

Tomasz BISKUP

PROSTY PRZEMYSŁOWY STEROWNIK MIKROPROCESOROWY FAŁOWNIKA NAPIĘCIA MSI

Streszczenie. Przedstawiono układ prostego, przemysłowego sterownika mikroprocesorowego falownika napięcia z modulacją szerokości impulsów, zrealizowanego w systemie Z80. Opisana została część układowa i programowa wraz z uzasadnieniem wybranego sposobu modulacji. Zamieszczono wyniki pomiarów oscyloskopowych prądów i napięć falownika obciążonego silnikiem w różnych stanach pracy. Przedstawiono zamierzenia w zakresie dalszego rozwoju układu.

SIMPLE INDUSTRIAL MICROPROCESSOR CONTROLLER OF PWM VOLTAGE FED INVERTER

Summary. A simple, industrial microprocessor's controller for PWM converter, based on microprocessor Z80 is presented in this paper. There are described hardware and software part, with relevant justification of chosen PWM algorithm. The author demonstrates results obtained by an experiment with converter and three-phase motor. There are prospect tasks of developing the described system also presented in the paper.

EINFACHER INDUSTRIELLEN REGLER EINES PWM UMFORMER

Zusammenfassung. Im Artikel wurde ein einfacher industriellen Regler eines PWM Umformer mit Z80 Mikroprozessor dargestellt. Es wurden Hardware, Software und die Begründung des Modulationsalgorithmus beschrieben. Die Ergebnisse der Zusammenarbeit eines Umformers mit 3-phasigen Induktionsmotoren wurden gezeigt. Es wurden auch die Vorschläge für weitere Entwicklung des bearbeitenden Systems besprochen.

1. WSTĘP

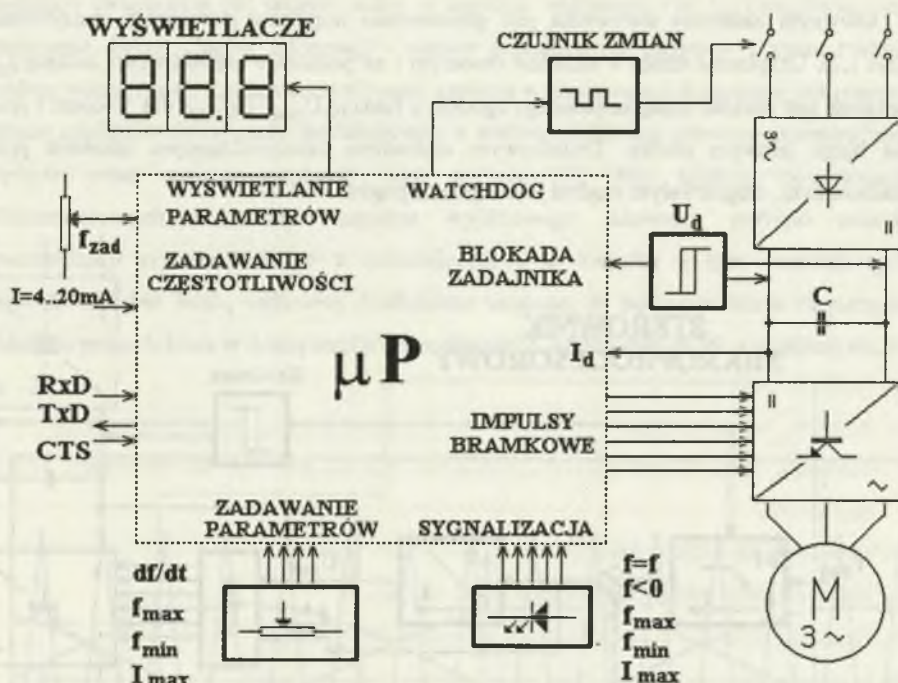
Opisywany sterownik jest wynikiem prac, jakie podjęto w firmie ENEL w związku z uruchomieniem produkcji w 1991 roku typoszeregu tranzystorowych falowników napięcia z modulacją szerokości impulsów. Są to falowniki przeznaczone do napędów z silnikiem indukcyjnym klatkowym.

Duże doświadczenie w budowie układów sterowania (a w tym i sterowania przekształtników energoelektronicznych), w których stosowano mikroprocesor firmy Zilog Z80, było czynnikiem decydującym o wyborze tego systemu [1-4].

Praca ta miała umożliwić zapoznanie się z rzeczywistymi problemami powstającymi przy budowie przemysłowych wersji tego typu urządzeń. Pierwsza wersja układu powstała w październiku 1990 roku [3] i w ciągu ostatnich dwóch lat była modernizowana [4]. W artykule opisuje się wersję ostateczną przemysłową.

Przy projektowaniu i budowie układu przyjęto następujące założenia:

- sterownik oparty na mikroprocesorze Z80,
- wszystkie elementy systemu dostępne w kraju,
- wymagane zabezpieczenie przed awarią systemu,
- duża odporność na zakłócenia,
- zadawanie częstotliwości wyjściowej: napięciem 0..5 V, (-5..+5 V dla wersji nawrotnej), prądem 4..20 mA oraz za pomocą transmisji szeregowej,
- zakres częstotliwości wyjściowej 5..55 Hz,
- wyświetlanie częstotliwości wyjściowej, sygnalizowanie osiągnięcia: częstotliwości minimalnej, maksymalnej, prądu maksymalnego i częstotliwości zadanej,
- możliwość nastawy: szybkości zadawania częstotliwości, częstotliwości maksymalnej, minimalnej oraz prądu maksymalnego.



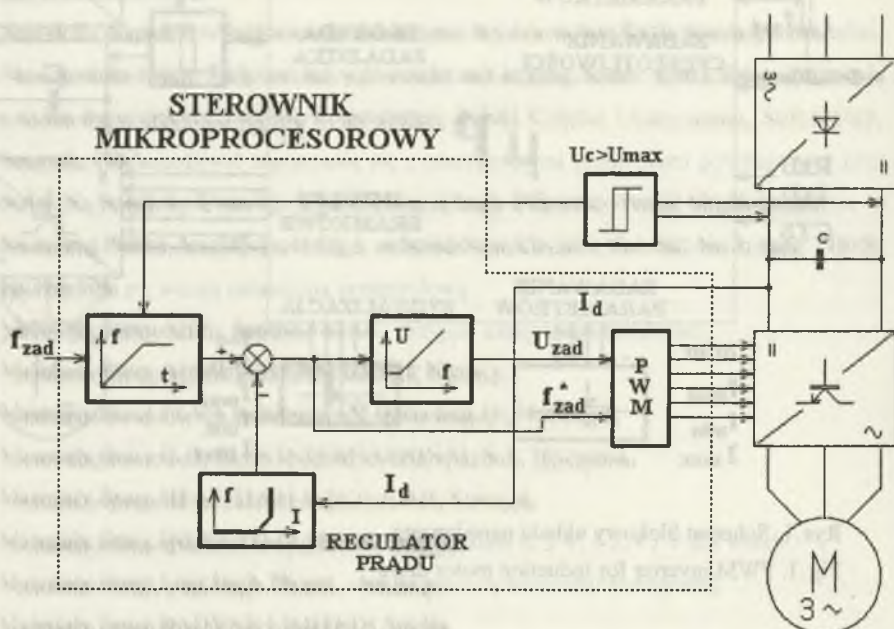
Rys.1. Schemat blokowy układu napędowego

Fig.1. PWM inverter for induction motor drive

2. BUDOWA UKŁADU

Schemat blokowy układu napędowego został zamieszczony na rys. 1. Falownik zbudowany jest na tranzystorach IGBT. Sygnałami wejściowymi dla sterownika są: prąd w obwodzie pośredniczącym falownika oraz sygnał blokady zadajnika częstotliwości pojawiający się przy zbyt dużym napięciu U_c na kondensatorze. Zabezpieczenie urządzenia przed awarią systemu mikroprocesorowego to układ 'watchdog' (stróż), który przy braku sygnału testującego od mikroprocesora powoduje wyłączenie falownika. Współpraca z użytkownikiem jest osiągana, dzięki zespołowi wyświetlaczy 7-segmentowych i diod elektroluminescencyjnych (LED). Zadawanie częstotliwości zgodnie z założeniami może być realizowane z trzech źródeł, natomiast do nastawy specjalnych parametrów wykorzystywane są potencjometry wieloobrotowe.

Głównym zadaniem sterownika jest generowanie impulsów sterujących tranzystorami (rys 1,2). Urządzenie działa w układzie otwartym i na podstawie częstotliwości zadanej f_{zad} ustalana jest wartość napięcia zadanego zgodnie z funkcją $U_{zad} = G(f_{zad})$ dla $\Psi = \text{const}$ i pracy na biegu jałowym silnika. Dodatkowym elementem zabezpieczającym falownik przed nadmiernym, długotrwałym prądem jest regulator prądu.



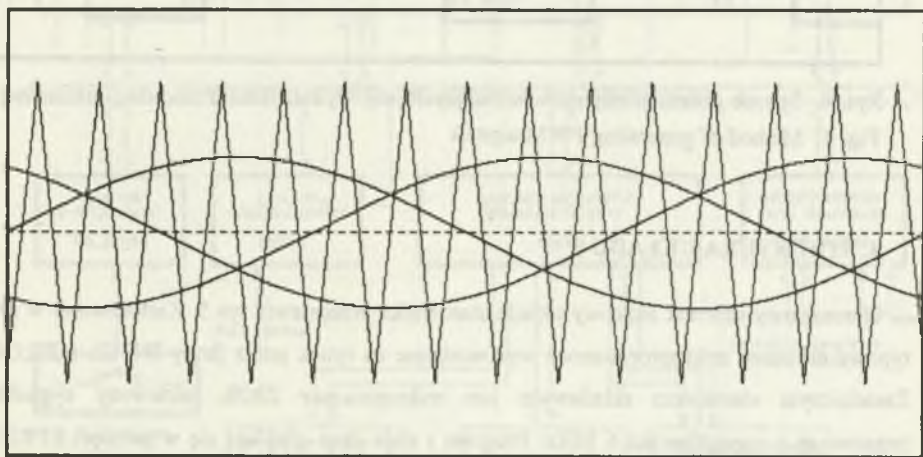
Rys. 2. Schemat blokowy układu regulacji

Fig. 2. Control scheme

3. METODA MODULACJI

Na podstawie wartości częstotliwości zadanej i napięcia zadanego generowane są impulsy sterujące tranzystorami w ten sposób, aby te wielkości były dotrzymane. Istnieje wiele różnych metod modulacji szerokości impulsów [5], ale ze względu na istotne zalety, przyjęto w tym rozwiązaniu metodę modulacji szerokości impulsów sygnałem nośnym. Impulsy sterujące otrzymujemy w niej w wyniku porównania sygnału nośnego z sygnałem modulującym (zwykle jest to sinusoida). Najlepsze efekty osiąga się przy zastosowaniu

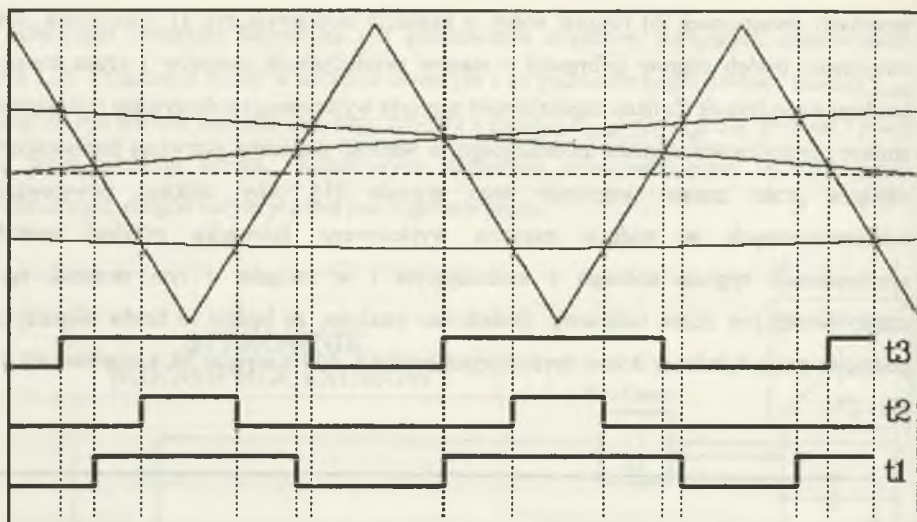
modulacji dwustronnej [6] (sygnał nośny o kształcie trójkątnym, rys. 3). Umożliwia ona otrzymanie dwóch ciągów informacji - stanów przełączanych zaworów i czasu trwania każdego stanu (rys.4). Zmiana częstotliwości napięcia wyjściowego dokonywana jest poprzez zmianę częstotliwości sygnału modulującego, a wartość skuteczna pierwszej harmonicznej napięcia przez zmianę amplitudy tego sygnału [5]. Aby uniknąć powstawania subharmonicznych w widmie napięcia wyjściowego falownika przyjęto metodę synchronizacji sygnału nośnego z modulującym i w związku z tym stosunek tych częstotliwości jest liczbą całkowitą. Dodatkowo ustalono, że będzie to liczba nieparzysta podzielna przez 3, która w dolnej strefie częstotliwości 5..40 Hz wynosi 39, a w górnej 40..55 Hz - 27.



Rys. 3. Modulacja naturalna - sygnał nośny trójkątny, sygnał modulujący sinusoidalny

Fig. 3. Sine-triangle PWM

Realizacja takiej modulacji daje ogromne zalety zwłaszcza dla prostego systemu mikroprocesorowego. Okazuje się, że ciąg informacji o kolejnych przełączeniach tranzystorów nie zależy ani od częstotliwości sygnału modulującego, ani od stosunku amplitudy sygnału modulującego i nośnego o ile jest on mniejszy od 1. Dodatkowo czasy między przełączeniami, dla stałego stosunku amplitudy sygnału modulującego i nośnego, są proporcjonalne dla różnych częstotliwości i co bardzo ważne, powtarzają się sześć razy na okres. Łącznym efektem jest znaczne ograniczenie informacji potrzebnej do zrealizowania takiego sposobu modulacji w układzie cyfrowym.



Rys. 4. Sposób generacji impulsów sterujących przy wykorzystaniu modulacji naturalnej

Fig. 4. Method of generating PWM signals

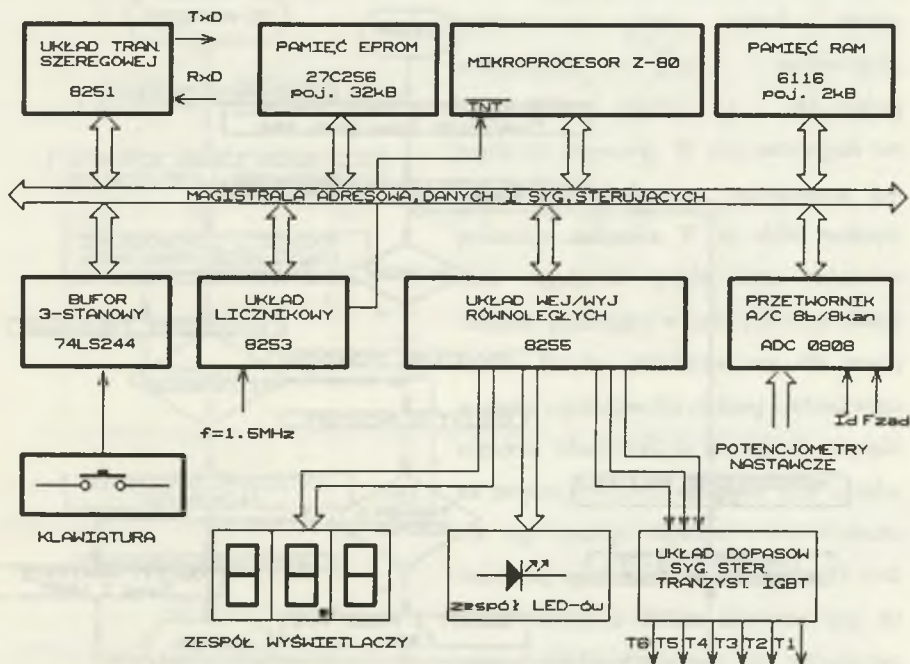
4. STRUKTURA UKŁADU

Uproszczony schemat blokowy układu sterownika przedstawia rys 5. Zastosowano w nim typowe elementy mikroprocesorowe wprowadzone na rynek przez firmy INTEL i ZILOG. Zasadniczym elementem składowym jest mikroprocesor Z80B, taktowany sygnałem zegarowym o częstotliwości 6 MHz. Program i stałe dane znajdują się w pamięci EPROM 27C256 o pojemności 32 kB. Nieodłącznym elementem systemu jest pamięć RAM 6116 o pojemności 2 kB. Współpraca z użytkownikiem możliwa jest dzięki wizualizacji pewnych wielkości (f_{zad} , f_{min} , f_{max} , I_{max}), za pomocą zespołu wyświetlaczy 7-segmentowych i diod LED, sterowanych przez układ wejść-wyjść równoległych 8255. Generowane są trzy impulsy sterujące tranzystorami po jednym dla każdego półmostka. W układzie dopasowującym tworzonych jest sześć sygnałów, przy czym układowo wymuszane jest przesunięcie sygnału załączającego jeden z tranzystorów i wyłączającego drugi w tym samym półmostku, aby zapobiec zwarciom skrośnym.

Odmierzanie odcinków czasu możliwe jest dzięki układowi licznikowemu 8253, który po odliczeniu zadanego czasu generuje sygnał przerwania INT do mikroprocesora. Na wejście

zegarowe układu podawana jest częstotliwość 1,5 MHz, przez co rozdzielczość wynosi 0,67 μ s.

Do przetwarzania wielkości analogowych zastosowano przetwornik A/C ADC0808, charakteryzujący się 100 μ s czasem konwersji. Posiada on 8 kanałów wejściowych analogowych i stosunkowo łatwo może być dołączony do systemu mikroprocesorowego. Z mierzonych wartości najważniejsze, to: częstotliwość zadana (dwa kanały) i prąd w obwodzie pośredniczącym. Dodatkowo wykorzystane są cztery kanały dla czterech potencjometrów nastawczych.



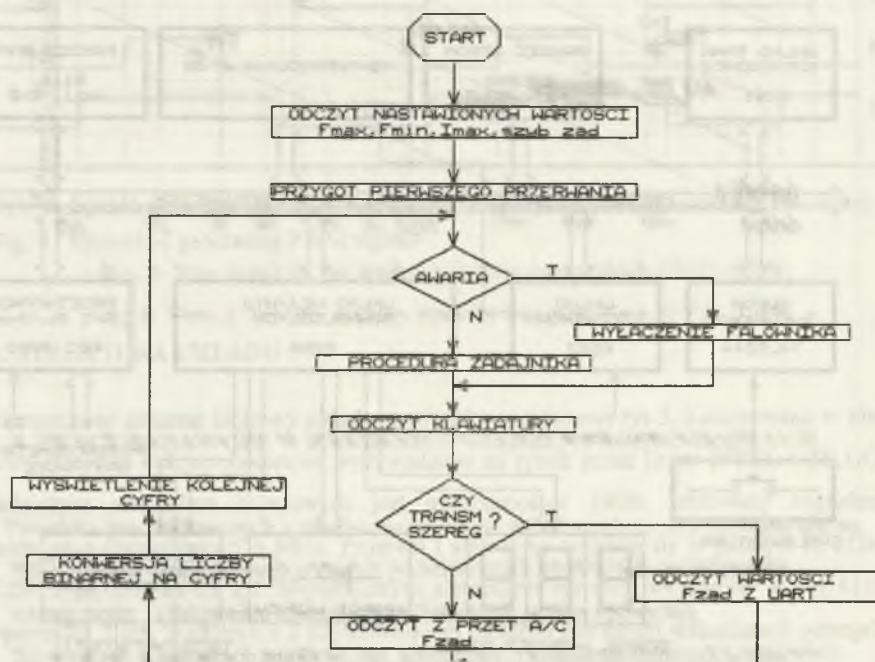
Rys. 5. Schemat blokowy sterownika mikroprocesorowego

Fig. 5. Inverter controller system

5. STRUKTURA PROGRAMU

Realizacja całego procesu sterowania falownikiem napięcia zorganizowana jest programowo, na podstawie wcześniej wyliczonych czasów przełączeń, przechowywanych w pamięci EPROM. Struktura taka wynika z niemożliwości wyliczania na bieżąco tych czasów.

Ze względu na wcześniej wymienione zalety przyjętej metody modulacji, liczba potrzebnych do jej realizacji wartości czasów między przełączeniami jest mocno zredukowana. Wystarczy bowiem tylko 1/6 wszystkich wartości z powodu ich powtarzalności, np. dla strefy niższej częstotliwości zadanej (stosunek częstotliwości fali nośnej do modulującej wynosi 39) otrzymano: 234 czasy między przełączeniami, z czego tylko 39 wartości jest niezbędnych, a dodatkowo ze względu na ich "symetrię środkową", wystarczy zgromadzić 20, bo resztę uzyskamy przez "odbicie lustrzane" względem "śroдка", jaki stanowi właśnie ta dwudziesta wartość.

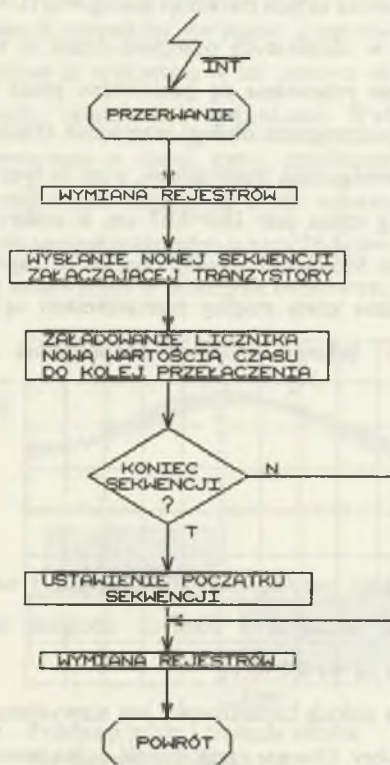


Rys. 6. Schemat blokowy programu głównego

Fig. 6. Block diagram of main program

Czasy między przełączeniami zostały wyliczone dla jednej częstotliwości fali modulującej (25,6 Hz) i wszystkich możliwych do uzyskania napięć wyjściowych falownika. Pozwala to na pracę nie tylko na charakterystyce $U_{zad} = G(f_{zad})$ dla $\Psi = \text{const}$, ale również na modyfikowanie wartości napięcia przy danej częstotliwości. Sekwencje przełączanych tranzystorów zgromadzone są w pamięci EPROM i nie podlegają zmianom, dla strefy niższej częstotliwości jest ich 234, natomiast dla wyższej 162.

Uproszczony schemat blokowy programu głównego znajduje się na rys. 6. Po starcie systemu wszystkie elementy sprzęgające i pomocnicze ustawiane są w odpowiednie tryby pracy, następnie odczytuje się wartości nastawianych za pomocą potencjometrów wielkości częstotliwości maksymalnej, minimalnej, prądu maksymalnego oraz szybkości działania zadajnika.



Rys. 7. Schemat blokowy podprogramu obsługi przerwania

Fig. 7. Block diagram of interrupt subroutine

Pętla główna programu składa się z odwołań do podprogramów. Początkowo kontrolowany jest sygnał awarii, występującej przy nadmiernym, długotrwałym prądzie I_d i minimalnej prędkości obrotowej. W przypadku jeśli ten sygnał jest nieaktywny, realizowana jest procedura zadajnika. W jej skład wchodzi blok regulatora prądu oraz właściwy zadajnik generujący w razie potrzeby tablicę czasów między przełączeniami dla nowej wartości częstotliwości zadanej i właściwego napięcia. Możliwość ta istnieje ze względu na proporcjonalności długości tych czasów dla tego samego napięcia i omówionemu wcześniej sposobowi modulacji rys. 3 i 4. Nowo obliczona tablica ładowana jest do pamięci RAM. Proces ten jest stosunkowo długotrwały i dlatego w jego czasie musi istnieć poprzednia tablica czasów, która jest nadal wykorzystywana, aż do chwili zakończenia wyliczania nowej.

Rozruch układu falownika jest realizowany w ten sposób, że początkowa częstotliwość zadana f_{zad} wynosi 5 Hz, niezależnie od nastawy częstotliwości minimalnej f_{min} i w czasie pierwszej fazy następuje stopniowe zwiększanie wartości skutecznej napięcia wyjściowego falownika. Po osiągnięciu właściwej wartości napięcia dla częstotliwości zadanej $f_{zad} = 5$ Hz,

dalsza praca zależy od zadanej (np. z potencjometru) częstotliwości. Szybkość działania zadajnika jest zależna od nastawy jednego z potencjometrów.

Następna faza programu głównego, to odczyt klawiatury. Służy ona do działań pomocniczych w czasie rozruchu urządzenia i nastawy parametrów f_{max} , f_{min} i in. W zależności od źródła nastawy, częstotliwość zadana odczytywana jest z odpowiedniego kanału przetwornika A/C lub rejestru buforowego odbiornika układu transmisji szeregowej (UART).

Przełączanie tranzystorów realizowane jest w określonych odstępach czasu w trakcie podprogramów obsługi przerwania. Te właśnie przerwania są generowane przez układ licznikowy, do którego w czasie poprzedniego podprogramu obsługi przerwania załadowano liczbę odpowiadającą czasowi do następnego przełączenia tranzystorów, a co za tym idzie, następnego przerwania. Podstawową jednostką czasu jest $1bit=0,67\ \mu s$, a maksymalna wartość czasu możliwa do odmierzenia wynosi $65535 \cdot 0,67\ \mu s=43,7\ ms$, co w zupełności wystarcza, ponieważ w rzeczywistości najkrótsze czasy między przełączeniami są rzędu $40\ \mu s$, a najdłuższe kilkaset mikrosekund. Schemat blokowy podprogramu został przedstawiony na rys. 7.

6. WYNIKI POMIARÓW I WNIOSKI

W toku badań falownika napięcia otrzymano oscylogramy prądu silnika i napięcia międzyfazowego dla różnych częstotliwości zadanych i różnych obciążeń silnika. Przykładowe oscylogramy zostały zamieszczone na rys 8,9,10,11.

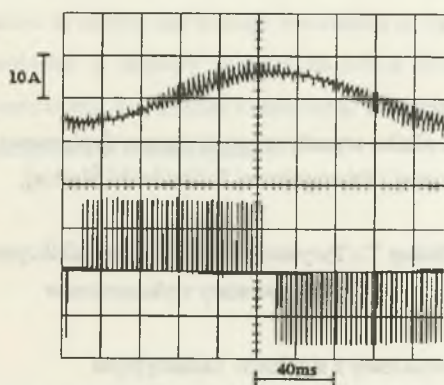
Z rysunków tych widać, że kształt prądu dla niskich częstotliwości jest niewystarczający, dopiero dla $f_{zad} = 15\ Hz$ można go uznać za dobry. Obecnie częstotliwość nośna zmienia się od $200\ Hz$ do $1600\ Hz$. Aby osiągnąć znacznie lepszy kształt prądu i zmniejszyć efekty dźwiękowe, jakie powstają w silniku zasilanym z falownika napięcia, należałoby zwiększyć częstotliwość sygnału nośnego kilkakrotnie.

Dokonano także analizy zawartości wyższych harmoniczných w prądzie silnika dla $20\ Hz$ i $50\ Hz$. Oczywiście, główny udział ma podstawowa harmoniczna, a pozostałe nie stanowiły więcej jak $3..5\ \%$ jej amplitudy i głównie były to wstęgi boczne wielokrotności częstotliwości nośnej.

Pomiary potwierdziły osiągnięcie założonych parametrów tranzystorowego falownika napięcia MSI z mikroprocesorowym sterownikiem. Znajduje on zastosowanie w napędach nie

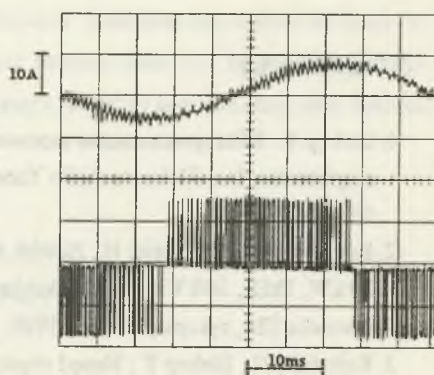
wymagających dobrych właściwości dynamicznych, czyli dla wentylatorów, pomp, podajników węgla i in. Sterownik jest taki sam niezależnie od mocy falownika, czy jest to 5 kV·A, czy 40 kV·A, zawsze stanowi go ta sama płyta bez zmian układowych. Ostatecznym weryfikatorem jest przemysł i tutaj ok. 40 zainstalowanych przez firmę ENEL i pracujących urządzeń (m.in. w elektrowni Bełchatów) daje ocenę pozytywną.

Ze względu na potrzebę polepszenia kształtu prądu, zwłaszcza dla małych prędkości obrotowych, należałoby zwiększyć częstotliwość fali nośnej do kilku kiloherców, co jest niemożliwe do wykonania w tak prostym układzie, oraz zrealizować układ regulacji, który poprawiłby właściwości dynamiczne. Wykonanie takiego sterownika wymaga użycia mikroprocesora o dużej mocy przeliczeniowej, umożliwiającego wykonanie szybkich przełączeń wyjść sterujących z jak najmniejszą ingerencją programową. Wynika stąd celowość perspektywicznego użycia 16-bitowych mikrokomputerów jednoukładowych, coraz szerzej stosowanych w przemyśle światowym.



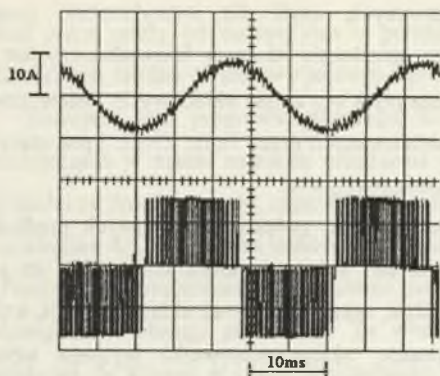
Rys. 8. Przebiegi prądu i napięcia silnika dla $f_{zad} = 5 \text{ Hz}$, $M_{obc} = 0$

Fig. 8. Current and voltage waveforms for $f_{zad} = 5 \text{ Hz}$, $M_{obc} = 0$



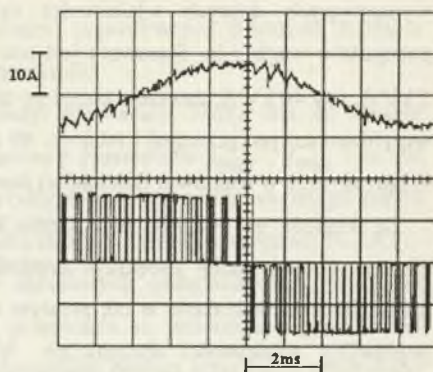
Rys. 9. Przebiegi prądu i napięcia silnika dla $f_{zad} = 20 \text{ Hz}$, $M_{obc} = 0.25M_n$

Fig. 9. Current and voltage waveforms for $f_{zad} = 20 \text{ Hz}$, $M_{obc} = 0.25M_n$



Rys.10. Przebiegi prądu i napięcia silnika dla $f_{zad} = 40 \text{ Hz}$, $M_{obc} = M_n$

Fig. 10. Current and voltage waveforms for $f_{zad} = 40 \text{ Hz}$, $M_{obc} = M_n$



Rys. 11. Przebiegi prądu i napięcia silnika dla $f_{zad} = 50 \text{ Hz}$, $M_{obc} = M_n$

Fig. 11. Current and voltage waveforms for $f_{zad} = 50 \text{ Hz}$, $M_{obc} = M_n$

LITERATURA

1. Biskup T.: Mikroprocesorowe sterowanie silnika asynchronicznego, praca dyplomowa magisterska, Inst.Elektrotechniki Teoretycznej i Przemysłowej Politechniki Śląskiej, Gliwice 1989.
2. Kuczewski Z., Kołodziej H., Nowak J., Biskup T.: Tyrystorowa wyżarzarka indukcyjna 30 kW, 2kHz, 380 V z wielofunkcyjnym zadajnikiem temperatury wykonanym w systemie Z80, rękopis, Gliwice 1990.
3. Kołodziej H., Biskup T.: Napęd częstotliwościowy z silnikiem indukcyjnym klatkowym i falownikiem MSI -5 kVA, 5..55Hz, 380 V, IGBT , ze sterownikiem i regulacją na Z80, rękopis, Gliwice 1991.
4. Kołodziej H., Biskup T.: Napęd częstotliwościowy z dwoma silnikami indukcyjnymi klatkowymi, 2*18 kVA i falownikiem MSI - 40 kVA, 5..55Hz, 380 V, IGBT, ze sterownikiem i regulacją na Z80, rękopis, Gliwice 1992.
5. Nowacki Z.: Modulacja szerokości impulsów w napędach przekształtnikowych prądu przemiennego, PWN, Warszawa 1991.
6. Kuczewski Z.: Energoelektronika, Skrypt Politechniki Śląskiej, Gliwice 1975.

Recenzent: Prof.dr hab.inż. Ryszard Kozioł

Abstract

Recently, PWM converters have been widely used for industrial applications. Simply solutions of controllers for drive with induction motors are still in search. A simple, industrial microprocessor's controller for PWM converter, based on Zilog Z80 is presented in this paper. Functional diagram of controller with communicate possible is given at fig 1. Converter is built of IGBT transistors. Controller works in open loop, and it obtains value of voltage using formula $U_{zad} = G(f_{zad})$, where flux $\Psi = \text{const}$ and no-load. There are used sine-triangle method to generate transistors control signals (fig 3,4). Controller structure is based on microprocessor Z80. Reduced block diagram of controller is presented at fig 5. PWM converter control is performed by software part. Block diagrams of main program and interrupt subroutine are shown at fig 6 and 7. There were performed experiments with induction motor and inverter. The author demonstrates results obtained by that experiment in shape of current and voltage waveforms at fig 8,9,10,11. Converter has worked without any problems in industry applications which dynamic features need not be so high (pumps, ventilators). It is needed to use better microprocessor (16 bit) to improve static and dynamic parameters of control system.