

Piotr Chudzik, Andrzej Radecki  
Politechnika Łódzka, Łódź

## STABILIZACJA NAPIĘCIA POŚREDNICZĄCEGO FALOWNIKOWYCH UKŁADÓW NAPĘDOWYCH

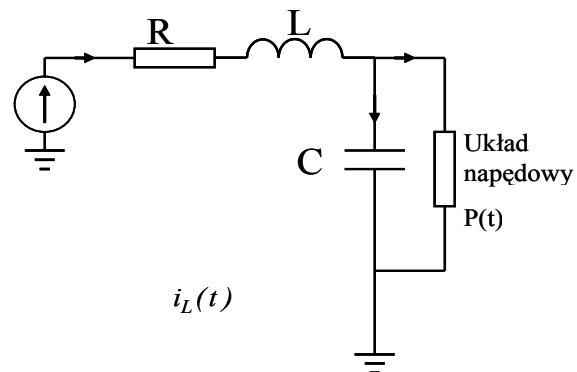
### VOLTAGE SUPPLY STABILIZATION FOR MOTOR DRIVE CONVERTER

**Abstract:** Modern methods of motor drives control are ought to be high precision and quality. This quality is achieved through a rapid and accurate realization of given electromagnetic torque which is insensitive to inverter voltage changes. As a result of using such control methods, a whole system can be considered as an element on constant power for constant angular velocity of the rotor, which leads to occurrence of negative admittance in presence of voltage changes. When an inverter input filter has a high inductance value, negative admittance leads to the excitation of input filter voltage oscillations, whose amplitude often exceeds 50% of nominal voltage. Such a perturbations of inverter voltage can lead to unstable work of electric drive or to damaging one of the inverter elements. The article outlined a method for stabilizing an inverter voltage, through an additional admittance which compensates an unstable component of system. Theoretical considerations and practical algorithm are included. As confirmation of the high efficiency of the proposed algorithm, article contains computer simulation, tests and results.

#### 1. Wstęp

Realizacja złożonych algorytmów sterowania prędkością, położeniem lub innymi wielkościami mechanicznymi związanymi z konkretnym procesem lub obiektem sterowania jest możliwa tylko wtedy, gdy układ napędowy ma zdolność odpowiedniego kształtowania chwilowej wartości momentu na wale maszyny. Współczesne, wektorowe metody sterowania silnikami prądu przemiennego spełniają ten warunek. Dzięki zapewnieniu pełnej kontroli nad stanem elektromagnetycznym maszyny umożliwiają całkowitą eliminację „stanów przejściowych”, charakteryzujących się przepływem znacznych prądów w uzwojeniach silnika i powodujących niekontrolowane zaburzenia momentu. Jednym z warunków poprawnego działania nowoczesnych metod sterowania jest zdolność bardzo precyzyjnej regulacji trójfazowego prądu lub napięcia na zaciskach silnika. W przypadku układów wyposażonych w falowniki napięciowe stosuje się zamknięte układy regulacji, które umożliwiają osiągnięcie zadanej wartości napięcia lub prądu nawet przy bardzo szerokim zakresie zmian napięcia zasilającego. Odpowiednia struktura układów regulacji pozwala zmniejszyć lub skompensować wpływ zmian napięcia na obwodzie pośredniczącym na wartości prądów lub napięć wyjściowych falownika. Rola obwodów zasilania falownika ogranicza się więc jedynie do zapewnienia pewnej minimalnej wartości pojemności obwodu pośredniczącego, która ogranicza chwi-

lowe spadki napięcia, związane z komutacją, do wielkości dopuszczalnych ze względu na poprawne działanie układu. Drugim, obok kondensatora elementem falownika napięcia jest dławik, który ogranicza wysokoczęstotliwościowe pulsacje prądu pobieranego przez układ z sieci. Taka bardzo prosta w budowie struktura (rys.1) zapewnia niską impedancję źródła zasilania z punktu widzenia odbiornika energii, przy jednoczesnym niewielkim oddziaływaniu wysokoczęstotliwościowym napędu na sieć zasilającą i jest powszechnie stosowana w falownikach napięcia zasilanych z sieci trójfazowej.



Rys. 1. Uproszczony schemat obwodu zasilania napędu w pojeździe trakcyjnym

W przypadku napędów trakcyjnych zasilanych za pomocą styków przesuwających się wzdłuż przewodu (pantografy w tramwajach i lokomotywach elektrycznych lub odbieraki w trolejbusach) stosuje się większe wartości induk-

cyjności szeregowej („dławik liniowy”). Połączony szeregowo z napędem dławik wymusza przepływ prądu przez złącze pantograf-sięć trakcyjna w chwilach słabego kontaktu tych elementów. Stosunkowo dużą indukcyjność szeregową spotyka się również w układach napędowych znacznie oddalonych od źródła energii (np. w napędach w górnictwie). Obecność znacznej indukcyjności na drodze przepływu prądu ze źródła zasilania do falownika powoduje zmniejszenie tłumienia w obwodzie RLC powstałym z rezystancji przewodów, indukcyjności i pojemności kondensatora obwodu pośredniczącego. Powstające oscylacje prądu i napięcia potrafią osiągać znaczne wartości. Stanowi to bardzo duże utrudnienie dla algorytmów odpowiedzialnych za pracę falownika.

## 2. Metody eliminacji oscylacji w obwodach zasilania ze słabo tłumionym filtrem wejściowym RLC

Opis dynamiki omawianego układu zasilania ma charakter nieliniowy i może być przedstawiony za pomocą układu równań różniczkowych (1).

$$\begin{cases} L \frac{di_L(t)}{dt} = E - i_L(t) \cdot R - u_C(t) \\ C \frac{du_C(t)}{dt} = i_L(t) - \frac{P(t)}{u_C(t)} \end{cases} \quad (1)$$

Obwód zasilania falownika ze słabo tłumionym filtrem wejściowym wykazuje skłonność do oscylacji podczas gwałtownych zmian wartości prądu pobieranego przez dołączony do niego układ napędowy. Skłonność do oscylacji pojawia się również podczas obciążenia falownika stałą mocą. Ten typ obciążenia jest charakterystyczny dla układów napędowych, w których strukturze występuje regulator momentu. Poprawna praca tego regulatora, przy wolno zmieniającej się prędkości sprawia, że moc przekazywana przez falownik do silnika ma stałą wartość  $P(t) = P_0 = const$ . Analiza równań opisujących dynamikę układu prowadzi do określenia granicznej wartości mocy pobieranej z filtru, która powoduje doprowadzenie układu do niestabilności. W przypadku pojazdów trakcyjnych moc pobierana przez napęd znacznie przekracza tę wartość graniczną i sprawia, że układ napędowy nie może realizować w sposób precyzyjny sterowania momentem bez wywołania oscylacji napięcia i prądu na skutek cy-

klicznego przepływu energii między kondensatorem i dławikiem.

### 2.1 Zmiana parametrów filtru RLC

Najprostszym sposobem uniknięcia oscylacji w obwodach wejściowych jest znaczne zwiększenie wartości granicznej mocy, która zapewnia stabilną pracę, poprzez zwiększenie pojemności kondensatora obwodu pośredniczącego [1]. Zabieg ten można zastosować tylko w urządzeniach, które pozwalają na zamontowanie dodatkowych pojemności o znacznych rozmiarach. Istotną przeszkodą są również wysokie koszty dodatkowej pojemności. Inną, prostą metodą uniknięcia oscylacji jest pogorszenie dobroci filtru wejściowego poprzez dołączenie równoległe do falownika rezystancji. Eliminacja oscylacji tą metodą pociąga jednak za sobą powstawanie dużych strat energii w chwilach załączania rezystora. Bardzo skutecznym sposobem eliminacji jest dołączenie do falownika dodatkowego układu energoelektronicznego, umożliwiającego kompensację energii przemieszczającej się między dławikiem i kondensatorem. To rozwiązanie jest niestety zbyt kosztowne i wymaga stosowania dodatkowych elementów biernych pozwalających na gromadzenie energii.

### 2.2 Eliminacja oscylacji za pomocą modyfikacji algorytmu sterowania napędem

Interesującym rozwiązaniem problemu oscylacji w obwodzie pośredniczącym jest zapewnienie stabilności układu filtr-falownik-silnik za pomocą odpowiedniego sterowania samym napędem. Moc chwilową pobieraną przez napęd z obwodu zasilania można odpowiednio kształtować przez dokonywanie zmian momentu na wale maszyny [2][3][4]. Dzięki tej metodzie można osiągnąć znaczne zmniejszenie oscylacji napięcia w obwodzie pośredniczącym, ale nie można ich całkowicie wyeliminować [5]. Oddziaływanie na moc pobieraną z falownika poprzez kształtowanie momentu ma charakter pośredni, a poprawę stabilności można osiągnąć tylko pod warunkiem, że kształtowanie momentu jest odpowiednio szybkie i dokładne. Nie jest o to łatwe nawet w przypadku napędów sterowanych algorytmami o charakterze wektorowym. W pracy [5] zaproponowano rozwiązanie układu sterowania uwzględniające właściwości dynamiczne napędu i ograniczenia wynikające z rzeczywistego charakteru stosowanych elementów. Niestety praktyczne stosowanie tej

metody jest dość trudne ze względu na jej złożoność.

### 3. Kompensacja składowej admitancji odpowiedzialnej za powstawanie oscylacji w obwodzie pośredniczącym

Przyczyną powstawania oscylacji w obwodzie pośredniczącym układu napędowego jest przemieszczanie się energii między pojemnością kondensatora w falowniku, a indukcyjnością dławika liniowego i przewodów zasilających. Wynika stąd, że wielkością, za pomocą której można bezpośrednio wpłynąć na oscylacje jest moc chwilowa pobierana przez falownik. Wyznaczenie wartości tej mocy jest możliwe na podstawie analizy napięć i prądów płynących w poszczególnych elementach obwodu zasilania i falowniku.

Obciążenie w postaci regulowanego układu napędowego wywołuje przepływ prądu o wartości

$$i_P(t) = \frac{P(t)}{u_C(t)}. \quad \text{Ponieważ na jego zaciskach}$$

występuje napięcie  $u_C(t)$ , to można je opisać za pomocą nieliniowej admitancji o wartości zależnej od napięcia  $u_C(t)$ .

$$Y(t) = \frac{P(t)}{u_C^2(t)} \quad (2)$$

Zastępczą admitancję układu falownik-silnik (2) można przedstawić w postaci sumy dwóch składników  $Y_0(t)$  i  $Y_U(t)$ .

$$Y(t) = Y_0(t) + Y_U(t) \quad (3)$$

Pierwszy z nich związany jest z pewnym, ustalonym punktem pracy i ma zawsze wolno-zmienną, dodatnią wartość. Składową  $Y_0(t)$ , skojarzoną z realizowanym momentem napędowym przy prędkości kątowej  $\omega(t)$ , czyli stałej mocy i stałej wartości napięcia  $U_0$ , można wyrazić jako:

$$Y_0(t) = \frac{P(t)}{U_0^2} \quad (4)$$

Drugi składnik równania (3) obejmuje wpływ zmian napięcia obwodu pośredniczącego  $u_C(t)$  na rozptyw prądów w układzie.

Zadaniem sterowania, które umożliwia eliminację oscylacji jest wprowadzenie takiej dodatkowej składowej admitancji  $Y_K(t)$ , która skompensuje składową  $Y_U(t)$ . W tej sytuacji wypadkowa admitancja  $Y_i(t)$  dana wzorem (5) zawiera tylko dodatni - stabilny składnik admitancji  $Y_0(t)$ :

$$Y_i(t) = Y_0(t) + Y_U(t) - Y_K(t) \quad (5)$$

Zależność (5) jest słuszna przy pominięciu strat elektrycznych i mechanicznych w układzie napędowym. Dokonując przekształcenia powyższego wyrażenia otrzymujemy:

$$Y_U(t) - Y_K(t) = Y_i(t) - Y_0(t) \quad (6)$$

Spełnienie warunku  $Y_U(t) = Y_K(t)$ , powoduje, że wypadkowa admitancja  $Y_i(t)$  widziana na zaciskach obwodu zasilania:

$$Y_i(t) = \frac{P_i(t)}{u_C^2(t)} \quad (7)$$

nie zawiera odpowiedzialnej za oscylacje składowej ujemnej oraz umożliwia ustabilizowanie napięcia na obwodzie pośredniczącym.

W celu kompensacji składowej  $Y_U(t)$  założono prawo sterowania mocą pobieraną przez falownik w postaci:

$$P_i(t) = k(t)P(t) \quad (8)$$

Funkcja  $k(t)$  powinna modyfikować moc chwilową pobieraną przez falownik w taki sposób, aby:

$$\frac{P_i(t)}{U^2(t)} = Y_0(t) + Y_U(t) - Y_K(t) = Y_0(t) \quad (9)$$

Podstawiając do powyższego równania zależności (4) i (9) otrzymujemy:

$$\frac{k(t)P(t)}{U^2(t)} = \frac{P(t)}{U_0^2} \quad (10)$$

skąd ostatecznie funkcję  $k(t)$ :

$$k(t) = \frac{U^2(t)}{U_0^2} \quad (11)$$

Proponowane prawo sterowania ma prostą postać i jest łatwe do praktycznej realizacji, pod warunkiem odpowiednio szybkiego oddziaływania na moc pobieraną przez falownik.

### 4. Badania symulacyjne

Wstępna weryfikacja proponowanego rozwiązania została zrealizowana w oparciu o badania symulacyjne wykonane przy pomocy programu Power Simulation (PSIM) z wykorzystaniem modelu opisującego układ napędowy z silnikiem indukcyjnym o parametrach zgodnych z rzeczywistym napędem trolejbusowym [6].

Algorytm sterowania silnikiem indukcyjnym został oparty na metodzie sterowania pośredniego z wykorzystaniem stymulatora stanu elektromagnetycznego [6], w którym jedną z re-

gulowanych składowych jest moduł prądu stojana. Zastąpienie, w prawie sterowania (8) mocy chwilowej  $P_i(t)$  wartością chwilową modułu prądu  $I_s(t)$  jest uzasadnione dzięki dużej wartości stałej czasowej strumienia wirnika i oscylującej wokół jednośc wartości współczynnika  $k(t)$ .

$$|I_s| = k(t)|I_s| \quad (12)$$

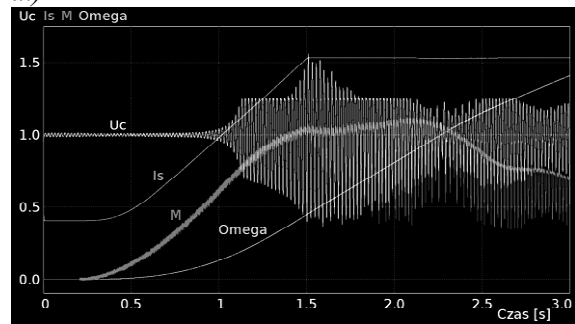
Wolnozmienny charakter strumienia wirnika powoduje, że szybkie oscylacje prądu rzeczywistego wokół wartości zadawanej przez stymulator praktycznie nie przenoszą się na wartość modułu strumienia. W tej sytuacji wartość momentu, jako iloczynu modułów prądu i strumienia, podlega zmianom wprost proporcjonalnym do zmian prądu, co z kolei przy założeniu powolnych zmian prędkości powoduje, że prawo sterowania (8) jest równoważne prawu sterowania (12). Zaletą takiego, bezpośredniego kształtowania pobieranej mocy przez wprowadzenie oscylacji na module prądu jest pominięcie przez układ kompensacji dynamicznego układu sterowania (stymulatora) oraz brak konieczności przekształcania sygnału  $k(t)$  przez odwrotny opis dynamiczny regulatora momentu, tak jak ma to miejsce w innych rozwiązaniach [4][5].

Do badań symulacyjnych zostały przyjęte następujące wartości parametrów filtra wejściowego:  $R=5\text{m}\Omega$ ,  $L=3\text{mH}$ ,  $C=3\text{mF}$ .

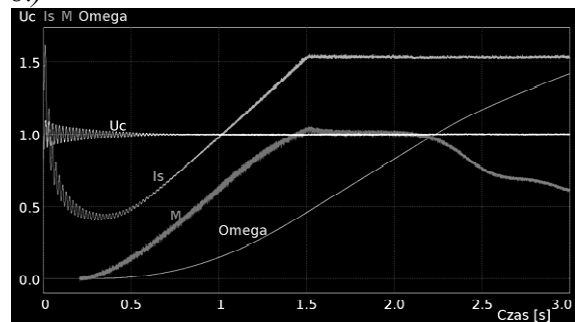
Na rysunku 2.a zostały przedstawione znormalizowane przebiegi napięcia obwodu pośredniczącego oraz wybranych zmiennych procesowych, zarejestrowane w modelu napędu bez zastosowanej metody kompensacji oscylacji. Amplituda powstających w obwodzie pośredniczącym oscylacji przekracza, w tym przypadku, 50% wartości nominalnej napięcia sieci trakcyjnej przyjętej na poziomie 600V.

Wprowadzenie mechanizmu kompensacji oscylacji wpływa na ich eliminację w stopniu zależnym od dokładności estymacji napięcia sieci trakcyjnej. Przy dokładnym odtworzeniu tego napięcia (rys. 2.c), została otrzymana najwyższa skuteczność redukcji oscylacji przy jednoczesnym zachowaniu zadanego momentu elektromagnetycznego.

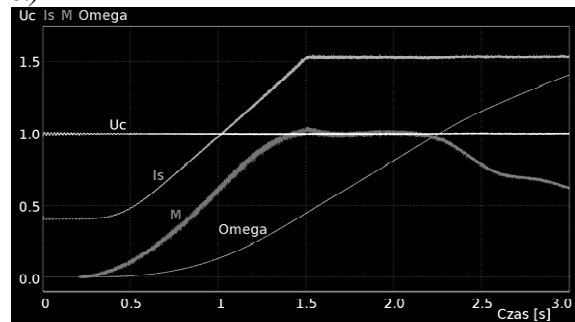
a.)



b.)



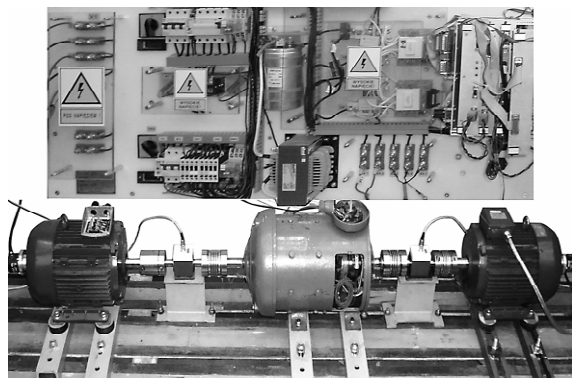
c.)



Rys. 2. Przebiegi przejściowe w układzie sterowania modelem silnika indukcyjnego ze słabo tłumionym filtrem obwodu wejściowego a) bez kompensacji oscylacji, b) z kompensacją oscylacji i estymacją napięcia sieci trakcyjnej, c) z kompensacją oscylacji i pomiarem napięcia sieci trakcyjnej

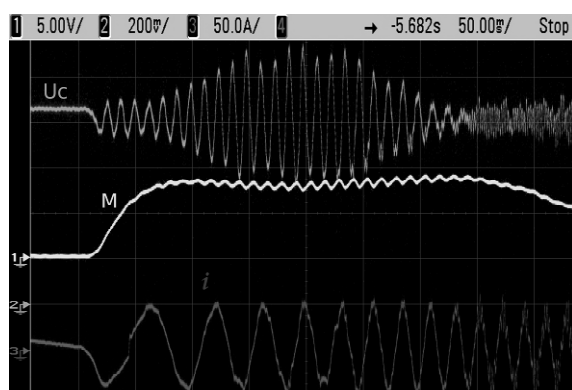
## 5. Badania napędu rzeczywistego

Algorytm modyfikacji modułu prądu stojana silnika indukcyjnego został zaimplementowany w sterowniku mikroprocesorowym z mikrokontrolerem sygnałowym TMS320F2812 i wykorzystany do sterowania falownikowego układu napędowego. Głównymi elementami testowego stanowiska napędowego (rys.3) były: falownik napięciowy pracujący z częstotliwością 2.5kHz, z filtrem wejściowym o parametrach:  $R=5\text{m}\Omega$ ,  $L=3\text{mH}$ ,  $C=3\text{mF}$ . oraz silnik indukcyjny o mocy nominalnej 5kW.



Rys. 3. Stanowisko laboratoryjne z falownikowym układem napędowym wykorzystane do badań skuteczności eliminacji oscylacji napięcia obwodu pośredniczącego

a)



b)



Rys. 4. Przebiegi przejściowe w układzie sterowania rzeczywistym falownikowym układem napędowym ze słabo tłumionym filtrem obwodu wejściowego a) bez kompensacji oscylacji, b) z kompensacją oscylacji i pomiarem napięcia sieci trakcyjnej

Rezultaty badań uzyskane na stanowisku laboratoryjnym przedstawiono na rys. 4. Zastosowanie algorytmu kompensacji składowej admittancej odpowiedzialnej za niestabilność

w układzie wejściowym falownika wyraźnie eliminuje oscylacje napięcia pośredniczącego.

## 6. Podsumowanie

Zaprezentowana metoda stabilizacji napięcia obwodu pośredniczącego w falownikowych układach napędowych charakteryzuje się wysoką skutecznością, nie wpływając na istotną zmianę podstawowych założeń sterowania napędem. Jej wysoka skuteczność została potwierdzona zarówno symulacjami komputerowymi, jak i badaniami na rzeczywistym falownikowym układzie napędowym z silnikiem indukcyjnym.

## 7. Literatura

- [1]. Kosiorowski S., Stobiecki A.: *Warunki stabilnej pracy trakcyjnych układów napędowych sterowanych impulsowo*. Mat. Konf. Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym Łódź 2009, s. 247-252.
- [2]. Sudhoff S.D., Corzine K.A., Glover S.F.: *DC Link Stabilized Field Oriented Control of Electric Propulsion Systems*. IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 13, No. 1, March 1998, s. 27-33.
- [3]. Zyl A, Spée R., Faveluke A., Bhowmik S.: *Voltage sag ride through for adjustable-speed drives with active rectifiers*. IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 34, no. 6, Nov./Dec. 1998, s. 1270-1277.
- [4]. Pietiläinen K., Harnefors L., Petersson A., Nee H.-P.: *DC-link stabilization and voltage sag ride-through of inverter drives*. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 53, no. 4, Aug. 2006, s. 1261-1268.
- [5]. Mosskull H.: *Stabilization of Induction Motor Drives With Poorly Damped Input Filters*. IEEE Trans. on Industrial Electronics, VOL. 54, n. 5, October 2007, s. 2724-2734.
- [6]. Dębowski A.: *Pośrednie sterowanie w napędzie elektrycznym przy wykorzystaniu stymulatora stanu*. Rozprawy Naukowe z.111, Zeszyty Naukowe Nr 552, Politechnika Łódzka, 1991.

## Autorzy

dr inż. Piotr Chudzik, Politechnika Łódzka, Instytut Automatyki ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, email: piotr.chudzik@p.lodz.pl,  
dr inż. Andrzej Radecki, Politechnika Łódzka, Instytut Automatyki ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, email: andrzej.radecki@p.lodz.pl.