

Roman Dudek, Stanisław Kosiorowski, Andrzej Stobiecki
Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

STANY PRZEJŚCIOWE W FILTRACH WEJŚCIOWYCH NAPĘDÓW TRAKCYJNYCH STEROWANYCH IMPULSOWO PRZY PRACY SILNIKOWEJ I PRĄDNICOWEJ

TRANSIENT STATES IN INPUT FILTERS OF PULSE-MODE CONTROLLED TRACTION DRIVES IN MOTORING AND GENERATING MODE OF OPERATION

Abstract: Analysis of stable operation conditions of the input filters of the mine locomotives' drive systems was presented in the paper. Equations describing the drive system in various operation states were formulated on the basis of a simplified model of the traction system. The points of balance were obtained and linearization of the system was carried out using the power series method and Jacobi matrix. Conditions of stable operation concerning the minimum value of the input filter capacitance depending on the parameters of the supply source and traction network and also on the characteristics and operation states of the drive were given. Special attention was paid to the analysis of the stable operation conditions in the generating mode during braking. Selected results of simulation and laboratory tests concerning the stable operation conditions of the input filter of the drive system of the pulse-mode controlled mine locomotive were presented. Laboratory tests were carried out using a laboratory stand equipped with a 45 kW traction motor of the mine locomotive type Ld 31.

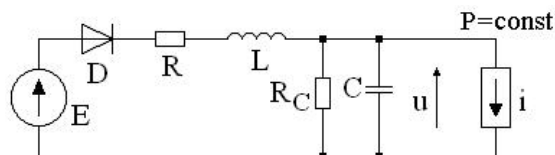
1. Wprowadzenie

Na podstawie doświadczeń z eksploatacji elektrycznych lokomotyw kopalnianych z impulsowymi układami sterowania [3] można stwierdzić, że najczęstszą przyczyną awarii przekształtników są uszkodzenia baterii kondensatorów filtra wejściowego. Jednym z powodów może być niestabilna praca układu, w wyniku której pojawiają się niskoczęstotliwościowe nietłumione oscylacje w przebiegach prądu i napięcia kondensatora filtra. Przyczyną pojawienia się tych oscylacji mogą być między innymi zmiany napięcia źródła zasilania, zmiany indukcyjności i rezystancji sieci trakcyjnej, jednoczesna praca kilku lokomotyw zasilanych z tej samej stacji trakcyjnej. Warunki stabilnej pracy są szczególnie istotne w nowych rozwiązaniach przekształtników energoelektronicznych z tranzystorami mocy, które umożliwiają znacznie większą częstotliwość pracy. Z punktu widzenia negatywnych skutków przepływu impulsowego prądu przez sieć trakcyjną i źródło zasilania (przebiecia, zakłócenia, straty mocy) zwiększenie częstotliwości impulsowania pozwala na istotne zmniejszenie pojemności i indukcyjności elementów filtra wejściowego. O poprawnym doborze parametrów tych elementów decydują jeszcze inne kryteria, między innymi związane ze stabilną pracą układu sterowania napędem. W artykule przedstawiono wy-

brane zagadnienia dotyczące warunków stabilnej pracy filtrów wejściowych przekształtników impulsowych w stanie pracy silnikowej i prądnicowej napędu.

2. Praca silnikowa napędu

Do analizy warunków stabilnej pracy przyjęto uproszczony schemat zastępczy dla najprostszego systemu trakcyjnego (rys. 1), uwzględniającego filtr wejściowy jednego pojazdu, układ napędowy pojazdu wraz z przekształtnikiem, sieć trakcyjną oraz podstację trakcyjną [1, 4, 7].



Rys. 1. Schemat zastępczy systemu trakcyjnego

Źródło napięcia z diodą modeluje podstację trakcyjną, elementy R, C i L są zastępczymi parametrami źródła zasilania, sieci trakcyjnej oraz filtra wejściowego pojazdu. Rezystor R_C to sumaryczna rezystancja obwodów pomocniczych i ewentualnego obwodu tłumienia przepięć i oscylacji. Taki sposób tłumienia przepięć i oscylacji zalecany jest w niektórych publikacjach [1], na przykład dotyczących tłumienia

oscylacji w filtrach wejściowych falowników napięcia w napędzie trakcyjnym z silnikami prądu przemiennego. 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 .

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

$$\frac{d^2 u}{dt^2} = \quad (1)$$

$$\frac{1}{LC} \left[E - \left(\frac{L}{R_C} + CR - \frac{LP}{u^2} \right) \frac{du}{dt} - \left(1 + \frac{R}{R_C} \right) u - R \frac{P}{u} \right]$$

Na podstawie powyższego równania w publikacji [5] wyznaczono punkty równowagi (krytyczne) i dokonano linearyzacji zastępczego układu równań metodą szeregów potęgowych. Następnie na podstawie macierzy Jacobiego [2] zapisano równanie charakterystyczne i sformułowano warunki umożliwiające określenie minimalnej wartości pojemności kondensatora filtru zapewniającej stabilną pracę układu. Uzyskana zależność ma postać:

$$C > \frac{2LPA^2}{R(E^2 - 2RPA + E\sqrt{E^2 - 4RPA})} - \frac{L}{R_C R} \quad (2)$$

$$\text{gdzie } A = \left(1 + \frac{R}{R_C} \right).$$

3. Wyniki badań stabilności przy pracy silnikowej

Do obliczeń i badań symulacyjnych wpływu parametrów źródła zasilania, sieci trakcyjnej, filtru wejściowego przekształtnika i stanów pracy układu napędowego na warunki stabilnej pracy wykorzystano program obliczeń symbolicznych Maple.

Przy pominięciu rezystancji bocznikującej kondensator filtru ($R_C = \infty$), nierówność (2) można zapisać:

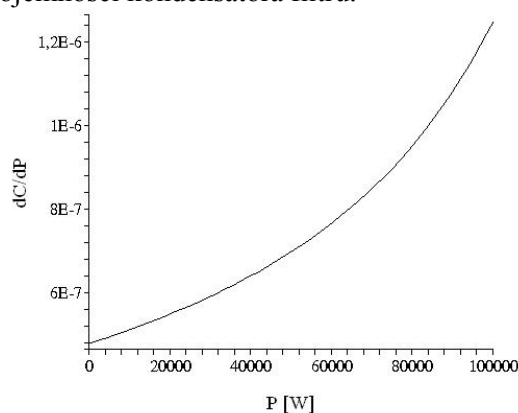
$$C > \frac{2LP}{R(E^2 - 2RP + E\sqrt{E^2 - 4RP})} \quad (3)$$

Z zależności (3) bezpośrednio wynika, że wraz ze wzrostem indukcyjności sieci trakcyjnej rośnie minimalna wartość pojemności zapewniająca stabilną pracę układu. Badając zmienność prawej strony zależności (3) w funkcji mocy można stwierdzić, że wraz ze wzrostem mocy

przy ustalonych pozostałych parametrach ($E=250V$, $L=3mH$, $R=0,1\Omega$) rośnie również minimalna wartość pojemności kondensatora. Pochodna tej funkcji ma postać

$$\frac{dC}{dP} = \frac{2L}{RB} - \frac{2LP \left(-2R - \frac{2ER}{\sqrt{E^2 - 4RP}} \right)}{RB^2} \quad (4)$$

gdzie: $B = E^2 - 2RP + E\sqrt{E^2 - 4RP}$, a jej wykres przedstawiono na rysunku 2. W założonym zakresie zmian mocy pochodna wyrażona wzorem (4) jest dodatnia, a zatem wraz ze wzrostem mocy napędu wzrasta minimalna wartość pojemności kondensatora filtru.



Rys. 2. Zależność dC/dP w funkcji P

Obliczono również pochodną prawej strony zależności (3) względem napięcia zasilania E

$$\frac{dC}{dE} = - \frac{2LP \left(2E + \sqrt{E^2 - 4RP} + \frac{E^2}{\sqrt{E^2 - 4RP}} \right)}{RB} \quad (5)$$

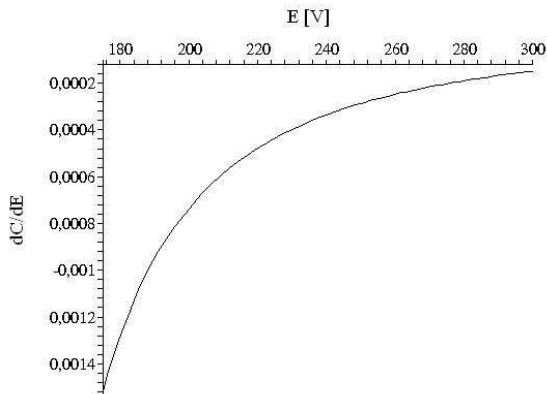
a jej wykres zamieszczono na rysunku 3 dla następujących wartości parametrów: $P=50kW$, $L=3mH$, $R=0,1\Omega$. Wraz ze zmniejszaniem napięcia zasilania wzrasta wartość pojemności kondensatora zapewniająca stabilną pracę układu.

Interesujący jest wpływ zmian rezystancji sieci trakcyjnej na warunki stabilnej pracy. Na podstawie wzoru na pochodną funkcji względem R

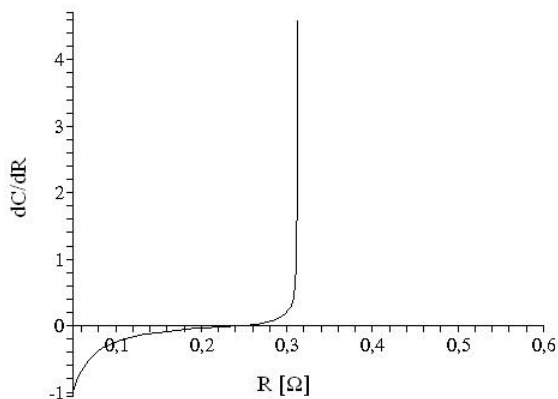
$$\frac{dC}{dR} = \frac{2LP}{R^2 B} - \frac{2LP \left(-2P - \frac{2EP}{\sqrt{E^2 - 4RP}} \right)}{RB^2} \quad (6)$$

wyznaczono wykres tej pochodnej w funkcji rezystancji R (rys. 4) dla następujących wartości parametrów: $E=250V$, $L=3mH$, $P=50kW$. Początkowo wraz ze wzrostem rezystancji minimalna pojemność maleje (rezystancja wpływa

stabilizująco), ale przy dalszym wzroście tej rezystancji minimalna wartość pojemności kondensatora zwiększa się. Zatem wzrost rezystancji sieci trakcyjnej (na przykład na skutek pogorszenia stanu połączeń szyn) może być przyczyną pojawienia się oscylacji w układzie, jeśli pojemność kondensatora filtru nie będzie dostatecznie duża.



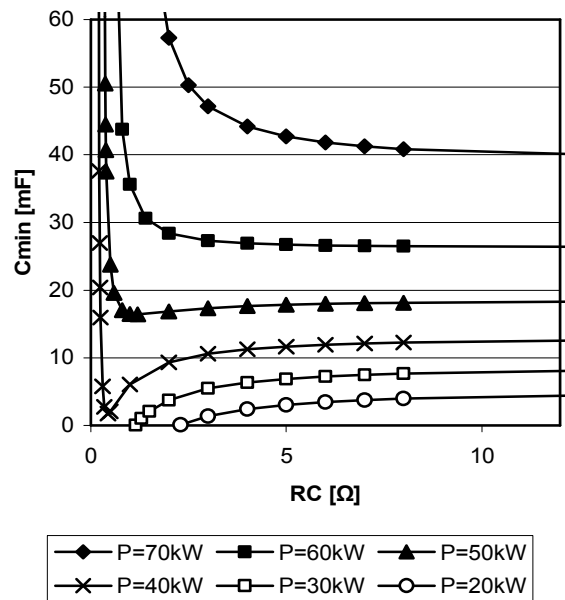
Rys. 3. Zależność dC/dE w funkcji E



Rys. 4. Zależność dC/dR w funkcji R

Interesujący jest również wpływ rezystancji R_C bocznikującej kondensator filtru na minimalną wartość pojemności tego kondensatora, zapewniającą stabilną pracę układu. Na podstawie obliczeń w programie Maple wyznaczono zależność (rys. 5) minimalnej pojemności kondensatora w funkcji tej rezystancji dla różnych mocy napędu przy ustalonych pozostałych parametrach układu ($R=0,2\Omega$, $E=250V$, $L=3mH$). Wraz ze zmianą wartości mocy napędu następują zmiany ilościowe i jakościowe w przebiegach charakterystyk. Istotne zmiany ilościowe występują przy stosunkowo małych wartościach rezystancji, co odpowiada znacznej mocy w niej traconej (do kilkudziesięciu procent mocy napędu). Ze wzrostem mocy napędu zmienia się charakter krzywych: przy małych mocach wraz ze zmniejszaniem się rezystancji R_C maleje mi-

nimalna wartość pojemności kondensatora filtru (R_C działa stabilizująco), ale dla większych mocy napędu wraz ze zmniejszaniem się rezystancji wartość pojemności koniecznej do zapewnienia stabilnej pracy wzrasta.



Rys. 5. Charakterystyki $C_{min}=f(R_C)$

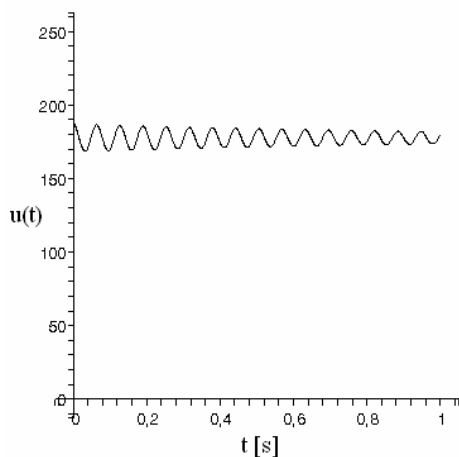
Przykładowe przebiegi napięcia kondensatora filtru uzyskane w wyniku obliczeń dla ustalonych parametrów układu $P=64,2kW$, $L=2,4mH$, $E=250V$, $R=0,2\Omega$, $C=24,9mF$, przy wartości początkowej napięcia na kondensatorze $U_C(0)=187V$, dla dwóch wartości rezystancji R_C bocznikującej kondensator filtru zamieszczono na rysunkach 6 i 7. Zmniejszenie wartości rezystancji dołączonej równolegle do kondensatora filtru spowodowało w tym przypadku pojawienie się narastających oscylacji napięcia.

4. Praca prądnicowa napędu

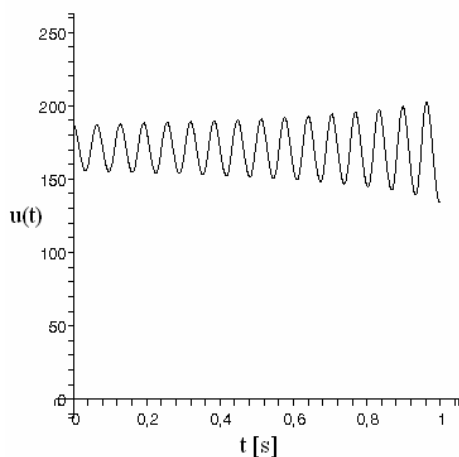
W stanie pracy prądnicowej podczas hamowania odzyskowego maszyn trakcyjnych następuje zmiana kierunku przepływu energii (rys. 8). Energia hamującego pojazdu przekazywana jest poprzez sieć trakcyjną do źródła zasilania lub do innych pojazdów zasilanych z tej samej podstacji trakcyjnej. Równania opisujące procesy w układzie przy założeniu stałej mocy hamowania mają następującą postać:

$$E + Ri + L \frac{di}{dt} = u$$

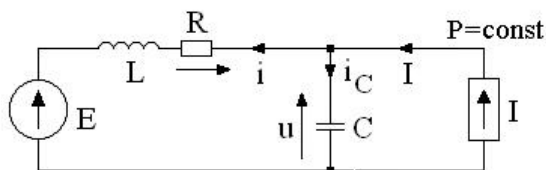
$$I = \frac{P}{u} = i + C \frac{du}{dt} \quad (7)$$



Rys. 6. Przebieg napięcia kondensatora ($R_C=1M\Omega$)



Rys. 7. Przebieg napięcia kondensatora ($R_C=10\Omega$)



Rys. 8. Schemat zastępczy systemu trakcyjnego dla hamowania odzyskowego

Po przekształceniach otrzymuje się:

$$\frac{d^2 u}{dt^2} = \frac{I}{LC} \left[E - \left(CR + \frac{LP}{u^2} \right) \frac{du}{dt} - u + \frac{RP}{u} \right] \quad (8)$$

Do analizy warunków stabilnej pracy układu powyższe równanie dogodnie jest zapisać w postaci dwóch równań pierwszego rzędu:

$$\left. \begin{aligned} \frac{du}{dt} &= v = f_1(u, v) \\ \frac{dv}{dt} &= \frac{I}{LC} \left[E - \left(CR + \frac{LP}{u^2} \right) v - u + \frac{RP}{u} \right] = f_2(u, v) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Punkty równowagi (krytyczne) wyznaczyć można z warunku zerowania się prawych stron układu równań (9):

$$\begin{aligned} u_1 &= \frac{E + \sqrt{E^2 + 4RP}}{2} = u_o \\ u_2 &= \frac{E - \sqrt{E^2 + 4RP}}{2} \end{aligned} \quad (10)$$

Praktyczne znaczenie ma punkt równowagi $u_1 = u_o$ i dla tego punktu wyznacznik Jacobiego ma postać:

$$|A| = \begin{vmatrix} 0 & I \\ \frac{I}{LC} \left(-\frac{RP}{u_o^2} - I \right) & \left(-\frac{P}{u_o^2 C} - \frac{R}{L} \right) \end{vmatrix} \quad (11)$$

Równanie charakterystyczne otrzymuje się na podstawie zależności:

$$p(\lambda) = \lambda^2 - (trA)\lambda + \det A = 0 \quad (12)$$

gdzie ślad macierzy trA jest sumą wyrazów na przekątnej głównej.

Po wykonaniu obliczeń równanie to można zapisać w formie:

$$\lambda^2 + \left(\frac{P}{u_o^2 C} + \frac{R}{L} \right) \lambda + \frac{I}{LC} \left(I + \frac{RP}{u_o^2} \right) = 0 \quad (13)$$

Z warunku stabilnej pracy:

$$\frac{P}{u_o^2 C} + \frac{R}{L} > 0 \quad (14)$$

obliczyć można minimalną wartość pojemności kondensatora filtru zapewniającą stabilną pracę napędu:

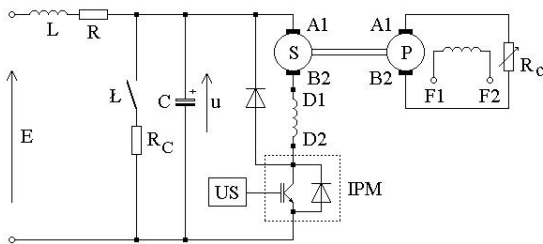
$$C > \frac{-PL}{Ru_o^2} = \frac{-PL}{R(E^2 + E\sqrt{E^2 + 4RP} + 2RP)} \quad (15)$$

A zatem dla dowolnej wartości pojemności kondensatora filtru ($C > 0$) warunek stabilnej pracy układu podczas hamowania odzyskowego jest spełniony.

5. Wyniki badań laboratoryjnych

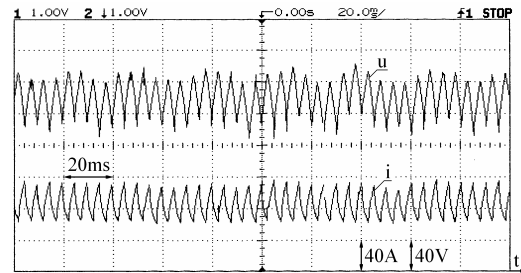
Schemat laboratoryjnego układu napędowego z impulsowym sterowaniem silnika trakcyjnego lokomotywy Ld 31 o danych znamionowych $P_N = 41,5kW$, $U_N = 250V$, $I_N = 205A$, $n_N = 1080 \text{ obr/min}$ zamieszczono na rysunku 9. Silnik zabudowany jest na wspólnym wale z prądnicą obcowzbudną i sterowany poprzez

przekształtnik impulsowy z inteligentnym modulem mocy PM200DSA060 ($I_C = 200A$, $U_{CE} = 600V$). Układ sterowania US wyposażony jest w regulator prędkości oraz regulator prądu i umożliwia zmianę częstotliwości impulsowania przekształtnika oraz zmianę współczynnikaysterowania w pełnym zakresie. Równolegle do kondensatora filtru może być dołączony poprzez łącznik L rezystor R_C .

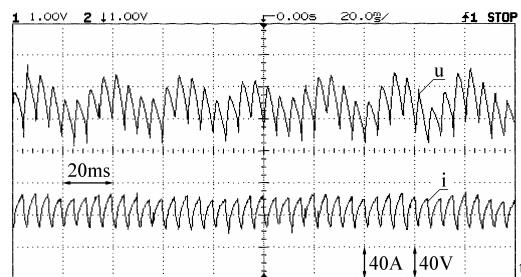


Rys. 9. Schemat laboratoryjnego układu impulsowego sterowania silnikiem

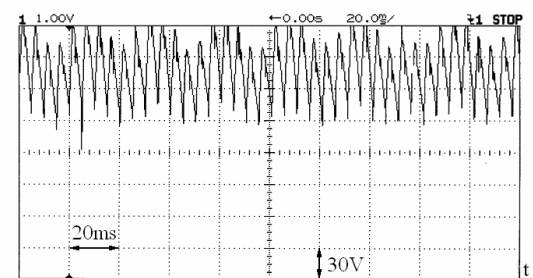
Podczas badań laboratoryjnych potwierdzono wyniki analizy i badań symulacyjnych dotyczące specyficznego dla obwodów nieliniowych zjawiska polegającego na tym, że wzrost tłumienia w układzie może być przyczyną pojawienia się oscylacji. Oscylogramy na rysunkach 10 i 11 uzyskano dla dwóch różnych wartości dodatkowych rezystancji włączonych szeregowo z rezystancją R (rys. 9) $R_d = 0$ (rys. 10) i $R_d = 0,5\Omega$ (rys. 11), przy niezmiennych pozostałych parametrach obwodu. Wzrost rezystancji włączonej szeregowo ze źródłem energii spowodował istotny wzrost amplitudy oscylacji. Również dołączenie rezystancji R_C równoległe do kondensatora filtru (rys. 9) nie zawsze eliminuje oscylacje. Przykładowo na oscylogramach pokazanych na rysunkach 12 - 14 przedstawiono przebiegi napięcia kondensatora filtru dla różnych wartości tej rezystancji, przy niezmiennych pozostałych parametrach obwodu ($R = 0,3\Omega$, $L = 6mH$, $E = 250V$, $C = 3,3mF$) i tym samym obciążeniu silnika $P \approx 14kW$. Mimo zastosowania stosunkowo małych rezystancji bocznikującej kondensator $R_C = 12\Omega$ (rys. 13) i $R_C = 6\Omega$ (rys. 14), w których wytracana moc porównywalna była z mocą silnika, oscylacje zostały zmniejszone, ale nie wyeliminowane.



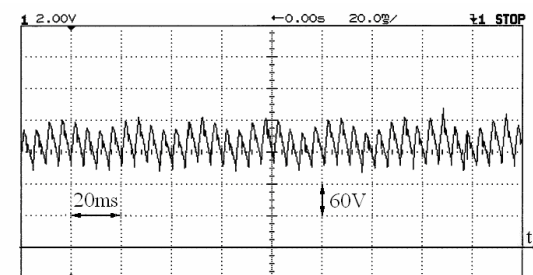
Rys. 10. Przebiegi napięcia kondensatora filtru i prądu silnika ($R_d = 0$)



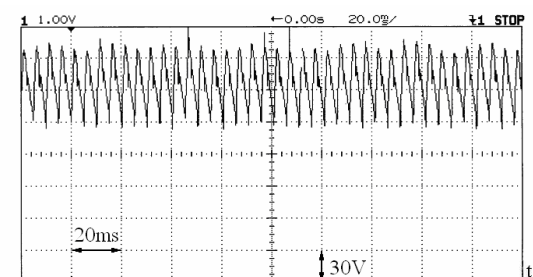
Rys. 11. Przebiegi napięcia kondensatora filtru i prądu silnika ($R_d = 0,5\Omega$)



Rys. 12. Przebieg napięcia kondensatora filtru

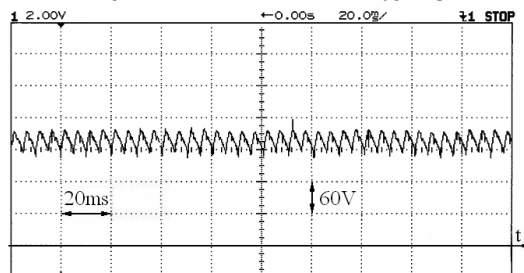


Rys. 13. Przebieg napięcia kondensatora filtru



Rys. 14. Przebieg napięcia kondensatora filtru

Na rysunku 15 zamieszczono oscylogram przebiegu napięcia po zwiększeniu pojemności kondensatora filtra do wartości 6,6mF, przy pozostałych parametrach takich samych, jak w przypadku oscylogramu z rysunku 12 ($R_C = \infty$). Zwiększenie pojemności eliminuje niskoczęstotliwościowe oscylacje w przebiegu napięcia kondensatora filtra. Pomiary dla większych mocy napędu będą mogły być wykonane po modernizacji stanowiska laboratoryjnego.



Rys. 15. Przebieg napięcia kondensatora filtra

6. Podsumowanie

W stanie pracy silnikowej napędu trakcyjnego sterowanego impulsowo mogą pojawić się niskoczęstotliwościowe oscylacje w przebiegach napięcia i prądu układu. Jednym z powodów generacji tych oscylacji może być wzrost rezystancji dolnej sieci trakcyjnej, a tłumienie tych oscylacji poprzez bocznikowanie kondensatora filtra rezystancją nie zawsze jest skuteczne. Uzyskane rezultaty pozwalają stwierdzić, że w stanie pracy prądnicowej napędu zapewnione są warunki stabilnej pracy. Dalszych badań wymaga wyjaśnienie różnicy między przebiegami uzyskanymi w wyniku obliczeń analitycznych (narastające oscylacje), a rezultatami otrzymanymi doświadczalnie (oscylacje o stałej amplitudzie).

7. Literatura

[1]. Carpita M., Zueger H., Pellerin M., Stefanutti P.: *Transformer used as a DC link filter inductance*

in DC high power traction applications. EPE 2005. Dresden

[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 Konferencji MET 1995, Warszawa 5-7 października 1995, s. 57-62

[4]. Karwowski K., Skibiński J.: *Analiza stabilności pracy sieciowych pojazdów z napędem energoelektronicznym*. Materiały Konferencji SEMTRAK 2004, Kraków – Zakopane październik 2004, s. 223-230

[5]. Kosiorowski S., Stobiecki A.: *Warunki stabilnej pracy trakcyjnych układów napędowych sterowanych impulsowo*. Materiały Konferencji SENE 2007, Łódź listopad 2007, s. 247-252

[6]. Kosiorowski S., Stobiecki A., Żuchowicz M.: *Wybrane zagadnienia stabilności trakcyjnych układów napędowych sterowanych impulsowo*. Problemy Eksploatacji Maszyn i Napędów elektrycznych PEMINE. Ustroń 2006. Maszyny elektryczne zeszyty problemowe nr 75/2006

[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

Roman Dudek
(dudek@kaniup.agh.edu.pl)
tel. 012-6172862

Stanisław Kosiorowski
(kosiorsk@kaniup.agh.edu.pl)
tel. 012-6172811

Andrzej Stobiecki
(astob@kaniup.agh.edu.pl)
tel. 012-6172862

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