

Aleksander Fręchowicz
Politechnika Śląska, Gliwice

PROCESOROWY UKŁAD STEROWANIA SILNIKA BLDC Z BOCZNIKOWANIEM CZĘŚCI UZWOJENIA DO NAPĘDU POJAZDU ELEKTRYCZNEGO

MICROPROCESSOR CONTROL OF BLDC MOTOR WITH WINDING PARTIALLY SHUNTED FOR ELECTRIC VEHICLE DRIVE

Streszczenie: Jednym z możliwych rozwiązań napędu samochodu elektrycznego jest zastosowanie bezszczotkowego silnika prądu stałego. W napędach trakcyjnych wymagany jest szeroki zakres regulacji prędkości obrotowej, przy czym przy większych prędkościach moment rozwijany przez silnik może być mniejszy. Dlatego w napędach tego typu chętnie stosuje się silniki pracujące w dwóch strefach regulacji prędkości: pierwszą strefę nazywamy strefą stałego momentu, a drugą – strefą stałej mocy. W bezszczotkowych silnikach prądu stałego, pracę w drugiej strefie można osiągnąć przez elektroniczne bocznikowanie części uzwojenia. Poniżej przedstawiony będzie układ regulacji prędkości obrotowej takiego napędu. Układ sterowania został zrealizowany w postaci rozproszonej sieci mikrokontrolerów CAN. Główny węzeł sieci CAN wykonano na procesorze sygnałowym TMS320LF2407A firmy Texas Instruments, którego bogate wyposażenie wewnętrzne umożliwia równoczesne sterowanie dwoma zespołami kluczy tranzystorowych. W omawianym rozwiązaniu, jedna część układów wewnętrznych mikrokontrolera steruje tranzystorami falownika (praca w I strefie), a druga część – tranzystorami zwierającymi części uzwojeń (praca w II strefie). Omówiona będzie budowa układu, działanie oprogramowania i wnioski wynikające z prac uruchomieniowych. Przedstawiony zostanie schemat blokowy układów sterowania. Cechą charakterystyczną napędu samochodu jest praca w szerokim zakresie regulacji prędkości obrotowej. Z tego faktu wypływają pewne wymagania odnośnie harmonogramu wykonywania poszczególnych procedur. Również te zagadnienia zostaną przedstawione w opracowaniu.

Abstract: One of possible drives for electric car is brushless dc motor. In traction drives we usually require wide range of speed control, and at greater speeds the motor torque may be less. That is why motors operating in two speed control zones are regularly applied; the first zone is called constant torque zone and the second is constant power zone. In dc brushless motor the second control zone may be achieved by shunting (electronically) part of the winding. The speed control circuit for this type of drive is presented. The control circuit has been designed as a distributed CAN microcontroller network. The main node of CAN network has been built with Texas Instruments signal processor TMS320LF2407A. The developed architecture of this processor makes it possible to control two sets of electronic switches at the same time. In the discussed system, one set of microcontroller internal circuits controls the inverter switches (first control zone), and the other set controls transistors shunting parts of the windings (second control zone). The structure of the circuit, software performance and some implementation remarks are described together with block diagram of control circuits. The characteristic feature of this car drive is wide range of speed control. Some requirements as to run schedule of different procedures are due to this fact. These issues are also presented in the paper.

Słowa kluczowe: *maszyny elektryczne, maszyny prądu stałego, maszyny bezszczotkowe, napędy o zmiennej prędkości*

Keywords: *electrical machines, DC machines, brushless motors, variable speed drives*

1. Wstęp

W opracowaniu przedstawiono budowę, oprogramowanie i wstępne wyniki badań układu napędowego pojazdu elektrycznego napędzanego bezszczotkowym silnikiem prądu stałego (BLDC). Cechą wyróżniającą ten napęd spośród wielu innych, stosowanych do regulacji prędkości obrotowej w napędach pojazdów elektrycznych jest fakt, że badany silnik BLDC pracował w dwóch strefach regulacji prędkości

obrotowej: strefie stałego momentu i w strefie stałej mocy, analogicznie jak dawne obcowzbudne silniki prądu stałego.

Silnik bezszczotkowy wyposażony został w dzielone uzwojenie twornika umieszczone w stojanie i magnesy trwale zamocowane na powierzchni wirnika. Tranzystorowy układ zasilający składał się z sześciu tranzystorów, pracujących w układzie falownika i sześciu tranzy-

storów zwierających część uzwojeń silnika. Podczas pracy w pierwszej strefie, prędkość obrotową nastawiano identycznie jak w klasycznych bezszczotkowych silnikach BLDC: poprzez zmianę współczynnika wypełnienia fali PWM sygnałów podawanych na bramki tranzystorów falownika. Zmiana współczynnika wypełnienia zmieniała wartość skuteczną napięcia przyłożonego do uzwojenia. W tej strefie wartość prądu pobieranego przez silnik zależy tylko od momentu obciążenia i jest ograniczona z góry wartością prądu znamionowego maszyny. Taką pracę nazywa się pracą „przy stałym momencie”. Gdy współczynnik wypełnienia stawał się równy 100%, układ przechodził do pracy w drugiej strefie. Do pracy włączaly się tranzystory zwierające dolne części uzwojenia. Zwiększając współczynnik wypełnienia fali PWM sterującej bramkami tych tranzystorów, stopniowo zwierano dolną połowę uzwojenia. W tym czasie silnik zwiększał prędkość obrotową dwukrotnie, przy czym wzrastał prąd silnika przy prawie stałym napięciu przyłożonym do uzwojenia twornika. Ponieważ w tym trybie pracuje coraz mniejsza część uzwojenia twornika – powiększanie prędkości skutkuje maleńm wypadkowego momentu maszyny. Jest to tak zwana praca „przy stałej mocy”. Dokładny opis budowy i działania części silnopędowej napędu można znaleźć w wielu publikacjach autora, np. w [1].

Badany układ regulacji prędkości wirowania silnika przeznaczony jest do napędu pojazdu elektrycznego. Układ tworzy system sterowania, regulacji i wizualizacji pracy napędu pojazdu i składa się z kilku podzespołów. Każdy podzespół jest sterowany własnym mikrokontrolerem lub mikroprocesorem, a informacje między podzespołami, przekazywane są za pomocą transmisji szeregowej zgodnej ze standardem CAN (ang. *Controller Area Network*). W sieciach CAN każdy układ mikrokontrolera włączonego do sieci nazywany jest „węzłem sieci”. Sieci kontrolerów CAN, stosuje się w rozproszonych, ale średnio rozległych (typowe odległości do 10 metrów) sieciach kontrolerów, np. w samochodowych systemach procesorowych, do sterowania sprzętu medycznego (tomografy), w systemach wojskowych itp.

W zbudowanym systemie przyjęto, że wysyłane lub odbierane komunikaty będą miały długość szesnastu lub sześćdziesięciu czterech bitów i będą wysyłane do sieci z prędkością

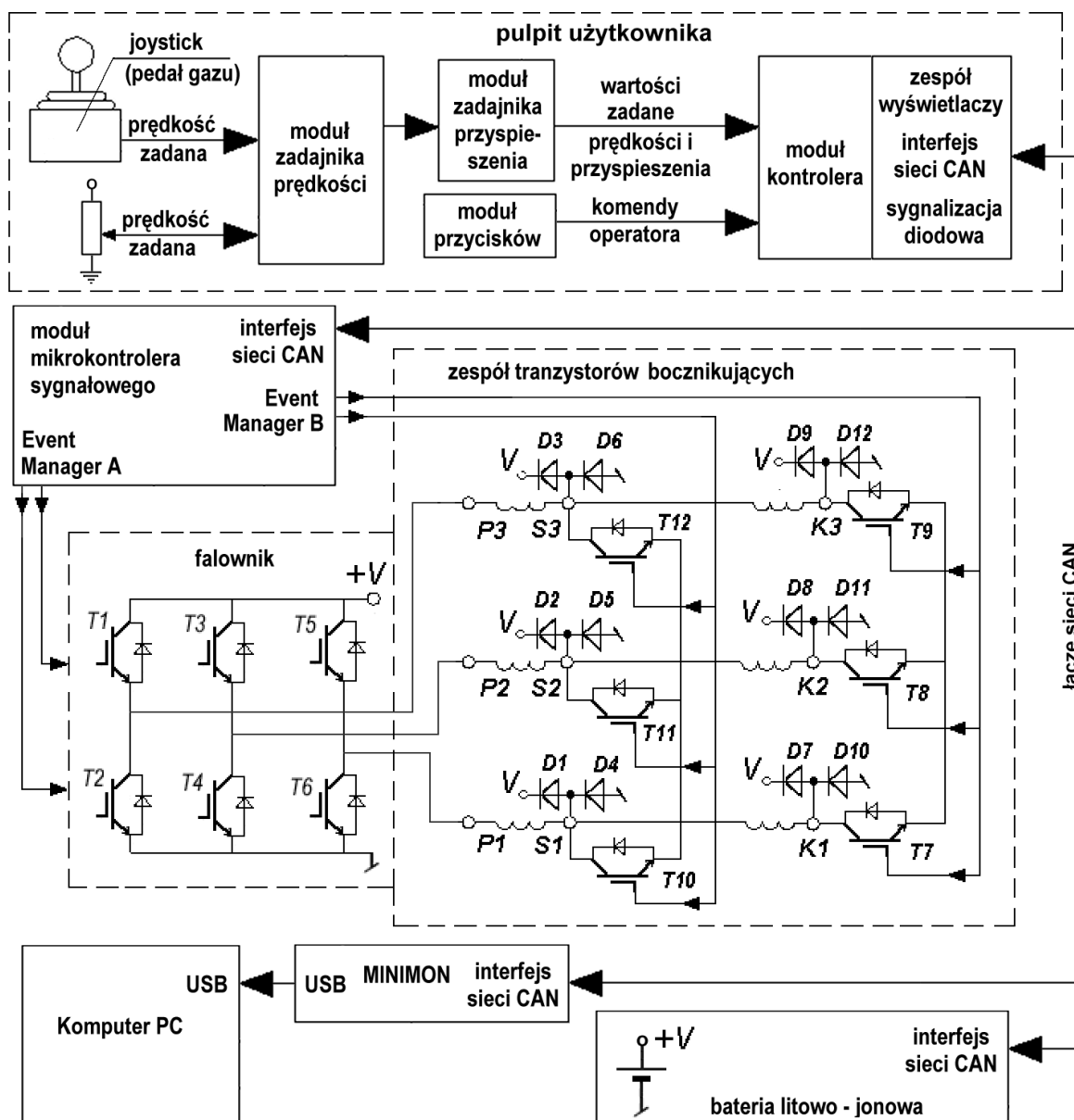
100 kbitów/s. Ponieważ przyjęto, że podstawową długością jednostki przesyłanych danych będzie 16 bitów (jeden „word”), transmitowane komunikaty podzielono na krótkie (o długości jednego 16-to bitowego słowa) i długie (o długości czterech 16-to bitowych słów). Wszystkie komunikaty podzielono na trzy kategorie:

- Sporadycznie generowane krótkie komunikaty, w których jeden z uczestników systemu informuje pozostałych o ważnych zdarzeniach zaobserwowanych przez system, na przykład naciśnięcie przycisku przez użytkownika, przekroczenie dopuszczalnej temperatury, itp.
- Okresowo generowane komunikaty informujące uczestników o stanie systemu: np. o stopniu naładowania baterii, o zadanej i rzeczywistej prędkości wirowania, o współczynniku wypełnienia fali PWM itp. Te komunikaty pozwalają też procesorom – węzłom systemu przekonać się o poprawnej pracy pozostałych węzłów.
- Długie, wielobajtowe komunikaty, przenoszące szczegółowe informacje o stanie pracy systemu: generowane przez uczestników i skierowane do dołączonego do systemu komputera. Takie komunikaty są generowane przez system podczas uruchamiania i testowania.

2. Budowa układu sterowania

Schemat blokowy połączeń systemu pokazano na rys. 1. System zbudowano w dwóch wykonaniach: wersja laboratoryjna przeznaczona jest do prac badawczych w laboratoriach Politechniki i Komelu, a wersja docelowa – do zamontowana w badanym pojeździe samochodowym. Pod względem technicznym główną różnicą jest rodzaj chłodzenia silnopędowych elementów elektronicznych: w wersji laboratoryjnej zastosowano radiatory chłodzone wymuszonym obiegiem powietrza, a w wersji docelowej – chłodzenie wodne.

Podzespołem nadzorującym pracę systemu jest pulpit użytkownika. Na rys. 2 pokazano wersję laboratoryjną tego zespołu. Na pokrywie obudowy zamocowano dwa wyświetlacze: ciekłokrystaliczny podający informacje o bieżącym stanie pracy falownika i wyświetlacz diodowy, siedmiosegmentowy, numeryczny, wyświetlający wartości prędkości wirowania silnika: zadaną i rzeczywistą. W wersji docelowej wyświetlacz będzie podawać prędkość pojazdu.



Rys. 1. Schemat blokowy wieloprocusorowego, rozproszonego układu sterowania napędu pojazdu elektrycznego

Na pokrywie zainstalowano też zadajniki prędkości: potencjometryczny do zadawania prędkości podczas badań laboratoryjnych i drążkowy (joystick) do symulacji pedału gazu. Ponadto zainstalowano przyciski pozwalające na wydawanie podstawowych komend, takich jak: uruchomienie napędu, zatrzymanie napędu, zmiana kierunku wirowania, a także zmiana stanu pracy zespołu: zerowanie, programowanie kontrolera, przełączanie zadajnika z potencjometrycznego na drążkowy i odwrotnie. Wewnątrz obudowy pulpitu znajdują się: mikrokontroler wyposażony w interfejs sieci CAN, interfejsy wyświetlaczy i interfejs umożliwiający programowanie mikrokontrolera z kom-

putera typu PC. Dodatkowo w obudowie znajduje się zasilacz pozwalający na zasilenie zespołu ze źródła o napięciu od 8 V do 30 V. Procesor pulpitu użytkownika, zbiera informacje o wartościach zadanych i rzeczywistych prędkości, wykonuje wizualizację tych parametrów, oblicza prędkość zadaną (z uwzględnieniem przyspieszenia) i przekazuje ją do podzespołu falownika. Do zadań tego zespołu należy również sterowanie (za pośrednictwem sieci CAN) stycznika łączącego wyprowadzenia baterii z końcówkami zasilającymi falownika oraz informowanie użytkownika o stanie rozładowania baterii. Układ docelowy umieszczony ma być w kabinie kierowcy.



Rys. 2. Pulpit użytkownika

Drugim i zasadniczym podzespołem (a zarazem węzłem sieci CAN) systemu jest procesorowy układ sterowania prędkością silnika, umieszczony w pobliżu falownika i zespołu tranzystorów bocznikujących część uzwojenia twornika (rys.3). Wraz z falownikiem układ ten jest umieszczony pod maską pojazdu.



Rys. 3. Falownik silnika z zamontowanym układem mikrokontrolera sygnałowego (wersja laboratoryjna)

Układ sterujący pracą falownika i zespołu tranzystorów bocznikujących część uzwojenia twornika zbudowano w oparciu o mikrokontroler sygnałowy TMS32F2407A. Procesor ten zawiera w sobie wszystkie podzespoły niezbędne do sterowania budowanego systemu sterowania. W szczególności mikrokontroler wyposażony jest w dwa identyczne „podzespoły zarządzania zdarzeniami” (*event manager*), zaprojektowane do sterowania pracą silników

elektrycznych zasilanych z elektronicznych przemienników. Każdy podzespół jest sterowany własnym zegarem i może sterować równocześnie bramkami trzech par tranzystorów tworzących trójfazowy mostek tranzystorowy. W praktyce oznacza to, że przy klasycznym sterowaniu bezszczotkowych silników z magnesami trwałymi, jeden mikrokontroler może być wykorzystany do równoczesnego i niezależnego sterowania dwóch silników, pracujących przy różnych prędkościach wirowania. W przypadku omawianego napędu jeden podzespół został wykorzystany do sterowania tranzystorów falownika, a drugi do sterowania tranzystorów bocznikujących część uzwojenia silnika. Dodatkowo podzespoły sterujące wyposażone są w układ generujący stałą zwłokę czasową (opóźnienie rzeczywiste) w torze każdego z tranzystorów (ang. *dead-band*). Umożliwia on pracę silników w układach czterokwadrantowych (dwa kierunki wirowania z hamowaniem odzyskowym), bez żadnych dodatkowych podzespołów logicznych.

3. Zasada działania

Zasada działania prezentowanego układu w dużej mierze opiera się o sprawdzoną konstrukcję bezszczotkowego silnika prądu stałego (*BLDC motor*). Podobnie jak w klasycznym układzie BLDC chwile komutacji wyznaczone są przez czujnik położenia wirnika umieszczony na wale maszyny. Zastosowany czujnik wytwarza dwa zestawy sygnałów: U, V, W (trzy fale prostokątne przesunięte między sobą o 120 stopni i o okresie równym przejściu wirnika pod podziałką biegunową stojana) i A, B, Z (fale prostokątne pozwalające na obliczenie położenia wału. W prezentowanym układzie sygnały U, V, W wykorzystano do sterowania procesem komutacji, a za pomocą sygnałów A i B wyznaczana jest wartość i zwrot prędkości wirowania. Trzecim podzespołem układu regulacji jest układ sterowania pracą baterii akumulatorów litowo – jonowych. Ten zespół został zakupiony do pracy od wytwórcy wraz z baterią i nie będzie tematem niniejszego opracowania. W czasie uruchamiania i testowania układu czwartym podzespołem należącym do wspólnej sieci staje się komputer klasy PC, włączany do sieci systemowej przez interfejs USB i szeregowo z nim połączony interfejs CAN (popularny układ „Minimon”). Ten podzespół pozwala śledzić poprawność pracy systemu i ingerować w treść komunikatów.

Praca systemu jest inicjowana przez użytkownika, przez załączenia napięcia zasilającego obwód elektroniczny pulpitu sterującego (kluczykiem) i wydaniu komendy „start” (przycisk). Kolejno załączają się: mikrokontroler i obwody sterownicze falownika i mikrokontroler i obwody sterownicze baterii. W trakcie normalnej pracy procesor falownika wykonuje pomiary prądu, prędkości i napięcia baterii, steruje obydwojema grupami tranzystorów IGBT oraz realizuje procedury regulatorów prądu i prędkości. Zatrzymanie zespołu następuje po wydanej przez operatora komendzie „stop” (przycisk na pulpicie). Informacja poprzez sieć CAN jest przesyłana do falownika. Mikroprocesor falownika blokuje tranzystory i wysyła do sterownika baterii polecenie odłączenia stycznika zasilania. Po zaniku napięcia baterii wyłączane są kolejno wszystkie obwody sterownicze. Algorytm realizujący sterowanie prędkością silnika BLDC z elektronicznym bocznikowaniem części uzwojenia był już omawiany w innych publikacjach [2]. Dlatego w dalszym ciągu omówiony zostaną ciekawe problemy które pojawiły się podczas uruchamiania tego napędu, a które rzadko są spotykane w innych, typowych rozwiązaniach.

4. Debouncing

Cechą charakterystyczną omawianego napędu pojazdu elektrycznego jest duży zakres regulacji prędkości obrotowej. Ponieważ pojazd powinien poruszać się z prędkością od bardzo małej do około 100 km/godz, a w łańcuchu kinematycznym przenoszenia momentu nie zastosowano skrzyni biegów, silnik musi stabilizować prędkość obrotową w granicach od zera do ok. 7000 obr/min. Oznacza to, że dla silnika o trzech parach biegunów, komutacja może powtarzać się nawet co 476 μ s.

Przy tak krótkich czasach problemem staje się niepewna praca czujników położenia wału, wyznaczających chwile komutacji prądu twornika. Najczęściej elementami przełączającymi czujników są hallotrony. W chwilach przełączania, a także pod wpływem silnych zewnętrznych zakłóceń elektromagnetycznych obwody czujników mogą wysłać pojedynczy bądź wielokrotny fałszywy impuls sterujący. Takie zakłócenia można porównać ze zjawiskiem, które w technice stykowej jest znane pod nazwą „drżenie styków” (ang. *contact bounce*). Aby napęd mógł pracować poprawnie konstruktor musi podjąć kroki, likwidujące niepewność wyzna-

czania chwil przełączania czujników hallotronowych. Takie rozwiązania (sprzętowe lub programowe) określamy mianem debouncingu.

Typowa procedura debouncingu powinna umożliwić identyfikację chwili, w której ma nastąpić przełączenie tranzystorów (po wystąpieniu zmiany stanu sygnałów wyjściowych hallotronowych czujników położenia), a następnie zrealizować zwłokę czasową, w czasie której kontrolowana jest stabilność napięć wyjściowych czujników położenia wału. Jeśli podczas całego okresu zwłoki stan sygnałów wyjściowych czujnika nie zmieni się, stwierdza się wykrycie zmiany stanu i przeprowadza się komutację prądów twornika maszyny.

Czas trwania procedury debouncingu jest stały i niezależny od prędkości silnika. Oznacza to, że silnik wirujący z dużą prędkością, w trakcie procedury debouncingu obróci się o kąt większy niż silnik wirujący z małą prędkością. Każda zwłoka wprowadzona za punktem naturalnej komutacji powoduje gwałtowny wzrost prądu płynącego przez uzwojenia, co skutkuje nierówną i głośną pracą maszyny. Zapobiega się temu skracając okres zwłoki lub przesuując czujnik położenia wału w ten sposób, by dla małych prędkości komutacja rzeczywista wyprzedzała komutację naturalną.

5. Synchronizacja przerw

W systemach sterowania maszyn szybkobieżnych konieczność skracania okresu, po którym sprawdzane jest położenie wału oraz skracanie zwłoki odmierzanej podczas procedury debouncingu, generuje problemy związane z precyzyjnym wyznaczaniem krótkich odstępów czasu. W omawianym układzie w ciągu jednej sekundy położenie wału jest sprawdzane ok. 64 tysięcy razy. Ten okres odmierza jeden z zegarów – liczników mikrokontrolera, nazywany zegarem bazowym, ze względu na to, że oprócz kontroli położenia wału steruje komutacją tranzystorów oraz wyznacza chwile, w których okresowo powtarzane są inne procedury (np. procedury regulatorów prędkości i prądu, procedura wymiany informacji z innymi węzłami sieci CAN itp). Ze względu na wymaganą powtarzalność procedura określająca punkt naturalnej komutacji oraz procedura realizująca debouncing powinna zaczynać się dokładnie o oznaczonym czasie i nie powinny być przerywane przez inne przerwania. Dlatego tej obsłudze nadano najwyższy priorytet. Pozostałe procedury synchronizowane przez zegar bazowy

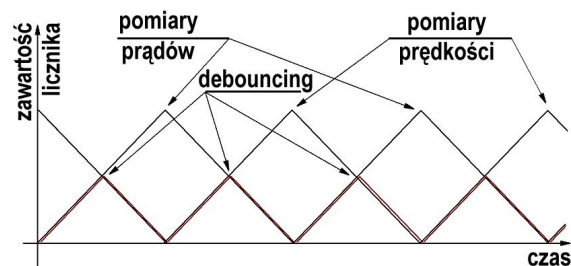
realizowane są w programie głównym, a procedura jedynie ustawia polecenie ich wykonania. Inne okresowo wywoływane procedury są zsynchronizowane przez zegary generujące fale PWM i zostały tak zsynchronizowane w czasie, by ich wykonanie nie kolidowało z wykonaniem obsługi zegara bazowego. Z tego względu częstotliwość przeładowań zegara bazowego dobrano dokładnie 4x większą, niż częstotliwość przeładowań pozostałych zegarów.

W budowanym algorytmie cały program sterowania silnika wykorzystuje cztery zegary – liczniki mikrokontrolera. Poza zegarem bazowym do generowania fal PWM wykorzystano dwa zegary: jeden steruje tranzystorami falownika (I zakres regulacji prędkości obrotowej), a drugi pracą kluczy zwierających (II zakres regulacji prędkości obrotowej). Oba zegary są z sobą zsynchronizowane w ten sposób, że ich przerwania generowane są przemiennie co 31,2 μ s. Czwarty zegar pracuje jako licznik i przez określony odcinek czasu zlicza impulsy przetwornika umieszczonego na wale silnika. Liczba zliczonych w ten sposób impulsów jest proporcjonalna do prędkości obrotowej silnika. Ten zegar nie generuje własnej obsługi przerwania.

W procedurach obsługi przerwania zegarów sterujących tranzystorami zrealizowano następujące elementy procesu sterowania:

- Pomiar prądów płynących przez trzy uzwojenia silnika. Aby we właściwym momencie wygenerować przerwanie, wybrano zegar sterownika zliczający „w górę i w dół”. Przerwanie pojawia się zawsze w chwili, w której licznik dokonuje nawrotu.
- Pomiar prędkości. Na wale silnika umieszczono przetwornik impulsowy, wysyłający 2048 impulsów na jeden obrót. Impulsy zliczane są przez 29312,5 μ s (469 kolejnych przerwania) przez inny licznik mikrokontrolera. W wyniku otrzymuje się rzeczywistą wartość prędkości obrotowej.
- Zegar bazowy. Generuje przerwania co 15,6 μ s, czyli cztery razy częściej, niż zegary wykorzystywane do generowania fal PWM. Również w tym przypadku wybrano zegar zliczający „w górę i w dół” i generujący przerwanie w chwili nawrotu. Ten zegar synchronizuje pozostałe okresowe procedury systemu.

Sposób synchronizacji przerwania pokazano na rys. 4. Takie ustawienie procedur pozwoliło w dużym stopniu zredukować udary prądu występujące w chwilach komutacji tranzystorów.



Rys. 4. Chwile czasowe określające początki procedur obsługujących przerwania mikrokontrolera

6. Wnioski

- Zastosowanie procedur okresowego sprawdzania położenia wału oraz procedur debouncingu zapobiega generowaniu błędnej komutacji tranzystorów przez przypadkowe zakłócenia.
- Procedury debouncingu i komutacji powinny kończyć się w precyzyjnie wyznaczonych chwilach czasu i dlatego wszystkie obsługi przerwania od zegarów powinny być tak zsynchronizowane, by ich obsługi nigdy nie występowały równocześnie.

7. Literatura

- [1]. Fręchowicz A.: *Dobór diod zabezpieczających w falownikach silników BLDC z elektronicznym bocznikowaniem części uzwojenia*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, ISSN 0239-3646, nr 96, 2012, wyd. BOBRME KOMEL, s. 49 – 55.
- [2]. Fręchowicz A. Heyduk A.: *Własności silników z magnesami trwałymi pracujących w drugiej strefie regulacji prędkości obrotowej*, Referat na XIV Krajowej Konferencji Elektryki Górniczej w Zakopanem, 10 do 12 października 2012.
- [3]. Sikora A., Zielonka A., Kulesz B.: *Impact of Hall sensors positioning on symmetry of BLDC control signals*. 21 st edition of the International Symposium on Power Electronics Electrical Drives, Automation and Motion. SPEEDAM 2012, Sorrento (Italy) June 20-22 2012. IEE Catalog number: CFP1248A-CDR, ISBN: 978-1-4673-1300-1, str. 249-252.
- [4]. Sikora A., Zielonka A., Kulesz B.: *Efficiency of BLDC motor drive*. XXII Symposium EPNC Electromagnetic Phenomena in Nonlinear Circuits, Pula (Croatia) 26-29.06.2012r. str. 95-96.

Autor

dr inż. Aleksander Fręchowicz, Politechnika Śląska ul. Akademicka 2; 44-100 Gliwice; tel. (32) 237-12-86; e-mail: afrechowicz@polsl.pl

Informacje dodatkowe

Praca była realizowana w ramach projektu badawczego - rozwojowego nr NR01 0059 10 /2011.