

Harmoniczne prądu w instalacjach oświetleniowych

Streszczenie. Problematyka artykułu dotyczy zawartości harmonicznego napięcia i prądu w sieciach elektroenergetycznych niskiego napięcia. Omówiono obowiązujące zapisy rozporządzeń i norm. Zaprezentowano wyniki badań na obiekcie rzeczywistym i analiz dotyczących obecności harmonicznego prądu opraw wyładowczych i LED stosowanych w instalacjach oświetleniowych zewnętrznych.

Abstract. The paper describes problems connected with presence of voltage and current harmonics in low voltage power network. Valid-decrees and standard regulations are discussed. The results of experimental investigations are presented, focused on harmonics content for LED and discharge lighting fitting, applied to outdoor lighting installations. (**Current harmonics in lighting installations**).

Słowa kluczowe: harmoniczne prądu, oprawy wyładowcze i LED, instalacje oświetleniowe.

Keywords: current harmonics, discharge and LED lighting fittings, lighting installations.

Wstęp

Wraz z rosnącym zastosowaniem nowych technologii w układach zasilania w sieciach elektroenergetycznych nasila się problem zachowania wymaganych przez normy parametrów określających jakość energii elektrycznej. Eksploatowanych jest coraz więcej odbiorników o charakterystykach nieliniowych - urządzenia elektryczne z układami energoelektronicznymi, takimi jak prostowniki zasilacze impulsowe czy przekształtnikowe układy napędowe. W instalacjach oświetleniowych zasilacze impulsowe stosowane są w oprawach z fluorescencyjnymi lub metalohalogenkowymi źródłami światła i przede wszystkim, w coraz popularniejszych oprawach z diodami elektroluminescencyjnymi (LED). Stałe rosnąca liczba odbiorników nieliniowych, w tym 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 [1,2,3].

W artykule dokonano przeglądu norm określających dopuszczalne odkształcenia prądów i napięć w instalacjach niskiego napięcia. Określone normami wymagania zestawiono z wynikami pomiarów wykonanych na obiekcie rzeczywistym – zewnętrznej instalacji oświetleniowej.

Przepisy i normy

Odkształcenia harmonicznego napięcia i prądu w sieciach elektroenergetycznych są traktowane w przepisach bardzo różnie. Norma [4] określa parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych, określając między innymi dopuszczalne poziomy poszczególnych harmonicznymi 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 harmonicznymi dla składowych parzystych i nieparzystych (tab. 1). Zgodnie z normą [5] współczynniki odkształcenia harmonicznymi napięcia i prądu można wyznaczyć z zależności:

$$(1) \quad THD_U = \sqrt{\sum_{h \neq 1} \left(\frac{U_h}{U_1} \right)^2}, \quad THD_I = \sqrt{\sum_{h \neq 1} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2},$$

gdzie: U_1, U_h, I_1, I_h – odpowiednio wartości skuteczne kolejnych składowych harmonicznymi napięć i prądów, h – numer harmonicznymi. W przypadku występowania

interharmonicznymi, zawartość wyższych harmonicznymi wyznacza się ze wzorów:

$$(2) \quad THD_U = \frac{\sqrt{U^2 - U_1^2}}{U_1}, \quad THD_I = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I_1},$$

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

W celu oceny zawartości harmonicznymi 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 .

Tabela 1. Poziomy zawartości harmonicznymi dla sieci o napięciu poniżej 110 kV [4]

Harmoniczne nieparzyste		Harmoniczne parzyste	
Rząd harmonicznymi	Wartość względna napięcia wyrażona w procentach składowej podstawowej	Rząd harmonicznymi	Wartość względna napięcia wyrażona w procentach składowej podstawowej
h	$u_h, \%$	h	$u_h, \%$
3	5,0	2	2,0
5	6,0	4	1,0
7	5,0	>4	0,5
9	1,5		
11	3,5		
13	3,0		
15	0,5		
17	2,0		
19	1,5		
21	1,5		
...	...		

Zgodnie z dyrektywą EMC 2004/108/WE urządzenia elektryczne powinny być tak zbudowane, aby nie zakłócały pracy innych urządzeń oraz aby były odporne na zburzenia w stopniu umożliwiającym ich pracę zgodnie z przeznaczeniem. Ocena zawartości harmonicznymi prądu powinna być dokonywana zgodnie z zapisami norm [6,7,8].

W normie PN - EN 61000-3-2 określono dopuszczalne poziomy emisji harmonicznymi 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, dla których określone są limity zawartości poszczególnych harmonicznymi:

- klasa A – symetryczne odbiorniki trójfazowe, sprzęt do zastosowań domowych z pominięciem przynależnego do klasy D, narzędzia z pominięciem narzędzi przenośnych, ściemniacze do żarówek, sprzęt akustyczny i wszystkie inne z wyjątkiem zakwalifikowanych do jednej z poniższych klas,
- klasa B – narzędzia przenośne tj. narzędzia elektryczne, które podczas normalnej pracy trzymane są w rękach i używane tylko przez krótki czas (kilka minut), nieprofesjonalny sprzęt spawalniczy,
- klasa C – sprzęt oświetleniowy,
- klasa D – sprzęt o mocy 600 W lub mniejszej następującego rodzaju: komputery osobiste i monitory do nich, odbiorniki telewizyjne.

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 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 wynika, że sprzęt oświetleniowy należy zakwalifikować do klasy C (dla odbiorników o mocy ≤ 25 W do klasy D).

Tabela 2. Poziomy dopuszczalne zawartości harmonicznyc P>25 W (klasa C) [6]

Rząd harmonicznyc	Maksymalny dopuszczalny prąd harmonicznyc wyrażony w procentach składowyc podstawowyc prądu wejściowyc
<i>h</i>	%
2	2
3	30·λ
5	10
7	7
9	5
11 ≤ <i>h</i> ≤ 39 tylko nieparzyste	3

λ (PF) - współczynnik mocy obwodu

Tabela 3. Poziomy dopuszczalne zawartości harmonicznyc P≤25 W (klasa C) [6]

Rząd harmonicznyc	Maksymalny dopuszczalny prąd harmonicznyc w przeliczeniu na wat
<i>h</i>	mA/W
2	3,4
3	1,9
5	1,0
7	0,5
9	0,35
11 ≤ <i>h</i> ≤ 39 tylko nieparzyste	3,85/ <i>h</i>

Dzieląc urządzenia elektryczne na klasy normodawca jest niekonsekwentny - ściemniacze do żarówek (ang. *dimmers for incandescent lamps*) zaliczono do klasy A [6].

Ocenia się, iż [9]:

- 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.

Tabela 4. Poziomy dopuszczalne zawartości harmonicznyc klasa A [6]

Rząd harmonicznyc	Maksymalny dopuszczalny prąd harmonicznyc
<i>h</i>	A
3	2,30
5	1,14
7	0,77
9	0,40
11	0,33
13	0,21
15 ≤ <i>h</i> ≤ 39 tylko nieparzyste	0,15·(15/ <i>h</i>)

Jak wynika z tabeli 2 dopuszczalna wartość 3 harmonicznyc jest zależna od współczynnika mocy PF. Według definicji zawartej w normie IEEE 1459-2010 [5,10]:

$$(3) \quad PF = \frac{P}{S} = \frac{U_1 I_1 \cos \theta_1 + \sum_{h \neq 1} U_h I_h \cos \theta_h}{\sqrt{\left(U_1^2 + \sum_{h \neq 1} U_h^2 \right) \left(I_1^2 + \sum_{h \neq 1} I_h^2 \right)}}$$

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

Wartość tego współczynnika zależy od składowyc harmonicznyc napięcia i prądu. Dla opraw oświetleniowyc do niedawna określone były tylko wartości współczynnika mocy dla lamp wyładowczych [11]. Od stycznia 2013 roku określono jego wartość również dla opraw LED [12]. Wartości dopuszczalne zestawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Wartości współczynnika mocy dla lamp (opraw oświetleniowyc) [11,12]

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

Tabela 6. Poziomy dopuszczalne zawartości harmonicznyc [7] dla $R_{SCE} = 33$ (R_{SCE} – stosunek mocy zwarciovej sieci elektroenergetycznej do mocy znamionowyc odbiornika, 33 jest to wartość minimalna określona w normie [7])

Rząd harmonicznyc	Maksymalny dopuszczalny prąd harmonicznyc wyrażony w procentach składowyc podstawowyc prądu wejściowyc	THD_i
<i>h</i>	%	%
3	21,6	23
5	10,7	
7	7,2	
9	3,8	
11	3,1	
13	2,0	
15	0,7	
17	1,2	
19	1,1	
21	≤ 0,6	

Współczynnik mocy zdefiniowany zgodnie ze wzorem (3) zależy od wartości poszczególnych harmonicznych, jak wynika z tabeli 5, 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) mają większą dopuszczalną zawartość harmonicznych prądu [6,12]. W normie PN - EN 61000-3-12 określono dopuszczalne poziomy emisji harmonicznych prądów powodowanych działaniem odbiorników, które mają być przyłączone do publicznej sieci zasilającej niskiego napięcia z fazowym prądem zasilającym odbiornika większym niż 16 A i mniejszym lub równym 75 A (tab. 6).

Pomiary parametrów elektrycznych oprawy LED

Pomiary zrealizowano w laboratorium wyznaczając parametry elektryczne oprawy LED (moc znamionowa 3 x 1 W – rys. 1). Wyniki pomiarów zestawiono w tabeli 7.

Tabela 7. Zmierzone parametry elektryczne oprawy LED 3 x 1 W

Lp.	Moc znamionowa	Moc	PF	THD _i , %
	W	P, W		
1	3,00	5,54	0,23	75,81

Pomiary parametrów elektrycznych opraw LED i wyładowczych w instalacji zewnętrznej

Pomiary zrealizowano dla instalacji oświetleniowej mieszanej zawierającej oprawy wyładowcze (sodowe i metalohalogenkowe o mocy 150 W) i LED (moc znamionowa 3 W – rys. 1). W trakcie pomiarów oprawy były załączane stopniowo, najpierw oprawy LED, a następnie oprawy wyładowcze. Odbiorniki były podzielone na trzy obwody, dla których moc zainstalowanych urządzeń oświetleniowych była różna (tab. 8). Oceniając parametry

instalacji (THD_i i PF) dokonano analizy dla całej instalacji według parametrów wymaganych dla pojedynczych odbiorników. Zestawienie zainstalowanych mocy opraw przedstawiono w tabeli 8.



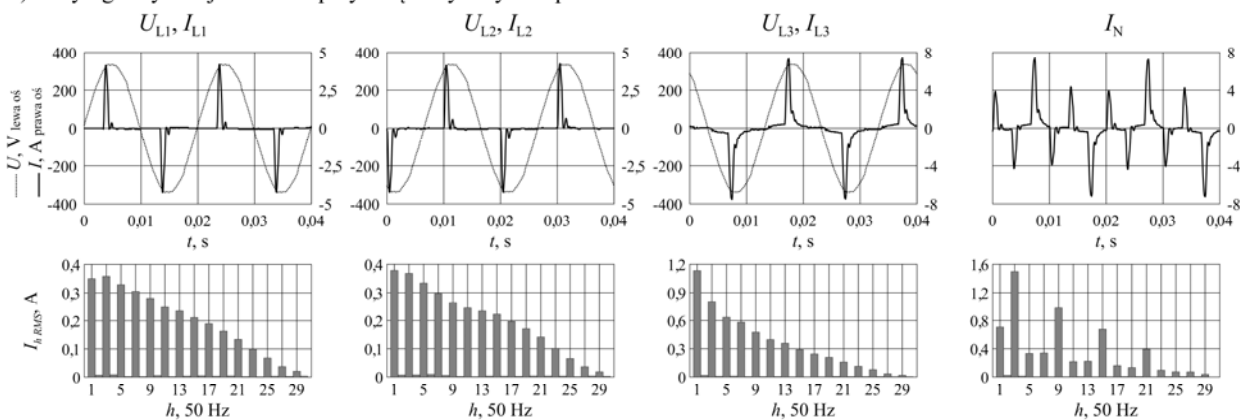
Rys.1. Oprawa LED 3 x 1 W

Tabela 8. Zestawienie wartości mocy zmierzonych opraw instalacji oświetleniowej (LED i wyładowcze)

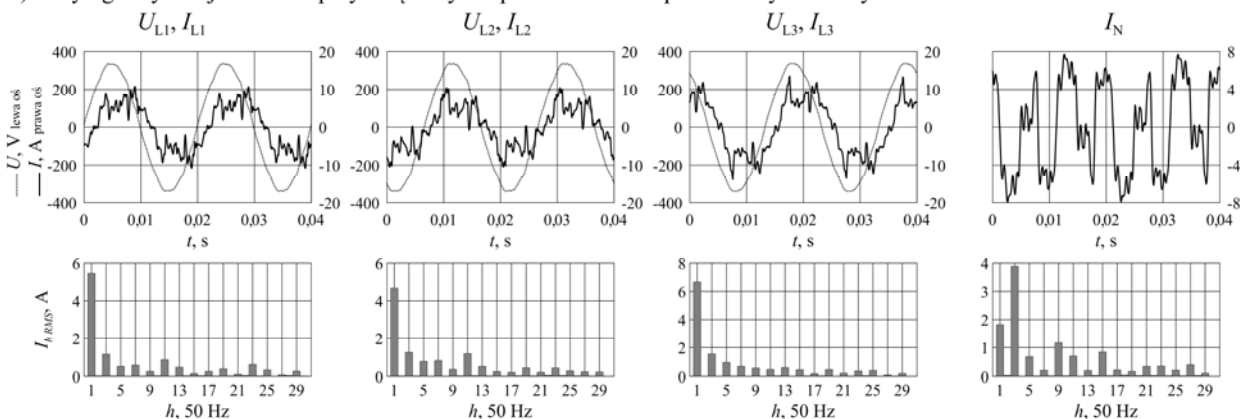
Obwód	Całkowita wartość mocy znamionowej w obwodzie	Moc opraw LED	Moc opraw wyładowczych
	P _C , W	P _{LED} , W	P _W , W
L1	1060	90	970
L2	1100	105	995
L3	1310	120	1190

Asymetria obciążenia kolejnych obwodów wynika z dwóch powodów. Pierwszym powodem są odłączenia części pierwotnie zainstalowanych opraw, spowodowane ich awariami. Drugim powodem jest wprowadzona późniejsza modyfikacja instalacji, polegająca na dołączeniu do obwodu L3 dodatkowej grupy opraw oświetleniowych LED.

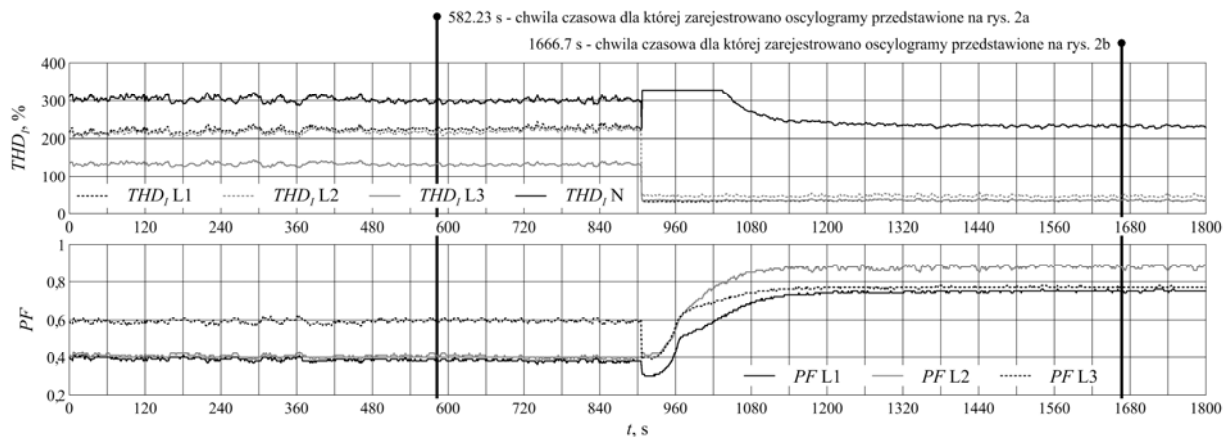
a) Oscylogramy zarejestrowane przy załączonych tylko oprawach LED



b) Oscylogramy zarejestrowane przy załączonych oprawach LED i oprawach wyładowczych



Rys.2. Zarejestrowane przebiegi prądów i napięć w przewodach fazowych (L1, L2, L3) i neutralnym N: a) przy załączonych oprawach LED; b) po załączeniu opraw wyładowczych



Rys. 3. Zarejestrowane przebiegi współczynników THD_i i PF przed i po założeniu opraw wyładowczych. Oprawy LED założone były przez cały czas trwania pomiaru.

Na podstawie zrealizowanych pomiarów można stwierdzić, że w analizowanej instalacji wyznaczone wartości maksymalne prądów obciążenia nie przekraczają wartości 9 A – analiza według normy PN-EN 61000-3-2 (rys.2.) Współczynniki zawartości harmonicznych zarówno w przewodach fazowych, jak i neutralnym przy włączonych oprawach LED (rys. 2 i 3), miały bardzo dużą wartość: THD_i L1 ok. 230%, THD_i L2 ok. 225%, THD_i L3 ok. 140%, THD_i N ok. 320%. Po założeniu opraw wyładowczych odkształcenie przebiegów prądów znacznie się zmniejszyło, THD_i L1 ok. 30%, THD_i L2 ok. 50%, THD_i L3 ok. 30%, THD_i N ok. 240%. Z przedstawionych na rysunku 2 wykresów wartości skutecznych wyższych harmonicznych prądów wynika, iż we wszystkich przypadkach są przekroczone dopuszczalne wartości podane w tabeli 2. Z zarejestrowanych przebiegów wynika również, że oprawy ze źródłami światła typu LED (przekształtniki) wprowadzają znacznie większe odkształcenia prądów niż źródła wyładowcze. Podobnie wartości współczynników mocy PF (dla opraw LED – PF wynosił od 0,3 do 0,6) odbiegały od wartości wymaganej (rys. 3.), podanej w tabeli 6.

Podsumowanie

W analizowanej instalacji oświetleniowej (oprawy LED i wyładowcze), eksploatowanej od ponad 3 lat stwierdzono:

- część opraw nie spełnia przepisów dotyczących dopuszczalnej wartości współczynnika mocy PF ;
- brak prawidłowej konserwacji spowodował nieprawidłowe działanie części źródeł i opraw, w efekcie doprowadziło to do niesymetryczności odbiorów, co w połączeniu z niedotrzymaniem przepisów dotyczących zawartości harmonicznych prądowych generowanych przez oprawy LED dało efekt przepływu prądu o znacznej wartości w przewodzie neutralnym, którego 3 harmoniczna jest ponad dwa razy większa od składowej podstawowej;

Można zatem stwierdzić, że wyższe harmoniczne oraz brak ich filtracji może powodować:

- przeciążenie przewodu neutralnego;
- przeciążenia kondensatorów (impedancja kondensatora maleje wraz z częstotliwością, więc włączone w obwód kondensatory stanowią naturalne ujście dla prądów wyższych harmonicznych).

Taki stan rzeczy stwarza zagrożenie dla poprawnej pracy i trwałości innych odbiorników energii elektrycznej zasilanych z tych obwodów. Przykładowym skutkiem występowania zagrożenia tego rodzaju jest odnotowany w badanej instalacji wybuch kondensatora w jednej z opraw metalohalogenkowych (rys. 4).

Należy więc stwierdzić co następuje:

- stosowane oświetlenie LED jest źródłem emisji harmonicznych prądu (dla części odbiorników < 25 W może to być zgodne z obowiązującymi przepisami);
- przedstawione wymagania dotyczące całkowitego współczynnika mocy PF pozwalają na instalowanie i eksploatację odbiorników LED małej mocy (< 25 W) dla których współczynnik mocy PF , zgodnie z obowiązującymi przepisami, nie będzie podlegał ograniczeniom (dla $P \leq 2$ W lub $P \leq 0,5$);



Rys.4. Uszkodzony kondensator w oprawie metalohalogenkowej.

- przeniesione do Instrukcji Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej [13] dopuszczalne poziomy zaburzeń parametrów jakościowych energii elektrycznej w części dotyczącej harmonicznych prądu – odbiorniki w klasie C w ogóle nie uwzględniają podziału na odbiorniki o mocy mniejszej i większej od 25 W, co zalecono w dwóch aktach prawnych: normie [6] i rozporządzeniu [12];
- porównując dopuszczalną wartość 3 harmonicznej z tabeli 4 z analogiczną wartością z tabeli 2 (źródła żarowe czyli $PF \approx 1$) można domniemać, iż wartość prądu w obwodzie z układami regulacji strumienia świetlnego (ściemniaczami) może wynosić około 7,66 A czyli rozpatrywane jest obciążenie żarowe o mocy około 1760 W. Ściemniacze stosuje się też dla odbiorników o mniejszych mocach znamionowych. Wpływ harmonicznych prądu generowanych przez te odbiorniki wg zapisów normy [6] można pominąć.

Zrealizowane pomiary parametrów elektrycznych, zarówno w laboratorium jak i w rzeczywistej instalacji oświetleniowej pozwalają stwierdzić, iż część odbiorników nie spełnia wymagań określających parametry elektryczne (PF) oraz zapisów norm [2,3]. Te oprawy powinny być wycofane z rynku. Przedstawione (tab. 5) wymagania dotyczące współczynnika mocy źródeł, modułów i opraw

oświetleniowych zarówno CFL jak i LED pozwalają na wprowadzanie na rynek i również późniejszą eksploatację odbiorników energii biernej. Pozwalają również na instalowanie grup odbiorników małej mocy (<25 W), dla których współczynnik mocy PF będzie (zgodnie z przepisami) większy lub równy 0,55 – CFL i większy lub równy 0,4 – LED.

W badanej instalacji oświetleniowej zawierającej oprawy ze źródłami wyładowczymi i LED zainstalowano 72 szt. nowoczesnych, „energooszczędnych” opraw z diodami LED o mocy znamionowej 3 W każda, co pozwoliło uzyskać 3 grupy odbiorników o łącznej mocy znamionowej 315 W. Pomimo tego, iż zawartość harmoniczných w prądach oraz wartości współczynników THD , i PF pojedynczych opraw nie podlegają ograniczeniom, lub obowiązujące ograniczenia są mało restrykcyjne ze względu na niewielkie moce jednostkowe, to po połączeniu opraw w grupy, niska jakość przebiegów sumarycznego prądu obciążenia jest źródłem poważnych problemów, które wciąż wymagają rozwiązania. Dlatego też, pomimo że tytuł i treść przywołanych norm [7,10] zawiera wymagania dla pojedynczych odbiorników można zaproponować stosowanie ich zapisów również dla wybranych grup urządzeń elektrycznych.

LITERATURA

- [1] Lange A., Pasko M.: Kompensacja mocy biernej i filtracja wyższych harmoniczných za pomocą filtrów biernych LC, Przegląd Elektrotechniczny, R. 86 nr 4, 2010, s. 126-129
- [2] Lange A., Pasko M.: Wybrane zagadnienia dotyczące jakości energii elektrycznej w kopalniach i hutach, Przegląd Elektrotechniczny, R. 88 nr 6, 2012, s. 150-153
- [3] Buła D., Pasko M.: Stability analysis of hybrid active power filter, Bull. Pol. Acad. Sci., Tech. Sci., vol. 62 no. 2, 2014, pp. 297-286
- [4] PN-EN 50160 Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych
- [5] IEEE Std 1459-2010 Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions; IEEE, New York, 2010.
- [6] PN - EN 61000-3-2 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) - Część 3-2: Poziomy dopuszczalne - Poziomy dopuszczalne emisji harmoniczných prądu (fazowy prąd zasilający odbiornika < lub = 16 A)
- [7] PN-EN 61000-3-12 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) - Część 3-12: Dopuszczalne poziomy - Dopuszczalne poziomy harmoniczných prądów powodowanych działaniem odbiorników, które mają być przyłączone do publicznej sieci zasilającej niskiego napięcia z fazowym prądem zasilającym odbiornika większym niż 16 A i mniejszym lub równym 75 A
- [8] Kasprzak A., Orlikowski M., Brodecki M.: O pewnych aspektach powszechnego wprowadzania świetlówek energooszczędnych, Przegląd Elektrotechniczny R. 83 nr 9, 2007, s. 104-105
- [9] Hołyński G., Skibko Z.: Analiza zjawiska odkształceń prądów i napięć na przykładzie wybranego obiektu widowskiego, ElektroInfo nr 129 11/2014, s. 28-33
- [10] Kurkowski M., Popławski T., Mirowski J.: Energa bierna a przepisy Unii Europejskiej Rynek Energii nr 2 (111) 2014, s.18-25
- [11] Rozporządzenie komisji (WE) nr 244/2009 w odniesieniu do wymogów dotyczących ekoprojektu dla bezkierunkowych lamp do użytku domowego
- [12] Rozporządzenie komisji (WE) nr 1194/2012 w odniesieniu do wymogów dotyczących ekoprojektu dla lamp kierunkowych, lamp z diodami elektroluminescencyjnymi i powiązanego wyposażenia
- [13] Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej (zatwierdzona decyzją Prezesa URE nr DRR-4321-29(5)/2013/MK04 z dnia 10 września 2013 r.)

Autorzy: mgr inż. Jarosław Mirowski, dr inż. Marek Kurkowski Politechnika Częstochowska Wydział Elektryczny, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, dr inż. Tadeusz Białoń, prof. dr hab. inż. Marian Pasko Politechnika Śląska Wydział Elektryczny, ul. Akademicka 10A, 44-100 Gliwice, e-mail: jarmirowski@gmail.com.