

ANALIZA RZECZYWISTYCH PARAMETRÓW SYGNAŁÓW ELEKTRYCZNYCH ZASILAJĄCYCH UKŁADY NAPĘDOWE POMP WODOCIĄGOWYCH

Streszczenie W artykule przedstawiono badania przeprowadzone w stacji uzdatniania wody, których celem była analiza przebiegów prądów i napięć zawierających wyższe harmoniczne, które powstają w wyniku pracy urządzeń nieliniowych. Pomiarów były przeprowadzane w stacji transformatorów, po stronie wyższego napięcia. Na kształt napięcia miały wpływ wszystkie odbiorniki nieliniowe zainstalowane w zakładzie, zasilane przez tę stację transformatorów. Skutkami występowania wyższych harmonicznych jest zniekształcenie sinusoidy napięcia zasilającego. Obecność wyższych harmonicznych w sieci zasilającej może być przyczyną zakłóceń w pracy urządzeń elektronicznych. W artykule wyznaczono wartości współczynników THD i odniesiono je do wartości określonych stosownymi normami.

Abstract. The article presents the studies carried out in water treatment plants, which aim was to analyze the current and voltage waveforms contain higher harmonics, they result from the work of non-linear devices. Measurements were carried out in the transformer station on the side of higher voltage. The shape of power to affect all the non-linear loads installed in the Department, powered by the transformer stations. The effects of harmonic distortion is a sine wave voltage. The presence of higher harmonics in the power supply can cause interference in electronic instruments. In this paper the values of the coefficients of THD and explicitly set them to values of the relevant standards. (**Voltage and Current Harmonicals Generate by Modern Drivers Used in Pump Station.**)

Słowa kluczowe: odkształcenie napięcia i prądu, wyższe harmoniczne, przemiennik częstotliwości, pompownia.

Keywords: Voltage and Current Distortion, Higher Harmonicals, Frequency Converter, Pump Station.

Wstęp

Tradycyjnie w przepompowniach wody stosowane są elektryczne układy napędowe, których olbrzymią zaletą jest możliwość praktycznie bezobsługowej pracy. Jednak do niedawna możliwość szerokiego stosowania najbardziej niezawodnych i najtańszych silników indukcyjnych klatkowych ograniczona była nikłymi możliwościami regulacji ich prędkości obrotowej. W praktyce regulacja prędkości silników prądu przemiennego ograniczała się do metod mechanicznych (przekładnie, sprzęgła regulowane). Najczęściej silnik indukcyjny był stosowany bez układów regulacji, a tylko wyposażony w odpowiednią aparaturę łączącą i zabezpieczającą. Rozwój technologii półprzewodnikowych elementów sterowanych umożliwił zbudowanie układów pozwalających na zmianę częstotliwości napięcia zasilającego. Dzięki temu możliwe jest wykorzystanie regulowanego napędu z silnikiem indukcyjnym zasilanym poprzez przemiennik częstotliwości. Zaletą napędu falownikowego jest możliwość uzyskania dużych oszczędności energii, co w przypadku przepompowni wody (zakładów uzdatniania wody) umożliwia obniżenie kosztów produkcji wody czystej. Niestety praca falowników negatywnie wpływa na charakter sygnałów zasilających powodując zniekształcenia przebiegów prądu i napięcia poprzez wprowadzenie harmonicznych wyższego rzędu.

Badany obiekt

W artykule przedstawiono wyniki badań pomiarowych wykonanych w stacji uzdatniania i oczyszczania wody w Rzeszowie, pomiary wykonano w stacji transformatorowej SS1 w czasie normalnej pracy zakładu. Dokonano zmian przepływu na pompie wody czystej, która jest odbiornikiem nieliniowym o największej mocy w zakładzie (200 kW). Pompa ta pompuje wodę do wodociągu miejskiego. Jest sterowana poprzez przemiennik częstotliwości z falownikiem PWM. Jednocześnie w czasie badań pomiarowych pracowały również inne odbiorniki o łącznej mocy ok. 600 kW, w tym również odbiorniki nieliniowe.

Urządzenie pomiarowe

Pomiary wykonano wysokiej klasy analizatorem jakości energii. Urządzenie umożliwia pomiar napięć oraz prądów w każdej z faz. Na podstawie zmierzonych wielkości określa

zawartość poszczególnych harmonicznych w sygnale oraz wyznacza współczynnik zawartości harmonicznych THD. Analiza mierzonych wielkości odbywa się metodą cyfrową: mierzone sygnały są próbkowane 128 razy w jednym okresie. Częstotliwość modulowania wynosi 6400 Hz. Szybkość urządzenia umożliwia natychmiastowe przeliczenie wielkości z dziedziny czasu na dziedzinę częstotliwościową (wykorzystywana jest do tego transformata Fouriera). Analizator wymaga podania tzw. czasu całkowania, który powinien zależeć od dynamiki mierzonych sygnałów – możliwe jest podanie czasu z zakresu od 1 sekundy do 15 minut. Po upływie zadanego czasu całkowania przyrząd wyznacza charakterystyczne, opisujące mierzony sygnał parametry, są to:

- minimalna wartość mierzonej wielkości w zadanym czasie całkowania,
- średnia wartość mierzonej wielkości (średnia arytmetyczną wszystkich wartości zapisanych w całkowanym okresie),
- maksymalna wartość mierzonej wielkości w całkowanym okresie.

Te trzy wartości są zapisywane do pamięci analizatora i następnie cały cykl się powtarza. Tak dzieje się dla każdego mierzonych sygnału. W przeprowadzonych pomiarach czas całkowania został ustawiony na 1 sekundę.

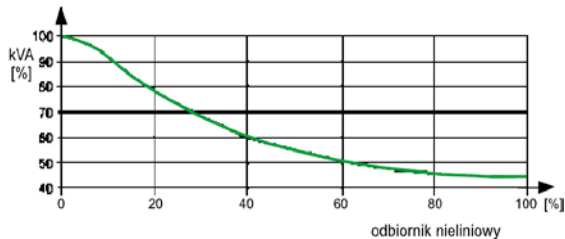
Zniekształcenia parametrów sieci zasilającej

Zniekształcenia parametrów sieci pojawiają się gdy sieć zasila odbiorniki nieliniowe, tj. takie które pobierają prąd o kształcie innym niż kształt napięcia zasilającego. Głównym zadaniem odbiorników nieliniowych jest poprawa efektywności wykorzystania energii elektrycznej i to właśnie w tym celu przekształcają one energię elektryczną prądu przemiennego na ten sam rodzaj energii, lecz o innych parametrach niż w sieci zasilającej (zmieniając wartość napięcia, prądu, częstotliwości). Przekształcenia te pozwalają w sposób energooszczędny dokonywać przemiany energii elektrycznej na:

- energię mechaniczną – silniki elektryczne,
- świetlną – energooszczędne źródła światła,
- grzewczą – piece i grzejniki elektryczne,
- chemiczną – procesy elektrochemiczne.

Niestety jak wspomniano wcześniej efektem ubocznym stosowania odbiorników nieliniowych jest przesyłanie

zakłóceń do sieci elektroenergetycznej, która zasila także inne odbiorniki. Zakłócenia te wpływają na pracę innych urządzeń powodując w skrajnych przypadkach ich uszkodzenia, a także negatywnie wpływają na poziom strat w urządzeniach i systemie przesyłowym [1]. Ponadto praca urządzeń nieliniowych obniża moc znamionową transformatora zasilającego – im większy udział odbiorników nieliniowych tym większy spadek mocy (rys.1.) [2].



Rys. 1. Zależność pomiędzy wykorzystaniem mocy znamionowej transformatora. a procentowym udziałem odbiorników nieliniowych. Źródło [2].

Do głównych zakłóceń jakie występują w sieci elektroenergetycznej zaliczamy:

- wyższe harmoniczne ,
- odkształcenia napięcia,
- zapady napięcia,
- wahania napięcia,
- krótkie i długie przerwy zasilania,
- asymetrie napięć,
- przepięcia [3].

Aby określić poziom zniekształceń napięciowych potrzebna jest wiedza o poziomie zniekształceń prądowych i zwarciowej impedancji układu. Niemożliwe jest określenie zniekształcenia napięciowego tylko na podstawie znajomości parametrów napędu - zniekształcenia napięciowe charakteryzują parametry układu zasilania, a zniekształcenia prądowe charakteryzują indywidualne cechy urządzenia [4].

Zniekształcenia napięcia zasilającego występujące w sieci energetycznej mogą być przyczyną uszkodzeń systemów sterowania falowników w zakładach gdzie stosuje się nieliniowe odbiorniki, ale mogą również wpływać na urządzenia poza zakładem, gdyż zniekształcenia rozchodzą się po sieci zasilającej. Wykonanie pomiarów jakości parametrów sieci pozwala na wykazanie wpływu poszczególnych odbiorników nieliniowych na kształt napięcia zasilającego.

Istnieje kilka parametrów decydujących o jakości sygnału zasilającego. Są to między innymi: zawartość harmonicznych, współczynnik zniekształcenia THDu. W normie PN-EN 50160 określono wartości poszczególnych parametrów napięcia, które nie mogą być przekroczone. Przepisy dopuszczają występowanie zakłóceń, jednak zakłady, w których występuje duża ilość odbiorników nieliniowych powinny zadbać o dobrą jakość energii, w celu zminimalizowania prawdopodobieństwa wystąpień awarii.

Przeмиenniki częstotliwości zastosowane w celu sterowania procesem technologicznym oczyszczenia wody powinny generować przemienny sygnał sinusoidalny. W celu określenia jakości działania systemu z przemiennikiem wykorzystuje się współczynnik zawartości harmonicznych w skrócie THD (*ang. Total Harmonic Distortion*). Współczynnik ten definiuje się jako stosunek wartości skutecznej obliczonej z pominięciem pierwszej harmonicznej (przyjmuje się, że składowa stała jest zerowa) do wartości skutecznej pierwszej harmonicznej:

$$w_h = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} X_{(k)}^2}}{X_{(1)}} \quad (1)$$

gdzie $X_{(k)}$ oznaczono jako wartość skuteczną k -tej harmonicznej danego sygnału $x(t)$.

Wartość THD dla idealnej sinusoidy wynosi 0, gdyż zawiera ona tylko harmoniczną podstawową (pierwszą). Dla idealnego prostokąta THD wynosi 0,483. Możemy więc stwierdzić, że mniejsza wartość THD, oznacza mniejsze odkształcenie przebiegu sygnału od idealnej sinusoidy.

Wkład poszczególnych harmonicznych w ostateczny kształt sygnału zdefiniowano jako współczynnik udziału harmonicznych (prądu oraz napięcia) i obliczany jest z zależności:

$$w_{(k)} = \frac{X_{(k)}}{X_{(1)}} \cdot 100\% \quad (3)$$

gdzie: $X_{(k)}$ – wartość skuteczna harmonicznej rzędu k , $k = 2, 3, 4, \dots, n$; n – liczba uwzględnianych w analizie harmonicznych; zgodnie z normą PN-EN 50160 $n=40$; $X_{(1)}$ – wartość skuteczna harmonicznej podstawowej.



Rys. 2. Widok pompy wody czystej w ZUW w Rzeszowie [zdj. Karol Szalajko]

Badania pomiarowe w Zakładzie Uzdatniania Wody

W Zakładzie Uzdatniania Wody w Rzeszowie przeprowadzono badania pomiarowe, które miały określić charakter sygnałów elektrycznych wynikający z pracy urządzeń nieliniowych (głównie są to pompy wodociągowe) oraz określić w jakim zakresie normalna praca zakładu oddziałuje na sieć energetyczną. W tym celu dokonano zmian przepływu wody na pompie wody czystej o mocy znamionowej 200kW (rys.2.), odpowiada ona za podawanie wody do rurociągu miejskiego. Regulacja prędkości pompy odbywa się poprzez przemiennik częstotliwości z falownikiem PWM. Jednocześnie pracowały w zakładzie inne odbiorniki nieliniowe, których praca jest niezbędna do realizacji procesu technologicznego przygotowania wody, były to między innymi pompa przewałowa o mocy 132 kW, generator ozonu o mocy 96 kW, dwie pompy wody surowej o mocy 37 kW każda. Celem pomiarów było sprawdzenie, czy wzrost wydajności pompy wody czystej powoduje zwiększenie wartości harmonicznych prądu oraz napięcia i wzrost wartości THD prądu i napięcia w stacji transformatorowej po pierwotnej stronie transformatora. Pomiary wykonywano dla różnych wartości przepływu, w artykule zaprezentowano skrajne pomiary – dla najmniejszego (514 m³/h) i największego zmierzonego przepływu (756 m³/h). Zmiana przepływu (wydajności pompy) spowodowana była zmianą prędkości jej wirowania. Wydajność pompy i moc na wale zmieniają się w funkcji

prędkości (częstotliwości) zgodnie z następującymi zależnościami:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad (3)$$

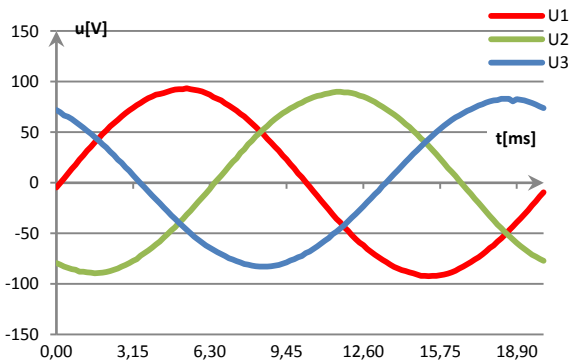
$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^3 \quad (4)$$

gdzie: Q_1, Q_2 – przepływy (wydajność pompy),
 P_1, P_2 – moce na wale pompy
 ω_1, ω_2 – prędkości pompy.

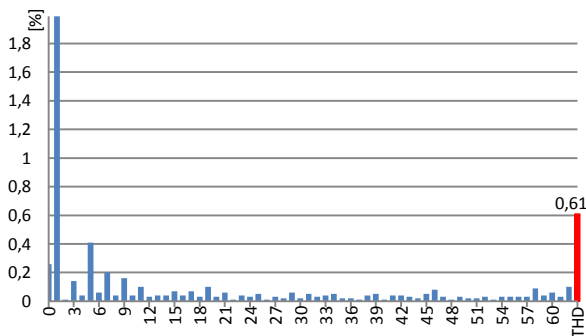
Oznacza to, iż w analizowanym przypadku moc pompy wzrosła 3,2 raza.

Pomiarów dokonano w stacji transformatorowej po stronie wysokiego napięcia wykorzystując przekładniki o przekładni napięciowej 15000/100 oraz prądowej 75/5.

W celu poprawy czytelności na rysunkach 4, 6, 8, 10 - pokazujących współczynniki zawartości harmonicznych - zawężono wartości pierwszej harmonicznej. W każdym przypadku wartość pierwszej harmonicznej wynosiła 100%

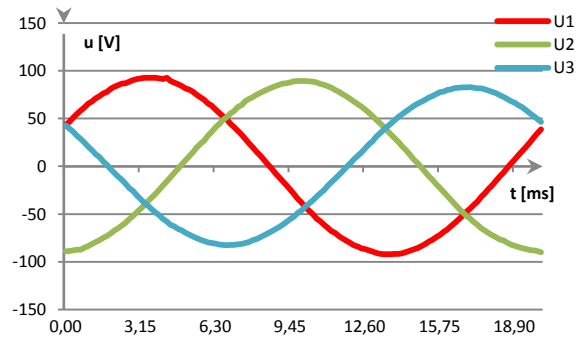


Rys.3. Przebieg trzech faz napięcia zasilającego przy przepływie 514 m³/h

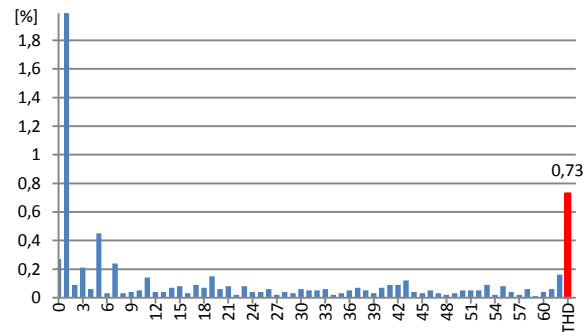


Rys.4. Analiza harmoniczna dla pierwszej fazy napięcia przy przepływie 514 m³/h

Wizualnie przebiegi napięć fazowych zasilających pokazane na rys.3. dla przepływu 514 m³/h wydają się bliskie idealnym - potwierdzają to wyznaczone wartości współczynnika odkształcenia napięcia które wynoszą odpowiednio dla każdej z faz 0,61%; 0,77%; 0,71%. Największy udział mają harmoniczne 5-ta i 7-ma, których współczynniki udziału wynoszą odpowiednio 0,41%; 0,50%; 0,30% oraz 0,20%; 0,29%; 0,32% dla każdej z faz (rys.4.).

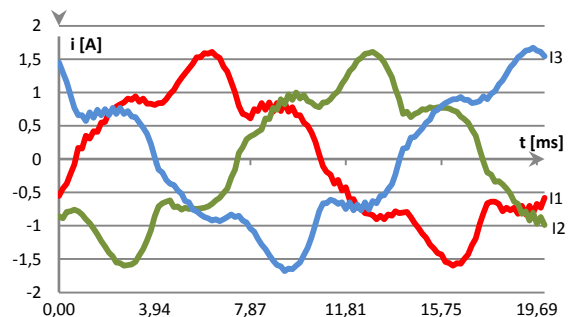


Rys.5. Przebieg trzech faz napięcia zasilającego przy przepływie 756 m³/h

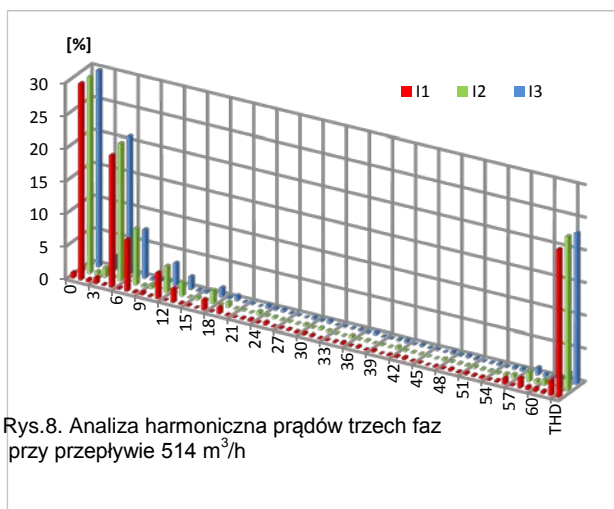


Rys.6. Analiza harmoniczna dla pierwszej fazy napięcia zasilającego przy przepływie 756 m³/h

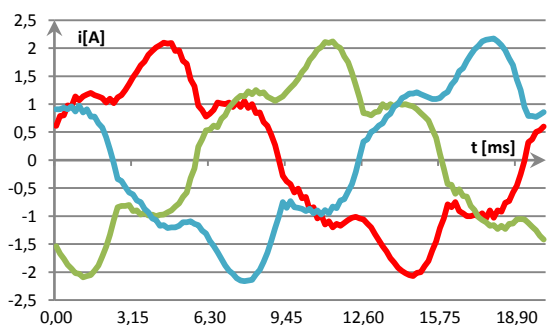
Dla przepływu 756 m³/h - co odpowiada ponad 3- krotnemu wzrostowi mocy pompy wody czystej - wyznaczona wartość współczynnika odkształcenia napięcia praktycznie się nie zmieniła (przebieg napięcia pokazany na rys.5 nadal wydaje się nieodkształcony). Dla pierwszej fazy współczynnik wzrósł z wartości 0,61% do 0,73% (rys.4, rys.6.), dla fazy drugiej pozostał praktycznie niezmienny i wynosił 0,77% dla przepływu mniejszego, a następnie 0,78% dla większego, natomiast dla fazy trzeciej współczynnik minimalnie zmalał z wartości 0,71% do 0,67%. Zgodnie z normą PN-EN 50160 współczynnik THD napięcia zasilającego (uwzględniający harmoniczne, do rzędu 40) powinien być mniejszy lub równy 8% [7]. W analizowanym przypadku jest on (THD) znacznie niższy, mimo, iż uwzględnia się składowe do 64 rzędu. Podobnie jest z zawartością poszczególnych harmonicznych, ich zawartość jest zdecydowanie niższa niż wartości dopuszczalne przez normę.



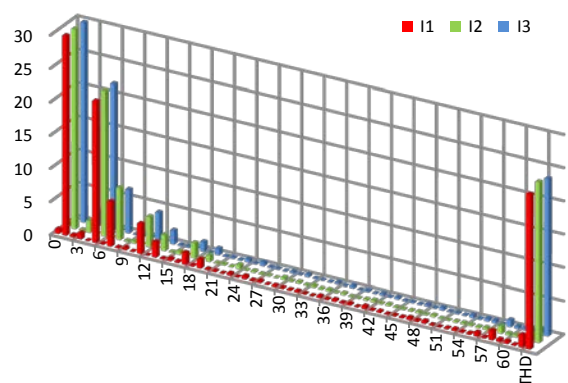
Rys. 7. Przebieg natężenia prądu w trzech fazach przy przepływie 514 m³/h



Rys.8. Analiza harmoniczna prądów trzech faz przy przepływie 514 m³/h



Rys. 9. Przebieg natężenia prądu w trzech fazach przy przepływie 756 m³/h



Rys.10. Analiza harmoniczna prądów trzech faz przy przepływie 756 m³/h

Tab.1. Zestawienie harmonicznych najmocniej wpływających na odkształcenia prądu.

Rząd harmonicznej	I ₁		I ₂		I ₃	
	514m ³ /h	756m ³ /h	514m ³ /h	756m ³ /h	514m ³ /h	756m ³ /h
5	20,24	21,34	21,07	21,89	21,08	21,87
7	7,93	6,74	8,61	7,81	7,43	6,55
11	3,98	4,51	4,00	4,56	3,44	4,19
13	2,13	2,31	2,15	2,36	1,95	2,03
17	1,62	1,8	1,99	2,25	1,41	1,41

Na rys. 7 i 9 pokazano przebieg prądu pobieranego przez zakład odpowiednio dla mniejszej (514 m³/h) oraz większej (756 m³/h) wydajności pompy wody czystej. Sygnały są wyraźnie odkształcone, spostrzeżenie to potwierdzają rys.8 i 10 pokazujące zawartość poszczególnych harmonicznych

oraz wartość współczynnika THD. Wyraźnie widać we wszystkich fazach dużą zawartość 5-tej harmonicznej oraz znaczący udział 7-mej, 11-tej, 13-tej oraz 17-tej harmonicznej (tabela 1).

Podsumowanie

W pracy przedstawiono pomiary oraz analizę rzeczywistych parametrów sygnałów elektrycznych zasilających układy napędowe pomp wodociągowych.

Zaprezentowane wyniki potwierdzają, iż napędy elektryczne zasilane poprzez przemienniki częstotliwości są odbiornikami energii elektrycznej o charakterze nieliniowym – świadczy o tym THD prądu przekraczające 20%.

Oddziaływanie odbiorników zlokalizowanych w Stacji Uzdatniania Wody w Rzeszowie na sieć energetyczną jest dostrzegalne ale nie powoduje znaczącego obniżenia jakości zasilania.

W [5] zaprezentowano wyniki badań ze stacji transformatorowej SS2. W niniejszym artykule ze stacji SS1. Wyniki z jednej i drugiej stacji potwierdzają, iż pomimo zmiany parametrów pracy największego nieliniowego odbiornika w Zakładzie, jakim jest pompa wody czystej nie zauważa się znaczących zmian wartości harmonicznych prądów i napięcia oraz THDi i THDu.

Piśmiennictwo

- [1] Malska W., Łatka M.: Wpływ odbiorników nieliniowych na parametry jakości energii elektrycznej, Wiadomości elektrotechniczne, 2007, nr 10, s. 12-16
- [2] Pasko M., Maciążek M., Buła D.: Wprowadzenie do zagadnień analizy jakości energii elektrycznej, Wiadomości elektrotechniczne, 2007, nr 4, s. 4-9
- [3] Henzelka Z., Jakość energii elektrycznej, www.twelvee.com.pl
- [4] Gizicki A., Kompatybilność elektromagnetyczna w aplikacjach z przetwornicami częstotliwości-wybrane zagadnienia ograniczania zakłóceń w obwodach zasilania, Pomiary, Automatyka, Robotyka, 2005, nr 7-8, s. 18-23.
- [5] Bartman J., Koziorowska A. - Wpływ nieliniowych odbiorników dużej mocy na sygnały zasilające – przykładowe pomiary - Technical News 1(31), 2(32)/2010, str. 68-71
- [6] Koziorowska A., Kuryło K., Bartman J. - Harmoniczne napięcia i prądu generowane przez nowoczesne napędy stosowane w kopalniach kruszywa – Przegląd Elektrotechniczny nr 6/2010 str. 279-284
- [7] PN EN 50160 „Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych” PKN 1998
- [8] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego [DzU nr 93 z 2007 r., poz. 623]
- [9] Standard IEEE 519-92

Autorzy: dr inż. Jacek Bartman, Uniwersytet Rzeszowski, Instytut Techniki, al. Rejtana 16c, 35-959 Rzeszów, E-mail: jbartman@univ.rzeszow.pl; dr inż. Anna Koziorowska, Uniwersytet Rzeszowski, Instytut Techniki, al. Rejtana 16c, 35-959 Rzeszów, E-mail: akozioro@univ.rzeszow.pl; dr inż. Kazimierz Kuryło, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, ul. Pola 2, E-mail: kkurylo@prz.edu.pl; 35-959 Rzeszów; dr inż. Wiesława Malaska, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, ul. Pola 2, E-mail: wmalska@prz.edu.pl; 35-959 Rzeszów;