

Aleksander Fręchowicz
Politechnika Śląska, Gliwice

WPLYW SPOSOBU ZASILANIA NA WŁASNOŚCI DYNAMICZNE SILNIKÓW PRĄDU STAŁEGO, ZASILANYCH Z IMPULSOWYCH PRZETWORNIKÓW ENERGII

IMPACT OF SUPPLY METHOD ON DYNAMIC PROPERTIES OF DC MOTORS FED BY IMPULSE ENERGY CONVERTERS

Abstract: Modern electric servodrives are equipped with standard or brushless dc motors and PWM transistor converters. The designers must utilise motors electric braking if high demands on motors' dynamics are to be met. It often happens that during coasting, real speed does not keep up with quickly decreasing set speed. In case of electric braking, the controllers change motor current direction. Motor goes into braking mode, and controllers operate in such a way, that real system speed keeps up with decreasing set speed. Additionally it is required that transmission from driving to braking modes and reversing should be achieved smoothly, without jerks or overshooting. Dc machines can brake in two different ways: utilising counter-current mode and dynamic braking mode. In both modes, when braking current is flowing, the valves are switched off and braking current transfers system's energy back to the supply source. From the design point of view, these drive systems may be divided into two basic categories. The first class consists of drives where PWM period may be apportioned into two time intervals: one, when the system operates in driving mode, the other, when it operates in braking mode. Depending on pulse-duty factor, the system operates as drive or brake. Change of energy flow direction does not necessitate switching the circuit structure. The second class of drives comprises systems operating as drives or brakes and change of operation mode is achieved by switching circuit structure. Four different designs of dc drives are presented in the paper, combining both braking modes and both drive classes. Merits and faults of these systems are shown.

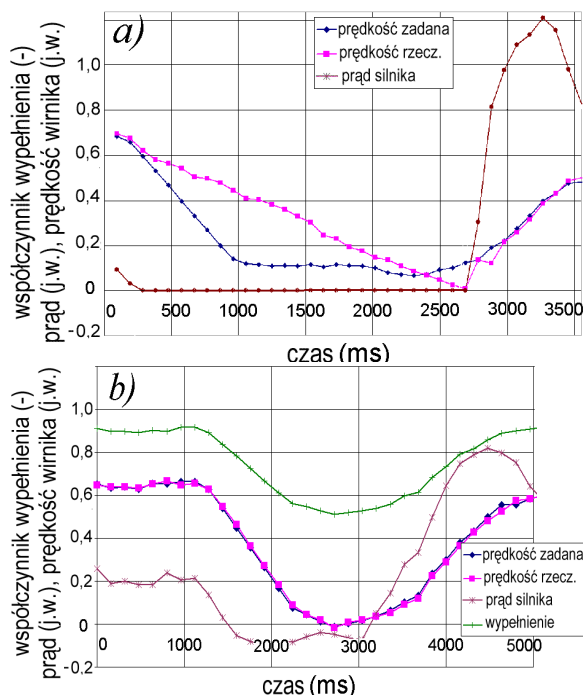
1. Wstęp

Współczesne napędy elektryczne wyposażone w klasyczne bądź bezszczotkowe silniki prądu stałego stawiają przed konstruktorami systemów napędowych wysokie wymagania odnośnie dynamiki. W szczególności dotyczy to napędów obrabiarek sterowanych numerycznie, oraz coraz liczniejszych napędów mobilnych robotów kołowych. We wszystkich tych urządzeniach wymagany jest szybki czterokwadrantowy, nawrotny sterownik umożliwiający pracę napędu w czterech ćwiartkach układu prąd – napięcie i, co nie mniej ważne, przejście od pracy napędowej do hamowania i odwrotnie oraz zmiana kierunku ruchu, powinny odbywać się bez szarpnięć i przeregulowań.

Pod względem funkcjonalnym współczesne napędy czterokwadrantowe można porównać z dawnymi, nawrotnymi napędami prądu stałego wyposażonymi w zawory tyrystorowe. Podobnie jak tamte układy, dzisiejsze napędy zasilane z impulsowych przetworników energii mogą zachowywać się jak dawne układy pracujące „z prądami wyrównawczymi” lub „bez prądów wyrównawczych”. Oznacza to, że możliwe jest takie sterowanie układu, by uzyskać płynną, nie

przerwaną zmianę kierunku przesyłania energii od źródła energii elektrycznej do napędzanego mechanizmu i od tego mechanizmu do źródła, ale też można budować prostsze układy, w których automatyczne przełączanie kierunku wirowania i kierunku przesyłania energii związane jest z przełączeniem struktury układu napędowego. Przykładem napędu o wysokich wymaganiach dynamicznych jest napęd wózka inwalidzkiego. Taki napęd [1,2] jest wyposażony w sterownik procesorowy, który na podstawie sygnałów sterujących z zadajnika (joysticka), obsługiwanego przez inwalidę, wypracowuje informację o prędkości zadanej dwóch silników napędzających wózek. Szczególnie krytycznym stanem pracy wózka jest pokonywanie ciasnego zakrętu. Jak wiadomo, wózek inwalidzki nie posiada kierownicy, a zakręca wtedy, kiedy koła napędzane pracują z różną prędkością. Podczas wchodzenia w ciasny zakręt (np. zawracanie w wąskim korytarzu), koło wewnętrzne powinno szybko zwolnić, a jeśli to konieczne, nawet zatrzymać się lub zacząć wirować w przeciwną stronę. Przy wychodzeniu z zakrętu, koło powinno szybko

przyspieszyć by zrównać prędkość z drugim (zewnątrznym) kołem wózka. Z punktu widzenia napędu oznacza to, że wewnętrzne koło, które wcześniej pracowało jako koło napędzane, powinno zwolnić aż do zatrzymania, wykonać rewersję prędkości, przyspieszyć w drugą stronę, znów zahamować, zatrzymać się i ponownie rozpedzić się do zadanej prędkości. Cały ruch powinien odbywać się płynnie, bez szarpnięć i przeregulowań. W napędzie wózka inwalidzkiego takie wymagania odnośnie dynamiki, zmuszają do zastosowania elektrycznego hamowania silników [3]. Przy stosunkowo dużej masie wózka i siedzącego na wózku inwalidy, nie ma możliwości by zwolnić koło napędzane jedynie za pomocą wybiegu. Taką sytuację wyjaśniono na przebiegach prądu, prędkości zadanej i rzeczywistej wózka, pokazanych na rys. 1a (dla wózka bez hamowania elektrycznego) i na rys. 1b (dla wózka z hamowaniem elektrycznym). Przebiegi pokazują pracę wewnętrznego koła wózka. Przy hamowaniu wybiegiem regulatory odcinają zupełnie prąd, ale nawet to nie jest w stanie spowodować, by rzeczywista prędkość koła nadążała



Rys. 1. Parametry pracy napędu wózka inwalidzkiego podczas manewru: szybkie zwalnianie – przyspieszanie: a) napęd z przekształtnikiem dwukwadrantowym, b) napęd czterokwadrantowy

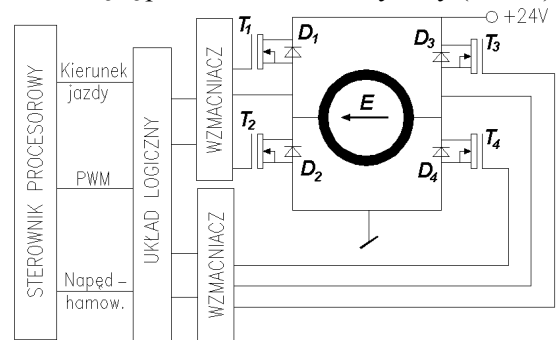
za szybko malejącą prędkością zadaną. Zespół napędowy wewnętrznego koła wiruje zbyt

szybko, co spowalnia wchodzenie w zakręt. Inwalida czując, że wózek nie nadąża za sterowaniem, odruchowo ściąga drążek sterujący na siebie, co może zakończyć się przełączeniem silnika do pracy w drugą stronę, podczas gdy masy całego mechanizmu wciąż jeszcze wirują w stronę początkową. W efekcie otrzymuje się silne szarpnięcie (takiego stanu nie pokazano na rysunku) i uderzenie prądu, które może doprowadzić do uszkodzenia napędu.

Zupełnie inaczej wygląda praca napędu, w którym zastosowano hamowanie elektryczne (rys. 1b). W tym przypadku regulatory nie wyłączają prądu, ale zmieniają kierunek prądu płynącego przez silnik. Silnik przechodzi do pracy hamulcowej, a regulatory w ten sposób wysterowują tranzystory, by prędkość rzeczywista napędu koła wewnętrznego nadążała za prędkością zadaną. Tak zaprojektowany wózek może ze sporą prędkością wchodzić w ciasne zakręty i pokonywać je bez szarpnięć.

2. Hamowanie elektryczne silników prądu stałego zasilanych z przetworników *dc-to-dc*

Na rys. 2 przedstawiono prosty schemat układu napędowego z silnikiem prądu stałego zasilanym z przetwornika tranzystorowego *dc-to-dc*. Jest to typowy sposób zasilania klasycznych (wyposażonych w szczotki) silników prądu stałego. Układ zasilacza silnika prądu stałego, składa się z dwóch gałęzi z tranzystorami FET, pracującymi w układzie pełnego mostka. Podczas pracy układu zasilającego możliwych jest kilka przypadków zasilania obwodu. W najprostszym, dwukwadrantowym trybie pracy, w układzie wysterowane są zawsze dwa tranzystory. Załóżmy, że przy jeździe do przodu będą to: górny tranzystor z pierwszej gałęzi (T_1) i dolny z drugiej (T_4). Przy jeździe do tyłu pracować będą pozostałe dwa tranzystory (T_3 i T_2).



Rys. 2. Schemat układu napędowego wózka z przetwornikiem tranzystorowym *dc-to-dc*

W takim układzie, przy jeździe do przodu, w tych przedziałach okresu PWM, w których tranzystory są wysterowane, prąd płynie w obwodzie: biegun dodatni źródła, tranzystor T_1 , uzwojenie silnika (pokonując sem rotacji E), tranzystor T_4 , biegun ujemny źródła. W tym czasie energia przenoszona jest ze źródła do silnika i powiększa się energia zmagazynowana w polu magnetycznym. W tych przedziałach czasu, kiedy tranzystory są zatkane prąd płynie w obwodzie: biegun ujemny źródła, dioda D_2 , silnik, dioda D_3 , biegun dodatni źródła, a część energii zmagazynowanej w obwodzie magnetycznym jest przekazywana do silnika lub zwracana do źródła. Bez względu na kierunek przenoszenia energii, prąd w cewkach silnika płynie w tę samą stronę, co znaczy, że silnik pracuje jako napęd. W skrajnym przypadku można tak zmniejszyć współczynnik wypełnienia fali PWM, by przejść do strefy prądów przerywanych lub w ogóle zgasić prąd. W takim przypadku maszyna będzie zwalniała wybiegiem, aż do zatrzymania. Aby przejść do pracy czterokwadrantowej, czyli spowodować by maszyna zaczęła pracować jako hamulec, należy zmienić kierunek prądu płynącego przez silnik. W zasadzie można to zrobić na dwa sposoby [4].

- Hamowanie przeciwpędem. Podczas jazdy „do przodu” należy przełączyć tranzystory mostka na jazdę „do tyłu”, czyli na chwilę zatkanąć tranzystory T_1 i T_4 i wysterować tranzystory T_3 i T_2 . W takim układzie sumaryczne napięcie źródła i sem rotacji E bardzo szybko wygasi prąd twornika, po czym wzniesi przepływ prądu w przeciwną stronę. Silnik przejdzie do pracy hamulcowej. Oczywiście w takim układzie cała energia pobierana zarówno ze źródła jak i z mas wirujących musi być tracona na rezystancji uzwojenia silnika i w zaworach. Dlatego taki stan nie może trwać długo i układ automatycznej regulacji powinien wyłączyć zawory, kiedy tylko prąd hamujący osiągnie wymaganą wartość. Przy wyłączonych zaworach, prąd będzie płynąć dalej w obwodzie: biegun ujemny źródła, dioda D_4 , uzwojenie silnika, dioda D_1 , biegun dodatni źródła, zwracając zarówno energię mas wirujących jak i energię zmagazynowaną w obwodzie magnetycznym do źródła. Ostatecznie praca w trybie hamowania składa się z bardzo krótkich chwil kiedy załączane są tranzystory T_3 i T_2 i wzniesany jest prąd hamujący i z długich przedziałów czasu, w

których wzniesiony prąd przenosi energię mas wirujących do źródła.

- Hamowanie dynamiczne. Podczas jazdy „do przodu” należy zaniechać sterowania tranzystorów T_1 i T_4 , a zamiast tego wysterować oba dolne (lub oba górne) tranzystory mostka np. tranzystory T_3 i T_4 . W takim układzie sem rotacji E zostanie zwarta, co spowoduje wygaszenie prądu napędzającego silnik i wzniesienie prądu płynącego w przeciwną stronę (hamowanie). Dalej algorytm postępowania jest podobny jak przy pierwszej metodzie. W tym trybie hamowania praca składa się z przedziałów czasu w których wysterowane są tranzystory T_3 i T_4 i zwarta sem rotacji wzniesie prąd hamujący i z krótkich przedziałów czasu, w których wzniesiony prąd płynie w obwodzie: biegun ujemny źródła, dioda D_4 , uzwojenie silnika, dioda D_1 , biegun dodatni źródła przenosi energię mas wirujących do źródła.

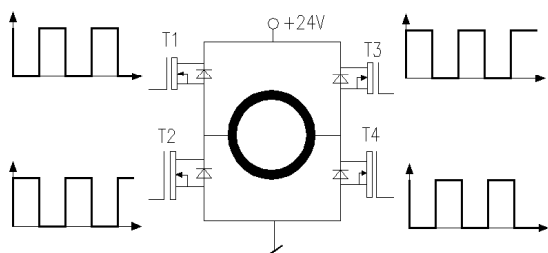
W obu przedstawionych wyżej metodach hamowania kluczowym problemem jest dobór chwili, w której zespół przechodzi z pracy napędowej do hamulcowej. Niewłaściwy wybór tej chwili może być przyczyną nieprzyjemnych szarpnięć i udarów prądu. We współczesnych układach stosuje się różne metody mające doprowadzić do płynnej zmiany kierunku wirowania i do płynnego przejścia z trybu napędzania do trybu hamowania. Każda metoda ma oczywiście swoje wady i zalety. Różne metody hamowania badano na stanowisku, którego schemat blokowy jest podobny do schematu pokazanego na rys. 2. Sterownik procesorowy wykorzystywany w układzie wypracowuje sygnał PWM, wykorzystywany do sterowania tranzystorami i dwa sygnały logiczne: kierunek jazdy („0” – do przodu, „1” – do tyłu) oraz napęd/ hamowanie („0” – napędzanie, „1” – hamowanie).

3. Struktury czterokwadrantowych przetworników *dc-to-dc*

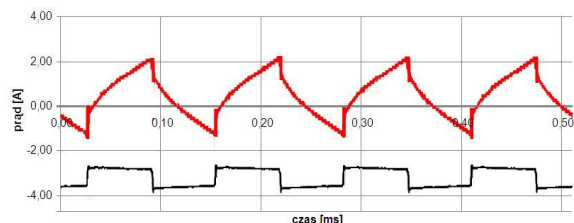
W opracowaniu przedstawiono cztery różne układy czterokwadrantowych przetworników *dc-to-dc*. W dwóch układach możliwa jest nie przerywana zmiana kierunku przesyłania energii od źródła energii elektrycznej do napędzanego mechanizmu i od tego mechanizmu do źródła, a w pozostałych dwóch, zmiana kierunku przesyłania energii związana jest ze zmianą struktury układu. Dwa pierwsze można porównać z dawnymi układami tyrystorowymi pracującymi „z prądami wyrównawczymi”, a dwa

pozostałe – z układami „bez prądów wyrównawczych”.

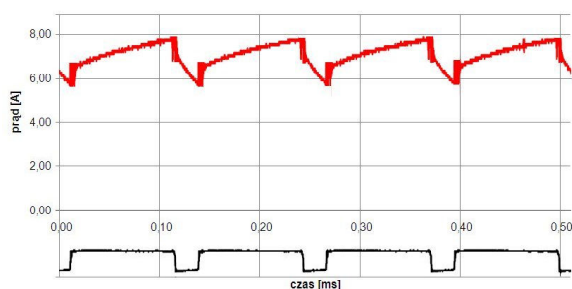
We współczesnych napędach z przetwornikami tranzystorowymi *dc-to-dc*, efekt podobny do pracy „z prądami wyrównawczymi”, uzyskuje się poprzez przemienne sterowanie wszystkich czterech tranzystorów mostka. W ten sposób dwa tranzystory (np. T_1 i T_4) przez pierwszą część okresu PWM starają się napędzać silnik, natomiast pozostałe dwa tranzystory (np. T_3 i T_2) podczas drugiej części okresu PWM starają się go hamować.



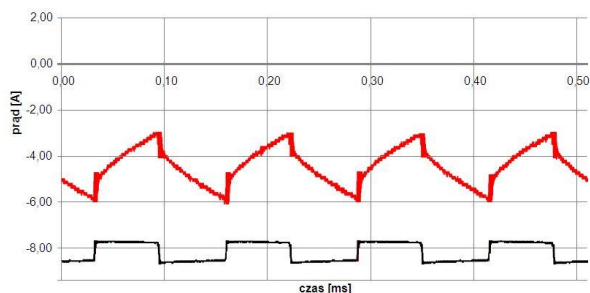
Rys. 3. Przetwornik tranzystorowy z czterema tranzystorami pracującymi przemiennie



Rys. 4. Przebiegi czasowe prądu zatrzymanego silnika



Rys. 5. Przebiegi czasowe prądu silnika pracującego jako napęd



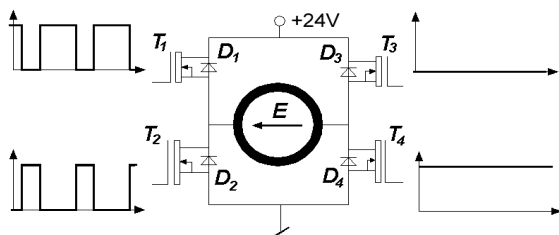
Rys. 6. Przebiegi czasowe prądu silnika pracującego jako hamulec

W układzie pokazanym na rys.3 fala PWM sterująca tranzystorami podawana jest na tranzystory należące do jednej gałęzi mostka przemiennie, by nie dopuścić do powstania zwarć skrośnych. Dodatkowo, dobierając przebiegi czasowe fali PWM, między wyłączeniem jednego tranzystora i załączeniem drugiego, umieszczonego w tej samej gałęzi, pomiędzy impulsy wprowadzono krótkie opóźnienie (*pulse delay time*). Opóźnienie to wprowadza układ logiczny pokazany na rys. 2.

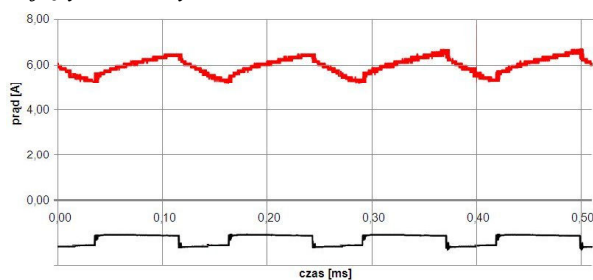
Na rysunku 3 naszkicowano przebiegi sterujące pracą tranzystorów z współczynnikiem wypełnienia równym 0,5. Przez silnik prąd płynie przemiennie raz w jedną, a raz w drugą stronę (rys.4). Oznacza to, że silnik a wraz z nim wózek – stoi. Zmiana współczynnika wypełnienia w kierunku wartości większych niż 0,5 powoduje wirowanie silnika w jedną stronę (np. w lewo – rys. 5). Zmniejszenie współczynnika wypełnienia na wartości mniejsze niż 0,5, powoduje ruch silnika w drugą stronę (np. w prawo). Silnik w obu tych stanach pracuje w tej samej strukturze i nie ma potrzeby dokonywania jakichkolwiek przełączeń przy zmianie kierunku ruchu. Podobnie wygodne jest przejście z trybu napędzania do trybu hamowania. Szybkie zmniejszenie prędkości zadanej powoduje płynne zmniejszenie współczynnika wypełnienia fali PWM, przejście maszyny do pracy hamulcowej i wyhamowanie wirnika do żądanej prędkości. Również w tym przypadku nie trzeba zmieniać struktury układu: przejście napędu do pracy silnikowej i hamulcowej odbywa się samoczynnie. Układ regulacji prędkości jazdy wózka jest bardzo prosty. Sygnały: „kierunek jazdy” i „napęd/hamowanie” pokazane na rys. 2 są zbędne. Do zamknięcia pętli sprzężenia zwrotnego praktycznie wystarcza znajomość siły elektromotorycznej mierzonej na zaciskach silników (pojedyncza pętla sprzężenia zwrotnego). Dodatkowy pomiar prądu umożliwia wykonanie odcięcia prądowego. Prosty układ regulacji i ciągłe przebiegi prądów i napięć silników napędowych przy przejściu od hamowania do napędzania i przy zmianie kierunku jazdy silnika, są niewątpliwymi zaletami tego układu. Niestety, układ posiada również swoje wady. Główną jest to, że zawsze, nawet wtedy gdy wózek stoi, przez silnik płynie prąd przemienny. Ten prąd wytwarza niepotrzebne straty energii w silniku i w tranzystorach mostka zasilającego silniki. Można stwierdzić, że radiatory, na których są zamocowane tranzy-

story, nawet podczas postoju wózka są ciepłe. Powoduje to dodatkowe straty energii zgmagazynowanej w akumulatorach, która w wózku inwalidzkim jest bardzo cenna.

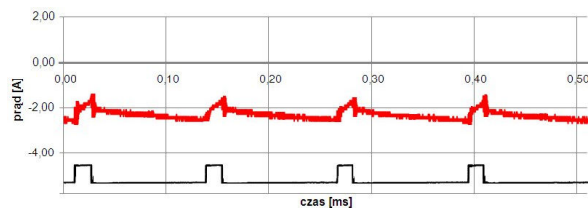
Prąd zmienny płynący przez silniki podczas ich postoju zależy od indukcyjności silnika i od częstotliwości fali PWM napięcia zasilającego silnik. W badanym wózku zastosowano częstotliwość zbliżoną do 8 kHz. W tym stanie prąd zmienny płynący przez jeden silnik miał wartość 0,8 A (RMS). Stanowi to 8% prądu znamionowego silnika. Sprawdzono również, że prąd stały pobierany z akumulatorów po załączeniu silnika (silnik stoi) wzrasta o ok. 0,3 A. Drugą wadą prezentowanego układu jest silne tętnienie prądu płynącego przez silnik. Tętnienie to może wygenerować stały, niewielki hałas. Zależy on od przyjętej częstotliwości fali PWM i przy częstotliwościach wyższych niż 8 kHz i dobrze wykonanym pakiecie silnika jest już praktycznie niezauważalny. Natomiast silne tętnienie prądu stwarza konieczność zastosowania dużych kondensatorów zasobniczych włączonych w obwód zasilający prądu stałego.



Rys. 7. Przetwornik tranzystorowy z trzema pracującymi tranzystorami



Rys. 8. Przebiegi czasowe prądu silnika pracującego jako napęd



Rys. 9. Przebiegi czasowe prądu silnika pracującego jako hamulec

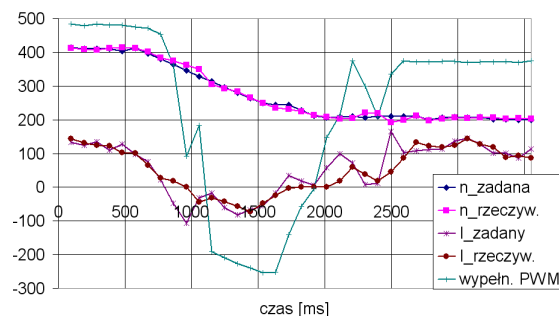
Drugi układ, w którym samoczynnie zmienia się kierunek przesyłanej energii pokazano na rys. 7. W tym układzie przy jeździe np. do przodu, podczas jednego okresu fali PWM tranzystory T_1 i T_2 pracują przemiennie, tranzystor T_4 jest na stałe wysterowany, a tranzystor T_3 jest na stałe zatkany.

Przy jeździe do tyłu na odwrót: tranzystory T_4 i T_3 pracują przemiennie, tranzystor T_2 jest na stałe wysterowany, a tranzystor T_1 jest na stałe zatkany. Podczas jednego okresu fali PWM kilkakrotnie odbywa się zmiana kierunku przesyłania energii: w czasie kiedy tranzystor T_1 przewodzi, rośnie prąd płynący przez tranzystory T_1 , T_4 i przez silnik (który pracuje jako napęd), a równocześnie rośnie energia zgmagazynowana w indukcyjnościach silnika. Kiedy tranzystor T_1 zostanie zatkany, indukcyjność uzwojenia silnika podtrzymuje prąd płynący przez silnik, który maleje zamykając się przez diody D_3 i D_2 . Energia pola magnetycznego częściowo jest przetwarzana na energię mechaniczną, a częściowo jest zwracana do źródła.

Jeżeli okres w którym tranzystor T_1 nie przewodzi jest wystarczająco długi, prąd silnika zostanie wygaszony, a wtedy sem rotacji E wzbudzi prąd płynący przez uzwojenia silnika w przeciwnym kierunku, przez tranzystor T_2 i diodę D_4 . Ten prąd będzie rósł tak długo, jak długo będzie przewodził tranzystor T_2 , a energia mas wirujących będzie przekształcana na energię pola magnetycznego (i częściowo tracona w elementach półprzewodnikowych). Prąd płynący przez uzwojenie silnika w drugą stronę, jest prądem hamującym. Taki stan będzie utrzymywać się aż do ponownego załączenia tranzystora T_1 i wyłączenia tranzystora T_2 . Wtedy prąd, wciąż podtrzymywany przez indukcyjność silnika, zacznie maleć, płynąc w obwodzie: silnik, diody D_2 , D_3 , źródło. W tym przedziale czasu, zarówno energia mechaniczna, jak i energia zgmagazynowana w polu magnetycznym, będą zwracane do źródła. Jeśli w tym przedziale czasu prąd zmaleje do zera, napięcie źródła wzbudzi ponownie prąd płynący przez tranzystory T_1 , T_4 i cały cykl zacznie się od nowa. Zaletą tego układu jest automatyczne przechodzenie do pracy hamulcowej, bez konieczności zmiany sterowania układu. Drugą zaletą jest brak prądu przemienego płynącego przez zatrzymany silnik. Trzecią zaletą, są mniejsze niż w pierwszym przypadku tętnienie prądu. Wadą układu jest nieco gorsza dynamika: zmiany prądu zachodzą wol-

niej, szczególnie przy mniejszych prędkościach. Przy bardzo małych prędkościach efekt hamowania zanika. Dodatkową wadą jest konieczność stosowania sygnału sterującego: „kierunek jazdy”. Zmiana sposobu sterowania tranzystorów przy zmianie kierunku jazdy może doprowadzić do nierównej pracy zespołu. W przedstawionych wyżej dwóch układach sterowania, zmiana kierunku przesyłania energii następowała samoczynnie i nie wymagała zmiany struktury układu. Dlatego te układy można porównać do dawnych układów „z prądami wyrównawczymi”. W obu układach przebiegi prędkości zadanej bardzo dobrze pokrywały się z przebiegami prędkości rzeczywistej, tak jak to pokazano na rys. 1b.

W dwóch układach przedstawionych poniżej, o kierunku przesyłania energii decydował sterownik, modyfikując odpowiednio strukturę układu zasilacza. Te kolejne dwa układy można porównać do dawnych układów „bez prądów wyrównawczych”. W pierwszym z tych układów wykorzystano hamowanie dynamiczne. Do zmiany struktury układ wykorzystywał oba przedstawione na rys. 2 sygnały logiczne: „kierunek jazdy” i „napęd / hamowanie”. Przyjęto, że sygnał logiczny: „kierunek jazdy” zmienia swoją wartość w chwili, kiedy wartość zadana prędkości przekracza zero. Natomiast moment przełączenia sygnału napęd / hamowanie” otrzymano porównując wartość zadaną prędkości z prędkością rzeczywistą i uwzględniając aktualny kierunek jazdy („do przodu” lub „do tyłu”). W tym układzie podczas napędzania sterowane były dwa tranzystory: górny tranzystor jednej gałęzi mostka i dolny tranzystor drugiej gałęzi mostka (na przykład przy jeździe do przodu przewodziły tranzystory T_1 i T_4 , a przy jeździe do tyłu tranzystory T_3 i T_2). Po przejściu do trybu hamowania dynamicznego, sterowane były oba dolne tranzystory mostka, czyli tranzystory T_2 i T_4 . Różnica między tym układem i układem drugim polega na tym, że w układzie drugim w każdym okresie PWM występował przedział, w którym pracowały dwa przeciwległe tranzystory i przedział, w którym pracowały dwa dolne tranzystory, natomiast w tym układzie przez wiele okresów PWM tranzystory pracują, albo w jednym, albo w drugim układzie.



Rys. 10. Parametry pracy napędu wózka inwalidzkiego podczas zwalniania dla napędu z przełączanym przekształtnikiem czterokwadrantowym

Na rysunku 10 pokazano przykład przebiegów zarejestrowanych podczas zwalniania z prędkości zbliżonej do maksymalnej do prędkości równej połowie tej prędkości. Wyraźnie widoczne są chwile przełączania struktury układu (chwile, w których prąd zmienia znak). Na szczęście w przebiegach prędkości te przeregulowania są prawie niewidoczne. W tak zbudowanym układzie uzyskano przebiegi prądów o niewielkiej pulsacji, zbliżone do tych, pokazanych na rysunkach 8 i 9. Niestety, układ stał się silnie nieliniowy i jest podatny na szarpnięcia i przeregulowania. W czwartym układzie sterowania, próbowano połączyć zalety przedstawionych wyżej układów. Podobnie jak w układzie trzecim, tak i w tym układzie podczas przyspieszania i jazdy w stanie ustalonym sterowane są jedynie dwa przeciwległe tranzystory (np. $T_1 - T_4$ na rys. 1a), ale kiedy pojawia się sygnał „hamowanie”, do pracy wprowadza się dwa pozostałe tranzystory (np. $T_2 - T_3$) pracujące jak w układzie pierwszym (hamowanie przeciwprądem). Oznacza to, że przy aktywnym sygnale „hamowanie”, w tym przedziale czasowym okresie PWM, kiedy wyłączone są tranzystory T_1 i T_4 ,ysterowuje się tranzystory T_2 i T_3 , ale okres, na który załączane są te tranzystory jest proporcjonalny do różnicy między prędkością rzeczywistą i zadaną. W ten sposób układ zwalnia lub nawet przechodzi płynnie do pracy hamulcowej. Po zejściu na nową prędkość zadaną, koryguje się współczynnik wypełnienia fali PWM tranzystorów napędzających ($T_1 - T_4$) i stopniowo odłącza tranzystory hamujące ($T_2 - T_3$). Podobnie jak w układzie trzecim, sygnał logiczny: „kierunek jazdy” przełącza tranzystory z „jazdy do przodu” na „jazde do tyłu”. Ten sygnał zmienia swoją wartość w chwili, kiedy wartość zadana prędkości przekracza zero.

Zaletą przedstawianego sposobu sterowania jest płynne przechodzenie układu od stanu „napęd” do stanu „hamowanie”. Również pulsacja prądu w czasie napędzania jest niewielka. Na postoju silnik nie pobiera prądu. Istotne jest również to, że przedstawiona metoda może być stosowana do sterowania wszystkich silników prądu stałego, zarówno klasycznych jak i bezszczotkowych. Wadą tej metody jest skomplikowany układ sterowania. Do wykonania układu potrzebny jest szybki sterownik procesorowy, wyposażony w co najmniej dwa układy zegarów – liczników i zewnętrzny układ logiczny sumujący wypracowane sygnały.

4. Wnioski

Wysokie wymagania stawiane dynamicznie współczesnych napędów wyposażonych w silniki prądu stałego zmuszają konstruktorów do stosowania napędów czterokwadrantowych, zdolnych do wytworzenia w stanach przejściowych momentu hamującego. Układy takie można zbudować na kilka sposobów. Wykorzystuje się hamowanie dynamiczne lub hamowanie przeciwwądem. Przejście układu ze stanu napędzania do hamowania może odbywać się samoczynnie lub po odpowiednich przełączeniach układu sterującego. Każdy układ posiada swoje wady i zalety i powinien być indywidualnie dobrany do konkretnego zastosowania.

5. Literatura

- [1]. Fręchowicz A.: *Wariantowe rozwiązania sterowania układem napędowym wózka inwalidzkiego wyposażonym w klasyczne silniki prądu stałego*. Przegląd Elektrotechniczny nr 4/2008 Warszawa 2008
- [2]. Fręchowicz A.: *Porównanie układów napędowych wózka inwalidzkiego*, referat na VIII międzynarodową konferencję: "MET'2007 - Nowoczesna Trakcja Elektryczna w Zintegrowanej Europie XXI Wieku", (*Comparison of drive systems for a wheelchair, Proceedings Eighth International Conference "Modern Electric Traction in Integrated XXI Century Europe MET'2007"*). Warszawa, 27.09.-29.09.2007
- [3]. Fręchowicz A.: *Impact of invalid wheelchair supply mode on its properties in transient states*. Referat na 18th International Conference on Electrical Machines ICEM 2008, 6 - 9 września 2008, Vilamoura – Algarve, Portugalia
- [4]. Kaźmierkowski M. P. , Tunia H.: *Automatic Control of Converter-Fed Drives*, ELSEVIER Amsterdam, London, New York, Tokyo, 1994.