

doi:10.15199/48.2020.05.08

## Zalety i wady stosowania układów wielopulsowych w napędzie elektrycznym maszyn wyciągowych

**Streszczenie.** W polskich zakładach górniczych napędy maszyn wyciągowych napędzane są głównie przez silniki obcowzbudne prądu stałego. Regulacja prędkości takiego silnika odbywa się dzięki zastosowaniu przekształtników statycznych. Oprócz niewątpliwych zalet tego typu napędu, coraz częściej dostrzegany jest negatywny wpływ tego typu napędów na sieci elektroenergetyczne kopalń. Dlatego poszukuje się możliwości ograniczenia negatywnych skutków pracy takiego napędu przez zastosowanie m.in. przekształtników złożonych. W artykule przedstawiono analizę doboru liczby pulsów układu przekształtnikowego maszyny wyciągowej pod kątem sprawności układu oraz jego oddziaływania na sieć zasilającą.

**Abstract.** In Polish mining plants the drives of hoisting machines are mainly made by separately excited DC motors. The speed of such a motor is regulated by the use of static converters. In addition to the unquestionable advantages of this type of drive, its negative impact on the power networks of mines is increasingly being noticed. Therefore, it is sought to limit their negative effects by using, e.g. complex converters. In this article the selection of the number of pulses of the hoisting machine converter system in terms of system efficiency and its impact on the supply network is presented. (*Advantages and disadvantages of using multi-pulse systems in the electric drive of hoisting machines*)

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

**Keywords:** hoisting machine, multipulses devices, power quality

### Wprowadzenie

Transport pionowy w kopalniach głębinowych realizowany jest z wykorzystaniem zespołu urządzeń, które wspólnie nazywane są górniczym wyciągiem szybowym. Głównym elementem tego zespołu jest maszyna wyciągowa, tzn. linopędnia wraz z linami i naczyniami oraz silnik wyciągowy i urządzenia go zasilające. Maszyna wyciągowa stanowi zasadniczy element górniczego wyciągu szybowego. Urządzenie to jest jednym z największych urządzeń w zakładach górniczych, pod względem mocy zainstalowanej. Ze względu na zastosowanie przekształtników energoelektronicznych dużej mocy, maszyna wyciągowa uznawana jest za jeden z najbardziej istotnych odbiorników zakładu górniczego, wpływających na jakość dostawy energii elektrycznej (JDEE).

### Układ zasilania silnika wyciągowego

Jako silnik wyciągowy, w większości polskich kopalń, stosowany jest wolnoobrotowy silnik prądu stałego (rozwiązanie bezprzekładniowe). Tego typu rozwiązania zastosowano w ponad 90% maszyn pracujących w naszym kraju. Obecnie, coraz częściej dostrzega się zalety silników prądu przemiennego, wolnoobrotowych synchronicznych, ze względu m.in. na ich większą przeciążalność i mniejszy moment bezwładności w stosunku do silników prądu stałego. Obecnie w dwóch zakładach górniczych trwają przygotowania do zastosowania nowoczesnych rozwiązań z zastosowaniem silników synchronicznych prądu przemiennego. Jednak w polskim górnictwie najbardziej rozpowszechnione są obcowzbudne silniki wolnoobrotowe prądu stałego produkowane przez wrocławską firmę DFME (rys. 1).

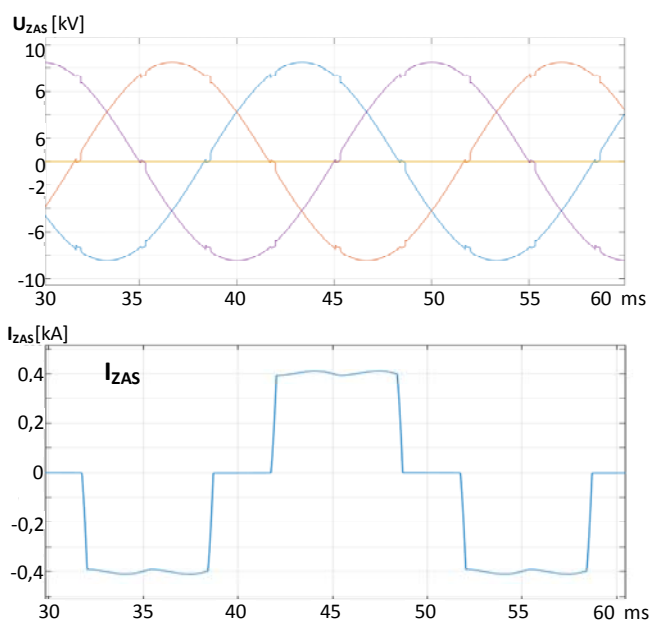
Regulacja prędkości takiego silnika jest możliwa dzięki zastosowaniu przekształtników statycznych. Silnik zasilony jest z sieci 6 kV poprzez transformator przekształtnikowy i układ energoelektroniczny nazywany prostownikiem. Z konstrukcji układu i własności przebiegów sinusoidalnie zmiennych zasilających przekształtnik wynika, że silnik zasilany jest napięciem, które oprócz składowej stałej zawiera także składową zmienną. Na rysunku 2 przedstawiono przebieg 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 wyraźnie załamania komutacyjne,

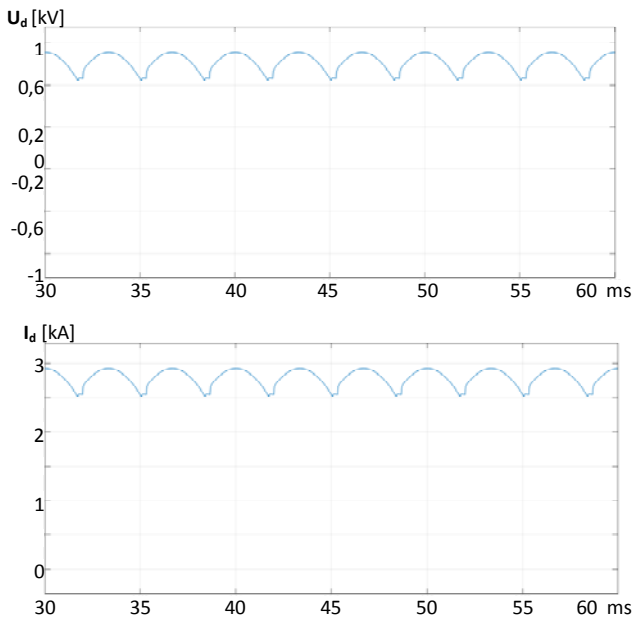
występujące w chwilach przejęcia przewodzenia przez kolejne elementy półprzewodnikowe. Kształt prądu zasilania układu znacznie odbiega od przebiegu sinusoidalnego.



Rys. 1. Silnik wyciągowy serii PW produkcji DFME

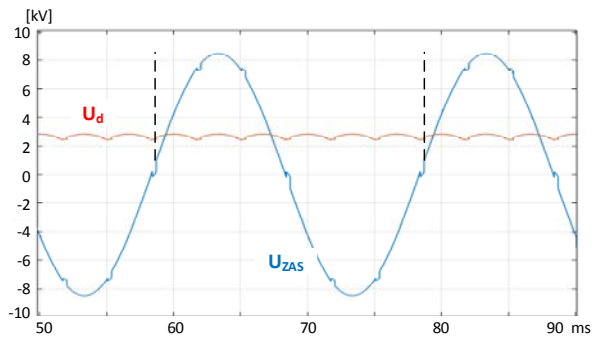


a)

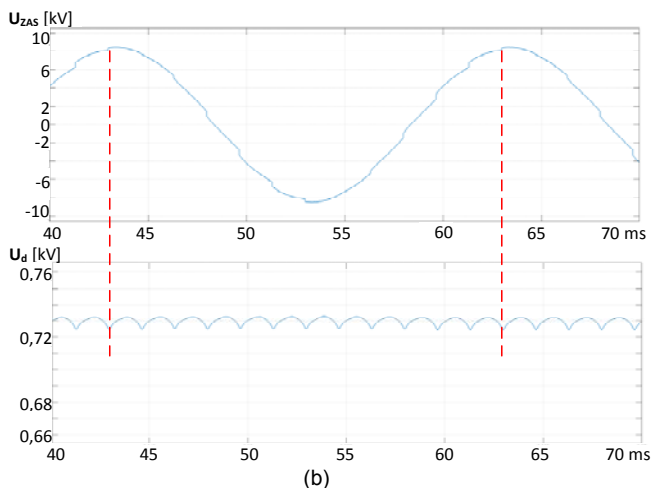


b)

Rys. 2. Przebiegi napięć i prądów po stronie zasilania napięciem zmiennym (a) i po stronie odbiornika (b)



(a)



(b)

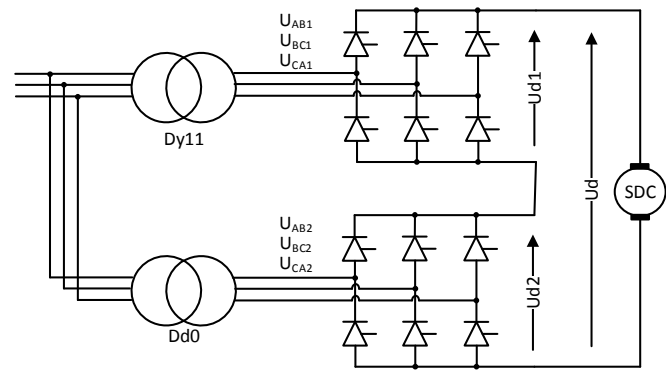
Rys. 3. Przebieg napięcia wyjściowego DC ( $U_d$ ) w odniesieniu do napięcia międzyfazowego zasilania ( $U_{ZAS}$ ) w układzie 6-pulsowym (a) i układzie 12-pulsowym (b)

Aby wyjaśnić pochodzenie nazewnictwa związanego z układami wielopulsowymi konieczne jest porównanie przebiegu napięcia wejściowego, w tym przypadku napięcia międzyfazowego zasilającego przekształtnik, z napięciem

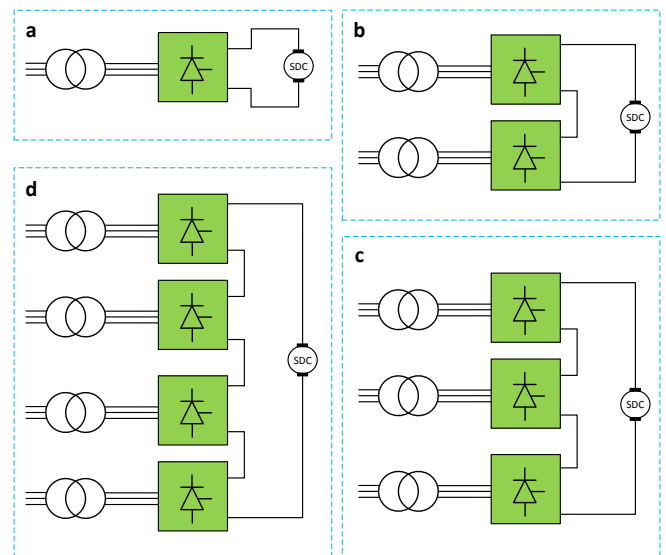
wyjściowym układu, czyli napięciem zasilającym silnik. Przebiegi dla układu 6 i 12-pulsowego przedstawiono na rysunku 3. Na jeden okres przebiegu napięcia wejściowego przypada sześć okresów napięcia wyjściowego. Układ taki nazywany jest układem 6-pulsowym (rys. 3a).

Aby zmniejszyć amplitudę tętnień 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 4 przedstawiono schemat układu 12-pulsowego.

Jeżeli dwa mostki 6-pulsowe zostaną zasilone z dwóch transformatorów, o takiej grupie połączeń, że po stronie wtórnej, napięcia będą przesunięte względem siebie o  $30^\circ$ , a przekształtniki po stronie DC zostaną połączone szeregowo, otrzyma się układ 12-pulsowy. Amplituda składowej zmiennej zostanie zmniejszona. Schemat takiego układu przedstawiono na rysunku 4. W rozwiązaniach przemysłowych można spotkać układy 12-pulsowe zasilone z jednego transformatora trójzwojowego. Takiego rozwiązania nie stosuje się w zakładach górniczych, ze względu na konieczność pracy z jednym przekształtnikiem i transformatorem (praca 6-pulsowa) w czasie awarii.



Rys. 4. Schemat układu 12-pulsowego



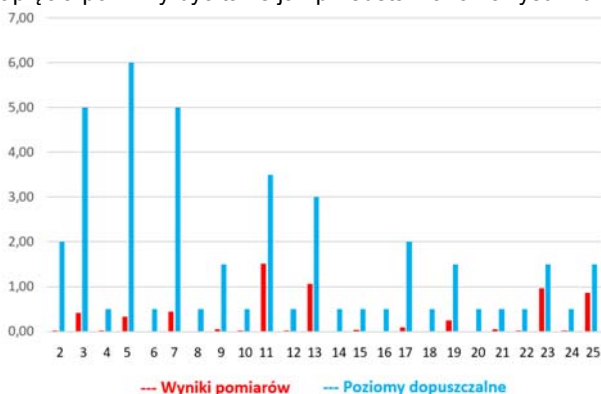
Rys. 5. Konfiguracje układów wielopulsowych: a) 6-pulsowy, b) 12-pulsowy, c) 18-pulsowy, d) 24-pulsowy

Możliwa jest budowa układów zasilania silników prądu stałego z liczbą pulsów większą niż 12. Dokładając kolejne przekształtniki 6-pulsowe i odpowiednio konfigurując transformatory zasilające, buduje się układy o liczbie pulsów 18, 24 i większej. Takie rozwiązania są stosowane

np. w układach trakcyjnych. Jednak w kopalni, gdzie wymagana jest unifikacja rozwiązań, a przede wszystkim ich prostota i uzasadnienie ekonomiczne, tego typu rozwiązania są wyjątkami. Na rysunku 5 przedstawiono schematy układów wielopulsowych, powstających przez odpowiednie połączenie układów podstawowych – 6-pulsowych.

### 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. Podstawowymi współczynnikami wykorzystywanymi do oceny odkształcenia napięcia są: całkowity współczynnik zawartości harmonicznych THD (ang. Total Harmonic Distortion) oraz wartości poszczególnych harmonicznych. 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 harmonicznych napięcia oraz wartość współczynnika THD napięcia powinny być takie jak przedstawiono na rysunku 6.



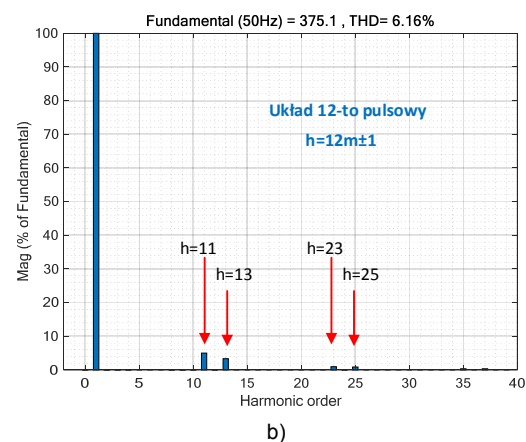
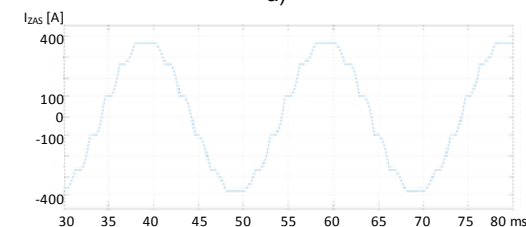
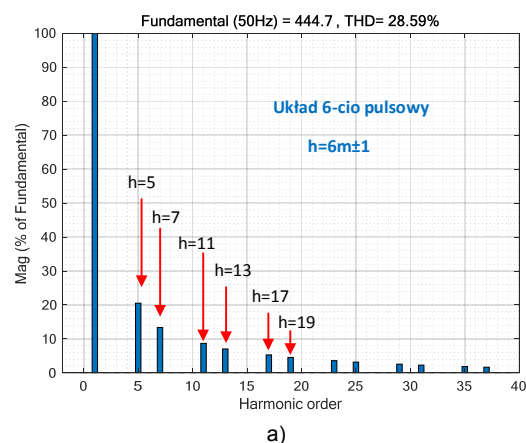
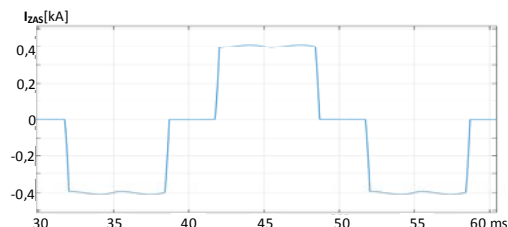
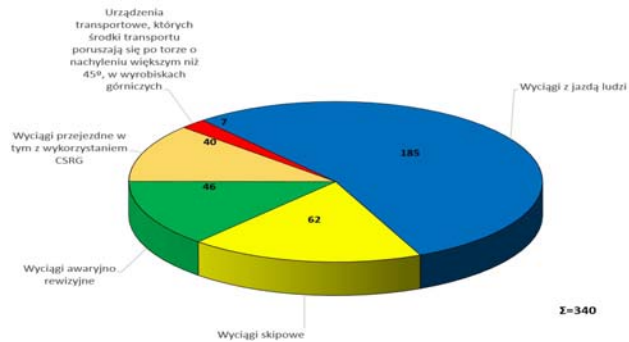
Rys. 6. Poziomy dopuszczalne oraz wyniki pomiarów wyższych harmonicznych napięcia (wartości procentowe względem podstawowej harmonicznej)

Na rysunku tym, kolorem niebieskim oznaczono wymagania określone w [1, 2], a kolorem czerwonym wyniki pomiarów emisji wyższych harmonicznych uzyskanych dla jednej ze śląskich kopalń węgla kamiennego (układ 12-pulsowy).

Na rysunku 7 przedstawiono charakterystyczne harmoniczne w przebiegu prądu przekształtnika 6 i 12-pulsowego.

Dla układów o różnej liczbie pulsów określone są one następująco [3,5]:

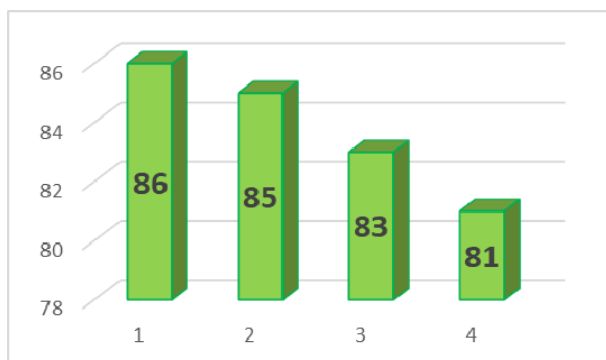
- Dla układu 6-pulsowego:  $h = 6m \pm 1$ ,
- Dla układu 12-pulsowego:  $h = 12m \pm 1$  (dla sterowania wspólnego),
- Dla układu 18-pulsowego:  $h = 18m \pm 1$ ,
- Dla układu 24-pulsowego:  $h = 24m \pm 1$ ,
- gdzie  $m=1, 2, 3, \dots$ . Przeprowadzone badania symulacyjne wskazują na znaczną redukcję współczynnika THD prądu przy zamianie układu 6-pulsowego (THD=28,59%) na 12-pulsowy (THD=6,16%).



Rys. 7. Widmo wyższych harmonicznych prądu zasilającego układu a) 6-pulsowego, b) 12-pulsowego

## Sprawność maszyny wyciągowej

Sprawność układu fizycznego jest to stosunek energii wydatkowanej przez układ w stosunku do energii dostarczonej do układu.



Rys. 8. 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 8 przedstawiono wyniki obliczeń sprawności układu maszyny wyciągowej.

## Podsumowanie

W artykule omówiono różne rodzaje przekształtnikowych układów wielopulsowych pod kątem ich sprawności oraz oddziaływania na sieć elektroenergetyczną kopalni. Problem jakości dostawy energii elektrycznej w polskich kopalniach będzie coraz bardziej odczuwalny. Zmiany modernizacyjne, konsolidacja kopalń a także budowa nowych wysokowydajnych ciągów wydobywczych spowoduje, że szczególna uwaga będzie zwrócona na oddziaływanie maszyny wyciągowej na sieć kopalnianą.

Zagadnienia związane z maszynami wyciągowymi nie są problemami marginalnymi. Na rysunku 9 przedstawiono liczbę obecnie pracujących wyciągów szybowych. Na dzień 31.12.2019 roku pracujących wyciągów było 340. To są

układy napędowe o mocach od kilku kilowatów do kilkunastu MW.

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, zbudowano układ 24-pulsowy. Należałoby szukać uzasadnienia technicznego i ekonomicznego, aby wyjaśnić dlaczego ten układ jest, w przypadku maszyny wyciągowej lepszy. Z pomiarów parametrów jakości dostawy energii elektrycznej wynika, że aby spełnić wymogi [1, 2] wystarczy zastosować układ 12 pulsowy. Wady stosowania układu o ilości pulsów większej niż dwanaście są następujące:

- 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 jakości energii elektrycznej;
- zwiększenie ryzyka braku części zamiennych (specjalne transformatory z długim okresem dostawy).

Zaletą układu o liczbie pulsów większej niż 12 jest znaczne zmniejszenie wartości harmonicznych niskich rzędów wynikające z konstrukcji układu.

Układ 12-pulsowy stanowi kompromis pomiędzy jakością zasilania maszyny wyciągowej, minimalizacją oddziaływania na sieć zasilającą, kosztami inwestycyjnymi i kosztami eksploatacji.

**Autorzy:** dr inż. Tomasz Siostrzonek, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, e-mail: [tsios@agh.edu.pl](mailto:tsios@agh.edu.pl); dr inż. Krzysztof Chmielowiec, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, e-mail: [kchmielo@agh.edu.pl](mailto:kchmielo@agh.edu.pl); dr inż. Andrzej Firlit, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, e-mail: [afirlit@agh.edu.pl](mailto:afirlit@agh.edu.pl); dr inż. Szymon Barczeniewicz, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, e-mail: [barczen@agh.edu.pl](mailto:barczen@agh.edu.pl)

## LITERATURA

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., Żółtkowski 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