

## Kształtowanie jakości energii i niezawodności w systemach zasilania elektrycznego

**Streszczenie.** W pracy podjęto tematykę jakości i niezawodności zasilania elektrycznego priorytetowych odbiorników energii. Przedstawiono zalety i wady elementów systemu zasilania gwarantowanego (jakimi są zasilacze UPS oraz zespoły prądotwórcze), wyniki badań ich parametrów funkcjonalnych oraz wskazano sposób osiągnięcia najkorzystniejszych rezultatów ich wykorzystania w systemach zasilania wrażliwych, strategicznych odbiorników energii.

**Abstract.** The paper deals with the problems of quality and reliability of power supply of priority energy receivers. The advantages and disadvantages of the parts of the guaranteed power supply systems (UPS and electric power generators) are specified, as well as the test results of their functional components. The way is presented to achieve the most favourable effects of their application to the power systems used to supply sensitive energy receivers of strategic significance (**Forming of energy quality and reliability in electrical power supply systems**).

**Słowa kluczowe:** jakość energii, niezawodność układów zasilania, systemy zasilania gwarantowanego (UPS), zespoły prądotwórcze.

**Keywords:** power quality, reliability of power supply systems, uninterruptible power supply (UPS), power generators.

### Wstęp

Dobra materialne (w szczególności techniczne) wytwarzane i użytkowane przez człowieka ulegają oddziaływaniom różnych czynników, które w rezultacie prowadzą do czasowego przerwania realizowanych przez nie funkcji bądź do ich rozregulowania lub destrukcji. W urządzeniach zasilanych elektrycznie jednym z takich czynników (poza oddziaływaniami zewnętrznymi) może być doprowadzanie energii elektrycznej o nieprawidłowych parametrach. We wszelkiej działalności gospodarczej, jak również życiu prywatnym człowieka wykorzystywanych jest coraz więcej urządzeń i systemów, których prawidłowe funkcjonowanie jest z określonych względów priorytetowe dla użytkownika. Ta poprawność funkcjonowania osprzętu w dużej mierze związana jest z pewnością i jakością dostarczanej do jego pracy energii elektrycznej [1-8]. Niekontrolowany zanik zasilania elektrycznego lub oddziaływanie zaburzeń, jakie mogą przenosić się sieciowo i docierać do wrażliwych odbiorników energii, mogą prowadzić do powstania zagrożeń dla życia bądź zdrowia człowieka (funkcjonowanie aparatury medycznej), utraty przetwarzanych informacji lub danych (których odtworzenie może być szczególnie trudne, a straty stąd wynikające często są niepoliczalne), uszkodzeń podzespołów wykorzystywanych urządzeń, nieoczekiwanego zadziałania urządzeń zabezpieczających, wystąpienia przerw w realizowanych procesach (w tym również w produkcji), uniemożliwienia korzystania z elementów kontroli dostępu do obiektów (bramy wjazdowe i garażowe, okna, drzwi i inne elementy tzw. budynku inteligentnego), pozbawienia możliwości ogrzania pomieszczeń (brak działania automatyki urządzeń grzewczych) lub z innych względów mogą być uciążliwe bądź kosztowne w skutkach dla użytkownika. W celu uniknięcia wystąpienia niekorzystnych efektów nieprawidłowości zasilania szczególnie ważnych dla użytkownika odbiorników powszechnie wykorzystuje się układy zasilania gwarantowanego. Niezawodność tworzonego systemu zasilania można kształtować dobierając odpowiednią do zapotrzebowania strukturę niezawodnościową urządzeń zasilających. Jest to związane z jednej strony z oczekiwanym poziomem niezawodności układu, z drugiej natomiast z zasadnością ponoszenia określonych obciążeń finansowych (kosztów wprowadzania i utrzymania zastosowanej struktury niezawodnościowej) wynikających z rozbudowy systemu [1,3,7,9].

W pracy zajęto się problematyką jakości i pewności doprowadzania energii elektrycznej do priorytetowych

(strategicznych) odbiorników. Opisano specyfikę elementów układów zasilania gwarantowanego. Głównie skupiono się na zasilaczach bezprzerwowych UPS oraz zespołach (agregatach) prądotwórczych. Przedstawiono ich wady i zalety, a w praktycznej części pracy rezultaty przeprowadzonych badań ich parametrów funkcjonalnych. Zestawienia te zrealizowano w celu uzyskania możliwości wskazania najkorzystniejszych rozwiązań wykorzystania tych urządzeń do zasilania wrażliwych odbiorników energii.

### Specyfika systemów zasilania rezerwowego

W przypadku odbiorników zasilanych sieciowo, w okresach awarii sieci, nieprawidłowych parametrów napięcia sieciowego bądź czasowych wyłączeń zasilania określonych odbiorców (np. podczas kłopotów z pokryciem zapotrzebowania na energię elektryczną), odbiorniki o znaczeniu priorytetowym dla odbiorcy mogą mieć podtrzymywane zasilanie przy wykorzystaniu określonego układu zasilania buforowego (awaryjnego) [1,3,9]. Wśród tych układów można wymienić systemy zasilania gwarantowanego UPS oraz zespoły (agregaty) prądotwórcze. Indywidualnie każde z tych źródeł zasilania ma określone mankamenty. Zasilacze UPS dostarczają napięcie o wysokiej klasy parametrach (sinusoidalne, o bardzo małych odkształceniach oraz stabilnych wartościach napięcia i częstotliwości), zarówno podczas pracy buforowej, jak również w czasie prawidłowego napięcia sieciowego. Jednak czas podtrzymania zasilania w trybie buforowym (baterijnym) jest w nich ograniczony ilością energii zgromadzonej w zasobnikach energii (akumulatorach). Agregaty prądotwórcze cechują się gorszymi parametrami wytwarzanego napięcia (znaczna zależność zmian częstotliwości, a czasem także wartości napięcia od dynamicznych zmian obciążenia oraz większe odkształcenia wytwarzanego przebiegu napięcia). Zaletą ich jest możliwość uzyskania długiego czasu podtrzymania zasilania, ograniczonego dostarczenia paliwa do silnika spalinowego [3,9].

Wykorzystać zalety, a jednocześnie wyeliminować wady każdego z tych systemów można stosując współpracę tych dwóch urządzeń. Wówczas podczas nieprawidłowości napięcia sieciowego agregat dostarcza długotrwale energię do zasilacza, a UPS wytwarza napięcie o wysokiej klasy parametrach, którym zasilane są zabezpieczone odbiorniki zarówno w pracy buforowej, jak również w czasie prawidłowych parametrów napięcia sieciowego. Dodatkowo wzrasta niezawodność powstałego w ten sposób systemu

zasilania, ponieważ w przypadku uszkodzenia zasilacza UPS do odbiorników może być dostarczana poprzez tor bypass energia bezpośrednio z sieci bądź wytwarzana w agregacie, a w przypadku awarii sieci oraz agregatu system UPS w trybie buforowym zasila zabezpieczone odbiorniki do czasu wyczerpania się energii zgromadzonej w akumulatorach. Jest to czas niezbędny do kontrolowanego zakończenia realizowanych procesów oraz bezpiecznego wyłączenia odbiorników.

Z przeprowadzonych rozważań wynika, że w systemie zasilania składającym się z sieci, zespołu prądowłórczego i zasilacza UPS odbiorniki mogą być zasilane [3,9]:

- z zasilacza UPS (którego obwód wejściowy może być zasilany z sieci, z agregatu prądowłórczego bądź z zasobnika energii – baterii akumulatorów) – osiąga się wówczas najlepsze parametry zasilania,
- z sieci elektroenergetycznej,
- z zespołu prądowłórczego.

### Wyniki badań współpracy zasilacza UPS i zespołu prądowłórczego

W celu zobrazowania specyfiki jakości energii w poszczególnych obiektach związanych z zasilaniem sieciowym i gwarantowanym, a jednocześnie potwierdzenia słuszności przytoczonych rozważań dokonano analizy współpracy systemu zasilania UPS i zespołu prądowłórczego z siecią zasilającą oraz wrażliwymi odbiornikami energii elektrycznej. Przeprowadzono odrębnie badania sieci, zasilacza UPS, agregatu prądowłórczego oraz współpracy tych układów zasilania. Badano prądy, napięcia, częstotliwość, moce czynną, bierną i pozorną, przebiegi czasowe, całkowite współczynniki odkształceń harmonicznego prądu i napięcia oraz zawartość poszczególnych harmonicznym (widmo częstotliwościowe). Badania realizowano na SYSTEMIE ZASILANIA GWARANTOWANEGO EVER&FOGO 15-33, składającym się z UPS EVER POWERLINE GREEN 33 oraz zespołu prądowłórczego FOGO FP 20 ACG [10].

Badany UPS POWERLINE GREEN 33 charakteryzuje się następującymi parametrami znamionowymi:

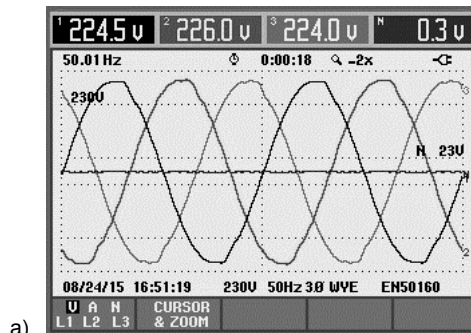
- maksymalna moc pozorna (wyjściowa): 15 kVA,
- maksymalna moc czynna (wyjściowa): 12 kW,
- znamionowe napięcie 3 x 400 V,
- znamionowa częstotliwość 50 Hz,

natomiast agregat prądowłórczy typu FP 20 ACG:

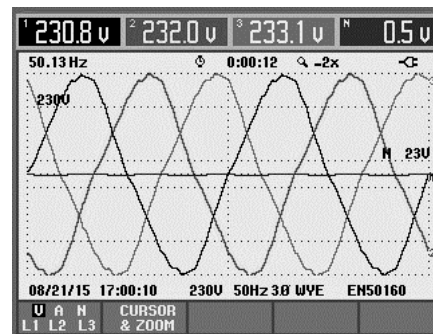
- maksymalna moc pozorna (wyjściowa): 19,8 kVA,
- maksymalna moc czynna (wyjściowa): 15,8 kW,
- znamionowe napięcie: 3 x 400 V,
- znamionowa częstotliwość: 50 Hz.

Na rysunku 1, jako przykładowe rezultaty zrealizowanych badań, zamieszczono przebiegi czasowe napięć przy obciążeniu rezystancyjnym (na poziomie połowy obciążenia znamionowego) odpowiednio na zaciskach zasilania z: a) sieci elektroenergetycznej, b) zespołu prądowłórczego, c) zasilacza UPS. Odczytano także współczynniki zawartości harmonicznym napięcia na zaciskach tych układów. Z ich porównania można już wstępnie wyciągnąć wnioski, dotyczące jakości zasilania elektrycznego z poszczególnych źródeł. Analiza wyników wskazuje jednoznacznie, że najmniej odkształcony od sinusoidy jest przebieg napięcia zasilacza UPS (całkowity współczynnik odkształcenia napięcia  $THD_U = 0,6\%$ ). Całkowite współczynniki odkształcenia napięć z pozostałych źródeł są wyższe: w przypadku sieci  $THD_U = 1,8\%$ , a w agregacie  $THD_U = 7,4\%$ .

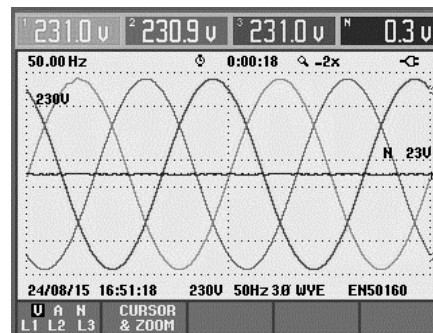
Intensywniejsze odkształcenia napięć (szczególnie w agregatach prądowłórczych) obserwuje się przy załączeniu obciążeń biernych (największe przy zasilaniu odbiorników o charakterze rezystancyjno-pojemnościowym).



a)



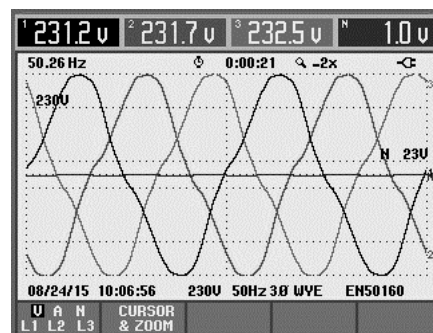
b)



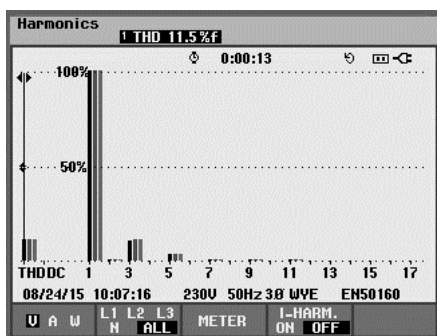
c)

Rys. 1. Przebiegi czasowe trójfazowego układu napięć dostarczanych do odbiorników przy obciążeniu rezystancyjnym z: a) sieci zasilającej, b) zespołu prądowłórczego, c) zasilacza UPS

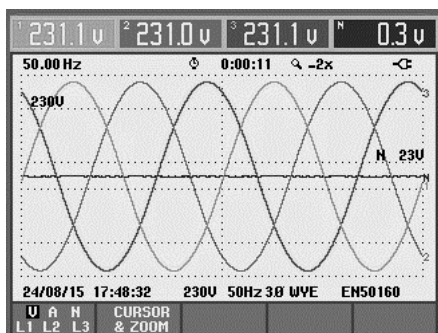
Na rysunkach 2 oraz 3 zamieszczono przebiegi czasowe oraz rozkłady widmowe harmonicznym napięć fazowych na wyjściu zespołu prądowłórczego przy obciążeniu rezystancyjno-pojemnościowym mocą  $Q = 3$  kvar oraz  $P = 7,25$  kW. Analogiczne wyniki pomiarów dla zasilacza UPS (przy obciążeniu rezystancyjno-pojemnościowym mocą  $Q = 3$  kvar oraz  $P = 6$  kW) przedstawiono na rysunkach 4 oraz 5.



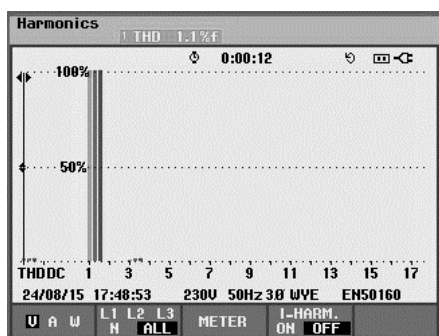
Rys. 2. Przebiegi czasowe napięć fazowych na wyjściu zespołu prądowłórczego przy obciążeniu rezystancyjno-pojemnościowym mocą  $Q = 3$  kvar oraz  $P = 7,25$  kW



Rys. 3. Wynik pomiaru rozkładów harmonicznych napięć fazowych na wyjściu zespołu prądotwórczego przy obciążeniu rezystancyjno-pojemnościowym mocą  $Q = 3$  kvar oraz  $P = 7,25$  kW



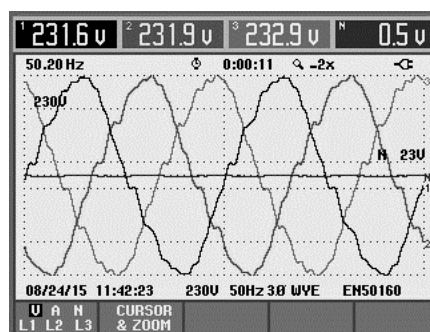
Rys. 4. Przebiegi czasowe napięć fazowych na wyjściu zasilacza UPS przy obciążeniu rezystancyjno-pojemnościowym mocą  $Q = 3$  kvar oraz  $P = 6$  kW



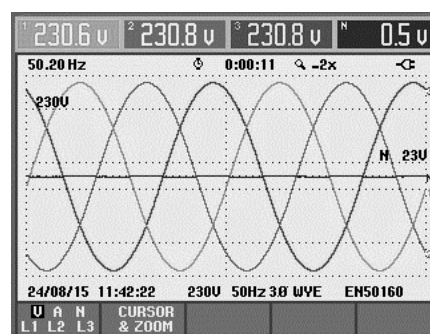
Rys. 5. Wynik pomiaru rozkładów widmowych harmonicznych napięć fazowych na wyjściu zasilacza UPS przy obciążeniu rezystancyjno-pojemnościowym mocą  $Q = 3$  kvar oraz  $P = 6$  kW

Różnice w wartościach obciążeń agregatu oraz zasilacza UPS wynikają z relacji, jakie należy zachować w doborze tych urządzeń podczas ich współpracy. Rezultaty przeprowadzonych badań potwierdzają wcześniejsze spostrzeżenia, że współczynnik zawartości harmonicznych ma niższą wartość w przypadku UPS (zaledwie 1,1%) i dominującą jest tu 3 harmoniczna, natomiast wartość THDu zespołu prądotwórczego jest na dziesięciokrotnie wyższym poziomie (11,5%), a dominującymi są harmoniczne 3 i 5.

W celu dopełnienia obrazu jakości napięć na zaciskach zespołu prądotwórczego oraz zasilacza UPS na rysunkach 6 oraz 7 zamieszczono przebiegi czasowe oraz zawartości harmonicznych napięć podczas współpracy tych urządzeń (obwód wejściowy UPS jest zasilany z wyjścia agregatu). Ponownie zauważyć można, że silniejsze odkształcenia sygnału napięcia mają miejsce w przypadku zespołu prądotwórczego, co widać na oscylogramach, a ilościowo potwierdzone jest na wykresach rozkładów widmowych harmonicznych. W tym przypadku na charakter odkształceń napięcia agregatu mają wpływ harmoniczne 3, 5, 9, 11 i 13.

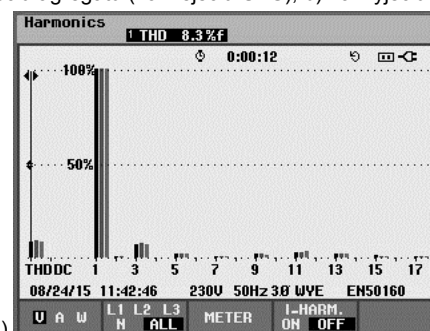


a)

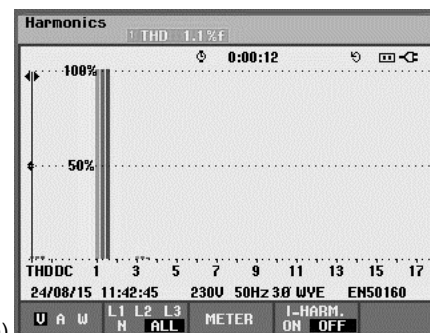


b)

Rys. 6. Przebiegi czasowe napięć fazowych przy obciążeniu rezystancyjno-pojemnościowym mocą  $Q = 3$  kvar oraz  $P = 6$  kW zasilacza UPS współpracującego z zespołem prądotwórczym: a) na wyjściu agregatu (na wejściu UPS), b) na wyjściu UPS



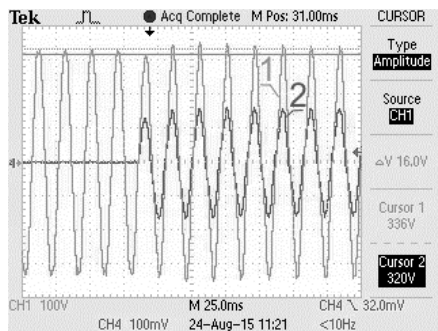
a)



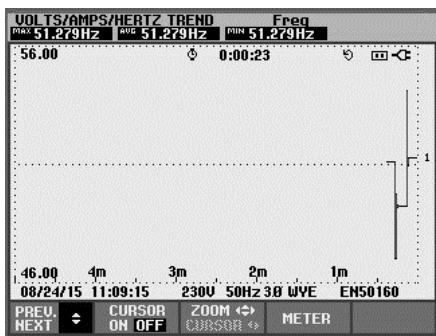
b)

Rys. 7. Wyniki pomiarów rozkładów widmowych harmonicznych napięć fazowych przy obciążeniu rezystancyjno-pojemnościowym mocą  $Q = 3$  kvar oraz  $P = 6$  kW zasilacza UPS współpracującego z zespołem prądotwórczym odpowiednio na: a) wyjściu agregatu (wejściu UPS), b) wyjściu UPS

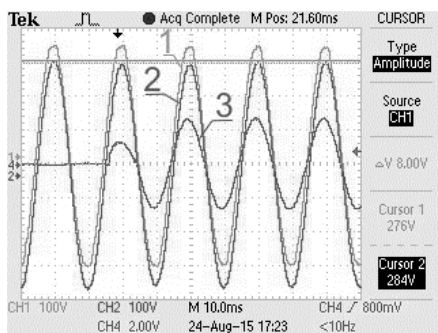
Jakość napięcia zasilania, to również jego stabilność podczas dynamicznych zmian obciążenia. Z tego względu na rysunkach 8 do 11 przedstawiono zachowanie się napięć w rozważanych układach przy gwałtownym załączeniu pełnego obciążenia znamionowego. Zmiana wartości napięcia (rys. 8 i 10) jest niższa w przypadku UPS (2,5%) niż w agregacie (4,9%), ale obie zmiany wartości napięć mieszczą się w zakresie dopuszczalnym unormowaniami nawet dla zasilania ciągłego [11,12].



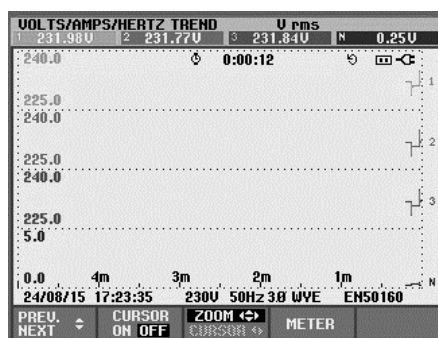
Rys. 8. Przebiegi oscyloskopowe napięcia na wyjściu zespołu prądowczego (1) oraz prądu obciążenia (2) w funkcji czasu przy gwałtownym załączeniu obciążenia o mocy  $P = 14,5 \text{ kW}$



Rys. 9. Przebieg zmian częstotliwości na wyjściu zespołu prądowczego w funkcji czasu przy gwałtownym załączeniu i wyłączeniu obciążenia o mocy  $P = 14,5 \text{ kW}$



Rys. 10. Przebiegi oscyloskopowe napięcia na wyjściu zasilacza UPS (1), napięcia sieci (2) oraz prądu obciążenia (3) w funkcji czasu przy gwałtownym załączeniu obciążenia o mocy  $P = 12 \text{ kW}$



Rys. 11. Przebieg zmian częstotliwości w funkcji czasu na wyjściu UPS przy gwałtownym załączeniu i wyłączeniu obciążenia o mocy  $P = 12 \text{ kW}$

Inaczej jest ze zmianą częstotliwości napięcia podczas gwałtownych zmian obciążenia (rys. 9 i 11). W agregacie chwilowe zmiany częstotliwości sięgają wartości  $\pm 4 \text{ Hz}$  (czyli 8%), a w UPS są niezauważalne.

Zdecydowanie korzystniejsze jakościowo parametry zasilania odbiorników osiąga się w przypadku UPS. Znaczną przewagą zespołów prądowczych nad zasilaczami UPS są czasy podtrzymania zasilania odbiorników w czasie awarii sieci [3,9]. W przypadku UPS są one rzędu minut, a w agregatach ograniczone są jedynie dostarczaniem paliwa do ich funkcjonowania.

### Uwagi końcowe i wnioski

Spośród wymienionych i badanych źródeł zasilania odbiorników najgorszymi parametrami zasilania charakteryzują się zespoły prądowcze, a następnie sieć elektroenergetyczna. Najkorzystniejszymi parametrami dostarczanej do odbiorników energii cechują się zasilacze UPS pracujące w trybie podwójnego przetwarzania energii (on-line). Ich wadą przy samodzielnej pracy jest krótki okres podtrzymania zasilania buforowego – do czasu wyczerpania się energii zgromadzonej w zasobnikach. Atutem zespołów prądowczych jest długi czas podtrzymania zasilania. Niedogodności urządzeń zasilania awaryjnego można wyeliminować, stosując współpracę zasilacza UPS z zespołem prądowczym i siecią zasilającą, uzyskując jednocześnie wyższy poziom niezawodności tak powstałego układu.

Jeszcze wyższy poziom niezawodności zasilania niż oferowany przez opisany system można osiągnąć stosując układy redundantne, w których dublowane są urządzenia bądź elementy najszybciej ulegające awarii albo zwielokrotniane są całe systemy, włącznie z siecią zasilającą [3]. Wiąże się to jednak ze znacznym zwiększeniem kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych powstałego systemu zasilania.

**Autorzy:** dr inż. Karol Bednarek, dr inż. Leszek Kasprzyk, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: [Karol.Bednarek@put.poznan.pl](mailto:Karol.Bednarek@put.poznan.pl); [Leszek.Kasprzyk@put.poznan.pl](mailto:Leszek.Kasprzyk@put.poznan.pl).

### LITERATURA

- [1] Bednarek K., Kasprzyk L., Suppression of higher harmonic components introduction to the networks and improvement of the conditions of electric supply of electrical equipment, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), No 12b, 236-239
- [2] Mohan N., Undeland T. M., Robbins W. P., *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, J. Wiley & Sons, 2003
- [3] Bednarek K., Wzrost bezpieczeństwa energetycznego poprzez zwiększanie niezawodności systemów zasilania energią elektryczną, *Przegląd Naukowo - Metodyczny. Edukacja dla Bezpieczeństwa*, Rok VII, 24 (2014), nr 3, 649-664
- [4] Bednarek K., Electrodynamic calculations and optimal designing of heavy-current lines, *Przegląd Elektrotechniczny*, 84 (2008), No 12, 138-141
- [5] Musiał E., Ocena jakości energii elektrycznej w sieciach przemysłowych, *Automatyka – Elektryka – Zakłócenia*, 2005, nr 1, 30-45
- [6] Bednarek K., Parametry cieplne w trójfazowych torach wieloprądowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 81 (2005), nr 12, 106-108
- [7] Korzeniewska E., Drzymała A., Elektrownie fotowoltaiczne – aspekty techniczne i ekonomiczne, *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013), nr 12, 324-327
- [8] Bednarek K., Nawrowski R., Tomczewski A., Trójfazowe torry wieloprądowe złożone z przewodów rurowych w indywidualnych osłonach, *Przegląd Elektrotechniczny*, 84 (2008), No 1, 62-64
- [9] Bednarek K., Współpraca zasilaczy UPS z zespołami prądowczymi, *Elektro.info*, 2015, nr 10, 54-55
- [10] <http://www.ever.eu/> [dostęp: 2016.09.09]
- [11] Dz. U. nr 93/2007, poz. 623 – Rozporządzenie Ministra Gospodarki z 4 maja 2007 w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego
- [12] PN-EN 50160: 2010 – Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych