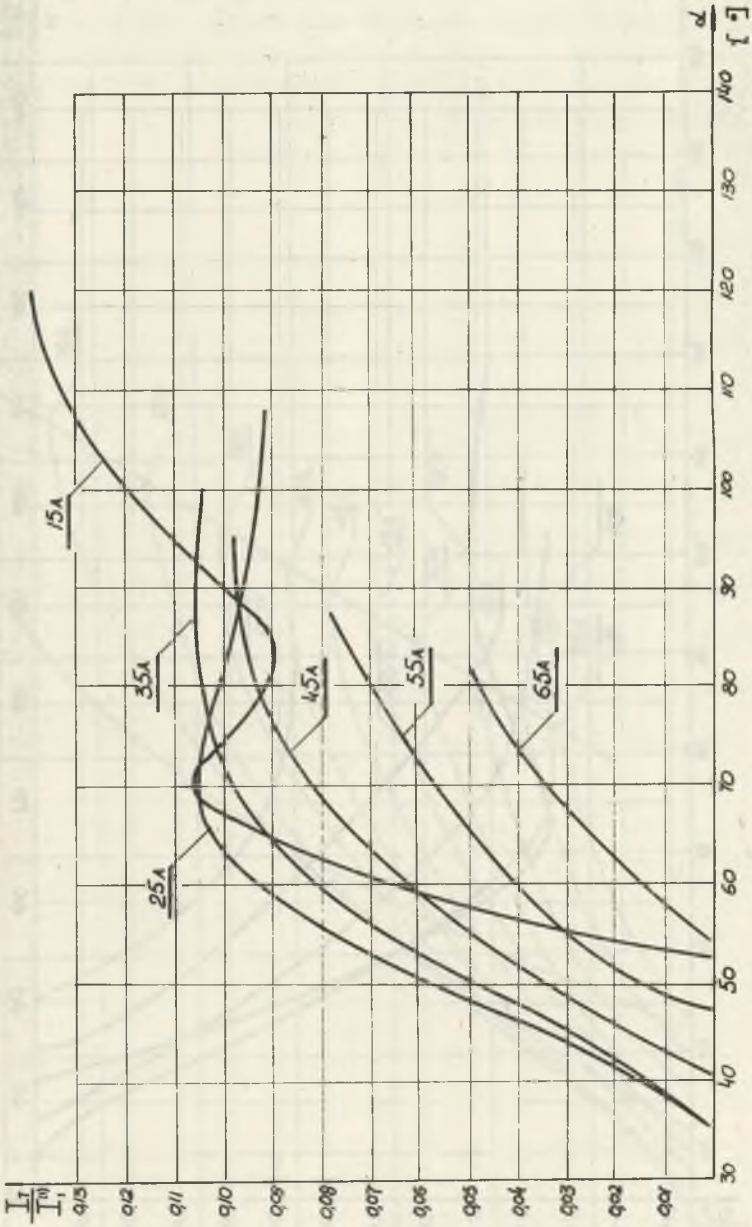
Rys. 4. Charakterystyki $\frac{I_5}{I_1^{(1)}}$ i $\frac{I_7}{I_1^{(1)}}$ w funkcji pomocniczego kąta α' dla silnika indukcyjnego SE-160



Rys. 5. Charakterystyki $\frac{I_5}{I_1^{(1)}}(\alpha)$ dla $I_1^{(1)}$ = const silnika indukcyjnego SE-160



Rys.6a. Charakterystyki $\frac{I_7}{I_1^{(1)}}(\alpha)$ dla $I_1^{(1)}$ = const silnika indukcyjnego SB-160



Rys. 6b. Charakterystyki $\frac{I_r}{I_1^{(1)}}(\alpha)$ dla $I_1^{(1)}$ = const silnika indukcyjnego SE-160

2) Kierując się metodyką podaną w pracy [3] zależności te przeliczono dla rzeczywistego kąta zapłonu tyrystorów względem napięcia zasilania U_z;

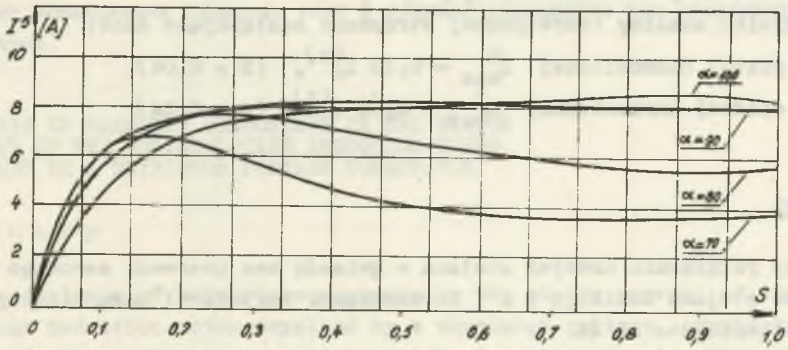
$$\frac{I^{(k)}}{I^{(1)}} = F_2(\alpha), \quad \text{przy} \quad I^{(1)} = \text{const}$$

$$I_o \leq I^{(1)} \leq I_{zwarcia}$$

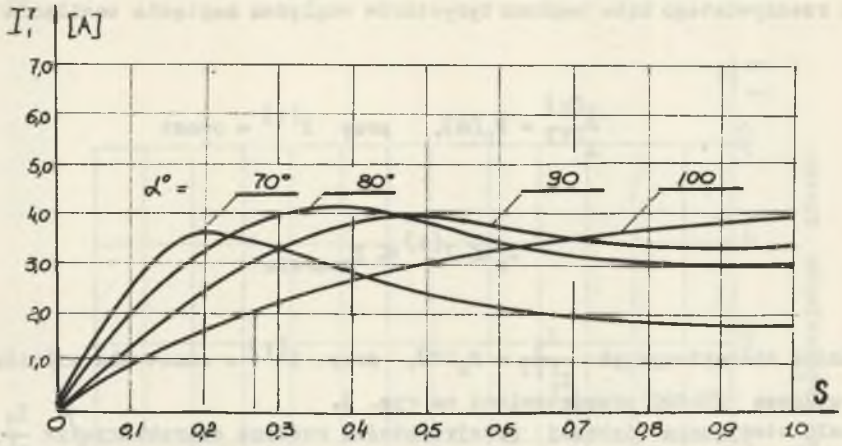
Rodzinę charakterystyk $\frac{I_5}{I^{(1)}} = F_2(\alpha)$, przy $I^{(1)}$ = const dla silnika indukcyjnego SE-160 przedstawiono na rys. 5.
W celu otrzymania większej przejrzystości rodzinę charakterystyk $\frac{I_7}{I^{(1)}} = F_2(\alpha)$, przy $I^{(1)}$ = const przedstawiona na dwóch rysunkach: rys. 6a, rys. 6b.

3) Na podstawie rodziny charakterystyk $\frac{I^{(k)}}{I^{(1)}} = F_2(\alpha)$, przy $I^{(1)}$ = const a także charakterystyk $M = F(\alpha)$, przy $I^{(1)}$ = const i $S = F(\alpha)$, przy $I^{(1)}$ = const; podanej dla silnika SE-160 w pracy [3] wykreślono charakterystyki $I_1^{(k)} = F(\alpha)$.

Na rys. 7 i 8 przedstawiono obliczone i pomierzone wartości piątej i siódmej harmonicznej prądu stojana w funkcji poślizgu dla $\alpha = 70^o$; 80°; 90°; 100°.



Rys. 7. Charakterystyki $I_5 = F(S)$ dla α = const silnika indukcyjnego SE-160



Rys. 8. Charakterystyki $I_7 = F(s)$ dla α = const silnika indukcyjnego SE-160

Niewielkie różnice między wartościami obliczonymi i pomierzonymi dla $\alpha = 70^o$ i $\alpha = 80^o$ w obszarze dużych poślizgów można wyjaśnić tym, że dla pierwszej harmonicznej prądu silnika nie uwzględniono wpływu wypierania prądu. W pracy [4] podano zawartości harmonicznych w prądzie stojana silnika indukcyjnego, zasilanego z tyrystorowego komutatora napięcia. Analiza ta bazowała na rozkładzie krzywej prądu, zdjętej oscylograficznie na szereg harmonicznych za pomocą maszyny cyfrowej. Wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych [4] dobrze pokrywają się z przeprowadzoną powyżej analizą teoretyczną.

Np. przy S = 0,05 maksymalna wartość piątej harmonicznej wynosi 0,42 $I_1^{(1)}$, a siódmej harmonicznej 0,15 $I_1^{(1)}$.

W wyniku analizy teoretycznej otrzymano następujące dane:

- dla piątej harmonicznej $I^5_{max} = 0{,}43\ I_1^{(1)}$, (S = 0,04),
- dla siódmej harmonicznej $I^7_{max} = 0{,}14\ I_1^{(1)}$, (S = 0,04).

Wnioski

1. Przy połączeniu uzwojeń stojana w gwiazdę bez przewodu zerowego w prądzie stojana dominują 5 i 7 harmoniczna. Wartość 11 harmonicznej prądu jest mniejsza od 4%.
2. Z podanych zależności widać, że powiększenie prądu stojana przez wyższe harmoniczne przy nastawianiu prędkości obrotowej tyrystorowym komutatorem napięcia nie przewyższa 12%.

3. W sieci zasilającej względna wartość wyższych harmonicznych wprowadzonych przez komutator tyrystorowy jest zazwyczaj znacznie mniejsza, gdyż wartość bazowa prądu o podstawowej częstotliwości zostaje powiększona o pobór prądu pozostałych odbiorników.

LITERATURA

[1] Bułgakow A.A.: Osnowy dynamiki uprawlajemych wentilnych system Izdatielstwo Akademii Nauk SSSR, Moskwa 1963.

[2] Potapow W.: Analiza zawartości harmonicznych w 3-fazowym napięciu wyjściowym komutatora tyrystorowego przy rezystancyjno-indukcyjnym obciążeniu. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka Nr 38, 1973.

[3] Potapow W.: Wyznaczenie charakterystyk silnika indukcyjnego z wirnikiem klatkowym zasilanego poprzez komutator tyrystorowy. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Elektryka Nr 46, 1975.

[4] Grebennikow W.I., Denisow A.A.: Opyt primienienia asichronnych elektropriwodow s fazowym uprawleniem dla chimiczeskich proizwodstw. Izdatielstwo WUZ-ow. Elektromechanika Nr 3, 1973.

Przyjęto do druku w czerwcu 1974 r.

ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТОКА СТАТОРА АСИНХРОННОГО КОРОТКОЗАМКНУТОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПИТАНИИ ОТ ТИРИСТОРНОГО КОММУТАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

Р е з ю м е

В статье приведен гармонический анализ тока статора асинхронного короткозамкнутого двигателя при питании от тиристорного коммутатора напряжения. Рассчитаны зависимости гармоник тока в функции скольжения при различных углах зажигания.

ANALYSIS OF HARMONIC COMPONENTS IN THE STATOR CURRENT OF THE SQUIRREL-CAGE INDUCTION MOTOR SUPPLIED BY A THYRISTOR VOLTAGE COMMUTATOR

S u m m a r y

The contents of harmonic components in the stator current of the squirrel-cage induction motor supplied by a thyristor voltage commutator are analysed. The stator current harmonics in function of rotor slip with excitation angle as parameter are calculated and compared with measured quantities.