

Łukasz PUTZ*
Milena KURZAWA*

STANOWISKO DO BADANIA JAKOŚCI ENERGII ELEKTRYCZNEJ W OŚWIETLENIOWYCH INSTALACJACH ELEKTRYCZNYCH ZE ŹRÓDŁAMI TYPU LED – POMIARY

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów parametrów jakości energii elektrycznej dla obciążenia będącego odwzorowaniem instalacji oświetleniowej ze źródłami LED. Badania zostały wykonane na specjalnie skonstruowanym stanowisku. Pozwala ono na pomiar zakłóceń pochodzących od oświetlenia elektroluminescencyjnego. W pracy przytoczono podstawy prawne w zakresie jakości energii elektrycznej, powołując się na Normy PN-EN 50160 „Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych” oraz PN-EN 61000 „Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC)”. W publikacji przedstawiono badania porównawcze źródeł światła LED różnych producentów, pracujących indywidualnie oraz w grupie. Przedstawiono przebiegi czasowe natężeń prądów oraz wykresy słupkowe wyższych harmonicznych natężenia prądu. Wykreślono charakterystyki współczynnika zawartości wyższych harmonicznych prądu THDi w zależności od mocy czynnej współpracujących lamp LED. Ostatecznie przeanalizowano oraz podsumowano uzyskane wyniki badań.

SŁOWA KLUCZOWE: instalacja oświetleniowa, jakość energii, oświetlenie elektroluminescencyjne, stanowisko badawcze, współczynnik THD, wyższe harmoniczne natężenia prądu, źródło LED

1. WPROWADZENIE

Każdy nabywca dowolnego produktu wymaga, aby ten był jak najlepszej jakości, to znaczy żeby miał konkretną wartość użytkową. Inaczej mówiąc, każdy wyrób powinien posiadać zespół cech i właściwości, pozwalających na rzeczywisty stopień zaspokojenia aktualnych wymagań użytkownika [3]. Odpowiedniej jakości powinna być także energia elektryczna, ponieważ ona jest produktem, który swoim klientom oferuje producent, czyli elektrownia.

Jak się jednak okazuje trudno jest osiągnąć akceptowalną jakość energii elektrycznej. Współczesne urządzenia elektryczne, choć potrzebują wysokiej

* Politechnika Poznańska.

jakości zasilania, to same generują różnego rodzaju zakłócenia pogarszające parametry jakości energii elektrycznej. W związku z tak dużą liczbą odbiorników zakłócających działanie sieci energetycznej, w wielu ośrodkach naukowych nieustannie trwają badania nad możliwościami poprawy jakości energii. Badania prowadzone są niejako w dwóch kierunkach: z jednej strony próbuje się uodpornić sieć elektroenergetyczną na zakłócenia, z drugiej natomiast szuka się rozwiązań pozwalających skompensować zaburzenia wywoływane przez odbiorców jeszcze na poziomie wewnętrznej instalacji zasilającej [1].

Duży problem, w zachowaniu wysokiej jakości energii elektrycznej, w ostatnich latach stwarzają instalacje oświetleniowe. To właśnie w przemyśle oświetleniowym wykorzystuje się nowoczesne lampy z półprzewodnikowymi źródłami światła LED, których układy sterująco-zasilające silnie zniekształcają sygnał prądowy, wprowadzając wyższe harmoniczne prądu oraz napięcia [7].

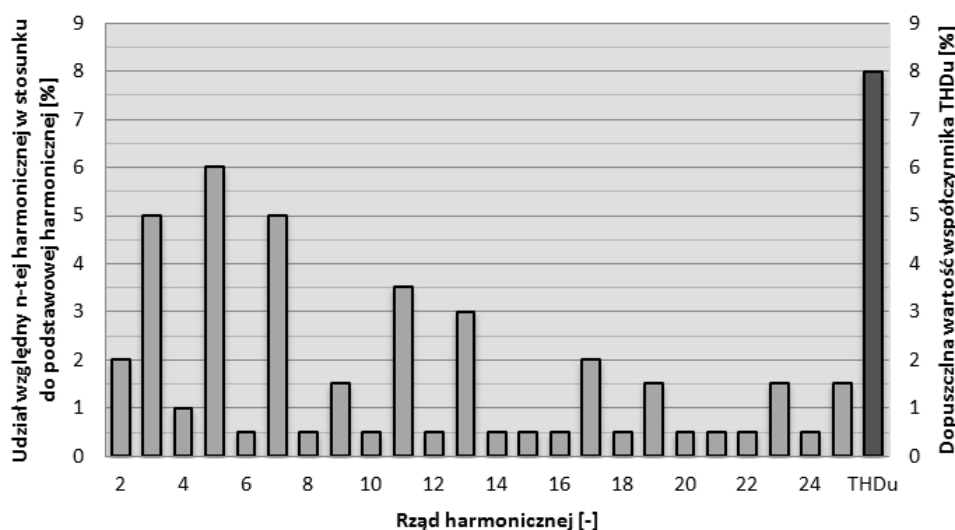
2. PODSTAWY PRAWNE W ZAKRESIE JAKOŚCI ENERGII

Prawidłowa praca urządzeń elektrycznych i elektronicznych uwarunkowana jest zasilaniem ich napięciem o odpowiedniej jakości. Zbyt niski poziom jakości energii elektrycznej może spowodować ich uszkodzenie. Dlatego też wprowadzono zapisy prawne w postaci Dyrektyw i Norm, które muszą spełniać sieci elektroenergetyczne. W Polsce obowiązuje Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 roku w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego [8]. Rozporządzenie to jest oparte na zapisach nieobligatoryjnej normy PN-EN 50160 [4] określającej „Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych”. Norma odnosi się do sieci mN, SN i WN, jednakże w niniejszej publikacji prezentowane dane dotyczą tylko sieci niskiego napięcia.

Jednym z wielu parametrów zasilania są wyższe harmoniczne napięcia, które są zaliczane do trwałych zaburzeń sygnału zasilającego. Generują je nieliniowe odbiorniki energii elektrycznej. W wyżej wymienionej normie określone są dopuszczalne wartości poszczególnych wyższych harmonicznych (od 2 do 40) w odniesieniu do harmonicznej podstawowej oraz podano dopuszczalną wartość udziału wyższych harmonicznych względem pierwszej harmonicznej – wskaźnik THD [6]. Dopuszczalne poziomy wskaźnika THDu oraz harmonicznych od 2 do 25 przedstawiono w postaci wykresu słupkowego na rys. 1. Harmoniczne od 26 do 40 są opisane w Normie, lecz pominięto je na prezentowanym wykresie, ponieważ osiągają bardzo małe wartości (około 0,5 %) [4].

W przytoczonej wyżej Normie PN-EN 50160 określone są wymagania odnośnie parametrów napięcia zasilającego (np. wyższych harmonicznych napięcia), jakie powinien spełnić dostawca energii elektrycznej. Jednak nie tylko dostawca energii jest zobowiązany do przestrzegania wymagań normatywnych.

Odbiorca musi z kolei liczyć się z zapisami normy o kompatybilności elektromagnetycznej urządzeń odbiorczych – PN-EN 61000. Norma ta określa dopuszczalne poziomy emisji zakłóceń dla różnego rodzaju odbiorników oraz opisuje w jaki sposób należy poprawnie wykonać pomiary jakości energii.



Rys. 1. Dopuszczalne poziomy wyższych harmonicznych napięcia od 2 do 25 oraz wskaźnika THDu w sieciach nn (na podstawie [4])

W części 3–2 wspomnianej normy określone są dopuszczalne poziomy emisji harmonicznych prądu dla odbiorników o prądzie znamionowym nie przekraczającym 16 A [5]. Wymagania określone są dla czterech grup urządzeń: A, B, C i D. Elektroluminescencyjne źródła światła (diody LED) ujęte zostały w grupie C (sprzęt oświetleniowy) [2]. Dopuszczalne wartości wyższych harmonicznych prądu dla odbiorników należących do grupy C przedstawiono w tabeli 1.

W Normie nie określono maksymalnej wartości wskaźnika THDi. Biorąc pod uwagę tylko wartości wyższych harmonicznych wskazanych w Normie i korzystając ze wzoru:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^n X_k^2}}{X_1} \quad (1)$$

gdzie: *THD* – współczynnik zawartości harmonicznych, X_k – wartość skuteczna (np. prądu) k – tej harmonicznej, X_1 – wartość skuteczna (np. prądu) podstawowej harmonicznej można obliczyć wskaźnik THDi. Wyniesie on około 35 %. Nie jest to jednak wartość, którą można uznać za graniczną dla spełnienia wy-

magań normy. Wynik ten można uzyskać również gdy jedna lub kilka harmonicznych przekroczy dozwolony zakres i jednocześnie inne harmoniczne będą niskie lub nawet nie wystąpią.

Tabela 1. Dopuszczalne poziomy wyższych harmonicznym prądu dla sprzętu z grupy C (na podstawie [5])

Rząd harmonicznym prądu n	Maksymalny dopuszczalny prąd harmonicznym wyrażony w procentach składowej podstawowej prądu [%]
2	2
3	30·PF
5	10
7	7
9	5
11, 13, ..., 39	3

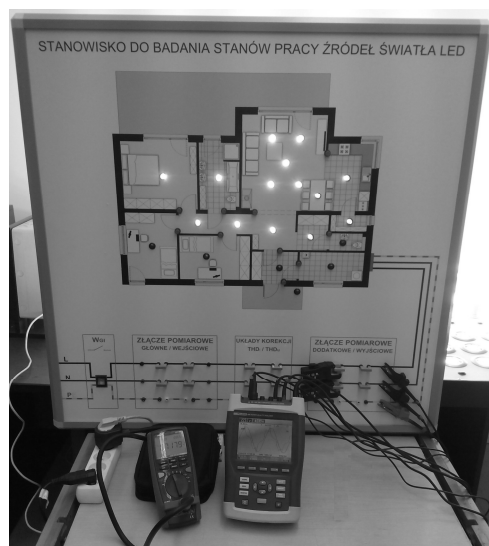
PF – (ang. *Power Factor*) współczynnik mocy danego sprzętu oświetleniowego

3. POMIARY WSKAŹNIKA ZAWARTOŚCI HARMONICZNYCH PRĄDU W UKŁADACH OŚWIETLENIA LED

Badania przeprowadzono na specjalnie skonstruowanym stanowisku do wyznaczania parametrów jakości energii instalacji oświetleniowych z lampami LED (rys. 2). Celem badań było przeanalizowanie zmian współczynnika zawartości wyższych harmonicznym prądu THDi podczas współpracy dwóch rodzajów źródeł LED o różnej mocy. Do testów wykorzystano lampy produkcji: LEDLEADER, OSRAM, PHILIPS oraz WHITENERGY. Parametry tych lamp zestawiono w tabeli 2.

Zasilacze impulsowe wbudowane w lampy LED, służące do wysterowania diod świecących, powodują bardzo silne zniekształcenia sygnału prądu, a tym samym generują wyższe harmoniczne prądu (rys. 3). Za pomocą analizatora jakości energii FLUKE 434/PWR dokonano pomiaru wyższych harmonicznym prądu oraz wyznaczono wskaźnik THDi. Osiągnięte wyniki okazały się mocno zróżnicowane, co przedstawiono w tabeli 3.

Spośród przebadanych źródeł LED, produkt firmy Osram ma najmniejszy współczynnik zawartości wyższych harmonicznym prądu – 24,6 %. Najgorzej pod tym względem wypadają lampy Ledleader, ponieważ mają bardzo duży wskaźnik THDi sięgający 119,3 %. LED-y produkcji Philips oraz Whitenergy mają zbliżone THDi sięgające odpowiednio 52,7 i 43,6 % (tabela 3).

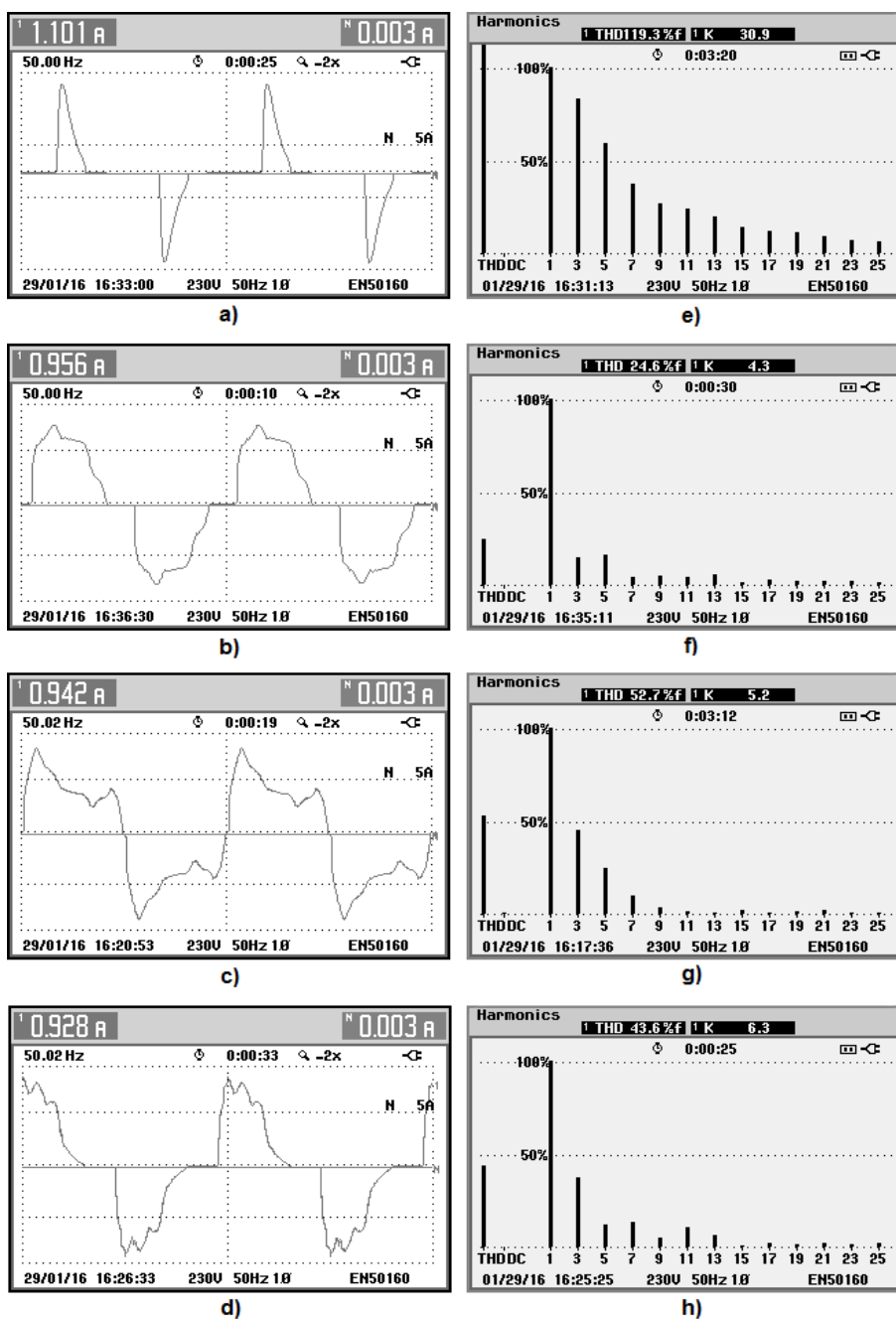


Rys. 2. Stanowisko badawcze do wyznaczania parametrów jakości energii elektrycznej instalacji oświetleniowych wykonanych w oparciu o źródła LED

Tabela 2. Parametry lamp LED wykorzystanych w badaniach

Producent	Moc [W]	Oprawa	Strumień [lm]	Temp. barwowa [K]	Liczba lamp	Pomiary		
						Całkowita moc [W]	Całkowity prąd [A]	PF
OSRAM	10	E27	810	2700	20	202,5	0,954	0,92
PHILIPS	9	E27	806	2700	20	181,9	0,948	0,83
WHITENERGY	3	GU10	250	2800	30	84,4	0,928	0,39
LEDLEADER	8	E14	700	3000	20	156,4	1,186	0,57

Jednak Norma PN-EN 61000 nie określa dopuszczalnych wartości wskaźnika THDi i konieczne jest porównanie poszczególnych harmonicznych, w głównej mierze nieparzystych. Po przeprowadzonych badaniach można stwierdzić, że żadne źródła światła nie spełniają wszystkich wymogów Normy dotyczących harmonicznych prądu. Każdy produkt spełnia wymagania odnośnie parzystych harmonicznych, a szczególnie drugiej harmonicznej, gdyż ta prawie wcale nie występuje. Lampy firmy Philips przekraczają dopuszczalne wartości tylko dla trzech harmonicznych: 3, 5 oraz 7. Natomiast LED-y marki Osram i Whitenergy nie spełniają wymogów w sumie dla 5–6 wyższych harmonicznych.



Rys. 3. Oscylogramy przebiegów prądu oraz wyższych harmonicznych prądu lamp LED zarejestrowane analizatorem jakości energii FLUKE 434/PWR dla: Ledleader - a), e); Osram - b), f); Philips - c), g); Whitenergy - d), h)

Tabela 3. Zmierzone wartości wyższych harmonicznych prądu badanych lamp LED

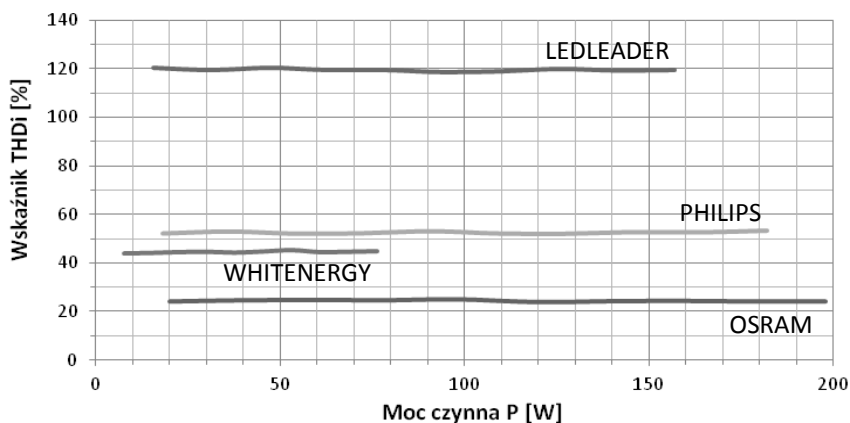
Numer harmonicznej	LEDLEADER	OSRAM	PHILIPS	WHITENERGY
H2	0,1 [√]	0,0 [√]	0,0 [√]	0,0 [√]
H3	82,9 [×]	14,9 [×]	45,1 [×]	37,2 [×]
H5	59,0 [×]	16,3 [×]	24,4 [×]	11,7 [×]
H7	37,1 [×]	4,4 [√]	10,2 [×]	13,3 [×]
H9	26,9 [×]	4,8 [√]	3,9 [√]	5,2 [×]
H11	24,1 [×]	3,9 [×]	1,2 [√]	10,8 [×]
H13	19,5 [×]	5,3 [×]	0,5 [√]	6,1 [×]
H15	13,9 [×]	1,4 [√]	2,0 [√]	1,0 [√]
H17	11,9 [×]	3,1 [×]	0,5 [√]	1,8 [√]
H19	11,6 [×]	1,8 [√]	1,7 [√]	1,6 [√]
H21	9,4 [×]	1,9 [√]	2,0 [√]	1,9 [√]
H23	6,7 [×]	2,0 [√]	1,0 [√]	1,7 [√]
H25	6,4 [×]	1,5 [√]	1,0 [√]	2,0 [√]
THDi	119,3	24,6	52,7	43,6
[√] – zgodność z wymaganiami Normy PN-EN 61000 [×] – brak zgodności z Normą				

Najgorsze wyniki uzyskano w przypadku oświetlenia produkcji Ledleader, gdzie każda harmoniczna nieparzysta przekracza dopuszczalny poziom. Godne uwagi są diody świecące Osram, ponieważ pomimo niedozwolonych poziomów aż pięciu wyższych harmonicznych, są one przekroczone w niewielkim stopniu. Dla porównania lampy firmy Philips dość znacznie przekraczają Normę. Przekłada się to na kształt przebiegów czasowych natężenia prądu – lampy marki Philips mają bardziej zniekształcony sygnał niż Osram. Najbardziej zniekształcony przebieg prądu, przypominający bardziej sygnał impulsowy niż sinusoidalny, mają lampy Ledleader, generujące bardzo dużo nieparzystych harmonicznych prądu.

Na skonstruowanym stanowisku prowadzono również badania wyższych harmonicznych prądu przy zmiennej mocy elektrycznej elektroluminescencyjnych źródeł światła. W przypadku produktów firm Ledleader, Osram i Philips moc zmieniano przez włączanie bądź wyłączenie do 20 takich samych lamp LED (taki sam model danego producenta), przy minimalnym skoku mocy odpowiadającym dwóm źródłom światła. W przypadku produktu firmy Whitenergy skok ten przypada co trzy lampy, a maksymalna ich liczba to 30 sztuk. W każdym przypadku jest więc możliwa skokowa zmiana mocy co 10 % wartości mocy maksymalnej.

Po przeprowadzonych badaniach można stwierdzić, że gdy instalacja oświetleniowa pracuje tylko i wyłącznie na jednym typie źródeł światła, to współczynnik zawartości wyższych harmonicznych prądu pozostaje stały, bez względu na zmianę mocy (sztuk) opraw. Relacja ta jest doskonale widoczna na rysunku 4. Niewielkie oscylacje wartości wskaźnika THDi mogą mieć kilka przyczyn, na przykład:

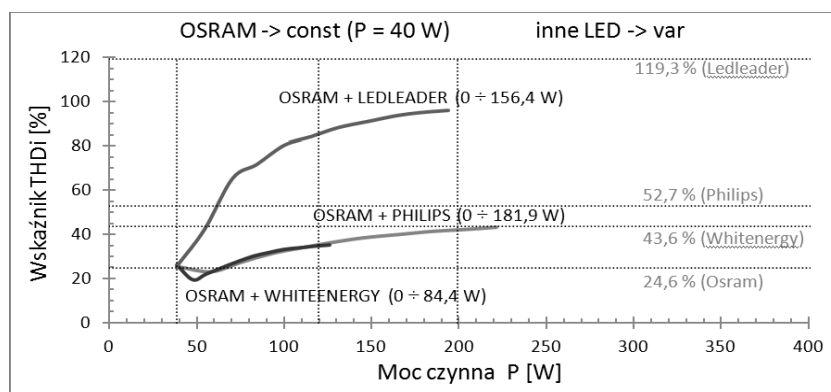
- błąd pomiarowy analizatora jakości energii,
- stan nieustalony spowodowany zmianą mocy,
- niejednakowe parametry pochodzące od strony instalacji elektrycznej.



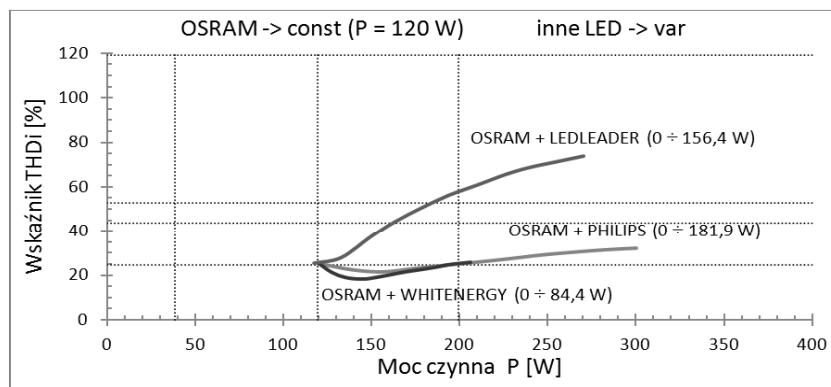
Rys. 4. Zależność współczynnika zawartości wyższych harmonicznych prądu THDi od mocy czynnej pobieranej przez badane lampy LED danego producenta

Zupełnie inne charakterystyki współczynnika zawartości wyższych harmonicznych natężenia prądu THDi w funkcji mocy czynnej obciążenia uzyskano gdy źródła światła LED produkcji różnych firm działały jednocześnie (rys. 5). Można by się spodziewać, że wypadkowy wskaźnik THDi dwóch współpracujących lamp będzie wynikiem uśrednienia ich THD ze zachowaniem proporcji w mocy obciążenia każdego ze światel. W związku z tym wypadkowy THDi powinien znaleźć się w przedziale ograniczonym od dołu niższym wskaźnikiem THD lepszej lampy oraz wyższym współczynnikiem zawartości harmonicznych gorszej lampy.

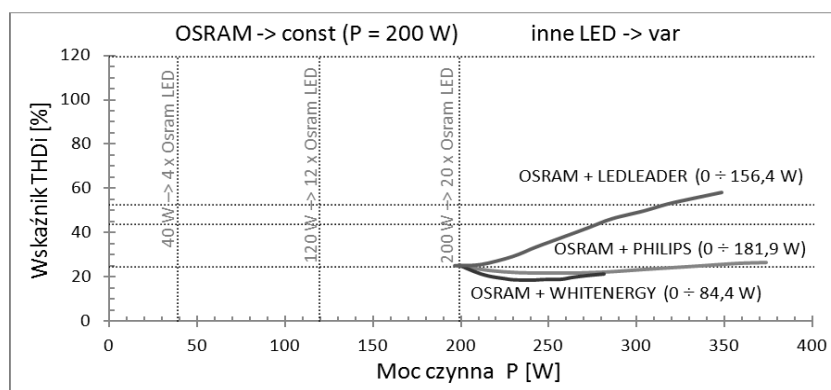
Jak się jednak okazuje niezupełnie tak jest. Możliwe jest uzyskanie takiej konfiguracji dwóch lamp LED, żeby wypadkowy wskaźnik THD był jeszcze niższy niż ten dla lepszej lampy. Opiswane zjawisko obrazują charakterystyki z rysunku 5. W badaniach przeanalizowano połączenia lamp firmy Osram w parze z LED-ami marki Ledleader, Philips oraz Whitenergy. Charakterystyki (rys. 5) wykreślono przy stałej mocy czynnej lamp Osram, natomiast regulowano moc drugiej lampy.



a)



b)



c)

Rys. 5. Zależność współczynnika zawartości wyższych harmonicznych prądu THDi od mocy czynnej P dwóch współpracujących lamp LED w przypadku gdy moc lampy Osram wynosi: a) 40 W, b) 120 W, c) 200 W

Wykonano trzy serie pomiarów dla mocy lamp Osram wynoszących 40, 120 oraz 200 W. W każdym przypadku moce pozostałych źródeł światła regulowano z krokiem co 10 % do wartości maksymalnej danego typu źródeł LED (podano w tabeli 2).

Z charakterystyk można zaobserwować, że gdyby dalej zwiększać moc lamp Ledleader, Philips oraz Whitenergy (niezależnie od ustawionej mocy czynnej źródeł światła firmy Osram) wykresy wskaźnika THDi ustabilizowałyby się na takim poziomie jaki LED-y osiągały w przypadku pracy indywidualnej (tab. 3).

4. PODSUMOWANIE

Z przeprowadzonych badań można wysnuć następujące spostrzeżenia:

- wypadkowe THDi dwóch rodzajów lamp LED nie jest średnią ważoną ich THDi (gdzie wagą jest moc czynna),
- jeśli THDi dwóch diod świecących różni się o rząd wielkości można przyjąć, że wypadkowy wskaźnik zawartości harmonicznych prądu jest średnią ważoną poszczególnych THDi (gdzie wagą jest moc czynna),
- zestawienie dwóch źródeł światła LED o podobnych THDi daje wypadkowy wskaźnik THDi mniejszy od niższego współczynnika zawartości harmonicznych prądu lampy pracującej indywidualnie; założenie jest prawdziwe jeśli moc czynna źródła LED o gorszym wskaźniku THDi jest mniejsza od mocy lampy o lepszym THDi.

Zaobserwowane zjawisko jest bardzo ciekawe. Wystarczy odpowiednio zestawić różne lampy LED, żeby dokonać kompensacji współczynnika zawartości wyższych harmonicznych prądu tych lamp. Wskazane jest przeprowadzenie dalszych badań w tym kierunku.

LITERATURA

- [1] Hołdyński G., Skibko Z.: „Parametry opisujące jakość energii elektrycznej”, Elektro-Info, nr 12/2014, s. 22–24, Warszawa 2014.
- [2] Mirowski J., Kurkowski M., Białoń T., Pasko M.: „Harmoniczne prądu w instalacjach oświetleniowych”, Przegląd Elektrotechniczny, nr 8/2015, s. 180–184, Warszawa 2015.
- [3] Norma Międzynarodowa PN-EN ISO 9000: „Systemy zarządzania jakością. Podstawy i terminologia”.
- [4] Norma PN-EN 50160: „Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych”.
- [5] Norma PN-EN 61000-3-2: „Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Część 3-2. Poziomy dopuszczalne. Poziomy dopuszczalne emisji harmonicznych prądu (fazowy prąd zasilający odbiornika < lub = 16 A)”.

- [6] Pawłęga A., Frącz R.: „Nowelizacja normy EN 50160 – parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych”, *Elektroinstalator*, nr 7–8/2012, s. 66–71, Warszawa 2012.
- [7] Putz Ł.: „Optimization analyze of the LED lighting installation for a quality of electrical energy”, *Poznan University of Technology Academic Journals Electrical Engineering*, No.79, pp.: 261–268, Poznan 2014.
- [8] Siwy E.: „Dostosowanie przepisów polskich w zakresie jakości energii elektrycznej do wymogów Unii Europejskiej”, *Śląskie Wiadomości Elektryczne*, nr 1/2003, s. 11–15, Gliwice 2003.

**THE EXPERIMENTAL SETUP TO THE POWER QUALITY RESEARCH
OF ELECTRICAL LIGHTING INSTALLATIONS
WITH THE LED TYPE SOURCES – MEASUREMENT**

The article describes the measurements of power quality parameters of load which is mapping the lighting installation of LED sources. Study were performed on a specially constructed the experimental setup which allows for the measurement of electrical parameters and distortion from electroluminescent lighting. In the paper quoted the legal basis in the field of power quality, referring to the Standards: PN EN 50160 “Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks” and PN-EN 61000 “Electromagnetic compatibility (EMC)”. Also has been presented a comparative study of LED light sources from various manufacturers, working individually and in a group. Shown the waveforms of current intensity and the bar graphs of higher harmonics of current. Additionally has been plotted the characteristics of total harmonic distortion ratio of current intensity THDi in the relation to the active power cooperating LED lamps. Finally the results of research has been analyzed and summarized.

(Received: 1. 03. 2016, revised: 9. 03. 2016)