

Aleksander Fręchowicz, Adam Heyduk
Politechnika Śląska, Gliwice

PRACA DWUMASZYNOWEGO NAPĘDU Z SILNIKAMI BLDC W ELEKTROMECHANICZNYCH STANACH PRZEJŚCIOWYCH

TWO-MACHINE BLDC DRIVE OPERATION IN TRANSIENT STATES

Abstract: The paper describes design and operation of processor-based control system of two-machine drive with BLDC motor. This type of drive may be applied for example to mobile wheel robots, powered wheelchairs etc. Such drives require fast, four-quadrant and reversible controller, which allows for operation in all four quadrants of current-voltage co-ordinate system, making it possible to change over from driving mode to braking mode and to reverse rotational direction smoothly. The operation is directed by processor-based motor speed control system, consisting of standard controller block, measurement block and transistor converter. Transistor converter used here is built on the basis of three-phase inverter bridge structure with a single pair of complementary transistors. This type of structure makes possible simple transition from driving to braking operation, without any additional switching manoeuvres. Currents and rotational emfs of motors are measured in the speed blocks; those quantities are represented by alternating waveforms. The principal measurement problem is to determine proper sign (negative or positive) of quantities indispensable to correct operation of control algorithms. This is important in drives where rotational direction changes as well as modes of operation (from driving to braking and vice versa for both rotational directions). The paper is supplemented by measured examples of currents and speeds occurring during operation of the drive. It is demonstrated that operation is smooth, without overshootings and jerks.

1. Wstęp

W artykule opisano budowę i działanie procesorowego układu sterowania dwumaszynowego napędu wyposażonego w silniki BLDC. Układ taki może znaleźć zastosowanie w napędach mobilnych robotów kołowych, wózków inwalidzkich itp. W tych urządzeniach dwa silniki napędzają dwa koła umieszczone z dwóch stron robota. Jeśli oba koła wirują z taką samą prędkością, robot porusza się do przodu lub do tyłu. Jeśli prędkość jest różna – robot skręca. W rozwiązaniach tego typu wymagany jest szybki czterokwadrantowy, nawrotny sterownik umożliwiający pracę napędu w czterech ćwiartkach układu prąd – napięcie. Dodatkowo przejście od pracy napędowej do hamowania i odwrotnie oraz zmiana kierunku ruchu, powinny odbywać się bez szarpnięć i przeregulowań.

Układ napędowy będący przedmiotem badań składał się ze źródła energii (akumulatora kwasowo – ołowiowego), zasobników energii biernej (elektrolitycznych kondensatorów aluminiowych), dwóch tranzystorowych przetwornic i dwóch silników elektrycznych napędzających badane urządzenie. Jako zasilacze silników zastosowano dwa trójfazowe falowniki, rozdzielające energię prądu stałego na trzy cewki silnika, zgodnie z powszechnie znaną zasadą działania bezszczotkowego silnika prądu sta-

łego BLDC. Obie przetwornice sterowane są sygnałami z tego samego procesora sygnałowego. Wykorzystano procesor TMS320LF2407A, ponieważ jest to układ scalony wyposażony w urządzenia peryferyjne niezbędne do równoczesnego sterowania dwoma falownikami.

Jako silniki zastosowano wyprodukowane w firmie BOBRME KOMELI dwa wolnoobrotowe silniki BLDC z wirnikiem zewnętrznym. Są to silniki, w których obracającą się częścią maszyny jest korpus zewnętrzny (jarmisko wirnika) wraz z naklejonymi na jego wewnętrznej powierzchni magnesami trwałymi i przykręcone do niego tarcze łożyskowe. Wirnik zewnętrzny jest bezpośrednio montowany w piaście napędzanego koła. Pakiet stojana osadzony jest na konstrukcji wsporczej z nieruchomym wałkiem i jest połączony z konstrukcją napędzanego urządzenia. Zastosowanie silnika wolnoobrotowego pozwoliło na eliminację przekładni mechanicznych, typowych w napędach tego typu [4].

2. Praca układu w czterech ćwiartkach układu moment – prędkość

Zastosowanie układu czterokwadrantowego pozwala na szybkie zatrzymanie napędu wykorzystujące hamowanie odzyskowe, zmianę kierunku

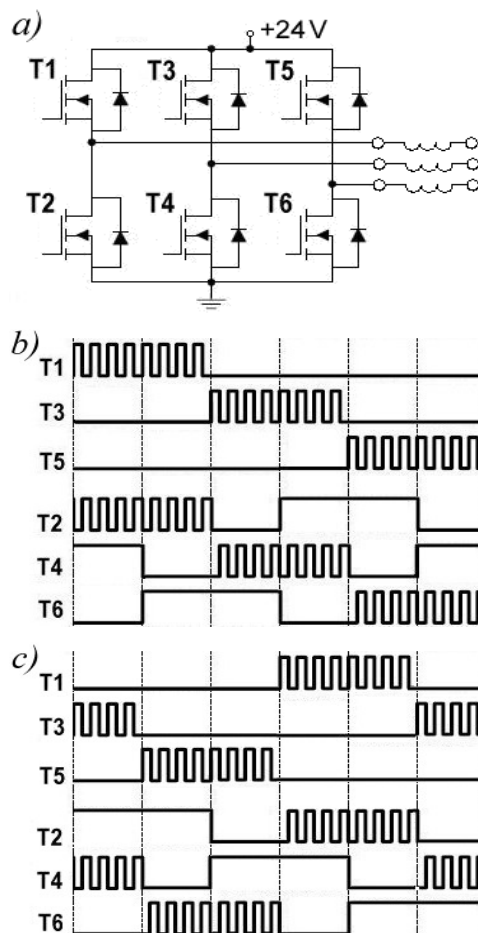
nku wirowania wirnika i rozpędzenie urządzenia w drugą stronę. Przyjęto, że w układzie zastosowany będzie klasyczny układ falownika w którym tranzystory sterowane będą w sposób, który można nazwać „sterowanie z jedną parą tranzystorów komplementarnych” (rys. 1). W takim układzie przy pracy napędowej tranzystory sterowane są w ten sposób, by prąd płynął w każdej chwili przez uzwojenia dwóch faz silnika. Na rysunku 1b wyjaśniono sposób sterowania tranzystorami mostka falownika podczas pracy napędowej silnika. Praca obejmuje zakres 360° elektrycznych, który można podzielić na 6 taktów, zaznaczonych na rysunku linią przerywaną. Kolejne takty są wyznaczone przez sygnały logiczne z hallotronowych czujników położenia. W każdym takcie pracują inne tranzystory mostka, a prąd w obwodzie płynie inną drogą, ale zawsze przez uzwojenia dwóch faz silnika. Na przykład w pierwszym takcie pokazanym na rysunku 1b prąd płynie od zacisku (+) źródła przez tranzystor T1, uzwojenie pierwszej i drugiej fazy silnika, tranzystor T4 do zacisku (-) źródła. Wartość napięcia zasilającego silnik nastawiana jest za pomocą modulacji szerokości impulsów sterujących bramką tranzystora należącego do górnej grupy (tranzystory T1, T3 i T5 na rys. 1). Tranzystory należące do dolnej grupy (T2, T4 i T6) przewodzą przez okres pełnych dwóch taktów.

Aby zmienić kierunek wirowania wirnika, prąd płynący przez pasma wybrane kombinacją sygnałów logicznych czujników Halla powinien zmienić kierunek na przeciwny. Przebiegi impulsów wyzwalaających tranzystory przy wirowaniu silnika w stronę przeciwną niż opisana wyżej, pokazano na rys. 1c.

W tych taktach, w których aktywny jest tranzystor należący do górnej grupy (np. T1 w pierwszym takcie) i w tych okresach, w których jest on blokowany, rozpoczyna przewodzenie tranzystor dolnej grupy, należący do tej samej gałęzi mostka (T2). W ten sposób tranzystory T1 i T2 tworzą parę komplementarną. Taki sposób sterowania pozwala na przepływ ciągłego prądu przez przewodzące tranzystory nawet przy małych wartościach współczynnika wypełnienia fali PWM, co poprawia liniowość całego układu sterowania. Ponadto, silnik zasilany w przedstawiony wyżej sposób, po zmniejszeniu współczynnika wypełnienia fali PWM automatycznie przechodzi do pracy hamulcowej bez jakiegokolwiek ingerencji w strukturę czy sterowanie układu. Takie działanie poprawia

zachowanie się układu w elektromechanicznych stanach przejściowych.

Hamowanie silnika przebiega następująco. Założmy, że w rozpatrywanej chwili czasu silnik pracuje w pierwszym takcie pokazanym na rys. 1b. Jeżeli przy wirującym silniku zmniejszony zostanie współczynnik wypełnienia fali PWM, istnieje możliwość, że w trakcie jednego okresu PWM prąd silnika zostanie wygaszony.



Rys. 1. Układ sterowania silnika BLDC „z jedną parą tranzystorów komplementarnych”: a) schemat ideowy, b) sposób sterowania przy zgodnym kierunku wirowania, c) sposób sterowania przy przeciwnym kierunku wirowania

Wtedy siły elektromotoryczne rotacji E_1 i E_2 indukowane w uzwojeniach dwóch faz silnika wzbudzą prąd płynący w kierunku przeciwnym niż ten, jaki był podczas pracy silnikowej. Będzie to więc prąd **hamujący** ruch wirnika. Na przykład na schemacie pokazanym na rysunkach 1a i 2a prąd narastać będzie w obwodzie: uzwojenia silnika – tranzystor T2 – dioda zwrotna tranzystora T4. Energia mechaniczna jest zamieniana na energię pola magnetycznego.

Taki stan będzie utrzymywać się, aż do chwili zmiany stanu tranzystorów pierwszej gałęzi mostka. Wtedy prąd zacznie maleć, płynąc w obwodzie: dioda zwrotna tranzystora T4 – uzwojenia silnika – dioda zwrotna tranzystora T1 – źródło. W tym przedziale czasu, zarówno energia mechaniczna, jak i energia zmagazynowana w polu magnetycznym będą zwracane do źródła (rys. 2b). Aby szczegółowo wyjaśnić działanie układu, na rys. 2c pokazano obliczone za pomocą modelu matematycznego przebiegi prądów płynących przez poszczególne elementy obwodu. Pierwsze cztery rysunki ilustrują przebiegi prądów tranzystorów T1, T2, T3, T4, na ostatnich dwóch pokazano prąd płynący przez uzwojenia dwóch faz i prąd oddawany do źródła. Oscylogramy prądów baterii w dwóch podstawowych trybach pracy silnika pokazano na rysunku 3. Na rys. 3a układ znajduje się w trybie pracy silnikowej i pobiera energię z baterii (prąd dodatni), na rys. 3b układ pracuje w trybie pracy hamulcowej i oddaje energię do baterii. Zaletą tej metody jest automatyczne przechodzenie od pracy silnikowej do pracy hamulcowej wymuszane jedynie przez zmianę współczynnika wypełnienia fali PWM, przy zachowaniu dotychczasowej struktury układu sterowania. Z tego powodu metoda ta jest chętnie stosowana w czterokwadrantowych układach sterowania. Wadą tego rozwiązania jest niestety fakt, że przy małych prędkościach moment hamujący maleje, a przy bardzo małych prędkościach w ogóle zanika.

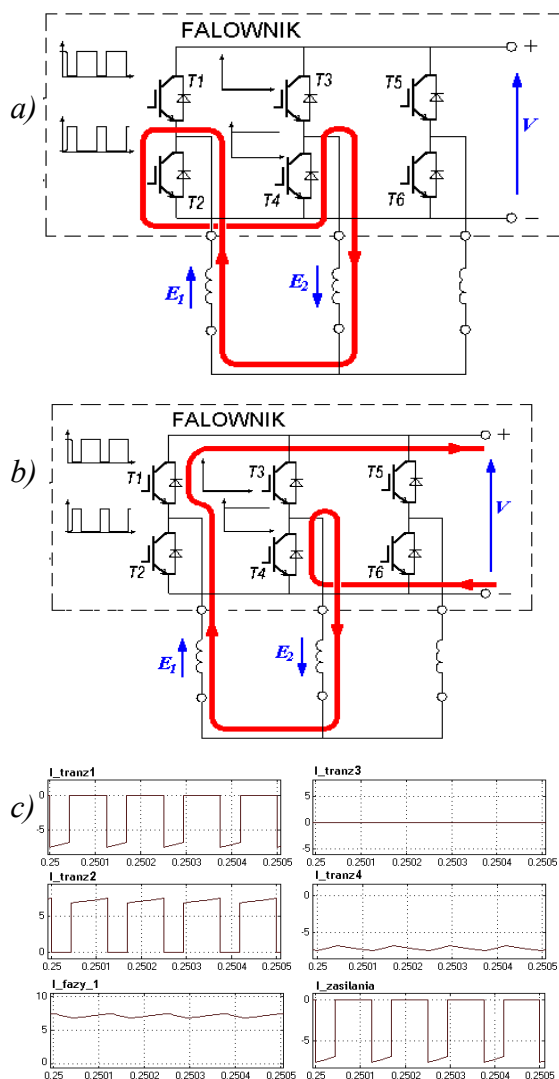
3. Algorytm i schemat blokowy układu sterowania

3.1. Komutacja tranzystorów falownika

Główne zadania, które realizuje algorytm sterowania to komutacja, czyli odpowiednie przełączanie tranzystorów falownika w takt zmian sygnałów z czujników położenia wału (czujników Halla) oraz regulacja prędkości i prądu silnika.

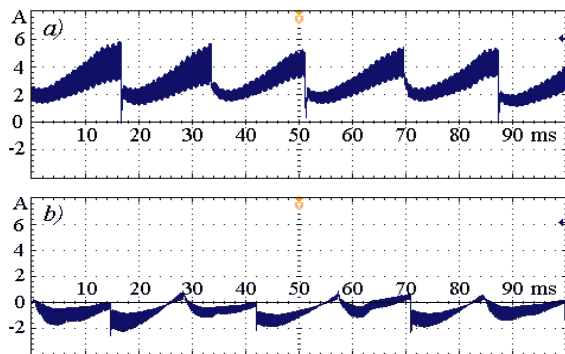
Na obwodzie twornika umieszczono co 120° elektrycznych trzy czujniki Halla. Logiczne sygnały z tych czujników wprowadzone są na wejścia procesora realizującego algorytm sterowania. Ruch wirnika i przyklejonych do niego magnesów powoduje zmianę stanu sygnałów wyjściowych czujników Halla w taki sposób, że podczas przesuwania magnesów wirnika o dwie podziałki biegunowe, wyznaczonych zostaje sześć różnych stanów logicznych. Każda zmia-

na stanu sygnałów Halla wywołuje działanie algorytmu komutacji, który przełącza tranzystory falownika. Każdemu z sześciu stanów sygnałów z czujników Halla odpowiadają dwie kombinacje stanu tranzystorów zapisane w tablicach umieszczonych w pamięci procesora:



Rys.2. Przepływ prądu w układzie sterowania silnika BLDC podczas hamowania: a) siły elektromotoryczne wzbudzają przepływ prądu, b) prąd oddaje energię do źródła, c) prądy układu wyliczone podczas badań symulacyjnych

jedna dla jazdy „do przodu” i jedna dla jazdy „do tyłu”. Określenie, z której tablicy pobierane będą kody sygnałów podawanych na bramki tranzystorów, oznacza przyjęcie jednej z dwóch możliwych kolejności wyzwalania tranzystorów falownika. Wybór odpowiedniej tablicy określa kierunek prądu przepływającego przez uzwojenia twornika przy wyznaczonym przez sygnały Halla położeniu wirnika i stąd kierunek wirowania pola magnetycznego.

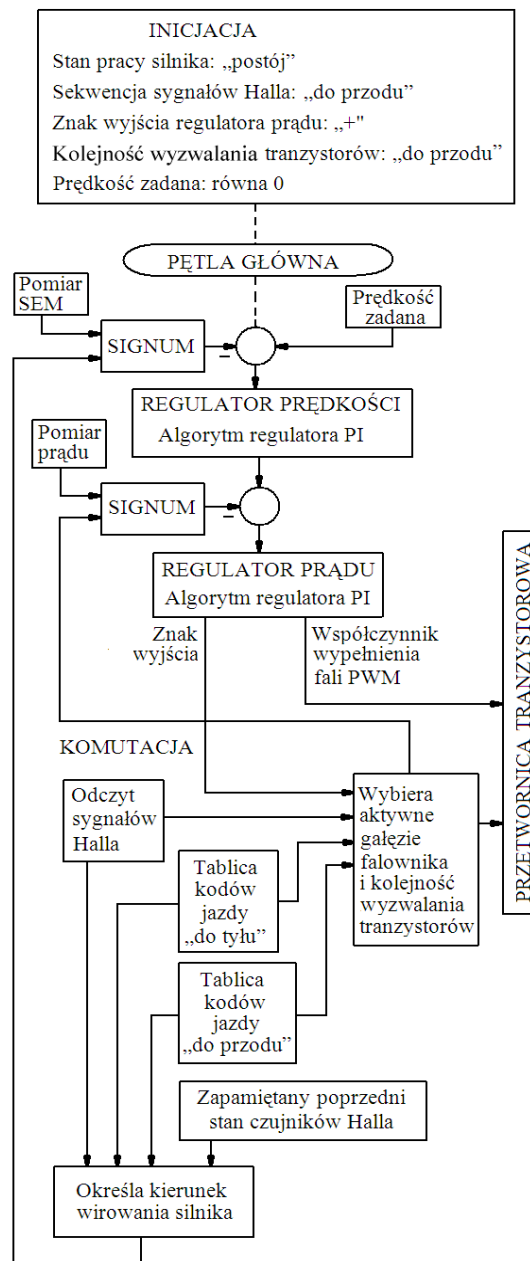


Rys. 3. Pomierzone przebiegi prądów: a) wydawanego ze źródła podczas pracy silnikowej, b) oddawanego do źródła podczas pracy hamulcowej

3.2. Pomiary i regulacja prędkości silnika

Schemat blokowy układu sterowania prędkością obrotową pojedynczego silnika pokazano na rysunku 4. Wielkością sterującą ruch silnika jest sygnał prędkości zadanej, wypracowany przez zadajniki prędkości i przyspieszenia, którego wartość jest zależna od wielu czynników. Ten sygnał jest wprowadzany na wejście bloku regulatorów, który zbudowano jako układ kaskadowy składający się z nadrzędnego regulatora prędkości i podrzędnego regulatora prądu. Zastosowano cyfrowe regulatory typu PI z programowaną wartością nasycenia. Nasycenie umożliwia wprowadzenie dodatkowych funkcji zabezpieczeń nadprądowych i termicznych silników (ograniczenie wartości prądu) oraz poprawia działanie układu w stanach dynamicznych. Nastawy regulatorów dobrano zgodnie z kryterium „optimum modułu” dla regulatora prądu i zgodnie z kryterium „optimum symetrii” dla regulatora prędkości [2].

Jako sygnał sprzężenia zwrotnego dla regulatora prędkości wykorzystano sygnał napięcia proporcjonalny do pomierzonej siły elektromotorycznej rotacji. Trzy napięcia wyprowadzane z falownika na zaciski silnika uśredniano (każde oddzielnie) i doprowadzono do trzech wejść przetwornika analogowo – cyfrowego procesora sterującego napędem. Wykorzystano fakt, że zawsze jedna z trzech gałęzi falownika znajduje się w takcie, w którym aktywny jest jej tranzystor przyłączony do dodatniego bieguna źródła napięcia. Oznaczało to, że sygnał napięcia odczytywany jest z górnej „podstawy trapezu” siły elektromotorycznej rotacji. Podczas każdej komutacji identyfikowano tę gałąź i do czasu kolejnej komutacji to jej napięcie służyło



Rys.4. Schemat przepływu sygnałów algorytmu sterowania tranzystorami falownika

do wyliczania wartości prędkości. Wyniki pomiaru poddawano dolnoprzepustowej filtracji cyfrowej w celu usunięcia zakłóceń impulsowych. W trakcie przetwarzania sygnału otrzymany wynik skalowano do zakresu wartości zgodnych z zakresem wartości uzyskiwanych z zadajnika prędkości. W trakcie przetwarzania sygnału od tak odczytanego napięcia odejmowano spadek napięcia na rezystancji twornika i otrzymany wynik skalowano do wartości zgodnych z wartością zadaną prędkości.

Metoda określenia prędkości wirowania maszyny bazująca na przetworzeniu pomierzonej

wartości siły elektromotorycznej rotacji pozwala określić jedynie moduł prędkości. W maszynach prądu stałego, w których ta metoda jest często stosowana, po zmianie kierunku wirowania następuje zmiana znaku mierzonego napięcia. W silnikach BLDC, podobnie jak w trójfazowych maszynach synchronicznych zmiana kierunku wirowania nie zmienia znaku mierzonego napięcia, ale istniejącą w układzie kolejność faz.

Znajomość znaku sygnału prędkości rzeczywistej jest niezbędna do prawidłowego działania układu regulacji. W prezentowanym algorytmie przyjęto, że znak prędkości rzeczywistej rozwijanej przez silniki będzie rozpoznawany po każdorazowym odczycie zestawu sygnałów z hallotronowego czujnika położenia wału. Sekwencje: nowego zestawu trzech sygnałów binarnych odczytanych z czujników Halla oraz zapamiętanego w pamięci procesora zestawu tych sygnałów odczytanych przy poprzedniej komutacji (poprzednie położenie wału) porównuje się z kolejnością występowania tych dwóch stanów w tablicach kodów jazdy „do przodu” i „do tyłu”. Odczytana sekwencja zostaje odnaleziona w jednej z tych tablic, co pozwala określić znak rzeczywistego kierunku wirowania silnika.

Pozornie prostszą drogą określenia znaku prędkości byłoby sprawdzenie zadanej i realizowanej przez algorytm kolejności wyzwiania tranzystorów mostka falownika. Niestety, podczas szybkozmiennych stanów dynamicznych może zdarzyć się, że po zadanej rewersji prędkości kierunek wirowania pola już ulegnie zmianie, podczas gdy obciążony dużym momentem bezwładności wirnik wciąż jeszcze wiruje w przeciwną stronę. W takim stanie określenie kierunku wirowania wirnika na podstawie znajomości kierunku wirowania pola mogłoby doprowadzić do impulsowych zmian momentu.

3.3. Pomiar i regulacja prądu silnika

Jako sygnał sprzężenia zwrotnego dla regulatora prądu wykorzystano wartość prądu zmierzoną w przewodzie łączącym źródło napięcia stałego i falownik. Ten prąd zmienia swój znak w zależności od trybu pracy maszyny: dla pracy silnikowej prąd płynie od źródła do falownika i maszyny, a dla pracy hamulcowej od maszyny do źródła. Przyjęto znak (+) dla pracy silnikowej i znak (–) dla pracy hamulcowej. Podobnie jak przy pomiarze siły elektromotorycznej, dla poprawnej pracy napędu należy jeszcze

uwzględnić zależność znaku prądu od rzeczywistego kierunku wirowania silnika. Zasada jest następująca: jeżeli napęd porusza się do przodu, znak prędkości określony przez tryb pracy (silnikowa / hamulcowa) pozostaje niezmienny, jeśli napęd porusza się do tyłu – znak sygnału prądu określony przez tryb pracy zostanie zamieniony na przeciwny.

Algorytm określania znaku wielkości rzeczywistych prądu został zbudowany w sposób następujący. Znak sygnału wyjściowego regulatora prądu decyduje o żądanej kolejności faz (kolejności wyzwiania tranzystorów falownika). Ale w chwili, gdy ten sygnał zostaje obliczony, jeszcze nie podejmuje się decyzji o znaku sygnału prądu rzeczywistego silnika, ani nie wywołuje się dodatkowego przebiegu algorytmu komutacji tranzystorów falownika. Dopiero gdy nastąpi najbliższa zmiana sygnałów z czujników Halla, uruchomiony zostaje algorytm komutacji i tranzystory falownika zostają ustawione na wytworzenie pola wirującego w stronę przeciwną do dotychczasowej. Następujące po tym fakcie, kolejne wywołanie algorytmu regulatora prądu i związanego z nim pomiaru prądu rzeczywistego powinno spowodować odpowiednie ustawienie znaku pomierzonej wartości prądu. Inaczej rzecz ujmując: zmiana znaku prądu jest określona przez znak sygnału wyjściowego regulatora prądu, ale może być wprowadzona do równań dopiero po rzeczywistej zmianie kierunku wirowania pola wykonanej przez algorytm komutacji.

3.4. Praca układu sterowania przy postoju

Dodatkową komplikacją pojawiającą się przy pracy zespołu jest całkowite działanie regulatorów występujące w całym zakresie pracy, a więc również przy postoju napędu. Aktywność całkowitych regulatorów zatrzymanego napędu powoduje lekkie drgania zespołu połączone z niewielkim, ale nieprzyjemnym hałasem. Aby uniknąć tych efektów postanowiono przy postoju napędu wyłączać z pracy człony całkowite regulatorów. Należało jeszcze określić kryterium postoju, bo w napędzie czterokwadrantowym przejście od pracy „do przodu” do pracy „do tyłu” wymaga przejścia przez zero. W takiej sytuacji nie powinna następować zmiana struktury regulatorów powodująca gwałtowne zmiany sygnału wyjściowego, bo kończyłoby się to silnym szarpaniem napędu przy małych prędkościach. Dlatego przyjęto, że stan postoju będzie rozpoznawany w sytuacji

gdy wszystkie cztery sygnały wejściowe regulatorów prędkości (prędkości rzeczywiste i prędkości zadane obu silników) będą utrzymywać się na wartości mniejszej, niż założona prędkość minimalna przez określoną graniczną wartość czasu. Po zaprogramowaniu powyższego kryterium odłączenie członu całkującego w stanie „postoju” uspokaja zatrzymane silniki.

4. Badania laboratoryjne napędu

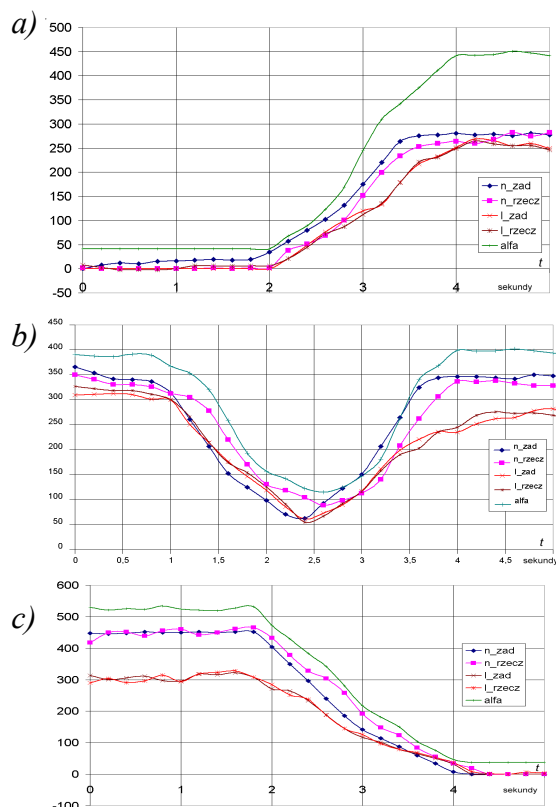
Powyższy algorytm został zastosowany w napędzie wózka inwalidzkiego i był poddany szeregowi prób laboratoryjnych. Na rysunkach 5 a,b,c przedstawiono przeskalowane wyniki rejestracji typowych stanów dynamicznych napędu, związanych ze zmianą prędkości jazdy, pokonywaniem zakrętu oraz zatrzymaniem wózka. Przedstawione przebiegi ilustrują poprawne działanie obwodów regulacji prędkości i prądu. Układ regulacji wózka inwalidzkiego zawsze współpracuje z zadajnikami prędkości i przyspieszenia. Parametry tych zadajników są tak dobrane, by zapewnić poczucie komfortu jazdy nawet przy gwałtownych ruchach drążka sterowniczego. Dlatego w prezentowanych przebiegach sygnał prędkości zadanej jest zawsze wygładzony. Na rysunkach widać, że prąd rzeczywisty dobrze śledzi wartości zadane. Sygnał prędkości rzeczywistej opóźnia się o około 0,2 sekundy za sygnałem prędkości zadanej. Ta relacja powinna być jeszcze dopracowana w trakcie dalszych prac.

5. Podsumowanie

W opisywanym układzie zastosowano szereg rozwiązań zapewniających uzyskanie poprawnego działania obwodów regulacji i prędkości w stanach przejściowych. Rozbudowa algorytmów pomiarowych i sterowniczych związana była z koniecznością zapewnienia pracy układu w czterech ćwiartkach układu moment-prędkość oraz w stanie postoju silnika. Szczególnie istotna dla prawidłowego przebiegu procesu hamowania okazała się synchronizacja chwil pomiaru znaku prądu z przebiegiem komutacji tranzystorów falownika oraz wyznaczenie rzeczywistego kierunku jazdy na podstawie sygnałów z czujników hallotronowych.

6. Literatura

[1]. Fręchowicz A.: *Wariantowe rozwiązania sterowania układem napędowym wózka inwalidzkiego wyposażonym w klasyczne silniki prądu stałego*. Przegląd Elektrotechniczny nr 4/2008 Warszawa 2008.



Rys.5. Przebiegi prędkości zadanej i rzeczywistej, prądu zadanego i rzeczywistego oraz współczynnika wypełnienia fali PWM: a) podczas rozruchu wózka, b) podczas pokonywania zakrętu (dla napędu koła wewnętrznego), c) podczas zatrzymania wózka

[2]. Fręchowicz A., Heyduk A.: *Dobór nastaw regulatorów cyfrowych w mechatronicznym układzie wózka inwalidzkiego*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, ISSN 0239-3646, zeszyt nr 88/2010 Katowice, 2010, str. 57 - 62

[3]. Kaźmierkowski M. P., Tunia H.: *Automatic Control of Converter-Fed Drives*, ELSEVIER Amsterdam, London, New York, Tokyo, 1994.

[4]. Dukalski P.: *Silnik bldc z magnesami trwałymi jako napęd wózka inwalidzkiego*; Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 86/2010, str. 267 – 272, BOBRME KOMELI, Katowice 2010.

Praca była realizowana w ramach projektu badawczego własnego nr NN501365934

Autorzy

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

dr inż. Adam Heyduk
Politechnika Śląska, ul. Akademicka 2
44-100 Gliwice; tel. (32) 237-12-50
e-mail: adam.heyduk@polsl.pl