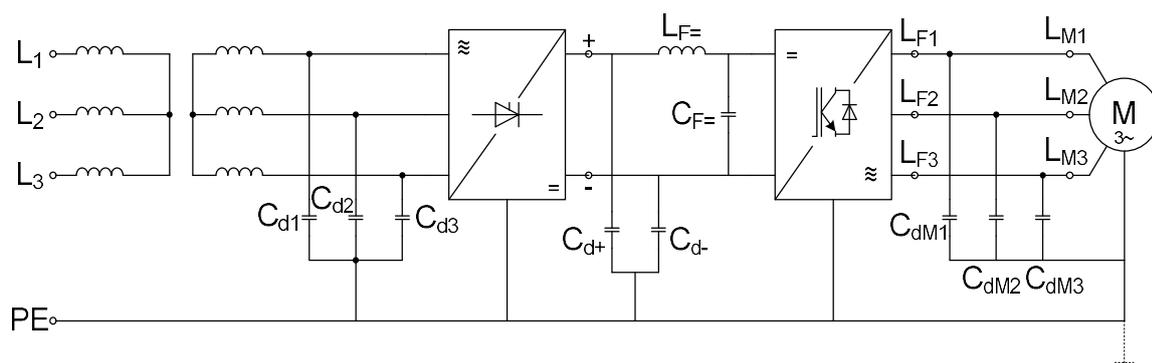


17

WPŁYW PRZEMIENNIKÓW CZĘSTOTLIWOŚCI NA PRACĘ SILNIKÓW INDUKCYJNYCH W PODZIEMIACH KOPALŃ

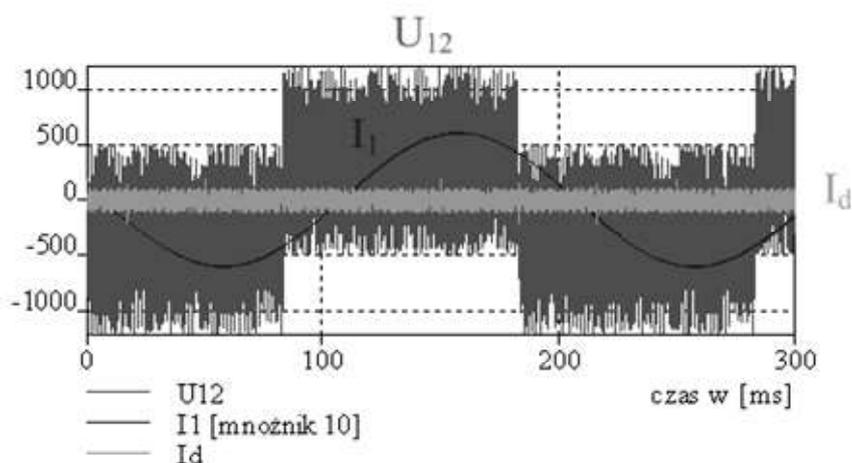
17.1 MODEL BADAWCZY ORAZ WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

W podziemiach kopalń powszechnie stosuje się pośrednie przemienniki częstotliwości do zasilania silników indukcyjnych. Główną zaletą użycia pośrednich przemienników częstotliwości jest możliwość elastycznego sterowania pracą napędów górniczych. Ponadto zastosowanie tego typu przekształtników pozwala na użycie silników indukcyjnych o mniejszych mocach oraz kabli i przewodów oponowych o mniejszych przekrojach przy jednoczesnym zapewnieniu mniejszej energochłonności. Na rys. 17.1 przedstawiono schemat przemiennika częstotliwości zasilającego silnik indukcyjny przy uwzględnieniu elementów pasożytniczych sieci, które mają (pojemności doziemne na wejściu i wyjściu falownika oraz pojemności doziemne na zaciskach zasilanego silnika) lub mogą mieć (pojemności doziemne w obwodzie pośredniczącym) wpływ na pracę układu.



Rys. 17.1 Uproszczony schemat zastępczy układu zasilania silnika indukcyjnego poprzez pośredni przemiennik częstotliwości z dołowej sieci kopalnianej

Na podstawie powyższego schematu przeprowadzono symulacje zachowania się napięcia międzyprzewodowego na wejściu silnika indukcyjnego U_{12} (pomiędzy fazami 1 i 2), prądu jednej fazy I_1 oraz prądu doziemnego I_d płynącego w ekranach. Sytuację tą przedstawiono na rysunku 17.2.



Rys. 17.2 Przebiegi: prądu jednej fazy I_1 [A], napięcia międzyprzewodowego na wejściu silnika indukcyjnego U_{12} [V] oraz prądu doziemnego I_d [A] w przypadku niezastosowania filtrów

Przedstawione przebiegi (rys. 17.2) uwiadcniają pojawiające się wielokrotnie przepięcia przekraczające 1 kV. Na sytuację taką wpływa przede wszystkim to, że pośredni przemiennik częstotliwości nie jest źródłem napięcia sinusoidalnie zmiennego. Istota jego pracy polega na cyklicznym przełączaniu zaworów falownika (wielokrotnie w ciągu jednej połowy okresu międzyprzewodowego napięcia wyjściowego np.: U_{12} -> związane jest to głównie z częstotliwością nośną układu sterowania MSI), a tym samym pojawianiu się na wyjściu przemiennika częstotliwości prostokątnych przebiegów napięcia (w zależności od typu modulacji 1 lub 2 biegunowej). Takim przebiegom napięcia wyjściowego towarzyszą duże stromości narastania tego napięcia podczas wielokrotnej komutacji zaworów falownika pracującego z MSI. Stromości narastania tego napięcia osiągają wartości dochodzące do kilkunastu kV na μs . Tak duże stromości narastania powodują przepływ (w stanie przejściowym) dużych prądów w tych pojemnościach według relacji:

$$i_{cd} = C_d \frac{du_{wyj}}{dt} \quad (17.1)$$

gdzie:

i_{cd} – chwilowa wartość pojemnościowego prądu doziemnego,

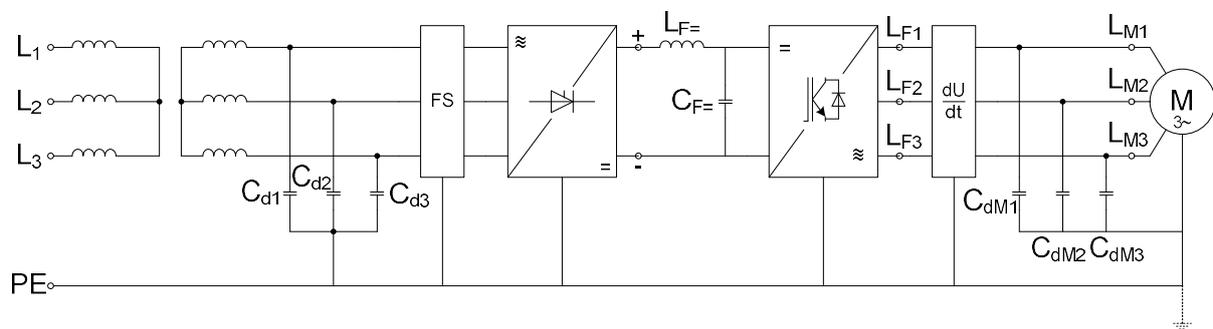
C_d – wartość zastępczej pojemności doziemnej,

u_{wyj} – chwilowa wartość napięcia na wyjściu przemiennika.

Otrzymane na rysunku 17.2 przebiegi wskazują, że prąd silnika jest praktycznie prądem sinusoidalnym, natomiast napięcie na wyjściu przekształtnika oprócz składowej prostokątnej zawiera przebiegi przejściowe wynikające z układu rezonansowego, w skład którego wchodzi indukcyjności odcinka sieci i pojemności doziemne kabla (przewodu oponowego) i silnika. W przebiegu tego napięcia pojawiają się przepięcia, które mogą przekraczać dwukrotną wartość napięcia obwodu pośredniczącego napięcia stałego. Charakterystyczną cechą zasilania silnika z przemiennika częstotliwości jest duża wartość prądu płynącego zarówno

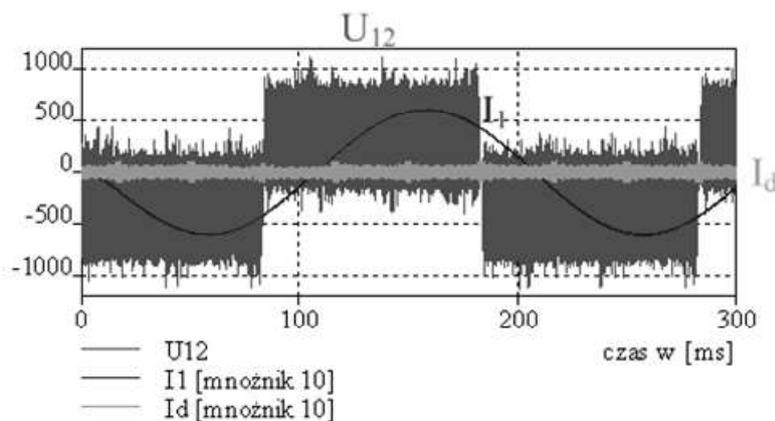
w pojemnościach doziemnych jak i w przewodzie ochronnym (prąd wypadkowy tych prądów pojemnościowych).

W celu ograniczenia tych niekorzystnych zjawisk (przebiecia, przepływ prądów pojemnościowych o względnie dużych wartościach) najczęściej stosuje się filtry stromościowe lub sinusoidalne. Na rysunku 17.3, w porównaniu do schematu z rysunku 1 uwzględniono 2 filtry: filtr sieciowy na wejściu przemiennika (w celu ograniczenia niekorzystnego wpływu pośredniego przemiennika częstotliwości na sieć zasilającą) oraz filtr stromościowy na wyjściu przemiennika. Zadaniem filtra stromościowego powinno być ograniczenie stromości narastania napięcia wyjściowego oraz zmniejszenie wartości prądów doziemnych w linii zasilającej silnik i w samym silniku.



Rys. 17.3 Uproszczony schemat zastępczy układu zasilania silnika indukcyjnego poprzez pośredni przemiennik częstotliwości z dołowej sieci kopalnianej wraz z filtrem sieciowym na wejściu przemiennika oraz filtrem stromościowym na wyjściu przemiennika

Efekt zastosowania filtra stromościowego obrazują przebiegi: napięcia na wejściu silnika oraz prądu jednej fazy i prądu doziemnego płynącego w przewodzie ochronnym, pokazane na rysunku 17.4.

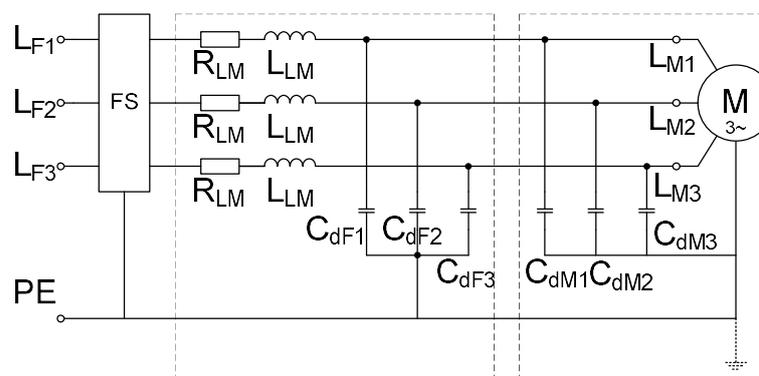


Rys. 17.4 Przebiegi: prądu jednej fazy I_1 [A], napięcia międzyprzewodowego na wejściu silnika indukcyjnego U_{12} [V] oraz prądu doziemnego I_d [A] w przypadku zastosowania filtra stromościowego na wyjściu przemiennika

Założony filtr stromościowy ma ograniczać stromość narastania napięcia wyjściowego przemiennika dla sieci łączącej przemiennik z silnikiem przewodami oponowymi o średniej długości (do około 100 m).

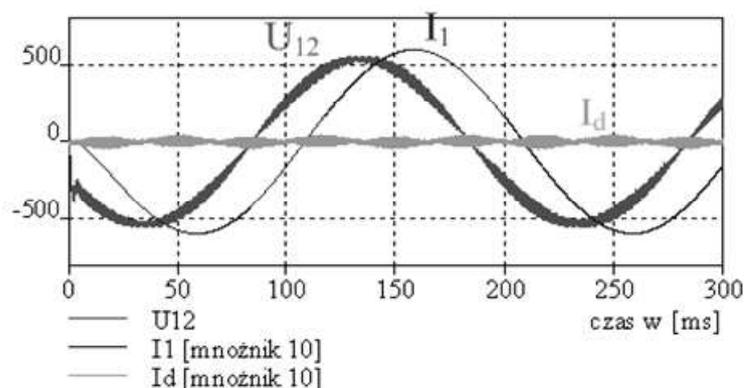
Otrzymane przebiegi prądów (jednej fazy oraz prądu doziemnego) i napięcia na wejściu silnika wskazują, że istotnemu ograniczeniu uległ prąd doziemny natomiast przepięcia na zaciskach silnika praktycznie nie uległy zasadniczemu zmniejszeniu.

Na kolejnym rysunku (rys. 17.5) przedstawiono schemat zastępczy układu zasilającego silnik indukcyjny z wykorzystaniem filtra sinusoidalnego włączonego do wyjścia przemiennika.



Rys. 17.5 Uproszczony schemat zastępczy układu zasilania silnika indukcyjnego poprzez pośredni przemiennik częstotliwości z zastosowanym filtrem sinusoidalnym na wyjściu przemiennika

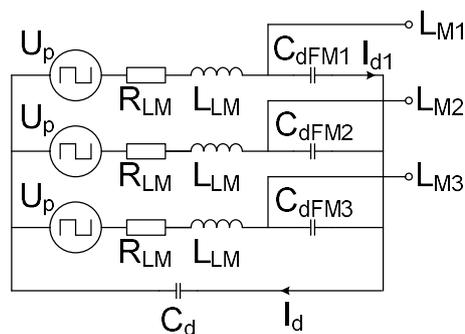
Zastosowanie takiego rozwiązania pozwala w sposób zasadniczy ograniczyć niekorzystne skutki występowania odkształconego napięcia na wyjściu przemiennika częstotliwości [1, 3, 5]. Przebiegi tych samych wielkości (napięcie na wejściu silnika, prąd jednej fazy oraz prąd doziemny w przewodzie ochronnym) zostały pokazane na rysunku 17.6. Otrzymane wyniki symulacji potwierdzają znaczące ograniczenie przepięć występujących na zaciskach wejściowych silnika.



Rys. 17.6 Przebiegi: prądu jednej fazy I_1 [A], napięcia międzyprzewodowego na wejściu silnika indukcyjnego U_{12} [V] oraz prądu doziemnego I_d [A] w przypadku zastosowania filtra sinusoidalnego na wyjściu przemiennika

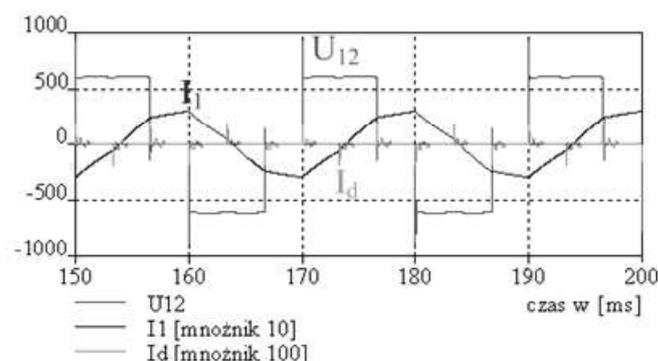
Zasadniczej poprawie uległ również kształt przebiegu tego napięcia, który jest zbliżony do napięcia sinusoidalnego. Filtr sinusoidalny przyczynił się również do zasadniczego ograniczenia wartości prądu doziemnego w przewodzie ochronnym. Zasadniczą wadą takiego rozwiązania jest wysoka cena filtra, która może być porównywalna lub nawet większa od ceny samego pośredniego przemiennika częstotliwości.

W górnictwie występują napędy o małych wymaganiach dynamicznych oraz napędy o charakterystyce wentylatorowej. Wówczas można zrezygnować ze sterowania pracą zaworów falownika z wykorzystaniem MSI. Na rysunku 17.7 przedstawiono schemat zastępczy takiego układu zasilającego silnik indukcyjny (wyjścia 3 faz L_M), zawierający trójfazowe źródło napięcia prostokątnego o zmiennej częstotliwości i amplitudzie, parametry zastępcze sieci (R_{LM} , L_{LM} , C_{dFM}) oraz zastępczą pojemność doziemną C_d występującą pomiędzy wejściem przemiennika częstotliwości a punktem gwiazdowym zastępczych pojemności doziemnych na wejściu silnika.



Rys. 17.7 Uproszczony schemat zastępczy układu zasilania silnika indukcyjnego trójfazowym napięciem prostokątnym (poprzez pośredni przemiennik częstotliwości)

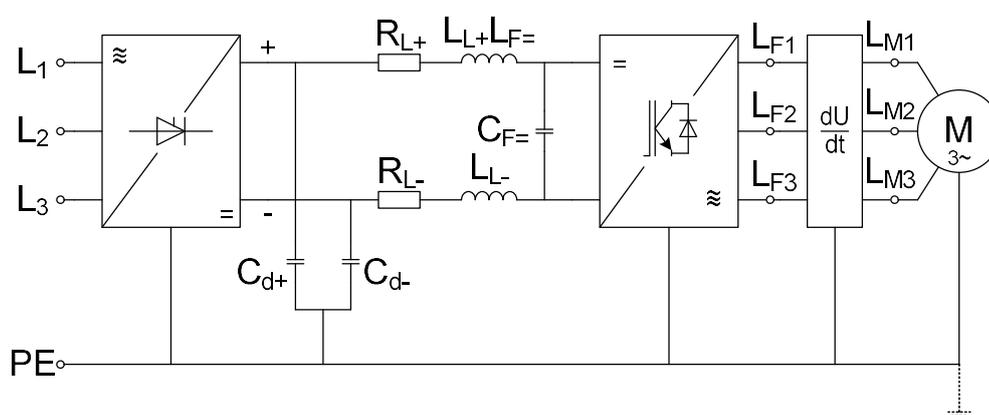
Efekty zasilania silnika indukcyjnego zasilanego trójfazowym przebiegiem napięcia prostokątnego (bez MSI) pokazują przeprowadzone symulacje (napięcie na wejściu silnika, prąd jednej fazy oraz prąd doziemny w przewodzie ochronnym) zestawione na rysunku 17.8.



Rys. 17.8 Przebiegi: prądu jednej fazy I_1 [A], napięcia międzyprzewodowego na wejściu silnika indukcyjnego U_{12} [V] oraz prądu doziemnego I_d [A] w przypadku zasilania silnika indukcyjnego trójfazowym napięciem prostokątnym

Otrzymane wyniki wskazują, że w odróżnieniu od sterownia pracą zaworów falownika z MSI, przebieg prądu wyjściowego przemiennika jest odkształcony. Tak jak zakładano, przebieg napięcia na zaciskach silnika indukcyjnego ma kształt zbliżony do prostokątnego. Ze względu na ograniczenie liczby komutacji zaworów falownika przypadających na okres napięcia zasilającego silnik, w przebiegu napięcia zasilającego występują jedynie pojedyncze przepięcia (w czasie komutacji zaworów przepięcia osiągają wartości dochodzące do około 1,5 krotności wartości napięcia w obwodzie pośredniczącym napięcia stałego). Ograniczenie ilości komutacji zaworów falownika przekłada się również na ograniczenie wartości prądu doziemnego płynącego w przewodzie ochronnym. Prąd, w postaci tłumionych przebiegów (będących efektem występowania tłumionych przebiegów rezonansowych), pojawia się w przewodzie ochronnym jedynie podczas komutacji zaworów falownika.

Problemy z przepięciami oraz z prądami doziemnymi w przewodzie ochronnym można istotnie ograniczyć rozdzielając w przestrzeni miejsce ustawienia elementów składowych pośredniego przemiennika częstotliwości: prostownika i falownika [6]. Odległości między tymi składowymi mogą dochodzić nawet do ponad 1000 m bez pogorszenia właściwości eksploatacyjnych zasilanego silnika indukcyjnego. Dodatkowo zabudowując falownik w maszynie roboczej można ograniczyć do kilku metrów odległość pomiędzy nimi. Tym samym znikome stają się indukcyjności przewodów łączących i ich pojemności doziemne. Omawiane rozwiązanie wraz z zastępczymi parametrami sieci i zastosowanym filtrem stromościowym pokazano na rysunku 17.9.



Rys. 17.9 Uproszczony schemat zastępczy układu zasilania silnika indukcyjnego poprzez pośredni przemiennik częstotliwości (z rozdzielonym prostownikiem i falownikiem) z dołowej sieci kopalnianej wraz z filtrem stromościowym na wyjściu przemiennika

17.2 PODSUMOWANIE

Zastosowanie pośrednich przemienników częstotliwości jako trójfazowego źródła napięcia zasilania silników indukcyjnych klatkowych oraz z magnesami trwałymi pozwala poszerzyć zakres ich zastosowań również w przemyśle górnictwym. Przekształtniki te: umożliwiają płynną regulację prędkości obrotowej

silnika indukcyjnego klatkowego przy zachowaniu stałego momentu krytycznego w szerokich zakresach, ograniczają wartość prądu rozruchowego (mniejsze wymagane przekroje przewodów zasilających), umożliwiają zwrot energii do sieci (w przypadku użycia prostownika sterowanego, który umożliwia pracę we wszystkich 4 kwadrantach). Z kolei silniki z magnesami trwałymi oraz silniki indukcyjne klatkowe charakteryzują się prostą budową i dużą niezawodnością oraz względnie małą masą i niewielkimi wymiarami w stosunku do silników starszych rozwiązań: silników prądu stałego, silników synchronicznych czy silników indukcyjnych pierścieniowych.

Do wad zastosowań pośrednich przemienników częstotliwości zasilających silniki indukcyjne klatkowe można zaliczyć przede wszystkim pojawianie się przepięć na zaciskach wejściowych silnika (rys. 17.2), indukowanie się prądów w przewodzie ochronnym (rys. 17.2) oraz przepływ prądów pojemnościowych przez łożyska silnika [4]. Pojawiające się przepięcia na zaciskach wejściowych silnika mogą prowadzić do uszkodzenia izolacji uzwojeń silnika. Należy więc użyć silnika o zwiększonej klasie napięciowej uzwojeń lub/i użyć filtrów. Zastosowanie filtra stromościowego ogranicza wartość indukowanych prądów w przewodzie ochronnym oraz zmniejsza wartości prądów pojemnościowych płynących przez łożyska silnika, ale nie ogranicza w sposób znaczący przepięć na zaciskach wejściowych silnika (rys. 17.4).

Lepsze efekty daje użycie filtra sinusoidalnego. Użycie tego filtra prowadzi nie tylko do ograniczenia wartości indukowanych prądów doziemnych, ale również w sposób zasadniczy ogranicza przepięcia występujące na zaciskach wejściowych silnika (rys. 17.6). Wadą takiego rozwiązania jest cena filtra sinusoidalnego, która może być porównywalna lub nawet większa od ceny falownika (najczęściej jest to około 2/3 ceny falownika).

Przedstawione właściwości, dotyczące zasilania silników indukcyjnych z pośrednich przemienników częstotliwości sterowanych z MSI, wskazują, że w podziemiach kopalń należy albo stosować silniki o zwiększonej klasie napięciowej i filtry stromościowe na wyjściu przemienników częstotliwości albo użyć filtrów sinusoidalnych na wyjściu przemienników częstotliwości.

W przemyśle górniczym stosowane są napędy, które charakteryzują się małymi wymaganiami dynamicznymi (napędy o wentylatorowej charakterystyce mechanicznej). W tym przypadku można zrezygnować ze sterowania zaworów falownika z MSI, a poprzestać na zasilaniu silnika prostokątnym napięciem międzyprzewodowym. Takie rozwiązanie ogranicza liczbę stanów komutacji (w napięciu na zaciskach wejściowych silnika) do 6 na okres napięcia wyjściowego. Wobec tego, pojawiające się w czasie komutacji przepięcia nie powinny powodować napięciowych uszkodzeń uzwojeń silnika.

LITERATURA

1. J. Bamberski. „Efektywność silnika elektrycznego zasilanego z przemiennika częstotliwości.” *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, z. 78, pp. 129-134, 2007.
2. P. Duda. „Energoelektronika w układach napędowych - problemy aplikacji i eksploatacji.” *Elektroenergetyka*, nr 4 (6), pp. 86-98, 2010.
3. A. Pozowski. „Doświadczenia aplikacyjne napędów dużej mocy.” Siemens AG, 2008.
4. A. Pozowski, H. Krawiec. „Wpływ filtrów wyjściowych napięciowych falowników częstotliwości na pracę silników indukcyjnych klatkowych.” *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, z. 85, pp. 111-115, 2010.
5. J. Szymański, B. Szymański. „Efektywność tłumienia zaburzeń doziemnych filtrów silnikowych LC w napędach z falownikami napięciowymi zasilanymi z sieci IT.” *Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering*, nr 7 (485), pp. 25-34, 2011.
6. „Układ zasilania z wykorzystaniem przesyłu energii prądem stałym.” Karta produktu. Elgór+Hansen.

Data przesłania artykułu do Redakcji: 10.2016

Data akceptacji artykułu przez Redakcję: 03.2017

dr inż. Adam Marek

Politechnika Śląska

Wydział Górnictwa i Geologii

Katedra Elektryfikacji i Automatykacji Górnictwa

ul. Akademicka 2A, 44-100 Gliwice, Polska

e-mail: adam.marek@polsl.pl

WPLYW PRZEMIENNIKÓW CZĘSTOTLIWOŚCI NA PRACĘ SILNIKÓW INDUKCYJNYCH W PODZIEMIACH KOPALŃ

Streszczenie. W referacie przedstawiono analizę współpracy pośrednich przemienników częstotliwości z zasilanymi przez nie silnikami indukcyjnymi. Na warunki pracy silników zasilanych z pośrednich przemienników częstotliwości mają w warunkach kopalnianych wpływ parametry elementów pasożytniczych użytych przewodów oponowych lub/i kabli górniczych, parametry elementów wchodzących w skład filtrów oraz sposób sterowania pracą zaworów falownika. Istotną właściwością omawianego przekształtnika jest to, że nie jest on źródłem napięcia sinusoidalnie zmiennego. Odkształcenie napięcia wyjściowego przemiennika jest efektem wielokrotnej komutacji zaworów falownika pracującego przy sterowaniu z modulacją szerokości impulsów (MSI). Z komutacją zaworów falownika związane są duże stromości narastania napięcia wyjściowego przemiennika. Stromości te osiągają wartości dochodzące do kilkunastu kV na μ s. Tak duże stromości narastania napięcia wyjściowego przemiennika powodują w stanie przejściowym przepływ dużych prądów pojemnościowych. W pracy omówiono wpływ poszczególnych parametrów kabli i przewodów oponowych na wartości przepięć i prądów doziemnych. Omówiono również sposoby ograniczenia tych niekorzystnych zjawisk (przepięć, prądów doziemnych).

Słowa kluczowe: pośredni przemiennik częstotliwości, falownik, MSI, silnik indukcyjny, przepięcie, prąd doziemny

INFLUENCE OF FREQUENCY INVERTERS ON OPERATION OF INDUCTION MOTORS IN MINE ENVIRONMENT

Abstract: The paper contains analysis of cooperation between induction motors with the intermediate frequency inverters that supply them. In the mine environment, parasitic elements of the cables, parameters of the filters' elements, and a method of control over inverter transistors have an impact on the regime of motors fed by the intermediate frequency inverters. An important feature of such a converter is that it is not a source of sinusoidal voltage. Deformation of voltage output is a result of inverter transistors being switched up multiple times with pulse – width modulation (PWM) control. Large steepness of the converter output rising voltage is related to switching of the transistors. The steepness reaches values of up to a dozen or so kV on μ s. Such a large steepness of output rising voltage can cause passage of large capacitive currents. The paper discusses also the influence of the parameters of individual cables on values of the overvoltages and earth leakage currents. Various ways to limit this negative phenomena (overvoltage, the earth leakage current) are also discusses in the paper.

Key words: the intermediate frequency inverter, inverter, PWM, induction motor, overvoltage, the earth leakage current