

*XV Seminarium*  
**ZASTOSOWANIE KOMPUTERÓW W NAUCE I TECHNICIE' 2005**  
Oddział Gdański PTETiS

**WPLYW PARAMETRÓW FILTRA WEJŚCIOWEGO LC POJAZDU  
NA STABILNOŚĆ TRAKCYJNEGO UKŁADU ZASILANIA**

**Jacek SKIBICKI<sup>1</sup>**

1. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Katedra Trakcji Elektrycznej  
tel: (58) 3472971, e-mail: [jskibic@elv.pg.gda.pl](mailto:jskibic@elv.pg.gda.pl)

W referacie przedstawiono wpływ zmiany parametrów elektrycznych filtra na stabilność układu zasilania trakcji elektrycznej. Zaprezentowano ogólne założenia teoretyczne problemu oraz zaproponowano nowy współczynnik pozwalający na wstępne określenie stabilności systemu dla przyjętych parametrów filtra wejściowego. Przedstawiono wyniki analizy symulacyjnej wykonanej w programie PSpice przy wykorzystaniu opracowanych modeli poszczególnych elementów systemu trakcyjnego. Badania symulacyjne wykonano dla pojazdu III generacji, czyli wyposażonego w przekształtnik energoelektroniczny i napędzanych silnikami indukcyjnymi, pracującego w obszarze regulacji po ograniczeniu mocy. Praca w tym obszarze stwarza bowiem największe ryzyko powstania niebezpiecznych oscylacji napięcia i prądu. Problem drgań związany z odpowiednim doбором parametrów filtra wejściowego jest szczególnie istotny w sytuacji krajowego systemu trakcji kolejowej, gdzie nowoczesne pojazdy III generacji zaczęły być eksploatowane w najbliższej przyszłości.

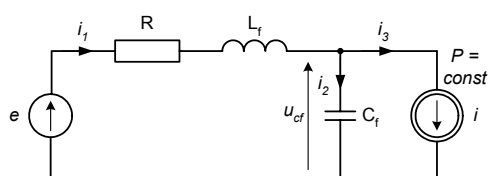
## 1. WSTĘP

Wprowadzenie do eksploatacji nowych generacji pojazdów trakcyjnych z układami energoelektronicznymi zmieniło w sposób diametralny parametry elektryczne, jakie mogą wystąpić w układzie zasilania trakcji elektrycznej. Pojazdy te są wyposażone w filtry wejściowe LC, stanowiące dodatkowy element rezonansowy o dość dużych wartościach indukcyjności i pojemności, a należy zwrócić uwagę, że układy zasilające konstruowano w okresie, gdy w eksploatacji były jedynie pojazdy klasyczne. Nie były zatem – podczas projektowania systemu trakcyjnego – uwzględniane czynniki wynikające z parametrów i charakteru pracy pojazdów z rozruchem impulsowym czy wyposażonych w energoelektroniczny napęd przekształtnikowy. Jednym z zagrożeń, jakie mogą wystąpić w takiej sytuacji jest możliwość pojawienia się oscylacji napięcia i prądu w układzie zasilania. Efekt ten jest powodowany przez sterowanie przekształtnika o dużej częstotliwości granicznej regulatorów w układzie sterowania [1,6,8]. Reakcja obwodu sterowania na zmianę parametrów zasilania może w pewnych okolicznościach zmiany te pogłębić i spowodować, że układ

wpadnie w drgania oscylacyjne. Jako przykład może posłużyć reakcja układu na obniżenie wartości napięcia zasilającego podczas pracy pojazdu w trybie regulacji ze stałą mocą. Sterowanie, 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. Zjawiska takie występują w praktyce, trudno je jednak badać ze względu na dużą przypadkowość ich występowania. Te niepożądane oscylacje mogą zagrozić poprawnej pracy pojazdu [8].

## 2. ANALIZA STABILNOŚCI SYSTEMU TRAKCYJNEGO

Uproszczony schemat zastępczy obwodu głównego pojazdu trakcyjnego przedstawiono na rys. 1. Wyposażony jest on w filtr wejściowy  $L_f C_f$ , napęd zaś został zastąpiony przez źródło prądowe. Układ regulacji mocy jest sztywny i pracuje w obszarze sterowania  $P = \text{const}$ . Pojazd jest zasilany z idealnego źródła napięciowego.



Rys. 1 - Uproszczony schemat zastępczy obwodu głównego pojazdu trakcyjnego, gdzie:  $e$  – źródło napięciowe zasilające;  $R$  – zastępcza rezystancja trakcyjnego układu zasilania;  $L_f$  – indukcyjność filtra wejściowego pojazdu;  $C_f$  – pojemność filtra wejściowego pojazdu;  $i$  – sterowane źródło prądowe

Dla układu dynamicznego z rys. 1, korzystając ze standardowego zapisu równań stanu [5, 9]

$$\frac{dx}{dt} = f(x, u, t) \quad x(0) = x_0 \quad (1)$$

gdzie  $x$ ,  $u$  są odpowiednio wektorami stanu i wymuszenia, otrzymamy:

$$\begin{cases} \frac{di_1}{dt} = \frac{1}{L_f} \cdot e - \frac{R}{L_f} \cdot i_1 - \frac{1}{L_f} \cdot u_{cf} \\ \frac{du_{cf}}{dt} = \frac{1}{C_f} \cdot i_1 - \frac{P}{C_f} \cdot \frac{1}{u_{cf}} \end{cases} \quad (2)$$

Po zlinearyzowaniu nieliniowego układu (2) otrzymamy:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu \quad (3)$$

gdzie macierz stanu wynosi:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_f} & -\frac{1}{L_f} \\ \frac{1}{C_f} & \frac{P}{u_{cf}^2 C_f} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Warunkiem stabilności układu jest, aby wszystkie części rzeczywiste wartości własnych macierzy stanu były ujemne. Wynika stąd, że dla standardowych parametrów filtra moc pobierana przez pojazd powinna być ograniczona:

$$P < u_{cf}^2 R \frac{C_f}{L_f} \quad (5)$$

Ze wzoru (5) wynika, że dopuszczalna moc pojazdu dla jakiej nie wystąpią oscylacje napięcia i prądu jest zależna od parametrów filtra wejściowego.

### 3. BADANIA SYMULACYJNE WSPÓŁPRACY POJAZDU Z UKŁADEM ZASILANIA

#### 3.1. Modele poszczególnych elementów systemu trakcyjnego

Dla potrzeb analizy współpracy nowoczesnego pojazdu trakcyjnego z układem zasilania pod kątem stanów przejściowych opracowano w programie PSpice modele następujących elementów systemu trakcyjnego:

- podstacji trakcyjnej,
- sieci jezdnej i powrotnej,
- pojazdu nowoczesnego wyposażonego w napęd przekształtnikowy i silniki indukcyjne.

##### *Model podstacji trakcyjnej.*

W modelu podstacji uwzględniono prostownik 6-cio pulsowy, dławik katodowy oraz zespół filtrów wygładzających (CUW). Parametry modelu odpowiadają podstacji wyposażonej w trzy zespoły prostownikowe typu PK-17/3,3 o napięciu znamionowym 3,3 kV i prądzie znamionowym 750 A każdy [2].

##### *Model sieci trakcyjnej*

Sieć trakcyjna została zamodelowana za pomocą czwórnika RLC, którego parametry odwzorowują parametry sieci na odcinku określonej długości. Przyjęto, że sieć pomiędzy podstacją a pojazdem, czy też pomiędzy dwoma pojazdami będzie reprezentowana przez jeden czwórnik o parametrach oddających założoną odległość pomiędzy obiektami [3].

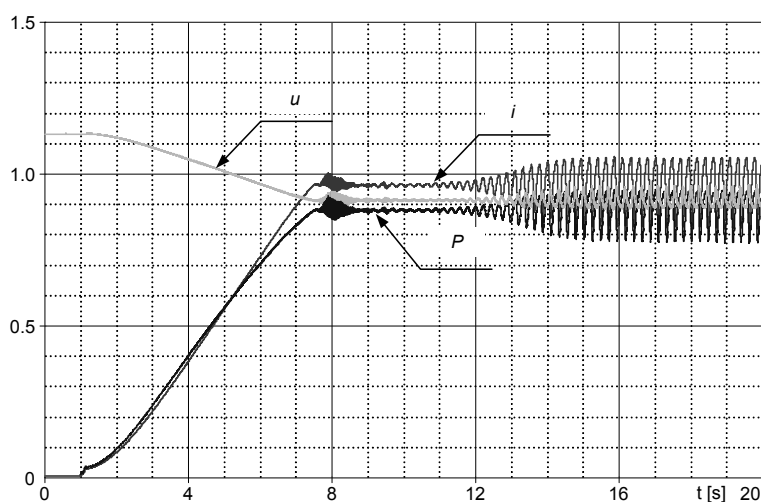
##### *Model pojazdu wyposażonego w napęd przekształtnikowy i silniki indukcyjne*

Opracowano model pojazdu z napędem przekształtnikowym wzorując się na parametrach lokomotywy uniwersalnej Taurus produkcji Siemens AG [7]. Lokomotywa jest napędzana czterema silnikami asynchronicznymi o mocy 1,6 MW każdy. Jest ona przystosowana do pracy w systemach prądu przemiennego, założono więc, że została ona odpowiednio dostosowana do systemu prądu stałego 3 kV. Przyjęto, że lokomotywa ciągnie pociąg pasażerski o długości 10 wagonów i masie całkowitej 420 t [10,11].

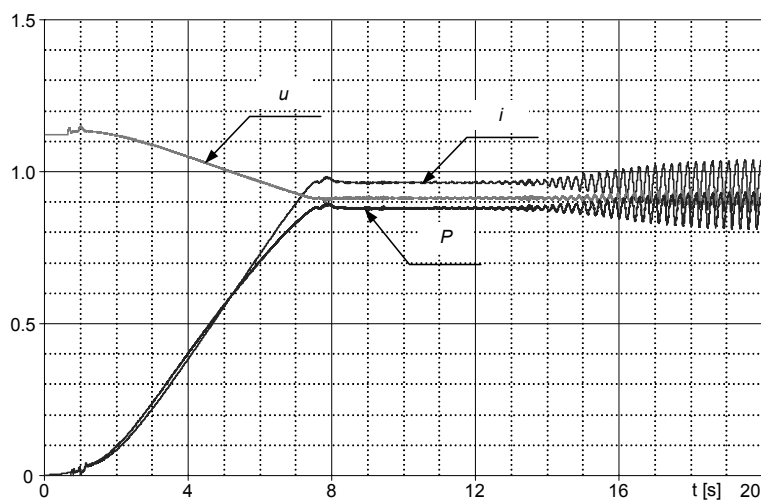
Szczegółowe omówienie opracowanych modeli zaprezentowano w [8].

### 3.2. Wyniki badań symulacyjnych

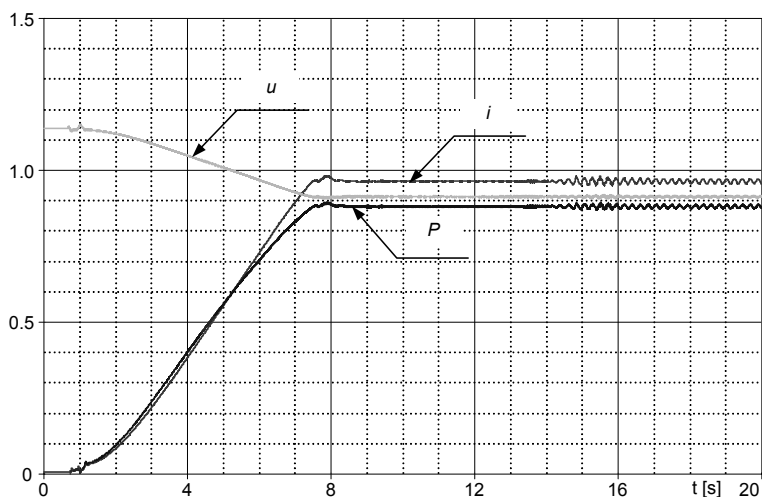
Wykonano obliczenia symulacyjne rozruchu pojazdu w trybie pracy ze stałym momentem ( $M=\text{const.}$ ), a następnie regulacji prędkości w trybie stałej mocy ( $P=\text{const.}$ ). Symulacje przeprowadzono dla różnych wartości parametrów filtra wejściowego  $L_f C_f$ . Przy stałej wartości indukcyjności zmieniano wartość pojemności. Ze względu na czas trwania symulacji obliczenia przeprowadzono dla 30-krotnie zmniejszonego mechanicznego momentu bezwładności układu. Wyniki przedstawiono w jednostkach względnych w odniesieniu do parametrów nominalnych.



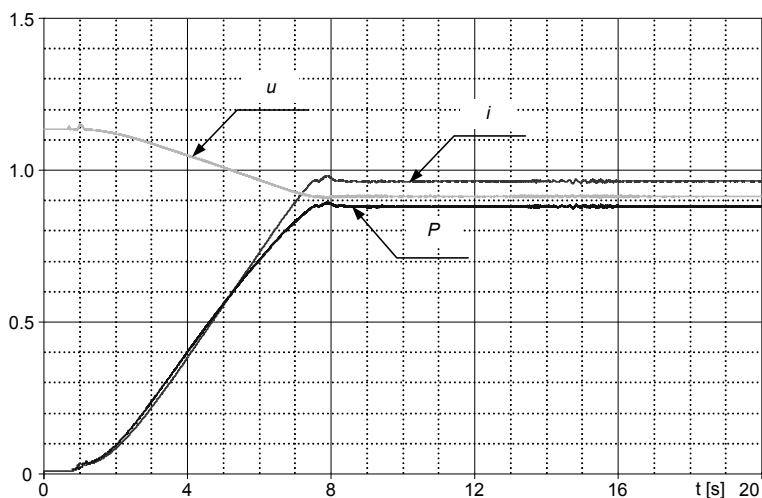
Rys. 2. Przebiegi: napięcia na kondensatorze filtra wejściowego, prądu pobieranego przez pojazd i mocy pojazdu dla  $L_f = 4,5 \text{ mH}$ ,  $C_f = 15 \text{ mF}$



Rys. 3. Przebiegi: napięcia na kondensatorze filtra wejściowego, prądu pobieranego przez pojazd i mocy pojazdu dla  $L_f = 4,5 \text{ mH}$ ,  $C_f = 20 \text{ mF}$



Rys. 4. Przebiegi: napięcia na kondensatorze filtra wejściowego, prądu pobieranego przez pojazd i mocy pojazdu dla  $L_f = 4,5 \text{ mH}$ ,  $C_f = 25 \text{ mF}$



Rys. 5. Przebiegi: napięcia na kondensatorze filtra wejściowego, prądu pobieranego przez pojazd i mocy pojazdu dla  $L_f = 4,5 \text{ mH}$ ,  $C_f = 30 \text{ mF}$

#### 4. WNIOSKI

Wyniki symulacji pokazują, że zgodnie z zależnością (5) zwiększenie wartości pojemności  $C_f$  filtra wejściowego sprawia, że amplituda oscylacji ulega zmniejszeniu, a w skrajnym przypadku wygaszeniu. Obliczenia pokazują, jak istotny z punktu widzenia stabilności systemu trakcyjnego jest dobór parametrów filtra wejściowego LC. Poza dotychczas stosowanymi kryteriami związanymi z parametrami elektrycznymi, mechanicznymi i ekonomicznymi pojawia się nowe nadrzędne kryterium dotyczące zapewnienia stabilności układu. Problem ten jest szczególnie ważny dla krajowego systemu trakcji kolejowej, gdzie nowoczesne pojazdy III generacji zaczną być eksploatowane w najbliższej przyszłości.

## 5. BIBLIOGRAFIA

1. B-H Bae, B-H Cho, S-K Sul - "*Damping control strategy for vector controlled traction drive*". 9<sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2001, Graz
2. F. Frontczak – "*Podstacje trakcyjne i ich zasilanie.*" Warszawa, Kolejowa Oficyna Wydawnicza 1994
3. K. Głowacki, E. Onderka: "*Sieci trakcyjne.*" Bibice, EMTRAK 2002, ISBN: 83-916364-0-2
4. 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
5. T.Kaczorek, A.Dzieliński, W.Dąbrowski, R.Łopatka - "Podstawy teorii sterowania". Warszawa, WNT 2005, ISBN: 83-204-2967-6
6. H.Mosskull - "*DC-link stabilization of an induction machine drive*". 10<sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2003, Toulouse
7. Praca zbiorowa – "*Electric locomotives. Reference list.*" Siemens – materiały firmowe
8. J.Skibicki - „Wpływ wybranych stanów przejściowych w układzie zasilania na sieciowe pojazdy trakcyjne”. Rozprawa doktorska. Gdańsk, Politechnika Gdańska 2004
9. Z.Trzaska - „*Modelowanie i symulacja układów elektrycznych*”. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 1993
10. A. Trzynadłowski – "Control of induction motors." London, Academic Press 2001, ISBN: 0-12-701510-8
11. P. Vas – "*Vector control of AC Machines.*" Oxford, Clarendon Press 1990

### INFLUENCE OF LC VEHICLE INPUT FILTER PARAMETERS ON STABILITY OF TRACTION SUPPLY SYSTEM

The aim of this paper is to present the way electric parameters of the LC vehicle input filter influence the stability of traction supply system. It shows the theoretical assumption of this problem and makes a suggestion for a new parameter which allows to define the system stability depending on input filter parameters. It also shows the results of PSpice simulation analysis, which was done using developed models of traction system elements. Simulation research was made for a vehicle with current converter and induction machines, which work in  $P=\text{const}$  control area. Operation in this area might result in the appearance of voltage and current oscillations. This problem is important for domestic railway traction supply system, where modern III generation vehicles will be exploited in near future.