

Stanisław Kosiorowski, Andrzej Stobiecki, Marek Żuchowicz
Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

WYBRANE ZAGADNIENIA STABILNOŚCI TRAKCYJNYCH UKŁADÓW NAPĘDOWYCH STEROWANYCH IMPULSOWO

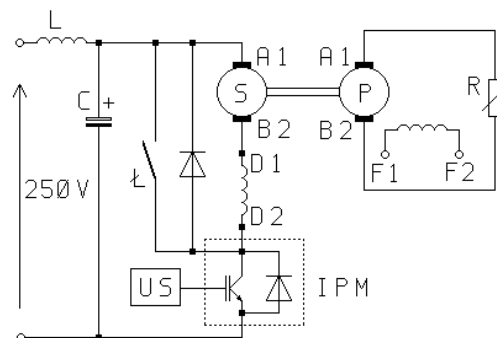
SELECTED PROBLEMS OF STABILITY OF PULSE-MODE CONTROLLED TRACTION DRIVE SYSTEMS

Abstract: New controllable power semiconductor devices make the high frequency pulse-mode operation of the power electronic converters in traction drive systems possible. The capacity and inductance of the converter input filter limiting the ripple of the traction network voltage and current can be decreased for this reason. However, the significant change of the parameter values of these elements can be unacceptable due to necessity to ensure the stable operation of the pulse-mode control system. Results of analytical research, computer-aided simulation and laboratory research concerning stability of the pulse-mode controlled drive system with the electric mining locomotive's traction motor are presented in this paper. On the basis of the traction system simplified model consisting of the energy source, traction network, input filter and drive system, the analysis of system operation was carried out. The non-linear differential equations describing the system were formulated and the points of balance were calculated. The relationships concerning the minimum value of the filter capacity ensuring proper work of the system were obtained on the basis of stability conditions. The waveforms of voltages in the system in stable and unstable working conditions obtained as result of computer simulation using Maple program are shown in the paper. Selected results of laboratory tests of the stability of the traction drive system equipped with the current and speed controllers are also shown here. The specific attention was paid to the influence of the filter capacitor capacity, line resistance and load current on the filter capacitor voltage fluctuations.

1. Wprowadzenie

Nowe w pełni sterowane półprzewodnikowe łączniki mocy - na przykład tranzystory IGBT, inteligentne moduły mocy IPM - umożliwiają realizację przetwórców impulsowych prądu stałego pracujących ze znacznie większą częstotliwością w porównaniu z częstotliwością impulsowania tyrystorowych przetwórców impulsowych. Stosowane dotychczas w polskim górnictwie tyrystorowe przetwórcy impulsowe sterują pracą silników trakcyjnych o łącznej mocy od 60 do 100kW, przy czym częstotliwości impulsowania nie przekraczają kilkuset Hz. Silniki te zasilane są poprzez filtr wejściowy z sieci trakcyjnej o napięciu 250V [3]. Nowe elementy półprzewodnikowe pozwalają uzyskać częstotliwości impulsowania rzędu kilkunastu, a nawet kilkudziesięciu kiloherców. Schemat laboratoryjnego układu przetwórcy impulsowego z inteligentnym modułem mocy PM200DSA060 ($I_C=200A$, $U_{CES}=600V$, $f_{max}=20kHz$) przedstawiono na rysunku 1. Układ zasilany jest poprzez filtr wejściowy LC typu Γ ze źródła napięcia o stałej wartości 250V. Na rysunku pominięto obwody wspomaganie komutacji (snubbers). Zewnętrzny układ sterowania umożliwia zmianę

częstotliwości impulsowania przetwórcy oraz zmianę współczynnika wysterowania w pełnym zakresie.



Rys.1. Schemat laboratoryjnego układu impulsowego sterowania silnikiem

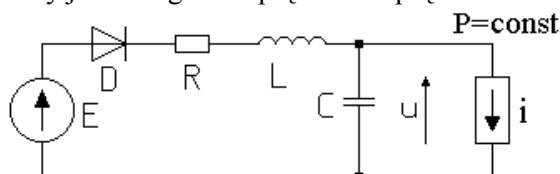
Łącznik L przeznaczony jest do badań przebiegów napięć i prądów inteligentnego modułu mocy w stanach zwarcia. Do wykonania zwarcia odbiornika wykorzystano styk próżniowego stycznika SV5, który nie ma cewki gasikowej, a tym samym nie ogranicza szybkości narastania prądu zwarcia.

Filtry w napędach trakcyjnych ograniczają negatywne skutki przepływu impulsowego prądu przetwórcy przez sieć trakcyjną i źródło

zasilania (straty mocy, przepięcia, zakłócenia). W ustalonych stanach pracy napędu zwiększenie częstotliwości impulsowania pozwala na znaczne zmniejszenie pojemności C i indukcyjności L elementów filtru. W przybliżeniu wartości tych elementów są odwrotnie proporcjonalne do częstotliwości impulsowania. Jednak istotna zmiana pojemności i indukcyjności może być niedopuszczalna z uwagi na konieczność zapewnienia stabilnej pracy impulsowego układu sterowania silnikami trakcyjnymi w stacjach przejeściowych.

2. Analiza warunków stabilnej pracy

Filtry wejściowe o dużych wartościach indukcyjności i pojemności oraz sieć trakcyjna o parametrach zmieniających się wraz ze zmianą odległości pojazdu od podstacji zasilającej mogą być przyczyną wystąpienia słabo tłumionych lub narastających oscylacji prądu i napięcia w trakcyjnym układzie zasilania. Do analizy warunków stabilnej pracy przyjęto uproszczony schemat zastępczy dla najprostszego przypadku systemu trakcyjnego (rys. 2), uwzględniający filtr wejściowy tylko jednego pojazdu, układ napędowy pojazdu, indukcyjność i rezystancję sieci trakcyjnej oraz podstację trakcyjną [1,4,7]. Założono, że układ sterowania napędu wyposażony jest w regulator prędkości i prądu.



Rys.2. Schemat zastępczy uproszczonego systemu trakcyjnego

Źródło napięcia z diodą modeluje podstację trakcyjną, elementy R, L, C są zastępczymi parametrami sieci trakcyjnej oraz filtru wejściowego pojazdu. Źródło prądowe modeluje obciążenie pojazdu w ustalonym stanie pracy przy stałym momencie obciążenia i stałej prędkości kątowej, a więc przy stałej mocy P, niezależnie od wartości napięcia na kondensatorze C. Przyjęto dodatkowo następujące założenia upraszczające:

- napięcie źródła ma stałą wartość, a rezystancję i indukcyjność źródła można pominąć;
- elementy R, L, C są liniowe.

Równanie opisujące przebiegi napięcia kondensatora filtru $u(t)$ dla stanu pracy silnikowej napędu (z pominięciem diody D) ma postać:

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

Powyższe nieliniowe, autonomiczne równanie różniczkowe zwyczajne drugiego rzędu zapisać można w postaci układu dwóch równań pierwszego rzędu:

$$\begin{cases} \frac{du}{dt} = v = f_1(u, v) \\ \frac{dv}{dt} = \frac{1}{LC} \left[E - \left(RC - \frac{LP}{u^2} \right) v - u - R \frac{P}{u} \right] = f_2(u, v) \end{cases} \quad (2)$$

Punkty równowagi (krytyczne) wyznaczono na podstawie warunku zerowania się prawych stron układu równań (2). Punkty te obliczono z równania równowagi:

$$u^2 - Eu + RP = 0 \quad (3)$$

$$u_1 = \frac{E + \sqrt{E^2 - 4RP}}{2} = u_0 \quad (4)$$

$$u_2 = \frac{E - \sqrt{E^2 - 4RP}}{2} \quad (5)$$

Z uwagi na dopuszczalne spadki napięcia w kopalnianych sieciach trakcyjnych istotne praktyczne znaczenie ma pierwiastek $u_1 = u_0$.

Dokonano linearyzacji układu równań (2) wyznaczając macierz Jacobiego [2, 6, 8]:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u} & \frac{\partial f_1}{\partial v} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u} & \frac{\partial f_2}{\partial v} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Wyznacznik tej macierzy w punkcie równowagi ($u = u_0, v = 0$) ma postać:

$$|A| = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{LC} & -\frac{R}{L} + \frac{P}{u_0^2 C} \end{vmatrix} \quad (7)$$

Równanie charakterystyczne otrzymuje się na podstawie zależności:

$$p(\lambda) = \lambda^2 - (trA)\lambda + \det A = 0 \quad (8)$$

gdzie ślad macierzy trA jest sumą wyrazów na przekątnej głównej.

Po wykonaniu obliczeń równanie charakterystyczne wyraża się zależnością:

$$LC\lambda^2 - \left(RC - \frac{PL}{u_0^2} \right) \lambda + 1 = 0 \quad (9)$$

O stabilności rozwiązań układu nieliniowego (2) można wnioskować na podstawie twierdzenia Grobmana – Hartmana [8]. Jeżeli pierwiastki równania charakterystycznego mają

niezerowe części rzeczywiste $\left(RC \neq \frac{PL}{u_0^2} \right)$ i gdy

$RC - \frac{PL}{u_0^2} > 0$, to punkt równowagi jest stabil-

nym punktem równowagi, a gdy ponadto:

$$RC - \frac{PL}{u_0^2} > 2\sqrt{LC} \quad (10)$$

to przebiegi napięć kondensatora mają charakter aperiodyczny.

Warunek stabilnej pracy układu z uwzględnieniem zależności (4) na napięcie kondensatora w punkcie równowagi ma postać:

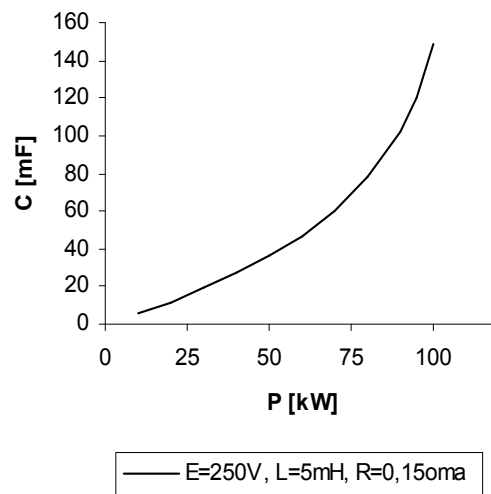
$$RC - \frac{2LP}{E^2 - 2RP + E\sqrt{E^2 - 4RP}} > 0 \quad (11)$$

a zatem pojemność kondensatora filtra dla zapewnienia stabilnej pracy powinna być wyznaczana z zależności:

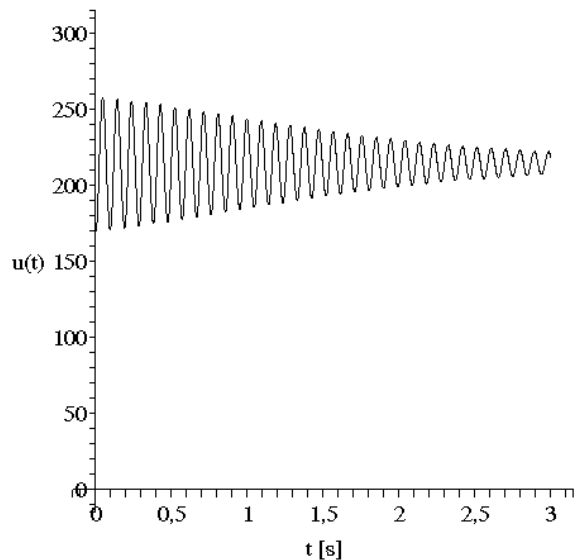
$$C > \frac{2LP}{R(E^2 - 2RP + E\sqrt{E^2 - 4RP})} \quad (12)$$

3. Wyniki badań symulacyjnych

Badania symulacyjne stabilności wybranych stanów pracy układu impulsowego sterowania napędu lokomotyw wykonano wykorzystując komputerowy program obliczeń symbolicznych Maple. Na podstawie wzoru (12) wyznaczono zależność minimalnej wartości pojemności kondensatora filtra C_{\min} w funkcji mocy napędu przy ustalonych pozostałych parametrach, to jest indukcyjności $L=5\text{mH}$, rezystancji $R=0,15\Omega$ oraz wartości napięcia zasilania $E=250\text{V}$ (rys. 3). Wraz ze wzrostem mocy silników trakcyjnych minimalna wartość pojemności kondensatora filtra zapewniająca stabilną pracę układu szybko rośnie (przy mocach powyżej 50kW zależność ma postać zbliżoną do funkcji kwadratowej). Otrzymane w wyniku obliczeń wartości pojemności kondensatora są zdecydowanie większe od pojemności kondensatorów filtrów stosowanych w eksploatowanych lokomotywach ze sterowaniem tyrystorowym (typowe parametry elementów filtra: indukcyjność dławika $L \approx 2\text{mH}$, pojemność $C \approx 20\text{mF}$). Uzyskany w wyniku symulacji przykładowy przebieg napięcia kondensatora filtra w warunkach stabilnej pracy układu ($C > C_{\min} = 36\text{mF}$), przy $L=5\text{mH}$, $R=0,15\Omega$, $C=38\text{mF}$, $E=250\text{V}$, $P=50\text{kW}$, dla warunku początkowego $u(0)=175\text{V}$ zamieszczono na rysunku 4. Przebieg ma charakter drgań oscylacyjnych o charakterze tłumionym.



Rys. 3. Charakterystyki $C_{\min} = f(P)$



Rys. 4. Przebieg napięcia kondensatora filtra

Przykładowy wynik symulacji pracy układu w stanie niestabilnym przy wartości pojemności filtra $C=35,5\text{mF} < C_{\min}=36\text{mF}$ i wartości początkowej napięcia kondensatora filtra 200V zamieszczono na rysunku 5. W tym przypadku przebieg napięcia kondensatora filtra ma postać oscylacji o narastającej amplitudzie.

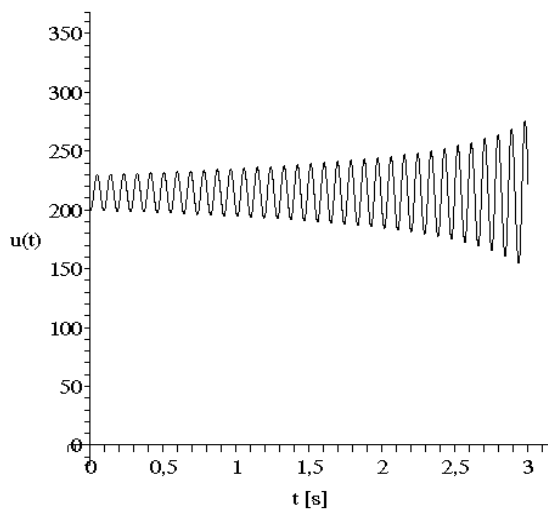
Zależność minimalnej wartości pojemności C_{\min} w funkcji rezystancji sieci trakcyjnej dla różnych wartości mocy napędu ($E=250\text{V}$, $L=5\text{mH}$) zamieszczono na rysunku 6. Zakres zmian sumarycznej rezystancji w obwodzie, a w szczególności maksymalną jej wartość, można wyznaczyć dla danej mocy napędu na podstawie schematu zastępczego systemu trakcyjnego dla stanu ustalonego (rys. 2). Z bilansu mocy w układzie wynika, że moc odbiornika jest równa

mocy źródła pomniejszonej o moc strat w rezystancji R : $P = EI - I^2 R$. Podstawiając $I = \frac{E - u}{R}$ otrzymuje się:

$$P = \frac{E(E - u)}{R} - \left(\frac{E - u}{R}\right)^2 R \quad (13)$$

Z warunku na ekstremum tej funkcji $\frac{dP}{du} = 0$ wyznacza się wartość napięcia u , przy której wystąpi maksimum ($u = \frac{E}{2}$) i wówczas

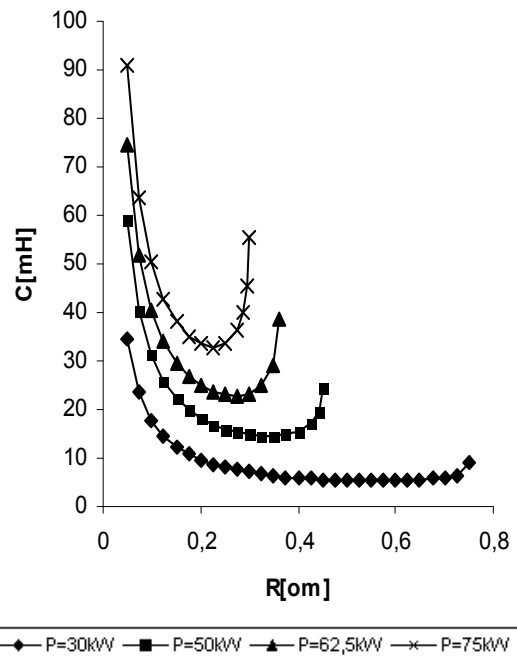
$$P_{\max} = \frac{E^2}{2R} - \frac{E^2}{R} = \frac{E^2}{4R}. \quad (14)$$



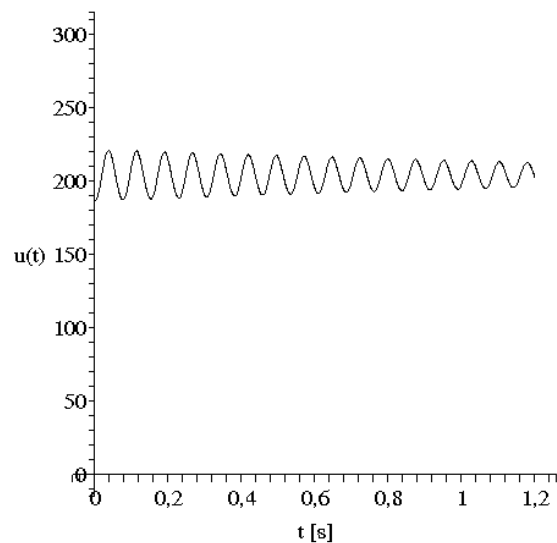
Rys. 5. Przebieg napięcia kondensatora filtru

Z zależności (14) przy danej mocy i danej wartości napięcia źródła zasilającego może być wyznaczona maksymalna wartość rezystancji w układzie, przy której możliwe jest dostarczenie do odbiornika założonej mocy i ta wartość rezystancji limituje zakres zmian rezystancji dla danej mocy na rysunku 6.

Z przebiegu krzywych na rysunku 6 wynika, że początkowo wraz ze wzrostem rezystancji R w gałęzi źródła sieci zasilającej (rys. 2) minimalne wartości pojemności, przy których praca układu jest stabilna, maleją, a następnie wraz ze wzrostem rezystancji rosną. Dokonano symulacji pracy układu przy ustalonych wartościach $P=50\text{kW}$, $E=300\text{V}$, $L=5\text{mH}$, $C=15,6\text{mF}$ i początkowej wartości napięcia na kondensatorze filtru około 190V , dla dwóch różnych wartości rezystancji $R=390\text{m}\Omega$ (rys. 7) i $R=405\text{m}\Omega$ (rys. 8). Przy wzroście rezystancji w analizowanym nieliniowym obwodzie zmienił się charakter przebiegów z oscylacyjnych tłumionych na oscylacyjne nietłumione.



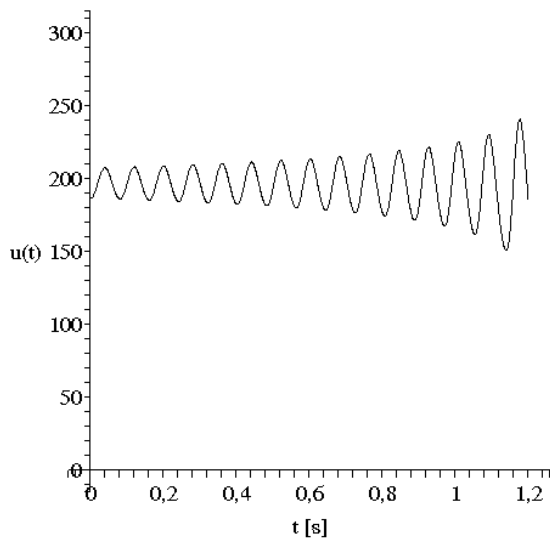
Rys. 6. Charakterystyki $C_{\min} = f(R)$



Rys. 7. Przebieg napięcia kondensatora filtru

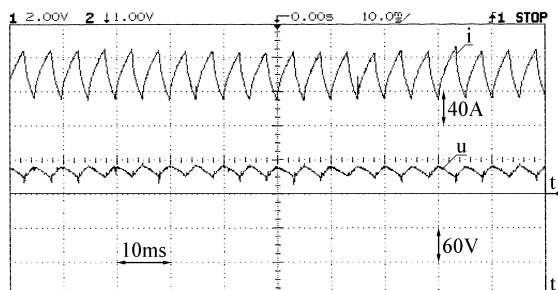
4. Badania laboratoryjne

Do badań laboratoryjnych wykorzystano silnik napędowy przewodowej lokomotywy kopalnia-nej typu Ld 31 o mocy 45kW , obciążony prądnicą obcowzbudną (rys. 1). Sterowanie prędkością obrotową silnika odbywa się poprzez układ tyrystorowego przekształtnika impulsowego prądu stałego o częstotliwości pracy około 200Hz . Układ regulacji wyposażony jest w regulator prędkości i prądu. Pomiar prędkości wału odbywa się za pomocą zabudowanego na wale przetwornika impulsowo-obrotowego. Podczas badań zmieniano parametry elementów

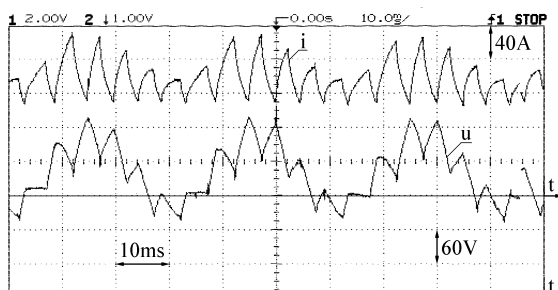


Rys.8. Przebieg napięcia kondensatora filtru

R i C (rys. 2). Na rysunkach 9 i 10 zamieszczono oscylogramy z przebiegami napięcia kondensatora filtru (dolny przebieg) i prądu silnika trakcyjnego dla dwóch różnych wartości pojemności kondensatora filtru, przy niezmiennych pozostałych parametrach układu i przy takiej samej średniej wartości prądu obciążenia $I_0=150\text{A}$. W przypadku, gdy pojemność kondensatora filtru $C=10,6\text{mF}$ (rys. 9), w przebiegu



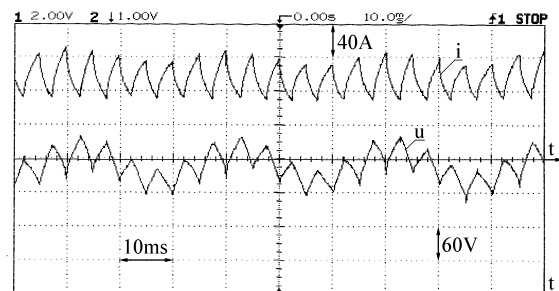
Rys.9. Przebiegi napięcia kondensatora filtru i prądu silnika



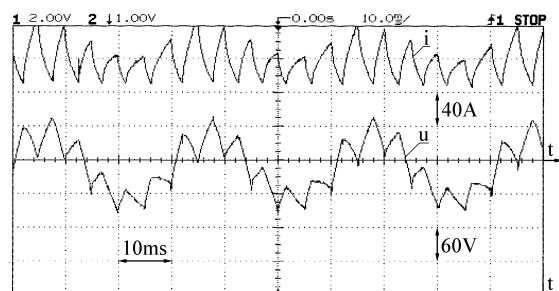
Rys.10. Przebiegi napięcia kondensatora filtru i prądu silnika

napięcia kondensatora pojawiają się wahania napięcia wywołane impulsową pracą przekształtnika o częstotliwości 200Hz. Przy zbyt

małej wartości pojemności kondensatora (6,6mF) w układzie wystąpiły nietłumione oscylacje napięcia kondensatora filtru, przy czym wartość chwilowa napięcia kondensatora przekracza o ponad 20% wartość napięcia zasilania. Taki chwilowy wzrost napięcia kondensatora może być przyczyną uszkodzenia inteligentnego modułu mocy w wyniku pojawienia się przepięcia o dużej wartości w przypadku zwarcia w odbiorniku. Wartość przepięcia podczas wyłączania prądu zwarcia przez inteligentny moduł mocy istotnie zależy od chwilowej wartości napięcia kondensatora filtru [5]. Ponadto amplituda oscylacji napięcia w niestabilnym stanie pracy rośnie wraz ze wzrostem prądu obciążenia. Przykładowo na oscylogramach 11 i 12 zaprezentowano przebiegi napięcia kondensatora filtru i prądu silnika trakcyjnego dla dwóch różnych średnich wartości prądu silnika $I_0=100\text{A}$ (rys.11) i $I_0=125\text{A}$ (rys.12), przy niezmiennych pozostałych parametrach układu.



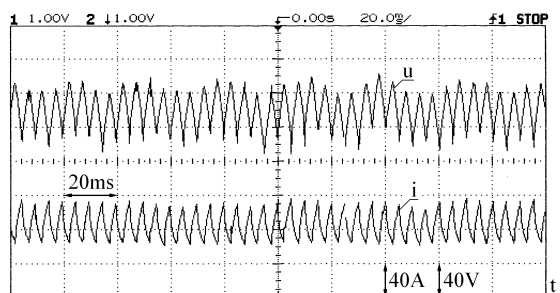
Rys.11. Przebiegi napięcia kondensatora filtru i prądu silnika



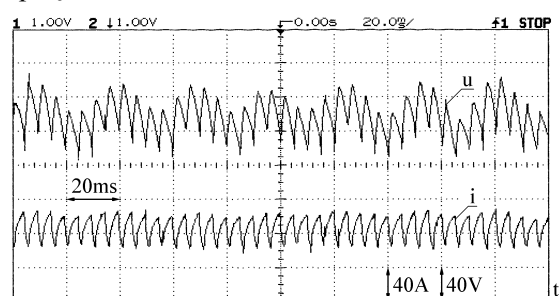
Rys.12. Przebiegi napięcia kondensatora filtru i prądu silnika

Podczas badań laboratoryjnych potwierdzono otrzymane wcześniej w wyniku analizy i badań symulacyjnych specyficzne dla obwodów nieliniowych zjawisko, że wzrost tłumienia w układzie może być przyczyną pojawienia się oscylacji. Oscylogramy na rysunkach 13 i 14 uzyskano dla dwóch różnych wartości dodatkowych rezystancji $R_d=0$ (rys. 13) i $R_d=0,5\Omega$ (rys. 14), przy niezmiennych po-

zostałych parametrach obwodu. Wzrost rezystancji włączonej szeregowo ze źródłem energii spowodował istotny wzrost amplitudy oscylacji.



Rys.13. Przebiegi napięcia kondensatora filtru i prądu silnika



Rys.14. Przebiegi napięcia kondensatora filtru i prądu silnika

5. Podsumowanie

Podczas dotychczas wykonanych fragmentarycznych badań układu laboratoryjnego nie stwierdzono niestabilności układu, która charakteryzowałaby się narastaniem amplitudy oscylacji, co sugerowałyby wyniki obliczeń analitycznych i badań symulacyjnych. Również badania laboratoryjne i doświadczenia ruchowe z wieloletniej eksploatacji układów impulsowego sterowania lokomotyw nie potwierdzają takiej, jak by to wynikało z prezentowanych rezultatów badań symulacyjnych, podatności układów impulsowego sterowania do niestabilności. Należy jednak stwierdzić, że uszkodzenia kondensatorów filtru są najczęstszym powodem awarii. Przyczyną wymienionych wyżej rozbieżności może być bardzo uproszczony model systemu trakcyjnego. Wątpliwości budzi sposób wyznaczenia prądu pobieranego przez przekształtnik z kondensatora filtru, wynikający z założenia stałej mocy czynnej odbiornika, ograniczenie liczby pojazdów zasilanych z tej samej podstacji trakcyjnej do jednego pojazdu, pominięcie złożonych zależności dotyczących strat mocy w rdzeniu dławika i wpływu podmagnesowania dławika filtru składową stałą prądu na wartość indukcyjności dławika. Niemniej jednak, nawet tak uproszczony model systemu po-

zwala na próbę jakościowego oszacowania charakteru zjawisk w tym złożonym układzie i wyznaczenia przybliżonych ilościowych zależności między parametrami elementów.

7. Literatura

- [1]. Bae B-H, Cho B-H, Sul S-K Sul.: *Damping control strategy for vector controlled traction drive*. EPE 2001, Graz
- [2]. Demidowicz B. P.: *Matematyczna teoria stabilności*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1972
- [3]. Dudek R., Kosiorowski S., Żuchowicz M.: *Doświadczenia eksploatacyjne tyrystorowych układów sterowania lokomotyw kopalnianych*. Materiały II Międzynarodowej Konferencji Naukowej Współczesne Systemy Zasilania i Napędu Pojazdów Trakcyjnych, Warszawa 5-7 października 1995, s. 57-62
- [4]. Karwowski K., Skibicki J.: *Analiza stabilności pracy sieciowych pojazdów z napędem energoelektronicznym*. Materiały XI Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej Trakcja Elektryczna SEMTRAK 2004, Kraków – Zakopane październik 2004, s. 223-230
- [5]. Kosiorowski S., Stobiecki A., Żuchowicz M., Dudek R.: *Stany przejściowe w filtrach wejściowych przekształtników impulsowych elektrycznych lokomotyw kopalnianych*. Materiały 7 Międzynarodowej Konferencji Naukowej Nowoczesna Trakcja Elektryczna w zintegrowanej Europie XXI wieku, Warszawa 29 września-2 października 2005, s. 215-220
- [6]. Kudrewicz J.: *Nieliniowe obwody elektryczne. Teoria i symulacja komputerowa*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1996
- [7]. Mosskull H.: *DC-link stabilization of an induction machine drive*. EPE 2003, Toulouse
- [8]. Ombach J.: *Wykłady z równań różniczkowych wspomaganie komputerowo – Maple*. Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków 1999

Autorzy

Stanisław Kosiorowski
(kosiorsk@kaniup.agh.edu.pl)

tel. 012-6172811

Andrzej Stobiecki
(astob@kaniup.agh.edu.pl)

tel. 012-6172862

Marek Żuchowicz
(zuchow@kaniup.agh.edu.pl)

tel. 012-6172811

Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków