

Jerzy ZYGMUNT  
Brunon MAREK  
Cecylia WONS

## FALOWNIK PRĄDOWY JAKO ŹRÓDŁO ZASILANIA SILNIKA INDUKCYJNEGO

Streszczenie. Praca zawiera rozważania dotyczące zastosowania przemienników częstotliwości z falownikami prądowymi do zasilania napędów z maszynami asynchronicznymi klatkowymi. Przedstawiono wyniki pomiarów na modelu laboratoryjnym falownika.

### 1. Wstęp

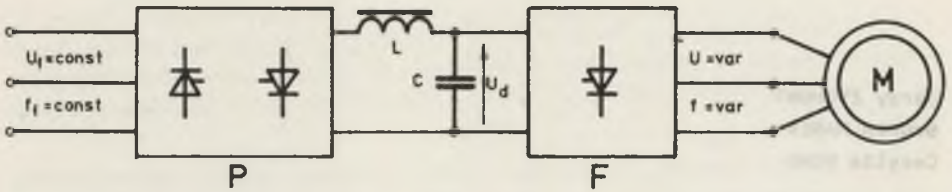
Rozwój techniki półprzewodnikowej i regulacji warunkuje ekonomiczne wykorzystanie maszyn trójfazowych w napędach, gdzie wymagana jest duża zmienność prędkości obrotowej. Maszyny trójfazowe są stosowane tam, gdzie maszyny prądu stałego nie spełniają pewnych wymagań stawianych napędom. Są to np. wymagania odnośnie łatwości konserwacji, możliwości pracy w atmosferze agresywnej lub zagrażającej eksplozją, możliwości osiągnięcia dużych prędkości.

Bezstratna regulacja prędkości w maszynach trójfazowych jest możliwa przy zasilaniu ich zmienną częstotliwością i napięciem regulowanym w zależności od stanu pracy maszyny. Takie warunki zasilania stwarzają przemienniki tyrystorowe, które wytwarzają zmienny system trójfazowy z istniejącej sieci o stałej częstotliwości i napięciu. Istnieje wiele rozwiązań przemienników, które ze względu na zasadę można podzielić na przemienniki bezpośrednie oraz przemienniki z obwodem pośredniczącym prądu stałego.

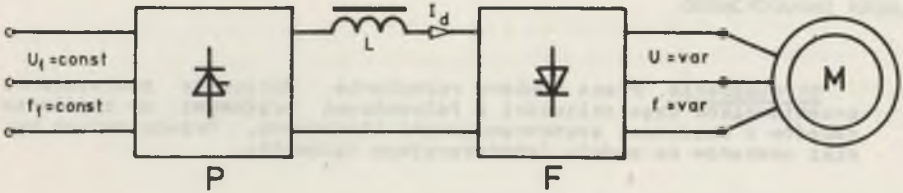
W przemienniku z obwodem pośredniczącym energia odbierana z sieci trójfazowej prądu zmiennego jest przetwarzana na energię prądu stałego, a następnie na system trójfazowy o regulowanej częstotliwości i napięciu.

W zależności od budowy i sposobu regulacji przemienniki pośrednie dzielą się na przemienniki z pośredniczącym obwodem z wymuszonym napięciem (rys. 1a) lub z wymuszonym prądem (rys. 1b). W dalszym ciągu tej pracy zostaną rozpatrzone przemienniki pośrednie jako źródła zasilania silników asynchronicznych.

a)



b)



Rys. 1

a. Schemat przemiennika z falownikiem napięciowym. b. Schemat przemiennika z falownikiem prądowym

## 2. Porównanie własności przemienników z falownikami napięciowymi i prądowymi

W obwodzie pośredniczącym przemiennika jak na rys. 1a na kondensatorze C utrzymuje się zadawane stałe napięcie  $U_d$ , natomiast na rys. 1b indukcyjność L stabilizuje zadawany stały prąd  $I_d$ .

Część przemiennika oznaczona na rys. 1 symbolem F jest odpowiednio falownikiem napięciowym (rys. 1a) bądź prądowym (rys. 1b).

W przemienniku z wymuszonym napięciem w obwodzie pośredniczącym falownik napięciowy wytwarza trójfazowy system napięć prostokątnych, które są podawane na zaciski maszyny M. Prąd silnika jest odpowiedzią na wymuszone napięcie.

Przemiennik częstotliwości z falownikiem napięciowym wg schematu na rys. 1a posiada szereg wad. Są to:

- odkształcony przebieg napięcia i prądu wyjściowego. W systemie sterowania o modulacji szerokości impulsów można uzyskać prawie sinusoidalny kształt prądu;
- ograniczenie mocy przemiennika wynikające z trudności praktycznej realizacji pojemności C (rys. 1a) oraz obwodów komutacyjnych na bardzo duże moce;
- trudne warunki pracy elementów prostownika i falownika przy przeciążeniach i zwarciach;

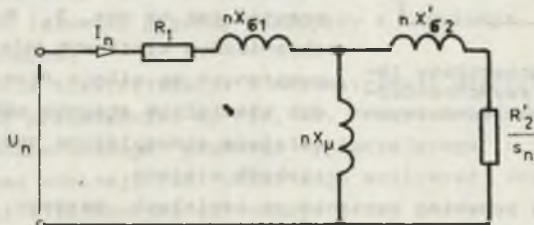
duża złożoność budowy (diody zwrotne, obwody komutacji, dwa prostowniki przy pracy nawrotnej).

W przemienniku z obwodem pośredniczącym z wymuszonym prądem falownik podaje stały prąd  $I_d$  kolejno na trzy fazy silnika asynchronicznego. Tworzy się w ten sposób trójfazowy system prądów przewodowych o przebiegach zbliżonych do trapezowego. Napięcie na zaciskach silnika jest odpowiedzią na wymuszony w każdej fazie prąd.

Przybliżony przebieg prądu jednej fazy (z uwzględnieniem kąta komutacji międzyfazowej  $\lambda$ ) wg szeregu Fouriera wyraża się wzorem:

$$i_R(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{8 \cdot I_d}{\pi \cdot \lambda (2k+1)} \cos(2k+1) \frac{\pi}{2} \sin(2k+1) \frac{\lambda}{2} \sin(2k+1) \omega t$$

Prąd zawiera harmoniczne rzędu 1, 5, 7, 11, 13, 17, 19 itd. Schemat zastępczy jednej fazy silnika asynchronicznego dla  $n$ -tej harmonicznej jest jak na rys. 2.



Rys. 2. Schemat zastępczy jednej fazy silnika asynchronicznego dla  $n$ -tej harmonicznej

Źnaczenia:

$$X_{\sigma 1} = \omega L_{\sigma 1}$$

$$X'_{\sigma 2} = \omega L'_{\sigma 2} \quad X_{\mu} = \omega L_{\mu}$$

$\omega$  - prędkość kątowa pola stojana,

$L_{\sigma 1}$  - indukcyjność rozproszenia stojana,

$L'_{\sigma 2}$  - indukcyjność rozproszenia wirnika sprowadzona na stronę stojana,

$R_1$  - oporność uzwojeń stojana,

$R'_2$  - oporność uzwojeń wirnika sprowadzona na stronę stojana,

$L_{\mu}$  - indukcyjność magnesująca maszyny.

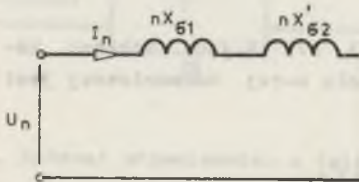
Przy założeniu  $X_{\mu} \gg X'_{\sigma 2}$  impedancję zastępczą jednej fazy silnika dla  $n$ -tej harmonicznej można zapisać:

$$Z_n = R_1 + \frac{n^2 \tau^2 S_n^2}{1+n^2 \tau^2 S_n^2} \cdot \frac{R_2'}{S_n} + jn(x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2} + \frac{x_M}{1+n^2 \tau^2 S_n^2})$$

gdzie:

$$\tau = \frac{x_M}{R_2}$$

Dla harmonicznej podstawowej późlizg  $S_1 \approx 0$ , natomiast dla wyższych harmonicznych  $S_n \rightarrow 1$ . Dla wyższych harmonicznych silnik pracuje więc w stanie zwarcia.



Rys. 3. Schemat uproszczony jednej fazy silnika asynchronicznego dla wyższych harmonicznych

Pierwsza harmoniczna prądu daje na zaciskach maszyny sinusoidę napięcia o częstotliwości wyjściowej falownika prądowego  $f$ . Dla wyższych harmonicznych, przy założeniu  $R_1 + R_2' \ll n(x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2})$ , schemat zastępczy dla jednej fazy można przyjąć jak na rys. 3. W silniku asynchronicznym klatkowym pola wyższych harmonicznych są silnie tłumione i w bardzo niewielkim stopniu odkształcają powstające sinusoidalne napięcia na zaciskach stojana.

Na sinusoidalny przebieg napięcia na zaciskach maszyny nakładają się przebiegi komutacyjne tłumione. Analizę tych przebiegów obejmuje praca [4].

Do zalet przemiennika z falownikiem prądowym można zaliczyć:

- możliwość zwrotu energii do sieci przy pracy prądnicowej bądź hamowaniu maszyny bez instalacji dodatkowego prostownika;
- nie występowanie przeciążeń prądowych elementów części energetycznej przemiennika;
- brak ograniczeń mocy przemiennika ze strony obwodu pośredniczącego (możliwość technicznej realizacji dławników bardzo dużej mocy);
- prawie sinusoidalny kształt napięcia na zaciskach maszyny;
- możliwość rozwiązania falownika prądowego, charakteryzującego się dużą prostotą budowy części energetycznej.

Przemienniki z falownikami prądowymi mają również wady; są to:

- pulsacja momentu obrotowego przy rozwiązaniu klasycznym falownika prądowego [1]. Wadę tę można usunąć stosując np. opracowany przez firmę "Siemens" system sterowania "TRANSVEKTOR" [3] lub wprowadzając modulację impulsową prądów fazowych [5];

- bardziej skomplikowany system sterowania i regulacji falownika prądowego (konieczność istnienia pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego);
- konieczność stosowania tyrystorów i diod o wyższej klasie napięciowej ze względu na występujące przepięcia komutacyjne (szczególnie duże w warunkach awaryjnych).

Biorąc pod uwagę obecny stan wykorzystania przemienników tyrystorowych w napędach krajowych, należy stwierdzić, że znacznie bardziej rozpowszechnione są odmiany z falownikiem napięciowym, natomiast z falownikiem prądowym są w fazie prób.

Powyższe zestawienie charakterystyk jednych i drugich narzuca wniospek, że celowe są prace doświadczalne i wdrożeniowe z przemiennikami zawierającymi falownik prądowy.

### 3. Opis działania falownika prądowego

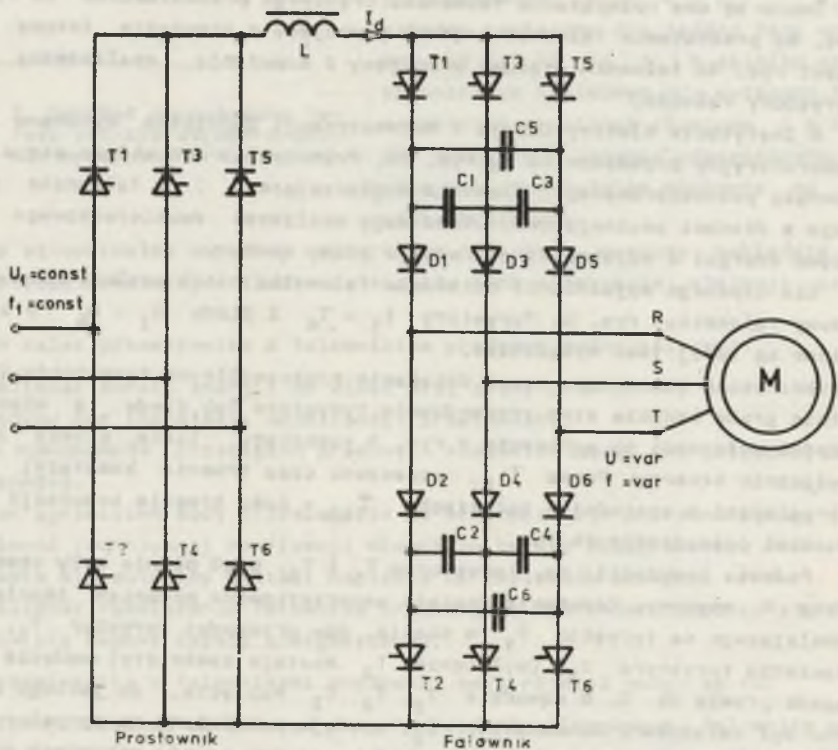
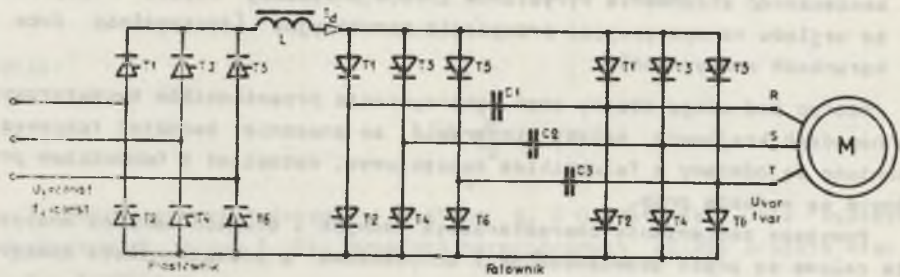
Znane są dwa rozwiązania falownika prądowego przedstawione na rys. 4. Rys. 4a przedstawia falownik prądowy pracujący z komutacją fazową, natomiast rys. 4b falownik prądowy pracujący z komutacją realizowaną przez tyrystory robocze.

W Instytucie Elektryfikacji i Automatyzacji Górnictwa wykonano model laboratoryjny przemiennika wg rys. 4b. Przemiennik ten składa się z prostownika pełnosterowanego, dławnika wygładzającego  $L$  i falownika prądowego z diodami odcinającymi. Układ daje możliwość dwukierunkowego przepływu energii w zależności od rodzaju pracy maszyny.

Dla lepszego wyjaśnienia działania falownika niech posłuży schemat kluczowy falownika, rys. 5. Tyrystory  $T_1 - T_6$  i diody  $D_1 - D_6$  przedstawione są tutaj jako wyłączniki.

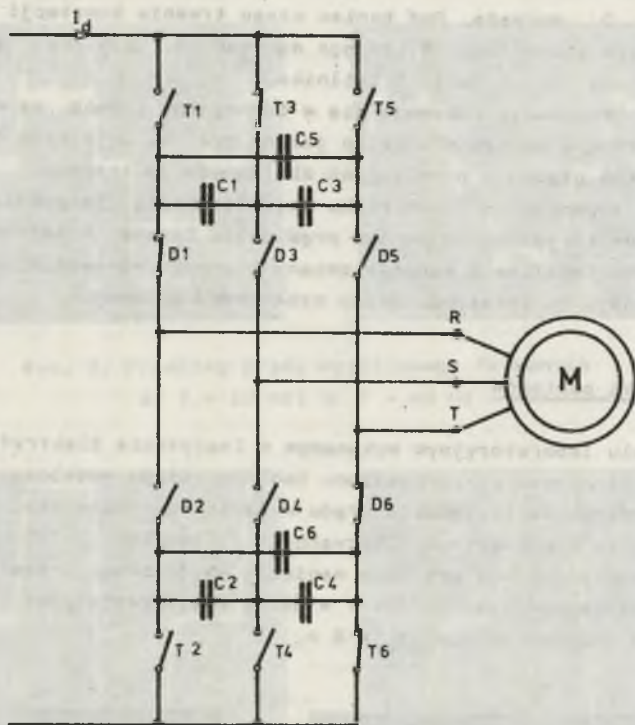
Na rys. 6 zaznaczono czasy działania poszczególnych tyrystorów i diod. Linia gruba oznacza stan przewodzenia tyrystora lub diody, a więc odpowiedni wyłącznik na schemacie z rys. 5 zamknięty, linia cienka oznacza wyłącznik otwarty. Przez  $\tau_{kT}$  oznaczono czas trwania komutacji między tyrystorami w sąsiednich gałęziach,  $\tau_{kD}$  - czas trwania komutacji między diodami poszczególnych faz.

Podczas komutacji, np. tyrystorów  $T_1$  i  $T_3$ , prąd płynie cały czas przez fazę  $R$  maszyny. Komutacja zostaje zapoczątkowana podaniem impulsu wyzwalającego na tyrystor  $T_3$  w czasie, gdy przewodzi tyrystor  $T_1$ . Po zamknięciu tyrystora  $T_3$  (wyłącznik  $T_3$  zostaje zamknięty) napięcie na nim spada prawie do 0. W obwodzie  $T_1, T_3, C_1$  napięcie, do którego uprzednio był załadowany kondensator  $C_1$ , zostaje przyłożone na tyrystor  $T_1$  w kierunku zaporowym. Prąd tyrystora  $T_1$  zaczyna maleć, natomiast tyrystora  $T_3$  wzrasta tak, że suma ich daje stały prąd  $I_d$  płynący w obwodzie pośredniczącym. Dioda  $D_1$  przewodzi prąd  $I_d$  do momentu, aż napięcie na niej osiągnie wartość 0. Prąd diody  $D_1$  zaczyna wtedy maleć, natomiast

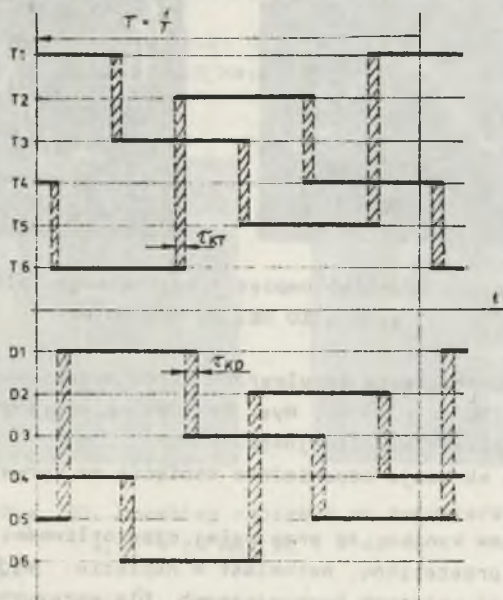


Rys. 4. Schematy przemienników z falownikami prądowymi

a. Falownik z komutacją fazową. b. Falownik z komutacją realizowaną przez tyrystory robocze



Rys. 5. Schemat kluczowy układu falownika prądowego



Rys. 6. Czasy działania tyrystorów i diod falownika prądowego

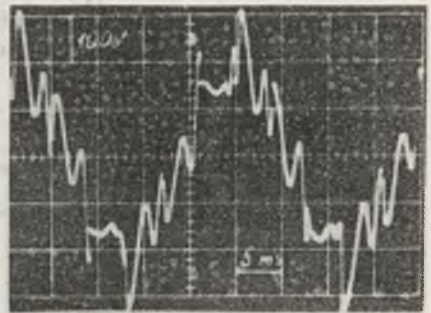
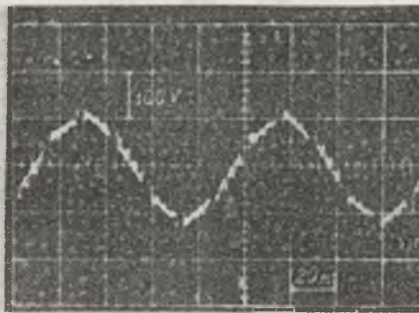
prąd diody  $D_3$  wzrasta. Pod koniec czasu trwania komutacji  $\tau_{kD}$  prąd diody  $D_1$ , a tym samym fazy R, osiąga wartość 0. Cały prąd  $I_d$  płynie wtedy przez diodę  $D_3$  i fazę S silnika.

Zjawiska komutacji odbywają się w identyczny sposób we wszystkich fazach i następują po sobie kolejno jak na rys. 6. Daje to w rezultacie trójfazowy system prądów o przebiegach zbliżonych do trapezu. Częstotliwość wyjściowa falownika  $f$  jest równa częstotliwości podawania impulsów na poszczególne tyrystory falownika prądowego. Zmiana kolejności podawania impulsów jest możliwa i oznacza zmianę kierunku wirowania pola stojana, tym samym daje to możliwość pracy czterokwadrantowej.

#### 4. Wyniki pomiarów

Na modelu laboratoryjnym wykonanym w Instytucie Elektryfikacji i Automatykacji Górniczego przeprowadzono badania układu modelowego. Zdjęto oscylogramy przebiegów napięcia i prądu wyjściowego falownika, napięcia na kondensatorze komutacyjnym i tyrystorze falownika.

Rys. 7a przedstawia przebieg napięcia wyjściowego przemiennika dla  $f = 10$  Hz, natomiast rys. 7b dla  $f = 40$  Hz przy praktycznie stałym prądzie w obwodzie pośredniczącym  $I_d = 8$  A.



Rys. 7. Przebieg napięcia wyjściowego falownika  
a.  $f = 10$  Hz; b.  $f = 40$  Hz

Rys. 8a i b przedstawia oscylogramy prądu wyjściowego dla częstotliwości odpowiednio 10 Hz i 40 Hz. Rys. 9a i 9b są oscylogramami przebiegów napięcia kondensatora komutacyjnego.

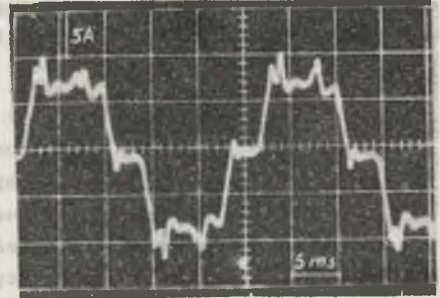
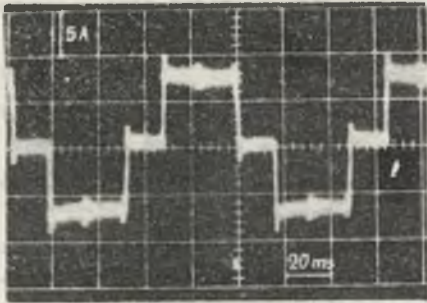
Rys. 10a i b obrazuje odpowiednio napięcia na tyrystorze dla  $f = 10$  Hz i  $f = 40$  Hz.

Z oscylogramów wynika, że przy małej częstotliwości przebieg prądu ma kształt prawie prostokątny, natomiast w napięciu wyjściowym występuje znaczna zawartość wyższych harmonicznych. Dla wyższych częstotliwości u-



a)

b)

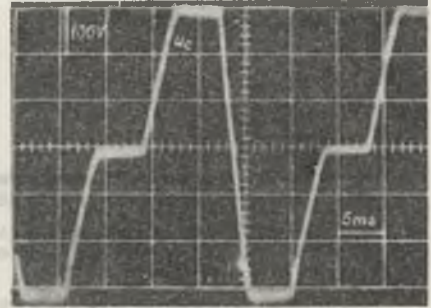
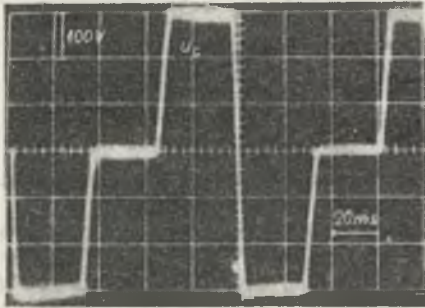


Rys. 8. Przebieg prądu wyjściowego falownika

a.  $f = 10$  Hz; b.  $f = 40$  Hz

a)

b)

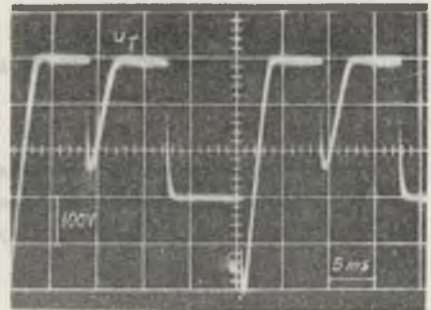
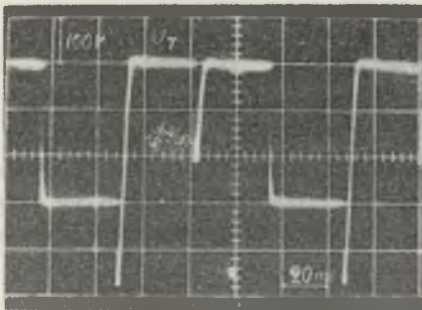


Rys. 9. Przebieg napięcia na kondensatorze komutacyjnym

a.  $f = 10$  Hz; b.  $f = 40$  Hz

a)

b)



Rys. 10. Przebieg napięcia na tyrystorze

a.  $f = 10$  Hz; b.  $f = 40$  Hz

dział przepięć komutacyjnych maleje, a przebieg prądu staje się zbliżony do trapezowego. Przy tym samym prądzie maksymalne wartości napięć na kondensatorach komutacyjnych i tyrystorach są tego samego rzędu.

### 5. Wnioski końcowe

Istnieją możliwości zastosowania przemienników z falownikami prądowymi w górnictwie, szczególnie do napędów wentylatorów.

Niewielki dotychczasowy stopień wykorzystania tego typu urządzeń w przemyśle krajowym wynika z ostrzejszych wymagań stawianych elementom części energetycznej i układom sterowania przemiennika oraz z braku doświadczenia przy projektowaniu i konstruowaniu tego typu układów.

W Instytucie Elektryfikacji i Automatykacji Górnictwa prowadzone są prace badawcze nad zastosowaniem przemienników z falownikiem prądowym jako źródeł zasilania silników indukcyjnych. Napędy te mogą znaleźć zastosowanie w górnictwie.

### LITERATURA

- [1] Naumin D.: Berechnung des Drehmomentverlaufs einer Asynchronmaschine bei Speisung mit Rechteckströmen. ATZ-A 90 (1969), 179-182.
- [2] Farrer W., Miskin J.D.: Quasi-sine-wave fully regenerative inverter. Proceedings the Institution of Electrical Engineers (1973) 969-976.
- [3] Blaschke F.: Das Prinzip der Feldorientierung die Grundlage für die TRANSVEKTOR-Regelung von Drehfeldmaschinen. Siemens-Zeitschrift 45 (1971), 757-764.
- [4] Kempski W.: Procesy komutacyjne falowników prądowych o komutacji fazowej i międzyfazowej. ZN Pol. Śl. Seria Górnictwo z. 82, s. 61-72.
- [5] Lineau W., Müller-Hellman A.: Drehstromtraktionsantrieb mit stromeinprägenden Zwischenkreisrichter. ETZ-A 97 (1976), 84-86.

### ТОКОВЫЙ ИНВЕРТОР КАК ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ИНДУКЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

#### Резюме

В работе помещаются рассуждения касающиеся применения преобразователей частоты с токовыми инверторами для питания приводов с асинхронными клеточными машинами. Представляются результаты измерений на лабораторной модели инвертора.

A CURRENT INVERTER AS A FEEDER FOR AN INDUCTION MOTOR

Summary

The paper considers the application of frequency converters with current inverters to drive squirrel cage asynchronous motors. Laboratory model tests of an inverter have been presented.