

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

ZMODYFIKOWANY FILTR WEJŚCIOWY PRZEKSZTAŁTNIKOWYCH NAPĘDÓW TRAKCYJNYCH

MODIFIED INPUT FILTER OF CONVERTER-BASED TRACTION DRIVES

Abstract: New fully controlled semiconductor power switches make considerable increase of operation frequency of converters in traction drives possible. Considering undesirable consequences of pulse current flow in the supply source and in the traction network, the increase of the converter's operation frequency allows to significant decrease of the capacitance and inductance of the input filter's components. However, the decrease of the parameter values of these components can be unacceptable due to instable operation of the drive system, which results in appearance of low-frequency undamped oscillations in the current and voltage waveforms of the input filter's capacitor. Various methods of damping these oscillations presented in the literature, for example increasing of the capacitance of the filter's capacitor, inserting an additional resistor or specific control strategies have some disadvantages and are not always effective. A method to limit the unstable region of operation of the traction drive through appropriate solution of the input filter system assuming that the mass and dimensions of the filter components are not bigger and the cost is not higher than in case of commonly applied LC filter has been suggested in the paper. Results of research of the features of the modified input filter and the results of comparison analysis between this filter and the LC type Γ filter have been presented. Special attention was paid to the stable operation region and to fluctuations of current and voltage in the filter system. The research was carried out using the IsSpice simulation program and the Maple computer algebra system.

1. Wstęp

Do minimalizacji niekorzystnego oddziaływania energoelektronicznych napędów trakcyjnych na źródło energii i sieć trakcyjną stosuje się filtry wejściowe. Przepływ impulsowego prądu przez źródło zasilania i sieć trakcyjną powoduje dodatkowe straty mocy, może być przyczyną przepięć i wahań napięcia w sieci trakcyjnej oraz źródłem zakłóceń radioelektrycznych [9]. Masa, gabaryty i koszt elementów filtru wejściowego stanowią istotny składnik masy, gabarytów i kosztu przekształtnika impulsowego, stąd też uzasadnione stają się poszukiwania takich rozwiązań układowych filtrów, które byłyby pod tym względem korzystniejsze. W artykule dokonano analizy wybranych własności zmodyfikowanego układu filtru wejściowego i porównano je z klasycznym jednoogniowym filtrem LC typu Γ . Podstawowe kryteria porównawcze to: wahania napięcia kondensatora filtru oraz prądu sieci trakcyjnej i źródła zasilania, a także warunki stabilnej pracy systemu trakcyjnego [1, 2, 4, 7, 10]. Badania wykonano wykorzystując program symulacyjny IsSpice i program obliczeń symbolicznych Maple.

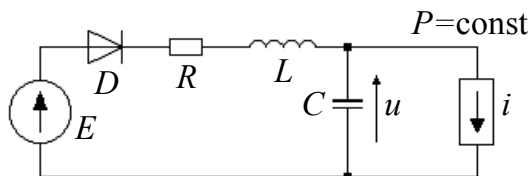
2. Warunki stabilnej pracy systemu trakcyjnego

Analizę warunków stabilnej pracy trakcyjnego układu napędowego sterowanego impulsowo z jednoogniowym filtrem typu Γ przedstawiono w publikacjach [5, 6]. Uproszczony schemat zastępczy układu, często prezentowany w literaturze [1, 2, 4, 7], zamieszczono na rysunku 1. 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 wraz z przekształtnikiem w ustalonym stanie pracy, przy stałym momencie obciążenia i stałej prędkości kątowej, a więc przy stałej mocy P , niezależnie od wartości napięcia na kondensatorze filtru. Przekształtnik wraz z tak sterowanym napędem ma więc cechy ujemnej rezystancji, ponieważ - aby utrzymać stałą moc - zwiększenie napięcia kondensatora filtru powoduje zmniejszenie prądu i vice versa. Przebieg napięcia na kondensatorze filtru $u_C(t) = u$ opisuje nieliniowe równanie

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

które można przedstawić w postaci dwóch równań pierwszego rzędu [3, 8]:

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



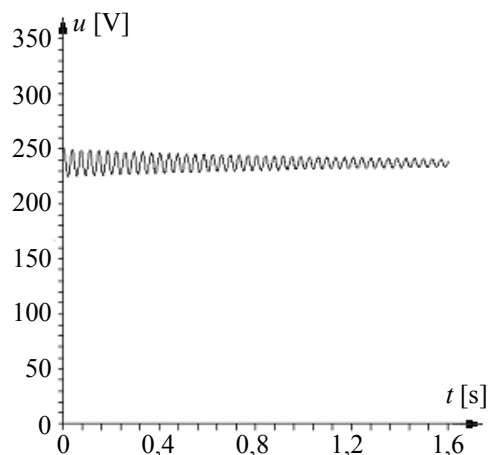
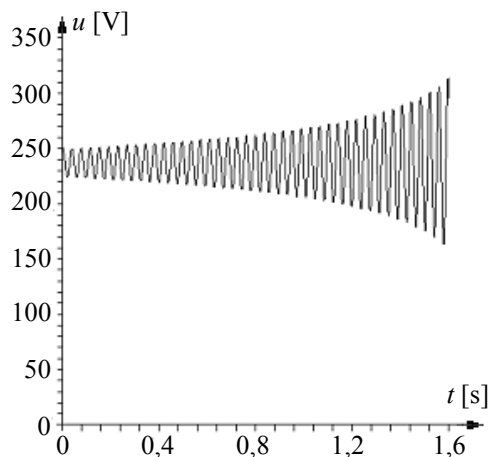
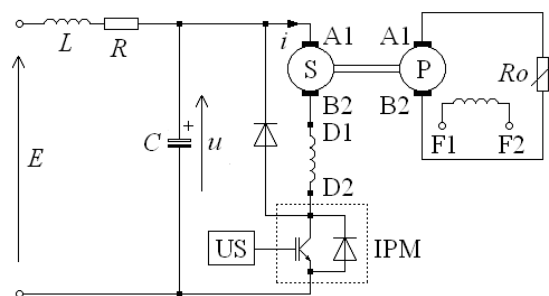
Rys. 1. Schemat zastępczy układu

Po określeniu punktów równowagi układu dokonano linearyzacji i wyznaczono minimalną wartość pojemności kondensatora filtra zapewniającą stabilną pracę układu [6]:

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

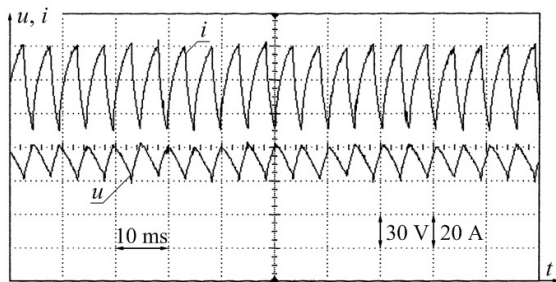
Bezpośrednio z zależności (3) wynika, że – przy ustalonych wartościach parametrów, to jest rezystancji R , napięcia źródła zasilania E i mocy napędu P – wraz ze wzrostem indukcyjności dławika filtra wejściowego przekształtnika impulsowego wzrasta minimalna wartość pojemności kondensatora filtra konieczna do zapewnienia stabilnej pracy układu. Przykładowe przebiegi napięcia kondensatora filtra, uzyskane w wyniku obliczeń w programie Maple dla dwóch różnych wartości indukcyjności, podano na rysunkach 2 ($L = 2,4 \text{ mH}$) i 3 ($L = 2,6 \text{ mH}$) przy $P = 30 \text{ kW}$, $R = 0,1 \Omega$, $E = 250 \text{ V}$ i $C = 13,3 \text{ mF}$. Również wyniki badań laboratoryjnych potwierdzają znaczny wpływ indukcyjności dławika filtra na stabilną pracę układu.

Badania wpływu indukcyjności na stabilną pracę układu napędowego dokonano na stanowisku laboratoryjnym, którego schemat zaprezentowano na rysunku 4. Silnik trakcyjny lokomotywy kopalnianej Ld31 o danych znamionowych $P_n = 41,5 \text{ kW}$, $U_n = 250 \text{ V}$, $I_n = 205 \text{ A}$, $n_n = 1080 \text{ obr/min}$ zabudowany jest na wspólnym wale z prądnicą obcowzbudną i sterowany poprzez przekształtnik impulsowy z inteligentnym modułem mocy PM200DSA060 ($I_c = 200 \text{ A}$, $U_{CE} = 600 \text{ V}$, $f = 20 \text{ kHz}$). Układ sterowania US wyposażony jest w regulator prędkości i regulator prądu. Przebiegi napięcia kondensatora filtra i prądu silnika trakcyjnego dla różnych wartości indukcyjności dławika filtra zamieszczono na rysunkach 5 i 6.

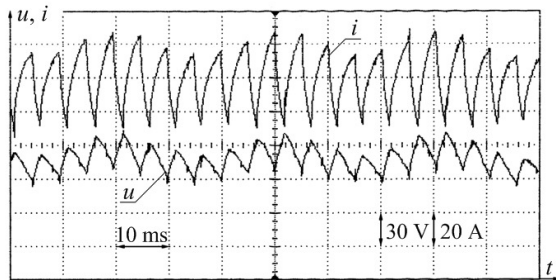
Rys. 2. Przebieg napięcia kondensatora filtra ($L = 2,4 \text{ mH}$)Rys. 3. Przebieg napięcia kondensatora filtra ($L = 2,6 \text{ mH}$)

Rys. 4. Schemat układu laboratoryjnego

Przy sumarycznej wartości indukcyjności w obwodzie (rys. 4) $L = 3,5 \text{ mH}$ częstotliwość wahań napięcia kondensatora filtra wynika z częstotliwości impulsowania przekształtnika (rys. 5), a po zwiększeniu indukcyjności dławika ($L = 5,5 \text{ mH}$), bez zmiany pozostałych parametrów, w napięciu kondensatora pojawiają się dodatkowo nietłumione oscylacje (rys. 6) o znacznie niższej częstotliwości, niż częstotliwość impulsowania.



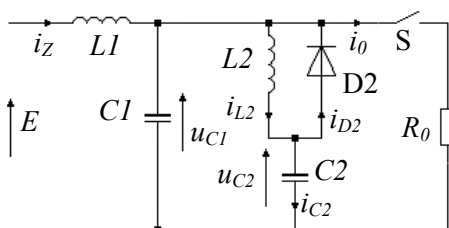
Rys. 5. Przebieg napięcia kondensatora i prądu silnika trakcyjnego ($L = 3,5 \text{ mH}$)



Rys. 6. Przebieg napięcia kondensatora i prądu silnika trakcyjnego ($L = 5,5 \text{ mH}$)

3. Zmodyfikowany układ filtru

Otrzymane powyżej rezultaty wskazują, że ograniczenie indukcyjności w obwodzie filtru pozwala na zmniejszenie pojemności kondensatora filtru, która zapewnia stabilną pracę układu. W celu minimalizacji wpływu indukcyjności dławika filtru na stabilną pracę układu napędowego zaproponowano rozwiązanie układu filtru wejściowego, które przedstawiono na rysunku 7. Równoległe do kondensatora powszechnie stosowanego filtru LC typu Γ włączono dodatkową gałąź złożoną z elementów $L2$, $C2$, $D2$.



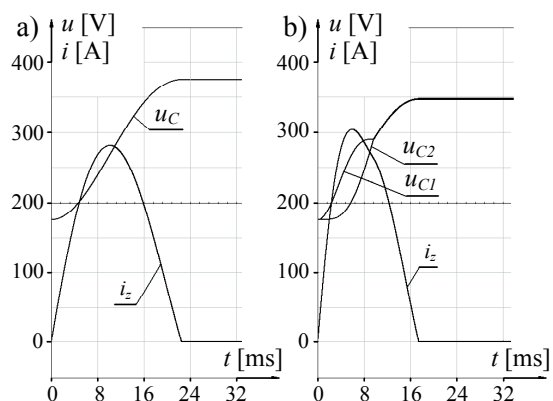
Rys. 7. Schemat układu z filtrem zmodyfikowanym

Ze źródła napięcia stałego E , poprzez filtr złożony z elementów $L1$, $C1$, $L2$, $C2$, $D2$, zasilany jest impulsowo za pomocą klucza S odbiornik w postaci rezystora $R0$.

Założono, że prąd ładowania kondensatorów w tym zmodyfikowanym filtrze nie powinien być większy, niż w jednoogniowym filtrze

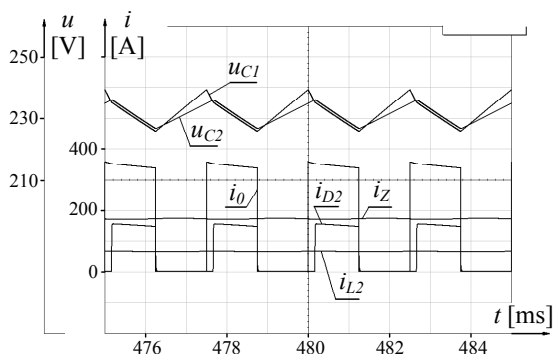
$$LC, \left(\sqrt{\frac{L_1}{C_1}} > \sqrt{\frac{L}{C}} \right), \text{ co ma istotne znaczenie}$$

z punktu widzenia warunków pracy stacji trakcyjnej podczas przejazdu lokomotywy przez przerwy sekcyjne. Zbyt duże wartości prądu ładowania baterii kondensatorów mogłyby być przyczyną zadziałania zabezpieczeń przeciążeniowych w stacji trakcyjnej. Przykładowe przebiegi napięć kondensatorów i prądu sieci trakcyjnej przy założeniu, że dopuszczalny zakres zmian napięcia kopalnianej sieci trakcyjnej wynosi od 175 V do 300 V, dla filtru LC typu Γ ($L = 2,5 \text{ mH}$, $C = 20 \text{ mF}$, $R = 0,11 \Omega$) oraz filtru zmodyfikowanego ($L1 = L2 = 1,25 \text{ mH}$, $C1 = C2 = 10 \text{ mF}$, $R1 = 0,1 \Omega$, $R2 = 0,01 \Omega$) przedstawiono na rysunkach 8a i 8b. Rezystor $R1$ jest sumą rezystancji sieci zasilającej i dławika wejściowego, a rezystancję dławika $L2$ uwzględniono w postaci rezystora $R2$. Różnica maksymalnych wartości prądów ładowania w obu przypadkach nie przekracza 10%.

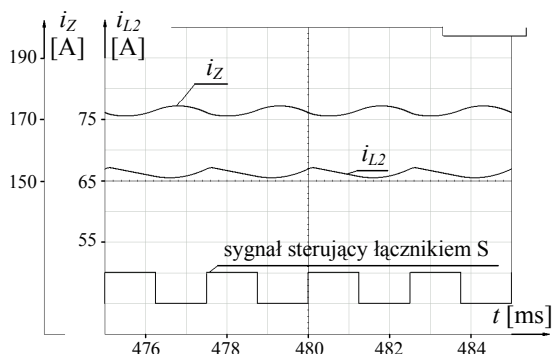


Rys. 8. Przebiegi napięć kondensatorów i prądów źródła dla filtrów: a) LC typu Γ , b) z dodatkową gałęzią LCD

Wybrane przebiegi napięć i prądów wyznaczone w programie symulacyjnym IsSpice, dla ustalonych wartości parametrów $E = 250 \text{ V}$, $R = 0,1 \Omega$, $R2 = 0,01 \Omega$, $L1 = L2 = 1,25 \text{ mH}$, $C1 = C2 = 10 \text{ mH}$, $R0 = 0,67 \Omega$, przy współczynniku wysterowania łącznika $\varepsilon = 0,5$, zamieszczono na rysunku 9. Na tle przebiegu prądu łącznika $i_0(t)$ przedstawiono przebiegi prądów dławików i_{L1} i i_{L2} oraz prąd i_{D2} diody $D2$, a także przebiegi napięć na kondensatorach u_{C1} i u_{C2} . W celu zilustrowania wahań prądu źródła oraz dławika $L2$ zmieniono skalę tych przebiegów (rys. 10). Współczynnik wysterowania ε zdefiniowano jako stosunek czasu przewodzenia łącznika do okresu impulsowania ($T = 2,5 \text{ ms}$, $f = 400 \text{ Hz}$).



Rys. 9. Przebiegi napięć i prądów dla filtra z dodatkową gałęzią LCD

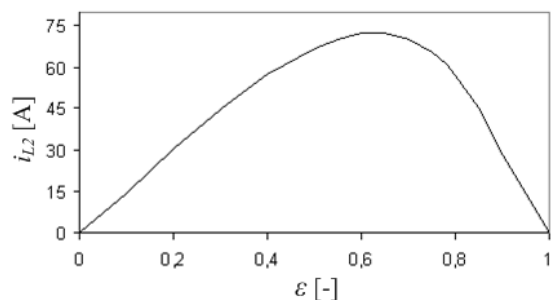


Rys. 10. Przebiegi prądu źródła i_Z i prądu i_{L2} dławika $L2$

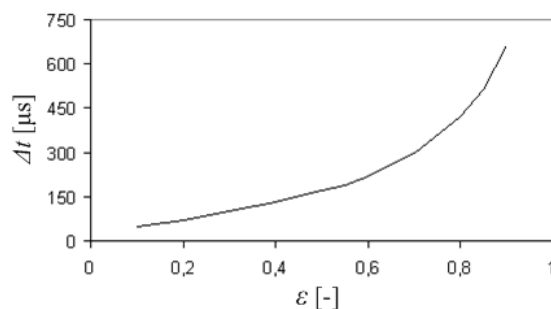
Wahania prądu źródła nie przekraczają 5 A przy wartości średniej około 170 A, a wahania prądu dławika $L2$ nie przekraczają 2,5 A przy wartości średniej około 65 A. Maksymalna wartość prądu dławika $L2$, a tym samym jego gabaryty i cena, zależna jest od współczynnika wysterowania (rys. 11). Maksymalna wartość prądu dławika nie przekracza 75 A, a zatem dławik $L2$ może być ponad czterokrotnie mniejszy, niż dławik $L1$, dla ustalonych wyżej parametrów.

Między maksymalnymi wartościami napięć kondensatorów filtra występuje przesunięcie czasowe. Maksymalna wartość napięcia kondensatora $C2$ opóźnia się w stosunku do maksymalnej wartości napięcia kondensatora $C1$. Zależność tego opóźnienia Δt od współczynnika wysterowania przekształtnika dla podanych wyżej parametrów i warunków pracy obciążenia podano na rysunku 12.

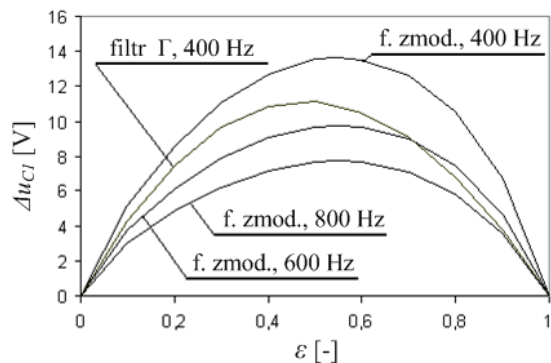
Charakter przebiegu wahań napięcia Δu_{C1} na kondensatorze $C1$ filtra oraz prądu źródła w funkcji współczynnika wysterowania dla filtra zmodyfikowanego, przy częstotliwości impulsowania przekształtnika 400 Hz, 600 Hz i 800 Hz oraz dla filtra jednoogniowego LC ($R = 0,11 \Omega$, $L = 2,5 \text{ mH}$, $C = 20 \text{ mF}$, rys. 1), przy takich samych pozostałych parametrach, zamieszczono na rysunkach 13 i 14.



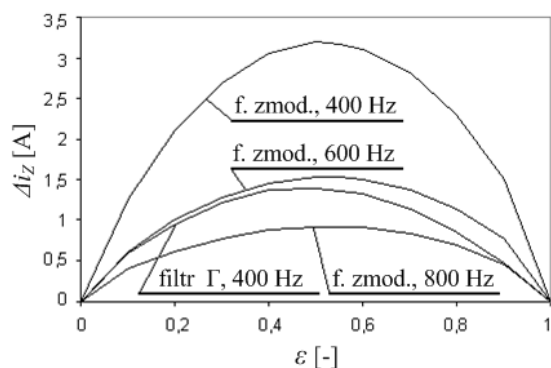
Rys. 11. Zależność wartości maksymalnej prądu i_{L2} dławika $L2$ od współczynnika wysterowania



Rys. 12. Zależność czasu przesunięcia maksymalnych wartości napięć na kondensatorach od współczynnika wysterowania



Rys. 13. Wahania napięcia Δu_{C1} kondensatora $C1$ w funkcji współczynnika wysterowania łącznika S



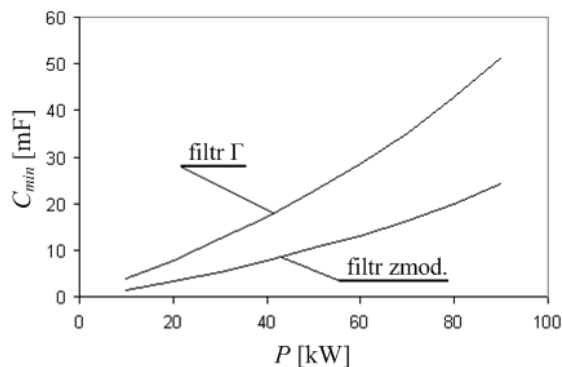
Rys. 14. Wahania prądu źródła Δi_Z w funkcji współczynnika wysterowania łącznika S

Jakościowo charakterystyki $\Delta u_{C1} = f(\epsilon)$

i $\Delta i_Z = f(\varepsilon)$ mają zbliżony przebieg dla obu filtrów, przy czym maksymalna wartość wahań w przypadku filtru zmodyfikowanego nie występuje przy współczynniku wysterowania równym 0,5.

4. Analiza porównawcza

Analizę porównawczą własności powszechnie stosowanego jednoogniowego filtru LC typu Γ ze zmodyfikowanym filtrem wykonano z punktu widzenia warunków stabilnej pracy oraz wahań napięcia kondensatora i prądu sieci trakcyjnej. Minimalne wartości pojemności baterii kondensatorów filtrów zapewniające stabilną pracę układu w funkcji mocy układu napędowego, przy ustalonych parametrach dla filtru jednoogniowego LC typu Γ (rys. 1) $E = 250$ V, $R = 0,11$ Ω , $L = 2,5$ mH oraz dla filtru zmodyfikowanego z dodatkową gałęzią LCD (rys. 7) $E = 250$ V, $R1 = 0,1$ Ω , $R2 = 0,01$ Ω , $L1 = L2 = 1,25$ mH, podano na rysunku 15. Założono, że w filtrze zmodyfikowanym pojemności obu baterii kondensatorów są sobie równe i wyznaczono minimalną sumaryczną pojemność filtru.

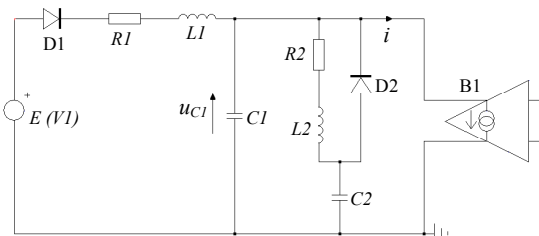


Rys. 15. Zależność pojemności minimalnej C_{min} od mocy napędu P

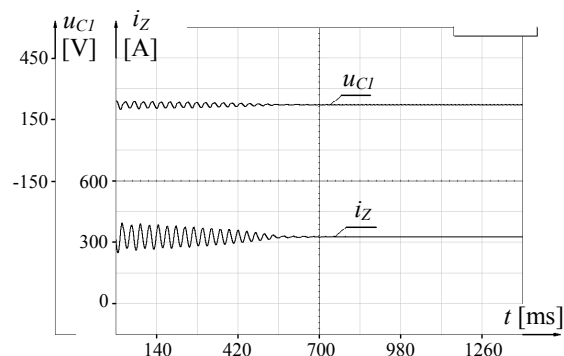
Na podstawie wykresów prezentowanych na rysunku 15 można stwierdzić, że sumaryczna pojemność w zmodyfikowanym układzie jest co najmniej dwukrotnie mniejsza, niż w przypadku filtru typu Γ . Jest to podstawowa zaleta prezentowanego rozwiązania układowego filtru. Przykładowo dla mocy napędu $P = 70$ kW minimalna wartość pojemności dla filtru zmodyfikowanego $C1+C2 = 16,36$ mF, a dla filtru Γ minimalna pojemność kondensatora $C = 34,73$ mF. Obliczenia wykonano w programie IsSpice wykorzystując schemat symulacyjny pokazany na rysunku 16, przy czym blok B1 realizuje funkcję $i = P/u_{C1}$.

Przebiegi napięcia kondensatora $C1$ i prądu

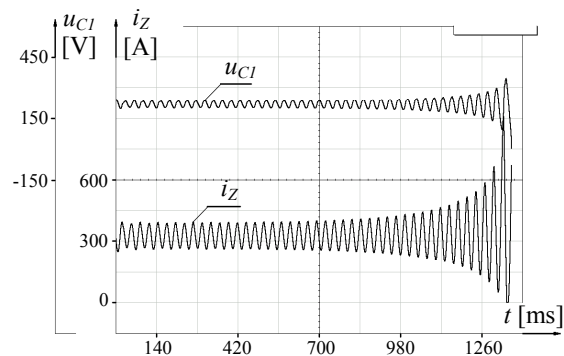
źródła uzyskane w wyniku symulacji dla pojemności filtru $C1+C2 > C_{min} = 16,36$ mF (drżania tłumione) i dla pojemności mniejszej od C_{min} (oscylacje o narastającej amplitudzie) przedstawiono na rysunkach 17 i 18.



Rys. 16. Schemat symulacyjny



Rys. 17. Przebiegi napięcia u_{C1} kondensatora $C1$ i prądu źródła i_Z w filtrze zmodyfikowanym, $C1 = 16,6$ mF



Rys. 18. Przebiegi napięcia u_{C1} kondensatora $C1$ i prądu źródła i_Z w filtrze zmodyfikowanym, $C1 = 16,34$ mF

Zmniejszenie indukcyjności i pojemności elementów filtru skutkuje zwiększeniem wahań napięcia kondensatora filtru i prądu źródła. W przypadku filtru LC typu Γ maksymalne wahań napięcia i prądu występują przy współczynniku wysterowania 0,5 i przybliżone zależności przy założeniu, że częstotliwość pracy przekształtnika jest dużo większa od częstotliwości drgań własnych filtru, mają postać:

$$\Delta U_{C_{max}} \cong \frac{I_0}{4fC} \quad (4)$$

$$\Delta I_{max} \cong \frac{\Delta U_{Cmax}}{4fL} \quad (5)$$

przy czym I_0 – prąd odbiornika, f – częstotliwość pracy przekształtnika.

Z prezentowanych na rysunkach 13 i 14 charakterystyk wynika, że przy tej samej częstotliwości pracy przekształtnika 400 Hz wahania napięcia, a zwłaszcza wahania prądu w sieci trakcyjnej dla zmodyfikowanego układu filtru są ponad dwukrotnie większe niż dla filtru LC typu Γ . Zwiększenie częstotliwości pracy przekształtnika z filtrem z dodatkową gałęzią LCD z 400 Hz do 600 Hz pozwala uzyskać wahania napięcia kondensatora oraz prądu sieci trakcyjnej o zbliżonych wartościach do rezultatów uzyskanych dla filtru Γ , przy częstotliwości impulsowania 400 Hz i tych samych pozostałych parametrach (różnice nie przekraczają 20%).

5. Podsumowanie

Nowe elementy energoelektroniczne (na przykład IGBT, IPM) umożliwiają zwiększenie częstotliwości pracy przekształtników, a tym samym zmniejszenie parametrów elementów filtru wejściowego LC typu Γ . Jednak zmniejszenie pojemności kondensatora filtru w tego typu filtrach może być niedopuszczalne z uwagi na niestabilną pracę napędu. Na podstawie dotychczasowych badań i prezentowanych w artykule rezultatów można stwierdzić, że zmodyfikowany układ filtru z dodatkową gałęzią LCD zapewnia znacznie większy zakres stabilnej pracy układu napędowego, przy czym przy tej samej częstotliwości impulsowania przekształtnika wahania napięcia kondensatora filtru i wahania prądu źródła są zdecydowanie większe. Tę wadę układu można wyeliminować poprzez zwiększenie częstotliwości pracy przekształtnika energoelektronicznego.

6. Literatura

- [1]. Bae B-H., Cho B-H., Sul S-K.: *Damping control strategy for vector controlled traction drives*. Proc. of EPE 2001, Graz.
- [2]. 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.
- [3]. Demidowicz B. P.: *Matematyczna teoria stabilności*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1972.
- [4]. Karwowski K., Skibicki J.: *Analiza stabilności pracy sieciowych pojazdów z napędem energoelektronicznym*. Mat. konf. SEMTRAK 2004, Kraków – Zakopane, s. 223-230.

[5]. Kosiorowski S., Stobiecki A.: *Analiza stabilności przekształtnikowych napędów trakcyjnych*. Przegląd Elektrotechniczny nr 6, 2009, s. 50-53.

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

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

[8]. Ombach J.: *Wykłady z równań różniczkowych wspomaganie komputerowo – Maple*. Wydawnictwo UJ, Kraków 1999.

[9]. Piróg S.: *Energoelektronika*. Wydawnictwo AGH, Kraków 2006.

[10]. Walczyna A. M., Hasse K., Czarnecki R.: *Input filter stability of drives fed from voltage inverters controlled by direct flux and torque control methods*. IEE Proc.-Electr. Power Appl. nr 5, 1996 (143), s. 396-401.

Autorzy

dr inż. Roman Dudek, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Automatyki Napędu i Urządzeń Przemysłowych, email: dudek@agh.edu.pl

dr inż. Stanisław Kosiorowski, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Automatyki Napędu i Urządzeń Przemysłowych, email: kosiorsk@kaniup.agh.edu.pl

dr inż. Andrzej Stobiecki, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Automatyki Napędu i Urządzeń Przemysłowych, email: astob@agh.edu.pl