

UKŁADY WIELOPULSOWE W NAPĘDACH ELEKTRYCZNYCH MASZYN WYCIĄGOWYCH

Tomasz SIOSTRZONEK¹, Jakub WÓJCIK², Krzysztof CHMIELOWIEC³, Andrzej FIRLIT⁴,
Szymon BARCZENTEWICZ⁵

1. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie tel.: 12 617 48 59
2. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie tel.: 12 617 28 98
3. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie tel.: 12 617 35 93
4. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie tel.: 12 617 28 36
5. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie tel.: 12 617 28 57

e-mail: tsios@agh.edu.pl
e-mail: jakubwojcik@agh.edu.pl
e-mail: kchmielo@agh.edu.pl
e-mail: afirlit@agh.edu.pl
e-mail: barczent@agh.edu.pl

Streszczenie: W polskich zakładach górniczych napędy maszyn wyciągowych realizowane są głównie w oparciu o silniki prądu stałego. W artykule przedstawiono analizę doboru liczby pulsów układu przekształtnikowego maszyny wyciągowej pod kątem sprawności układu oraz jego oddziaływania na sieć zasilającą.

Słowa kluczowe: maszyna wyciągowa, układy wielopulsowe, jakość energii elektrycznej.

1. WPROWADZENIE

Maszyna wyciągowa stanowi zasadniczy element kopalnianego wyciągu szybowego. Jej głównym elementem jest linopędnia napędzana silnikiem wyposażonym w układ zasilania oraz układ regulacji prędkości. Z racji swojej relatywnie dużej mocy oraz coraz częstszego stosowania pośredniczącego układu energoelektronicznego, maszyna wyciągowa uznawana jest za jeden z najbardziej istotnych odbiorników zakładu górniczego, wpływających na jakość dostawy energii elektrycznej.

2. PROSTOWNIKI STEROWANE W NAPĘDZIE MASZYN WYCIĄGOWYCH

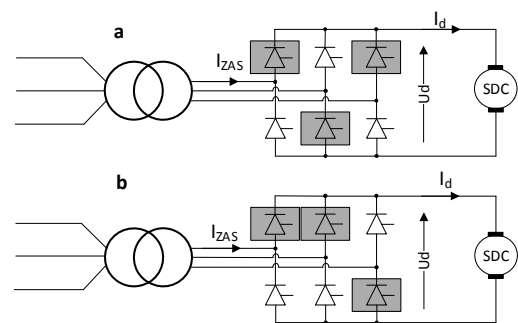
Napęd maszyn wyciągowych realizowany może być przez zastosowanie wolnoobrotowych silników prądu stałego (rozwiązanie bezprzekładniowe) lub szybkozmiennych silników prądu stałego lub przemiennego, napędzające linopędnię z wykorzystaniem przekładni. W polskim górnictwie najbardziej rozpowszechnione są silniki wolnoobrotowe produkowane przez wrocławską firmę DFME (rysunek 1).

Aby możliwa była regulacja prędkości napędu, silnik zasilony jest z sieci 6 kV poprzez transformator przekształtnikowy i układ energoelektroniczny nazywany prostownikiem. Jest to zestaw sześciu elementów półprzewodnikowych, których sekwencja załączania jest wyznaczona w układzie sterowania przekształtnikiem.

Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe rozwiązanie układu przekształtnikowego. Jest on zbudowany z tyrystorów i pracuje w ściśle określonej konfiguracji załączeń elementów półprzewodnikowych.



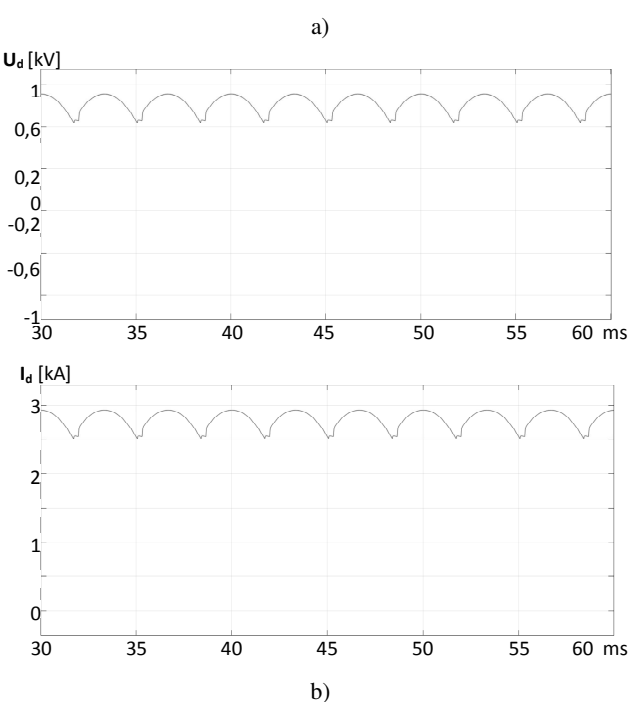
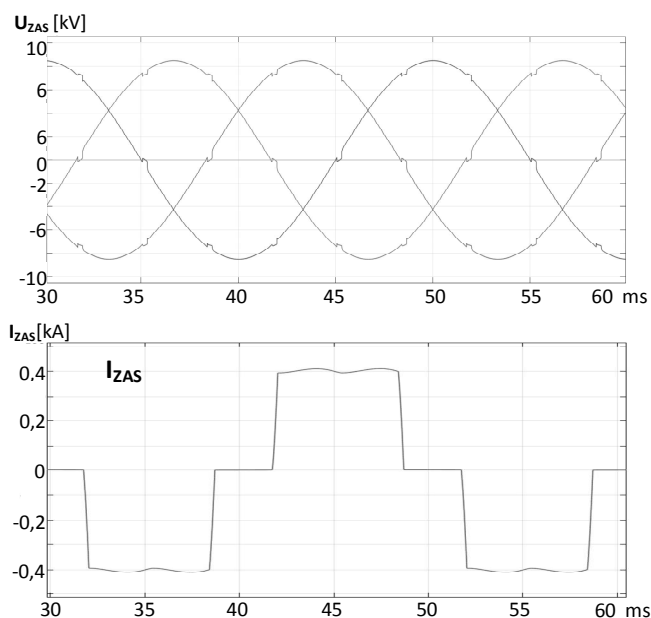
Rys. 1. Silnik wyciągowy serii PW produkcji DFME



Rys. 2. Przykładowa konfiguracja załączeń tyrystorów napędu przekształtnikowego

Z konstrukcji układu i własności przebiegów sinusoidalnie zmiennych zasilających przekształtnik wynika, że silnik zasilany jest napięciem, które oprócz składowej stałej zawiera także składową zmienną. Na rysunku 3 przedstawiono przebiegi napięcia i prądu po stronie zasilającej (U_{ZAS} , I_{ZAS}) i po stronie silnika (U_d , I_d) układu przekształtnikowego.

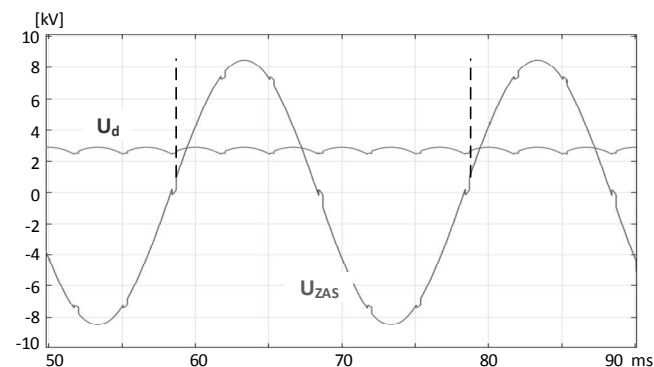
Przebiegi napięć zasilających są zniekształcone. Widoczne są wyraźne załamania komutacyjne, występujące w chwilach przejścia przewodzenia przez kolejne elementy półprzewodnikowe. Kształt prądu zasilania znacznie odbiega od przebiegu sinusoidalnego.



Rys. 3. Przebiegi napięć i prądów po stronie zasilania napięciem zmiennym (a) i po stronie odbiornika (b)

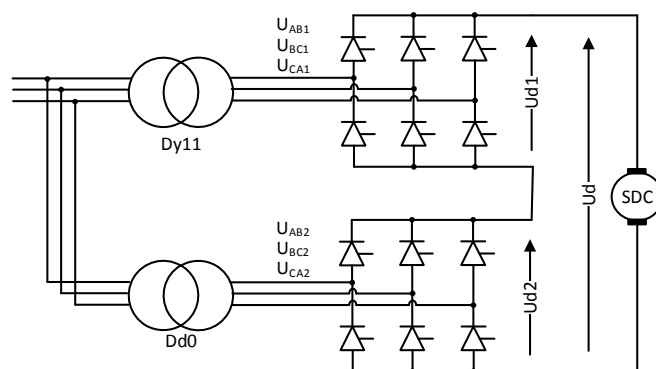
Aby wyjaśnić pochodzenie nazewnictwa związanego z układami wielopulsowymi konieczne jest zestawienie przebiegu napięcia wejściowego, w tym przypadku napięcia międzyfazowego zasilającego przekształtnik, z napięciem wyjściowym układu, czyli napięciem zasilającym silnik. Przebiegi te przedstawiono na rysunku 4. Jeżeli wyznaczony zostanie jeden okres przebiegu napięcia zasilania, to okaże się, że w tym czasie występuje sześć okresów składowej zmiennej napięcia wyjściowego. Upraszczając, na jeden okres przebiegu wejściowego przypada sześć tętnień (pulsów) napięcia wyjściowego. Układ taki nazywany jest układem 6-pulsowym.

Aby zmniejszyć tętnienia napięcia wyjściowego i znacznie ograniczyć oddziaływanie układu na sieć zasilającą, buduje się układy o większej liczbie pulsów. Zawsze jednak jest to liczba będąca wielokrotnością liczby sześć, ponieważ układ 6-pulsowy jest podstawowym elementem takiej struktury. Na rysunku 5 przedstawiono schemat układu 12-pulsowego.

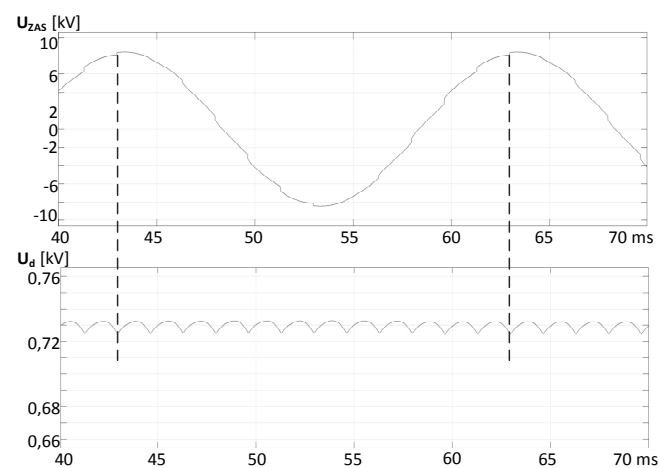


Rys. 4. Przebieg napięcia wyjściowego DC (U_d) w odniesieniu do napięcia międzyfazowego zasilania (U_{ZAS}) w układzie 6-pulsowym

Składa się on z dwóch 6-pulsowych mostków połączone szeregowo po stronie DC. Zasilanie każdego układu realizowane jest poprzez transformator przekształtnikowy. Transformatory mają różne grupy połączeń, co powoduje, że po stronie wtórnej, napięcia zasilające poszczególne przekształtniki są przesunięte względem siebie o 30° .

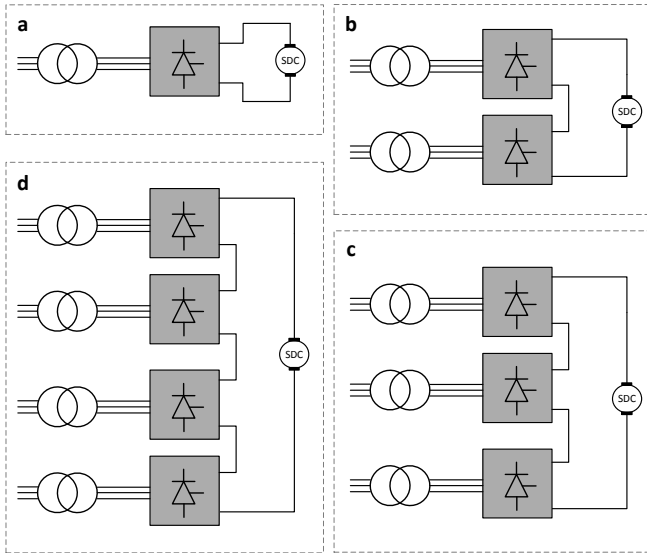


Rys. 5. Schemat układu 12-pulsowego



Rys. 6. Przebieg napięcia wyjściowego (U_d) układu 12-pulsowego w odniesieniu do napięcia międzyfazowego zasilania (U_{ZAS})

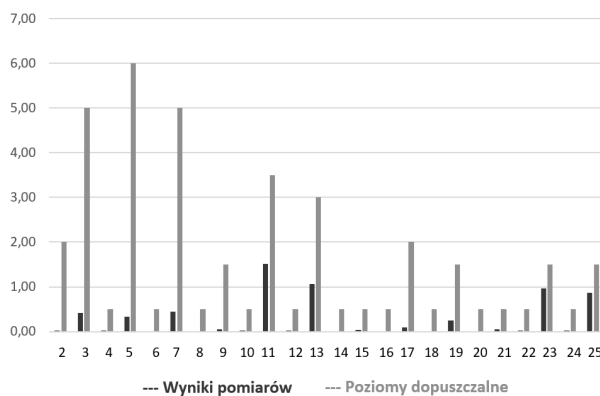
W takim rozwiązaniu na jeden okres napięcia wejściowego przypada 12 okresów składowej zmiennej napięcia zasilającego silnik, co przedstawiono na rysunku 6. Amplituda składowej zmiennej napięcia wyjściowego jest znacznie mniejsza niż w układzie 6-pulsowym. Tworzenie układów o większej ilości pulsów polega na dołączaniu kolejnych układów 6-pulsowych (rysunek 7).



Rys. 7. Konfiguracje układów wielopulsowych: a) 6-pulsowy, b) 12-pulsowy, c) 18-pulsowy, d) 24-pulsowy

3. ODDZIAŁYWANIE UKŁADU WIELOPULSOWEGO NA SIEĆ ZASILAJĄCĄ

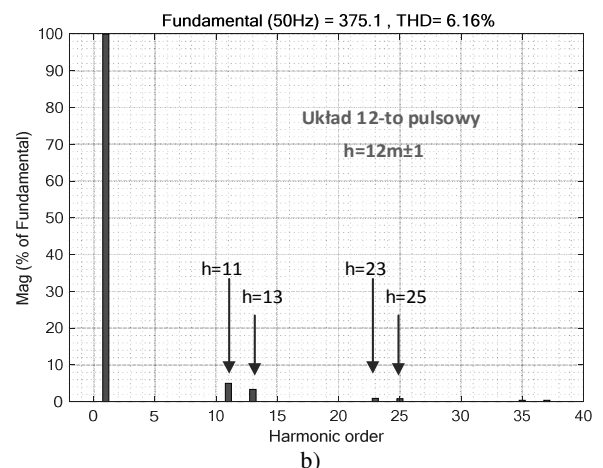
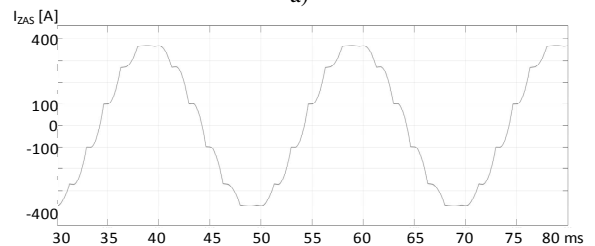
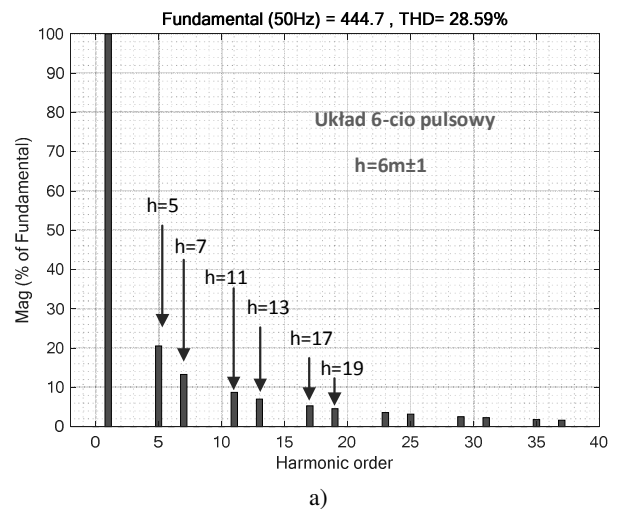
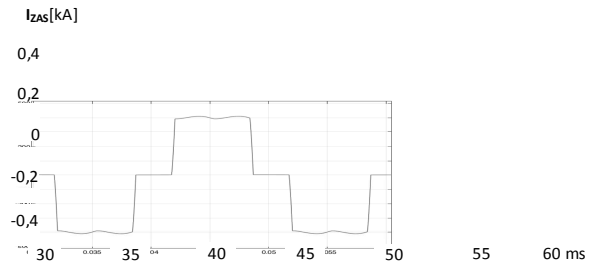
Jednym z kryteriów oceny wielopulsowych układów zasilania maszyn wyciągowych jest poziom ich negatywnego oddziaływania na sieć zasilającą. W szczególności mowa jest w tym przypadku o odkształcaniu napięcia za sprawą przepływu odkształconego prądu. W aktach prawnych [1,2] określono miary liczbowe służące zwymiarowaniu tego oddziaływania. Dla oceny odkształcenia napięcia wykorzystywany jest całkowity współczynnik zawartości harmonicznym THD (ang. *Total Harmonic Distortion*) oraz wartości poszczególnych harmonicznym. Ocena dokonywana jest po stronie średniego napięcia (po stronie pierwotnej transformatora przekształtnikowego). Zgodnie z zapisami Rozporządzenia Ministra Gospodarki z 4 maja 2007 r w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego [2], dla napięcia 6 kV, poziomy dopuszczalne poszczególnych harmonicznym napięcia oraz wartość współczynnika THD napięcia powinny być takie jak przedstawiono na rysunku 8, który oprócz wymagań normatywnych zawiera także wyniki rzeczywistych pomiarów emisji wyższych harmonicznym uzyskanych dla jednej ze śląskich kopalń węgla kamiennego.



Rys. 8. Poziomy dopuszczalne oraz wyniki pomiarów wyższych harmonicznym napięcia (wartości procentowe względem podstawowej harmonicznym)

Przy analizie oddziaływania układu przekształtnikowego na sieć zasilającą warto wskazać występowanie tzw. harmonicznym charakterystycznych, zależnych od rodzaju przekształtnika [3,5]:

- dla układu 6-pulsowego: $h = 6m \pm 1$,
 - dla układu 12-pulsowego: $h = 12m \pm 1$ (dla sterowania wspólnego),
 - dla układu 18-pulsowego: $h = 18m \pm 1$,
 - dla układu 24-pulsowego: $h = 24m \pm 1$,
- gdzie $m=1, 2, 3, \dots$



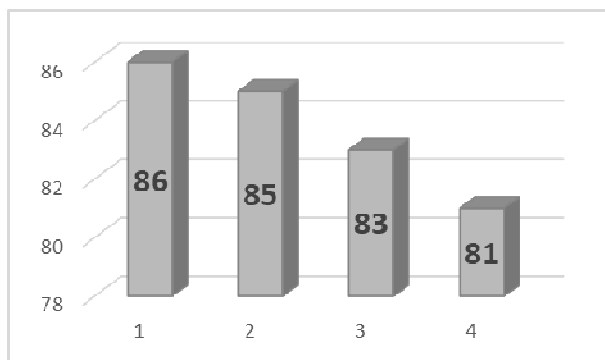
Rys. 9. Widmo wyższych harmonicznym prądu zasilańskiego układu a) 6-pulsowego, b) 12-pulsowego

Zniekształcony prąd źródła powoduje spadek napięcia na reaktancjach sieci, co w efekcie powoduje odkształcenie napięcia zasilającego. Można temu przeciwdziałać poprzez zwiększenie mocy zwarciowej, co zazwyczaj wiąże się z przebudową układu zasilania. Z tego powodu lepszym rozwiązaniem jest poszukiwanie możliwości ograniczenia negatywnego oddziaływania maszyn wyciągowych poprzez zwiększenie liczby pulsów sterowanych układów prostowniczych.

Przeprowadzone badania symulacyjne wskazują na znaczną redukcję współczynnika THD prądu przy zamianie układu 6-pulsowego (THD=28,59%) na 12-pulsowy (THD=6,16%). Widma prądów dla obu konfiguracji prostownika przedstawione zostały na rysunku 9.

4. SPRAWNOŚĆ MASZYNY WYCIĄGOWEJ

Sprawność układu fizycznego jest to stosunek energii wydatkowanej przez układ w stosunku do energii dostarczonej do układu. Każde fizyczne urządzenie ma sprawność mniejszą niż jeden ze względu na straty jakie występują wewnątrz urządzenia.



Rys. 10. Sprawność układów wielopulsowych, 1 – układ 6-pulsowy, 2 – układ 12-pulsowy, 3 – układ 18-pulsowy, 4 – układ 24-pulsowy

Obliczenie sprawności maszyny wyciągowej nie jest rzeczą prostą, ale dla określenia wpływu zwiększenia ilości pulsów na sprawność urządzenia posłużyć się można pewnym uproszczeniem. Załóżmy, że sprawność silnika wyciągowego wynosi 90%, sprawność transformatora przekształtnikowego – 98%, a sprawność przekształtnika 6-pulsowego 98%. Z tych trzech elementów składa się każda instalacja układu maszyny wyciągowej. Sprawność całego urządzenia jest iloczynem sprawności poszczególnych elementów składowych (obliczenia sprawności na podstawie [4] przy założeniu, że układ ma strukturę mieszaną). Analiza została przeprowadzona dla następujących układów 6-, 12-, 18- i 24-pulsowych. Na rysunku 10 przedstawiono wyniki obliczeń sprawności układu maszyny wyciągowej.

5. PODSUMOWANIE

W artykule omówiono różne rodzaje przekształtnikowych układów wielopulsowych pod kątem ich sprawności oraz oddziaływania na odkształcenie napięcia zasilającego. Obecnie standardem w polskich zakładach górniczych jest stosowanie układów 12-pulsowych, jednak w ostatnich latach, dzięki rozwojowi energoelektroniki i układów mikroprocesorowych, a także coraz większej uwadze przykładanej do jakości energii elektrycznej, realizuje się układy o większej ilości pulsów. Nie jest to jednak uzasadnione z punktu widzenia technicznego i ekonomicznego z uwagi na następujące wady stosowania układu o ilości pulsów większej niż dwanaście:

- zmniejszenie sprawności oraz niezawodności układu;
- zwiększenie kosztów inwestycyjnych ze względu na dużą liczbę urządzeń;
- zwiększenie kosztów eksploatacyjnych (większa ilość urządzeń determinuje zwiększenie czasu potrzebnego na przeglądy i naprawy);
- brak znaczącej poprawy współczynników dotyczących jakości energii elektrycznej;
- zwiększenie ryzyka braku części zamiennych (specjalne transformatory z długim okresem dostawy).

Mając na uwadze specyfikę pracy maszyny wyciągowej i dążenie do jak największej prostoty układu, stwierdzono, że nie ma uzasadnienia, aby tego rodzaju układ wyposażać w przekształtniki energoelektroniczne o liczbie pulsów większej niż 12. Układ 12-pulsowy stanowi kompromis pomiędzy jakością zasilania maszyny wyciągowej, minimalizacją oddziaływania na sieć zasilającą, kosztami inwestycyjnymi i kosztami eksploatacji.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Norma PN-EN 50160. Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych.
2. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego.
3. Piróg S.: Energoelektronika. Układy o komutacji sieciowej i o komutacji twardej. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne. Kraków 2006.
4. Sadowski A., Żótkowski B.: Badania sprawności złożonych układów napędowych. Inż. Ap. Chem. 2012,51, 5, 249-250.
5. Sikora A., Kulesz B., Grzenik R.: Dwunastopulsowe i dwudziestoczwieropulsowe układy przetwarzania napięcia przemiennego na napięcie stałe. Elektryka 2015. Zeszyt 3 (235).

MULTIPULSES CONVERTERS FOR ELECTRIC DRIVES OF MAIN HOISTS – ANALYSIS OF REASONABILITY OF USE

The drive systems of hoisting machines in Poland are based on the separately excited DC motors. The motors are supplied by power electronic converters. Almost all machines are built in a 12-pulse configuration. The article explains whether it is technically and economically reasonable to manufacture multi-pulse systems (with a number of pulses greater than 12).

Keywords: hoisting machine, multi-pulse systems, power quality.