

Zastosowanie filtrów pasywnych do eliminacji wyższych harmonicznych prądu

Streszczenie. W artykule przeanalizowano zagadnienia związane z jakością energii elektrycznej w instalacjach oświetleniowych z nowoczesnymi źródłami światła. Rozpoczęto od analizy metodologii obliczania parametrów energii w warunkach odkształconych przebiegów prądów i napięć. Następnie przeprowadzono analizę wyników pomiarów uzyskanych dla wybranych opraw oświetleniowych. Na koniec zaproponowano rozwiązanie umożliwiające poprawę jakości energii elektrycznej poprzez zastosowanie pasywnych filtrów rezonansowych.

Abstract. The article analyzes issues related to the quality of electricity in lighting installations with modern light sources. It began with an analysis of the methodology for calculating energy parameters under distorted current and voltage waveforms. Then, the analysis of the measurement results obtained for the selected lighting fixtures was carried out. Finally, a solution was proposed to improve the quality of electricity through the use of passive resonant filters. (**The use of passive filters to eliminate higher harmonics of the current**).

Słowa kluczowe: jakość energii; źródła światła; składowe harmoniczne; współczynnik mocy.

Keywords: energy quality; light sources; harmonics components; power factor.

Charakterystyka problemu

Wraz z rosnącym zastosowaniem nowych technologii w układach zasilania w sieciach elektroenergetycznych nasila się problem zachowania wymaganych przez normy parametrów określających jakość energii elektrycznej [6,7,9,15,16,17]. W wielu pracach [5,11,14] przedstawiono zarówno definicję podstawowych parametrów jakości energii elektrycznej oraz metody kształtowania przebiegów prądów i napięć. Poruszano również problem ograniczania wyższych harmonicznych w sieciach. Bezpośrednią przyczyną generowania w układzie wyższych harmonicznych prądu są odbiorniki nieliniowe. Eksploatowanych jest coraz więcej odbiorników o charakterystykach nieliniowych. Są to urządzenia elektryczne z układami energoelektronicznymi, takimi jak: prostowniki, zasilacze impulsowe czy przekształtnikowe układy napędowe. W instalacjach oświetleniowych zasilacze impulsowe stosowane są w urządzeniach ze źródłami fluorescencyjnymi, metalohalogenkowymi i przede wszystkim w coraz popularniejszych urządzeniach z diodami elektroluminescencyjnymi LED. Stałe rosnąca liczba odbiorników nieliniowych również w instalacjach oświetleniowych, powoduje narastające problemy z odkształceniem przebiegów prądów. Odkształcenia prądów są nie tylko większe niż dopuszczane przez aktualnie obowiązujące normy, lecz w skrajnych przypadkach są tak duże, iż są przyczyną różnego rodzaju awarii [2,7,15].

Ocena zawartości harmonicznych prądu powinna być dokonywana zgodnie z zapisami norm [19,20]. Coraz powszechniej stosowane urządzenia oświetleniowe z nowoczesnymi źródłami światła takimi jak wyładowcze czy LED, mają silnie nieliniowe charakterystyki, w związku z czym powodują znaczne odkształcenie prądu sieci zasilającej. Związane z odkształceniem wyższe harmoniczne prądu można wyeliminować stosując równoległy filtr rezonansowy [6,8,10,13]. Filtry rezonansowe są szeroko stosowane do poprawy jakości energii elektrycznej. Mogą pracować samodzielnie, jako filtry pasywne [1,3] lub współpracować z filtrami aktywnymi, tworząc filtr kompozytowy [2,4,12]. Filtr rezonansowy powinien być zaprojektowany z myślą o konkretnej aplikacji, przy uwzględnieniu impedancji sieci zasilającej w zadanym miejscu przyłączenia obciążenia, widma harmonicznych generowanych przez zadane obciążenie oraz odpowiednich dla analizowanego przypadku norm.

Wymagania dotyczące zawartości wyższych harmonicznych prądu i napięcia oraz współczynniki mocy (PF) dla urządzeń oświetleniowych

Odształcenia harmoniczne napięcia i prądu w sieciach elektroenergetycznych są traktowane w przepisach bardzo różnie. Norma [16] określa parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych określając między innymi dopuszczalne poziomy poszczególnych harmonicznych oraz całkowity współczynnik odkształcenia harmonicznymi w napięciu zasilającym THD_U , uwzględniający wyższe harmoniczne do rzędu 40. Dla sieci o napięciu poniżej 110 kV powinien być nie większy niż 8% w tzw. punkcie przyłączenia odbiorcy. Norma podaje również procentowe zawartości harmonicznych dla składowych parzystych i nieparzystych (tabela 1). Zgodnie z normą [15] współczynniki odkształcenia harmonicznymi napięcia i prądu można wyznaczyć z zależności:

$$(1) \quad THD_U = \sqrt{\sum_{h \neq 1} \left(\frac{U_h}{U_1} \right)^2}$$

gdzie: U_1 , U_h – wartości skuteczne kolejnych składowych harmonicznych napięcia, h – numer harmonicznej

$$(2) \quad THD_I = \sqrt{\sum_{h \neq 1} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2}$$

gdzie: I_1 , I_h – wartości skuteczne kolejnych składowych harmonicznych prądu, h – numer harmonicznej

W przypadku występowania interharmonicznych, zawartość wyższych harmonicznych wyznacza się ze wzorów:

$$(3) \quad THD_U = \frac{\sqrt{U^2 - U_1^2}}{U_1}$$

$$(4) \quad THD_I = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I_1}$$

gdzie: U , I – wartości skuteczne napięcia i prądu.

W celu oceny zawartości harmonicznych w napięciu dokonuje się pomiarów wartości poszczególnych składowych, wyznacza współczynnik THD_U i porównuje z wartością dopuszczalną. W razie przekroczenia wartości granicznej dostawca energii powinien podjąć stosowne kroki mające na celu zmniejszenie wartości THD_U .

W normie [17] określono dopuszczalne poziomy emisji harmonicznego prądu dla fazowego prądu zasilającego odbiornik nie większego niż 16 A. Norma ta dotyczy odbiorników jednofazowych do użytku domowego lub biurowego i dzieli urządzenia na cztery klasy A, B, C i D, dla których określone są limity zawartości poszczególnych harmonicznym:

Odbiorniki oświetleniowe, w zależności od wejściowej mocy czynnej są podzielone na dwie grupy – większej niż 25 W i mniejszej lub równej 25 W. W przypadku sprzętu oświetleniowego o wejściowej mocy czynnej większej niż 25W, harmoniczne prądu nie powinny przekraczać względnych poziomów podanych w tabeli 1. co w przeliczeniu prądu harmonicznego na moc daje poziomy pokazane kolumnie 2 tabeli 2. Dla sprzętu oświetleniowego o wejściowej mocy czynnej nie większej niż 25 W harmoniczne prądu nie powinny przekraczać poziomów dopuszczalnych zależnych od mocy znamionowej i podanych w kolumnie 2 tabeli 3. Z powyższego wykazu wynika, że sprzęt oświetleniowy należy zakwalifikować do klasy C (dla odbiorników o mocy P≤ 25W do klasy D).

Tabela 1. Poziomy dopuszczalne zawartości harmonicznym P>25 W (klasa C)

Rząd harmonicznym	Maksymalny dopuszczalny prąd harmonicznym wyrażony w procentach składowej podstawowej prądu wejściowego
h	[%]
2	2
3	30·PF
5	10
7	7
9	5
11 ≤ h ≤ 39 tylko nieparzyste	3

PF - współczynnik mocy obwodu

Tabela 2. Poziomy dopuszczalne zawartości harmonicznym P≤25 W (klasa C)

Rząd harmonicznym	Maksymalny dopuszczalny prąd harmonicznym w przeliczeniu na Wat
h	[mA/W]
2	3,4
3	1,9
5	1,0
7	0,5
9	0,35
11 ≤ h ≤ 39 tylko nieparzyste	3,85/h

Na podstawie przeprowadzonych badań autorzy pracy [25] stwierdzają że:

- wartość THD_I poniżej 10% jest dopuszczalna - nie występuje ryzyko niepoprawnego działania urządzeń,
- wartość THD_I pomiędzy 10% a 50% wskazuje na duże odkształcenie przebiegów - niektóre urządzenia mogą działać niepoprawnie,
- wartość THD_I powyżej 50% wskazuje na bardzo duże odkształcenie przebiegów - wysoce prawdopodobne jest błędne działanie urządzeń, niezbędna jest szczegółowa analiza pracy systemu oraz dobór i instalacja urządzeń ograniczających harmoniczne.

W rozdziale 4.16 standardu IEEE 1459-2010 [15] zdefiniowano zależność pomiędzy PF , $\cos\theta$, oraz współczynnikiem THD :

$$(5) PF = \frac{P}{S} = \frac{U_1 I_1 \cos\theta_1 + \sum_{h \neq 1} U_h I_h \cos\theta_h}{\sqrt{\left(U_1^2 + \sum_{h \neq 1} U_h^2 \right) \left(I_1^2 + \sum_{h \neq 1} I_h^2 \right)}}$$

gdzie: S – całkowita moc pozorna, P – całkowita moc czynna, θ_1, θ_h - kąty przesunięcia fazowego przebiegów napięć i prądów kolejnych harmonicznym, PF – całkowity współczynnik mocy.

Współczynnik mocy zdefiniowany zgodnie ze wzorem (5) zależy od wartości poszczególnych harmonicznym, jak wynika z tabeli 3. dla odbiorników małej mocy może on przyjmować wartości nieco powyżej 0,5. Wynika z tego że odbiorniki o mocy mniejszej niż 25 W (zgodnie z przepisami) mogą mieć większą dopuszczalną zawartość harmonicznym prądu [17,20].

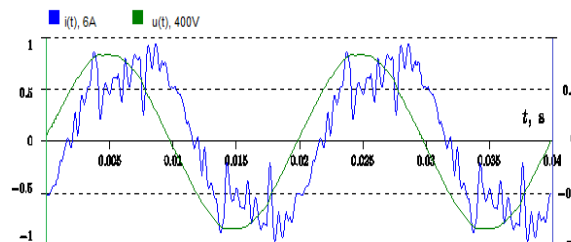
Wartość współczynnika mocy PF zależy od składowych harmonicznym napięcia i prądu. Dla opraw oświetleniowych do niedawna określone były tylko wartości współczynnika mocy dla lamp wyładowczych [19]. Od stycznia 2013 roku określono jego wartość również dla opraw LED [20]. Wartości dopuszczalne zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wartości współczynnika mocy dla lamp (opraw) oświetleniowych

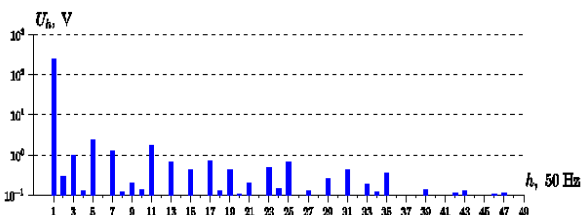
	PF
Wymogi dotyczące funkcjonalności dla pozostałych lamp (opraw) kierunkowych (z wyjątkiem lamp : LED, CFL i wyładowczych dużej intensywności)	≥ 0,5 dla P ≤ 25 W ≥ 0,90 dla P > 25 W
Wymogi dotyczące funkcjonalności dla bezkierunkowych i kierunkowych (opraw) lamp LED	P ≤ 2 W brak wymogu 2 W < P ≤ 5 W ; PF > 0,4 5 W < P ≤ 25 W ; PF > 0,5 P > 25 W ; PF > 0,9

Wyniki pomiarów

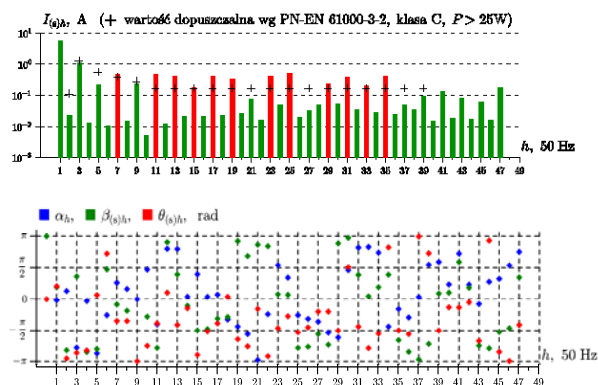
W układzie sieć zasilająca – odbiornik oświetleniowy zarejestrowano napięcie sieci oraz prądy. Uzyskane przebiegi przedstawiono na rysunku 1. Uzyskane widmo harmonicznym napięcia przedstawiono na rysunku 2. Na rysunku 3 przedstawiono widma harmonicznym prądów oraz ich argumenty i przesunięcia fazowe względem napięcia.



Rys.1. Zarejestrowane przebiegi prądu i napięcia.



Rys.2. Widmo harmonicznych zarejestrowanego przebiegu napięcia



Rys.3. Widmo harmonicznych i przesunięcia fazowe zarejestrowanego prądu sieci zasilającej

W dalszej kolejności wyznaczono wartości skuteczne prądu i napięcia oraz współczynniki THD badanych przebiegów. Obliczone wartości zestawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Wartości skuteczne i THD zarejestrowanych przebiegów.

Wyznaczana wielkość	$u(t)$	$i_{(s)}(t)$
RMS	240,01 [V]	5,78 [A]
THD	1,65 [%]	32,98 [%]

Kolejnym krokiem było obliczenie wszystkich zdefiniowanych w normie [15] rodzajów mocy oraz współczynnika mocy PF . W tabeli 5 zestawiono wszystkie wyliczone wartości.

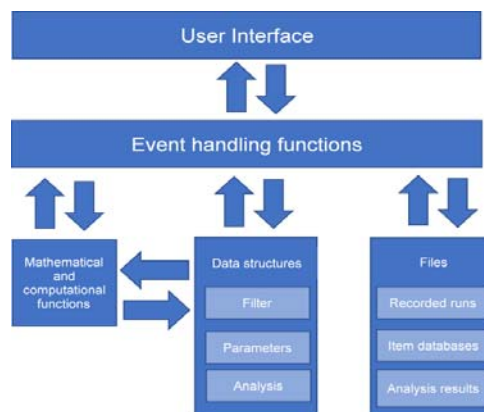
Tabela 5. Wartości mocy i współczynników mocy.

Wyznaczana wielkość	Wartość
P [W]	1050,07
S [VA]	1388,18
N [var]	907,97
P _H [W]	0,09
S _H [VA]	7,20
S _N [VA]	435,34
D _U [var]	21,84
D _I [var]	434,73
D _H [var]	7,20
P ₁ [W]	1049,98
S ₁ [VA]	1318,16
Q ₁ [var]	796,92
PF [-]	0,75

Zastosowanie układów filtrów pasywnych do ograniczenia wyższych harmonicznych prądu

Przedmiotem rozważań w artykule jest pasywny filtr rezonansowy służący do tłumienia wyższych harmonicznych prądu, o strukturze opisanej w pracy [8]. W celu automatyzacji obliczeń projektowych filtra utworzono program w środowisku Scilab. Utworzony program zawiera przyjazny interfejs użytkownika oraz biblioteki funkcji obsługi zdarzeń, wywoływanych przez poszczególne elementy interfejsu. Funkcje obsługi zdarzeń wykorzystują bibliotekę funkcji matematycznych zawierającą algorytmy

obliczeniowe programu. Schemat blokowy funkcjonalności programu przedstawiono na rysunku 4.

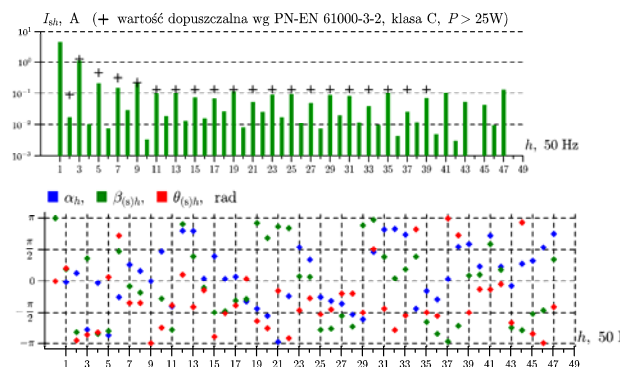


Rys.4. Uproszczony schemat blokowy programu

Pracę z programem rozpoczyna się tworząc jego wewnętrzną bazę danych niezbędnych do zaprojektowania i analizy filtra. W pierwszym etapie należy wczytać przebiegi prądu i napięcia sieci zarejestrowane w miejscu przyłączenia filtra, mające postać oscylogramów. Po załadowaniu danych wejściowych, program analizuje widmo harmonicznych wczytanego przebiegu prądu i wskazuje harmoniczne wykraczające poza określone w normie [15] limity.

Kolejnym krokiem jest budowa struktury filtra, przy wykorzystaniu edytora, umożliwiającego dodawanie i usuwanie kolejnych gałęzi rezonansowych filtra, oraz poszczególnych elementów L i C każdej z gałęzi. Ten etap pracy wspomaga „Kalkulator elementów gałęzi” oraz aktualizowany na bieżąco wykres impedancji budowanej gałęzi. Gałąź może również zawierać rezystory wysokiej częstotliwości R_{HF} .

Po ukończeniu budowy struktury filtra, należy uruchomić algorytm jego analizy. Program rozwiązuje wtedy obwód zastępczy reprezentujący sieć zasilającą wraz z filtrem i obciążeniem oraz oblicza na podstawie normy [15] wartości szczytowe i skuteczne wszystkich prądów i napięć, współczynniki PF i THD , oraz moc czynną P . Obliczone wartości są porównywane z wartościami znamionowymi z bazy danych elementów.



Rys.5. Widmo harmonicznych i przesunięcia fazowe zarejestrowanego prądu sieci zasilającej po zastosowaniu filtra

Ostatnim krokiem jest wyświetlenie w oknie programu wykresu impedancji filtra oraz widma harmonicznych prądu sieci obliczonego po zastosowaniu filtra. Dane te pozwalają na stwierdzenie czy zaprojektowany filtr spełnia wszystkie przyjęte założenia i na ewentualne wprowadzenie

modyfikacji. Pozostałe dane są eksportowane do plików wyjściowych.

Na rysunku 5 przedstawiono uzyskane widmo harmonicznych i przesunięcia fazowe zarejestrowanego prądu po zastosowaniu filtra.

W dalszej kolejności wyznaczono według [15] skuteczne wartości napięć i prądów oraz współczynniki THD oraz wszystkie składowe mocy i współczynnik PF dla instalacji. Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 6 i tabeli 7.

Tabela 6. Wartości skuteczne i THD zarejestrowanych przebiegów po zarejestrowaniu filtra

obliczona wielkość	$u(t)$	$i_{(s)}(t)$	$i_{(o)}(t)$	$i_{(n)}(t)$
RMS	240,01 V	5,78 A	1,23 A	3,95 A
THD	1,65 %	8,35 %	32,98 %	8,23 %

Tabela 7. Wartości mocy i współczynników mocy bez filtra i po zarejestrowaniu filtra

Wyznaczana wielkość	Wartości Bez filtra	Wartości z filtrem
P [W]	1050,07	1038,92
S [VA]	1388,18	312,09
N [var]	907,97	89,84
P _H [W]	0,09	0,07
S _H [VA]	7,20	7,89
S _N [VA]	435,34	451,56
D _u [var]	21,84	8,78
D _i [var]	434,73	489,56
D _H [var]	7,20	7,89
P ₁ [W]	1049,98	992,31
S ₁ [VA]	1318,16	311,54
Q ₁ [var]	796,92	796,92
PF [-]	0,75	0,89

Wnioski końcowe

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz parametrów elektrycznych opraw i instalacji mieszanych ze źródłami wydajowymi i LED można przedstawić następujące wnioski:

- Można stwierdzić, że zastosowanie filtra pasywnego jest w badanych przypadkach rozwiązaniem optymalnym ze względu na prostotę zarówno zastosowanej konfiguracji układu jak możliwości doboru elementów.
- Wyniki obliczeń są zgodne z wynikami symulacji. Wartość współczynnika zawartości harmonicznych THD_i zmniejszyła się z **32,98 %** do wartości **8,35 %**.
- Opracowany program komputerowy skutecznie i efektywnie umożliwia analizę oraz realizuje dobór parametrów filtrów pasywnych dedykowanych do badanej instalacji co skutkuje szybkim i skutecznym ograniczeniem zawartości harmonicznych w instalacjach oświetleniowych.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Tomasz Popławski, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Al. Armii Krajowej 17, 420-200 Częstochowa, E-mail: Tomasz.poplawski@pcz.pl, dr inż. Marek Kurkowski, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Al. Armii Krajowej 17, 420-200 Częstochowa, marek.kurkowski@pcz.pl, dr inż. Jarosław Mirowski, Energo-Bud Sp. z o.o., [Adres, jarmirowski@gmail.com](mailto:jarmirowski@gmail.com).

LITERATURA

[1] Bhonsle D. C., Kelkar R. B., Design and Analysis of Composite Filter for Power Quality improvement of Electric Arc Furnace, IEEE Int. Conf. On Electric Power and Energy Conversion Systems}, Istanbul, 2013.

[2] Buła D., Pasko M. Stability analysis of hybrid active power filter, Bull. Half. Acad. Sci., Tech. Sci., Vol. 62 no. 2, pp. 297--286, 2014

[3] Dzhankhotov V., Pyrhonen J., Passive LC Filter Design Considerations for Motor Applications, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 10 (60), 4253-4259, 2013

[4] Guo L. Li, Y., Zhang X., Analysis and Application of Passive Damping LLCL Filter in Active Power Filter, IEEE International Conference On Cyberotechnology in Automation, Control and Intelligent Systems, pp.~751-755, Shenyang, 2015

[5] Kurkowski M., Mirowski J., Popławski T., Pasko M., Białoń T., Pomiar energii biernej w instalacjach niskiego napięcia, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 92 NR 4, pp.~144-147, 2016

[6] Lange A., Pasko M., Wybrane zagadnienia dotyczące jakości energii elektrycznej w kopalniach i hutach, Przegląd Elektrotechniczny, R. 88 No. 6, pp.~150-153, 2012

[7] Lange A., Pasko M., Kompensacja mocy biernej i filtracja wyższych harmonicznych za pomocą filtrów biernych LC, Przegląd Elektrotechniczny, R. 86 No. 4, pp. 126-129, 2010,

[8] Maciążek M., Pasko M., Wybrane zastosowania algorytmów numerycznych w optymalizacji warunków pracy źródeł napięcia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2007

[9] Moreno-Munoz A., Power Quality: Mitigation Technologies in a Distributed Environment, Springer-Verlag, London 2007

[10] Pasko M., Dębowski K., Symetryzacja układów trójfazowych i wielofazowych zasilanych ze źródeł napięć okresowych odkształconych, Publishing House of the Silesian University of Technology, 2002

[11] Sharon D., Reactive power definitions and power factor improvement in nonlinear systems, Proceedings IEE, vol. 120, no. 6, pp.704-706, 1973

[12] Shepherd W., Zakikhani P., Newblock Suggested definition of reactive power for nonsinusoidal systems, Proceedings IEE, vol. 119, no. 9, pp.1361-1362, 1972

[13] Syafrudin M., Hadzer C. M., Sutanto J., Zero-Sequence Harmonics Current Minimization Using Zero-Blocking Transformer and Shunt LC Passive Filters, IEEE Int. Conf. On Power System Technology, pp.116-120, Kunming 2002

[14] Mirowski J., Analiza parametrów pracy opraw oświetleniowych w układach mieszanych, Rozprawa doktorska. (Nie publikowana) Częstochowa, Polska, 2020

[15] IEEE Std 1459-2010 Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, IEEE, New York, 2010

[16] PN-EN 50160 Supply voltage parameters in public power networks

[17] PN - EN 61000-3-2 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Permissible levels - Permissible levels of harmonic current emissions (phase current supply of the receiver <or = 16 A)

[18] PN-EN 61000-3-12 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-12: Permissible levels - Permissible levels of harmonic currents caused by the operation of receivers to be connected to the public low-voltage power supply network with a phase current supplying the load greater than 16 A and less than or equal to 75 A.

[19] COMMISSION REGULATION (EC) No 244/2009 of 18 March 2009 implementing Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for non-directional household lamps

[20] COMMISSION REGULATION (EU) No 1194/2012 of 12 December 2012 implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for directional lamps, light emitting diode lamps and related equipment

[21] Hołdyński G., Skibko Z., Analiza zjawiska odkształceń prądów i napięć na przykładzie wybranego obiektu widowskiego, ElektroInfo nr 129 11/, s.28-33, 2014