

Andrzej CIOSKA  
Zakład Mechatroniki

Zbigniew RYMARSKI  
Instytut Elektroniki

## ZAUTOMATYZOWANY SYSTEM POMIAROWY DO BADANIA POLA MAGNETYCZNEGO W MASZYNACH INDUKCYJNYCH

**Streszczenie.** Przedstawiono system pomiarowy maszyn indukcyjnych małej i średniej mocy, składający się z układu generacji napięcia zasilającego (o programowalnej amplitudzie podstawowej częstotliwości, zawartości harmonicznych), układu zbierania i gromadzenia pomiarów z czujników pomiarowych umieszczonych w badanej maszynie oraz układu mikroprocesorowo sterowanego falownika, generującego 3-fazowe napięcie zasilające maszynę synchroniczną (wymuszającą prędkość obrotową badanej maszyny indukcyjnej). Przedstawiono dobór parametrów elementów poszczególnych subsystemów z punktu widzenia dokładności odwzorowywania generowanych przebiegów i dokładności pomiarów w całym zakresie mierzonych przebiegów. Przedstawiono oryginalne, niestandardowe rozwiązania konstrukcyjne subsystemów istniejącego systemu pomiarowego, pozwalające przyspieszyć proces zbierania i przetwarzania danych.

## THE AUTOMATIZED SYSTEM FOR MEASURING THE MAGNETIC FIELD IN INDUCTION MACHINES

**Summary.** The measuring system of the low and middle power induction machines is presented. It consists of the power supply voltage generator (with the programmable voltage magnitude and frequency of the basic harmonic and programmable level of the higher harmonics), data collecting subsystem that measures voltages induced in sensors (placed in the tested machine) and the microprocessor controlled 3-phase PWM voltage for supplying the synchronous machine that forces the rotational speed of the tested induction machine. There is presented the selection of parameters of the subsystem components in order to get the assigned measurement accuracy. There are presented the unique, not standard design solutions of the system.

## 1. WPROWADZENIE

Występowanie asymetrii technologicznych jednofazowych maszyn indukcyjnych powstałych podczas ich produkcji powoduje, że zachodzi konieczność wyznaczania wpływu tych asymetrii na podstawowe parametry elektromagnetyczne i elektromechaniczne maszyn. Przekroczenie w procesie produkcyjnym dopuszczalnych odchyłek podstawowych parametrów konstrukcyjno-wykonawczych maszyn elektrycznych małej mocy powoduje występowanie znacznych rozrzutów znamionowych parametrów elektromagnetycznych i elektromechanicznych. Podczas produkcji dużych i średnich maszyn niedotrzymanie takich dopuszczalnych odchyłek parametrów konstrukcyjno-wykonawczych nie powoduje znacznych rozrzutów parametrów znamionowych tych maszyn.

Do podstawowych parametrów konstrukcyjno-wykonawczych maszyn zalicza się:

1. średnice: zewnętrzną wirnika i wewnętrzną stojana,
2. równomierność, ewentualnie celowo wprowadzaną nierównomierność promieniowej grubości szczeliny powietrznej,
3. mimośrodowość powierzchni wirnika względem osi obrotu maszyny (ekscentryczność dynamiczna) i mimośrodowość położenia osi obrotu wirnika względem osi powierzchni wewnętrznej stojana (ekscentryczność statyczna),
4. deformację eliptyczną zewnętrznej powierzchni wirnika i deformację eliptyczną wewnętrzną powierzchni stojana,
5. asymetryczne połączenia czołowe stojana i wirnika,
6. wadliwie wykonany odlew klatki wirnika,
7. nieprecyzyjnie wykonane spawy zwojów zwartych,
8. wadliwie zamontowane boczniki magnetyczne,
9. nieprecyzyjnie nawinięte uzwojenia główne (np. lokalne przewężenia), itd.

W celu określenia wpływu technologicznej niedokładności wykonawczej (odstępującej od podstawowych parametrów konstrukcyjno-wykonawczych) na parametry elektromagnetyczne i elektromechaniczne produkowanych maszyn należy przeprowadzić odpowiednie badania w specjalistycznym modelowym układzie badawczym, który w swojej części mechanicznej umożliwi odpowiednią symulację odstępstw od niektórych parametrów konstrukcyjno-wykonawczych z jednoczesnym ich pomiarem. Schemat blokowy z rys.1 przedstawia systemem pomiarowy (składający się z trzech zasadniczych części nazywanych trzema subsystemami) modelowego układu badawczego, który poprzez pomiary rozkładów przestrzenno-czasowych [1] indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej między stojanem a wirnikiem niesymetrycznych maszyn indukcyjnych umożliwi w konsekwencji wyznaczanie wpływu poszczególnych asymetrii technologicznych (powstałych podczas produkcji) na parametry elektromagnetyczne i elektromechaniczne maszyn.

Wyznaczanie rozkładów przestrzenno-czasowych indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej niesymetrycznych maszyn indukcyjnych wymaga przeprowadzania precyzyjnych badań w ściśle określonych powtarzalnych warunkach elektromagnetycznych.

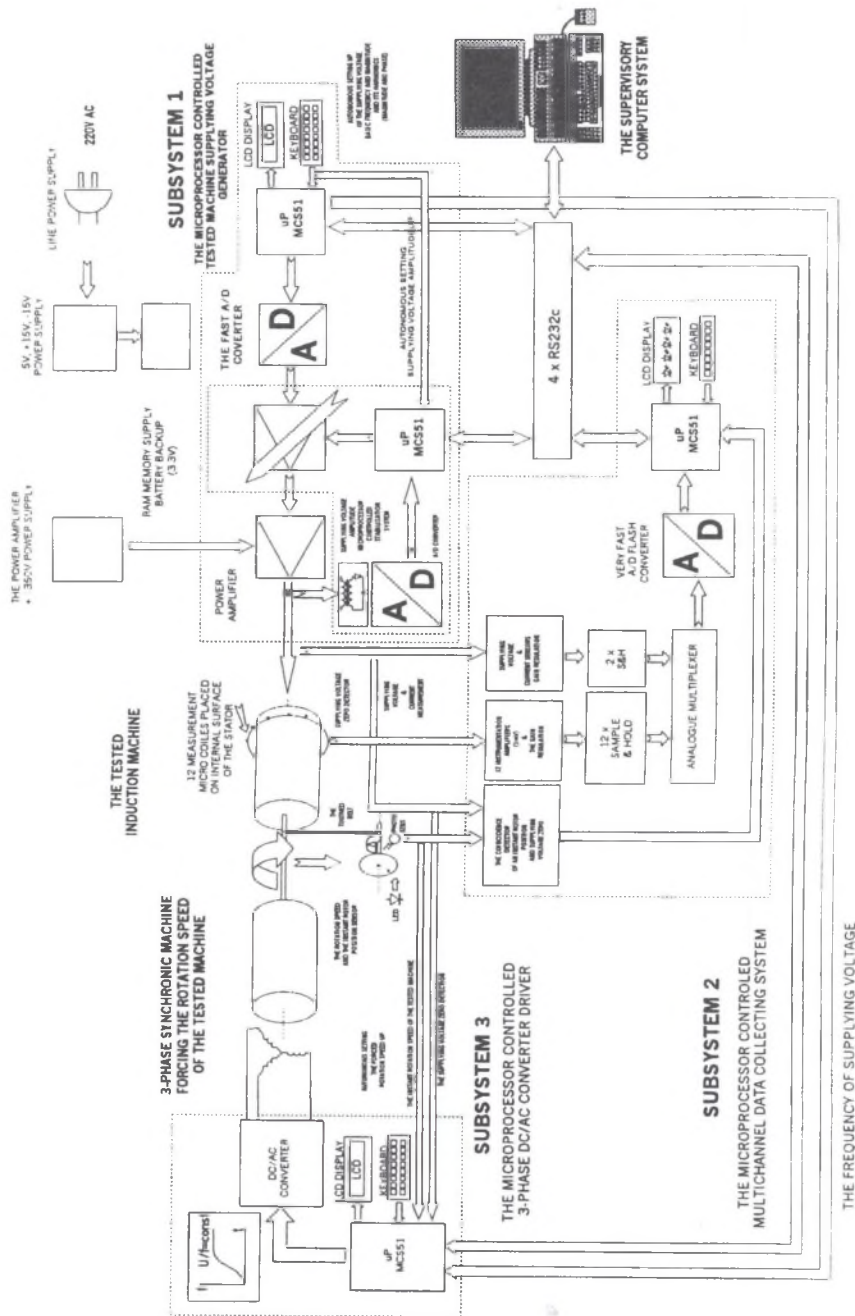
Podczas pomiarów napięcie zasilania badanej maszyny indukcyjnej musi być stabilizowane (tzn. utrzymywany musi być zadany kształt przebiegu czasowego napięcia: wartość, zawartość harmonicznych, częstotliwość) celem otrzymania właściwych przebiegów przestrzenno-czasowych indukcji. Jest to realizowane w układzie pierwszego subsystemu (pkt 2.1).

Prędkość obrotowa badanej maszyny indukcyjnej musi być stabilizowana podczas pomiarów każdej serii pomiarowej (tzn. utrzymywana musi być stała prędkość obrotowa wirnika  $n$  przy zadanej częstotliwości  $f$  napięcia zasilania silnika). Jest to realizowane w tzw. trzecim subsystemie (pkt 2.3), za pomocą którego w konsekwencji wymuszana jest prędkość obrotowa wirnika badanej maszyny przez mechaniczne sprzęgnięcie z silnikiem synchronicznym 3-fazowym, zasilanym z falownika o regulowanej i stabilizowanej częstotliwości napięcia zasilania.

Układ pomiarowy, jako drugi subsystem (pkt 2.2) schematu blokowego z rys.1, umożliwia wykonywanie każdej serii pomiarowej (rozkładów przestrzenno-czasowych indukcji) przez automatyczne wyzwalanie początków wykonywanych pomiarów za pomocą odpowiedniego układu koincydencji (serie pomiarowe muszą być wyzwalane w ściśle określonych powtarzalnych warunkach elektromagnetycznych determinowanych fazą chwilowego położenia wirnika względem stojana oraz fazą przejścia napięcia zasilającego przez zero).

## 2. SYSTEM POMIAROWY

Rys.1 przedstawia schemat blokowy zbudowanego systemu pomiarowego składającego się z trzech subsystemów oraz komputera nadrzędnego klasy IBM/PC. Komputer nadrzędny zarządza całością systemu, jednak podstawowym założeniem projektowanego urządzenia pomiarowego jest możliwość samodzielnej, autonomicznej pracy na stanowisku pomiarowym oddalonym od komputera nadrzędnego. Po wstępnym ustawieniu zadanych parametrów pomiarów i przetransmitowaniu tych parametrów do systemu pomiarowego można zarówno odłączyć komputer nadrzędny, jak i wyłączyć zasilanie sieciowe systemu pomiarowego, przemieścić w miejsce pomiarów i ponownie włączyć zasilanie sieciowe, a wprowadzone parametry pozostają zapamiętane w statycznych pamięciach RAM, dzięki temu że zasilanie tych pamięci RAM jest podtrzymywane bateryjnie. Podobnie, serie pomiarów dla każdego położenia czujników pomiarowych zostają zapisywane do podtrzymywanych bateryjnie statycznych pamięci RAM i transmitowane do nadrzędnego komputera dopiero po zakończeniu pomiarów na żądanie programu zarządzającego.



Rys. 1. Schemat blokowy systemu pomiarowego maszyn indukcyjnych  
 Fig. 1. Block diagram of the measuring system for induction machines

Każdy z subsystemów ma własną klawiaturę i wielopozycyjny wyświetlacz LCD, tworzące wraz z odpowiednim oprogramowaniem danego subsystemu interfejs użytkownika. Taki interfejs użytkownika umożliwia autonomiczne (a nie tylko z komputera nadrzędnego) wprowadzanie nowych parametrów pomiarów do poszczególnych subsystemów.

Wszystkie subsystemy są połączone z komputerem nadrzędnym poprzez standardowe łącze szeregowe RS232C, a szybkość transmisji nie odgrywa roli, ponieważ łącze RS232C służy tylko do przesyłania parametrów pomiarów i odczytu zebranych danych, a nie do sterowania procesami pomiarowymi, które w każdym z subsystemów są realizowane autonomicznie przez odrębne układy mikroprocesorowe. Poszczególne subsystemy mają łącza umożliwiające przekazywanie informacji z subsystemu do innego subsystemu.

We wszystkich subsystemach zastosowano 8-bitowe mikrokomputery jednocukładowe z rodziny MCS-51. Wybór tych mikroprocesorów wynika z możliwości wykorzystania ich portów wejść/wyjść szeregowych i wykorzystania ich wewnętrznych liczników, między innymi do sterowania transmisją szeregową w standardzie RS232C. Pozostałe porty pracujące jako wejścia/wyjścia równoległe wykorzystywane są do funkcji sterowania, a możliwość adresacji pojedynczego bitu znakomicie upraszcza proces sterowania. Równocześnie jednak 8-bitowe rejestry wewnętrzne w tych mikroprocesorach powodują wydłużenie i dużą pracochłonność bardziej skomplikowanych operacji arytmetycznych (np. w sterowniku falownika z subsystemu 3 programowe obliczanie wartości funkcji sinus i dokonywanie operacji mnożenia i dzielenia na uzyskanych wynikach). Dlatego w przypadku mikroprocesorowego sterownika falownika lepszy byłby szybszy 16-bitowy układ z rodziny MCS-96 posiadający wyjście jednego z portów wyprowadzające sygnał o modulowanej szerokości impulsów (w układach z MCS-51 należy uzyskać modulację szerokości impulsów - PWM programowo z wykorzystaniem zewnętrznych i wewnętrznych liczników) [5]. Przy specjalistycznych pomiarach maszyn indukcyjnych w stanach nieustalonych istnieje potrzeba uzyskania dynamicznych zmian prędkości obrotowej wirnika, więc w zbudowanym systemie pomiarowym istnieje potrzeba uzyskania dynamicznych zmian częstotliwości i współczynnika wypełnienia impulsów sterujących falownikiem zasilającym maszynę synchroniczną; zatem następne wersje falownika muszą być budowane w oparciu o 16-bitowy mikroprocesor.

## 2.1. Subsystem generujący napięcie zasilania (subsystem 1)

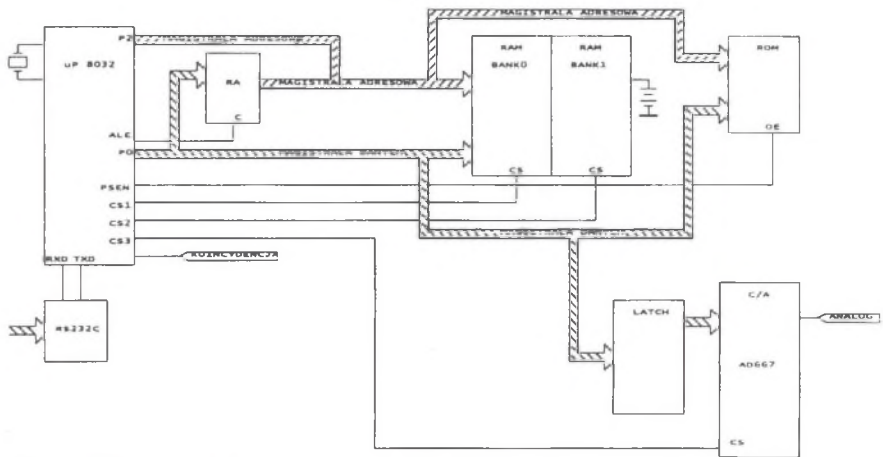
Subsystem 1, generujący napięcie zasilające badaną maszynę indukcyjną, składa się z dwóch modułów funkcyjnych:

1. układu generacji napięcia zasilającego,
2. układu regulacji i stabilizacji amplitudy napięcia zasilającego oraz oprogramowania systemowego.

Każdy z bloków został tak zaprojektowany i wykonany, aby mógł pracować autonomicznie jako samodzielny moduł, jednak dopiero połączenie modułów tworzy generator przebiegu napięcia zasilającego o programowanej zawartości harmonicznych.

### 2.1.1. Układ generacji napięcia zasilającego

Rys.2 przedstawia schemat blokowy układu generacji napięcia zasilającego. Moduł układu generacji powstał w oparciu o mikrokontroler jednocukłowy 8032 z rodziny mikrokomputerów jednocukłowych MCS-51. Należy on do grupy mikrokontrolerów 8-bitowych z multipleksowaną magistralą adresów i danych. Stąd wynika konieczność zastosowania w układzie rejestru adresowego (RA).



Rys.2. Schemat blokowy modułu generatora napięcia zasilającego  
Fig.2. Block diagram of the power supply voltage generator module

Architektura mikrokontrolera 8032 pozwala prosto uzyskać komunikację z komputerem nadrzędnym klasy IBM PC za pomocą łącza szeregowego w standardzie RS232C. Mikrokontroler taktowany jest oscylatorem kwarcowym 12 MHz, co powoduje, że cykl rozkazowy równy jest 1  $\mu$ s. Szybkość transmisji szeregowej ustalono na ok. 9600 bodów.

Rozkazy sterujące oraz stabilizowany ciąg próbek przebiegu napięcia generowanego przez układ przekazywane są łączem RS232C do modułu generacji. Przetrasmitowane dane zapisywane są w pamięci RAM modułu generatora. Pamięć modułu generatora przechowująca informacje o przebiegu sygnału została podzielona na dwa banki (BANK0 i BANK1). W celu zachowania przetransmitowanych danych w przypadku zaniku napięcia zasilającego oraz umożliwienia odłączenia subsystemu od komputera nadrzędnego i przeniesienia systemu na stanowisko pomiarowe pamięć RAM posiada układ bateryjnego podtrzymywania napięcia.

W celu uzyskania dużej dokładności odwzorowania przebiegu w układzie zastosowano 12-bitowy przetwornik C/A firmy Analog Devices AD667. Istnieje kilka standardowych rozwiązań konstrukcyjnych problemu dostarczenia danych do 12-bitowego przetwornika przy

pomocy 8-bitowej magistrali danych. Dzięki zastosowaniu dwóch banków pamięci RAM możliwe jest jednoczesne podawanie do przetwornika 12 bitów, co przyspiesza proces generacji kolejnych wartości napięcia. Próbki przetransmitowane do układu generacji poprzez łącze RS232C zapisywane są na przemian raz do BANKU0, raz do BANKU1 w taki sposób, aby pod odpowiadającymi adresami w obu bankach znalazły się wartości jednej próbki (pełne dwanaście bitów). BANK0 zawiera młodszy bajt próbki, a BANK1 starsze 4 bity. Pełne 12-bitowe dane podawane są równocześnie do przetwornika C/A bez udziału rejestrów wewnętrznych procesora, co w wystarczającym stopniu przyspiesza działanie przedstawianego układu.

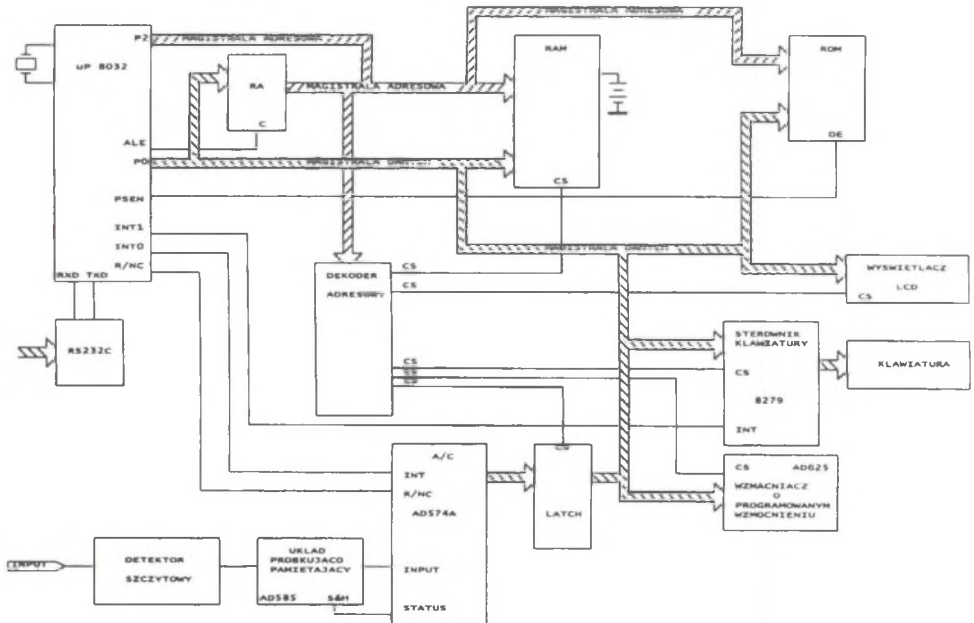
W celu dokonywania pomiarów przy zmianie położenia cewek pomiarowych i zachowaniu ściśle określonej chwili czasu dokonywania pomiaru układ generacji dostarcza do systemu pomiarowego sygnał koincydencji wyznaczający chwilę przejścia przez zero generowanego napięcia zasilającego.

### 2.1.2. Układ regulacji i stabilizacji amplitudy

Rys.3 przedstawia schemat blokowy modułu regulacji i stabilizacji amplitudy. Jego zadaniem jest utrzymanie stałej, zadanej wartości amplitudy generowanego sygnału napięciowego. Moduł został wyposażony w pamięć RAM, w której przechowywane są informacje przetransmitowane do układu za pośrednictwem łącza RS232C z komputera nadrzędnego. Pamięć RAM modułu ma układ podtrzymywania bateryjnego zasilania, co pozwala na odłączenie go od napięcia zasilania, podobnie jak układ generacji napięcia.

Układ firmy Analog Devices AD625 będący wzmacniaczem pomiarowym o programowanym wzmocnieniu w połączeniu z procesorem stanowi pętlę regulacji amplitudy. Wzmocnienie jest ustalane za pomocą kluczowanej drabinki rezystorowej. Istotnym problemem jest dobór wartości rezystancji drabinki oraz niezerowej rezystancji, jaką wnoszą załączone klucze CMOS, co powoduje istotne ograniczenie poziomu wzmocnienia wzmacniacza.

Istotnym problemem jest dokonywanie obliczeń arytmetyki wielobitowej na procesorze 8-bitowym, który nie posiada rejestrów 16-bitowych oraz ma ubogą listę rozkazów arytmetycznych (mnożenia i dzielenia wielobitowego). Opracowanie procedur arytmetycznych oraz integracja całego subsystemu stanowiły jeden z podstawowych problemów przy projektowaniu i wykonaniu subsystemu 1.



Rys.3. Schemat blokowy modułu regulacji i stabilizacji amplitudy  
Fig.3. Block diagram of the amplitude control module

### 2.1.3. Oprogramowanie systemowe

Oprogramowanie systemowe ponosi odpowiedzialność za pracę całego systemu oraz pełni rolę nadzorującą. Komputer nadrzędny klasy IBM/PC wykonuje procedury kształtowania przebiegu oraz dokonywania skomplikowanych operacji arytmetycznych. Operacje obliczeniowe przetwarzają dużą liczbę danych o przebiegu. Oprogramowanie systemowe zapewnia łatwą ingerencję w generowany przebieg i umożliwia łatwe kształtowanie tego przebiegu. Pozwala także na jego wizualizację po ustaleniu wszystkich parametrów przebiegu jeszcze przed przetransmitowaniem go do systemu generacji. Oprogramowanie musi także zapewnić komunikację operatora systemu z urządzeniem.

### 2.2. Subsystem pomiarowy (subsystem 2)

Rys.4 przedstawia schemat blokowy zrealizowanego subsystemu pomiarowego. W szczelinie powietrznej między stojanem a wirnikiem maszyny indukcyjnej rozmieszczono symetrycznie zespół 12 mikrocewek pomiarowych. Każdemu położeniu tego zespołu odpowiada seria zbieranych danych. Aby wyniki pomiarów uzyskane w różnych seriach pomiarowych (przy przesuwaniu cewek w szczelinie) mogły sobie odpowiadać, w celu otrzymania rozkładów przestrzennych indukcji pomiary rozpoczynają się zawsze w ściśle określonej chwili czasu, wyznaczonej przez koincydencję chwilowego położenia obracającego się wirnika z przejściem przez zero napięcia zasilającego od wartości ujemnych do dodatnich.



Detektorem chwilowego położenia wirnika jest tarcza obrotowa osadzona na wale wirnika z odpowiednim otworem na obwodzie, przepuszczająca dla pożądanego położenia wirnika impuls światła, co powoduje w konsekwencji wygenerowanie odpowiedniego impulsu napięcia w układzie dioda LED-fototranzystor. Układ detektora DK (rys.4) generuje zatem krótki pojedynczy impuls w chwili osiągnięcia koincydencji rozpoczynający operację pobierania i zapamiętywania wyników przez mikrokontroler jednocukładowy  $\mu K$  (rys.4). W czasie jednej serii pomiarowej układ elektroniczny dokonuje pobrania kilku tysięcy próbek napięcia wyindukowanego w czujniku (duża częstotliwość próbkowania sygnałów mierzonych przez kilka założonych okresów napięcia sieci zasilającej), aby przebieg można było dokładnie odwzorować w czasie. Cyfrowa reprezentacja sygnałów pomiarowych umożliwia łatwą rejestrację przebiegów wielkości mierzonych przy dużej wymaganej odporności na zakłócenia (szumy, temperatura, zmiany napięć zasilających), a oprogramowanie nadrzędnego komputera klasy IBM PC umożliwi przetwarzanie wyników oraz ich wizualizację na ekranie monitora wraz z możliwością ich wydrukowania.

W układzie pomiarowym procesem pobierania i zapamiętywania danych steruje mikrokontroler I80C32, z popularnej rodziny MCS-51 ukierunkowanej na sterowanie. Jest on standardowo wyposażony w łącze szeregowe RS232C, co umożliwia bezpośrednie sprzęgnięcie go z komputerem IBM PC. Mikrokontroler pracuje według programu zapisanego w pamięci EPROM (rys.4), sterując bezpośrednio procesem wyboru wzmocnienia, kanału pomiarowego, zapisu i odczytu danych. Stan procesu pomiarowego jest sygnalizowany na bieżąco w bloku BSP (rys.4) diodami LED i sygnałem dźwiękowym.

Indukowane w rozłożonych na obwodzie maszyny mikrocewkach pomiarowych napięcie ma wartość rzędu kilku mV wartości międzyszczytowej. Ponadto mała impedancja cewek. konieczność stosowania „pływającego” wejścia wzmacniaczy pomiarowych (połączenie biegunów cewek z masą zniekształcałoby pomiary rozkładów przestrzennych indukcji) oraz fakt, że pomiarom podlega przebieg o częstotliwości równej częstotliwości sieci zasilającej silnik, stwarzają poważne utrudnienia [3]. Przetworniki A/C wymagają napięcia wejściowego o amplitudzie kilku woltów odniesionego do masy (w opisanym dalej przypadku z nałożoną składową stałą - UNSS z rys.4). Konieczne jest więc wzmocnienie przebiegów mierzonych do takiej wartości (BWWP z rys.4). Najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie wzmacniaczy pomiarowych AD524 firmy Analog Devices. Układy te mają możliwość regulacji wzmocnienia, bardzo dobre parametry statyczne i dynamiczne oraz umożliwiają wykorzystanie układu do dynamicznej zmiany potencjału ekranu ochronnego w celu zwiększenia tłumienia zakłóceń.

Jednoczesny pomiar napięcia w kilku określonych miejscach obwodu badanej maszyny i jego przetworzenie na postać cyfrową wymaga użycia w najprostszym przypadku tylu przetworników A/C, ile jest kanałów pomiarowych. Gęstość próbkowania zależy odwrotnie proporcjonalnie od czasu przetwarzania przetworników oraz czasu odczytu i zapisu danej z przetwornika do pamięci RAM systemu pomiarowego. Po analizie różnych możliwych rozwiązań zastosowano układ szybkiego przetwornika A/C typu „flash converter” oraz układ wykorzystujący ideę bezpośredniego zapisu danej do pamięci RAM (DMA-direct memory access) jako najlepsze możliwe rozwiązanie dla tego przypadku. Mikrokontrolery serii MCS-51 nie mają możliwości współpracy z układami DMA. W systemie pomiarowym zastosowano mikrokontroler I8032, który generuje tylko adresy i sygnały sterujące pamięcią, a dane są zapisywane wprost z wyjść przetwornika A/C do pamięci RAM (układ sterujący bramą B i G przez USDMA z rys.4) bez pośrednictwa rejestrów wewnętrznych mikrokontrolera, co znacznie przyspiesza operację zapisu. Na gęstość próbkowania wpływa również czas przetwarzania wyników pomiarów. Ograniczona lista rozkazów mikrokontrolera jest ukierunkowana na sterowanie, a nie na przetwarzanie danych. Celowe zatem wydaje się zrezygnowanie z przetwarzania polegającego na całkowaniu napięcia indukowanego, aby otrzymać wartość przebiegu indukcji. Do pamięci RAM zapisywane są tylko próbki napięć indukowanych, a operację ich całkowania, jak założono, wykona się później w komputerze nadrzędnym typu IBM PC po przetransmitowaniu do niego zebranych danych.

Zastosowano tylko jeden przetwornik A/C. Powoduje to konieczność przełączania wyjść wzmacniaczy pomiarowych do wejścia przetwornika. Komutację zrealizowano wykorzystując multipleksery/demultipleksery analogowe z rodziny układów CD40XX (BMA z rys.4), które zbudowane z kluczy analogowych typu CMOS umożliwiają przełączanie sygnałów z częstotliwością  $f \geq 1$  MHz, w pełnym zakresie przenoszonych napięć (od  $-U_{zas}$  do  $+U_{zas}$  układu). Charakteryzują się ponadto krótkim czasem stabilizowania przełączonego napięcia (rzędu ns), małą rezystancją w stanie załączenia klucza ( $R_{ON} \leq 125 \Omega$  przy  $U_{zas} = \pm 7,5$  V) i bardzo dużą rezystancją kluczy wyłączonych ( $R_{OFF} \geq 100 M\Omega$ ).

Przy przełączaniu wyjść wzmacniaczy pomiarowych do wejścia przetwornika A/C formalnie nie jest spełniony warunek jednoczesności pomiaru. Pomiaru są przesunięte względem siebie o pewien niewielki okres czasu (rzędu kilku  $\mu s$ ), zależny od czasu przełączenia multipleksera, czasu stabilizacji sygnału na wejściu przetwornika, czasu samego przetwarzania, jak i czasu odczytu i zapisu (zapamiętania) danej w pamięci RAM (czas pomiędzy próbkowaniem jest równy sumie tych czasów pomnożonych przez liczbę kanałów).

Problem przeprowadzania jednoczesnych pomiarów w 12 kanałach pomiarowych rozwiązano przez zastosowanie układów próbkująco-pamiętających (S&H) w torach pomiarowych bezpośrednio po wzmacniaczach. W zastosowanym rozwiązaniu układy próbkująco-pamiętające (BUPP z rys.4) służą do pobierania próbek wartości zmiennego w czasie napięciowego sygnału wejściowego w czasie rzędu kilku  $\mu\text{s}$  i zapamiętania tych wartości sygnału przez czas potrzebny na zapisanie danych pomiarowych do pamięci RAM. Układy S&H spełniają więc rolę pamięci analogowej w układzie pomiarowym. Dodatkowo przez to, że układ S&H utrzymuje stałą, zapamiętaną wartość próbek sygnału mierzonego przez czas przetwarzania przetwornika A/C, nie powstają błędy związane z szybkością zmian sygnału na wejściu przetwornika.

Pomimo przesuniętych względem siebie czasów odczytów i przetwarzania sygnałów (rzędu kilku  $\mu\text{s}$ ) uzyskuje się jednak (dzięki zastosowanym układom) jednoczesność pomiarów we wszystkich 12 kanałach pomiarowych, tak istotną przy specjalistycznych badaniach rozkładów przestrzenno-czasowych indukcji w szczelinie powietrznej silnika. Jednoczesność zapamiętania wartości sygnałów w poszczególnych kanałach uzyskuje się przez podanie na zwarte ze sobą wejścia sterujące próbkowaniem układów S&H impulsu zapisującego, generowanego przez mikrokontroler ( $\mu\text{K}$ ). Zastosowane układy S&H typu LF398 mają wystarczająco dobre parametry do tego typu pomiarów. Charakteryzują się krótkim czasem przyjęcia próbki, małym błędem pamiętania i dużym współczynnikiem tłumienia wpływu napięć wejściowych i zasilających na zapamiętywane napięcie.

Wszystkie wyniki pomiarów i dane potrzebne do uruchomienia systemu pomiarowego w czasie inicjalizacji zapisywane są w pamięci RAM o podtrzymywanym bateryjnie napięciu zasilania.

Duża pojemność pamięci (128 kB) zapewnia możliwość zebrania do 128 tysięcy próbek sygnału, a bardzo mały pobór prądu układu pamięci (rzędu kilku  $\mu\text{A}$  dla wersji CMOS) przy nieaktywnym sygnale wyboru pamięci i zasilaniu z baterii 3.3 V zapewnia wielotygodniową możliwość zapamiętywania zapisanej informacji. Ponadto tak opracowany i wykonany system ma zapewnioną autonomiczność, dzięki czemu można wykorzystywać go z dala od komputera nadrzędnego IBM PC, a małe wymiary i masa pozwalają na jego łatwe przenoszenie na stanowisko pomiarowe.

Zebrane dane (cyfrowe wyniki pomiarów) w późniejszym czasie mogą być przetransmitowane do komputera nadrzędnego klasy IBM łączem szeregowym RS232C, gdzie zostają zapamiętane w odpowiednich plikach i mogą podlegać dalszej obróbce cyfrowej (np. cyfrowemu całkowaniu) z możliwością wizualizacji na ekranie monitora, mogą również zostać wydrukowane.



### 2.3. Subsystem wymuszający prędkość obrotową (system 3)

Przy badaniach silnika indukcyjnego w stanie ustalonym subsystem wymuszający prędkość obrotową (obiektu badań) musi zapewnić stałą (stabilizowaną, wybraną) prędkość, spełniając wymogi elektromagnetyczne podczas badań. Przy badaniach silnika indukcyjnego w stanie nieustalonym subsystem ten musi zapewnić narastanie prędkości obrotowej według założonej krzywej przebiegu czasowego prędkości  $n(t)$ .

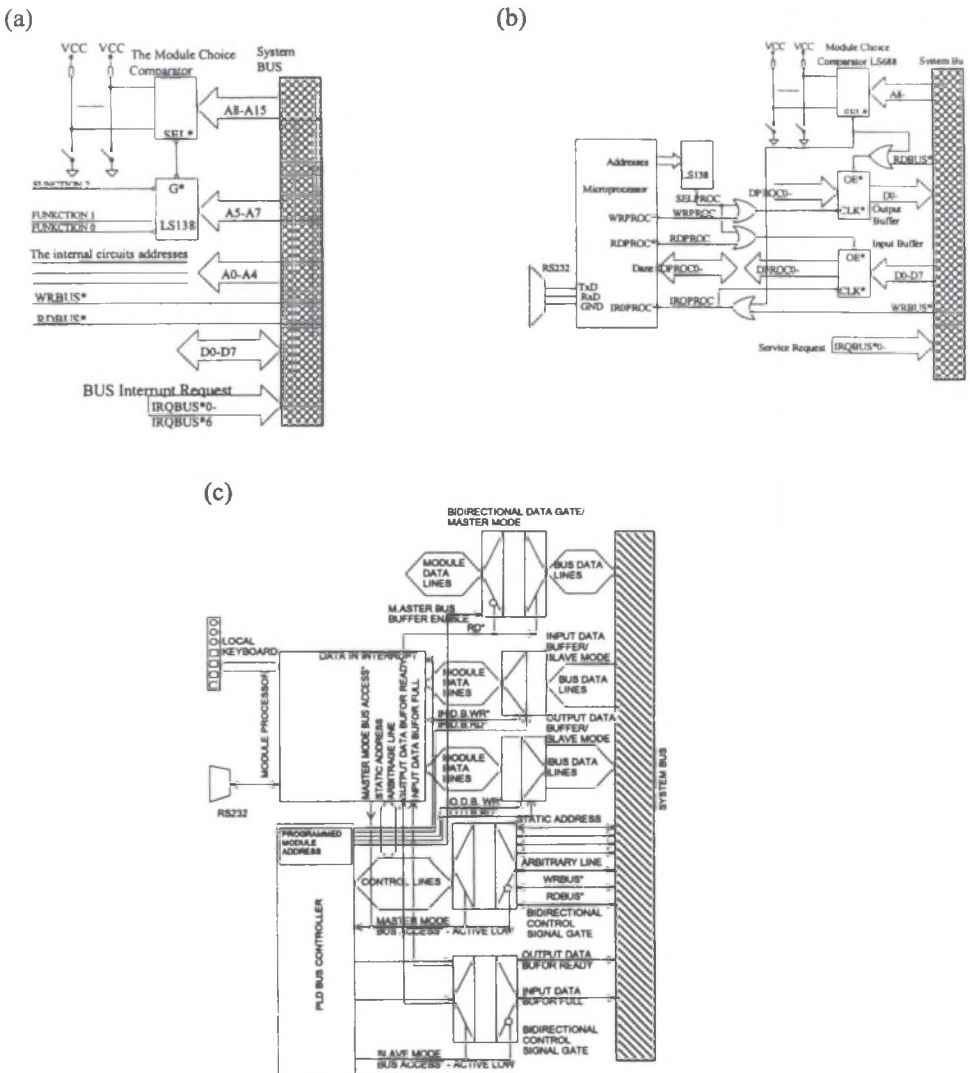
Taki właśnie układ zaprezentowano w artykule, przyjmując, że prędkość obrotowa w trakcie rozruchu silnika (jak i jego dojścia do innej prędkości obrotowej) zmienia się według krzywej o inercji 2 rzędu o 2 stałych czasowych  $T1$  i  $T2$  (ograniczając je od dołu do 10 ms, z góry do 1000 s). W praktyce dla silników o mocy rzędu 1÷10 kW należy odpowiednio dobrać stałe czasowe  $T1$  i  $T2$ , np. przyjmując ich wartość rzędu kilku sekund w zależności od potrzeb itd.

Parametry pracy silnika są wyliczane w komputerze nadrzędnym i przesyłane w postaci bloków danych do systemu pomiarowego po każdej zmianie któregoś z parametrów sterowania silnika. Bloki danych dla różnych parametrów są wcześniej zgromadzone w nieulotnej pamięci i wybierane z klawiatury bloku sterującego.

*Pierwszym założeniem konstrukcyjnym systemu sterowania i pomiarów silników elektrycznych jest elastyczność systemu – możliwość zmiany jego konfiguracji, dalszej rozbudowy i realizacji projektów poszczególnych pakietów przez różnych projektantów w oparciu o wstępne, wspólne założenia.*

Dlatego system ten zrealizowano na zasadzie urządzenia złożonego z pakietów podłączonych do magistrali systemowej. Wszystkie pakiety mają ujednoczony interfejs do magistrali systemowej, która umożliwia każdemu pakietowi pełnienie funkcji MASTER lub SLAVE.

Rozwiązanie z dedykowanym modułem MASTER i modułami SLAVE uniemożliwia bezpośrednią wymianę danych pomiędzy dwoma dowolnymi pakietami SLAVE (np. modułem pomiaru prędkości obrotowej i modułem generatora PWM) bez udziału modułu MASTER (modułu układu pomiarowego). Wydłuża to czas operacji przekazywania danych i komplikuje program modułu MASTER. Moduły SLAVE mogły być „pasywne” – traktowane przez MASTER jako rodzaj zestawu zewnętrznych rejestrów o określonych adresach (rys.5a), jak i mogły być „aktywnymi” modułami z własnym procesorem realizującym operację wymiany danych przez magistralę systemową po otrzymaniu przerwania generowanego przez moduł MASTER. W obecnie prezentowanym systemie każdy moduł może przejąć kontrolę nad magistralą systemową i stać się pakietem MASTER wybierającym dowolny inny moduł jako SLAVE.



Rys.5. Schematy blokowe modułów: „Pasywny” moduł SLAVE w systemie z jednym dedykowanym modułem MASTER (a); „Aktywny” moduł SLAVE w systemie z jednym dedykowanym modułem MASTER (b); Uniwersalny moduł MASTER/SLAVE w prezentowanym wielomodulowym systemie (c)  
 Fig.5. Block diagrams of the modules: the „passive” Slave module in the system with the only one dedicated Master module (a); the “active” Slave module in the system with the only one dedicated Master module (b); the universal Master/Slave module in the multimodule system presented in this paper (c)

Magistrala systemowa składa się z linii dostępnych dla wszystkich pakietów i kilku specjalizowanych linii kontrolnych łączących konkretne pakiety, tak jak przedstawiono na rys.6.



obligatoryjnie bajt danych. Przedstawiona kolejność: zapis bajtu rozkazu i odczyt lub zapis bajtu rozkazu i zapis bajtu danych, musi być zachowana ze względu na automatykę działania zunifikowanego dla wszystkich pakietów interfejsu magistrali systemowej. Ten interfejs oparty jest na układzie logiki programowalnej PALCE 26V12H-15/PC4. Interfejs poszczególnych pakietów różni się jedynie wpisaniem do układu PLD adresem wyboru karty z magistrali. Pewne funkcje interfejsu na niektórych kartach mogą nie być wykorzystywane – np. karta przetwornika obrotowo-kodowego wirnika nigdy nie będzie pełnić roli MASTER, ale dla unifikacji ma zainstalowany układ PLD, identycznie oprogramowany jak np. karta generatora PWM, która zarówno wydaje rozkazy jako MASTER (np. odczytu prędkości obrotowej), jak i przyjmuje rozkazy jako SLAVE. Przyjęto także konwencję zapisu lub odczytu zawsze najpierw starszego bajtu, który blokuje funkcje kontrolne pakietu SLAVE, a potem młodszego bajtu danych, który te funkcje odblokowuje. Zapobiega to sterowaniu w oparciu o niepełne dane.

*Drugim założeniem projektowym systemu* (sprzętu i oprogramowania) jest możliwość autonomicznej pracy każdego z pakietów, bez instalacji układów interfejsu. Każda karta ma własny interfejs szeregowy RS232 umożliwiający załadowanie parametrów pracy z komputera nadrzędnego, a jej zestaw lokalnych wskaźników i przycisków umożliwia indywidualne sterowanie jej funkcjami. Wszystkie rozkazy zapisu i odczytu parametrów przez magistralę systemową są zdublowane przez łącze szeregowo, a żądanie odczytu lub zapisu danych z nieobsadzonej karty poprzez magistralę systemową nie może spowodować zawieszenia pracy karty MASTER, ani spowolnić innych jej funkcji. Dlatego oprogramowanie nie zawiera pętli wewnętrznych głównej pętli programu, lecz cyklicznie (ograniczona liczba cykli w ograniczonym czasie) sprawdza warunki zapisu/odczytu z magistrali w kolejnych obiegach pętli głównej.

Komputer nadrzędny ma program zarządzania całością systemu poprzez wybrany pakiet (który po zdekodowaniu „szeregowych” rozkazów dla innych pakietów transmituje je dalej w trybie MASTER poprzez magistralę systemową) oraz programy bezpośredniego sterowania innymi kartami (w trybie ich autonomicznej pracy), nie wykorzystywane w wielopakietowym trybie pracy systemu. Programy bezpośredniego sterowania pakietami mogą być wykorzystane w trybie testowania poszczególnych modułów.

Rozkazy przez łącze szeregowo są przesyłane w formacie zbliżonym do formatu MODBUS-ASCII. Standardowa ramka (adres pakietu, bajt rozkazu, pole danych, LRC, bajty kontrolne) ma 29 bajtów.

Natomiast ramka przesyłu parametrów rozruchu lub zmiany prędkości obrotowej – zawsze poprzedzona rozkazem zapisu bloku parametrów – ma zmienną długość zależną od zaprogramowanej liczby  $n$  kroków zmiany (maksymalnie  $n=400$ ) rozruchu/zmiany -  $17+12*n$  bajtów ASCII.



Trzecim założeniem projektowym systemu jest bezpieczeństwo operacji pakietów – wszystkie wyjścia/wejścia podłączone do części mocy są optoizolowane. Ze względu na to założenie system zrealizowano w tak zwanej dwupoziomowej architekturze, gdzie sterowanie jest umieszczone w całości na „niskonapięciowym poziomie”, a na „wysokonapięciowym poziomie” są jedynie elementy bezpośrednio sterujące kluczami przetwornicy (IR2101).

W niniejszym artykule przedstawiono dwa pakiety – programowalnego generatora PWM i karty przetwornika obrotowo-kodowego wirnika realizującej równocześnie pomiar bieżącego kąta położenia wirnika, programowy pomiar prędkości obrotowej silnika i generującej impuls dla systemu pomiarowego, gdy położenie wirnika jest zgodne z zadaną wartością.

Generator PWM zbudowano w oparciu o standardowy procesor SAB80C535 firmy Siemens i specjalizowany kontroler SA8282 firmy Mitel. Idea sterowania rozruchem lub zmianą prędkości obrotowej jest taka, że zakłada się liczbę kroków rozruchu/zmiany pomiędzy ustalonymi prędkościami początkową i końcową, przyjmuje się dwie stałe czasowe i inne przedstawione dalej parametry, a następnie liczy się czasy poszczególnych kroków. Jako końcową wartość ustaloną w obliczeniach przyjmuje się  $f_{\text{end}} \pm 0.01 \lfloor f_{\text{end}} - f_{\text{begin}} \rfloor / n$ .

Dla czasu  $t=0$  na silnik podawany jest przebieg o pierwszej wyliczonej częstotliwości, a do licznika czasu sterownika wpisywana jest długość pierwszego kroku. Po ostatnim kroku ( $n+1$  krok), gdy teoretycznie obliczona wartość częstotliwości jest zgodna z wartością końcową, na silnik jest podawany przebieg o częstotliwości ustalonej końcowej  $f_{\text{end}}$ . W kolejnych krokach błąd trajektorii częstotliwości sterowania silnikiem nie przekroczy  $\Delta f = \lfloor f_{\text{end}} - f_{\text{begin}} \rfloor / n$ . W przypadku dużej liczby kroków  $n$  może się okazać, że dokładność ustawiania częstotliwości (wynikająca z minimalnego przyrostu czasu 1 ms w obliczeniach) jest mniejsza niż  $\Delta f_{\text{end}} = \pm 0.01 \lfloor f_{\text{end}} - f_{\text{begin}} \rfloor / n$  i w kilku ostatnich krokach (ale nie po ostatnim) częstotliwość jest ustawiana na wartość  $f_{\text{end}}$ .

Dokładność obliczeń poszczególnych chwil zmiany częstotliwości wynosi 1 ms. Do licznika czasu dane o chwilach przełączeń zapisywane są z dokładnością 10 ms, ponieważ i tak jest to przyjęty minimalny czas, w którym karta enkodera musi wyliczyć chwilową prędkość.

Amplituda generowanego przebiegu określona przez współczynnik wypełnienia impulsów powinna się zmieniać proporcjonalnie do zmian częstotliwości modulującej, lecz dla najniższych częstotliwości przebiegu zasilającego należy podać pewną minimalną, różną od zera, wartość amplitudy (zwykle ok. 20% maksymalnej amplitudy), ponieważ w innym przypadku start prędkości obrotowej silnika rozpocznie się dopiero przy dostatecznie dużej amplitudzie napięcia zasilającego silnik indukcyjny, a w przypadku zasilania silnika synchronicznego w niektórych przypadkach może w ogóle nie nastąpić rozruch.

Wstępne ustawianie częstotliwości nośnej  $f_{\text{carr}}$  (rzędu kilku kHz) umożliwia pracę z różnego typu przetwornicami DC/AC. Układ SA828 liczy częstotliwość przebiegu wyjściowego w specyficzny sposób, co powoduje, że uzyskiwana częstotliwość różni się od wstępnie zadawanej. Jeżeli  $f_{\text{clock}} = 10 \text{ MHz}$ ,  $f_{\text{carr}} = 4882.8 \text{ kHz}$ ,  $f_{\text{range}} = 101.7 \text{ Hz}$ , to dokładność ustawień częstotliwości nośnej wynosi około  $0.025 \text{ Hz}$ , co daje maksymalny błąd zadawanej prędkości obrotowej  $0.15/p\text{-obr/min}$ , gdzie:  $p$  – liczba par biegunów.

Podczas pracy silnika w stanie ustalonym prędkość obrotowa jest mierzona i przesyłana co 2 s do komputera nadrzędnego. Błąd pomiaru prędkości w stanie nieustalonym jest większy (maksymalnie około 1.5% dla 1800 obr/min, czyli 27 obr/min) niż błąd zadawania prędkości przez generator PWM.

Pomiar chwilowych wartości prędkości obrotowej ma znaczenie przy doborzeniu zakresu stałych czasowych zmiany prędkości obrotowej, ponieważ pozwala to w konsekwencji na identyfikację własności dynamicznych układu. Pomiar ustalonej prędkości obrotowej silnika synchronicznego przy stałym momencie obciążeniu (w realizowanym systemie pomiarowym) ma znaczenie kontrolne.

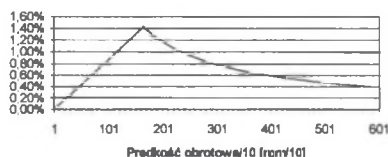
Prędkość chwilową należy mierzyć albo poprzez liczenie czasu obrotu wirnika o zadany kąt, albo poprzez liczenie kąta obrotu w zadanym czasie. Obie te metody są tym dokładniejsze, im dłuższy jest czas pomiaru prędkości (dłuższy czas obrotu o zadany kąt lub dłuższa zmiana o większy kąt w zadanym czasie), co jest równoznaczne z tym, że pierwsza metoda jest dokładniejsza dla małych prędkości, druga zaś dla dużych.

Założony zakres zmian prędkości obrotowej przyjęto w granicach od 0 do 6000 obr/min. Błąd pierwszej metody zależy od błędu pomiaru czasu zmiany kąta o  $360^\circ/1024$ , ponieważ używany jest enkoder z 10-bitowym kodem Graya i można przerwać program procesora co drugą zmianę LSB, który zmienia się co  $2 \cdot 360^\circ/1024$ . Jeżeli stosuje się procesor DALLAS 80C320 z 12 MHz zegarem i odpowiednią korekcją programu, to błąd ten jest równy  $T_{\text{error}} = 2 \mu\text{s}$ . Błąd względny metody liczenia czasu jest wyrażony zależnością (2), a prędkość obrotowa relacją (1).

Dwubajtowy licznik T1 pozwala na określenie najniższej prędkości obrotowej 3.6 obr/min. Poniżej tej prędkości następuje przepełnienie licznika i programowe wpisanie 0 do obu bajtów prędkości.

W drugiej metodzie pomiaru zliczana jest liczba przerwań (generowanych przy obrocie wirnika o kąt  $4 \cdot 360^\circ/1024$ ) w czasie 10 ms (czyli jest to czas jednego obrotu wirnika przy prędkości 6000 obr/min). Bezwzględny błąd tej metody wynosi  $\pm 1$  przerwanie. Względny błąd tej metody maleje ze wzrostem prędkości i jest wyrażony relacją (4), zaś prędkość określona jest relacją (3). System zawsze zbiera dane do obu metod pomiaru prędkości, ale do obliczeń wybiera tę, która dla bieżącej prędkości obrotowej daje mniejszy błąd zgodnie z rys.7. W ten sposób można ograniczyć błąd względny do około 1.5% dla prędkości 1800 obr/min, przy której zmienia się metodę.

Błąd pomiaru prędkości obrotowej



Rys. 7. Błąd pomiaru prędkości obrotowej z optymalną zmianą metody pomiaru  
 Fig. 7. The relative error of speed measurement

Prędkość obrotowa i względny błąd metody przy pomiarze czasu zmiany kąta obrotu o  $4 \cdot 360^\circ / 1024$ :

$$v_{\text{obr}} = \frac{1}{T_{\text{counted}}} 60 \frac{1000000}{256} [\text{rpm}] , \quad (1)$$

$$\delta_{\text{obr}} = \frac{\frac{1}{(T_{\text{counted}} - T_{\text{error}})} - \frac{1}{T_{\text{counted}}}}{\frac{1}{T_{\text{counted}}}} . \quad (2)$$

Prędkość obrotowa i względny błąd metody przy pomiarze liczby zmian kąta wirnika o  $4 \cdot 360^\circ / 1024$  w czasie 10 ms:

$$v_{\text{obr}} = n_{\text{przerwan}} 60 \frac{100}{256} [\text{rpm}] , \quad (3)$$

$$\delta_{\text{obr}} = \frac{(n_{\text{przerwan}} \pm 1) - n_{\text{przerwan}}}{n_{\text{przerwan}}} . \quad (4)$$

### 3. PODSUMOWANIE

Zaprezentowano system pomiarowy do wyznaczania rozkładów przestrzenno-czasowych indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej niesymetrycznych maszyn indukcyjnych. System został praktycznie sprawdzony dla jednego toru pomiarowego, bez automatycznej regulacji wzmocnienia w tym torze, bez mikroprocesorowego układu wymuszającego napięciowe zasilanie badanej maszyny i z podstawową wersją mikroprocesorowo sterowanego falownika bez możliwości kształtowania dynamiki dochodzenia prędkości obrotowej maszyny synchronicznej do zadanej prędkości ustalonej. W oprogramowaniu położono główny nacisk na odporność transmisji na zakłócenia, tworząc algorytmy transmisji wielokrotnie sprawdzające (np. sprawdzając transmisję zwrotną) transmitowane dane. W tak zbudowanym podstawowym systemie sprawdzono prawidłowość przedstawionej koncepcji i możliwość jej reali-

zacji (pomiaru małych napięć w obecności znacznych zakłóceń [3] oraz wielkość błędów odtwarzania, zmierzonych przebiegów, wynikających z szybkości i dokładności stosowanych układów). Odrebnym, niezwykle istotnym problemem, realizowanym jednak przez odrębny zespół niż autorzy artykułu, jest wykonanie mikrocewek pomiarowych (technologią napylania) i umieszczenie ich w badanej maszynie indukcyjnej.

## LITERATURA

1. Cioska A., Janik T.: Metoda pomiaru rozkładu pola magnetycznego w szczelinie powietrznej małych maszyn elektrycznych prądu przemiennego. OBRME "EMA-KOMEL", Zeszyty Problemowe 20/74.
2. Nowacki Z.: Modulacja szerokości impulsów w napędach przekształtnikowych prądu przemiennego. PWN, Warszawa 1991.
3. Cioska A., Gołowski G.: Problemy pomiaru małych sygnałów napięciowych w obecności silnych zakłóceń. Zeszyty Problemowe 50/95 Maszyny Elektryczne, BOBRME "KOMEL", Katowice 1995. Materiały konferencyjne, IV Seminarium Techniczne, Katowice-Ustroń, 24-26 maja 1995, str. 42-49.
4. Cioska A., Rymarski Z.: System pomiarowy niesymetrycznych maszyn indukcyjnych małej i średniej mocy. Zeszyty Naukowe Pol. Śląskiej, seria Elektryka z. 138, Gliwice 1994.
5. Cioska A., Rymarski Z.: Stanowisko laboratoryjne do zautomatyzowanych pomiarów maszyn indukcyjnych małej i średniej mocy. Zeszyty Problemowe 48/94, OBRME „EMA-KOMEL”, Katowice 1994.
6. Cioska A., Janczak A.: Wielokanałowy układ do pomiaru rozkładów przestrzenno-czasowych indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej niesymetrycznych maszyn indukcyjnych. Zeszyty Naukowe Pol. Śląskiej, seria Elektryka z. 138, Gliwice 1994.

Recenzent: Dr hab. inż. Bronisław Tomczuk

Wpłynęło do Redakcji dnia 10 kwietnia 2000 r.

## Abstract

The paper shows a measuring system for determining the spatial distribution of magnetic induction in small and medium power non symmetrical induction motors, by making a series of induction timings' examinations by means of proper micro coils installed with the possibility of shifting them in the air gap. The original concept of measurements in precisely determined electromagnetic conditions has been developed. The paper presents the concept and realisation of this measuring system that consists of a device generating the supplying

voltage (with a programmable magnitude, basic frequency and contents of harmonics), a device collecting and storing results of measurement from sensors (installed in tested engine) and microprocessor controlled dc/ac converter generating 3 phase voltage, supplying the synchronous engine (forcing the rational speed of the tested engine). All three subsystems co-operate with an IBM/PC compatible host computer, to which the stored measurement results are transmitted through the standard serial interface RS232C. Each of the subsystems can work separately and can be controlled by means of a user interface: autonomous keyboard and multiposition alphanumeric LCD module. Each subsystem has battery powered memories (RAM) in which the subsystem parameters and collected data are stored. Such a design makes it possible to use the system in places remote from the host computer after initial setting up. The paper presents the choice of performance parameters for the components of particular subsystems (such as conversion times, settling times, slew rates etc. of converters and analogue components and time of completing some instructions by embedded controllers) from point of view of the accuracy of programmed wave forms generation and the accuracy of measurements. There are shown the unique, non-standard solutions of the existing system, speeding it, such as DMA in the system with an embedded microcontroller in the multichannel measurement subsystem, use of parallel, complementary loaded programmable counters in the converter controller and others. Apart from this, there are briefly shown problems with creating the software, that has to solve the problem of faults in the transmitted data, caused by periodic and random noise. A special protocol of serial data transmission through the RS232C interface to the host IBM/PC compatible computer has been developed to eliminate the errors of transmission that can appear in the presence of interfaces. At the end of the paper there is presented the actual state of the system together with the direction of its further rebuilding and modernising.