

Tomasz BISKUP

Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Przemysłowej

MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA PRZEMIENNIKA MSI DO HAMOWANIA DYNAMICZNEGO SILNIKA INDUKCYJNEGO KLATKOWEGO

Streszczenie. W artykule przedstawiono algorytm sterowania przemiennika MSI, pozwalający na lotny start silnika indukcyjnego klatkowego oraz jego zatrzymanie za pomocą hamowania dynamicznego. Analiza symulacyjna pokazała praktyczny zakres momentu hamującego oraz właściwy sposób sterowania, pozwalający na proste przejście od modulacji wektorowej do hamowania prądem stałym. Symulacje zostały potwierdzone testami praktycznymi, przeprowadzonymi na stanowisku badawczym, których wyniki zamieszczono w artykule.

THE POSSIBILITY OF USING PWM INVERTER FOR DC BRAKING OF SQUIRREL CAGE INDUCTION MOTOR

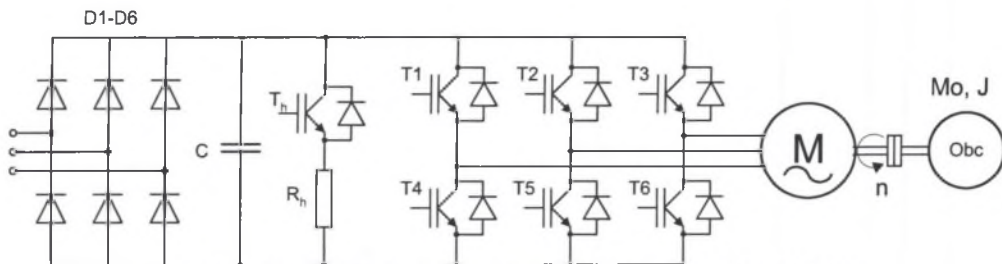
Summary. In the paper a control algorithm of PWM inverter is presented. It enabled to realise flying restart and DC braking procedures. The simulations showed range of braking torque and proper method of control of IGBTs that gives easy transition from vector modulation to DC braking. The simulations were confirmed by practical tests, obtained in laboratory setup. Some of the results are presented in the paper.

1. WPROWADZENIE

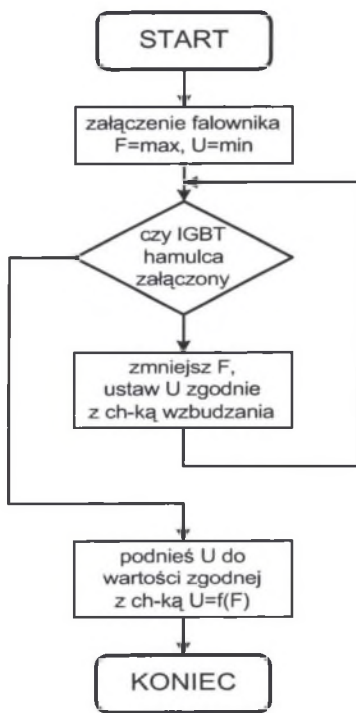
Przemienniki częstotliwości MSI są obecnie jednymi z najbardziej rozpowszechnionych przekształtników energoelektronicznych stosowanych w przemyśle. Rozwój w pełni sterowalnych zaworów energoelektronicznych pozwolił na produkcję takich urządzeń w zakresie mocy od ułamka kW do mocy MW. Szeroki jest też zakres praktycznych zastosowań, od napędów o niższych wymaganiach dynamicznych, takich jak pompy czy wentylatory, ale także do napędów wymagających szybkiego kształtowania momentu na wale silnika. Podstawowa struktura przemiennika MSI została przedstawiona na rys. 1.

Jednym z typowych zastosowań należących do pierwszej grupy są napędy wentylatorów. Wymagania dynamiczne nie są tu najczęściej bardzo wysokie, ale należy spełnić pewne dodatkowe warunki, niezbędne dla prawidłowej pracy urządzenia we wszystkich możliwych sytuacjach. Przede wszystkim jest to problem zwrotu energii do obwodu pośredniczącego przemiennika w czasie hamowania odzyskowego i jej równoczesne rozproszenie w tym obwodzie za pomocą dodatkowego tranzystora T_h i rezystora R_h . Kolejny problem to załączenie przemiennika w chwili, gdy silnik już wiruje, czyli tzw. lotny start. To drugie zjawisko wynika z bardzo dużego momentu bezwładności maszyny obciążającej i niewielkiego

momentu oporowego dla niższych prędkości obrotowych. Powoduje to, że czas wybiegu maszyny jest długi (nawet kilkanaście minut) i w przypadku wyłączenia awaryjnego (np. zanik napięcia), ponowne szybkie załączenie (SPZ) może nastąpić w takim niekorzystnym stanie.



Rys. 1. Schemat obwodów głównych przemiennika częstotliwości MSI
Fig. 1. Main circuit of PWM inverter



Rys.2. Schemat blokowy procedury lotnego startu

Fig.2. Flowchart of flying restart procedure

Procedura lotnego startu problem ten rozwiązuje na innej drodze niż bezpośredni pomiar prędkości obrotowej silnika, ale w pewnych warunkach może być nieskuteczna. Dotyczy to sytuacji, gdy silnik wiruje z niską prędkością obrotową, np. poniżej 20% znamionowej, co powoduje, że klasyczna procedura nie pozwala na jej prawidłowe wykrycie, a start z częstotliwością minimalną może powodować prawie natychmiastowe wyłączenie awaryjne od zabezpieczenia przeciążeniowego, spowodowane dużym ujemnym poślizgiem silnika. Wtedy spore znaczenie dla poprawienia jakości pracy urządzenia może mieć wprowadzenie procedury hamowania dynamicznego. Pozwala ona na szybkie obniżenie prędkości wirowania aż do zatrzymania i skuteczny ponowny start silnika.

2. LOTNY START

Tematyka lotnego startu była już przez autora podejmowana wcześniej [1, 2]. Było to wynikiem współpracy z firmą produkującą przemienniki częstotliwości MSI. Jednym z problemów, które należało rozwiązać, było poprawienie warunków pracy dla napędów wentylatorów. Doświadczenia zebrane w kolejnych latach, dotyczące napędów wentylatorów, pozwoliły na udoskonalenie procedury i ujawniły pewne szczególne sytuacje, w których opracowana wcześniej procedura jest nieskuteczna.

Procedura lotnego startu jest opcją, którą użytkownik może włączyć dla pracy przemiennika częstotliwości z napędem wentylatora [1]. Wtedy każdorazowe załączenie przemiennika odbywa się zgodnie z tą procedurą. Polega ona na zasileniu silnika z przemiennika częstotliwości w taki sposób, żeby częstotliwość wyjściowa zmieniała się w zakresie od maksymalnej do minimalnej, przy czym napięcie jest kształtowane na odpowiednio niskim poziomie. Ma to pozwolić na wzbudzenie silnika indukcyjnego

klatkowego do pracy generatorowej, co może nastąpić tylko dla częstotliwości zasilania nieco niższej niż odpowiadająca chwilowa wartość prędkości obrotowej. Wykrycie tego punktu jest równoznaczne z wyznaczeniem częstotliwości wirowania silnika. Schemat blokowy procedury został zamieszczony na rys. 2. Jej zastosowanie wymaga zabudowy modułu rozpraszającego energię zwracaną do obwodu pośredniczącego przemiennika (T_h , R_h). Impulsowanie tranzystora jest wskaźnikiem przejścia silnika do pracy generatorowej.

Niestety, okazuje się, że dla niskich prędkości wirowania możliwości wzbudzenia silnika do pracy generatorowej mogą być zbyt małe, częstotliwość wirowania nie jest wykrywana i przemiennik próbuje dokonać rozruchu od częstotliwości minimalnej. W konsekwencji powoduje to często wyłączenie awaryjne spowodowane przeciążeniem prądowym falownika (duży ujemny poślizg silnika) i cykl załączenia się powtarza. Przy dużym momencie bezwładności układu napędowego może nastąpić jeszcze kilka wyłączeń, aż do chwili gdy silnik wyhamuje i praca zostanie podjęta w sposób prawidłowy.

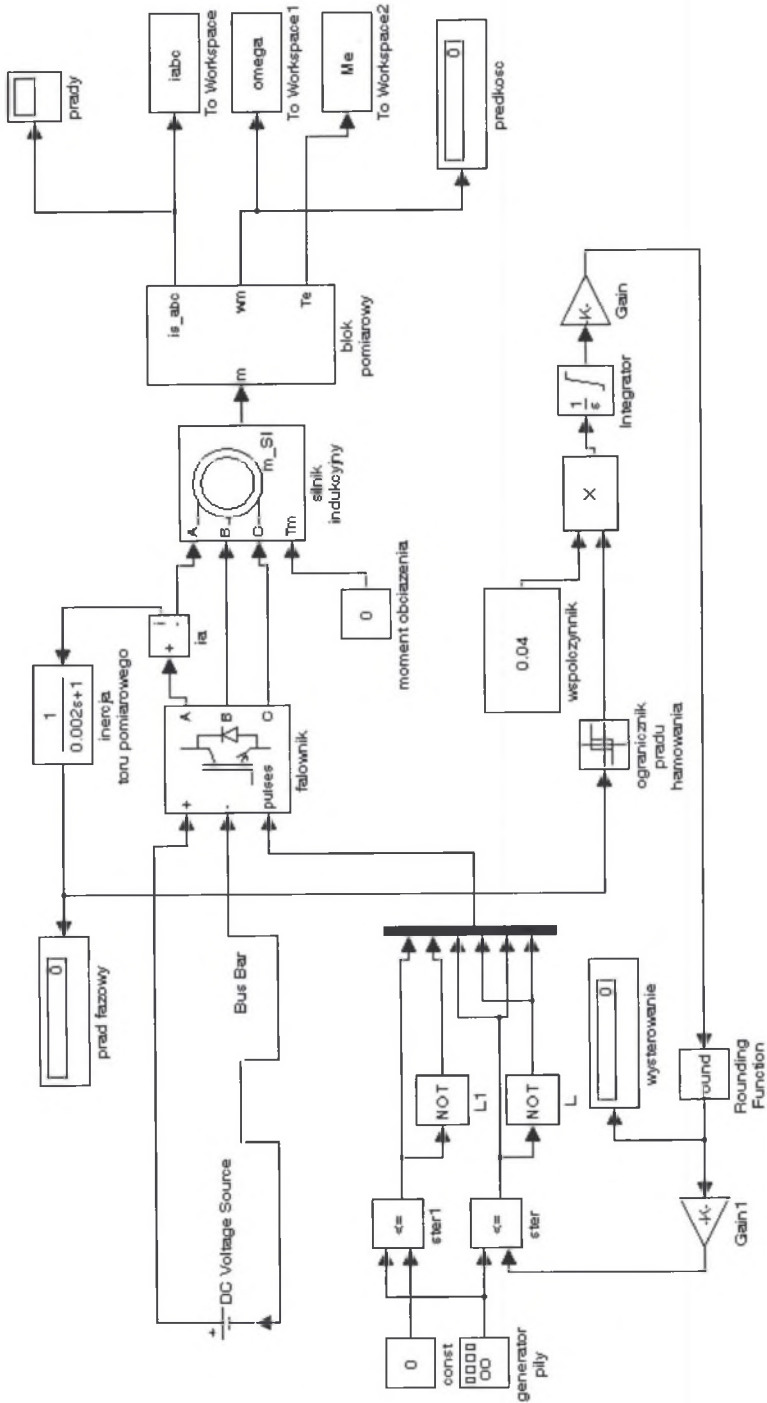
3. HAMOWANIE DYNAMICZNE

Metodą, która może rozwiązać przedstawiony wyżej problem, jest wyhamowanie silnika prądem stałym w sytuacji, gdy procedura lotnego startu okaże się nieskuteczna. Struktura obwodów głównych jest taka jak na rys. 1. Rezystor R_h jest niezbędny, bo układ w warunkach rzeczywistych może realizować procedurę lotnego startu i hamowania dynamicznego. Symulacje układu napędowego pokazały, że moment, jaki rozwija silnik w czasie hamowania dynamicznego, jest wystarczający do jego wyhamowania. Model układu, wykorzystany do symulacji w pakiecie oprogramowania Matlab-Simulink, przedstawiono na rysunku 3.

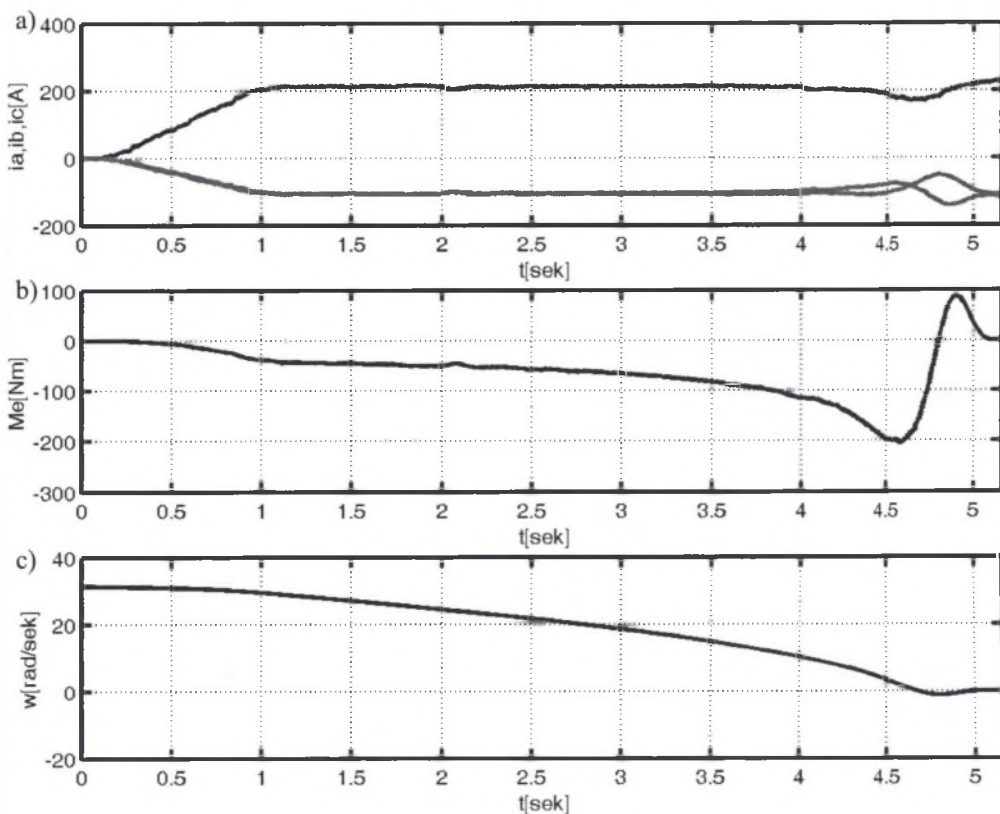
W celu minimalizacji czasu potrzebnego na przeprowadzenie kolejnych symulacji model został uproszczony. Pominięto przekształtnik sieciowy z filtrem wyjściowym i przedstawiono go w postaci źródła napięcia stałego. Pomiar prądu zredukowano tylko do informacji z jednej fazy, mimo że w rzeczywistym układzie sterowania mierzone są prądy w dwóch fazach i odpowiednio przekształcane. W celu oddania parametrów toru transmisji i przetwarzania tego sygnału, w modelu wprowadzono odpowiednią inercję pierwszego rzędu.

W symulacji przyjęto, że zawsze sterowane są wszystkie 3 półmostki tranzystorowe. Prąd fazy a wynosi I_h , w fazach b i c płynie prąd $\frac{1}{2}I_h$. Symulowano także sytuację, gdy prąd płynął tylko przez 2 fazy [3], ale wyniki momentu hamującego były podobne. Z drugiej strony takie sterowanie wymagałoby zmian układowych przemiennika MSI, bo w istniejącym nie ma możliwości wyłączenia sterowania tranzystorów wybranego półmostka. Wynika to z tego faktu, że sterowania są uzyskiwane w klasyczny sposób, w postaci 3 sygnałów sterujących dla 3 górnych tranzystorów półmostków falownika $T1$, $T2$, $T3$. Pozostałe 3 sygnały dla tranzystorów $T4$, $T5$, $T6$ są generowane przez negację podstawowych.

Ze względu na niewielkie rezystancje silnika, czas przyłożenia napięcia U_d między fazy silnika τ musi być krótki. Podstawowy sposób sterowania zaworów przedstawiony na rysunku 5a (wykorzystywany w symulacjach), można przekształcić na postać zbliżoną do klasycznej modulacji wektorowej. Uzyskujemy dzięki temu obniżoną dwukrotnie częstotliwość przełączania zaworów przy tej samej częstotliwości impulsowania napięcia wyjściowego. Dla symetrii napięcia wyjściowego należy w pierwszej połowie cyklu wyprzedzać załączenie tranzystora $T1$ względem punktu $\frac{1}{4}T_c$ o τ , a następnie w ten sam sposób wyprzedzać wyłączenie sterowania dla $T2$ i $T3$ względem $T1$ o τ - rys. 5b (oznaczenia tranzystorów na rys. 1). Metoda ta dobrze współgra ze stosowaną do normalnej pracy falownika MSI modulacją wektorową. W ten sposób procedura hamowania dynamicznego wymaga tylko niewielkiej modyfikacji programu.

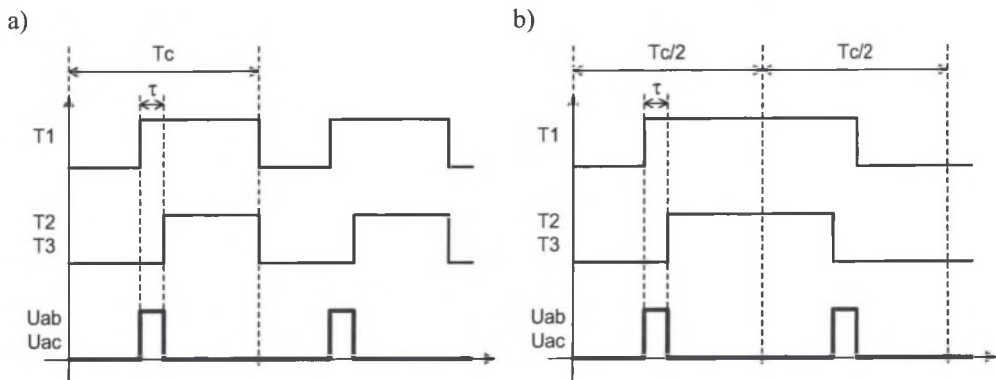


Rys. 3. Schemat modelu układu wykorzystywany w symulacji
 Fig. 3. Diagram of model used in simulation



Rys. 4. Symulacja procedury hamowania dynamicznego dla silnika o mocy znamionowej $P=90\text{kW}$, od góry: a) prądy fazowe silnika; b) moment elektromagnetyczny; c) prędkość silnika

Fig. 4. DC braking procedure simulation for motor with $P=90\text{ kW}$: a) motor currents, b) electromagnetic torque, c) motor speed



Rys. 5. Sterowanie tranzystorów w dwóch wersjach a) i b) oraz napięcie międzyfazowe

Fig. 5. Control signals for two version of control algorithm a) and b) and phase-phase voltage

Cały układ sterowania bazuje na mikrokontrolerze Intel 80C196KC, a sterowanie zaworami jest zrealizowane za pomocą układu szybkich wyjść tego mikrokontrolera [4]. Przyjęto stosunkowo niską częstotliwość impulsowania tranzystorów 2 kHz, głównie w celu powiększenia zakresu sterowania wypełnieniem. Przy rozdzielczości licznika układu HSO 0,8 μ s daje to rozdzielczość w sterowaniu na poziomie 0,16%. Ma to kolosalne znaczenie ze względu na małe rezystancje silnika zwłaszcza przy dużych mocach. Dla symulowanego układu, przy częstotliwości przełączania 2 kHz, wartość prądu DC na poziomie prądu znamionowego była osiągana przy czasie trwania impulsu napięciowego równym 8,8 μ s.

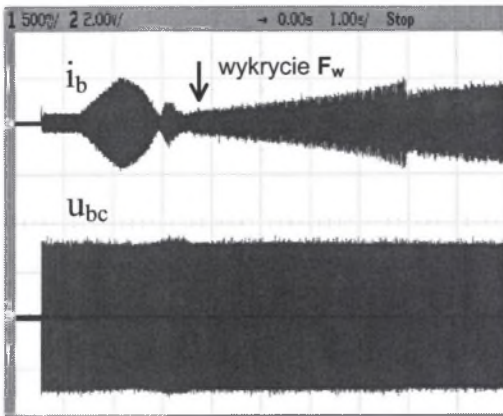
Procedura hamowania dynamicznego ma charakter opcjonalny. Jeśli częstotliwość wirowania nie zostanie wykryta w czasie lotnego startu do ustalonej częstotliwości wyjściowej, prąd silnika jest wygaszany, a następnie falownik rozpoczyna impulsowanie tranzystorów zgodnie z przebiegami pokazanymi na rysunku 5b. Czas τ jest zwiększany od 0 do wartości przy której prąd fazy a osiąga wartość zadaną odpowiednim parametrem nastawialnym. Nie istnieje potrzeba dokładnej regulacji prądu hamowania, w związku z tym układ sterowania nie zmienia w dalszym ciągu czasu τ . Pewne zmiany prądu hamowania nie mają znaczenia dla skuteczności metody. Także czas hamowania może być ustawiany w szerokim zakresie. Po jego zakończeniu następuje normalny rozruch silnika.

W celu przetestowania algorytmu sterowania przeprowadzono szereg symulacji cyfrowych, a przykładową zamieszczono na rysunku 4. W chwili $t=0$ silnik o mocy znamionowej $P=90$ kW (pozostałe dane silnika na końcu artykułu) wirował z prędkością równą 20% znamionowej. Zadano prąd hamowania nieco większy niż prąd znamionowy silnika. Moment bezwładności układu napędowego był 7 razy większy od momentu bezwładności silnika, a moment oporowy na minimalnym poziomie. Jak można zauważyć, wartość średnia momentu hamującego nie jest duża i średnio wynosiła w tym cyklu 15% momentu znamionowego silnika. W dużym stopniu moment ten zależy od rezystancji silnika, a w niniejszym przykładzie silnik należał do nowoczesnych, energooszczędnych jednostek o bardzo małych wartościach rezystancji. Niezależnie od tego zjawiska czas wyhamowania układu napędowego był satysfakcjonujący.

4. WYNIKI POMIARÓW

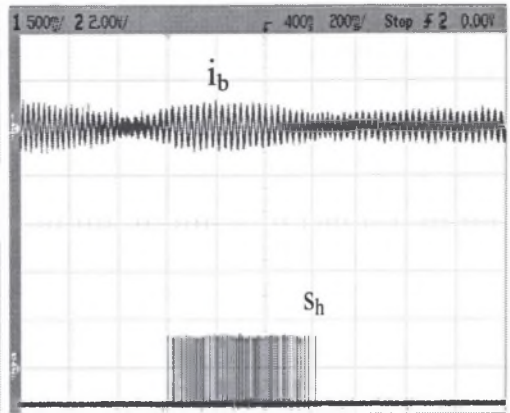
Próby urządzenia zostały wykonane na stanowisku badawczym z przemiennikiem częstotliwości MSI, realizującym opcjonalnie procedury startu lotnego i hamowania dynamicznego, oraz zespołem napędowym o dużym momencie bezwładności i niewielkim momencie oporowym. Schemat układu pomiarowego był zgodny z rysunkiem 1. Dało to warunki zbliżone do napędu z wentylatorem. Wykorzystywany silnik miał następujące dane znamionowe: $P_n=30$ kW, $I_n=56/32$ A, $U_n=380/660$ V, $\cos\phi_n=0,88$, $n_n=1470$ ob/min. Dzięki zmianie czasu od wyłączenia układu do jego ponownego załączenia, można było modyfikować warunki dla procedury lotnego startu.

Na rysunku 6 przedstawiono oscylogram prądu fazowego i napięcia międzyfazowego w czasie skutecznej procedury lotnego startu. Po niespełna 3 sekundach od ponownego załączenia falownika została odnaleziona częstotliwość wirowania silnika, co jest zauważalne w prądzie wyjściowym jako lokalne maksimum po lokalnym minimum. Także w amplitudzie napięcia międzyfazowego widać lekki wzrost w obwiedni, wywołany zwrotem energii z silnika do obwodu pośredniczącego i doładowaniem kondensatora. Na rysunku 7 można zauważyć, w powiększonej skali czasowej, przebieg prądu fazowego silnika i impulsów tranzystora T_h - s_h , pozwalającego na rozpraszanie energii zwracanej do obwodu DC. Po wykryciu częstotliwości wirowania układ przeszedł do normalnej pracy, zwiększając częstotliwość wyjściową od wykrętej do zadanej (50 Hz).



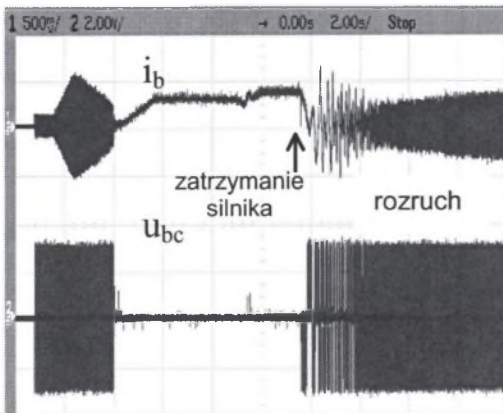
Rys. 6. Przebiegi prądu silnika (50 A/dz) i napięcia międzyfazowego (400 V/dz) dla udanej procedury startu lotnego

Fig. 6. Current (50 A/div) and voltage (400 V/div) waveforms for successful flying restart



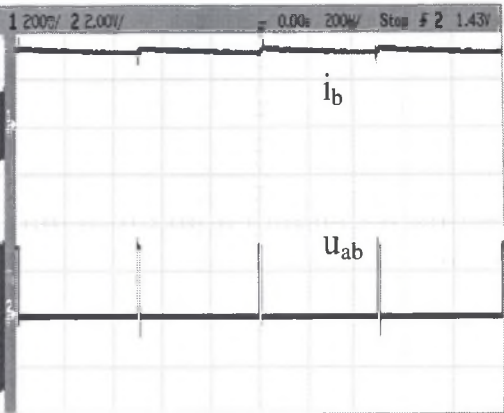
Rys. 7. Przebiegi prądu silnika i impulsów tranzystora hamulca z obwodu DC w chwili zwrotu energii do obwodu pośredniczącego

Fig. 7. Current waveform and control signal of braking transistor during reverse of power flow



Rys. 8. Przebiegi prądu silnika (50 A/dz) i napięcia międzyfazowego (400 V/dz) dla hamowania dynamicznego po nieudanej procedurze startu lotnego, $i_h=60$ A

Fig. 8. Current (50 A/div) and voltage (400 V/div) waveforms during DC braking after failed flying restart



Rys. 9. Powiększenie przebiegów prądu (20 A/dz) i napięcia (400 V/dz) w czasie hamowania dynamicznego, $i_h=60$ A

Fig. 9. Zoom in of current (20 A/div) and voltage (400 V/div) waveforms during DC braking

Na rysunku 8 przedstawiono natomiast sytuację, w której częstotliwość wirowania silnika była już zbyt niska dla wykrycia stanu hamowania odzyskowego i w związku z tym dla ustalonej granicznej częstotliwości poszukiwania (np. 10 Hz) rozpoczyna się procedura hamowania dynamicznego. W prądzie objawia się ona przepływem wartości stałej o niewielkich pulsacjach, na oscylogramie przedstawiono fazę w której płynie prąd $\frac{1}{2}I_h$. W tym czasie napięcie między pokazanymi na rys. 8 fazami b i c wynosiło 0. Czas trwania impulsów w napięciu międzyfazowym u_{ab} , gdzie są one różne od 0 oraz częstotliwość przełączania

są widoczne na rysunku 9, gdzie fragment przebiegów został uchwycony przy niższej wartości podstawy czasu. Uzyskano kilkakrotnie przyśpieszenie procesu wyhamowania w stosunku do hamowania wybiegiem i dzięki temu późniejszy pewny start silnika (rozruch silnika następuje po jego zatrzymaniu), co jest widoczne w ostatniej fazie przebiegu oscyloskopowego na rys. 8.

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Postawione zadanie zostało zrealizowane za pomocą wyłącznie zmian programowych. Procedura hamowania dynamicznego pozwala na wyhamowanie silnika w sytuacji, gdy częstotliwość wirowania była za niska dla jej wykrycia przez lotny start. Czas potrzebny na zatrzymanie silnika zależy od parametrów zastępczych silnika, zadanego prądu hamowania, momentu bezwładności układu napędowego. Maksymalne wartości momentu hamującego dla symulowanego silnika nie przekraczają 20% momentu jego znamionowego.

W przebiegach prądu w czasie hamowania dynamicznego są zauważalne niewielkie pulsacje, nie mające wpływu na zachowanie momentu hamującego. Jak wykazały symulacje, przebieg momentu jest gładki, rys. 4b.

Z analizy wynika, że niebezpieczeństwo przegrzania silnika nie istnieje, ponieważ procedura jest wykonywana przed załączeniem silnika, więc energia wydzielona w silniku w postaci ciepła w czasie hamowania dynamicznego zostanie rozproszona w cyklu dalszej pracy silnika przez układ wentylacji.

Przedstawiona procedura hamowania dynamicznego może także mieć dodatkowe zastosowanie dla innego rodzaju napędów niż wentylatory. W przypadku układów pompowych złożonych z wielu jednostek, zasilanych z przemienników(-a) częstotliwości MSI, zdarza się że przepływ wody napędza wyłączoną pompę w innym kierunku niż właściwy kierunek jej pracy. Stwarza to duże problemy z załączeniem układu, bo następują kolejne wyłączenia od zabezpieczenia kontrolującego przeciążenie. Wstępne wyhamowanie silnika za pomocą hamowania dynamicznego może poprawić warunki startowe.

Podobnie jest z napędem jazdy dźwigni, gdzie opcja hamowania dynamicznego może pozwolić na łagodne zatrzymanie. W przypadku gdy blokada mechaniczna (luzownik) zadziała dla minimalnej częstotliwości wyjściowej falownika, może to powodować gwałtowne zatrzymanie, w efekcie kołysanie ciężaru i inne niekorzystne zjawiska mechaniczne.

LITERATURA

1. Biskup T., Grzesik B.: *Praktyczne ekspertowe rozwiązanie sterowania mikroprocesorowego falownika napięcia MSI*. Materiały konferencji SENE'95. Łódź-Arturówek 15-17.11.1995 r. Łódź 1995, s.28-33.
2. Biskup T., Grzesik B.: *Industrial Examples of μP -Control of AC-Drive Based on Expert Knowledge*. Materiały konferencji EDPE'96. Stara Lesna Słowacja 1-3.10.1996, Kosice 1996, s.203-208.
3. *Napęd elektryczny*. Praca zbiorowa pod kierunkiem Z. Grunwalda. WNT, Warszawa 1987.
4. Intel: *16-bit Embedded Controller Handbook*, Intel Corporation 1991.

Silnik wykorzystywany do symulacji: CELMA 280M4

$P_n=90$ kW, $U_n=380$ V, $I_n=157$ A, $n_n=1485$ obr/min, $\eta_n=94,4\%$, $\cos\phi_n=0,92$, $J=1,63$ kgm²

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Włodzimierz Koczara

Wpłynęło do Redakcji: 30 kwietnia 2004 r.