

Edward CADLER<sup>1</sup>  
Kazimierz HERLENDER<sup>2</sup>

## KOMPATYBILNOŚĆ ELEKTROMAGNETYCZNA A ODBIORNIKI NIELINIOWE NISKIEGO NAPIĘCIA

*Postęp technologiczny w ostatnim okresie spowodował wzrost liczby odbiorników energoelektronicznych i odbiorników małej mocy zasilanych z przetworników impulsowych. Szczególnie negatywny wpływ na poziom zaburzeń elektromagnetycznych mają urządzenia o nieliniowej charakterystyce prądowo-napięciowej, które są prądowym źródłem harmonicznych. Zjawiska te mają bardzo duży wpływ na jakość energii elektrycznej.*

### 1 WSTĘP

Zwiększone zainteresowanie jakością energii elektrycznej (*jee*) różnych środowisk obserwuje się od dziewięćdziesiątych lat ubiegłego wieku. Przyczyną tego są m.in. przekształcenia w sektorach energetycznych, wprowadzenie zasady dostępu do sieci odbiorców energii (zasada TPA), kształtowanie sprzedaży energii i usług sieciowych na zasadzie umów cywilnoprawnych, instalowanie dużej liczby odbiorników energooszczędnych (o rosnącej mocy) z układami energoelektronicznymi o nieliniowej charakterystyce prądowo-napięciowej.

Problematyką *jee* zajmuje się obecnie wiele podmiotów. Jakość i niezawodność dostarczania energii elektrycznej stanowią skomplikowane zagadnienie techniczne, prawne oraz ekonomiczne. Próba zdefiniowania jakości energii elektrycznej w kategoriach prawnych wymaga określenia zbioru gwarantowanych parametrów jakości zasilania, a także ustalenia procedury pomiaru ich wartości. W zakresie ekonomicznym problemy dotyczą wyceny skutków złej jakości energii. Funkcjonowanie rynku energii opartego na dobrowolnych kontraktach handlowych wymaga dużej precyzji definiowania parametrów określających jakość energii elektrycznej w przepisach [1, 2]. Jakość energii ma wiele różnych znaczeń, zależnych między innymi od tego, kto podejmuje próbę jej zdefiniowania: dostawca, odbiorca energii czy producent urządzeń.

Odbiorcy finalni energii odczuwają bezpośrednio skutki złej jakości energii elektrycznej i definiują następująco: „Jakość energii wyraża się w napięciu i/lub prądzie lub odchyleniu częstotliwości od jej wartości znamionowej, które powoduje uszkodzenie lub niewłaściwą pracę odbiorników elektrycznych.”

<sup>1</sup> ENEA Operator Sp. z o.o., Oddział Dystrybucji Gorzów Wlkp., 73-200 Choszczno, Rejon Dystrybucji Choszczno, tel. 0957689302, e-mail: edward.cadler@gorzow.operator.enea.pl,

<sup>2</sup> Politechnika Wrocławska, Instytut Energoelektryki, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, 071 320 4413, kazimierz.herlender@pwr.wroc.pl,

Producent urządzeń definiuje jakość energii na podstawie parametrów znamionowych systemu zasilającego, które mogą zmienić się w zależności od dostawcy energii. Dla energetyki zawodowej problem sprowadza się obecnie głównie do niezawodności zasilania, dostawca energii będzie więc wyrażał jej jakość poprzez podanie statystycznego współczynnika będącego miarą przerw w zasilaniu oraz parametrów napięcia zasilającego. Ostateczna definicja winna obejmować spektrum punktów widzenia.

W literaturze technicznej często stosowany jest termin – jakość napięcia, traktowany jako miara różnicy pomiędzy istniejącym napięciem a przebiegiem idealnym. Ten ostatni jest sinusoidą o stałej częstotliwości i amplitudzie. Cechami jakości energii elektrycznej są wówczas wielkości odnoszące się do napięcia. Uwzględniając to, możemy przyjąć następującą definicję: „Jakość zasilania energią elektryczną” to zbiór parametrów opisujących właściwości procesu dostarczania energii do użytkownika w normalnych warunkach pracy określających ciągłość zasilania oraz charakteryzujących jakość energii (wartość, asymetrię, częstotliwość, kształt napięcia).

## **2 TECHNICZNO-EKONOMICZNE ASPEKTY ODDZIAŁYWANIA ODBIORNIKÓW NIELINIOWYCH**

Jednym z podstawowych pojęć związanych z użytkowaniem energii elektrycznej jest pojęcie kompatybilności elektromagnetycznej. Wg ustawy [3] do opisywania kompatybilności elektromagnetycznej (EMC - Electromagnetic Compatibility) przyjęto stosowanie określeń:

- odporność na zaburzenia elektromagnetyczne – zdolność urządzeń do działania zgodnie z przeznaczeniem bez ograniczania wykonywanych funkcji w przypadku wystąpienia zaburzeń elektromagnetycznych,
- zaburzenia elektromagnetyczne (termin używany jest w znaczeniu przyczyny) – dowolne zjawisko elektromagnetyczne, które może obniżyć jakość działania urządzeń albo niekorzystnie wpływać na materię żywą i nieżywą.

Z powyższymi zjawiskami spotykamy się coraz częściej.

Przy określaniu poziomów kompatybilności dla harmonicznych należy uwzględnić fakt, że z jednej strony liczba źródeł harmonicznych rośnie, a z drugiej strony udział czysto rezystancyjnych odbiorników, które działają jak elementy tłumiące, maleje w relacji do całkowitej mocy odbiorników. Postęp technologiczny w ostatnim okresie spowodował wzrost liczby odbiorników energoelektronicznych i odbiorników małej mocy zasilanych z przetworników impulsowych. Szczególnie negatywny wpływ na poziom zaburzeń elektromagnetycznych mają urządzenia o nieliniowej charakterystyce prądowo-napięciowej, które są prądowym źródłem harmonicznych (wyższe harmoniczne, interharmoniczne i subharmoniczne). Mimo istotnych zalet, urządzenia te powodują występowanie wyższych harmonicznych w prądzie, co z kolei prowadzi do odkształceń napięcie zasilających.

Dołączenie tej grupy odbiorników do sieci elektroenergetycznej powoduje pogorszenie parametrów jakościowych energii. Prądy odkształcone pobierane przez

odbiorców finalnych są dla energetyki zawodowej źródłem problemów związanych z utrzymaniem poprawnego ruchu sieci. W krajach o nowoczesnej technologii przemysłu około 70% produkowanej energii elektrycznej przekształca się przy użyciu układów energoelektronicznych. Szacuje się, że w USA w 1992 roku 15÷20% energii elektrycznej zużywały odbiorniki nieliniowe, natomiast w 2001 roku było to już 60÷80% [4].

### 3 KONSEKWENCJE WPLYWU ODBIORNIKÓW NIELINIOWYCH NA SIEĆ ZASILAJĄCĄ

Sieć elektroenergetyczna, szczególnie niskiego napięcia oprócz swojej podstawowej funkcji, przenosi również zaburzenia elektromagnetyczne, generowane w różnych punktach przez jej użytkowników. Na negatywne skutki oddziaływania harmonicznych narażone są odbiorniki, które pobierają prąd o sinusoidalnym przebiegu.

Przepływ prądów wyższych harmonicznych w sieci zasilającej powoduje pogorszenie *jee*, a także jest przyczyną wielu niekorzystnych zjawisk [5, 6, 7, 8].

Do negatywnych technicznych skutków oddziaływania harmonicznych na grupy urządzeń zalicza się [9, 10, 11, 12]:

- napowietrzne linie energetyczne – wzrost strat mocy czynnej,
- kablowe linie energetyczne – oprócz zwiększonych strat mocy czynnej, przyspieszeniu ulega proces starzenia izolacji,
- przewody instalacji elektrycznych - ulegają przeciążeniu (również przewód PEN). Przyczyną jest wzrost wartości skutecznej prądu, a tym samym wzrost strat w elementach rezystancyjnych,
- generatory, silniki – dodatkowe momenty harmoniczne, oscylacje mechaniczne oraz zwiększony poziom zakłóceń akustycznych,
- transformatory rozdzielcze – wzrost strat w rdzeniu i uzwojeniach,
- wyłączniki instalacyjne – zmniejszenie zdolności łączeniowej, proces przerywania łuku,
- układy elektroniczne i energoelektroniczne – uszkodzenia elementów układów na skutek wzrostu wartości maksymalnej napięcia, błędy czujników pomiarowych i synchronizacji, zakłócenia w pracy elementów diagnostyki i sprzętu medycznego, zabezpieczeń elektroenergetycznych i sprzętu RTV,
- przełączniki i styczniki – działają różnie w obecności harmonicznych, ich reakcja zależna jest również od rodzaju aparatu i jego producenta,
- przyrządy pomiarowe – kalibrowane dla pomiarów przebiegów sinusoidalnych, w obwodach z przebiegami odkształconymi mogą być źródłem błędów,
- kondensatory energetyczne – pobierają prąd większy niż w przypadku napięcia sinusoidalnego. Istnienie w napięciu wyższych harmonicznych stwarza dodatkowe niebezpieczeństwo wystąpienia rezonansu,

- zagrożenie porażeniem prądem elektrycznym – jest innym niekorzystnym skutkiem obciążenia (przeciążenia) harmonicznymi prądu przewodu ochronno-neutralnego – PEN.
- niewiarygodny pomiar energii elektrycznej – pomiar energii licznikami indukcyjnymi przy obciążeniu nieliniowym (np. energooszczędne wysokowydajne układy oświetleniowe – HID) obarczony jest błędem. W miarę wzrostu harmonicznym dostrzega się niedoszacowanie zużywanej energii, ale może też wystąpić zjawisko odwrotne (mała wartość pobieranego prądu – np. energooszczędne źródła światła małej mocy).
- źródła światła – wzrost wartości szczytowej odkształconego napięcia powoduje skrócenie czasu eksploatacji inkandescencyjnych źródeł światła.  
Występowanie wyższych harmonicznym ma również bardzo poważne konsekwencje ekonomiczne [13, 14]:
  - przedwczesne starzenie urządzeń, skutkuje skróceniem czasookresu eksploatacji,
  - przeciążenie sieci rozdzielczej wymusza konieczność zwiększenia ilości zamawianej energii,
  - odkształcenie prądu powoduje nieuzasadnione zadziałanie zabezpieczeń i niepotrzebne przerwy technologiczne.

Odbiorniki nieliniowe dzięki swoim licznym zaletom znajdują coraz szersze zastosowanie w różnych gałęziach gospodarki oraz u odbiorców komunalnych. Ich oddziaływanie na sieć zasilającą nie jesteśmy w stanie przecenić. Tym bardziej, że w coraz większym stopniu rolę dominującą źródeł tego rodzaju zaburzeń pełnią nie odbiorniki dużej mocy, lecz rozproszone odbiorniki małej mocy jednostkowej, ale występujące bardzo licznie. Do tej grupy odbiorników zaliczają się m.in. urządzenia RTV i gospodarstwa domowego (nie bez znaczenia jest również zużywanie energii przez te urządzenia w czasie „czuwania,„) oraz energooszczędne układy oświetleniowe, a wśród nich:

- lampy wyładowcze dużej skuteczności świetlnej nisko i wysokoprężne,
- świetlówki kompaktowe zintegrowane,
- regulatory natężenia oświetlenia.

Na podkreślenie zasługuje fakt, iż w strukturze zużycia energii elektrycznej przez urządzenia gospodarstwa domowego obserwujemy ciągły wzrost. Z 3,3% w 1993 roku do 4,5% w 2002 roku [15].

#### **4 WYNIKI POMIARÓW**

Pomimo podjętych działań w zakresie rozeznania oddziaływanie urządzeń RTV oraz energooszczędnych układów oświetleniowych na sieć rozdzielczą niskiego napięcia, zauważa się brak szerszych analiz dotyczących negatywnych cech eksploatacyjnych związanych z ich wpływem na jakość energii elektrycznej. Dane techniczne nie pozwalają na określenie np. poziomu generowania zaburzeń elektromagnetycznych.

Dostępne wyniki literaturowe są niepełne i uzasadniają podjęcie dodatkowych badań w tym zakresie. Przykładowe przebiegi czasowe i widma amplitudowe prądu w obwodach zasilających odbiorniki RTV i oświetleniowe przedstawiono na rysunkach 1-9.

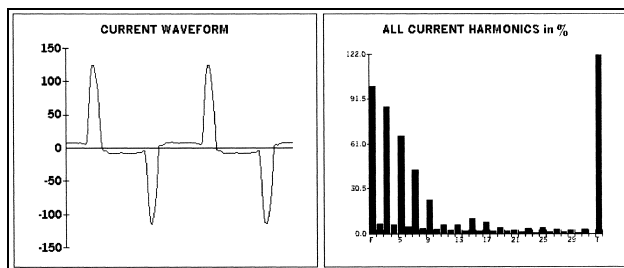
W tabeli nr 1 przedstawiono wartości ważniejszych parametrów odbiorników o nieliniowej charakterystyce prądowo-napięciowej zasilanych z publicznej sieci rozdzielczej. W poz. 1÷3 zestawiono dane dla odbiorników powszechnego użytku a w pozostałych pozycjach dla obwodów oświetlenia ulicznego.

Tabela 1. Wartości parametrów wybranych odbiorników nieliniowych niskiego napięcia

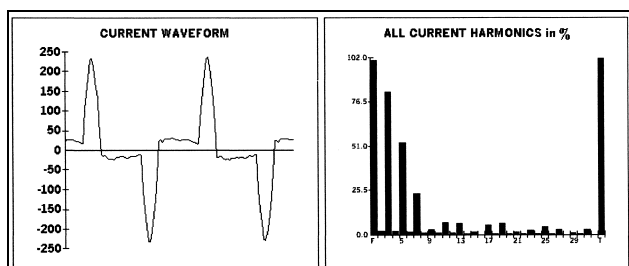
Lp.	Rodzaj odbiornika/ miejsce pomiaru	I	THD <sub>I</sub>	THD <sub>U</sub>	TP <sub>F</sub>	K <sub>F</sub>	K <sub>S</sub>
		[A]	[%]	[%]			
1	Odbiornik telewizyjny CRT 21" rys. 1	0,44	121,35	4,20	0,62	17,21	2,74
2	Zestaw komputer z drukarką	0,91	101,48	4,33	0,66	11,49	2,56
3	Światłówki kompaktowe zintegrowane	0,48	136,9	4,20	0,55	29,42	3,54
4	Złącze kablowe bloku mieszkalnego - przewód PEN	5,65	185,0	2,96	0,87	15,14	1,72
5	Kablowy obwód oświetleniowy – przewód PEN	1,89	198,3	---	---	49,02	2,20
6	Napowietrzny obwód oświetleniowy – przewód PEN	2,41	106,4	---	---	31,93	2,44
7	Napowietrzna linia elektroenergetyczna ze wspólnym przewodem PEN dla odbiorców komunalnych i oświetlenia	3,73	121,3	5,20	0,59	114,8	3,14
8	Obwód oświetleniowy z kompensacją indywidualną	2,38	37,11	3,93	0,94	14,07	1,68
9	Obwód oświetleniowy z kompensacją grupową	3,18	32,59	3,93	0,59	12,07	1,63
10	Obwód oświetleniowy bez filtra	16,89	28,80	3,30	0,96	2,46	1,57
11	Obwód oświetleniowy z filtrem	16,57	14,10	3,20	0,99	1,43	1,42

Oznaczenia wielkości podanych w tabeli 1:

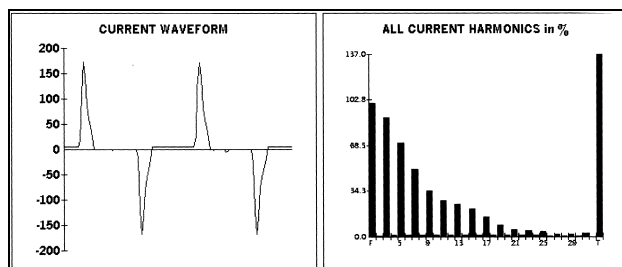
- THD<sub>U</sub> - współczynnik odkształcenia napięcia,
- THD<sub>I</sub> - współczynnik odkształcenia prądu,
- TP<sub>F</sub> - (*true power factor*) – współczynnik mocy,
- K<sub>F</sub> - (*k-factor*) – współczynnik oddziaływania odkształconego prądu na transformator,
- K<sub>S</sub> - współczynnik szczytu prądu.



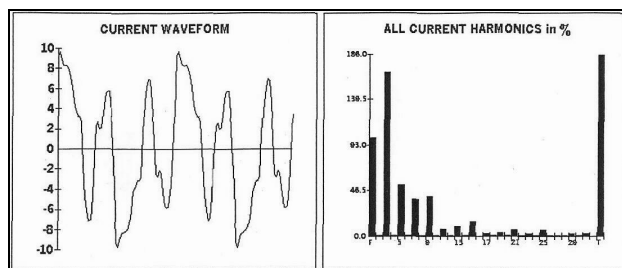
Rys. 1. Przebieg i widmo amplitudowe prądu w obwodzie zasilającym odbiornik telewizyjny CRF 21" w czasie pracy



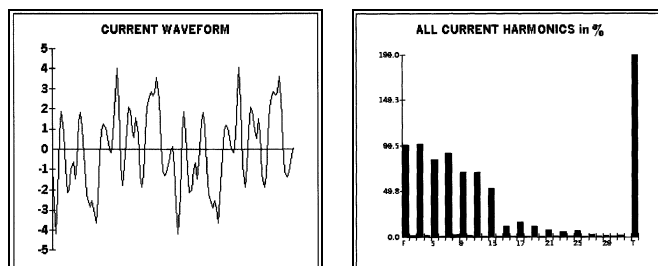
Rys. 2. Przebieg i widmo amplitudowe prądu w obwodzie zasilającym komputer w czasie pracy drukarki



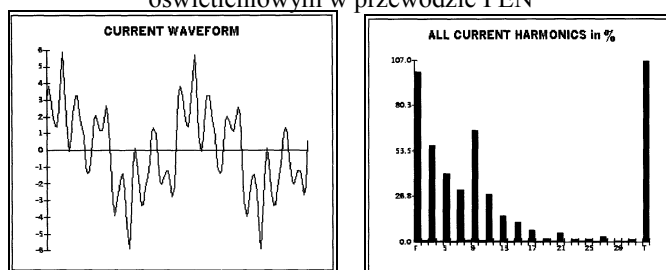
Rys. 3. Przebieg i widmo amplitudowe prądu w obwodzie ze świetłówkami kompaktowymi zintegrowanymi



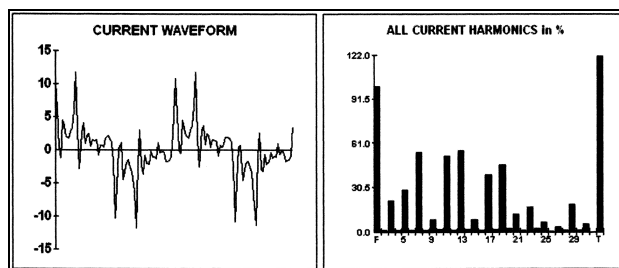
Rys. 4. Przebieg i widmo amplitudowe prądu w złączu kablowym bloku mieszkalnego w przewodzie PEN



Rys. 5. Przebieg i widmo amplitudowe prądu w kablowym obwodzie oświetleniowym w przewodzie PEN

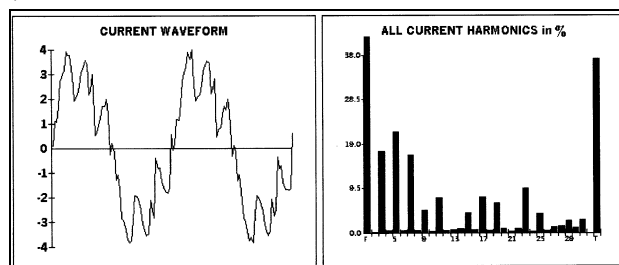


Rys. 6. Przebieg i widmo amplitudowe prądu w napowietrznym obwodzie oświetleniowym w przewodzie PEN

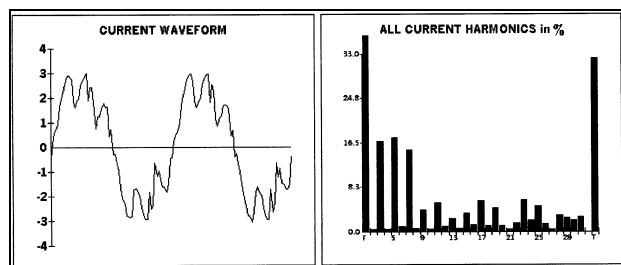


Rys. 7. Przebieg i widmo amplitudowe prądu w napowietrznej linii elektroenergetycznej ze wspólnym przewodem PEN dla odbiorców komunalnych i oświetlenia drogowego

a)



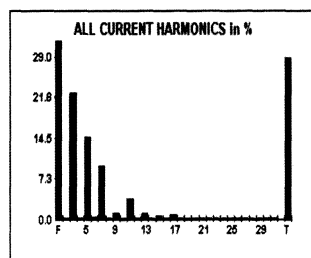
b)



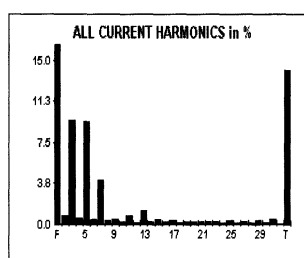
Rys. 8. Przebieg i widma amplitudowe prądu w kablowym obwodzie oświetleniowym:

a) kompensacja indywidualna, b) kompensacja grupowa

a)



b)



Rys. 9. Widma amplitudowe prądu w kablowym obwodzie oświetleniowym:  
przed załączeniem filtra, b) po załączeniu filtra

## 5 PODSUMOWANIE

Istnieje wiele metod poprawy *jee* w sieciach zasilających niskiego napięcia. Skuteczną i ekonomicznie uzasadnioną metodą poprawy jakości energii jest stosowanie w obwodach oświetleniowych kompensacji grupowej, w miejsce kompensacji indywidualnej zalecanej przez producentów opraw oświetleniowych. Poprawę parametrów energii można uzyskać również przy pomocy filtrów aktywnych małej mocy.

Szczególne znaczenie mają nowoczesne instalacje oświetleniowe pracujące z innymi urządzeniami nieliniowymi przyłączonymi do wspólnych węzłów lub pracujące samodzielnie. Zasadniczą wadą energooszczędnych układów oświetleniowych jest generowanie wyższych harmonicznych, co może powodować w instalacjach i obwodach elektrycznych odkształcenia napięcia od sinusoidy ponad dopuszczalne wartości określone odpowiednimi aktami prawnymi (odkształcenia prądów nie są normowane).

O jakość energii elektrycznej powinni dbać zarówno dostawca energii, producent urządzeń jak i klient – odbiorca finalny. W dobie urynkwienia energii elektrycznej, jej dostawca powinien być wyposażony w:

- uregulowania formalno – prawne pozwalające na egzekwowanie od odbiorców zużywania energii zgodnie z umową sprzedaży energii elektrycznej,



- specjalistyczną aparaturę pomiarowo-rejestrującą mierzącą wielkości określone w normie [2], a nie tylko zgodnie z tą normą.

## 5.LITERATURA

1. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (Dz. U. Nr 93, poz. 623).
2. Norma PN-EN 50160:2002/Ap1:2005 Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych.
3. Ustawa z dnia 13 kwietnia 2007 r. o kompatybilności elektromagnetycznej (Dz. U. Nr 82, poz. 556).
4. Akagi H.: Trends in Active Power Line Conditions. IECON'92.
5. Strzelecki R., Benysek G., Noculak A.: Wykorzystanie urządzeń energoelektronicznych w systemie energetycznym. Przegląd Elektrotechniczny, nr 2, 2003, s. 41-48.
6. Hanzelka Z. Jakość dostaw energii elektrycznej wyzwaniem dla współczesnej elektrotechniki. Elektroinfo, nr 12, 2006, str. 16-22.
7. Peng F.Z., Akagi H., Nabae A.: A New approach to harmonic compensation In power systems-a combined system of shunt passive and series active filters. IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-26, No 6, 1990, pp. 983-990.
8. Cadler E.: Techniczne konsekwencje modernizacji oświetlenia. Konferencja Naukowo-Techniczna Energooszczędne oświetlenie miast. Kraków 11 października 2001.
9. Cadler E., Noculak A.: Wpływ odbiorników nieliniowych na straty przesyłu energii w liniach niskiego napięcia. Przegląd Elektrotechniczny, nr 7-8, 2007, s. 37-39.
10. Herlender K., Cadler E.: Wpływ sposobu zasilania nowoczesnych układów oświetleniowych na jakość energii elektrycznej. Wiadomości Elektrotechniczne, nr 3, 2006, s. 30-32.
11. Kuśmierk Z.: Harmoniczne w systemach elektroenergetycznych. Przegląd Elektrotechniczny, nr 6, 2006, s. 8-19.
12. Pasko M., Maciążek M.: Wkład elektrotechniki teoretycznej w poprawę jakości energii elektrycznej. Wiadomości Elektrotechniczne 2004, nr 7-8, s. 37-46.
13. Siwik A.: Energooszczędne lampy wyładowcze jako źródła zakłóceń w sieciach niskich napięć. JiUEE, t. II, z. 2, 1996, s. 3-8.
14. Jakość energii w europejskich sieciach elektroenergetycznych. Grupa Ekspertów ds. Normalizacji Eurelectric. Bruksela 2002.
15. Główny Urząd Statystyczny Efektywność wykorzystania energii w latach 1994-2004. Warszawa 2006.