

Henryk URZĘDNICZOK

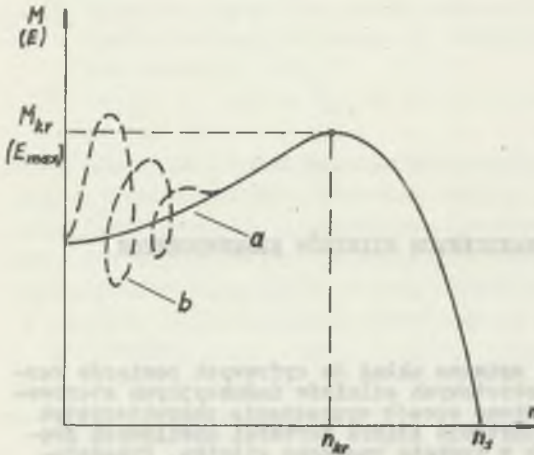
Instytut Metrologii Elektrycznej
i Elektronicznej
Politechniki Śląskiej

CYFROWY POMIAR CHARAKTERYSTYK MECHANICZNYCH SILNIKÓW ELEKTRYCZNYCH INDUKCYJNYCH

Streszczenie. W artykule opisano układ do cyfrowych pomiarów wartości chwilowych prędkości obrotowych silników indukcyjnych sterowany minikomputerem. Przedstawiono sposób wyznaczenia charakterystyk mechanicznych silników na podstawie zbioru wartości chwilowych prędkości obrotowych mierzonych w trakcie rozruchu silnika. Przedstawiono analizę błędów pomiaru prędkości, określono maksymalny błąd wyznaczenia momentu mechanicznego oraz określono optymalną wartość czasu uśrednienia w zależności od parametrów silnika. Podano przykładowe wartości błędów maksymalnych, bezwzględnych dla wybranych wartości czasu uśrednienia.

1. WPROWADZENIE

Charakterystyka mechaniczna jest to zależność momentu mechanicznego na wał silnika od prędkości obrotowej zmieniającej się od zera do prędkości synchronicznej. Rozróżnia się charakterystyki mechaniczne: statyczną i dynamiczną. Charakterystykę statyczną (krzywa a, rys. 1) wyznacza się w elektromagnetycznym i mechanicznym stanie ustalonym, natomiast na przebieg charakterystyki dynamicznej (krzywa b, rys. 1) mają wpływ elektromechaniczne procesy przejściowe. Szczególnym przypadkiem charakterystyki mechanicznej jest charakterystyka rozruchowa, która dostatecznie wiernie pokrywa się z charakterystyką statyczną, o ile podczas rozruchu ograniczy się wpływ stanów przejściowych. W tym celu sprzęga się z wałem silnika duże masy wirujące oraz przeprowadza się rozruch z nawrotu. Przy takim sposobie rozruchu procesy przejściowe wytłumiają się w zakresie ujemnych prędkości obrotowych. Norma PN-72/E-04272 zaleca pomiar charakterystyki mechanicznej silników poprzez pomiar charakterystyki rozruchowej.



Rys. 1

Przykładowe charakterystyki mechaniczne silnika indukcyjnego - statyczne (krzywa a) i dynamiczne (krzywa b)

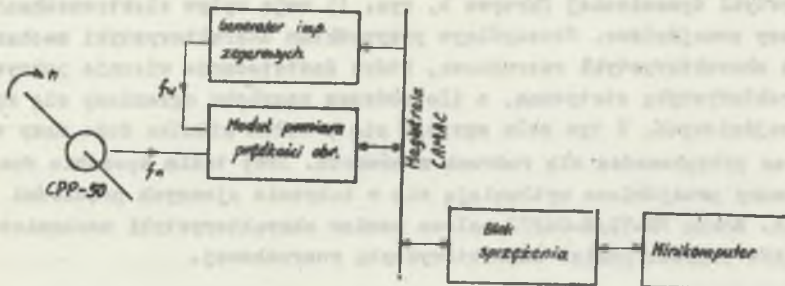
Exemplary torque-speed characteristics of asynchronous motors - static (curve a) and dynamic (curve b)

kości obrotowej n wału silnika. Napięcia te są przesunięte w fazie o $\pm \frac{\pi}{2}$ w zależności od kierunku obrotów.

2. OPIS UKŁADU POMIAROWEGO

W komputerowym systemie badań silników indukcyjnych [2] zastosowano wyznaczenie charakterystyki rozruchowej przy użyciu toru przetwarzania przedstawionego na rys. 2. Zasadniczym układem tego toru jest moduł CAMAC (rys. 3) przetwarzający sygnały z przetwornika obrotowo - impulsowego na liczby proporcjonalne do chwilowych wartości prędkości obrotowej silnika.

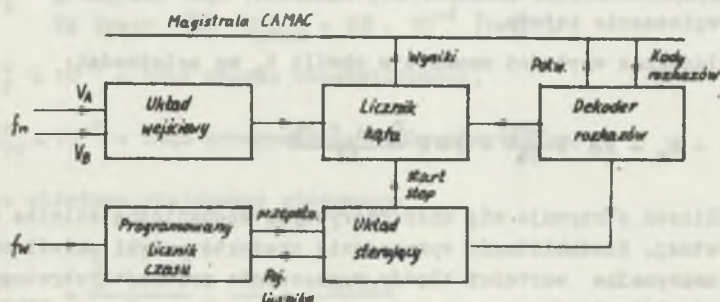
Przetwornik obrotowo - impulsowy CPP-50, przystosowany do celów pomiaru prędkości chwilowej [1], wytwarza na wyjściu dwa napięcia sinusoidalne zmienne V_A i V_B o częstotliwości f proporcjonalnej do prędkości



Rys. 2

Struktura toru pomiaru prędkości obrotowej w komputerowym systemie badania silników elektrycznych

Structure of measurement circuit of the rotational speed in computer controlled system of the electric motors testing



Rys. 3

Schemat blokowy modułu prędkości obrotowej
The block diagram of module rotational speed

W układzie wejściowym napięcia V_A i V_B są przekształcane na ciąg impulsów prostokątnych o częstotliwości f . Na podstawie przesunięcia fazowego napięć V_A i V_B wyznaczony jest bit znaku kierunku obrotów. Impulsy zliczone są w liczniku kąta (każdemu impulsowi odpowiada jednostkowa wartość drogi katowej wału) o stałej pojemności 10^4 w czasie Δt . Czas Δt jest odmierzony przez licznik czasu o pojemności ustawionej rozkazami CAMAC, który zlicza impulsy z generatore częstotliwości wzorcowej. Stan licznika kąta po każdym odcinku czasu Δt jest liczbą proporcjonalną do drogi katowej $\Delta\alpha$ wału silnika w czasie Δt . Liczby te wraz z bitem znaku są przesyłane do pamięci minikomputera. Zatem po zakończeniu pomiarów (z chwilą ustalenia się prędkości obrotowej) w pamięci znajduje się ciąg liczb reprezentujących drogę katową wału silnika między kolejnymi chwilami $t_j = \Delta t$. $j = 1, 2, \dots, N$. Na tej podstawie, przez różniczkowanie numeryczne wyznaczone wartości chwilowe prędkości obrotowej $n(t_k)$ w chwilach t_k wg zależności:

$$n(t_k) = n_k = \frac{\Delta\alpha}{\Delta t} \quad (1)$$

gdzie:

$$t_k = \Delta t(j + \frac{1}{2})$$

Moment mechaniczny na wale silnika związany jest z prędkością obrotową równaniem:

$$M = J E = 2\pi J \frac{dn}{dt} \quad (2)$$

gdzie:

J - stały moment bezwładności mas wirujących,

E - przyspieszenie kątowe.

Przyjęto obliczanie wartości momentu w chwili t_k wg zależności:

$$M(t_k) = M_k = 2\pi J \frac{\Delta n_k}{\Delta t} = 2\pi J \frac{n_{k+1} - n_k}{\Delta t} \quad (3)$$

W wyniku obliczeń otrzymuje się charakterystykę mechaniczną silnika w postaci dyskretnej. Niedokładność wyznaczania charakterystyki określona jest przez maksymalne wartości błędów wyznaczenia prędkości obrotowej i przyspieszenia kątowego.

3. KLASYFIKACJA BŁĘDÓW WYZNACZANIA CHARAKTERYSTYKI $M = f(n)$

Wyznaczenie charakterystyki silnika odbywa się w dwóch etapach: w pierwszym przetworze się na bieżąco kolejne odcinki drogi kątowej wału silnika na liczby rejestrowane w pamięci komputera, w drugim na podstawie ciągu liczb wyznacze się dla poszczególnych punktów charakterystyki wartości prędkości obrotowej i momentu wg zależności (1) i (3).

Liczby reprezentujące odcinki drogi kątowej obraczone są błędem będącym wypadkowym błędem poszczególnych ogniw toru przetwarzania - błąd przetwarzania. Obliczone na podstawie tych liczb wartości prędkości obrotowej i momentu lub przyspieszenia wg wzorów (1) i (3) jest źródłem dodatkowego błędu - błędu uśrednienia. Błąd przetwarzania obejmuje błędy związane z niedokładnym przeniesieniem ruchu obrotowego wału silnika na wałek przetwornika obrotowo - impulsowego oraz błędy instrumentalne, których przyczyną jest ograniczona dokładność poszczególnych ogniw toru przetwarzania. Błąd przetwarzania można wyrazić zależnością:

- dla prędkości obrotowej

$$\delta_{nprz}^0 = \delta_w^0 + \delta_z^0 + \delta_p^0 + \delta_P^0 + \delta_{pr}^0$$

gdzie:

δ_w^0 - względny błąd dyskretyzacji czasu pomijany ze względu na bardzo małe wartości czasu propagacji sygnałów w układzie - rzędu 20 ns - w stosunku do czasu Δt ,

$$\delta_z^0 = \frac{1}{N \Delta t n} - \text{względny błąd dyskretyzacji kąta}$$

N - stała przetwornika obrotowo - impulsowego,

δ_p^0 - graniczny błąd położenia przetwornika obrotowo-impulsowego.
Wg pracy [4] $\delta_{pmax} = 2\pi \cdot 10^{-4}$ [rad],

$\delta_p^0 \leq 10^{-5}$ - błąd wzorca częstotliwości,

$\delta_{pr}^0 < 10^{-5}$ - błąd przenieszenia ruchu obrotowego.

Pomijając składowe nieistotne otrzymano:

$$\delta_{nprz}^0 = \frac{\frac{1}{N} + 10^{-4}}{n} \cdot \frac{1}{\Delta t} = \frac{\delta_n \text{ prz}}{n}$$

- w oparciu o zależność (3) dla przyspieszenia kąowego:

$$\delta_{\Sigma prz}^0 = \frac{2(\frac{1}{N} + 10^{-4})}{B} \cdot \frac{1}{(\Delta t)^2} = \frac{\delta_{\Sigma prz}}{B} \quad (5)$$

Zależność (5) została przedstawiona na rys. 5

Dla rozpatrywanego sposobu wyznaczenia charakterystyki mechanicznej można wyróżnić dwie składowe błędy uśredniania. Jedną jest błąd powstający na skutek tego, że liczbę zawartą w liczniku kąta traktuje się jako proporcjonalną do chwilowej wartości prędkości obrotowej, w rzeczywistości jest ona proporcjonalna do średniej prędkości obrotowej ze okresu Δt . Interpretacja graficzna tego błędu przedstawiona jest na rys. 4. Drugą składową błędów uśredniania jest błąd różniczkowania numerycznego, którym obciążone są wyniki obliczeń przyspieszenia kąowego. Błąd różniczkowania można zdefiniować jako różnicę między rzeczywistą wartością chwilową przyspieszenia, a wartością wyznaczoną wg zależności (3) przy założeniu, że dane są dokładne wartości prędkości obrotowej w chwilach t_k . Błąd uśredniania dla przyspieszenia kąowego zależy od przyjętego algorytmu różniczkowania numerycznego, wartości czasu Δt oraz od charakteru zmienności przyspieszenia w czasie, czyli od krzywizny charakterystyki rezerwowej. Określenie analityczne tego błędu jest trudne, jednakże można oszacować jego maksymalną wartość odpowiadającą obszarowi charakterystyki $M = f(n)$ o największym zakrzywieniu, czyli jej wierzchołkowi - punkt (M_{kr}, n_{kr}) na rys. 1. Dla szerokiej klasy silników indukcyjnych można spreksymować ten obszar charakterystyki włączeniem o stałych zależnych od parametrów silnika (E_{max} i T_r lub odpowiednio P_n i n_g) oraz wyznaczyć na tej podstawie maksymalny błąd uśredniania [3]. Uzyskano w ten sposób empiryczną zależność błędów uśredniania od parametrów silnika i czasu zliczania impulsów kąta:

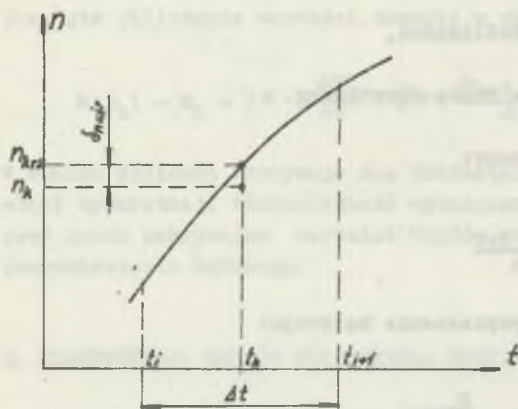
$$\delta_{\text{Euśr}} = 6,5 \cdot \frac{E_{\text{max}}}{T_R} (\Delta t)^2 \quad (6)$$

gdzie:

E_{max} [rad/s²] - przyspieszenie kątowe odpowiadające wierzchołkowi charakterystyki,

T_R [s] - czas rozruchu (od $n = 0$ do $n = n_g$)

Δt [s] - czas zliczenia impulsów kąta.



Rys. 4

Interpretacja graficzna błędu uśredniania dla prędkości obrotowej
Graphical interpretation of the averaging error for rotational speed

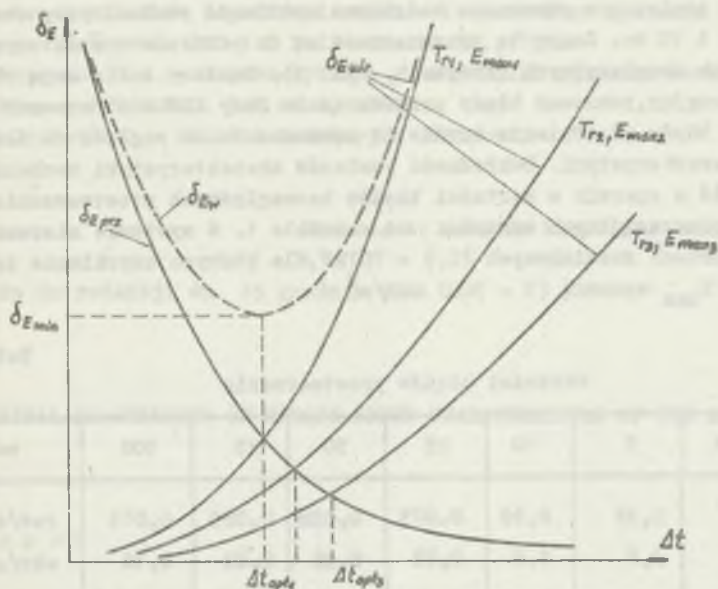
zapewnienie jednekowej dokładności we wszystkich punktach nie jest możliwe, ponieważ błąd uśredniania zależy od jej krzywizny. Maksymalna dokładność pożądana jest dla obszaru wierzchołka charakterystyki, tj. w pobliżu momentu krytycznego, gdyż parametr ten oraz odpowiadający mu poślizg krytyczny są parametrami charakterystycznymi dla silnika i wchodzi do zależności opisujących jego pracę w układach napędowych. Przeprowadzone oszacowanie błędów pozwala na minimalizację błędu wypadkowego w tym obszarze charakterystyki poprzez wyznaczenie optymalnego czasu zliczenia impulsów Δt (rys. 5).

W oparciu o zależności (5) i (6) można określić analitycznie optymalną wartość Δt :

$$\Delta t_{\text{opt}} = 0,07 \cdot \sqrt[4]{\frac{T_R^2}{E_{\text{max}}}}$$

lub w przybliżeniu po wprowadzeniu jako parametrów P_n i n_g :

$$\Delta t_{\text{opt}} \approx 0,59 n_g \cdot \sqrt[4]{\frac{J^3 n_g}{P_n^3}}$$



Rys. 5

Zależność błędów przyspieszenia kąowego od czasu zliczenia impulsów kąta
 Dependence of angular acceleration error on the time of counting of the
 angular pulses

gdzie:

- P_n [W] - moc znamionowe silnika,
 n_s [obr/s] - prędkość synchroniczna,
 J [$N \cdot m^2$] - wypadkowy moment bezwładności wału silnika i hamownicy.

4. UWAGI KOŃCOWE

W oparciu o przytoczone wyżej zależności, uwzględniając zakres mocy badanych silników (0,5 - 70 kW), przy założeniu, że błąd maksymalny wypadkowy wyznaczenia momentu mechanicznego nie powinien być większy niż 1%, ustalono następujące wartości czasów zliczenia impulsów:

$$\Delta t = (25 ; 50 ; 75 ; 100) \text{ ms.}$$

Spśród tych czasów, mając parametry silnika, wybrany jest czas optymalny. W systemie pomiarowym stworzono dodatkowo możliwość pomiaru przy czasach $\Delta t = 5$ ms i 10 ms. Czasy te przeznaczone są do pomiarów charakterystyk ruchowych oscylacyjnych (krzywa b, rys. 1). Pomiaru takie mają charakter orientacyjny, ponieważ błędy przetwarzania przy krótkich czasach są znaczne, a błędy uśredniania trudne do oszacowania ze względu na złożony kształt charakterystyki. Dokładność pomiarów charakterystyki mechanicznej można ocenić w oparciu o wartości błędów bezwzględnych przetwarzania wyliczone dla poszczególnych wartości Δt - tabela 1. W systemie mierzone są silniki o mocach zmienionych (0,5 - 70) kW, dla których uzyskiwane przyspieszenia E_{max} wynoszą (5 - 500) rad/s^2 .

Tabela 1

Wartości błędów przetwarzania

Czas Δt	5	10	25	50	75	100	ms
$\delta_{prz n}$	0,38	0,19	0,075	0,038	0,025	0,019	rad/s
	3,6	1,8	0,72	0,36	0,24	0,18	obr/min
$\delta_{prz E}$	24	6	0,96	0,24	0,11	0,06	rad/s^2

Wartości błędów uśredniania dla obszaru wierzchołka charakterystyki są przy optymalnych czasach Δt porównywalne z błędami przetwarzania (warunek optymalizacji doboru Δt). Poza obszarem wierzchołka wartość tego błędu jest mniejsza (mniejsza krzywizna charakterystyki). Istnieje możliwość budowy urządzenia do pomiaru charakterystyki mechanicznej, stosując: tzw. sposób stałego kąta, tzn. mierząc czas przyrestu drogi katowej wału silnika o stałą wartość. Sposób ten nie zapewni większej dokładności pomiaru [3], jest natomiast kłopotliwy technicznie, ponieważ wymaga rozbudowy układu elektronicznego.

LITERATURA

- [1] Jakubiec J.: Przystosowanie przetwornika OPP-50 do pomiarów chwilowej prędkości obrotowej. PAK nr 3, 1980.
- [2] Mercyniak A., Grzesik S., Dykła Z.: Komputerowa instalacja do automatycznego badania silników elektrycznych. PAK nr 11, 1979.

- [3] Urzędniczek H.: Opracowanie zagadnienia pomiaru charakterystyki ruchowej silników asynchronicznych w komputerowym systemie badań. Praca dyplomowa. IME i E Politechniki Śl., 1980.
- [4] Merkwicz M.: Analogowo-cyfrowe przetworniki optyczne serii CPP produkowane przez PZO. PAK nr 1, 1972.
- [5] PN-72/E-04272 - Silniki indukcyjne 3-fazowe.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Michał Szyper

Wpłynęło do redakcji dn. 15 grudnia 1984 r.

THE DIGITAL MEASUREMENT OF TORQUE-SPEED CHARACTERISTIC OF THE ASYNCHRONOUS MOTORS

S u m m a r y

A computer controlled system for measurement of an actual value of a rotational speed of the electric motors was described in this paper. The method of determination of the torque-speed characteristic of the motors on the base of collection of actual values of rotational speed measured during starting the motors was presented. The error analysis of the rotational speed measurement was presented. The greatest error of determination of the torque moment and the best possible value of averaging time depend on the parameters of the motors has been fixed. A few exemplary values of greatest absolute error was published.

ЦИФРОВОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНИЧЕСКИХ ИНДУКЦИОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Р е з ю м е

В статье описана система цифрового измерения мгновенного значения скорости вращения асинхронных двигателей, вычислительной машиной. Представлен метод определения кривой момента двигателей на основе множества мгновенных значений скорости вращения, измеренных во время пуска двигателя. Дан анализ погрешности измерения скорости, определена максимальная погрешность вычисления механического момента а также оптимальное значение времени осреднения в зависимости от параметров двигателя. Даны примерные значения максимальной абсолютной погрешности для некоторых значений времени осреднения.