

BOGUSŁAW GRZESIK  
HENRYK WOSIŃSKI

Instytut Podstawowych Problemów  
Elektrotechniki i Energoelektroniki

PROBLEMY FALOWNIKÓW Z MODULACJĄ SZEROKOŚCI IMPULSÓW  
PRZEZNACZONYCH DO ZASILANIA SILNIKÓW ASYNCHRONICZNYCH

Streszczenie. W artykule podano podział, własności i wymagania stawiane falownikom przeznaczonym do zasilania trójfazowych silników asynchronicznych. Specjalną uwagę poświęcono falownikom o wewnętrznej komutacji impulsowej, kształtującym przebieg napięcia wyjściowego o zmiennej częstotliwości metodą modulacji szerokości impulsów. Omówiono problemy dowodów komutacji w tych falownikach i różne sposoby formowania kształtu napięcia wyjściowego.

Wstęp

Statozne, półprzewodnikowe przemienniki częstotliwości umożliwiły opracowanie ekonomicznych układów napędowych z silnikami asynchronicznymi prądu przemiennego o szerokim zakresie zmian prędkości obrotowej i o dobrych wskaźnikach ekonomicznych. Różnorodne układy przemienników częstotliwości są rezultatem szerokich badań w tej dziedzinie, a jednym z ważniejszych problemów napędu elektrycznego jest wybór układu przemiennika częstotliwości stosownie do wymagań urządzenia napędzanego.

Wymagania odnoszące się do źródła napięcia o zmiennej częstotliwości (przemiennika częstotliwości), wynikające z analizy częstotliwościowej regulacji prędkości obrotowej silnika asynchronicznego w stanach ustalonych i przejściowych, można sformułować następująco:

a) amplituda i częstotliwość napięcia wyjściowego przemiennika powinny się zmieniać w wymaganym zakresie w sposób płynny, bezinercyjny i niezależnie od siebie,

b) kształt napięcia wyjściowego powinien być sinusoidalny, szczególnie przy częstotliwościach wyjściowych bliskich zeru,

c) przemiennik częstotliwości powinien zapewnić dwustronny przepływ energii pomiędzy silnikiem a siecią zasilającą.

### 1. Klasyfikacja stycznych przemienników częstotliwości z pośredniozącym obwodem prądu stałego

Na rysunku 1 przedstawiono systematykę znanych wielofazowych układów przemienników częstotliwości zasilanych z sieci przemysłowej prądu przemiennego. Szczegółowy podział dokonano jedynie dla przemienników częstotliwości z pośredniozącym obwodem prądu stałego, zawierającym falowniki napięcia.

Przemienniki częstotliwości z pośredniozącym obwodem prądu stałego składają się z prostownika i falownika o komutacji wewnętrznej. Ze względu na sposób komutacji wewnętrznej rozróżnia się falowniki o komutacji wymuszonej i sztucznej. Falowniki o komutacji wymuszonej zawierają zawory w pełni sterowalne, którymi są tranzystory lub tyrystory wyłączalne. Przemienniki częstotliwości oparte na tych falownikach buduje się jedynie dla mocy dochozących do kilku kilowatów, ze względu na ograniczoną moc produkowanych obecnie zaworów w pełni sterowalnych.

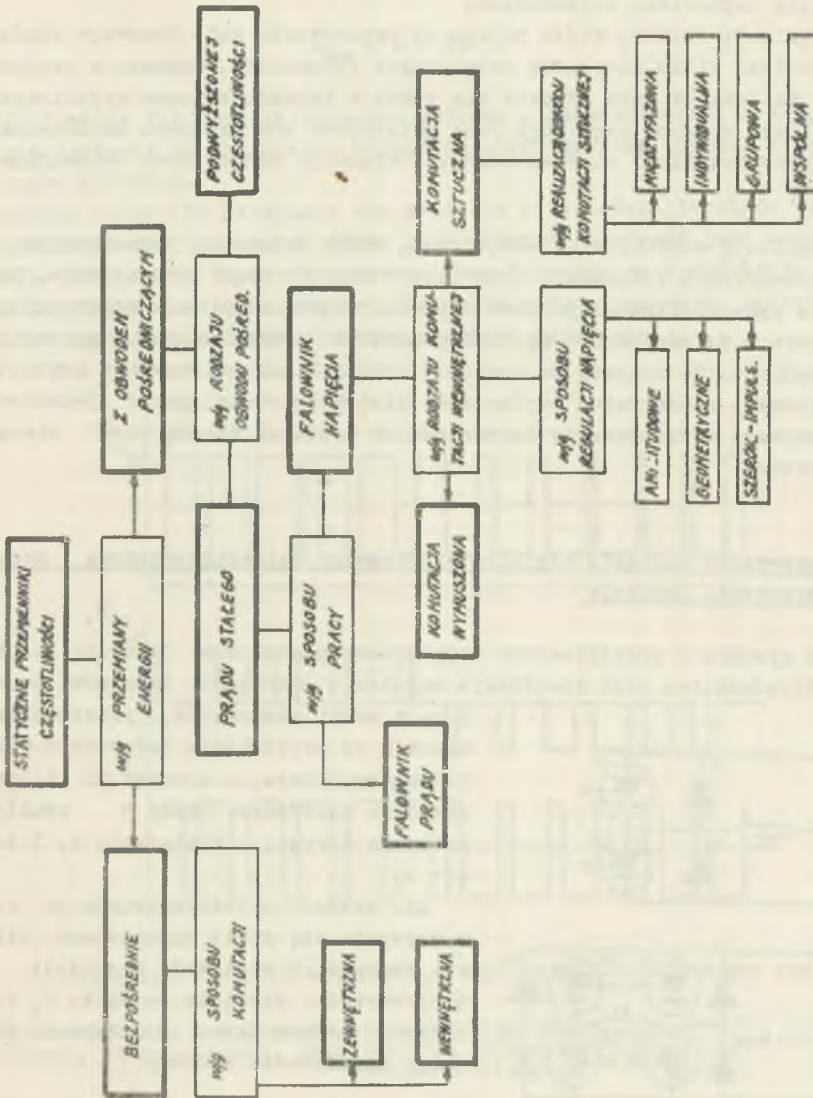
W napędzie elektrycznym o większej mocy stosuje się jedynie falowniki z zaworami nie w pełni sterowanymi – tyrystorami. Falowniki te muszą więc zawierać dodatkowe elementy tworzące obwody komutacji sztucznej, których celem jest wyłączanie tyrystorów. Obwody komutacji sztucznej zawierają najczęściej dodatkowe elementy czynne (tranzystory, tyrystory) i bierne (kondensatory, cewki).

Wielofazowe falowniki o komutacji sztucznej dzieli się, ze względu na realizację obwodu komutacji, na falowniki o komutacji międzyfazowej, indywidualnej, grupowej i wspólnej.

Najprostsze falowniki trójfazowe zawierają obwody komutacji międzyfazowej. Falowniki te nie posiadają tyrystorów pomocniczych, a ich rolę dla każdej z faz falownika spełniają tyrystory robocze pozostałych, nie przewodzących w danej chwili faz. Wyłączenie tyrystora roboczego jednej fazy jest związane z włączeniem tyrystora roboczego innej fazy. Kąt przewodzenia dla każdego z tyrystorów roboczych wynosi  $\frac{2\pi}{3}$ , w związku z czym kształt napięcia wyjściowego zmienia się zależnie od współczynnika mocy obciążenia [2]. Falowniki pozostałych trzech grup, w których kąt przewodzenia tyrystora roboczego może wynosić  $\pi$ , nie posiadają tej wady. Falowniki te oprócz tyrystorów roboczych zawierają w obwodach komutacji sztucznej mniejszą lub większą ilość tyrystorów pomocniczych, cewek i kondensatorów [2].

Regulacja wartości amplitudy napięcia wyjściowego przemiennika częstotliwości stanowi ważne zagadnienie. Rozróżnia się następujące sposoby regulacji:

- a) regulację amplitudową, która polega na zastosowaniu pośredniożącego obwodu prądu stałego z regulowanym napięciem (prostownik sterowany lub szerokościowo-impulsowy regulator napięcia włączony za prostownikiem niesterowanym). Filtr włączony na wejściu falownika wprowadza w tym



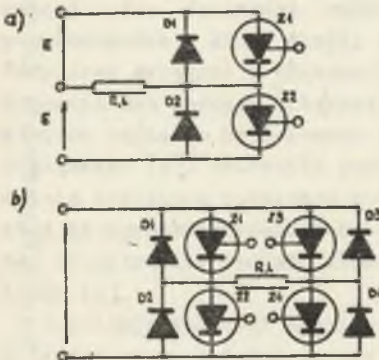
Rys. 1. Klasyfikacja statycznych przebiegów częstotliwości zasilanych z sieci przemysłowej

przypadku bezwładność w obwód regulacji amplitudy napięcia wyjściowego falownika. Dodatkową wadą tego sposobu regulacji napięcia jest konieczność zwiększenia mocy elementów w węzłach komutacji sztucznej, przy niskich napięciach wyjściowych;

- b) regulację fazową, która polega na przesuwaniu kąta fazowego między napięciami kilku szeregowo połączonych falowników. Sumowanie napięć kilku falowników może odbywać się także w transformatorze wyjściowym. Wadą tego sposobu regulacji jest zwiększona moc urządzeń zainstalowanych w przemienniku i nierównomierne obciążenie oddzielnych falowników [1], [2],
- o) regulację szerokościowo-impulsową, która polega na jednokrotnym lub wielokrotnym wyłączeniu tyrystora w okresie jego przewodzenia. Regulacja szerokościowo-impulsowa napięcia wyjściowego może mieć miejsce jedynie w falownikach z węzłami komutacji indywidualnej, grupowej lub wspólnej. Ze względu na obecność wyższych harmonicznych w napięciu wyjściowym, wielokrotne wyłączenie jest korzystniejsze od jednokrotnego ponieważ odfiltrowanie harmonicznych wyższych rzędów jest stosunkowo proste.

## 2. Formowanie kształtu napięcia wyjściowego falownika poprzez modulację szerokości impulsów

Na rysunku 2 przedstawiono najprostszy jednofazowy falownik napięcia, w którym możliwa jest realizacja modulacji szerokości impulsów, a zawory Z są w pełni sterowalne, jednokierunkowe. Rysunek 2a przedstawia falownik w układzie jednokierunkowym, a rysunek 2b falownik w układzie mostkowym. Diody D umożliwiają przepływ energii z obciążenia R, L do źródła E.



Rys. 2. Schemat ideowy jednofazowego falownika napięcia w układzie

a) jednokierunkowym, b) mostkowym

Dla układów przedstawionych na rysunku 2 uzyskuje się przez odpowiednie sterowanie zaworami Z możliwość regulacji średniej wartości napięcia za okres  $T_n$  częstotliwości nośnej (rys. 3a). Wartość średnią można przedstawić wzorem:

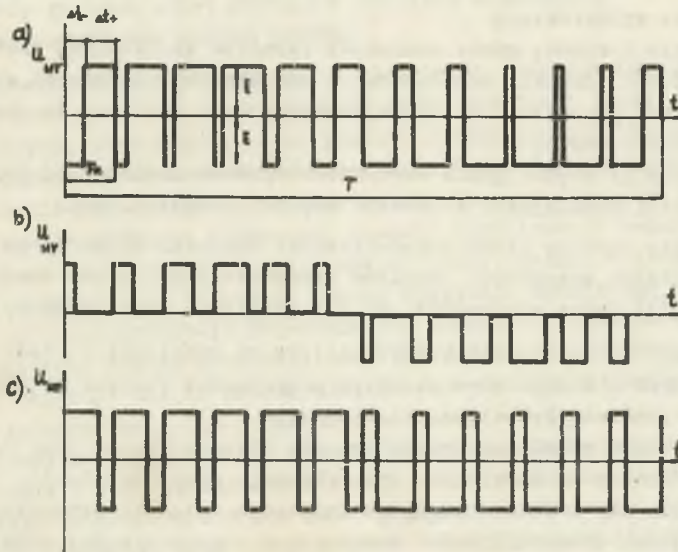
$$U_{sr} = E \frac{\Delta t_+ - \Delta t_-}{T_n} \quad (1)$$

Zmieniająco w czasie stosunek  $\Delta t_+$  do  $\Delta t_-$  według dowolnej funkcji modulującej  $F(t)$  uzyskuje się na obciążeniu napięcie o wartości średniej za okres  $T$ :

$$U_{\text{śr}} = E \cdot F(t). \quad (2)$$

Jeżeli funkcja  $F(t)$  będzie okresowo zmienna o częstotliwości  $f = \frac{1}{T}$ , to średnie napięcie na obciążeniu będzie również okresowo zmienne o tej samej częstotliwości.

Na wyjściu falownika otrzymuje się napięcie w kształcie impulsów prostokątnych dodatnich i ujemnych (rys. 3a), których szerokość jest modulowana funkcją  $F(t)$ . Taki falownik nazywany jest falownikiem z modulacją szerokości impulsów. W obrębie takiego falownika można regulować jednocześnie wartości amplitudy i częstotliwości napięcia wyjściowego.



Rys. 3. Przebiegi napięcia wyjściowego falownika jednofazowego dla modulacji:

a) sinusoidalnej, dwupolarnej, jednostronnej przedniego zbocza, b) sinusoidalnej, jednopolarnej, jednostronnej tylnego zbocza, c) prostokątnej, dwupolarnej

Układ jednokierunkowy falownika (rys. 2a) umożliwia jedynie realizację modulacji dwupolarnej (rys. 3a), natomiast układ mostkowy (rys. 2b) dwupolarnej i jednopolarnej (rys. 3b). Układy mostkowe wymagają jednak dwa razy większej liczby zaworów. W falowniku trójfazowym rezultaty zbliżone do modulacji jednopolarnej w kształcie napięcia międzyfazowego, uzyskuje się na bazie układów jednofazowych jednokierunkowych dla każdej fazy [1].

W omawianych falownikach przeznaczonych do zasilania silników asynchronicznych, jako funkcji modulujących  $F(t)$ , używa się najczęściej przebiegów prostokątnych (rys. 3a) lub sinusoidalnych (rys. 3a,b). W tym ostatnim przypadku funkcja  $F(t)$  przybiera postać:

$$F(t) = \gamma \sin \Omega t, \quad (3)$$

gdzie

$\Omega$  - pulsacja częstotliwości modulacji  $\Omega = \frac{2\pi}{T}$ ,

$\gamma$  - głębokość modulacji określająca amplitudę napięcia wyjściowego.

Można wyróżnić następujące sposoby modulacji szerokości impulsów:

- a) modulacja jednostronna przedniego lub tylnego zbocza dodatniego impulsu napięcia wyjściowego;
- b) modulacja dwustronna przedniego i tylnego zbocza dodatniego impulsu napięcia wyjściowego;
- c) modulacja I rzędu, gdzie szerokość impulsów uzależniona jest jedynie od wartości funkcji modulującej w ustalonych dyskretnych chwilach i nie zależy od zmiany tej funkcji między tymi chwilami (w okresie częstotliwości nośnej);
- d) modulacja II rzędu, gdzie szerokość impulsów uzależniona jest od zmiany funkcji modulującej w okresie częstotliwości nośnej.

Na podstawie analizy widma częstotliwości napięcia wyjściowego falowników z modulacją szerokości impulsów przeprowadzonej przez niektórych autorów [1] [3] można stwierdzić, że dla modulacji sinusoidalnej:

- a) modulacja II rzędu jest korzystniejsza od modulacji I rzędu ze względu na brak w widmie harmonicznych o krotności funkcji modulującej oraz na jej prostszą techniczną realizację;
- b) jednostronna modulacja przedniego lub tylnego zbocza jest równoznaczna
- c) w porównaniu z modulacją jednostronną przy modulacji dwustronnej zmniejsza się w widmie względna amplituda wyższych harmonicznych kombinacyjnych (częstotliwości modulacji i częstotliwości nośnej). Techniczna realizacja sterowania modulacji jednostronnej jest jednak prostsza.

Widmo częstotliwości prądu fazowego silnika asynchronicznego przy zasilaniu go napięciem odkształconym zależy od układu połączeń silnika (trójkąt, gwiazda bez i z przewodem zerowym).

### 3. Komutacja w falownikach z modulacją szerokości impulsów

Falowniki napięcia buduje się obecnie na tyrystorach (zaworach nie w pełni sterowalnych) z dodatkowymi obwodami komutacji sztucznej. Tyrystor roboczy wraz z obwodem komutacji sztucznej stanowią odpowiednik zaworu jednokierunkowego w pełni sterowalnego.

Od obwodów komutacji sztucznej wymaga się aby:

- a) nie magazynowały energii w elementach biernych,
- b) zapewniały niezależność procesów komutacji od rodzaju i wielkości obciążenia,
- c) nie wносиły deformacji w kształt napięcia wyjściowego w okresie komutacji,
- d) zabezpieczały poprawną pracę falownika przy dowolnym kierunku przepływu energii w falowniku,
- e) zapewniały jaknajmniejszy czas trwania komutacji,
- f) zapewniały minimum strat energii w procesie komutacji,
- g) charakteryzowały się prostą budową.

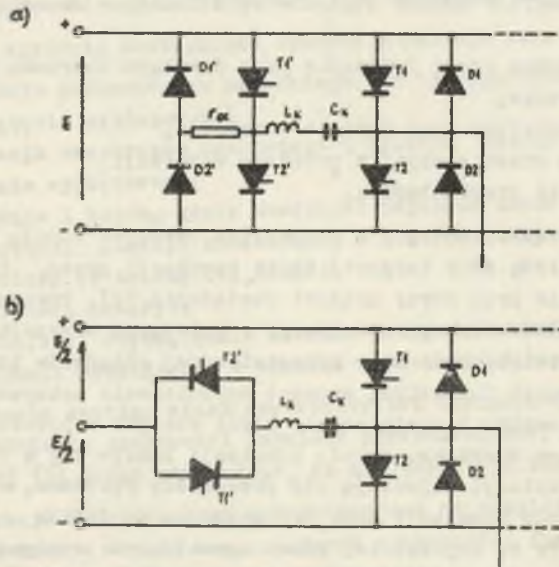
Magazynowanie zbyt dużej energii w elementach biernych obwodu komutacji spowodowane jest tym, że w końcowej fazie komutacji przez indukcyjność komutacyjną płynie prąd równy prądowi obciążenia [2]. Powoduje to dodatkowe ładowanie kondensatora komutacyjnego w kolejnych okresach komutacji, a w rezultacie powiększenie mocy zainstalowanej elementów biernych i czynnych obwodów głównych falownika, znaczne ograniczenie maksymalnej częstotliwości pracy falownika i powiększenie strat energii w procesie komutacji. Aby uniknąć tego zjawiska, obwody komutacji buduje się w ten sposób, że w procesie komutacji pojawiają się przedziały czasowe, w których zbyt duża energia obwodu komutacji może być zwracana do źródła zasilania falownika. Uzyskuje się to najczęściej przez ograniczenie maksymalnego napięcia na indukcyjności lub pojemności komutacyjnej (rys. 4a) oraz przez kolejno narzucone warunki pracy obwodu: ładowanie kondensatora komutacyjnego ze źródła i jego rozładowanie przez źródło zasilania (rys. 4b). Innym sposobem jest zastosowanie w obwodzie komutacyjnym elementu indukcyjnego nieliniowego, mającego przy końcu procesu komutacji indukcyjność praktycznie równą zeru. Realizowane to jest przez włączenie w obwód komutacji cewki z rdzeniem z materiału o prostokątnej charakterystyce magnesowania.

Niezależność procesu komutacji od obciążenia uzyskuje się drogą ładowania i rozładowania kondensatora komutacyjnego nie tylko prądem obciążenia falownika, ale także dodatkowym prądem mogącym płynąć w obwodzie niezależnym od obciążenia.

Jednym z ważniejszych wymagań odnośnie obwodów komutacji w falownikach z modulacją szerokości impulsów jest zapewnienie jaknajmniejszego czasu trwania komutacji oraz minimalnych strat energii, ponieważ pracują one ze stosunkowo wysoką częstotliwością (częstotliwością nośną). Im mniejszy bę-

dzie czas trwania komutacji, tym bardziej można zwiększyć częstotliwość nośną i uzyskać większą maksymalną głębokość regulacji  $\gamma_{\max}$ . Na wyjściu falownika uzyska się wtedy większą maksymalną amplitudę pierwszej harmonicznej napięcia, a krzywa prądu fazowego obciążenia rezystancyjno-indukcyjnego będzie mniej odkształcona.

Jak już wspomniano, w falownikach z modulacją szerokości impulsów mogą być stosowane obwody komutacji indywidualnej, grupowej i wspólnej. Przy pierwszym rozwiązaniu obwodu komutacji falownik jest najbardziej zbliżony do falownika zbudowanego przy pomocy zaworów w pełni sterowalnych, ponieważ każdy tyrystor roboczy posiada własne urządzenie komutujące. Ponieważ



Rys. 4. Schematy ideowe falownika z grupowymi obwodami komutacji sztucznej (dla 1 fazy)

układy trójfazowe falowników buduje się najczęściej jako układy dwukierunkowe (mostkowe) (6 tyristorów roboczych i 6 diod mocy zwrotnej) liczba elementów komutacyjnych przy zastosowaniu obwodów komutacji indywidualnej jest duża, a budowa skomplikowana. Najmniejszą ilość elementów komutacji ma falownik z obwodem komutacji wspólnej dla wszystkich trzech faz, jednak w tym wypadku niemożliwa jest praca falownika z dwustronną modulacją szerokości impulsów.

Najczęściej falowniki z modulacją szerokości impulsów posiadają grupowe obwody komutacji sztucznej. Na każdą fazę napięcia wyjściowego przypada jeden obwód komutacji, który przez odpowiednie sterowanie może kolejno wyłączać tyrystor grupy katodowej i anodowej danej fazy. Dwa rodzaje takich obwodów przedstawia rysunek 4 (pokazano jedną fazę falownika).



Charakterystyczne własności obwodów komutacji jak: czas komutacji, straty energii, moc zainstalowanych elementów biernych i czynnych, zależą od własności dynamicznych tyrystora i sposobu sterowania tyrystorów pomocniczych. Wymagania stawiane tyrystorom pod względem ich własności dynamicznych w falownikach z modulacją szerokości impulsów są stosunkowo wysokie w odniesieniu do innych rodzajów falowników.

#### 4. Zagadnienia związane z budową i sterowaniem falowników z modulacją szerokości impulsów

Realizacja układów częstotliwościowej regulacji prędkości obrotowej silników asynchronicznych prądu przemiennego wymaga rozwiązania następujących ogólnie sformułowanych problemów:

1. określenie własności eksploatacyjnych silników asynchronicznych przy zasilaniu z przemienników częstotliwości, a w rezultacie sformułowanie potrzeb dla ich wyjściowych parametrów (zakresu regulacji napięcia i częstotliwości, dopuszczalnej deformacji kształtu krzywej napięcia wyjściowego, wzajemnych związków między częstotliwością a amplitudą napięcia wyjściowego w zależności od zadanego zakresu regulacji prędkości obrotowej, charakteru obciążenia i wymaganych własności dynamicznych napędu);
2. opracowania teoretycznego i badania praktycznego obwodów głównych i sterowniczych różnych rodzajów tyrystorowych przemienników częstotliwości;
3. wszechstronnego badania układów napędowych celem wyboru właściwych obwodów sprzężeń zwrotnych dla formowania zadanych charakterystyk statycznych, dynamicznych i energetycznych systemu napędowego oraz porównania celowości zastosowań przemienników częstotliwości różnych typów.

Pomimo prowadzenia szerokiego zakresu badań, przez wiele instytucji, wszystkie te problemy nie zostały jeszcze do końca rozwiązane i wyjaśnione, a szczególnie dwa ostatnie. Dotyczy to głównie przemienników częstotliwości z falownikami z modulacją szerokości impulsów, które są najbardziej złożone, niemniej których możliwości pracy czynią je najbardziej uniwersalnymi w przypadku napędu elektrycznego o szerokim zakresie regulacji prędkości obrotowej.

Zagadnienia dotyczące racjonalnej budowy i sterowania falowników z modulacją szerokości impulsów wiążą się nierozzerwalnie z przeznaczeniem danego przemiennika częstotliwości, a więc z wymaganiami stawianymi układowi napędowemu jako całości.

Na wyjściowe parametry przemienników częstotliwości z modulacją szerokości impulsów można wpływać przez odpowiedni dobór:

- rodzaju funkcji modulującej (sinusoidalna, prostokątna lub inna),
- rzędu i sposobu modulacji szerokości impulsów (I lub II rzędu, jedno- lub dwustronna, jedno lub dwupolarna),
- układu połączeń falownika (jednokierunkowy lub mostkowy),
- układu połączeń faz uzwojenia stojana silnika asynchronicznego (gwiazda lub trójkąt),
- częstotliwości nośnej (może być stała lub zmieniać się płynnie względnie skokowo w zależności od częstotliwości wyjściowej),
- rodzaju obwodu komutacji i sposobu jego sterowania.

Ograniczenia w doborze niektórych przedstawionych powyżej rozwiązań narzucają się przez ich wzajemne związki oraz przez własności dynamiczne tyrystorów. Aktualne więc jest zagadnienie optymalnego doboru wymienionych czynników w zależności od różnych kryteriów, których kolejność wg ważności narzucona jest przez układ napędowy.

#### LITERATURA

1. SCHÖBUNG A., STEMLER H. - Gelegelter Drehstrom-Umkehrantrieb mit gesteuertem Umrichter nach dem Unterschwingungsverfahren, Brown Boveri Mitt 1964 nr 8/9.
2. СИТНИК Н.Н. - Автономные инверторы с отделенными от нагрузки конденсаторами, Энергия, Москва 1968.
3. III Międzynarodowa Konferencja Nauk.-Techn. Zautomatyzowanego Napędu - materiały - Praga 1971.
4. Преобразовательная техника, Новосибирский Институт Электротехники 1968.
5. БУЛГАКОВ А.А. - Частотное управление асинхронными электродвигателями, Наука, Москва 1966.
6. ABRAHAM L., HEUMANN K., KOPPELMANN F. - Wechselrichter zur Drehzahlsteuerung von Käfigläufermotoren, AEG Mitt. 1964, 1/2.

Przyjęto do druku w styczniu 1972 r.

ПРОБЛЕМЫ ИНВЕРТОРОВ С ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ  
ДЛЯ ПИТАНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

## Р е з ю м е

Автором рассматриваются требования относительно инверторов питающих трехфазные асинхронные двигатели. Обращено особое внимание проблеме узлов коммутации и формировке выходного напряжения в автономных инверторах с широтно-импульсной модуляцией.

PROBLEMS OF PULSE WIDTH MODULATION INVERTERS DESTINATED FOR FEEDING  
ASYNCHRONOUS MOTORS

## S u m m a r y :

In the paper classification, properties of, and requirements for inverters intended for feeding three-phase asynchronous motors are given.

In particular, forced commutation inverters capable of shaping the variable frequency output voltage by means of pulse width modulation is discussed in detail. Some problems in commutating circuits of these inverters and different ways of controlling the output voltage shape are discussed.