

Wacław ORLEWSKI, Andrzej ZATORSKI
 AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA W KRAKOWIE
 KATEDRA MASZYN ELEKTRYCZNYCH, KATEDRA METROLOGII

Układ do pomiaru momentu obrotowego z optyczną transmisją sygnału

Dr inż. Wacław ORLEWSKI

Absolwent Wydziału Elektrotechniki Górniczej i Hutniczej AGH - rocznik 1975. Pracuje w Katedrze Maszyn Elektrycznych na Wydziale Elektrotechniki Automatyki Informatyki i Elektroniki na stanowisku adiunkta. Zajmuje się problematyką pomiarów maszyn elektrycznych i ich sterowaniem, ze szczególnym uwzględnieniem napędowych układów przekształtnikowych i generatorów zasilanych z alternatywnych źródeł energii. Jest autorem ponad 30 publikacji na temat metod ich sterowania i badania sprawności napędów oraz 1 patentu.



e-mail: orlewski@agh.edu.pl

Dr inż. Andrzej ZATORSKI

Absolwent Wydziału Elektrotechniki Górniczej i Hutniczej AGH - rocznik 1969. Po uzyskaniu w 1974 roku stopnia doktora n.t. nauczyciel akademicki na macierzystym Wydziale Elektrotechniki Automatyki Informatyki i Elektroniki, obecnie na stanowisku adiunkta. Głównie zainteresowania naukowe dotyczą teorii pomiaru, pomiarów elektrycznych i telekomunikacyjnych oraz diagnostyki magnetycznej. Członek Sekcji Kształcenia Komitetu Metrologii i Aparatury Pomiarowej PAN. Autor lub współautor ponad 30 publikacji i 5 skryptów.



e-mail: zatorski@agh.edu.pl

Streszczenie

Podczas badania elektromechanicznych charakterystyk maszyn elektrycznych zachodzi konieczność pomiaru ich momentu obrotowego. W tym celu na wirującym wale badanej maszyny instalowany jest zespół czujników (najczęściej tensometrycznych), stanowiących część układu pomiarowego, w którym powstaje sygnał niosący informację o mierzonym momencie. Sygnał ten jest następnie transmitowany z wirującego wału do stacjonarnej części układu pomiarowego. W zastosowanym przez autorów rozwiązaniu wykorzystano w tym celu bezprzewodowe łącznie optyczne pracujące w zakresie podczerwieni. Część nadawcza układu pomiarowego została zainstalowana na wale maszyny służącej jako hamownica badanego silnika. Zawiera ona stałoprądowy mostek tensometryczny, baterię zasilającą, wzmacniacz napięcia nierównowagi mostka, przetwornik U/f oraz diodę elektroluminescencyjną umieszczoną w otworze wykonanym w osi wirującego wału. Wytworzony sygnał impulsowy o częstotliwości rzędu 10 kHz odbierany jest w stacjonarnej części układu pomiarowego, zawierającej: fototranzystor (umieszczony również osiowo względem wydrążonego wału), wzmacniacz, przetwornik f/U, woltomierz cyfrowy i wyjście rejestracyjne. Skalowania układu pomiarowego dokonano w warunkach statycznych, zadając wzorcowe wartości momentu skręcającego unieruchomiony wał maszyny hamującej.

Zaproponowana przez autorów metoda ma szereg zalet, do których należą: brak w torze transmisji sygnału pierścieni ślizgowych i szczotek (metoda bezprzewodowa), ze względu na zastosowanie modulacji FM odporność na zakłócenia analogowe, w porównaniu z innymi metodami bezprzewodowymi (np. wykorzystującymi transformatory wirujące), stosunkowo prosty układ elektroniczny. Przedstawiony przez autorów układ umożliwi pomiar momentu obrotowego w zakresie $0 \div 30$ Nm przy prędkościach obrotowych w przedziale $0 \div 1500$ obr/min z niepewnością nie większą niż 1%.

Słowa kluczowe: pomiar momentu, łącznie optyczne.

A system for measurement of torques with optical transmission of the signal

Abstract

When investigating mechanical characteristics of electric machines it becomes necessary to measure their torques. Sets of sensors (most often strain gages) are installed on the shaft of the examined machine being a part of a measuring system, producing a signal informing on the measured torque. This signal is then transmitted from the rotating shaft to the stationary part of the measuring system. The solution applied by the present Authors uses to this aim a wireless optical connection operating in the infrared range. The emitter of this measuring arrangement was installed on the shaft of the machine serving as electric dynamometer of the tested motor. It includes a d.c. full bridge circuit with strain gages, a battery supplying power, an amplifier of the bridge unbalance voltage, a U/f converter and a light emitting diode placed in the axis of the rotating shaft. The produced pulsating signal with a frequency of the order of 10 kHz is received in the stationary part of the measuring

arrangement, composed of: a phototransistor (also placed in the axis of the hollow shaft), amplifier, f/U converter, digital voltmeter and a recording output. The measuring system was calibrated in static conditions by putting-in calibrating values of the torques, twisting the stopped shaft of the electric dynamometer.

The method of signal transmission, suggested by the present Authors has a series of advantages such as: absence of sliding rings and brushes in the transmission chain (a wireless method), resistance to analog interferences (frequency modulation), a relatively simple electronic system as compared with other wireless methods, e.g. those using radio-connections. The system presented by the Authors allows to measure torques within $0 \div 30$ Nm at speeds of $0 \div 1500$ rev/min with uncertainties below 1%.

Keywords: torque measuring, optical link.

1. Wprowadzenie

W trakcie wyznaczania charakterystyk i parametrów silników elektrycznych, przeprowadzanego w warunkach laboratoryjnych musi być mierzony rozwijany przez nie moment w różnych warunkach obciążenia. Do wytwarzania momentu hamującego stosowane są [1]:

- hamownice mechaniczne wyskalowane najczęściej statycznie wzorcowymi wartościami momentu
- silniki lub prądnice sprzęgnięte z silnikiem badanym, obciążające go pożądanym momentem, o wartości określonej na podstawie pobieranej lub wydawanej mocy elektrycznej.

Jeśli badane są stany dynamiczne silnika, przy zmieniających się: prędkości obrotowej, parametrach zasilania lub obciążenia, do pomiaru przebiegu momentu w funkcji czasu używane są przetworniki momentu, wykonywane jako łączniki mechaniczne między wałami badanego silnika i hamownicy, wyposażone w układy czujników różnego typu, umożliwiające wyznaczenie wartości momentu na podstawie pomiaru [1, 3]:

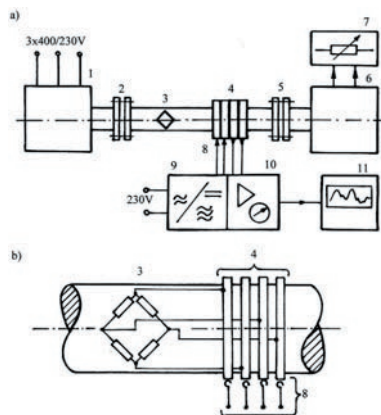
- kąta skręcania łącznika, np. za pomocą dwóch tarcz ze szczelinami, zamocowanych na obu jego końcach (metoda optyczna wykorzystująca zmianę natężenia wiązki świetlnej przechodzącej przez przeciwległe szczeliny obu tarcz, powodowaną ich wzajemnym przesłonięciem)
- odkształcenia powierzchni łącznika (np. metoda tensometryczna)
- zmiany przenikalności magnetycznej stali, z której wykonany jest łącznik (metoda magnetostrykcyjna).

W przypadku często stosowanej metody tensometrycznej [2, 3, 4], czujniki rezystancyjne (tensometry) naklejone są na powierzchni walcowego, sprężystego łącznika, którego odkształcenie powoduje zmianę ich rezystancji; są one najczęściej połączone w układzie czteroramienno mostka. Transmisja napięcia zasilającego mostek i jego napięcia wyjściowego reali-

zowana jest za pomocą pierścieni ślizgowych ze szczotkami. To rozwiązanie charakteryzuje się małą niezawodnością a także jest powodem powstawania zakłóceń w sygnale pomiarowym. Dlatego też pojawiło się szereg innych rozwiązań technicznych [1, 5], umożliwiających bezprzewodową transmisję sygnału niosącego informację o wartości momentu z wirującego łącznika do części stacjonarnej układu pomiarowego. Wykorzystują one pole elektromagnetyczne występujące pomiędzy sprzęgniętymi cewkami, w transformatorach wirujących lub łączach radiowych. Rozwiązania te są jednak wrażliwe na zakłócenia mające tę samą naturę fizyczną, co sygnał użyteczny. Powoduje to, że np. w przypadku, gdy transmisja sygnału dokonywana jest łączem radiowym, stosuje się zamiast modulacji AM, modulację FM, znacznie bardziej odporną na zakłócenia addytywne [5,6]. Wszystkie te rozwiązania zwiększają stopień komplikacji układów elektronicznych, za pomocą których są one realizowane. Te z układów, które w torze przetwarzania sygnału pomiarowego wchodzi w skład części nadawczej muszą być zainstalowane na łączniku i zasilane albo bezprzewodowo (np. przez transformator wirujący), albo z miniaturowych akumulatorów, także zamocowanych na łączniku. To drugie rozwiązanie, prostsze konstrukcyjnie, jest aktualnie możliwe ze względu na mały pobór mocy przez układy elektroniczne nowych generacji, szczególnie w przypadku, gdy sygnał pomiarowy transmitowany jest na niewielką odległość.

2. Struktura i właściwości układu pomiarowego

W Laboratorium Katedry Maszyn Elektrycznych AGH badania silników wykonywane są rutynowo, zarówno w ramach zajęć dydaktycznych jak i prac naukowych. Przeprowadzane są one na zaprojektowanym i oprzyrządzonym w tym celu stanowisku, o strukturze przedstawionej na rysunku 1.



Rys. 1. Stanowisko do badania charakterystyk ruchowych maszyn elektrycznych: a) struktura układu do pomiaru momentu skręcającego metodą tensometryczną, b) fragment wału łącznika: 1 – badany silnik; 2, 5 – sprzęgła; 3 – mostek tensometryczny; 4 – pierścienie ślizgowe; 6 – prądnica; 7 – regulowane obciążenie prądnicy; 8 – szczotki; 9 – zasilacz; 10 – wzmacniacz tensometryczny; 11 – rejestrator.

Fig. 1. Test stand for investigation of motive characteristics of electric machines: a) structure of measurement system for measuring torsional moment with strain gages, b) fragment of the coupler shaft: 1 – investigated electric machine; 2, 5 – clutches; 3 – full bridge circuit with strain gages; 4 – slip rings; 6 – generator; 7 – controllable generator load; 8 – brushes; 9 – power supply; 10 – measuring amplifier; 11 – recorder.

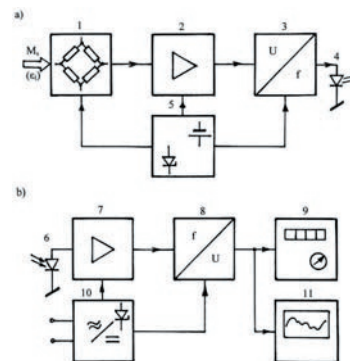
Hamowanie badanego silnika realizowane jest za pomocą obwodowej prądnicy prądu stałego o regulowanym obciążeniu, sprzężonej z tym silnikiem za pomocą łącznika, na którym zainstalowany jest mostek tensometryczny oraz cztery pierścienie ślizgowe, służące do zasilania mostka oraz wyprowadzenia jego napięcia wyjściowego do wzmacniacza tensometrycznego, stanowiącego stacjonarną część układu pomiarowego. Wykonana została również druga wersja tego stanowiska, której głównym celem było zastąpienie przewodowej transmisji sygnału pomiarowego z wirującego łącznika transmisją bezprzewodową. Zastosowa-

wano w tym celu łącze optyczne, gdyż charakteryzuje się ono dużą odpornością na zakłócenia, szczególnie w przypadku, gdy transmisja ta może być realizowana na krótkim dystansie, a tak jest w przypadku pomiaru w warunkach laboratoryjnych. Zastosowana metoda transmisji wymusiła jednak znaczne zmiany w strukturze układu pomiarowego, wynikające z dwóch powodów:

- 1) Stosowane standardowo w łączach optycznych źródła światła (np. diody LED) są źródłami praktycznie monochromatycznymi, co nie pozwala zastosować bezpośredniej modulacji FM (łatwo może być zastosowana modulacja AM, ale jest ona mało odporna na zakłócenia). Dlatego też analogowy sygnał wyjściowy mostka tensometrycznego, po wzmacnieniu, jest przetwarzany na ciąg impulsów prostokątnych o amplitudzie 5 V i czasie trwania 0,01 ms, którego częstotliwość, wynosząca dla napięcia wyjściowego mostka równego zero około 10 kHz, zmienia się w przedziale $\pm 0,5$ kHz (modulacja PFM).
- 2) Detektor w odbiorniku sygnału musi stale „widzieć” element emisyjny nadajnika, najlepiej w stałym kącie bryłowym, gdyż unika się wówczas pasywności modulacji AM. Ponieważ jedynym „nieruchomym punktem” wirującego wału jest jego oś obrotu, nadawczą diodę LED umieszcza się w osiowym otworze wywierconym przez całą długość wału prądnicy hamującej lub silnika w ramach ich przystosowania do zastosowanej metody pomiaru.

Część nadawcza układu pomiarowego zawierająca wzmacniacz stałoprądowy napięcia wyjściowego mostka tensometrycznego, przetwornik U/f oraz miniaturowe baterie, została zamocowana na łączniku. Elementy i podzespoły wchodzące w jej skład zostały tak rozmieszczone, aby uzyskać symetryczne rozłożenie ich mas względem osi obrotu łącznika.

Część odbiorcza układu pomiarowego zawiera: fototranzystor umieszczony również osiowo względem wydrążonego wału w odległości kilku do kilkunastu milimetrów od jego końca, wzmacniacz, przetwornik f/U, woltomierz cyfrowy i wyjście analogowe, umożliwiające rejestrację napięcia nierównowagi mostka tensometrycznego w funkcji czasu. Strukturę tej wersji układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat blokowy toru do pomiaru momentu skręcającego: a) część nadawcza, b) część odbiorcza: 1 – mostek tensometryczny; 2, 7 – wzmacniacze; 3, 8 – przetworniki napięcie/częstotliwość i częstotliwość/napięcie; 4, 6 – łącze optyczne; 5, 10 – zasilacze; 9 – woltomierz; 11 – rejestrator.

Fig. 2. Block diagram of the channel for torsional moment measurements: a) sending part, b) receiving part: 1 – full bridge circuit with strain gages; 2, 7 – amplifiers; 3, 8 – voltage/frequency and frequency/voltage converters; 4, 6 – optical link; 5, 10 – power supplies; 9 – voltmeter; 11 – recorder.

Projektując układ pomiarowy przyjęto, że będą za jego pomocą badane przede wszystkim silniki indukcyjne o mocach nominalnych $P \leq 4$ kW i prędkościach obrotowych $n \leq 1500$ obr./min. Rozwijane przez nie znamionowe momenty obrotowe, wyznaczone na podstawie zależności (1)

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{30P}{\pi n} \quad (1)$$

nie przekraczają wartości 30 Nm. W takim przypadku łącznik wykonany jako pełny walec powinien, przy założeniu maksymal-

nych odkształceń ε_1 na jego powierzchni rzędu $5 \cdot 10^{-4}$ posiadać średnicę $D = 12 \div 13$ mm. Wartość ta wynika ze znanej (np. [2,4]) zależności (2):

$$D = \sqrt[3]{\frac{8M}{\varepsilon_1 \pi G}} \quad (2)$$

w której moduł sprężystości poprzecznej G dla najczęściej stosowanych w łącznikach gatunków stali sprężynowych wynosi około 80 GPa.

Tak mała średnica wału utrudnia naklejanie tensometrów o długości bazy wynoszącej przeciętnie kilkanaście milimetrów w układzie pełnego mostka. Dlatego też zastosowany został łącznik o większej średnicy ($D = 23,5$ mm) z wykonanym osiowo otworem przelotowym o średnicy $d = 21,5$ mm. Analiza rozkładu odkształceń w tego typu łączniku (np. [2,4]) pozwala wyznaczyć ich maksymalną wartość, występującą w przekroju nachylnym pod kątem 45° do osi skręcenia, ze wzoru

$$\varepsilon_1 = \frac{8MD}{\pi G(D^4 - d^4)} \quad (3)$$

W łączniku o podanych powyżej wymiarach wartość ta wynosi $\varepsilon_1 \approx 0,243\%$. Jeśli mostek tensometryczny zawiera cztery tensometry o czułości odkształceniowej $k = 2,15$ i zasilany jest napięciem $U_z = 3,8$ V, to jego napięcie nierównowagi U_{wym} może się zmieniać w przedziale $[-U_{wym}, +U_{wym}]$, przy czym

$$U_{wym} = U_z k \varepsilon_1 \approx 0,198 \text{ mV} \quad (4)$$

Dla przyjętej wartości częstotliwości nośnej $f_0 = 10$ kHz oraz jej dewiacji $\Delta f_0 = 500$ Hz można dobrać wartość wzmocnienia k_{un} wzmacniacza 2 w części nadawczej (por. rys. 2) tak, aby zmiana napięcia U_{wym} w zakresie $\pm 0,198$ mV powodowała zmianę częstotliwości impulsów na wyjściu przetwornika U/f w zakresie $[10 \pm 0,5]$ kHz. W tym celu przeprowadzono pomiary charakterystyki $U(f)$ przetwornika U/f, których wyniki umożliwiły jej aproksymację metodą regresji prostą o równaniu

$$f = k_{fn} U_n + f_0 = 3,7833 U + 9932,7 \quad (5)$$

gdzie U_n jest napięciem wejściowym przetwornika w [mV], z względnym błędem liniowości $\leq 0,41\%$ (współczynnik regresji wyniósł $r = 0,999974$).

W części nadawczej toru obowiązuje związek

$$k_{fn} k_{un} U_{wym} = \Delta f_0 \quad (6)$$

umożliwiający wyznaczenie wzmocnienia wzmacniacza 2, które powinno być równe

$$k_{un} = \frac{\Delta f_0}{k_{fn} U_{wym}} \approx \frac{500}{3,7833 \cdot 0,198} = 667 \text{ V/V} \quad (7)$$

Przy podanych powyżej parametrach w części nadawczej toru pomiarowego, można wyznaczyć jej stałą, której wartość wynosi $C_n \approx 16,7$ Hz/Nm. Postępując analogicznie i zmieniając częstotliwość f impulsowego sygnału wejściowego części odbiorczej w przedziale $(10 \pm 0,5)$ kHz, wyznaczono eksperymentalnie jej charakterystykę $U(f)$ oraz aproksymowaną ją prostą o równaniu

$$U = k_{uo} f + U_o = 0,00896 f - 88,986 \quad (8)$$

z względnym błędem liniowości $\leq 0,23\%$ (współczynnik regresji wyniósł $r = 0,9999996$).

Zerową wartość napięcia wyjściowego, odpowiadającą zerowej wartości napięcia nierównowagi U_{wym} mostka tensometrycznego w części nadawczej, uzyskano dla częstotliwości $f_0 = 9933,5$ Hz, a więc nieco mniejszej niż zakładana na etapie projektowania układu wartość $f_0 = 10$ kHz.

Ponieważ uzyskana w części odbiorczej jej stała wyniosła $C_o \approx 8,96$ mV/Hz, więc łączna stała przetwarzania całego toru pomiarowego wynosi

$$C = C_n C_o = 149,6 \approx 150 \text{ mV/Nm} \quad (9)$$

Eksperymentalne potwierdzenie dobrej liniowości toru pomiarowego pozwoliło na zweryfikowanie rzeczywistej wartości jego stałej, poprzez skalowanie przeprowadzone w jednym punkcie jego charakterystyki statycznej. Po wyzerowaniu napięcia wyjściowego toru ($U=0$), realizowanym przez układ kompensujący napięcie nierównowagi występujące na wejściu przetwornika U/f dla momentu skręcającego $M_s = 0$, zwiększono ten moment do wartości $M_s = 6,23$ Nm. Napięcie wyjściowe toru wyniosło wówczas $U = 0,90$ V, a więc rzeczywista wartość jego stałej wynosi $C_{rz} = 144,6$ mV/Nm. W poszczególnych blokach toru pomiarowego (por. rys.2) zastosowano profesjonalne podzespoły (np. wzmacniacze, przetworniki U/f, f/U), wytypowane na podstawie ich danych katalogowych (np. [7]).

Łącze optyczne tworzą: dioda LED typu CQYP 19 oraz fototranzystor BPYP 21, pracujące w zakresie podczerwieni (długość fali $\lambda = 920$ μm).

3. Podsumowanie

Przedstawiona w artykule wersja stanowiska badawczego charakteryzuje się dużą niezawodnością oraz odpornością na zakłócenia elektromagnetyczne pochodzące od przekształtnikowych układów zasilających napędy w Laboratorium Maszyn Elektrycznych. Oprócz pomiaru momentu obrotowego napędów pracujących ze stałymi prędkościami, pozwala także na rejestrację zachodzących w nich stanów dynamicznych, pod warunkiem że sygnał momentu $M_s(t)$ posiada widmo mieszczące się w przedziale $[0 - 300]$ Hz. Wykonanie w części odbiorczej układu pomiarowego mnożenia sygnału momentu z sygnałem prędkości obrotowej umożliwia także wyznaczenie mocy i energii mechanicznej w stanach dynamicznych [5].

4. Literatura

- [1] Przygoda D. A., Szulce A., Boreta B., Nakonieczny A.: Wybrane problemy pomiaru momentu obrotowego maszyn elektrycznych. XXX Sympozjum Maszyn Elektrycznych; Współczesna problematyka maszyn indukcyjnych, Kazimierz Dolny 13 – 17 czerwca 1994, str. 383 – 388.
- [2] Styburski W.: Przetworniki tensometryczne. Konstrukcja, projektowanie, użytkowanie. WNT, Warszawa 1971.
- [3] Roliński Z.: Tensometria oporowa. Podstawy teoretyczne i przykłady zastosowań. WNT, Warszawa 1981.
- [4] Hoffmann K.: An Introduction to Measurements using Strain Gages. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt 1989.
- [5] Orlewski W.: Pomiar sprawności elektrycznych zespołów napędowych zasilanych napięciem odkształconym. Wiadomości Elektrotechniczne nr 21 – 22, listopad 1984, str. 525 – 526.
- [6] Noga M., Czajkowski J., Pańkow J., Orlewski W.: Fernmeßtechnisches System zur Übergabe der Meßsignale von rotierenden Teilen. 28. Intern. Wiss. Koll. TH Ilmenau 1983, Vortragsreihe „Elektrische Maschinen und Antriebe“, str. 65 – 67.
- [7] Katalog firmy Analog Devices Inc. 1992, 1996.

Artykuł recenzowany