

Krzysztof KARWOWSKI, Jacek SKIBICKI
POLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I AUTOMATYKI

Stabilność systemu zasilania sieciowych pojazdów trakcyjnych z napędem energoelektronicznym

Dr hab. inż. Krzysztof KARWOWSKI

Ur. 17.11.1951 r. w Toruniu. Studia wyższe ukończył na Wydziale Elektrycznym Politechniki Gdańskiej w 1975 r. oraz w 1981 r. na Wydziale Matematyki, Fizyki i Chemii Uniwersytetu im. M. Kopernika. W roku 1984 obronił pracę doktorską, a w 1996 r. uzyskał stopień doktora habilitowanego w dziedzinie elektrotechniki. Pracuje w Zakładzie Trakcji Elektrycznej na stanowisku prof. nadzw. PG. Zajmuje się mikrokomputerowym sterowaniem układów napędowych pojazdów i diagnostyką urządzeń trakcyjnych.

e-mail: K.Karwowski@ely.pg.gda.pl



Dr inż. Jacek SKIBICKI

Ukończył studia na Politechnice Gdańskiej w roku 2000. Na tej samej uczelni uzyskał stopień naukowy doktora w roku 2004. Od tego czasu pracuje na stanowisku adiunkta w Zakładzie Trakcji Elektrycznej, Wydziału Elektrotechniki i Automatyki. Zajmuje się problemami związanymi ze stabilnością trakcyjnych systemów zasilania; do obszaru jego zainteresowań wchodzi również dziedzina pojazdów elektrycznych i automatyki w transporcie.

e-mail: j.skibic@ely.pg.gda.pl



Streszczenie

W artykule przedstawiono wpływ zmiany parametrów elektrycznych trakcyjnego układu zasilania na jego stabilność. Znaczne zmiany parametrów wynikają m.in. z wprowadzenia do eksploatacji sieciowych pojazdów z napędem przekształtnikowym wyposażonych w filtr wejściowy LC. Mała tłumienność obwodu, duże i szybkie zmiany obciążenia oraz aktywne metody sterowania napędu pojazdu zwiększają możliwość wystąpienia oscylacji napięć i prądów. Jest to szczególnie istotne podczas pracy pojazdu w obszarze regulacji ze stałą mocą. Wykorzystując metody symulacji komputerowej określono wartości parametrów układu zasilania, których przekroczenie zwiększa podatność na wystąpienie oscylacji.

Słowa kluczowe: Trakcja elektryczna, Pojazdy energoelektroniczne, Stabilność napędu.

Stability of traction supply system and inverter drive vehicles

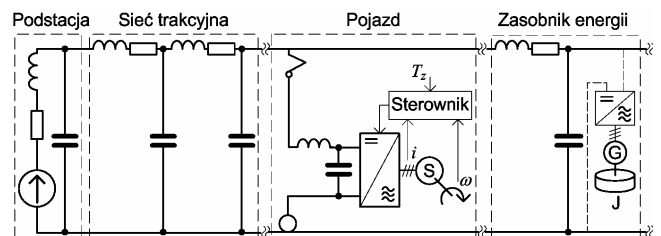
Abstract

Technical progress in power electronics and computer technology has resulted in the growing number of traction vehicles with converter drive being used. Rail contact system vehicles are usually equipped in LC input filters for current ripple rejection, pulse converters PWM for DC to three phase conversion, induction motors and computer controllers for drive control. One of the risks in this kind of vehicle operating is that voltage and current oscillation might appear in power supply system. This is caused by vector control of the converter with high limit frequency of torque controller. This paper presents the results of the computer analysis of the system – traction substation, contact line system and vehicles - focused on the possibility of appearance of the above-mentioned oscillation. The computer analysis made it possible to reduce the costs of the research and carry out an extensive study of the phenomenon.

Keywords: Electric traction, Power electronics and rail-vehicles, Drive stability.

1. Wstęp

Nowo wprowadzane sieciowe pojazdy trakcyjne z napędem energoelektronicznym, wyposażone w filtry wejściowe LC, zmieniają w sposób diametralny parametry elektryczne układu zasilania trakcji elektrycznej. W podstacjach trakcyjnych instaluje się nowe filtry Γ o znacznie większych pojemnościach, niż miało to miejsce dotychczas. Parametry te, uwarunkowane rodzajem podstacji i sieci trakcyjnej, są zależne także od liczby, typów i umiejscowienia pojazdów. Na rys. 1 pokazano przykładowy układ zasilania pojazdów [1]. Duża dobroć Q pasywnych obwodów LC o znacznych wartościach indukcyjności i pojemności, aktywne sterowanie napędu pojazdów oraz zmiany wartości napięcia spowodowane komutacją łączników lub szybką zmianą obciążenia wywołują oscylacje prądów i napięć. Odzysk bądź akumulacja energii hamujących pojazdów zwiększa interakcje z innymi pojazdami znajdującymi się na wspólnym odcinku zasilania.



Rys. 1. Przykładowy schemat zasilania trakcji elektrycznej, gdzie: S – silnik napędowy, G, J – opcjonalny zasobnik energii

Fig. 1. Scheme of traction supply system, where: S – vehicle motor, G, J – optional set of energy storage system

Nowoczesne pojazdy są sterowane w sposób automatyczny. Sterowanie napędem jest na ogół realizowane w oparciu o metodę DTC (ang. Direct Torque Control) lub FOC (ang. Field Oriented Control), a złożone algorytmy sterowania cyfrowego realizuje się wykorzystując procesory DSP. Szybkie układy regulacji, stosowane w tych pojazdach, są w stanie nadążyć za zmianami o czasie trwania rzędu milisekund. Reakcja układu sterowania na krótkotrwałą zmianę parametrów zasilania może w pewnych okolicznościach zmiany te pogłębić i spowodować, że w obwodzie głównym pojazdu pojawią się drgania oscylacyjne. Jako przykład może posłużyć odpowiedź układu na obniżenie wartości napięcia zasilającego. Układ sterowania, usiłując utrzymać wartość mocy pobieranej na stałym poziomie, wymusi większy pobór prądu, powodując dalszy spadek napięcia. Tego rodzaju reakcja na zaburzenie jest w stanie pobudzić układ do drgań [2, 3].

Na podstawie rys. 1 można wyróżnić następujące typy oscylacji [1]:

- występujące w układzie elektrycznym, tj. pomiędzy elementami filtra lub między filtrami pojazdów oraz pomiędzy filtrem pojazdu a siecią i podstacją trakcyjną lub zasobnikiem energii;
- wzajemnego oddziaływania układu mechanicznego i elektrycznego. Wyróżnić tu możemy oscylacje pomiędzy silnikiem, jako inercyjnym elementem mechanicznym a elektrycznym filtrem wejściowym. W przypadku występowania rezonansu mechanicznego w układzie przenoszenia momentu, drgania mogą być przekazywane do sterownika napędu i układu elektrycznego poprzez przetwornik pomiarowy prędkości;
- wywołane niestabilnością układu sterowania napędem, np. przez niewłaściwie dobrane parametry regulatorów.

Coraz więcej zarządów kolejowych zauważa narastające problemy w eksploatacji nowoczesnego taboru [2, 4]. Niestabilność systemu zasilania może wywołać: zadziałanie zabezpieczeń w układzie napędowym pojazdu i jego wyłączenie, zakłócenia w systemie sterowania i zabezpieczenia ruchu kolejowego czy wręcz awarię pojazdu wskutek efektu zmęczenia materiałów w układzie przenoszenia napędu.

2. Analiza stabilności dla idealnego zasilania i sztywnej regulacji mocy pojazdu

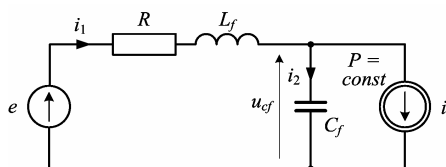
Dla pojazdu jak na rys. 1, uwzględniając, że aktualny moment silnika T jest równy momentowi zadanemu T_z , tj. dla:

$$T \cong T_z, \quad (1)$$

oraz pomijając straty w układzie napędowym otrzymamy, że moc mechaniczna pojazdu P jest równa mocy elektrycznej zasilania:

$$P = \omega \cdot T = u_{cf} \cdot i. \quad (2)$$

Na rys. 2 przedstawiono uproszczony schemat zastępczy obwodu głównego pojazdu wyposażonego w filtr wejściowy i zasilanego z idealnego źródła napięciowego dla warunku pracy opisanych przez równania (1) i (2) [5, 6]. Analogiczny przypadek zachodzi dla pracy układu napędowego na charakterystyce trakcyjnej, powyżej prędkości bazowej, w obszarze sterowania $P = \text{const}$ i sztywnej regulacji mocy pojazdu [7].



Rys. 2. Uproszczony schemat zastępczy obwodu głównego pojazdu trakcyjnego
Fig. 2. Simplified equivalent circuit of traction vehicle

Dla układu dynamicznego z rys. 2, korzystając ze standardowego zapisu równań stanu, otrzymamy:

$$\begin{cases} \frac{di_1}{dt} = \frac{1}{L_f} \cdot e - \frac{R}{L_f} \cdot i_1 - \frac{1}{L_f} \cdot u_{cf} \\ \frac{du_{cf}}{dt} = \frac{1}{C_f} \cdot i_1 - \frac{P}{C_f} \cdot \frac{1}{u_{cf}} \end{cases} \quad (3)$$

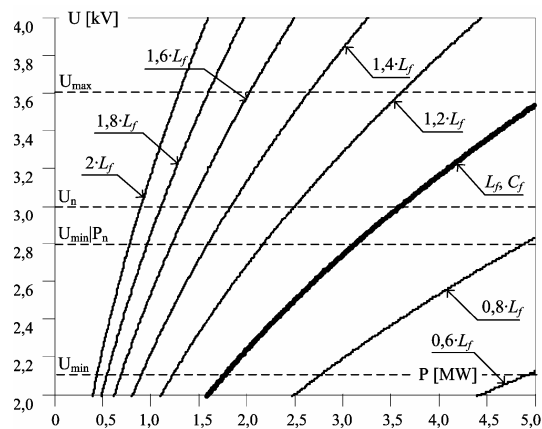
Badając rozwiązanie układu (3), dla małych zmian parametrów wokół ustalonego punktu pracy, otrzymamy warunek stabilnej pracy [5, 8]:

$$P < u_{cf}^2 R \frac{C_f}{L_f} \quad (4)$$

Z warunku (4) wynika, że dla określonych parametrów filtra i napięcia zasilania, moc pobierana przez pojazd powinna być ograniczona.

Po zlinearyzowaniu nieliniowego układu (1), korzystając z programu Matlab, zbadano wpływ zmiany parametrów filtra wejściowego pojazdu L_f i C_f na stabilność układu, przy zachowaniu jego stałej wartości częstotliwości granicznej. Zmieniano wartość indukcyjności L_f odpowiednio dostosowując do tych zmian pojemność C_f . Wartość rezystancji R była dla wszystkich przypadków taka sama. Obliczenia wykonano dla zakresu napięć zbliżonych do występujących w trakcji kolejowej prądu stałego i mocy zmienianej od 0 do 5 MW. Z uzyskanych rezultatów, przedstawionych na rys. 3, wynika, że przy zwiększaniu wartości indukcyjności w filtrze wejściowym pojazdu, przy zachowaniu jego stałej częstotliwości granicznej, obszar niestabilny powiększa się. Korzystne zatem, z punktu widzenia stabilności, jest stosowanie możliwie małych wartości indukcyjności i odpowiednio dużych pojemności. Dla parametrów poniżej linii granicznej układ jest niestabilny, np. dla parametrów bazowych filtra, gdzie granicę stabilności wyróżniono grubą linią, przy napięciu 2800 V moc pobierana nie może przekraczać 3 MW. Na rysunku, linią przerywaną, zaznaczono: maksymalną, nomi-

nalną i minimalną wartość napięcia zasilania. Podano także wartość minimalną napięcia, przy której pojazd może pobierać moc nominalną – poniżej tej wartości należy zmniejszyć moc pobieraną.

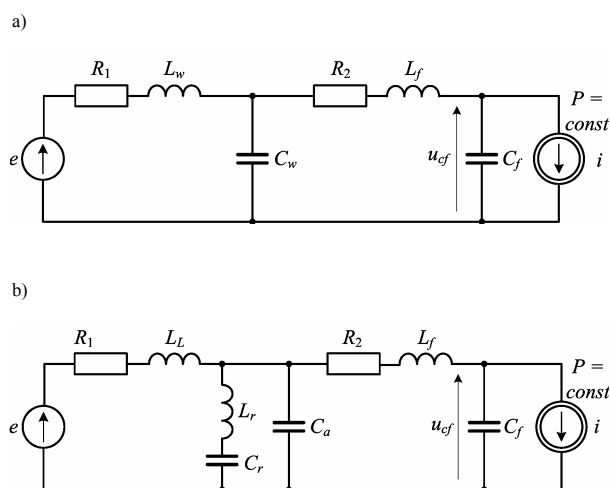


Rys. 3. Granica stabilności układu w zależności od mocy pojazdu, napięcia zasilającego i parametrów filtra wejściowego, gdzie parametry bazowe filtra wynoszą: $L_f = 5$ mH, $C_f = 20$ mF, $R = 100$ mΩ

Fig. 3. Stability limit of system depending on vehicle power, supply voltage and vehicle input filter parameters, where basic filter parameters are: $L_f = 5$ mH, $C_f = 20$ mF, $R = 100$ mΩ

3. Analiza stabilności z układem filtra podstacji

Na stabilność systemu trakcyjnego może wpływać także filtr podstacji zasilającej. Na rys. 4 przedstawiono schemat zastępczy podstacji trakcyjnej i pojazdu dla wariantów: z filtrem podstacji typu Γ (rys. 4a) oraz z dławikiem katodowym i centralnym urządzeniem wygładzającym (rys. 4b).

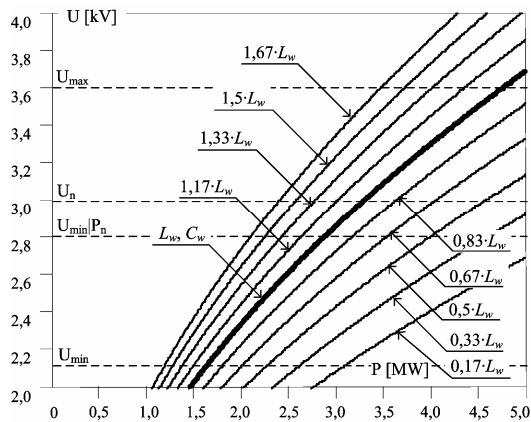


Rys. 4. Uproszczony schemat zastępczy podstacji trakcyjnej i obwodu głównego pojazdu: a) z filtrem podstacji typu Γ ; b) z dławikiem katodowym i centralnym urządzeniem wygładzającym (CUW)

Fig. 4. Simplified equivalent circuit of traction substation and traction vehicle: a) with Γ type substation filter; b) with cathode reactor and set of output filters (CUW)

Analogicznie jak dla poprzedniego przypadku, przedstawionego w rozdz. 1, układ zastępczy opisano równaniami stanu i po zlinearyzowaniu utworzono macierz stanu. Na tej podstawie zbadano stabilność układu w zależności od parametrów elementów LC filtra wyjściowego podstacji typu Γ (rys. 4a) przy zachowaniu stałej wartości częstotliwości granicznej filtra. Zmieniano wartość indukcyjności L_w , przyjmując odpowiednią pojemność C_w . Obliczenia wykonano dla zmian wartości napięcia zasilającego i mocy

pobieranej, przy stałych wartościach elementów filtru wejściowego pojazdu L_f , C_f równych wartościom bazowym. Wyniki przedstawiono na rys. 5.

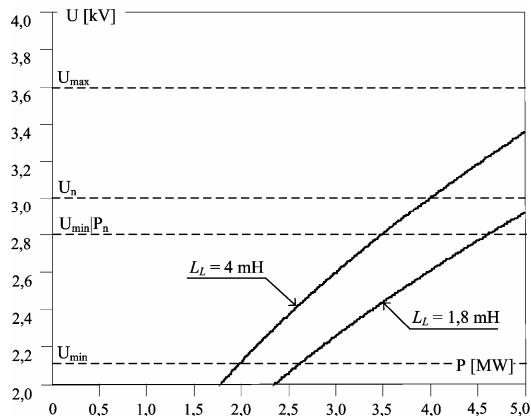


Rys. 5. Granica stabilności układu z filtrem podstacji typu Γ w zależności od mocy pojazdu, napięcia zasilającego i parametrów filtru wyjściowego podstacji, gdzie parametry bazowe filtrów wynoszą: $L_f = 5$ mH, $C_f = 20$ mF, $R_1 = R_2 = 100$ m Ω , $L_w = 6$ mH, $C_w = 0,8$ mF

Fig. 5. Stability limit of system with traction substation output filter depending on vehicle power, supply voltage and substation output filter parameters, where basic filters parameters are $L_f = 5$ mH, $C_f = 20$ mF, $R_1 = R_2 = 100$ m Ω , $L_w = 6$ mH, $C_w = 0,8$ mF

Z porównania granic stabilności przedstawionych na rys. 3 i 5 wynika, że filtr wyjściowy podstacji typu Γ (rys. 4a) pogarsza warunki stabilności w porównaniu z układem bez filtru (rys. 2). Widać niewielkie przesunięcie granicy stabilności w górę. Zmiany parametrów filtru wyjściowego podstacji wpływają w mniejszym stopniu, niż było to w przypadku filtru wejściowego pojazdu. Wynika to z mniejszej nominalnej wartości pojemności w filtrze.

Sprawdzono także, jaki wpływ na stabilność układu mają zmiany parametrów filtru wyjściowego podstacji dla typowego zespołu filtrów wyjściowych (CUW) o schemacie przedstawionym na rys. 4b. Wyniki obliczeń dla standardowych wartości pojemności i indukcyjności filtru podstacji pokazano na rys. 6. Uwzględniono dwie typowe wartości dławika katodowego L_L . Zwiększenie wartości indukcyjności dławika niekorzystnie wpływa na stabilność układu. Jest to zgodne z wynikami otrzymanymi w poprzednich przypadkach, dla których większe wartości indukcyjności pogarszają stabilność systemu.

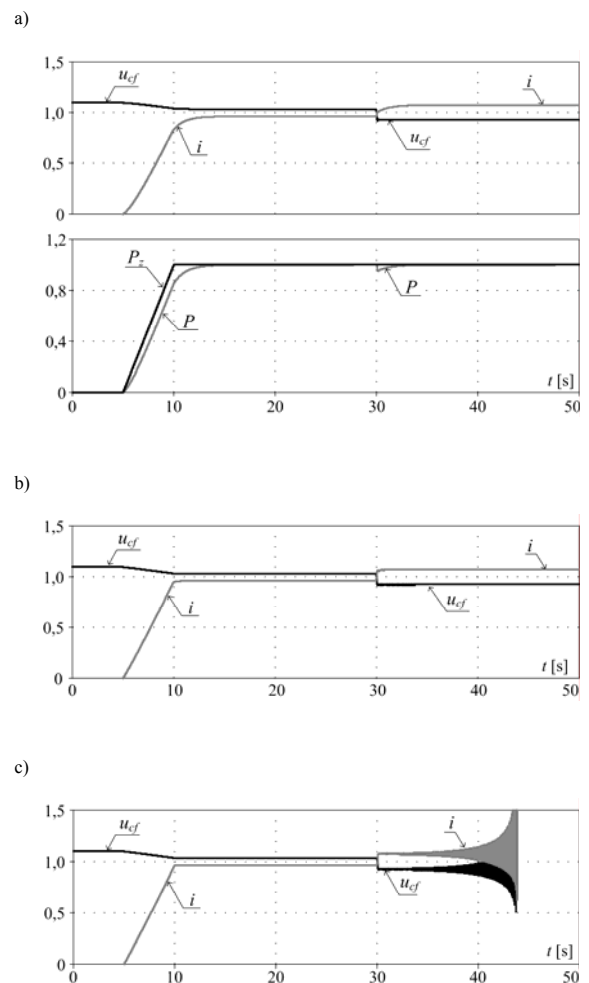


Rys. 6. Granica stabilności układu z filtrem CUW podstacji w zależności od mocy pojazdu, napięcia zasilającego i indukcyjności dławika katodowego podstacji

Fig. 6. Stability limit of system with set of traction substation output filters depending on vehicle power, supply voltage and inductance of reactor

4. Analiza stabilności z regulatorem mocy pojazdu

W celu określenia wpływu parametrów regulatora mocy pojazdu na stabilność układu zasilania do badań wykorzystano układ przedstawiony na rys. 4a z tą różnicą, że zamiast idealnego odbiornika $P = \text{const}$ zastosowano sterowane źródło prądowe. Do regulacji mocy zastosowano standardowy regulator proporcjonalno-całkujący (PI). Sygnałem wejściowym regulatora jest różnica pomiędzy mocą zadaną a mocą pobieraną przez pojazd. Określono wpływ wartości współczynnika wzmocnienia i czasu zdwojenia regulatora PI na stabilność układu dla standardowych wartości pojemności i indukcyjności filtrów w układzie zasilania. Poniżej przedstawiono przykładowe wyniki dotyczące zmiany parametrów pracy pojazdu, z punktu pracy ustalonej (rys. 5): $u_c = 3,1$ kV, $P = 3$ MW do wartości $u_c = 2,8$ kV, $P = 3$ MW. Jest to przejście z obszaru pracy stabilnej do obszaru niestabilnego. Obliczenia w dziedzinie czasu wykonano, przy wykorzystaniu programu PSpice, dla trzech wartości parametrów regulatora określonych jako: małe, średnie i duże. Wyniki symulacji dla poszczególnych wartości współczynników pokazano na rys. 7. Wartości zostały przedstawione w jednostkach względnych w odniesieniu do wielkości nominalnych: $U_n = 3$ kV, $P_n = 3$ MW.



Rys. 7. Wyniki symulacji układu z regulatorem mocy typu PI: a) dla małych wartości wzmocnienia; b) dla średnich wartości wzmocnienia; c) dla dużych wartości wzmocnienia, gdzie: i – prąd pobierany przez obciążenie; u_{cf} – napięcie na kondensatorze filtru wejściowego pojazdu; P_2 – moc zadana; P – moc pobierana przez pojazd

Fig. 7. Simulation results of system with PI controller: a) with low level amplification factors; b) with medium level amplification factors; c) with high level amplification factors, where: i – load current; u_{cf} – input filter capacitor voltage; P_2 – setting power; P – consumed power

Na rysunku przedstawiono fazę rozruchu pojazdu (w czasie do 10 s) i przejście do pracy w obszarze stałej mocy a następnie wystąpienie, dla czasu $t = 30$ s, zaburzenia powodującego zmniejszenie wartości napięcia zasilania. Na rys. 7a, oprócz przebiegów napięcia i prądu, przedstawiono przebiegi mocy zadanej P_z i mocy pobieranej przez pojazd P . Na pozostałych rysunkach nie podano przebiegów mocy, gdyż uchyb regulacji jest mały i wykresy pokrywają się.

Wyniki symulacji pokazują, że wystąpienie oscylacji napięcia i prądu przy przejściu w obszar pracy niestabilnej jest zależne od współczynników wzmocnienia regulatora. Dla małych wartości tych współczynników oscylacje nie występują (rys. 7a), gdyż jedynie z pewnym przybliżeniem zachowany jest warunek $P \approx \text{const}$. Uchyb regulacji mocy jest stosunkowo duży a czas reakcji wynosi kilka sekund. Zwiększenie wartości współczynników wzmocnienia regulatora do wartości średniej spowodowało, że jakość regulacji uległa znacznej poprawie, przy zachowaniu pracy stabilnej. Na rys. 7b można zauważyć niewielkie zanikające oscylacje napięcia i prądu po wystąpieniu zakłócenia w wartości napięcia zasilającego. Dalsze zwiększanie wartości współczynników spowodowało, że wstąpiły oscylacje napięć i prądów o charakterze narastającym (rys. 7c). Częstotliwość tych oscylacji jest niska i wynosi ok. 10 Hz.

Rozpiętość parametrów systemu trakcyjnego, oraz ich zmienność w czasie, wymaga od układów sterowania pojazdów nie tylko wykrywania, ale i tłumienia niepożądanych oscylacji w różnych stanach pracy [2, 5]. Ponieważ zmniejszenie dobroci obwodów LC ze względów praktycznych jest niedopuszczalne, zaproponowano tłumienie poprzez filtrację sygnału mocy pobieranej przez pojazd. Sygnał mocy w torze sprzężenia zwrotnego przechodzi przez filtr dolnoprzepustowy o stałej czasowej ok. 1 s. Następnie, w regulatorze PI na podstawie sygnału zadającego i sygnału mocy, wyliczany jest sygnał zadający moment w algorytmie sterowania wektorowego. Algorytm sterowania uzależnia także zadawanie strumienia silnika od wartości napięcia na kondensatorze filtru. Takie rozwiązanie umożliwia zwiększenie mocy pojazdu przy zachowaniu jego stabilnej pracy lub ewentualnie zastosowanie filtru wejściowego o mniej korzystnych parametrach z punktu widzenia stabilności a pożądanym np. z przyczyn konstrukcyjnych. Jest to metoda łatwa w realizacji, gdyż sprowadza się do modyfikacji odpowiedniego algorytmu w układzie sterowania napędem pojazdu [8].

5. Podsumowanie

Przedstawiona analiza pokazuje jak istotne z punktu widzenia stabilności systemu zasilania trakcji elektrycznej jest komplekso-

we podejście do problemu obecności w tym układzie filtrów LC. Na podstawie prowadzonych symulacji można wyciągnąć wnioski:

- dla modelu dokładniejszego z uwzględnieniem diody prostowniczej w podstacji i dodatkowych elementów stratnych, w przypadku pracy niestabilnej, amplitudy oscylacji napięć i prądów narastają do ograniczonych wartości;
- regulator mocy powinien charakteryzować się małymi współczynnikami wzmocnień tak, aby zapewnić minimalne wymagania dotyczące pracy pojazdu na charakterystyce dla stałej mocy; Przedstawione w artykule zagadnienie jest tym istotniejsze, że w najbliższym czasie na krajowej sieci kolejowej będą mogły być eksploatowane rozmaite pojazdy różnych operatorów.

6. Literatura

- [1] J. Shen: Inverter Drive system Stability for Traction Applications. Vehicle Power and Propulsion. IEEE Conference 2005.
- [2] B-H Bae, B-H Cho, S-K Sul: Damp-ning control strategy for vector controlled traction drive. 9th European Conference on Power Electronics and Applications. EPE, Graz 2001.
- [3] K. Hasse, A. Walczyna, R. Czarnecki: Input filter stability of drives fed from voltage inverters controlled by direct flux and torque control methods. IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 143, No. 5, Sept. 1996.
- [4] T. Toftevaag, M. T. Pålsson: Low-frequency oscillations in the Norwegian electric traction power supply system caused by interaction between the supply system and propulsion machinery – Analysis and consequences. 7th International Conference “Modern Electric Traction in Integrated XXIst Century Europe MET ‘05”. Warsaw 2005.
- [5] M. Carpita, H. Zueger, M. Pellerin, P. Stefanutti: Transformer used as a DC link filter inductance in DC high power traction applications. 13th European Conference on Power Electronics and Applications. EPE, Dresden 2005.
- [6] H. Mosskull: DC-link stabilization of an induction machine drive. 10th European Conference on Power Electronics and Applications. EPE, Toulouse 2003.
- [7] E. Godoy, S. Tebbani, Y. Louvain, K. Sauterau: Stability analysis of a constant – power inverter. 10th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE, Toulouse 2003.
- [8] J. Skibicki: Wpływ wybranych stanów przejściowych w układzie zasilania na sieciowe pojazdy trakcyjne. Rozprawa doktorska. Politechnika Gdańska 2004.

Artykuł recenzowany

INFORMACJE

Zapraszamy do PUBLIKACJI artykułów naukowych w czasopiśmie PAK

WYDAWNICTWO POMIARY AUTOMATYKA KONTROLA
ul. Świętokrzyska 14A, pok. 530, 00-050 Warszawa,
tel./fax: 022 827 25 40

Redakcja czasopisma POMIARY AUTOMATYKA KONTROLA
44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10, pok. 30b,
tel./fax: 032 237 19 45, e-mail: wydawnictwo@pak.info.pl

