

Łukasz ZAWARCZYŃSKI¹
Tadeusz STEFAŃSKI²

PROBLEMY POMIAROWE W NAPĘDACH FAŁOWNIKOWYCH

W pracy przedstawiono metody i techniki pomiaru podstawowych wielkości elektrycznych i nieelektrycznych, występujących w układach sterowania falownikowymi napędami elektrycznymi. Omówiono pomiar położenia i prędkości kątowej wału wirnika, a także napięcia, prądu, strumienia, mocy i momentu silnika. Zamieszczono wyniki badań eksperymentalnych.

MEASUREMENT PROBLEMS IN INVERTER DRIVE SYSTEMS

A broad review of the methods and techniques of measurements of basic electric and non-electric quantities occurring in inverter drive systems are presented. Particular attention is focused on the problems related with measurements of position and angular speed of rotor, voltage and flux of stator and motor power and torque, including a possibility of recording with the aid of microprocessor equipments. The experimental investigations were presented.

1. WSTĘP

W procesie projektowania napędu falownikowego uwzględnia się następujące elementy: pomiar wielkości fizycznych silnika, identyfikację parametryczną modelu matematycznego, wybór metody sterowania i dobór nastaw regulatorów. Zastosowanie mikroprocesorowych układów kontrolno-sterujących pozwala na implementację złożonych algorytmów sterowania, wykorzystujących bieżącą informację o sygnałach i parametrach obiektu sterowania. Algorytmy te zwykle wymagają stosowania skomplikowanych metod i technik pomiarowych lub algorytmów odtwarzających sygnały. Błędy i nadmierne szумы pomiarowe, a także nieodpowiednie charakterystyki statyczne i dynamiczne przetworników pomiarowych, zniekształcają wyniki identyfikacji oraz obniżają wskaźniki jakościowe sterowania, a mogą także przyczynić się do niestabilnej pracy układu sterowania. Problemy

¹ Kielce University of Technology, Faculty of Electrical and Computer Engineering, POLAND;
Kielce 25-314; ul. Tysiąclecia P.P. 7. Phone: + 48 41 34-24-204, Fax: + 48 41 34-24-214
E-mail: l.zawarczyński@tu.kielce.pl

² Kielce University of Technology, Faculty of Electrical and Computer Engineering, POLAND;
Kielce 25-314; ul. Tysiąclecia P.P. 7. Phone: + 48 41 34-24-213, Fax: + 48 41 34-24-214
E-mail: t.stefanski@tu.kielce.pl

pomiarowe w napędach falownikowych często różnią się od typowych, głównie z uwagi na konieczność separacji galwanicznej, niesinusoidalny (odkształcony) charakter oraz zmienną częstotliwość mierzonych sygnałów.

W znakomitej większości układów sterowania napędami falownikowymi jest niezbędny pomiar podstawowych wielkości fizycznych silnika, głównie jego prędkości kątowej, momentu oraz prądu i napięcia stojana [1, 5]. Obecnie coraz powszechniejsza staje się tendencja do minimalizacji ilości informacji otrzymywanych za pomocą bezpośrednich pomiarów [7], poprzez zastosowanie estymacji (obserwatorów). Jednakże w algorytmach obserwatorów jest także niezbędny pomiar wybranych wielkości. Ponadto eliminacja przetworników pomiarowych, np. prędkości kątowej lub strumienia, podnosi walory eksploatacyjne napędu, ale zwykle komplikuje algorytmy sterowania oraz – co jest bardzo istotne – zwiększa wrażliwość układów sterowania na zmiany parametrów silnika. Uzyskiwane wskaźniki jakościowe tych układów są często gorsze niż w przypadku zastosowania bezpośrednich pomiarów.

W niniejszej pracy przedstawiono metody i układy do pomiaru podstawowych wielkości mechanicznych i elektrycznych napędu falownikowego, przystosowane do współpracy z układami mikroprocesorowymi. Analizowano pomiar położenia i prędkości kątowej wału wirnika, napięcia, prądu i strumienia stojana oraz mocy i momentu silnika. Przedstawiono budowę oryginalnych układów pomiarowych oraz wyniki badań laboratoryjnych.

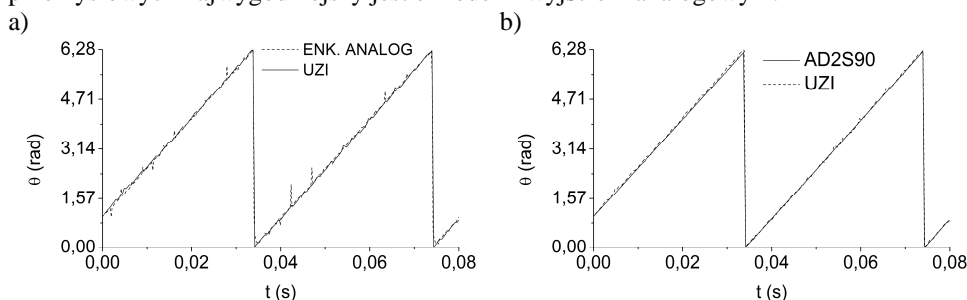
2. POMIAR POŁOŻENIA KĄTOWEGO WIRNIKA

Pomiar położenia kątowego wirnika jest zwykle dokonywany za pomocą przetworników obrotowo-impulsowych lub transformatorów położenia kątowego (resolverów) [2, 3, 4]. W pierwszym przypadku pomiar polega na zliczaniu liczby impulsów generowanych przez przetwornik impulsowy. Wykonanie tarczy impulsowej metodą fotooptyczną pozwala na uzyskanie rozdzielczości pomiaru rzędu kilku tysięcy impulsów na obrót, która dodatkowo może być zwiększona poprzez zastosowanie elektronicznej aproksymacji (zwielokrotniania częstotliwości impulsów). Wadą tej metody pomiaru jest sumowanie błędów zliczania impulsów oraz brak możliwości określenia początkowego położenia kątowego wirnika względem stojana po załączeniu układu.

Do najpopularniejszych przetworników współpracujących z resolverami zalicza się układy z serii AD2S (Analog Devices). Wymienione przetworniki umożliwiają pomiar położenia z programowalną dokładnością wartości bitowych. Rozdzielczość pomiaru położenia przetwornika w zależności od rodzaju jest stała (np. AD2S90 – 12 bitów) lub można ją zaprogramować (np. AD2S80A – 10, 12, 14 i 16 bitów). W transformatorze mają miejsce zjawiska, które zniekształcają sygnały wyjściowe i tym samym wpływają na dokładność pomiaru położenia. Do tych zjawisk można zaliczyć: pływanie wartości amplitud sygnałów wyjściowych, przesunięcia fazowe różne od $\pi/2$, zawartość wyższych harmonicznych, zakłócenia itd.

Na rys. 1 przedstawiono zarejestrowane przebiegi położenia kątowego wirnika silnika za pomocą mikroprocesorowego układu zliczania impulsów (UZI), układu AD2S90 i enkodera absolutnego z wyjściem analogowym. Analizowane układy dokładnie odwzorowują mierzone położenie wirnika. Sygnał przetwornika o analogowym wyjściu jest

nieznacznie zakłócony i zniekształcony przy wartości bliskiej 0 rad. W zastosowaniach przemysłowych najwygodniejszy jest enkoder z wyjściem analogowym.



Rys. 1. Porównanie pomiaru położenia kąтового wału silnika: a) układ zliczania impulsów i enkoder z wyjściem analogowym, b) układ zliczania impulsów i AD2S90

3. POMIAR PRĘDKOŚCI KĄTOWEJ

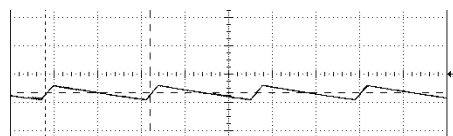
Zasadniczą grupę układów pomiarowych stanowią układy pomiaru prędkości kątowej. Uzyskanie informacji o wartości chwilowej prędkości kątowej dokonuje się za pomocą czujników analogowych lub impulsowych [1, 6]. Do pierwszej grupy są zaliczane prądnice tachometryczne i transformatory położenia kąowego, natomiast do drugiej – przetworniki obrotowo-impulsowe. Sposób pomiaru prędkości kątowej za pomocą prądnic tachometrycznych jest powszechnie znany. Zaletą tej techniki pomiaru jest możliwość bezpośredniej rejestracji napięcia, proporcjonalnego do mierzonej prędkości, natomiast wadą – duża podatność na zakłócenia oraz zniekształcenia nieliniowe.

Układami specjalizowanymi, współpracującymi z transformatorami położenia kąowego, są np. układy z serii AD2S. Zasadniczo są one przeznaczone do pomiaru położenia kąowego, ale jedną z wielkości wyjściowych tych układów jest sygnał napięciowy proporcjonalny do prędkości silnika (wirmika transformatora położenia kąowego). Prędkość kąową można wówczas wyznaczyć bezpośrednio, rejestrując ten sygnał, lub pośrednio – różniczkując sygnał położenia kąowego wirnika.

W przypadku zastosowania czujników impulsowych prędkość kąowa jest wyznaczana na podstawie pomiaru czasu między dwoma kolejnymi impulsami, generowanymi przez tarczę fotooptyczną połączoną z wałem silnika lub liczby impulsów zliczonych w określonym przedziale czasu. Powszechnie są również stosowane przetworniki częstotliwość-napięcie (np. z serii VFC, Burr-Brown), które generują sygnał napięciowy proporcjonalny do częstotliwości impulsów, a więc także do mierzonej prędkości kątowej.

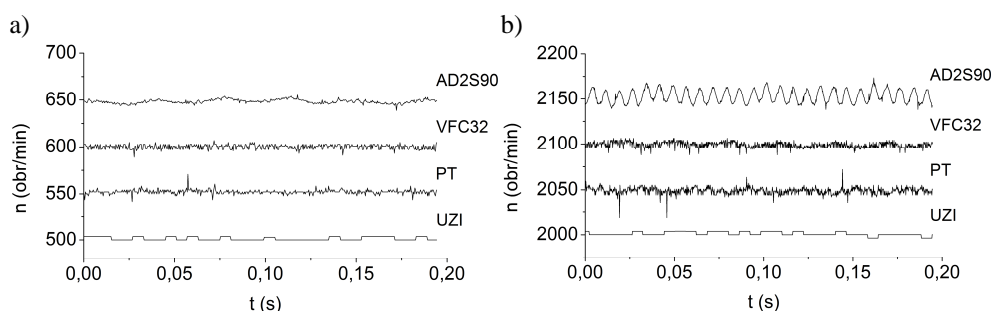
Sygnały wyjściowe A i B przetwornika obrotowo-impulsowego są przesunięte względem siebie o 90° elektrycznych. Mikrokontroler zlicza liczbę impulsów w jednostce czasu z kanału A, przelicza na proporcjonalną wartość prędkości kątowej i wysyła magistralą SPI do przetwornika cyfrowo-analogowego. Kierunek obrotu określany jest na podstawie zbocza narastającego kanału A i poziomu logicznego sygnału B ($\uparrow A$ i $B = 0$ – prawo, $\uparrow A$ i $B = 1$ – lewo). Identyfikacja kierunku jest możliwa dopiero po przekroczeniu minimalnej prędkości obrotowej. Zwielenokrotnienie dokładności pomiaru można uzyskać przez zastosowanie bramki EXOR, do której wejść doprowadza się sygnały kanałów A i B.

Przetwornik częstotliwość-napięcie generuje napięcie proporcjonalne do częstotliwości sygnału wejściowego. Napięcie to, oprócz składowej wolnozmiennnej (proporcjonalnej do prędkości kątowej), zawiera składową szybkozmienną o charakterystycznym kształcie piły (rys. 2). W całym zakresie pomiarowym częstotliwość składowej szybkozmiennnej przetwornika jest proporcjonalna do częstotliwości impulsowego sygnału wejściowego, a więc jest dużo większa od częstotliwości składowej wolnozmiennnej. W związku z tym do eliminacji wpływu składowej szybkozmiennnej można zastosować filtr (w analizowanym układzie zastosowano filtr Bessela IV-go rzędu).



Rys. 2. Pomiar stałej prędkości obrotowej $n=2000$ obr/min za pomocą przetwornika VFC32

Wyniki pomiarów stałych prędkości obrotowych silnika za pomocą prądniczki tachometrycznej (PT), układu zliczania impulsów w jednostce czasu (UZI) oraz przetworników typu VFC32 i AD2S90 przedstawiono na rys. 3, odpowiednio dla prędkości obrotowej $n=500$ i 2000 obr/min. Na rysunku przebiegi prędkości kątowej otrzymane za pomocą prądniczki tachometrycznej oraz przetworników VFC32 i AD2S90 zostały przesunięte odpowiednio o 50, 100 i 150 obr/min. W zakresie prędkości obrotowej od 0 do 3000 obr/min pomiar za pomocą prądniczki tachometrycznej i przetwornika typu VFC32 charakteryzuje się zbliżonym poziomem zakłóceń (w układach pomiarowych zastosowano filtry analogowe o identycznych parametrach). Natomiast w sygnale wyjściowym układu AD2S90 występują oscylacje, których amplituda i częstotliwość rośnie wraz ze wzrostem prędkości obrotowej.

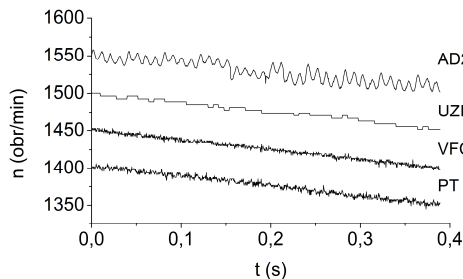


Rys. 3. Wyniki pomiarów prędkości obrotowej silnika za pomocą układu zliczania impulsów (UZI), prądniczki tachometrycznej (PT), przetworników VFC32 i AD2S90 dla: a) $n=500$ obr/min., b) $n=2000$ obr/min

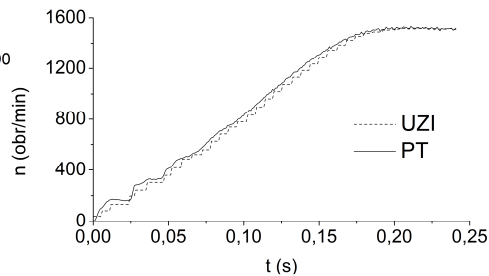
W celu wyeliminowania wpływu pulsacji momentu na prędkość obrotową, jej pomiaru dokonano podczas swobodnego hamowania silnika rozpędzonego do prędkości obrotowej

$n=1500$ obr/min. Wyniki pomiaru zamieszczono na rys. 4, przy czym również na wykresie przebiegi czasowe sygnałów wyjściowych z przetworników przesunięto o 50 obr/min.

Na rys. 5 przedstawiono wyniki pomiaru prędkości obrotowej za pomocą prądniczki tachometrycznej (PT) i układu zliczania impulsów (UZI) podczas rozruchu silnika. W tym przypadku można zaobserwować ogólną zgodność uzyskanych przebiegów, z tym że przebieg czasowy prędkości obrotowej otrzymany za pomocą układu zliczania impulsów jest nieco opóźniony. Opóźnienie to jest wynikiem zliczania impulsów w określonym przedziale czasu i jest zależne od przyjętej jego wartości. W początkowej fazie pomiaru jest widoczny stan nieustalony odpowiedzi czasowej prądniczki tachometrycznej. Analiza wyników pomiaru prowadzi do wniosku, że prądniczka tachometryczna wykazuje nieco większą inercję pomiaru niż układy pomiarowe z przetwornikami częstotliwość-napięcie.

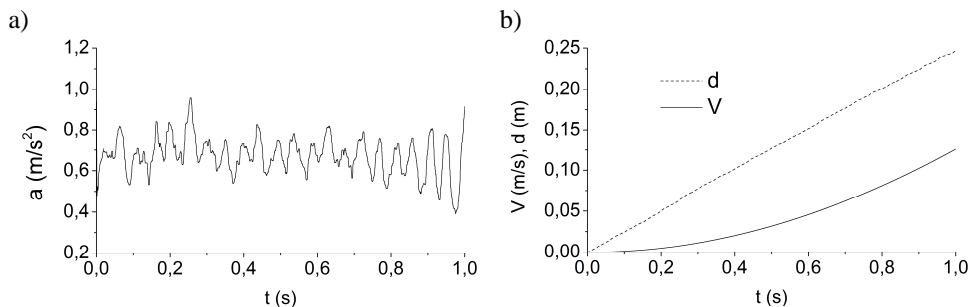


Rys. 4. Wyniki pomiaru prędkości obrotowej podczas swobodnego hamowania



Rys. 5. Pomiar prędkości obrotowej za pomocą prądniczki tachometrycznej (PT) i układu zliczania impulsów (UZI)

Do pomiaru prędkości lub położenia (przeszczenia liniowego) można również zastosować czujnik przyspieszenia. W badaniach laboratoryjnych zastosowano czujnik typu MMA7455 (*Freescale Semiconductor*). Czujnik ten posiada nastawną dokładność pomiarową $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 6g$ z auto-kalibracją $0g$. Przeliczenie wartości przyspieszenia na wartość prędkości lub przeszczenia zrealizowano za pomocą układu mikroprocesorowego. Na rys. 6 przedstawiono zarejestrowane przebiegi przyspieszenia, prędkości i przeszczenia tłoczyska siłownika hydraulicznego.



Rys. 6. Wyniki pomiaru: a) przyspieszenia, b) prędkości i przeszczenia liniowego

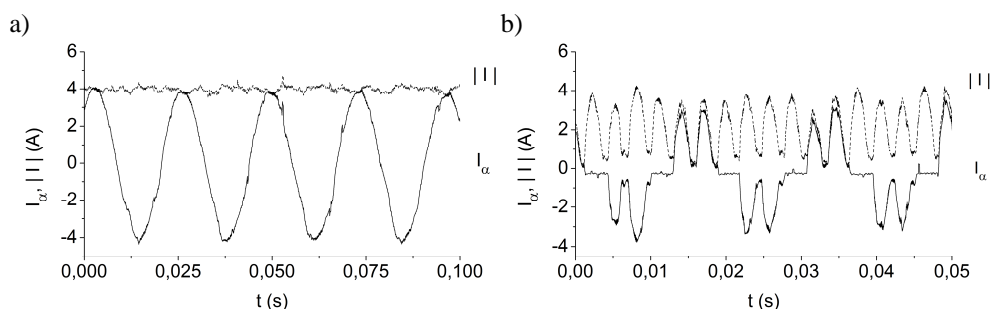
4. POMIAR PRĄDU STOJANA

Pomiar prądu jest zwykle dokonywany za pomocą przetworników hallotronowych. Są one produkowane w kilkunastu zakresach pomiarowych i charakteryzują się bardzo dobrymi właściwościami statycznymi, dynamicznymi oraz separującymi. Strukturę toru pomiarowego prądu pojedynczej fazy silnika przedstawiono na rys. 7. W skład układu wchodzi: LEM – przetwornik pomiarowy prądu, UF – filtr aktywny Bessla II-go rzędu, UO – układ offsetowy, umożliwiający dodanie składowej stałej (przekształcenie sygnału bipolarnego w unipolarny, w celu uzyskania odpowiedniego dopasowania amplitudy napięcia do poziomu przetwarzania przetwornika ADC), UW – układ wzmacniacza odwracającego. W układzie pomiarowym prądów trójfazowych zastosowano trzy identyczne toru pomiarowe.



Rys. 7. Schemat blokowy pojedynczego toru pomiarowego prądu.

Na rys. 8 przedstawiono zarejestrowane, przykładowe przebiegi składowej I_α i modułu wektora prądu stojana I dla silnika indukcyjnego i bezszczotkowego prądu stałego (BLDC).



Rys. 8. Zarejestrowane przebiegi czasowe składowej I_α oraz modułu wektora prądu stojana I dla silnika: a) indukcyjnego, b) synchronicznego typu BLDC

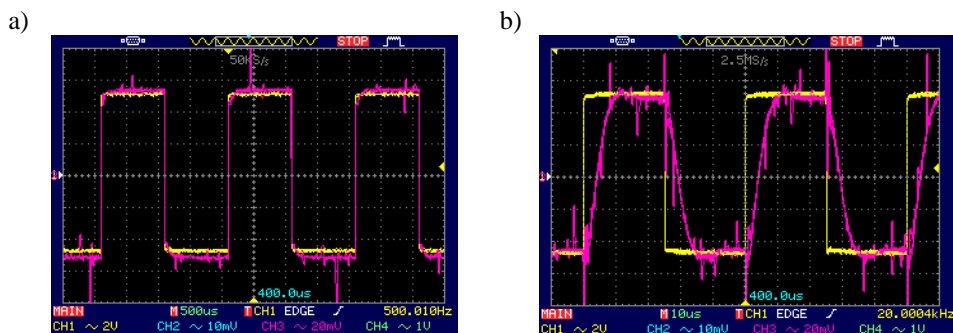
Na podstawie zarejestrowanych przebiegów stwierdzono, że analizowany układ pomiarowy z przetwornikiem hallotronowym LA-55P zapewnia dobre odwzorowanie mierzonego prądu w przedziale częstotliwości do 10 kHz. Powyżej tej częstotliwości występuje przesunięcie fazowe (opóźnienie) oraz zniekształcenie sygnału wyjściowego przetwornika prądu.

5. POMIAR NAPIĘCIA STOJANA

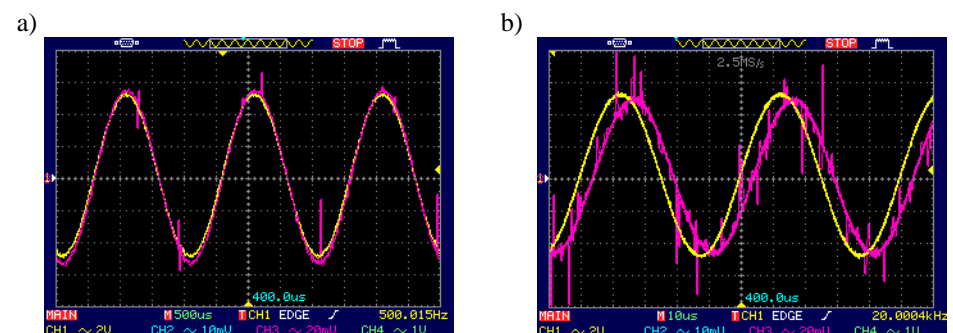
Napięcie wyjściowe falownika zasilanego ze źródła napięcia stałego jest kształtowane poprzez odpowiednie załączanie i wyłączanie tranzystorów, w wyniku czego otrzymuje się napięcie międzyprzewodowe w postaci ciągu impulsów. W układach sterowania napędami

falownikowymi jest często niezbędny bezpośredni pomiar napięć międzyprzewodowych stojana, np. do estymacji strumienia. Składowe lub amplituda, a także położenie kątowe wektora napięcia stojana są wyznaczone na podstawie pomiaru wartości chwilowych napięcia międzyprzewodowego silnika. Metoda ta wymaga dużej częstotliwości próbkowania układu pomiarowego, uwzględniając fakt, że częstotliwość kluczowania tranzystorów często przekracza 50 kHz.

Pomiar napięcia jest zwykle dokonywany za pomocą przetworników hallotronowych. Schemat układu pomiarowego z zastosowaniem przetwornika napięciowego LEM LV25-P jest identyczny, jak schemat przedstawiony na rys. 7. Do przeliczenia składowych napięcia (przekształcenia Parka) wykorzystano programowalny układ mikroprocesorowy z kontrolerem ATmega8L. W celu zbadania właściwości przetwornika LEM wykonano serię pomiarów napięcia o przebiegu sinusoidalnym oraz prostokątnym o amplitudzie 20 V. Na rys. 9 i 10 zamieszczono zarejestrowane przebiegi dla różnych częstotliwości. Otrzymane wyniki pomiarów potwierdzają prawidłowe odwzorowanie kształtu i amplitudy przebiegu w paśmie częstotliwości do 10 kHz. Powyżej tej częstotliwości występuje znaczne przesunięcie fazowe przebiegu, względem sygnału wejściowego, oraz zniekształcenie amplitudy mierzonego napięcia.

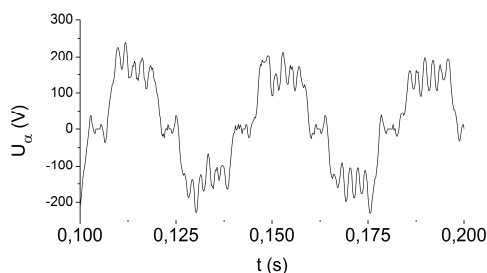


Rys. 9. Wyniki pomiarów napięcia a) prostokątnego 500 Hz, b) prostokątnego 20 kHz



Rys. 10. Wyniki pomiarów napięcia a) sinusoidalnego 500 Hz, b) sinusoidalnego 20 kHz

Często napięcia fazowe stojana wyznacza się pośrednio, na podstawie pomiaru napięcia wyprostowanego przekształtnika i sygnałów sterujących tranzystorami. Taki sposób wyznaczania napięć zasilania silnika jest obarczony błędem, wynikającym z konieczności stosowania czasu martwego w układzie sterowania tranzystorami. Przykładowy wynik pomiaru składowej U_α napięcia silnika BLDC przedstawiono na rys 11. W układzie pomiarowym zastosowano filtr dolnoprzepustowy, który uśrednia wartość napięcia modulowanego o częstotliwości 10 kHz.



Rys. 11. Przebieg składowej U_α napięcia silnika BLDC.

6. POMIAR STRUMIENIA STOJANA

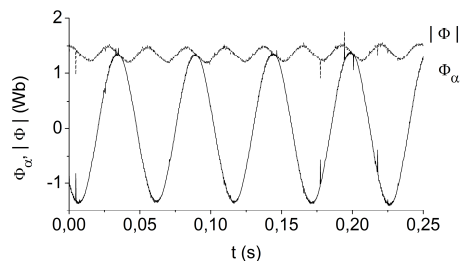
W sterowaniu falownikowymi napędami z silnikami prądu przemiennego najczęściej są stosowane metody polowo-zorientowane. Realizacja takich układów sterowania wymaga aktualnej informacji o położeniu wektora strumienia skojarzonego wirnika (ewentualnie strumienia stojana lub strumienia głównego) w przestrzeni wektorowej. Błędna informacja o położeniu wektora wirnika niweczy zasadniczą ideę sterowania polowo-zorientowanego, polegającą na dekompozycji wektora prądu stojana na składową magnesującą i składową wytwarzającą moment. Niecałkowite odsprężenie powoduje pogorszenie właściwości dynamicznych układu sterowania oraz niekorzystne warunki pracy silnika.

Bezpośredni pomiar strumienia jest dokonywany za pomocą czujników hallotronowych lub specjalnych uzwojeń pomiarowych, umieszczonych wewnątrz maszyny. Czujniki Halla ze względu na małą wytrzymałość mechaniczną oraz dużą wrażliwość na zmiany temperatury są rzadko stosowane w przemysłowych rozwiązaniach układów napędowych. Wad tych nie posiadają uzwojenia pomiarowe wbudowane w stojan. Generowane w nich napięcia są filtrowane i całkowane, w wyniku czego otrzymuje się sygnały proporcjonalne do składowych ϕ_α i ϕ_β wektora strumienia głównego ϕ , w układzie współrzędnych związanym ze stojaniem. Na podstawie wektora ϕ można wyznaczyć wektory strumienia skojarzonego wirnika lub stojana.

Z czujników pomiarowych (np. dodatkowych uzwojeń w stojanie) otrzymuje się składowe dwufazowe napięcia proporcjonalne do składowych wektora strumienia. Układ pomiarowy strumienia jest więc podobny do układu pomiaru prądu lub napięcia. Wyniki pomiaru składowej ϕ_α oraz modułu wektora ϕ strumienia głównego silnika, zasilanego z falownika napięcia, ilustruje rys. 12. Układ pomiarowy strumienia wyposażono w filtr dolnoprzepustowy Bessela IV-go rzędu, ze względu na impulsowy kształt napięcia

zasilającego stojan. Filtr ten w niewielkim stopniu zmienia wzmocnienie i przesunięcie fazowe mierzonego sygnału w zakresie częstotliwości od 0 do 200 Hz.

Obecnie większość proponowanych metod odtwarzania strumienia silnika bazuje na teorii obserwatorów działających w układzie zamkniętym (*closed-loop observers*). Obserwatory strumienia cechują się dobrą zbieżnością i małą wrażliwością na zmiany parametrów silnika [7]. Głównie jest to wynikiem stosowania obserwatorów nieliniowych lub liniowych z obwodami adaptacji. Obserwatory te są jednak wrażliwe na szumy pomiarowe napięć, prądów i prędkości kątowej silnika. Klasyczna teoria obserwatorów stosunkowo łatwo radzi sobie z uwzględnieniem zakłóceń mierzalnych lub zakłóceń o znanym modelu matematycznym. W przypadku modeli stochastycznych silnika (wynikających np. z uwzględnienia szumów pomiarowych) do wyznaczania estymat strumienia jest stosowana teoria optymalnej filtracji Kalmana, a w szczególności teoria rozszerzonego filtru Kalmana. W tym przypadku są stosowane filtry Kalmana do estymacji: wektora stanu (często prądu stojana i wirnika), wektora stanu i wybranych parametrów modelu matematycznego silnika (np. stałej czasowej wirnika) lub wybranych zmiennych stanu i parametrów modelu silnika. Aplikacje w czasie rzeczywistym pełnego rzędu filtrów Kalmana wymagają zastosowania procesorów sygnałowych.



Rys. 12. Zarejestrowane przebiegi czasowe składowej ϕ_α i modułu wektora strumienia głównego Φ

7. POMIAR MOCY I MOMENTU

W napędach falownikowych na ogół nie ma potrzeby dokonywania w sposób ciągły pomiaru mocy silnika. Pomiar mocy może być wykorzystywany do pośredniego wyznaczania momentu elektromagnetycznego. Moc silnika jest wyznaczana na podstawie pomiaru napięcia i prądu stojana. Moc chwilowa P trójfazowego silnika indukcyjnego wyraża się zależnością

$$P = V_{AB} I_A + V_{CB} I_C \quad (1)$$

przy czym V_{AB} i V_{CB} są napięciami międzyprzewodowymi. Moc na wale silnika (moc użyteczna) jest także wyznaczana na podstawie pomiaru momentu na wale oraz prędkości kątowej silnika.

Informacja o momencie elektromagnetycznym lub o momencie na wale silnika jest w wielu przypadkach konieczna do realizacji obwodów sprzężeń zwrotnych lub do analizy eksperymentalnej napędów falownikowych. Moment silnika może być także wyznaczany w

sposób pośredni, na podstawie pomiaru mocy i prędkości kątowej silnika, lub za pomocą bezpośredniego pomiaru.

Jednym z popularniejszych sposobów bezpośredniego pomiaru momentu na wale silnika jest pomiar z zastosowaniem wałka skrętnego, którego kąt skręcenia jest proporcjonalny do mierzonego momentu. Przykładem takiego przetwornika jest momentomierz firmy DataFlex, gdzie bezpośrednio przetwornik mocuje się na wale wirnika silnika. Metoda pomiaru polega na odczycie przesunięcia pomiędzy dwoma tarczami z czujnikami optycznymi, gdzie przesunięcie jest proporcjonalne do momentu. Częstotliwość pomiaru może wynosić do 16 kHz. Sygnałem wyjściowym jest napięcie w zakresie 0 – 10 V lub sygnał prądowy 4 – 20 mA. Przetwornik posiada również wyjście prędkości obrotowej, która jest wyznaczana na podstawie sygnałów impulsowych o rozdzielczości 60 imp/obr.

W przypadku napędów obciążonych tylko momentem bezwładności, moment dynamiczny na wale silnika może być wyznaczany na podstawie pomiaru jego przyspieszenia. Możliwy jest także pomiar na podstawie pomiaru siły reakcji obudowy silnika, z zastosowaniem tensometrycznych czujników siły. Układ pomiarowy wymaga jednak odpowiedniego zamocowania obudowy silnika, co stanowi utrudnienie w aplikacjach przemysłowych.

8. PODSUMOWANIE

W pracy omówiono metody i układy pomiarowe podstawowych wielkości elektrycznych i nieelektrycznych silnika, tj. położenia i prędkości kątowej wału silnika, napięcia, prądu i strumienia stojana oraz mocy i momentu. Analizowano pomiar prędkości kątowej z wykorzystaniem prądniczki tachometrycznej, przetwornika obrotowo-impulsowego i transformatora położenia kątowego. Stwierdzono, że zastosowanie prądniczki tachometrycznej i przetworników częstotliwość-napięcie charakteryzuje się porównywalnymi właściwościami dynamicznymi i poziomem zakłóceń. Najmniejszy poziom zakłóceń odnotowano w przypadku pomiaru prędkości kątowej na podstawie zliczania liczby impulsów w określonym przedziale czasu. Zastosowane przetworniki LEM prądowe jak i napięciowe zapewniają bardzo dokładne odwzorowanie kształtu oraz amplitudy w całym paśmie częstotliwości sygnałów mierzonych.

9. LITERATURA

- [1] Brock S., Zawirski K.: *Cyfrowy pomiar prędkości obrotowej w napędzie elektrycznym*. Pomiary, Automatyka, Robotyka, 2005, R. 8, nr 1, str. 10-13.
- [2] Hanselman D.: *Resolver signal requirements for high accuracy resolver-to-digital conversion*. IEEE Trans. on Industrial Electr., Vol. 37, No. 6, 1990, str. 556-561.
- [3] Hanselman D.: *Techniques for improving resolver-to-digital conversion accuracy*. IEEE Trans. on Industrial Electr., Vol. 38, No. 6, 1991, str. 501-504.
- [4] Ociepa Z.: *Pomiary położenia kątowego z zastosowaniem enkodera i wejść binarnych sterowników PLC*. Pomiary, Automatyka, Kontrola, 2009, R. 55, nr 4, str. 225-228.
- [5] Stefański T., Zbroszczyk Z.: *Metody i techniki pomiarowe w układach sterowania napędami falownikowymi*. Metrologia i Systemy Pomiarowe, 1998, T. 5, z. 3, str. 227-245.

- [6] Szcześniak Z.: *Cyfrowe metody pomiaru prędkości z zastosowaniem optoelektronicznego przetwornika położenia*. Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania, 2005, Vol. 46, nr 2-3, str. 73-74.
- [7] Włas M.: *Zastosowanie obserwatora prędkości kątowej wirnika w układach sterowania silnikiem indukcyjnym klatkowym zasilanym z przemiennika częstotliwości*. Przegląd Elektrotechniczny, 2004, R. 80, nr 10, str. 950-952.