

Aleksander ŻYWIEC, Grzegorz KŁAPYTA, Tomasz TRAWIŃSKI  
Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych

## **AUTOMATYZACJA PROCESU BADAŃ CHARAKTERYSTYK STATYCZNYCH MASZYN INDUKCYJNYCH PRZY WYKORZYSTANIU STEROWNIKÓW PROGRAMOWALNYCH**

**Streszczenie.** Autorzy przedstawiają w pracy koncepcję i opis prototypowego stanowiska przeznaczonego do pomiarów charakterystyk statycznych silników indukcyjnych. Stanowisko zaprojektowano w oparciu o sterownik SIMATIC S7-200, komputer IBM PC z kartą przetworników AC. Przedstawiony projekt prototypowego stanowiska ma na celu ograniczenie do minimum roli człowieka w procesie pomiarowym. Zastosowanie takiego rozwiązania stwarza szansę znacznego skrócenia czasu pomiarów oraz zwiększenia ich dokładności.

## **AUTOMATION OF INVESTIGATION OF STATIC CHARACTERISTICS OF INDUCTION MACHINES USING PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLERS**

**Summary.** A conception and a prototype device for measurement of induction machine static characteristics are presented in this paper. The elements of this device are: programmable logic controller SIMATIC S7-200, computer IBM PC with analog to digital converter board. This system can be used for minimizing participation of a man in measurement process. Application of this device makes possible to shorten considerably the measurement time and to get better precision.

### **1. POMIARY CHARAKTERYSTYK STATYCZNYCH**

W eksploatacji maszyn indukcyjnych szczególnie ważna jest znajomość ich własności, opisywanych między innymi przez charakterystyki statyczne i charakterystyki dynamiczne. Poprawnie wyznaczone pomiarowo ww. charakterystyki umożliwiają przeprowadzenie oceny stopnia wykorzystania obwodu magnetycznego i elektrycznego oraz symetrii uzwojeń, a także

umożliwiają wyznaczenie parametrów schematu zastępczego, strat poszczególnych i strat ogólnych oraz sprawności maszyny. Zmierzone charakterystyki statyczne i dynamiczne są źródłem informacji o własnościach ruchowo-eksploatacyjnych maszyny, pracującej w określonych warunkach zasilania i obciążenia. Można zatem stwierdzić, że wyniki badań maszyny są niezbędne dla ich konstruktorów i użytkowników, a także są wyznacznikiem jakości przeprowadzonych remontów w zakładach remontowych. W niniejszej publikacji ograniczono się do przedstawienia budowy stanowiska pomiarowego silnika indukcyjnego realizującego pomiary wybranych rodzajów charakterystyk statycznych przy ograniczeniu do minimum roli człowieka w procesie pomiarowym.

Przez charakterystyki statyczne rozumie się zależności opisujące ustalone stany pracy lub - praktycznie rzecz biorąc - przebiegi bardzo wolno zmienne. Pomiary charakterystyk statycznych realizowane przez prezentowane w niniejszej publikacji stanowisko badawcze obejmują pomiar charakterystyk biegu jałowego, charakterystyk stanu zwarcia oraz pomiar rezystancji uzwojeń. Pomiary charakterystyk statycznych przeprowadza się przy stałej prędkości, możliwie stałej temperaturze oraz stałej częstotliwości.

Przy pomiarze biegu jałowego stojan silnika zasilany jest napięciem trójfazowym nastawianym w zakresie od  $\approx 130\%$  do  $\approx 30\%$  napięcia znamionowego o stałej częstotliwości  $f_1$  równej częstotliwości sieci zasilającej. Podczas pomiarów uzwojenie wirnika jest zwarte (w silnikach indukcyjnych pierścieniowych), wał wirnika nie jest obciążony żadnym momentem zewnętrznym. Stan, przy którym prędkość obrotowa zmniejszy się o ok. 1% (prąd biegu jałowego zacznie rosnąć), jest sygnałem do zaprzestania pomiarów.

Podczas pomiarów w stanie zwarcia wirnik silnika indukcyjnego jest zahamowany. Pomiary wykonuje się przy zasilaniu uzwojeń stojana napięciem trójfazowym symetrycznym o stałej częstotliwości, aby taki prąd pobierany przez silnik nie przekraczał znacznie prądu znamionowego ( $1,2 I_n$ ). Aby uniknąć nadmiernego wzrostu temperatury uzwojeń, konieczny jest możliwie szybki pomiar, który powinien zaczynać się od najwyższej wartości napięcia zasilania (odpowiadającej maksymalnej, zadanej wartości prądu zwarcia). W prototypowej wersji stanowiska pomiarowego nie przewidziano pomiarów stanu przy różnych położeniach kątowych stojana względem wirnika [6].

Podczas pomiarów rezystancji uzwojeń wygodnie jest zastosować źródło prądowe, którego wydajność powinna być taka, aby możliwa była nastawa prądu pomiarowego w zakresie do 20% prądu znamionowego badanego silnika. Wielkość prądu podyktowana jest koniecznością ochrony uzwojeń przed nadmiernym nagraniem, co może mieć istotny wpływ na wartość mierzonej rezystancji.

Ze specyfiki wymienionych pomiarów wynika minimalna ilość przyrządów pomiarowych i innych urządzeń potrzebnych do realizacji uniwersalnego stanowiska pomiarowego. Głównym

zadaniem prezentowanego stanowiska pomiarowego jest zbieranie niezbędnych danych pomiarowych, a nie ich obróbka; dlatego zastosowano przetworniki pomiarowe napięcia i prądu, mierzące wartości chwilowe oraz skuteczne. Pozwoliło to wyeliminować przetworniki mocy (moc pobieraną można obliczyć na podstawie przebiegów chwilowych wartości napięcia i prądu). Mierzone wartości skuteczne pozwalają realizować odpowiednie czynności pomiarowe.

## 2. OGÓLNA KONCEPCJA STANOWISKA POMIAROWEGO

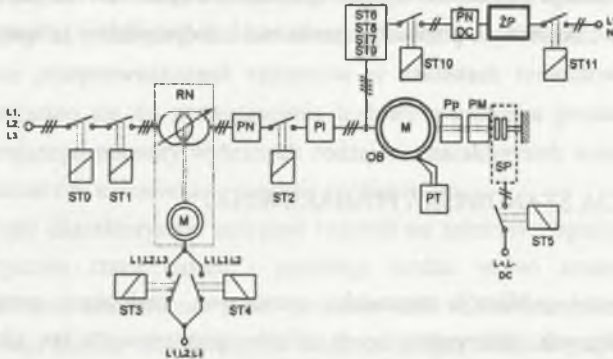
Przedstawione w niniejszej publikacji stanowisko pomiarowe, realizujące program pomiarów charakterystyk statycznych, jest syntezą trzech układów pomiarowych, tzn. układu do pomiaru charakterystyk biegu jałowego, układu do pomiarów stanu zwarcia oraz układu do pomiaru rezystancji uzwojeń stojana [7]. Schemat blokowy takiego stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys. 1. W skład stanowiska pomiarowego wchodzi:

- obiekt badany OB - trójfazowy silnik indukcyjny,
- regulator indukcyjny RN - z możliwością nastawiania napięcia wyjściowego za pomocą elektrycznego sygnału zewnętrznego,
- sprzęgło elektromagnetyczne SP,
- źródło prądowe ŻP,
- przetworniki pomiarowe: przetworniki napięcia przemiennego i stałego (PN, PN DC), przetworniki prądu (PI), przetworniki prędkości i momentu oraz przetwornik temperatury (Pp, PM, PT). Sygnały elektryczne z przetworników pomiarowych są doprowadzone do karty przetwornika A/C (nie zaznaczonego na rys. 1.),
- styczniki ST0 do ST11 - które podlegają sterowaniu przez wyjścia binarne sterownika programowalnego (nie zaznaczonego na rys. 1.).

Tor główny do pomiaru charakterystyk biegu jałowego i charakterystyk zwarcia obejmuje elementy stanowiska: ST0, ST1, RN, ST3, ST4, PN, ST2, PI, OB, PT, Pp, PM, SP, ST5. Regulator indukcyjny RN przez styczniki ST0 i ST1 jest zasilany z trójfazowej sieci 380 V i umożliwia nastawę napięcia wyjściowego przez sterowanie stycznikowe (ST3, ST4) dodatkowym silnikiem wykonawczym. Przetwornik napięcia PN kontroluje wartość napięcia wyjściowego regulatora RN i przesyła je do karty przetwornika A/C. W karcie zbiegają się również sygnały z przetworników: prądu PI, momentu PM, prędkości Pp oraz temperatury PT przyłączonych do obiektu badanego OB. Uruchomienie układu do pomiaru charakterystyk biegu jałowego odbywa się poprzez wystereowanie styczników ST0, ST1. Następnie



wykorzystując styczniki ST3, ST4 nastawia się wymaganą wartość napięcia wyjściowego regulatora. Stycznik ST2 umożliwia podanie tego napięcia na zaciski wejściowe maszyny badanej.



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego

Fig. 1. Scheme of the measurement device

W układzie do badania charakterystyk zwarcia dodatkowo znajduje się sprzęgło elektromagnetyczne SP, umożliwiające unieruchomienie wirnika badanej maszyny. Sprzęgło zasilane jest z sieci prądu stałego poprzez stycznik ST5.

Układ do pomiaru rezystancji uzwojeń stanowi oddzielny obwód stałoprądowy załączany za pomocą stycznika ST11. Źródło prądowe ŻP wymusza (po wysterowaniu stycznika ST10) przebieg żądanego prądu, a przetwornik napięcia stałego PN DC realizuje pomiar spadku napięcia na badanych uzwojeniach. Przełączanie prądu pomiarowego pomiędzy kolejnymi uzwojeniami realizują styczniki ST6 + ST9.

### 3. ALGORYTM POMIARÓW

Podstawowy schemat blokowy programu realizującego pomiary charakterystyk statycznych przedstawiono na rys.2 [7]. Po starciu i wykonaniu czynności sprawdzających stan urządzeń stanowiska (stwierdzeniu, czy wszystkie elementy podlegające sterowaniu stanowiska działają poprawnie) operator wprowadza dane znamionowe silnika badanego, tzn. napięcia, prądu, prędkości, mocy i układu połączeń uzwojeń stojana. Po zapamiętaniu wprowadzonych danych program umożliwia dokonanie wyboru rodzaju realizowanych badań. Algorytm

przedstawiony na rys.2 umożliwia wybranie bądź pomiarów charakterystyk biegu jałowego, bądź pomiarów charakterystyk zwarcia, bądź też pomiarów rezystancji uzwojeń stojana. Czynności charakterystyczne dla poszczególnych rodzajów pomiarów realizowane są w trzech podprogramach:

- podprogram bieg jałowy,
- podprogram stan zwarcia,
- podprogram pomiar rezystancji.

Po zakończeniu wykonywania podprogramu operator ma możliwość ponowienia pomiarów lub zakończenia pracy. Na początku każdego z podprogramów realizowane są czynności konfigurujące stanowisko oraz czynności sprawdzające poprawną konfigurację stanowiska dla realizacji poszczególnych podprogramów.

Z uwagi na znaczne rozmiary podprogramów zostanie przedstawiony jedynie opis słowny tych algorytmów.

**Podprogram bieg jałowy:** Po poprawnym skonfigurowaniu i przygotowaniu stanowiska do

pomiarów biegu jałowego operator dokonuje wyboru metody wykonywania pomiarów, tzn. czy będą podane własne punkty pomiarowe lub czy pomiary będą wykonywane standardowo. Po tej czynności program przechodzi do wykonywania zadań pomiarowych i regulacyjnych obejmujących:

- nastawę, korektę i pomiary żądanych wartości napięć zasilania maszyny,
- pomiary prądu, prędkości obrotowej, mocy i częstotliwości,
- zapisanie zmierzonych danych w pamięci RAM po każdym pomiarze zadanego punktu,
- przerwanie pomiarów w przypadku:
  - przekroczenia maksymalnej wartości prądu,
  - przekroczenia dopuszczalnej różnicy prędkości obrotowej pomiędzy kolejnymi punktami pomiarowymi,
  - pomiaru ostatniego punktu.



Rys. 2. Algorytm podstawowy pomiarów

Fig. 2. Measurement basic algorithm

Po wykonaniu tych czynności możliwe jest opuszczenie programu głównego lub przejście

do punktu „wybór zakresu pomiarów” (decyzja operatora), w którym możliwe jest ponowne określenie, który z podprogramów ma być wykonany lub powtórzony.

**Podprogram zwarcie:** Po skonfigurowaniu i przygotowaniu stanowiska oraz po określeniu metody wykonywania pomiarów (tzn. czy będą podane własne punkty pomiarowe lub czy pomiary będą wykonywane standardowo) w układzie pomiarowym zostaje programowo ustawione minimalne napięcie na zaciskach wyjściowych regulatora napięcia, po czym następuje załączenie stycznika ST5 i unieruchomienie wału silnika przez sprzęgło elektromagnetyczne SP (rys.1). Po tych czynnościach następuje załączenie napięcia na zaciski silnika badanego (stycznik ST2). W celu określenia napięcia i prądu zwarcia maszyny napięcie zasilające silnik zwiększane jest programowo do wartości, przy której prąd w przewodach zasilających osiągnie wartość równą prądowi znamionowemu maszyny. Zmierzone wartości prądu, napięcia i momentu zostaną zapamiętane jako napięcie zwarcia, prąd zwarcia i moment rozruchowy (moment należy przeliczyć na znamionowe warunki zasilania). Następnie dokonywany jest pomiar temperatury (pomiar może być wykonany przez przetwornik temperatury bądź przez pomiar rezystancji uzwojeń silnika). Jeśli temperatura będzie mieścić się w dopuszczalnych granicach, zostaną odczytane parametry pierwszego zadanego punktu. Po odczytaniu parametrów punktu wykonane będą czynności:

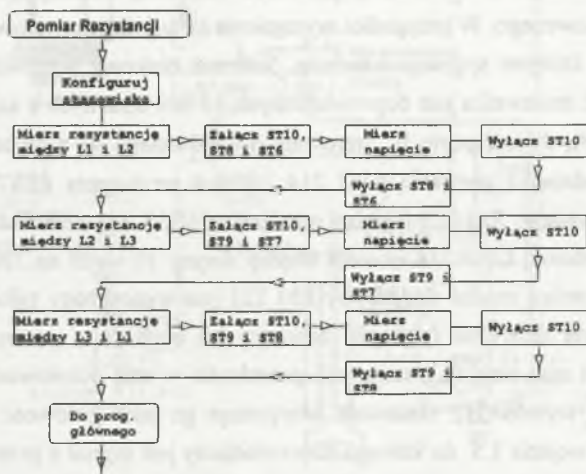
- ustalenie i pomiar żądanej wartości napięcia,
- pomiar prądu, mocy, częstotliwości, momentu mechanicznego na wale silnika,
- kontrolny pomiar temperatury,
- zapamiętanie danych w pamięci RAM.

Jeśli zmierzona temperatura mieści się w dopuszczalnych granicach, zmierzone wartości zostaną zapisane do pliku. Następnie wykonywane jest pobranie parametrów kolejnego punktu pomiarów. W przypadku zbyt wysokiej temperatury silnik badany zostanie odłączony od zasilającego go regulatora indukcyjnego, zostanie załączone chłodzenie i program przechodzi w stan oczekiwania. Po pewnym czasie pomiary zostaną wznowione od następnego punktu pomiarów. Jeśli mierzony punkt był ostatni - zostaną zakończone pomiary stanu zwarcia. Po wykonaniu tych czynności możliwe jest opuszczenie programu głównego lub przejście do punktu „wybór zakresu pomiarów” (decyzja operatora), w którym możliwe jest ponowne określenie, który z podprogramów ma być wykonany lub powtórzony.

**Podprogram pomiar rezystancji uzwojeń stojana:** Schemat podprogramu realizującego pomiary rezystancji uzwojeń stojana przedstawiono na rys.3. Po skonfigurowaniu stanowiska, tzn. wyłączeniu stycznika ST2 i włączeniu stycznika ST11 (rys.1.), następuje pomiar rezystancji między fazami L1 i L2. Zostają załączone styczniki ST10, ST8 i ST6. Po załączeniu tych styczników dokonuje się pomiaru napięcia i po zapamiętaniu jego wartości wyłącza się ST10 i następnie z pewnym opóźnieniem wyłącza się także ST8 i ST6. Po tych czynnościach



następuje pomiar rezystancji między fazami L2 i L3, a następnie między fazami L3 i L1. Pomiar tych rezystancji jest technicznie taki sam jak przy pomiarach między fazami L1 i L2, z tą różnicą że załączane są inne pary styczników (tzn. ST9-ST7 lub ST8-ST9). Po wykonaniu wszystkich pomiarów następuje opuszczenie podprogramu pomiaru rezystancji uzwojeń silnika i przejście (po potwierdzeniu przez operatora) do wyboru rodzaju badanej charakterystyki lub zakończenie całego cyklu pomiarowego (wyjście z programu musi być potwierdzone przez operatora).



Rys. 3. Algorytm pomiaru rezystancji uzwojeń stojana

Fig. 3. Algorithm of stator winding resistance measurement

#### 4. OPIS STANOWISKA ZBUDOWANEGO Z WYKORZYSTANIEM KARTY PRZETWORNIKA A/C I PROGRAMOWALNEGO STEROWNIKA LOGICZNEGO

Do budowy części sterującej stanowiskiem i realizacji przedstawionych algorytmów pomiarów wykorzystano sterownik PLC typu S7-200 produkcji firmy Siemens [4] oraz komputer PC z kartą przetworników A/C. Komputer IBM PC nadzoruje całością procesu badawczego. Karta przetwornika A/C Lab-PC jest wielofunkcyjną kartą laboratoryjną do komputerów zgodnych z IBM PC zawierającą: 12-bitowy kompensacyjny przetwornik analogowo-cyfrowy, 8 wejść pomiarowych multipleksowanych, dwa 12-bitowe wyjścia analogowe, 24-wyjściowe linie binarne w standardzie TTL - podzielone na trzy porty 8-bitowe, trzy 16-bitowe zegary/liczniki. Problem równoczesności pomiarów na wszystkich

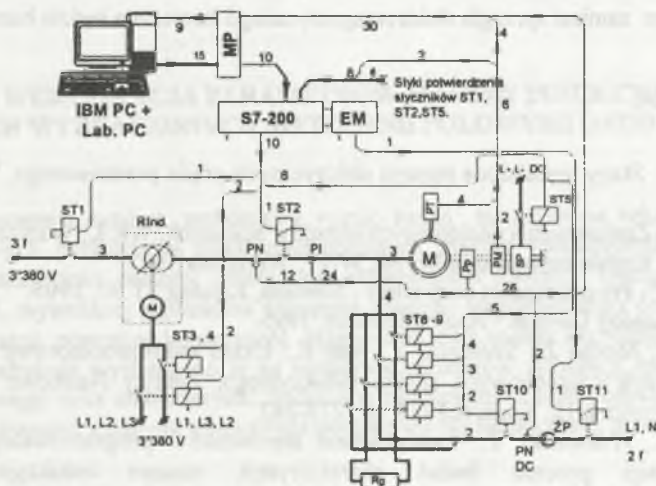
wejściach został rozwiązany przez zastosowanie układów „sample and hold” (układów tych nie zaznaczono na rys.4 z uwagi na przejrzystość rysunku). Program znajdujący się w IBM PC zbiera informacje z wejść analogowych i wysyła pewne informacje na niektóre wyjścia binarne karty przetwornika A/C. Programowalny sterownik logiczny PLC podejmuje wysyłane sygnały sterujące z IBM PC (karty przetwornika), dokonując łączeń w obwodzie badanego urządzenia. Program wczytany do sterownika eliminuje możliwość przypadkowego załączenia któregoś stycznika, kontroluje dodatkowo poprawność działania ważniejszych elementów układu stanowiska badawczego. W przypadku wystąpienia awarii układu sterownik wyłącza wszystkie elementy, nad którymi sprawuje kontrolę. Schemat blokowy stanowiska przedstawiono na rys.4. Do wejść sterownika jest doprowadzonych 10 linii binarnych z karty przetwornika A/C: osiem z portu A, dwie z portu B. Sterownik S7-200 składa się z dwóch części, tzn. modułu głównego z jednostką centralną CPU 214 (symbol producenta 6ES7 214-1BC00-0XB0) i modułu dodatkowego EM 222 (symbol producenta 6ES7 222-1HF00-0XA0). Moduł główny z jednostką centralną CPU 214 zawiera między innymi 10 wyjść na 220V AC/DC i 14 wejść binarnych, natomiast moduł dodatkowy EM 222 jest wyposażony tylko w 8 wyjść na 220V AC/DC. Jeśli na linii PA0 (najmniej znaczący bit portu A - podłączony do wejścia 0.0 sterownika) jest stan niski (L), sterownik przechodzi w stan oczekiwania. Jeżeli na tejże linii występuje stan wysoki (H), sterownik interpretuje go jako gotowość komputera do pracy. Sprawdza stan wejścia 1.5, do którego doprowadzony jest sygnał z przetwornika temperatury; jeśli stwierdza stan L, to przechodzi do sprawdzania pozostałych wejść. Ustawienie tego wejścia w stan H stanowi informację dla sterownika o przekroczeniu dopuszczalnej temperatury silnika - sterownik wyłącza wszystkie styczniki (rys.4). Jeśli stan wejścia 0.0 jest H i wejścia 1.5 jest L, sterownik sprawdza stan wszystkich pozostałych wejść, jeśli stwierdzi, że na wejściu nr:

- 0.1 jest stan H, załącza stycznik ST1, jeśli stan L, wyłącza stycznik, sprawdza styk potwierdzenia,
- 0.2 jest stan H, załącza stycznik ST2, jeśli stan L, wyłącza stycznik, sprawdza styk potwierdzenia,
- 0.3 jest stan H, załącza stycznik ST3, jeśli stan L, wyłącza stycznik,
- 0.4 jest stan H, załącza stycznik ST4, jeśli stan L, wyłącza stycznik,
- 0.5 jest stan H, załącza stycznik ST5, jeśli stan L, wyłącza stycznik, sprawdza styk potwierdzenia,
- 0.6 jest stan H, załącza stycznik ST11, jeśli stan L, wyłącza stycznik,
- 0.7 jest stan H, załącza stycznik ST10, jeśli stan L, wyłącza stycznik.

Jeżeli sterownik stwierdzi stany wejść 1.0 i 1.1 zgodne z przedstawionymi w tabeli 1 (kolumna Stan Wejść), to wykona odpowiednią czynność (kolumna Czynność). Po sprawdzeniu stanu



wszystkich wejść i zaktualizowaniu stanu wyjść rozpoczyna cykl od nowa. Aby zapewnić galwaniczną separację między sterownikiem S7-200 a obwodami wyjść binarnych karty przetwornika A/C, zastosowano moduł pośredniczący MP, który zawiera w środku wzmacniacze optoizolacyjne TLP 250. Moduł pośredniczący MP spełnia także dodatkową rolę, tzn. gwarantuje odpowiedni poziom sygnałów logicznych potrzebnych do wysterowania wejść sterownika.



Rys. 4. Schemat blokowy stanowiska

Fig. 4. Structure of the device

Tabela 1

Lp.	Stan wejść	Czynność
1	L, H	załęcz styczniki ST8 i ST6
2	H, L	załęcz styczniki ST8 i ST9
3	H, H	załęcz styczniki ST7 i ST9
4	L, L	wyłęcz styczniki ST6, 7, 8, 9

## 5. UWAGI KOŃCOWE

Programowanie stanowiska S7-200 z IBM PC jest złożone, gdyż program jest dwuczęściowy; program główny w IBM PC i program dodatkowy w S7-200. Mimo zastosowania stosunkowo prostego sterownika programowalnego możliwa jest rozbudowa stanowiska o dodatkowe funkcje, np.: pomiary przy idealnym biegu jałowym, pomiary

charakterystyk mechanicznych w stanie obciążenia, badania charakterystyk rozruchowych przy różnych położeniach kątowych wirnika względem stojana, badania nagrzewania maszyn, badania pracy dorywczej. Możliwe jest również uzupełnienie układu o podzespoły gwarantujące podgrzewanie i schładzanie badanego silnika takie, aby w każdym punkcie pomiarowym utrzymywana była stała (określona) temperatura uzwojeń maszyny. Naturalnie realizacja takiego algorytmu pomiarów pociąga za sobą konieczność pewnej przebudowy stanowiska (np. zamiast sprzęgła elektromagnetycznego konieczna będzie hamownica).

## LITERATURA

1. Paszek W.: Stany nieustalone maszyn elektrycznych prądu przemiennego, WNT, Warszawa 1986.
2. Socloft S.: Zastosowania analogowych układów scalonych, WKiŁ, Warszawa 1991.
3. Trybus L.: Regulatory wielofunkcyjne, WNT, Warszawa 1992.
4. Simatic S7 - Programmable controllers - Siemens, Katalog ST 70, 1995.
5. Katalog Analog Devices - Analog Devices, 1995.
6. Żywiec A., Mołoń Z., Świetlicki T., Szar E.: Układ mikroprocesorowy do zdejmowania charakterystyk rozruchowych silnika indukcyjnego, Zeszyty Naukowe AGH, nr 1120, Elektrotechnika z. 12, Kraków 1988, str. 273-282.
7. Żywiec A., Trawiński T.: Zastosowanie sterowników programowalnych w układach automatyzacji procesu badań charakterystyk maszyn indukcyjnych, Materiały I Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej „Postępy w Elektrotechnice Stosowanej”, Zakopane 1997.

Recenzent: Dr hab. inż. Jerzy Hickiewicz  
Profesor Politechniki Opolskiej

Wpłynęło do Redakcji dnia 30 maja 1997 r.

## Abstract

This paper presents a conception and a prototype device for measurements of induction machine characteristics. In part one a short description of the measurements process of an induction machine in steady state has been given. Reasons for building universal measurement device have been presented as well. In part two the main part of measurement device—especially its elements is described. In part three the algorithm of measurement program for computer IBM PC and the programmable controller (eg: the measurement algorithm of no load state, the algorithm of measurement of the stator winding resistance) have been presented. In part four the way of connection of the device elements and their operation have been given. Possibilities of the device development concerning extra functions have been mentioned as well.