

Andrzej Stobiecki, Roman Dudek
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

WPLYW DODATKOWEGO POJAZDU NA WARUNKI STABILNEJ PRACY PRZEKSZTAŁTNIKOWYCH NAPIĘDÓW TRAKCYJNYCH

INFLUENCE OF SECOND VEHICLE ON STABILITY OF CONVERTER-BASED TRACTION DRIVES

Streszczenie: Filtry wejściowe LC, w które wyposażone są wszystkie przewodowe lokomotywy elektryczne z energoelektronicznymi układami sterowania, mogą być przyczyną niestabilnej pracy układu napędowego. Stabilność pracy takiego układu zależy przede wszystkim od parametrów systemu trakcyjnego, takich jak napięcie zasilania, moc napędu, rezystancja i indukcyjność sieci trakcyjnej oraz pojemność kondensatora filtra. Także obecność innych pojazdów trakcyjnych w pobliżu rozważanego pojazdu może mieć wpływ na warunki stabilnej pracy napędów. W niniejszym artykule przedstawiono wybrane wyniki analizy wpływu pracy dodatkowego pojazdu na stabilność systemu trakcyjnego. Analizę przeprowadzono w oparciu o uproszczony model systemu trakcyjnego, obejmujący źródło zasilania, sieć trakcyjną, filtry wejściowe oraz układy napędowe pojazdów z regulatorami momentu i prędkości. Sformułowano równania różniczkowe opisujące układ w ogólnym przypadku lokomotyw o różnych parametrach, znajdujących się w różnych odległościach od punktu zasilania. Wykorzystując pierwszą metodę Lapunowa określono warunki stabilnej pracy systemu trakcyjnego dla szczególnego przypadku dwóch takich samych pojazdów pracujących obok siebie w różnych odległościach od punktu zasilania i porównano uzyskane wyniki z rezultatami analizy warunków stabilnej pracy dla pojedynczego pojazdu. Na podstawie przykładowych symulacji pokazano także, że wystarczy ustawienie lokomotyw w pewnej odległości względem siebie, przy niezmiennych innych parametrach układu, aby uzyskane wyniki istotnie zmieniły się jakościowo i ilościowo.

Abstract: All electric trolley locomotives with power electronic control systems are equipped with LC input filters, which can cause unstable operation of the drive system. Stability of such a system depends primarily on traction system parameters. The presence of other traction vehicles in the vicinity of the considered vehicle may also affect the conditions of stable operation of the drives. In this paper, selected results of an analysis of the impact of an additional vehicle on the traction system stability are presented. The analysis was based on the simplified model of the traction system. Differential equations describing the system in the general case of locomotives with different parameters operating at different distances from the supply point are formulated. Using the first Lyapunov's method, the conditions for stable operation of the traction system for the special case of two identical vehicles operating beside each other at various distances from the supply point are determined and compared with the results of the analysis of the stable operation for a single vehicle. It is also shown basing on the exemplary simulation that just setting a distance between the locomotives is enough, with other parameters unchanged, to obtain significantly different qualitatively and quantitatively results.

Słowa kluczowe: *napęd trakcyjny, stabilność, wpływ innego pojazdu*

Keywords: *traction drive, stability, influence of second vehicle*

1. Wstęp

Zastosowanie elektrycznej trakcji przewodowej jest jedną z metod realizacji transportu poziomego w podziemiach kopalń. W polskich kopalniach do prowadzenia pociągów są wykorzystywane głównie lokomotywy typu Ld, wyposażone w silniki szeregowe prądu stałego i rezystorowy układ sterowania. Pojazdy ze sterowaniem energoelektronicznym są stosunkowo nieliczne. Istnieją jednak oferty zarówno modernizacji lokomotyw [5], jak i sprzedaży nowych pojazdów [10] z takim wyposażeniem i należy się spodziewać, że w warunkach postę-

pującego zużycia wykorzystywanego taboru będzie on zastępowany nowocześniejszym.

Każdy energoelektroniczny układ napędowy jest wyposażony w filtr wejściowy LC, którego praca w pewnych warunkach może być niestabilna, co skutkuje pojawieniem się oscylacji w filtrze i układzie napędowym (na przykład napięcia, prądu, momentu, prędkości) [9]. Stabilność pracy takiego układu zależy przede wszystkim od parametrów systemu trakcyjnego, takich jak napięcie zasilania, moc napędu, rezystancja i indukcyjność sieci trakcyjnej oraz po-

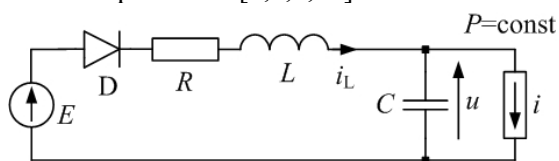
jemność kondensatora filtru. Także obecność innych pojazdów trakcyjnych w pobliżu rozważanego pojazdu może mieć wpływ na warunki stabilnej pracy napędów.

2. Warunki stabilnej pracy systemu trakcyjnego dla jednego pojazdu

Schemat uproszczonego modelu systemu trakcyjnego, dla którego przeprowadzono badania warunków stabilnej pracy, przedstawiono na rysunku 1. Modelując system trakcyjny uwzględniono elementy układu zasilania (źródło zasilające i sieć trakcyjną) oraz filtr wejściowy i układ napędowy jednego pojazdu. Źródło napięcia E oraz dioda D reprezentują podstawę zasilającą, opornik R i dławik L – odpowiednio rezystancję i indukcyjność źródła, sieci trakcyjnej i dławika filtru wejściowego, kondensator C – pojemność kondensatora filtru. Źródło prądu i modeluje napęd pojazdu w ustalonym stanie pracy przy stałym momencie obciążenia i stałej prędkości kątowej, a więc przy stałej mocy P , niezależnie od wartości napięcia u na kondensatorze C . Wartość prądu i jest określona zależnością

$$i = \frac{P}{u} \quad (1)$$

czyli w wyniku przyjęcia założenia o stałej mocy układu napędowego zależność między napięciem kondensatora filtru, a prądem układu napędowego jest hiperboliczna. Prezentowany model systemu trakcyjnego został wykorzystany do analizy stabilności na przykład przez autorów opracowań [2,3,7,12].



Rys. 1. Schemat uproszczonego modelu systemu trakcyjnego

Dla stałych wartości parametrów elementów E , R , L i C oraz pomijając diodę D (dla stanu pracy silnikowej), układ prezentowany na rysunku 1 można opisać autonomicznym równaniem różniczkowym drugiego rzędu:

$$\frac{d^2 u}{dt^2} = \frac{1}{LC} \left[E - \left(RC - \frac{LP}{u^2} \right) \frac{du}{dt} - u - R \frac{P}{u} \right] \quad (2)$$

Analiza właściwości układu reprezentowanego równaniem (2) została przedstawiona w pracy [8]. Pojemność kondensatora filtru wejściowego pojazdu, dla której zapewniona jest stabilna praca systemu trakcyjnego, określona

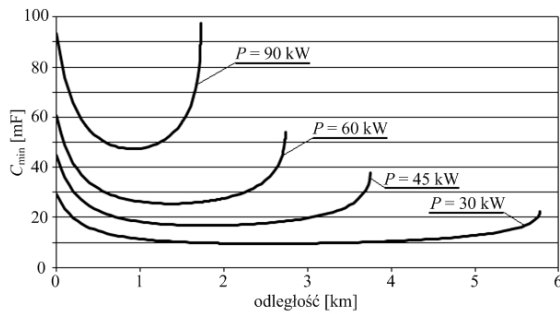
jest zależnością:

$$C > \frac{2PL}{R(E^2 - 2RP + E\sqrt{E^2 - 4RP})} \quad (3)$$

Na skutek ruchu pojazdu trakcyjnego zmienia się jego odległość od źródła zasilania, a więc także wartości indukcyjności i rezystancji sieci trakcyjnej. Indukcyjność jednostkowa sieci trakcyjnej linii jednotorowej wynosi 2,2 mH/km [1]. Rezystancja jednostkowa sieci zależy przede wszystkim od przekroju wykorzystywanego przewodu jezdnego, typu szyn i sposobu wykonania połączeń czołowych. W przypadku kopalnianych linii wielotorowych przewody jezdne łączone są równolegle w określonych odstępach. Również toki szynowe takich linii łączone są równolegle. Sieć trakcyjną górną wykonuje się z drutu jezdnego D_{jp} , natomiast najczęściej stosowanymi typami szyn są S30, S37 i S42 [1]. Na rysunku 2 pokazano zależność minimalnej pojemności kondensatora filtru wejściowego C_{min} , wymaganej do stabilnej pracy systemu trakcyjnego, od odległości pojazdu od podstawy zasilającej, dla wybranych wartości mocy układu napędowego. Wyznaczając charakterystyki założono, że górną sieć trakcyjną stanowi drut jezdny typu D_{jp} 100 o rezystancji jednostkowej 0,179 Ω /km [6], a dolną – szyny S37, o masie jednostkowej 37,2 kg/m [1]. Rezystancję jednostkową szyn wyznaczono na podstawie zależności [11]:

$$r = \frac{1,56}{m} \quad (4)$$

gdzie m – masa jednego metra szyny [kg]. W przypadku szyn S37 rezystancja jednostkowa toru pojedynczego jest równa 0,021 Ω /km. Założono, że szyny są spawane (pominięto rezystancję połączeń czołowych) oraz, że linia jest dwutorowa. Przyjęto także, że indukcyjność dławika filtru wejściowego lokomotywy wynosi 2 mH, a jego rezystancja – 0,01 Ω . Parametry układu zasilania sieci trakcyjnej, składającego się z podstawy zasilającej, przewodu zasilacza i przewodu powrotnego, są trudne do określenia, ponieważ w dużym stopniu zależą od warunków lokalnych. Do celów analizy przyjęto, że indukcyjność tego układu jest równa 0,1 mH, a rezystancja – 0,02 Ω . Krzywe widoczne na rysunku 2 wyznaczono dla napięcia źródła zasilania $E = 270$ V, równego napięciu stanu jałowego automatycznej przewoźnej stacji prostownikowej APSP. Takie stacje są typowym źródłem zasilania trakcji kopalnianej.



Rys. 2. Charakterystyki C_{min} w funkcji odległości od punktu zasilania dla wybranych wartości mocy napędu

Analizując charakterystyki zaprezentowane na rysunku 2 można stwierdzić, że minimalna wartość pojemności kondensatora filtra wejściowego pojazdu wymagana do stabilnej pracy systemu trakcyjnego najpierw maleje wraz ze wzrostem odległości lokomotywy od punktu zasilania, a następnie rośnie. Wartość C_{min} rośnie również przy wzroście mocy napędu.

Charakterystyki widoczne na rysunku 2 są ograniczone od prawej strony. Ograniczenie to jest związane z możliwością dostarczenia do odbiornika danej mocy [9].

3. Wpływ dodatkowego pojazdu

Analizę wpływu dodatkowego pojazdu na warunki stabilnej pracy systemu trakcyjnego przeprowadzono dla zmodyfikowanego uproszczonego modelu, którego schemat pokazano na rysunku 3. W celu uzyskania jednoznacznego opisu przyjęto, że lokomotywa A znajduje się bliżej punktu zasilania, niż lokomotywa B. Źródło zasilania E i dioda D modelują podstawę zasilającą, podobnie jak w przypadku układu prezentowanego na rysunku 1. Elementy R_1 i L_1 reprezentują rezystancję i indukcyjność źródła zasilania oraz fragment sieci trakcyjnej między źródłem, a miejscem pracy lokomotywy A, elementy R_{FB} i L_{FB} – rezystancję i indukcyjność odcinka sieci trakcyjnej między lokomotywami oraz dławika filtra wejściowego lokomotywy B, R_{FA} , L_{FA} – rezystancję oraz indukcyjność dławika filtra wejściowego lokomotywy A, zaś C_A i C_B – pojemności kondensatorów filtrów lokomotyw. Źródła prądowe i_A oraz i_B reprezentują układy napędowe lokomotyw, pracujące przy stałej mocy. Obie lokomotywy wyposażone są w takie same układy sterowania.

Dla stałych wartości napięcia źródła, rezystancji, indukcyjności i pojemności oraz pomijając diodę D (dla stanu pracy silnikowej), obwód pokazany na rysunku 3 można opisać układem

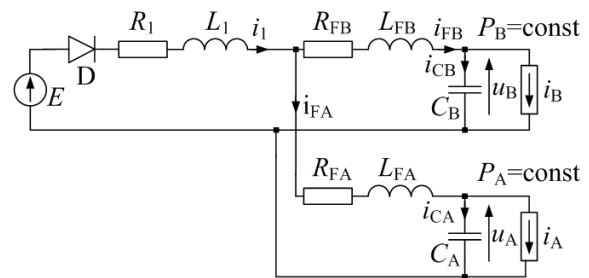
równań różniczkowych drugiego rzędu:

$$L_B C_B \frac{d^2 u_B}{dt^2} + \left(R_B C_B - \frac{L_B P_B}{u_B^2} \right) \frac{du_B}{dt} + \frac{R_B P_B}{u_B} + u_B + L_1 C_A \frac{d^2 u_A}{dt^2} + \left(R_1 C_A - \frac{L_1 P_A}{u_A^2} \right) \frac{du_A}{dt} + \frac{R_1 P_A}{u_A} = E \quad (5)$$

oraz

$$L_1 C_B \frac{d^2 u_B}{dt^2} + \left(R_1 C_B - \frac{L_1 P_B}{u_B^2} \right) \frac{du_B}{dt} + \frac{R_1 P_B}{u_B} + L_A C_A \frac{d^2 u_A}{dt^2} + \left(R_A C_A - \frac{L_A P_A}{u_A^2} \right) \frac{du_A}{dt} + \frac{R_A P_A}{u_A} + u_A = E, \quad (6)$$

gdzie: $R_A = R_1 + R_{FA}$, $L_A = L_1 + L_{FA}$, $R_B = R_1 + R_{FB}$, $L_B = L_1 + L_{FB}$.



Rys. 3. Schemat zmodyfikowanego uproszczonego modelu systemu trakcyjnego

Dla przypadku szczególnego dwóch takich samych lokomotyw pracujących w stanie ustalonym, w identycznych warunkach obciążenia $P_A = P_B = \text{const}$ oraz przy tych samych warunkach początkowych, to znaczy tych samych napięciach początkowych na kondensatorach i prądach w dławikach filtrów, w jednakowej odległości od punktu zasilania (na przykład znajdujących się obok siebie na sąsiednich torach linii dwutorowej), układ równań (5), (6) upraszcza się do autonomicznego równania różniczkowego drugiego rzędu postaci:

$$BC \frac{d^2 u}{dt^2} + \left(AC - \frac{BP}{u^2} \right) \frac{du}{dt} + \frac{AP}{u} + u = E \quad (7)$$

gdzie $A = 2R_1 + R_F$, $B = 2L_1 + L_F$. Dla tego przypadku stosunkowo łatwo jest wyznaczyć zależność minimalnej wartości pojemności kondensatorów filtrów wejściowych zapewniających stabilną pracę układów napędowych lokomotyw od parametrów systemu trakcyjnego.

Warunki stabilnej pracy układu opisanego równaniem (7) można określić wykorzystując metodę linearyzacji Lapunowa. Metoda umożliwia

zbadanie stabilności lokalnej układu wokół punktów równowagi.

W celu wyznaczenia punktów równowagi badanego układu zapisano równanie (7) w postaci układu dwóch równań różniczkowych pierwszego rzędu [4,13]:

$$\frac{du}{dt} = v = f_1(u, v) \quad (8)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{BC} \left[E - \left(AC - \frac{BP}{u^2} \right) v - \frac{AP}{u} - u \right] = f_2(u, v) \quad (9)$$

Napięcia równowagi są pierwiastkami równania

$$u^2 - Eu + (2R_1 + R_F)P = 0 \quad (10)$$

otrzymanego z warunku zerowania się prawych stron równań (8), (9). Współrzędne punktów równowagi są następujące:

$$u_1 = \frac{E + \sqrt{E^2 - 4PA}}{2} = u_e, \quad i_{11} = \frac{2P}{u_1} = i_{1e} \quad (11)$$

$$u_2 = \frac{E - \sqrt{E^2 - 4PA}}{2}, \quad i_{12} = \frac{2P}{u_2} \quad (12)$$

Można wykazać, że ze względu na dopuszczalny spadek napięcia w kopalnianej sieci trakcyjnej (30% U_n , $U_n = 250$ V), praktyczne znaczenie ma tylko punkt równowagi u_e, i_e (dla przykładowych parametrów systemu trakcyjnego $E = 270$ V, $R_1 = 0,1$ Ω , $R_F = 0,01$ Ω , $P = 45$ kW napięcia równowagi są równe $u_e = 228,68$ V, $u_2 = 41,33$ V).

Układ równań (8), (9) zlinearyzowano wyznaczając macierz Jacobiego w punkcie równowagi [4,13]:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{BC} & \frac{1}{BC} \left(AC - \frac{BP}{u_e^2} \right) \end{bmatrix} \quad (13)$$

Równanie charakterystyczne macierzy A ma postać:

$$\lambda^2 + \frac{1}{BC} \left(AC - \frac{BP}{u_e^2} \right) \lambda + \frac{1}{BC} = 0 \quad (14)$$

Aby badany układ nieliniowy był stabilny, pierwiastki równania charakterystycznego muszą mieć ujemne części rzeczywiste. Warunek ten jest spełniony, jeśli:

$$(2R_1 + R_F)C - \frac{(2L_1 + L_F)P}{u_e^2} > 0 \quad (15)$$

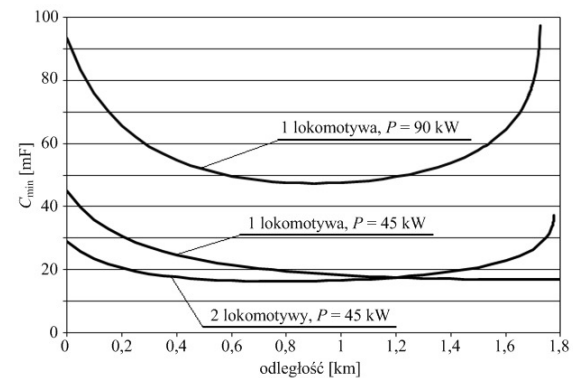
albo po przekształceniach:

$$C > \frac{(2L_1 + L_F)P}{(2R_1 + R_F)u_e^2} \quad (16)$$

Po uwzględnieniu zależności (11) uzyskuje się wyrażenie określające warunki stabilnej pracy systemu trakcyjnego w badanym przypadku:

$$C > \frac{(2L_1 + L_F)P}{\left(E^2 + E\sqrt{E^2 - 4P(2R_1 + R_F)} - 2P(2R_1 + R_F) \right)} * \frac{2}{(2R_1 + R_F)} \quad (17)$$

Na rysunku 4 przedstawiono zależność minimalnej pojemności, wymaganej do stabilnej pracy systemu trakcyjnego, od odległości lokomotyw od źródła zasilania. Założono, że górna sieć trakcyjna została wykonana z drutu jezdowego Djp 100, zaś sieć powrotną tworzą szyny S37. Pozostałe parametry systemu trakcyjnego mają następujące wartości: rezystancja źródła zasilania 0,02 Ω , indukcyjność źródła zasilania 0,1 mH, rezystancja dławika filtru wejściowego 0,01 Ω , indukcyjność dławika filtru wejściowego 2 mH, siła elektromotoryczna źródła 270 V. Obliczenia wykonano dla mocy każdej z lokomotyw równej 45 kW. Na tym samym rysunku pokazano dla porównania charakterystyki C_{min} w funkcji odległości dla pojedynczego pojazdu o mocy 45 kW oraz 90 kW, wyznaczone na podstawie wzoru (3).



Rys. 4. Charakterystyki C_{min} w funkcji odległości od punktu zasilania dla dwóch lokomotyw o mocy 45 kW każda oraz dla pojedynczych lokomotyw o mocy 45 kW i 90 kW

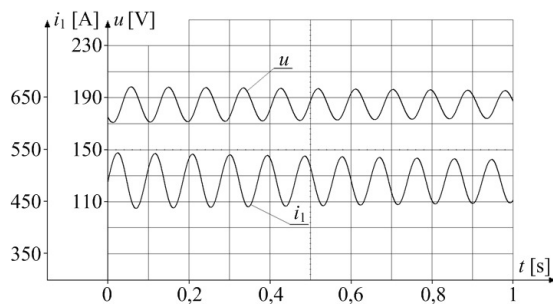
Porównując charakterystyki dla pojedynczego pojazdu o mocy $P = 45$ kW i dwóch lokomotyw o mocy 45 kW znajdujących się w takiej samej odległości od źródła zasilania można stwierdzić, że:

- w całym zakresie możliwych odległości od punktu zasilania wymagana pojemność kondensatora filtru wejściowego każdej z dwóch lokomotyw jest mniejsza od pojemności, która jest niezbędna do prawidłowej pracy pojedynczej lokomotywy (45 mF);

- dla małych odległości od punktu zasilania wymagana pojemność kondensatora filtru każdej z dwóch lokomotyw jest mniejsza, niż pojemność niezbędna do zapewnienia warunków stabilnej pracy pojedynczej lokomotywy, natomiast dla większych odległości od punktu zasilania zależność jest odwrotna.

Z porównania charakterystyk dla dwóch lokomotyw o mocy 45 kW każda (o sumarycznej mocy 90 kW) i pojedynczej lokomotywy o mocy 90 kW wynika, że niezbędna do stabilnej pracy układu pojemność kondensatora filtru wejściowego jest dla każdej odległości mniejsza podczas pracy dwóch lokomotyw, niż wymagana pojemność kondensatora filtru pojedynczej lokomotywy. Suma pojemności kondensatorów filtrów obu lokomotyw jest wyraźnie mniejsza od pojemności niezbędnej w przypadku pracy pojedynczej lokomotywy (wynosi od 57% do 72% tej pojemności, w zależności od odległości lokomotyw od punktu zasilania). Na podstawie analizy charakterystyk pokazanych na rysunku 4 można stwierdzić, że w rozważanym przypadku obecność dodatkowego pojazdu wpływa korzystnie na stabilność systemu trakcyjnego.

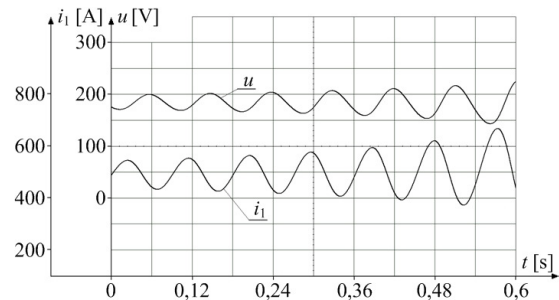
Wyniki analizy zweryfikowano modelując układ przedstawiony na rysunku 3 w programie IsSpice. Przyjęto, że lokomotywy znajdują się w odległości 1,5 km od punktu zasilania. Parametry sieci trakcyjnej i pozostałe parametry systemu trakcyjnego odpowiadają tym, dla których wyznaczono charakterystyki zaprezentowane na rysunku 4. Minimalna pojemność wymagana do zapewnienia stabilnej pracy systemu trakcyjnego wynosi wtedy 20,7 mF. Na rysunku 5 pokazano przebiegi napięcia kondensatora filtru wejściowego u oraz prądu sieci trakcyjnej i_1 dla pojemności kondensatora większej niż C_{min} i równej 21 mF.



Rys. 5. Przebiegi napięcia kondensatora filtru wejściowego u oraz prądu sieci trakcyjnej i_1 , $C = 21 \text{ mF} > C_{min}$

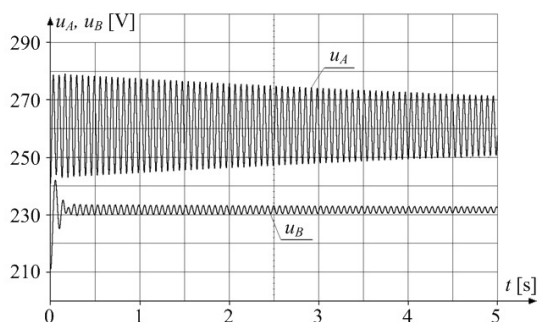
Na podstawie charakteru przebiegów można

stwierdzić, że dla tej wartości pojemności układ napędowy jest stabilny. Przebieg napięcia kondensatora filtru wejściowego i prądu sieci trakcyjnej dla pojemności mniejszej od C_{min} , równej 20 mF, zaprezentowano na rysunku 6. Taka wartość pojemności nie zapewnia stabilnej pracy układu. W obu przypadkach obliczenia wykonano dla początkowego napięcia na kondensatorach filtrów wejściowych równego 175 V.

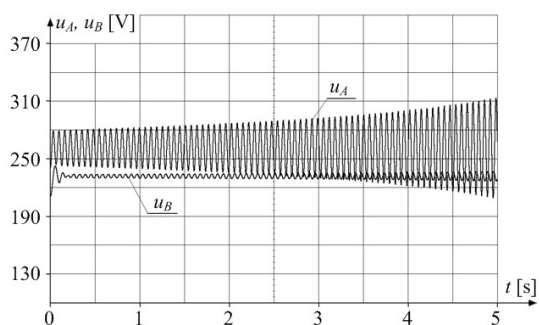


Rys. 6. Przebiegi napięcia kondensatora filtru wejściowego u oraz prądu sieci trakcyjnej i_1 , $C = 20 \text{ mF} < C_{min}$

Ze względu na złożoną postać równań tworzących układ (5), (6) trudne jest sformułowanie ogólnej zależności określającej warunki stabilnej pracy systemu trakcyjnego z dwiema lokomotywami. Narzędzia symulacyjne umożliwiają natomiast sprawdzenie, czy przy konkretnych parametrach elementów systemu jego praca będzie stabilna. Wykorzystując model systemu trakcyjnego przygotowany w programie IsSpice sprawdzono, jaka jest minimalna wartość pojemności kondensatorów filtrów wejściowych dwóch lokomotyw, z których jedna znajduje się w punkcie zasilania sieci trakcyjnej, a druga – w punkcie odległym o 1,5 kilometra. Przyjęto, że moc każdej z lokomotyw jest równa 45 kW, napięcia początkowe kondensatorów są mniejsze o 20 V od napięć w stanie równowagi, a pozostałe parametry systemu trakcyjnego odpowiadają przyjętym poprzednio. Przebiegi napięć kondensatorów filtrów wejściowych lokomotyw A i B (rys. 3) pokazano na rysunkach 7 i 8. Analizując przebiegi pokazane na tych rysunkach można stwierdzić, że wymagana do stabilnej pracy systemu trakcyjnego pojemność kondensatorów filtrów lokomotyw wynosi 51 mF. Jest to wartość większa, niż niezbędna do poprawnej pracy pojedynczej lokomotywy o mocy 45 kW (rys. 4). Wynika z tego, że w ogólnym przypadku obecność dodatkowej lokomotywy może wpływać niekorzystnie na stabilność systemu trakcyjnego.



Rys. 7. Przebiegi napięć kondensatorów filtrów wejściowych u_A i u_B , $C = 51 \text{ mF}$



Rys. 8. Przebiegi napięć kondensatorów filtrów wejściowych u_A i u_B , $C = 49 \text{ mF}$

4. Podsumowanie

W niniejszym artykule przedstawiono wybrane wyniki analizy wpływu dodatkowego pojazdu na stabilność systemu trakcyjnego. Mimo wielu założeń upraszczających i pominięcia na przykład tłumiącego oscylacje działania źródła zasilania oraz dolnej sieci trakcyjnej, postać układu równań (5), (6) opisujących system trakcyjny tylko z dwiema lokomotywami jest złożona i trudno wyznaczyć ogólną analityczną zależność określającą warunki stabilnej pracy systemu. Na podstawie dwóch prezentowanych przypadków można jedynie stwierdzić, że obecność dodatkowej lokomotywy na odcinku sieci zasilanymi z tej samej podstacji trakcyjnej, może istotnie wpływać na warunki stabilnej pracy, przy czym ten wpływ z punktu widzenia minimalnej wartości pojemności kondensatorów filtra może być korzystny lub niekorzystny. Sformułowanie dokładnych związków ilościowych wymaga dalszych szczegółowych badań.

5. Literatura

- [1]. Antoniak J.: *Urządzenia i systemy transportu podziemnego w kopalniach*. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1990.
- [2]. Bae B-H., Cho B-H., Sul S-K.: *Damping control strategy for vector controlled traction drives*. Proc. of EPE 2001, Graz.
- [3]. Carpita M., Zueger H., Pellerin M., Stefanutti

P.: *Transformer used as a DC link filter inductance in DC high power traction applications*. Proc. of EPE 2005, Dresden.

[4]. Demidowicz B. P.: *Matematyczna teoria stabilności*. WNT, Warszawa 1972.

[5]. Dudek R., Zuchowicz M.: *Układ sterowania elektrycznej lokomotywy kopalnianej z inteligentnymi modułami mocy*. Czasopismo Techniczne z.1-E/2007, zeszyt 5, s. 31-41.

[6]. Dudek W., Machowski J.: *Sieci trakcyjne w górnictwie*. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1967

[7]. Karwowski K., Skibicki J.: *Analiza stabilności pracy sieciowych pojazdów z napędem energoelektrycznym*. Mat. konf. SEMTRAK 2004, Kraków – Zakopane, s. 223-230.

[8]. Kosiorowski S., Stobiecki A.: *Wpływ parametrów systemu zasilania na stabilność impulsowego układu sterowania lokomotywy kopalnianych*. Mat. konf. SEMTRAK 2006, Zakopane, s. 283-292.

[9]. Kosiorowski S., Stobiecki A., Zuchowicz M.: *Wybrane zagadnienia stabilności trakcyjnych układów napędowych sterowanych impulsowo*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne nr 75, 2006, wyd. BOBRME Komel, s. 77-82.

[10]. *Lokomotywa przewodowa Ld-31 EM*. http://komag.eu/files/lok_elektr.pdf (styczeń 2014)

[11]. Mierzejewski L., Szelaż A., Gałuszewski M.: *System trakcji elektrycznej prądu stałego*. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1989.

[12]. Mosskull H.: *Stabilization of an induction motor drive with resonant input filter*. Proc. of EPE 2005, Dresden.

[13]. Ombach J.: *Wykłady z równań różniczkowych wspomaganie komputerowo – Maple*. Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków 1999.

Autorzy

dr inż. Andrzej Stobiecki

dr inż. Roman Dudek

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział EAIiIB, Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii, email: astob@agh.edu.pl, dudek@agh.edu.pl

Informacje dodatkowe

Badania, których wyniki zostały zaprezentowane w niniejszym artykule, wykonano w ramach pracy statutowej 11.11.120.353.