

Daniel Lewandowski, Piotr Lipnicki  
Korporacyjne Centrum Badawcze ABB, Kraków

## AKTYWNE TŁUMIENIE I UNIKANIE WZBUDZENIA OBWODU WEJŚCIOWEGO NAPĘDÓW TRAKCYJNYCH

### ACTIVE DAMPING AND AVOIDING EXCITATION OF INPUT FILTER IN TRACTION DRIVES

**Streszczenie:** Przekształtniki trakcyjne, zawierają w swej konstrukcji obowiązkowy obwód wejściowy LC, którego przeznaczeniem jest filtrowanie prądu przekształtnika oraz wygładzanie napięcia na zasobniku jakim jest kondensator. Dodatkowo filtr wejściowy chroni sieć trakcyjną przed zakłóceniami w postaci wyższych harmonicznym wytwarzanych przez przełączenia kluczy tranzystorowych. Niewątpliwymi zaletami takiego obwodu jest prostota konstrukcji i łatwość wyznaczenia parametrów elementów pasywnych. Uciążliwą wadą jest niestety skłonność do oscylacji, które w skrajnych sytuacjach mogą doprowadzić do awaryjnego wyłączenia przekształtnika przez zabezpieczenia nadnapięciowe i nadprądowe. W artykule przedstawiono porównanie właściwości dwóch metod stabilizacji obwodu pośredniczącego przekształtnika trakcyjnego. Pierwsza z nich to klasyczna koncepcja układu tłumienia oscylacji obwodu pośredniczącego, współpracującego ze sterowanym wektorowo napędem. Drugą metodą jest zastosowanie elementu kształtującego wartość zadaną momentu napędowego wraz z układem aktywnego rozpraszania energii oscylacji w rezystorze hamowania. Proponowana metoda wykorzystuje zasadę zachowania ciągłości i ograniczoności pierwszej pochodnej sygnału sterującego do unikania wzbudzenia oscylacji. W ramach badań symulacyjnych rozważono zasadność takiego rozwiązania ze względu na podwyższony wskaźnik strat.

**Abstract:** Traction converters include in its construction mandatory LC input circuit whose purpose is to filter the inverter current and voltage smoothing on the DC bus capacitor. In addition, this LC filter protects the traction power network against interference coming from higher harmonics generated by the transistor switching. Undoubted advantages of such solution are simplicity of design and ease of determining the parameters of passive components. One of the obvious disadvantages is tendency to oscillate, which in extreme cases can lead to emergency shutdown of the inverter by overvoltage and overcurrent protection. This paper presents a comparison of two methods of stabilization for LC input circuit for traction converter. The first is the classic circuit oscillation damping method, working with vector controlled drive. The second method is to use a torque set point forming element together with an active energy dissipation system for circuit oscillations, using a braking resistor. The proposed method uses the principle of continuity and boundedness of the first derivative of control signal, to avoid the excitation of oscillations. The simulation study reviewed the validity of this approach taking into consideration the increased loss ratio.

**Słowa kluczowe:** stabilność napędów trakcyjnych, tłumienie oscylacji, filtr wartości zadanej

**Keywords:** stability of traction drives, oscillation damping, set-point filter

### 1. Wstęp

Nowoczesne układy napędowe stosowane w pojazdach trakcyjnych pozwalają na uzyskanie bardzo dobrych właściwości dynamicznych. W szczególności rozwiązania oparte o falownikowe napędy asynchroniczne spełniają wysokie wymagania stawiane przez transport publiczny. Zdolność do właściwego kształtowania chwilowej wartości momentu na wale maszyny jest nieodzowna w takich aplikacjach. W szczególności możliwość eliminacji niekontrolowanych zaburzeń momentu i strumienia magnetycznego silnika, spowodowane przez stany przejściowe, znacząco podnosi komfort eksploatacji pojazdu. Przy odpowiednim doborze struktury sterowa-

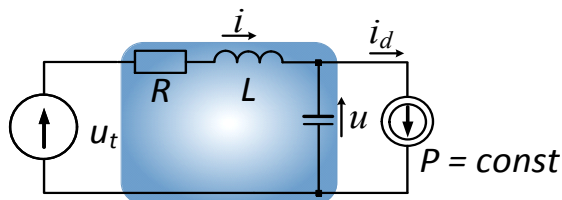
nia, osiągnięcie zadanej wartości momentu jest możliwe w bardzo szerokim zakresie zmian napięcia zasilającego. Układy te zasilane są zwykle z sieci trakcyjnej prądu stałego, dostarczanego przez podstacje diodowe. W celu poprawienia właściwości zasilania w przekształtnikach tych wykorzystuje się szeregowo dołączone dławiki o wysokiej indukcijności razem z pojemnością obwodu pośredniczącego, tworzące obwód wejściowy typu LC [8].

Występowanie znacznej indukcijności pomiędzy źródłem zasilania, a przekształtnikiem wpływa na obniżenie właściwości tłumiących obwodu RLC (obwód uwzględnia rezystancje

przewodów, indukcyjności i pojemności kondensatora obwodu pośredniczącego). To z kolei prowadzi do możliwości powstawania oscylacji prądu i napięcia, które potrafią osiągać istotne wartości, a w skrajnych przypadkach – spowodować awaryjne wyłączenie układu napędowego poprzez zadziałanie zabezpieczeń nadnapięciowych i nadprądowych [4]. Fakt istnienia takich oscylacji sprawia, iż z punktu widzenia algorytmów sterowania stabilność w obwodzie LC jest zagadnieniem krytycznym.

## 2. Stabilizacja obwodu LC

Obwód pośredniczący LC wraz z układem napędowym, traktowanym jako idealne źródło prądowe, można przedstawić tak, jak na rysunku 1 [6].



Rys. 1. Schemat zastępczy przekształtnikowego napędu trakcyjnego

Natomiast model matematyczny napędu trakcyjnego można opisać liniowym równaniem różniczkowym

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bi_d + Du_t \quad (1)$$

Gdzie  $x = \begin{bmatrix} i \\ u \end{bmatrix}$  jest wektorem zmiennych stanu,

na który składają się prąd  $i$  dławika i napięcie  $u$  na kondensatorze. Natomiast

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{C} \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix}$$

są macierzami modelu liniowego, a  $R$ ,  $L$ ,  $C$  – parametrami obwodu pośredniczącego.

Zaburzeniami dla tego obiektu regulacji jest prąd napędu  $i_d$  oraz napięcie traksji  $u_t$ . Pierwsze wynika bezpośrednio z pozycji zadajnika motorniczego. Natomiast drugie jest wypadkową wielu czynników, takich jak odległość pojazdu od stacji zasilającej, ilość innych pojazdów, oraz ich stan – pobór lub zwrot energii do sieci trakcyjnej. Najgorszym przypadkiem jest zmia-

na napięcia traksji, w przypadku gdy pojazd dokonuje tzw. przejazdu pod izolatorem, w trakcie którego następuje zmiana podstacji zasilającej. Napięcie dla obu odcinków sieci trakcyjnej mogą różnić się diametralnie, a dodatkowo przez krótki okres czasu, zależny oczywiście od prędkości przejazdu, układ napędowy nie jest zasilany. Napięcie traksji, a szczególnie jego zmiany, stanowią zatem zaburzenie zewnętrzne, które wprowadza do rozważanego systemu zakłócenia o charakterze impulsowym.

Cechą charakterystyczną napędów trakcyjnych jest stosunkowo stałe zapotrzebowanie na jego moc, co można wyrazić następująco

$$P = u \cdot i_d = const \quad (2)$$

Zależność ta wynika ze znacznej masy, a więc i bezwładności pojazdu trakcyjnego. Z równania (2) można wyprowadzić związek pomiędzy prądem napędu i funkcją napięcia na kondensatorze [7]

$$i_d = -\frac{P}{u^{*2}} u \quad (3)$$

gdzie  $u^*$  jest napięciem na kondensatorze w stanie ustalonym. Z równania (3) wynika, że przy zachowaniu stałej mocy spadek napięcia na kondensatorze pociąga za sobą wzrost pobieranego prądu. To z kolei wymusza dalszy spadek napięcia, co jest początkiem oscylacji w obwodzie pośredniczącym [1]. Przy niewielkich mocach, rzędu kilku procent mocy znamionowej, układ pozostaje stabilny, a oscylacje mają charakter gasnący [6, 7]. W pozostałych przypadkach duże zmiany mocy prowadzą do wzbudzenia obwodu LC. Problem ten jest szczególnie istotny w trakcie tzw. hamowania nagłego, w trakcie którego wymaga się od napędu maksymalnego momentu hamującego, a niestabilności w jego pracy mogą wpłynąć na bezpieczeństwo [3].

Jednym z rozwiązań powyższego problemu jest zastosowanie dodatkowych układów energoelektronicznych lub zastosowanie innej konfiguracji obwodu wejściowego [5]. Rozwiązania te przekładają się na wyższe koszty wytworzenie i eksploatacji napędu, stąd ich niska popularność. Innym rozwiązaniem jest wprowadzenie dodatkowego sprzężenia zwrotnego opracowanego w oparciu o model ujemnej admittancji [2]. Wielkością podlegającą korekcji jest moment napędowy przy założeniu, że jest on zmienną w pełni kontrolowaną przez układ ste-

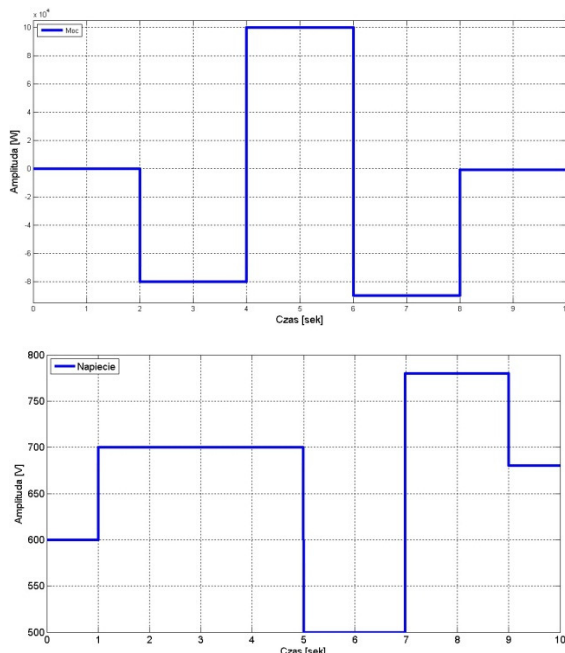
rowania, co jest prawdziwe dla napędów trakcyjnych sterowanych metodami wektorowymi. Jednakże zbytne usztywnienie kryterium stabilności obwodu pośredniczącego może niekorzystnie wpłynąć na działanie całego napędu. Pulsacje momentu będące wynikiem działania sprzężenia stabilizującego są propagowane w układzie silnik – przekładnia – koła – szyna i mogą objawiać się niekorzystnymi wibracjami w dowolnym jego elemencie, które mogą być odczuwalne przez pasażerów.

W ramach badań symulacyjnych rozważono analogiczne rozwiązanie. Zastosowano jednak pewne uproszczenie, przyjmując że ostateczną zmienną podlegającą korekcie jest prąd napędu. Przy takim uproszczeniu wyznaczono ujemne sprzężenie zwrotne dla modelu liniowego określonego w otoczeniu punktu pracy ( $u^*$ ,  $i^*$ ).

$$i_d = i_d^* - \Delta i_d = i_d^* - K \begin{bmatrix} \Delta i \\ \Delta u \end{bmatrix} \quad (4)$$

gdzie  $\Delta i = i^* - i$ ,  $\Delta u = u^* - u$ , są

odchyleniami zmiennych stanu od przyjętego punktu pracy. Współczynniki wektora  $K$  wyznaczono w oparciu o metodę przesuwania wartości własnych



Rys. 2. Przebieg wartości zadanej mocy napędu i napięcia trakcji

Działanie zaproponowanego układu stabilizacji obwodu pośredniczącego sprawdzono w przypadku pobudzenia napędu poprzez zmianę war-

tości zadanej mocy i napięcia trakcji, przedstawionych na rysunku 2. Ponieważ rozważano wyidealizowany układ, uzyskane wyniki są zgodne z oczekiwaniami – układ pozostaje stabilny w każdym przypadku. Oczywiście bezpośrednia aplikacja rozwiązania w rzeczywistym układzie jest problematyczna, np. żądanie od napędu realizacji korekty mocy na postoju po prostu nie jest możliwe. Również skokowa zmiana mocy napędu przekłada się bezpośrednio na gwałtowne korekty momentu, które są nieakceptowalne. Jednakże uproszczony model układu aktywnej stabilizacji obwodu pośredniczącego LC dostarcza interesujących wniosków. W przypadku pobudzenia układu skokową zmianą wartości zadanej mocy, sprzężenie wprowadza korektę zmieniając kształt prądu napędu. Uzyskane przebiegi zbliżone do krzywej typu S, potwierdziły przypuszczenie, że dla zachowania stabilności funkcja kształtująca wartość zadaną powinna zachowywać ciągłość pierwszej pochodnej.

### 3. Unikanie oscylacji obwodu LC

Uzyskane wyniki dla wyidealizowanego układu napędowego z stabilizującym sprzężeniem zwrotnym wskazują na to, że interesującym rozwiązaniem może być zastosowanie elementu kształtującego wartość zadaną mocy napędu. W automatyce jest on znany jako filtr wartości zadanej i stosowany w wielu układach regulacji, właśnie w celu złagodzenia wpływu jej zmian na obiekt regulacji. Oczywiście wprowadzenie zbyt mocnego osłabienia dynamiki wartości zadanej jest często nieakceptowalne ze względu na całościową wydajność pracy całego układu. W przypadku napędów trakcyjnych dodatkowym utrudnieniem jest, wspomniane już wcześniej, zapewnienie odpowiedniej dynamiki i stabilności w przypadku hamowania [2, 3]. Konieczność spełnienia odpowiedniej wartości opóźnienia jest nakładana przez wymagania homologacyjne, które musi spełniać pojazd przed dopuszczeniem do normalnej eksploatacji. Pożądane jest to również z punktu widzenia bezpieczeństwa, gdzie zatrzymanie pojazdu w ściśle określonym czasie jest koniecznością. Zbyt słaba dynamika hamowania może w skrajnym przypadku doprowadzić do wypadku.

Wadą filtra wartości zadanej jest brak wpływu na stabilność napędu w przypadku zróżnicowanych zaburzeń pochodzących np. od sieci trakcyjnej. Z tego powodu proponowane rozwiąza-

nie unikania oscylacji obwodu LC rozszerzono o układ gaszący współpracujący z rezystorem hamowania. Takie rozwiązanie nie jest często stosowane ze względu na prawdopodobne obniżenie wskaźników sprawności napędu. Interesującym zagadnieniem jest zatem określenie jakiej wielkości straty mogą być wprowadzane przez układ gaszenia oscylacji, którego głównym ograniczeniem jest możliwość pracy wyłącznie jako element pozwalający wytracać energię.



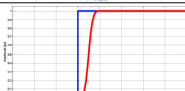
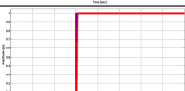
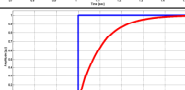
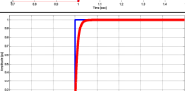
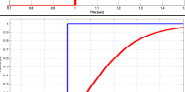
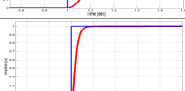

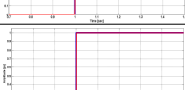
Dla takiego systemu unikania oscylacji zbadano właściwości wybranych elementów dynamicznych, które można zastosować jako filtr wartości zadanej:

- człon inercyjny I rzędu,
- człon inercyjny II rzędu,
- filtr Gaussa,
- filtr Czebyszewa,
- element ograniczający prędkość zmian wartości zadanej.

Dla każdego przypadku zbadano dwa warianty związane z oczekiwanym opóźnieniem w realizacji wartości zadanej, wprowadzonym przez człon dynamiczny – stała czasowa opóźnienia 10 – 30 ms oraz stała czasowa opóźnienia 100 – 300 ms.

Do oceny systemu wybrano dwa wskaźniki. Pierwszy związany jest z akceptowalnością oscylacji powstających w obwodzie LC, powstających w odpowiedzi układu na skokowe zmiany wartości zadanej mocy i napięcia trakcji (rysunek 2). Oscylacje takie muszą być silnie tłumione, tzn. ich czas zanikania musi być znacznie mniejszy niż stała czasowa obwodu pośredniczącego. Również amplituda oscylacji nie może przekraczać przyjętych ograniczeń, np. dla pojazdu trakcyjnego napięcie w obwodzie pośredniczącym nie może być mniejsze niż 400V lub większe niż 820V. Napięcie poza tymi wartościami jest wskazaniem do awaryjnego wyłączenia napędu. We wzbudzonym obwodzie LC takie wartości mogą być błyskawicznie osiągnięte, a do rozpraszania ich energii nadaje się rezystor hamowania. Stąd jego zastosowanie w układzie unikania oscylacji jest naturalne. Z kolei drugim wskaźnikiem oceny systemu jest wielkość energii wytracanej w rezystorze w wyniku działań podjętych w celu tłumienia oscylacji odniesiona do całkowitej energii bezwzględnej napędu (pobranej i oddanej) dla rozważanego przypadku.

Tabela 1. Porównanie metod kształtowanie wartości zadanej (NA – metoda nieakceptowalna, A – metoda akceptowalna)

Metoda	Oscylacje	Stosunek mocy wytracanej do mocy napędu	Odpowiedź na skok jednostkowy
Filtr FIR Gaussa Stała 100 ms	A	0.44 %	
Filtr FIR Gaussa Stała 10 ms	NA	1.11 %	
Filtr FIR Czebyszewa Stała 100 ms	A	0.44 %	
Filtr FIR Czebyszewa Stała 10 ms	NA	11.44 %	
Człon inercyjny I rzędu - stała 100ms	A	0.45 %	
Człon inercyjny I rzędu - stała 10ms	NA	0.53 %	
Człon inercyjny II rzędu - stała 100ms	A	0.39 %	
Człon inercyjny II rzędu - stała 10ms	A	0.43 %	
Rampa 10 [kA/sec]	NA	3.55 %	
Rampa 1 [kA/sec]	A	0.81 %	

Z przedstawionej tabeli wynika, że najbardziej interesujący jest filtr Gaussa i Czebyszewa o dłuższej stałej czasowej, dla których oscylacje są na akceptowalnym poziomie, a strata energii w rezystorze jest stosunkowo niewielka. Również dla tego przypadku opóźnienie wprowadzane w realizacji wartości zadanej nie obniżają dynamiki, natomiast zdecydowanie łagodzą przejścia między kolejnymi zmianami mocy rozwijanej przez napęd. Takie zachowanie podnosi kulturę napędu stosowanego w transporcie publicznym. Pozostałe przypadki nie posiadają równie korzystnej oceny. W szczególności chętnie stosowana w praktyce przemysłowej rampa osiągnęła bardzo słabe wyniki, co jest

skutkiem nieciągłości pierwszej pochodnej i wynikającej stąd łatwości do wzbudzenia obwodu LC. Konieczność aktywnego gaszenia oscylacji wpływa również na zwiększenie współczynnika strat. Inny chętnie stosowany filtr wartości zadanej – element inercyjny pierwszego i drugiego rzędu także nie uzyskał korzystnych ocen. Chociaż uzyskane wyniki są lepsze niż elementu ograniczającego prędkość zmian wartości zadanej, to niekorzystną właściwością inercji jest długi czas osiągnięcia wartości zadanej. Zaletą tych dwóch elementów jest jednak łatwość ich implementacji i niskie wymagania obliczeniowe.

#### 4. Wnioski

W artykule przedstawiono dwa rozwiązania zagadnienia stabilizacji obwodu pośredniczącego w pojazdach trakcyjnych. Pierwsze to układ aktywnej stabilizacji w oparciu o ujemne sprzężenie zwrotne, wprowadzające korektę prądu pobieranego przez napęd. Rozwiązanie to choć skuteczne, nie jest pozbawione pewnych wad. W szczególności podejście to może kolidować z podstawowym zadaniem napędu trakcyjnego, jakim jest rozwijanie stałego i stabilnego momentu. Drugim rozwiązaniem jest zastosowanie filtra wartości zadanej, kontrolującego charakter zmian zmiennej sterującej. Ponieważ stosowanie samego tylko kształtowania zmiennej sterującej nie jest wystarczające do zapewnienia pełnej stabilności napędu, układ uzupełniono o sprzężenie zwrotne odpowiedzialne za gaszenie oscylacji z wykorzystaniem rezystora hamowania. Przeprowadzone badania symulacyjne wskazują, że akceptowalne wyniki uzyskuje się stosując formowanie sygnału wartości zadanej mocy za pomocą funkcji gaussa lub czybyszewa. Takie połączenie zapewnia skuteczność porównywalną z aktywnym sprzężeniem stabilizującym, ale jest pozbawione jego wad. W szczególności jego działanie jest niezależne od stanu pracy samego napędu i może stabilizować obwód LC również na postoju.

Wadą proponowanego rozwiązania jest obniżenie wskaźników sprawności napędu, spowodowane wytracaniem energii oscylacji w obwodzie pośredniczącym w rezystorze hamowania. Jednakże dla rozważanego przypadku przebiegu zaburzeń i wartości zadanej mocy napędu, udział strat w odniesieniu do mocy całego napędu jest mniejszy niż 0,5%. Wartość to wskazuje, że proponowane rozwiązanie unikania oscylacji w obwodzie LC jest skutecznym roz-

wiązaniem, które tylko w znikomym stopniu obniża sprawność całego napędu.

#### 5. Literatura

- [1]. Chudzik P., Radecki A.: *Stabilizacja napięcia pośredniczącego falownikowych układów napędowych*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 86/2010.
- [2]. Chudzik P., Radecki A.: *Eliminacja oscylacji w układzie zasilania pojazdu trakcyjnego*. Przegląd Elektrotechniczny Nr 2/2010.
- [3]. Dębowski A., Chudzik P.: *Control of rotor flux in AC tram drive during sudden braking operation*. EPE-PEMC'2008.
- [4]. Dudek R., Kosiorowski S., Stobiecki A.: *Oscylacje w filtrach wejściowych przekształtnikowych napędów trakcyjnych*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 86/2010.
- [5]. Dudek R., Kosiorowski S., Stobiecki A.: *Zmodyfikowany filtr wejściowy przekształtnikowych napędów trakcyjnych*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 90/2011.
- [6]. Mosskull H.: *Stabilization of an Induction Machine Drive*. PhD Thesis, 2003.
- [7]. Mosskull H.: *Stabilization of Induction Motor drives with Poorly Damped Input Filters*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 54, no. 5, 2007.
- [8]. Skibicki J.: *Wpływ parametrów filtra wejściowego LC pojazdu na stabilność trakcyjnego układu zasilania*. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej Nr 21, 2005.

#### Autorzy

dr inż. Daniel Lewandowski  
 daniel.lewandowski@pl.abb.com  
 mgr inż. Piotr Lipnicki  
 piotr.lipnicki@pl.abb.com  
 Korporacyjne Centrum Badawcze ABB  
 ul. Starowiślna 13A, 31-038 Kraków