

Andrzej LANGE\*, Marian PASKO\*\*

## WPLYW PRACY LED-OWYCH ŹRÓDEŁ ŚWIATŁA NA PARAMETRY OKREŚLAJĄCE JAKOŚĆ ENERGII ELEK- TRYCZNEJ, CZĘŚĆ 1

W niniejszym artykule przedstawiono obowiązujące zapisy rozporządzeń i norm w zakresie jakości energii elektrycznej, ze szczególnym uwzględnieniem zawartości wyższych harmonicznych napięcia i prądu w sieciach elektroenergetycznych wysokiego, średniego i niskiego napięcia oraz współczynnika mocy PF. Zaprezentowano wyniki pomiarów parametrów określających jakość energii elektrycznej pobieranej przez nowoczesne LED-owe źródła światła. W drugiej części niniejszego artykułu przedstawiono przebiegi prądów wybranych opraw LED-owych stosowanych do użytku domowego podczas załączania ich do sieci elektroenergetycznej.

SŁOWA KLUCZOWE: parametry jakości energii elektrycznej, wyższe harmoniczne napięcie i prądów, moc bierna, filtry pasywne.

### 1. WSTĘP

Do oświetlenia pomieszczeń wewnętrznych w domach i zakładach przemysłowych oraz miejsc zewnętrznych np. ulic coraz częściej stosowane są źródła światła wykorzystujące technologię LED. Zastępują one mniej ekonomiczne żarowe źródła światła oraz bardziej energooszczędne wyładowcze źródła, takie jak: fluorescencyjne, rtęciowe, sodowe niskoprężne i wysokoprężne oraz metalohalogenkowe. Najmniejszy wpływ na sieć zasilającą mają żarowe źródła światła. Nie emitują one zaburzeń do sieci zasilającej natomiast charakteryzują się najmniejszą sprawnością. Wyładowcze źródła mają wyższą sprawność, ale negatywnie wpływają na sieć zasilającą powodując przepięcia podczas zapłonu, generują do sieci elektroenergetycznej wyższe harmoniczne prądu [1, 2, 15] oraz pobierają z sieci moc bierną indukcyjną (przy zastosowaniu indukcyjnych układów zapłonowych). LED-owe źródła światła charakteryzują się bardzo wysoką sprawnością świetlną (lumenów w przeliczeniu na wat) i bardzo dużą trwałością. Wadą ich są małe moce świetlne (mały strumień świetlny) utrudniający instalację w wysokich pomieszczeniach i na zewnątrz budynków.

---

\* Uniwersytet Warmińsko-Mazurski

\*\* Politechnika Śląska

Dodatkowo generują one do sieci zasilającej wyższe harmoniczne prądu oraz pobierają z sieci moc bierną pojemnościową.

## 2. NORMY I PRZEPISY OKREŚLAJĄCE JAKOŚĆ ENERGII ELEKTRYCZNEJ

Wybrane zapisy dyrektyw, rozporządzeń i norm zawarto w od [3] do [14]. Podstawowym aktem prawnym w Unii Europejskiej jest dyrektywa [4]. Określa ona dość ogólne wymagania i przewiduje, że urządzenia muszą być projektowane i produkowane w taki sposób, aby przy uwzględnieniu stanu techniki, zapewnić:

- a) nie przekraczanie poziomu wytwarzanych zaburzeń elektromagnetycznych, powyżej którego urządzenia radiowe i telekomunikacyjne lub inne urządzenia nie mogą działać zgodnie z przeznaczeniem;
- b) poziom odporności tych urządzeń na zaburzenia elektromagnetyczne, jakich należy spodziewać się podczas użytkowania zgodnie z przeznaczeniem oraz pozwalał on na działanie urządzeń bez niedopuszczalnego pogorszenia jakości jego użytkowania zgodnego z przeznaczeniem.

W Polsce podstawowym aktem prawnym określającym jakość energii elektrycznej jest Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego [5]. W rozporządzeniu tym szczegółowo podano parametry jakościowe energii elektrycznej jakie muszą spełniać sieci zasilające odbiorców na różnych poziomach napięcia. Do parametrów tych zaliczono:

- wartość średnią częstotliwości i jej maksymalne odchylenia,
- wartość skuteczną napięcia zasilającego i jego maksymalne odchylenia,
- maksymalny wskaźnik długookresowego migotania światła  $P_{lt}$ ,
- średnią wartość skuteczną składowej symetrycznej kolejności przeciwnej napięcia zasilającego do wartości składowej kolejności zgodnej i jej maksymalne odchylenia,
- dopuszczalne średnie wartości skuteczne dla każdej harmonicznej,
- maksymalny współczynnik odkształcenia wyższymi harmonicznymi napięcia zasilającego  $THD_U$ ,
- pobieranie przez odbiorcę mocy czynnej nie większej od mocy umownej, przy maksymalnym współczynniku  $\text{tg}\varphi$ .

Dla odbiorców zaliczanych do grup przyłączeniowych I i II tj. przyłączanych do sieci wysokich napięć 400 kV, 220 kV lub 110 kV współczynnik odkształcenia wyższymi harmonicznymi napięcia zasilającego  $THD_U$ , powinien wynosić nie więcej niż 3%, a procentowe wartości poszczególnych harmonicznymi przedstawiono w tabeli 1. Dla odbiorców zaliczanych do grup przyłączeniowych III, V tj. przyłączanych do sieci średnich i niskich napięć - poniżej 110

kV współczynnik odkształcenia wyższymi harmonicznymi napięcia zasilającego  $THD_U$ , powinien wynosić nie więcej niż 8% a procentowe wartości poszczególnych harmonicznymi przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 1. Dopuszczalne wartości wyższych harmonicznymi w ciągu każdego tygodnia 95% ze zbioru 10-minutowych średnich wartości skutecznych dla każdej harmonicznymi napięcia zasilającego w grupie przyłączeniowej I i II [5].

Harmoniczne nieparzyste				Harmoniczne parzyste	
Niebędące krotnością 3		Będące krotnością 3			
Rząd harmonicznymi	Wartość względna napięcia wyrażona w procentach składowej podstawowej	Rząd harmonicznymi	Wartość względna napięcia wyrażona w procentach składowej podstawowej	Rząd harmonicznymi	Wartość względna napięcia wyrażona w procentach składowej podstawowej
$n$	%	$n$	%	$n$	%
5	2	3	2	2	1,5
7	2	9	1	4	1
11	1,5	15	0,5	>4	0,5
13	1,5	>21	0,5		
17	1				
19	1				
23	0,7				
25	0,7				
>25	$0,2 + 0,5 \cdot \frac{25}{n}$				

Tabela 2. Dopuszczalne wartości wyższych harmonicznych w ciągu każdego tygodnia 95% ze zbioru 10-minutowych średnich wartości skutecznych dla każdej harmonicznej napicia zasilającego w grupie przyłączeniowej III,V [5].

Harmoniczne nieparzyste				Harmoniczne parzyste	
Niebędące krotnością 3		Będące krotnością 3			
Rząd harmonicznej	Wartość względna napięcia wyrażona w procentach składowej podstawowej	Rząd harmonicznej	Wartość względna napięcia wyrażona w procentach składowej podstawowej	Rząd harmonicznej	Wartość względna napięcia wyrażona w procentach składowej podstawowej
$n$	%	$n$	%	$n$	%
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,5	>4	0,5
13	3	>15	0,5		
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

W rozporządzeniu nie określono zawartości wyższych harmonicznych prądów generowanych do sieci ani współczynnika odkształcenia wyższymi harmonicznymi pobieranego prądu  $THD_I$ .

W rozporządzeniu [5] jak również w normach [6] i [7] współczynnik odkształcenia napięcia jest określany jako:

$$THD_U = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} (U_n)^2} \quad (1)$$

gdzie:  $U_n$  – wartość skuteczna  $n$ -tej harmonicznej napięcia,  $n$  – numer harmonicznej,

lub odniesioną do składowej podstawowej:

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_n^2}}{U_1} \quad (2)$$

gdzie:  $U_1$  – wartość skuteczna podstawowej harmonicznej napięcia,

przy czym ograniczenie rzędu harmonicznej do 40 ma charakter umowy [6].

W przypadku występowania napięć zawierających składową stałą, składowe nieokresowe, lub składowe nie będące całkowitymi wielokrotnościami pierwszej harmonicznej tj. interharmoniczne lub subharmoniczne określa się  $TTHD_U$  (True Total Harmonic Distortion) ze wzoru:

$$TTHD_U = \frac{\sqrt{U^2 - U_1^2}}{U_1} = \sqrt{\left(\frac{U}{U_1}\right)^2 - 1} \quad (3)$$

gdzie:  $U$  – wartość skuteczna napięcia,  $U_1$  – wartość skuteczna podstawowej harmonicznej napięcia.

Przedmiotem normy [6] są parametry napięcia zasilającego w złączach elektroenergetycznych sieci rozdzielczych niskiego i średniego napięcia (do 35 kV) dotyczące:

- częstotliwości,
- wartości,
- kształtu przebiegu czasowego,
- symetrii napięć trójfazowych.

Dopuszczalne wartości wyższych harmonicznych napięcia w sieci zasilającej niskiego i średniego napięcia przedstawiono w tabeli 3. Współczynnik zawartości wyższych harmonicznych w napięciu zasilającym nie powinien być mniejszy lub równy 8% [6].

Tabela 3. Dopuszczalne wartości wyższych harmonicznych w ciągu każdego tygodnia 95% ze zbioru 10-minutowych średnich wartości skutecznych dla każdej harmonicznej napięcia zasilającego w grupie przyłączeniowej I i II [5].

Harmoniczne nieparzyste				Harmoniczne parzyste	
Niebędące krotnością 3		Będące krotnością 3			
Rząd harmonicznej	Wartość względna napięcia wyrażona w procentach składowej podstawowej	Rząd harmonicznej	Wartość względna napięcia wyrażona w procentach składowej podstawowej	Rząd harmonicznej	Wartość względna napięcia wyrażona w procentach składowej podstawowej
$n$	%	$n$	%	$n$	%
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,5	6 ... 24	0,5
13	3	>15	0,5		
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

W celu oceny oddziaływania odbiorników na pracę innych urządzeń, jak wymaga tego dyrektywa [4] należy sprawdzić zawartość poszczególnych harmonicznych w prądzie zasilającym odbiornik. Wartości zmierzone zgodnie z [8],

[9], [10] i [11] należy porównać z wartościami dopuszczalnymi zawartymi w normie [8] i [9]. W normach tych określono współczynnik odkształcenia harmonicznymi prądu zgodnie ze wzorem:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_n^2}}{I_1} \quad (4)$$

gdzie:  $I_n$  – wartość skuteczna  $n$ -tej harmonicznej prądu,  $I_1$  – wartość skuteczna podstawowej harmonicznej prądu,  $n$  – numer harmonicznej.

W przypadku występowania prądów zawierających składową stałą, składowe nieokresowe, lub składowe nie będące całkowitymi wielokrotnościami pierwszej harmonicznej tj. interharmoniczne lub subharmoniczne określa się  $TTHD_I$  (True Total Harmonic Distortion) ze wzoru:

$$TTHD_I = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I_1} = \sqrt{\left(\frac{I}{I_1}\right)^2 - 1} \quad (5)$$

gdzie:  $I$  – wartość skuteczna prądu,  $I_1$  – wartość skuteczna podstawowej harmonicznej prądu.

W normie [8] określono wartości dopuszczalne wyższych harmonicznym generowanych do sieci zasilającej przez urządzenia elektryczne i elektroniczne z fazowym prądem zasilającym do 16 A włącznie. Norma nie dotyczy nieprofesjonalnych urządzeń spawalniczych, które podlegają normie [9]. W normie [9] określono wartości dopuszczalne wyższych harmonicznym prądu emitowanego do sieci zasilającej przez urządzenia elektryczne i elektroniczne z fazowym prądem zasilającym większym niż do 16 A i nie większym niż 75 A. Norma [8] w punkcie 5 (Klasyfikacja urządzeń) dzieli urządzenia odbiorcze na cztery klasy tj. A, B, C i D. Urządzenia sklasyfikowano następująco:

- klasa A – symetryczne urządzenia trójfazowe, urządzenia domowego użytku z wyłączeniem urządzeń przenośnych zakwalifikowanych do klasy D, narzędzia z wyłączeniem narzędzi przenośnych, ściemniacze do żarówek, urządzenia akustyczne oraz nie wyszczególnione w pozostałych trzech klasach;
- klasa B – narzędzia przenośne oraz nieprofesjonalne urządzenia do spawania łukowego;
- klasa C – urządzenia oświetleniowe;
- klasa D – urządzenia których moc nie przekracza 600 W takie jak: komputery osobiste i ich monitory, odbiorniki telewizyjne, lodówki i zamrażarki, mające jeden lub więcej regulatorów prędkości do sterowania silników kompresorowych.

Do klasy A w normie [8] dopisano uwagę: Uwaga 1. Urządzenia, które wykazują znaczny wpływ na system zasilania, mogą być przeklasyfikowane w przyszłej edycji normy. Czynniki brane pod uwagę to:

- liczba urządzeń będących w użyciu;
- czas użytkowania;
- jednoczesność użytkowania;
- pobór energii;
- widmo harmonicznych wraz z fazami.

Do klasy D w normie [8] dopisano uwagę: Uwaga 2. Poziomy dopuszczalne dla klasy D dotyczą urządzeń, co do których, ze względu na czynniki wymienione w Uwadze 1, można wykazać, że znacząco wpływają na publiczny system zasilania elektrycznego.

W rozdziale 7 (Poziomy dopuszczalne harmonicznych prądu) normy [8] opisano z jakich tablic należy czytać dopuszczalne zawartości wyższych harmonicznych prądów dla różnego rodzaju oświetlenia. Dla oświetlenia żarowego sterowanych za pomocą ściemniaczy zakwalifikowanego do klasy A - tabela 4. Dla oświetlenia żarowego i wyładowczego zakwalifikowanego do klasy C, norma podzieliła te urządzenia na dwie grupy: a) wejściowa moc czynna  $>25$  W (tabela 5), b) wejściowa moc czynna  $\leq 25$  W (tabela 6). W normie nie wyszczególniono LED-owych źródeł światła. Wymieniono tylko: wyładowcze urządzenia oświetleniowe, żarowy sprzęt oświetleniowy z wbudowanymi ściemniaczami, wyładowcze urządzenia oświetleniowe mające wbudowane ściemniacze lub zawierające niezależne ściemniacze wbudowane w obudowę. Przecież zgodnie z unijną dyrektywą żarówki tradycyjne (żarowe) nie mogą być sprzedawane i wykorzystane do użytku domowego [16]. Wymusza się więc stosowanie energooszczędnych źródeł światła jak świetlówki kompaktowe i żarówki LED-owe. Jak więc wytłumaczyć brak w normie LED-owych źródeł światła. Przecież ich stosowanie jest już powszechne. Norma ta jest z października 2014 r., a już w grudniu 2012 wydano rozporządzenie komisji europejskiej dotyczące wymogów dotyczących kierunkowych lamp z diodami elektroluminescencyjnymi [14]. Dodatkowo w normie tej można zauważyć brak spójności, gdyż zaliczane są urządzenia oświetleniowe do klasy C nawet wyładowcze z wbudowanymi ściemniaczami a ściemniacze do lamp żarowych zaliczane są do klasy A.

Tabela 4. Poziomy dopuszczalne zawartości harmonicznego prądu dla urządzeń klasy A [8].

Harmoniczne parzyste		Harmoniczne nieparzyste	
Rząd harmonicznego	Maksymalny dopuszczalny prąd harmonicznego	Rząd harmonicznego	Maksymalny dopuszczalny prąd harmonicznego
$n$	A	$n$	S
3	2,30	2	1,08
5	1,14	4	0,43
7	0,77	6	0,30
9	0,40	$8 \leq n \leq 40$	$0,23 \frac{8}{n}$
11	0,33		
13	0,21		
$15 \leq n \leq 39$	$0,15 \frac{15}{n}$		

Tabela 5. Poziomy dopuszczalne zawartości harmonicznego prądu dla urządzeń klasy C do mocy czynnej &gt; 25 W [8].

Rząd harmonicznego	Maksymalny dopuszczalny prąd harmonicznego wyrażony w procentach składowej podstawowej prądu wejściowego
$n$	%
2	2
3	$30 \cdot \lambda^*$
5	10
7	7
9	5
$11 \leq n \leq 39$ (tylko harmoniczne nieparzyste)	3
* $\lambda$ jest współczynnikiem mocy obwodu	



Tabela 6. Poziomy dopuszczalne zawartości harmonicznych prądu dla urządzeń klasy C do mocy czynnej  $\leq 25$  W oraz klasy D [8].

Rząd harmonicznej	Maksymalny dopuszczalny prąd harmonicznej przeliczony na wat
$n$	mA/W
3	3,4
5	1,9
7	1,0
9	0,5
11	0,35
$13 \leq n \leq 39$ (tylko harmoniczne nieparzyste)	$\frac{3,85}{n}$

Jak wynika z tabeli 5 zawartość 3 harmonicznej jest zależna od współczynnika mocy PF, który zgodnie z [7] i [12] jest definiowany następująco:

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \phi_1 + \sum_{n \neq 1} U_n \cdot I_n \cdot \cos \phi_n}{\sqrt{(U_1 \cdot I_1)^2 + \sum_{n \neq 1} (U_n \cdot I_n)^2}} \quad (4)$$

gdzie:  $U_n$  – wartość skuteczna  $n$ -tej harmonicznej napięcia,  $U_1$  – wartość skuteczna podstawowej harmonicznej napięcia,  $I_n$  – wartość skuteczna  $n$ -tej harmonicznej prądu,  $I_1$  – wartość skuteczna podstawowej harmonicznej prądu,  $\phi_1$ ,  $\phi_n$  – kąty przesunięcia fazowego przebiegów napięć i prądów poszczególnych harmonicznych,  $n$  – numer harmonicznej.

Współczynnik mocy PF dla opraw oświetleniowych został określony w przepisach unijnych [13] i [14]. W [13] określono dla lamp wyładowczych (tabela 7), a w [14] dla lamp LED (tabela 8).

Tabela 7. Wartości współczynnika mocy dla lamp oświetleniowych [13].

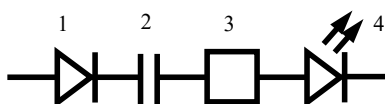
Rodzaj lampy	Dopuszczalny współczynnik mocy PF
Wymogi w zakresie funkcjonalności dla kompaktowych lamp fluorescencyjnych	$\geq 0,55$ dla $P < 25$ W $\geq 0,90$ dla $P \geq 25$ W
Wymogi w zakresie funkcjonalności dla lamp, z wyjątkiem kompaktowych lamp fluorescencyjnych i lamp LED	$\geq 0,95$

Tabela 8. Wartości współczynnika mocy dla lamp oświetleniowych [14].

Rodzaj lampy	Dopuszczalny współczynnik mocy PF
Wymogi dotyczące funkcjonalności dla kierunkowych kompaktowych lamp fluorescencyjnych (współczynnik mocy lampy dla lamp z wbudowanym osprzętem sterującym)	$\geq 0,55$ dla $P < 25$ W $\geq 0,90$ dla $P \geq 25$ W
Wymogi dotyczące funkcjonalności dla pozostałych lamp kierunkowych (z wyjątkiem lamp LED, kompaktowych lamp fluorescencyjnych i lamp wyładowczych dużej intensywności - współczynnik mocy lampy dla lamp z wbudowanym osprzętem sterującym)	Moc $> 25$ W: $\geq 0,9$ Moc $\leq 25$ W: $\geq 0,5$
Wymogi dotyczące funkcjonalności dla bezkierunkowych i kierunkowych lamp LED (współczynnik mocy lampy dla lamp z wbudowanym osprzętem sterującym)	$P \leq 2$ W: brak wymogu $2$ W $< P \leq 5$ W: PF $> 0,4$ $5$ W $< P \leq 25$ W: PF $> 0,5$ $P > 25$ W: PF $> 0,9$

### 3. OGÓLNA BUDOWA LED-OWYCH ŹRÓDEŁ ŚWIATŁA

Oprawy LED-owe są zbudowane z następujących elementów (rys. 1): układu prostowniczego 1, kondensatora 2 służącego do wygładzenia napięcia otrzymanego z prostownika, stabilizatora prądowo-napięciowego 3 oraz układu diod 4 połączonych szeregowo i równoległe generujących strumień świetlny. W zależności od typu i przeznaczenia oprawy (domowa, przemysłowa) układ prostowniczko-zasilający pojedyncze diody LED może być mniej lub bardziej rozbudowany, co z kolei ma istotny wpływ na przebieg pobieranego prądu.



Rys. 1. Ogólna Budowa LED-owego źródła światła

#### 4. POMIARY I ANALIZA UZYSKANYCH WYNIKÓW

Dla przedstawienia wpływu LED-owych źródeł światła na parametry jakości energii elektrycznej wytypowano do porównania urządzenia reprezentujące trzy grupy źródeł światła do użytku domowego. Pierwszą grupę stanowią LED-y – żarówki na gwint E27 i E14 (rys. 2). Drugą grupę źródeł LED-owych stanowią oprawy - gniazda typu GU10 (rys. 2). Trzecią grupę analizowanych źródeł światła stanowią oprawy na gniazda typu G9 (rys. 2).



Rys. 2. LED-owe oprawy stosowane do użytku domowego

W celu dokonania analizy jakości energii pobieranej przez oświetlenie LED-owe dokonano pomiaru kilku losowo wybranych źródeł, za pomocą analizatora jakości zasilania typu HIOKI 3196. Podczas prób dokonano pomiarów nie tylko prądów, napięć i mocy, ale również prądów i napięć wyższych harmonicznych w punkcie zasilania oprawy oświetleniowej. Dodatkowo zbadano stany przejściowe podczas załączania i wyłączania oprawy do sieci zasilającej.

W celu określenia oddziaływania domowych żarówek LED na sieć zasilającą do pomiarów wybrano sześć losowo wybranych żarówek przedstawionych w tabeli 9.

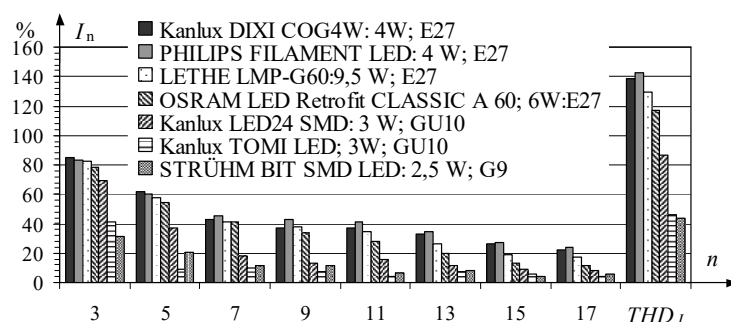
Tabela 9. Typy i dane znamionowe badanych żarówek domowych LED.

Lp.	Typ żarówki	Moc	Gwint
1	Kanlux DIXI COG4W	4 W	E27
2	PHILIPS FILAMENT LED	4 W	E27
3	LETHE LMP-G60	9,5 W	E27
4	Kanlux LED24 SMD	3 W	GU10
5	Kanlux TOMI LED	3 W	GU10
6	STRÜHM BIT SMD LED	2,5 W	G9

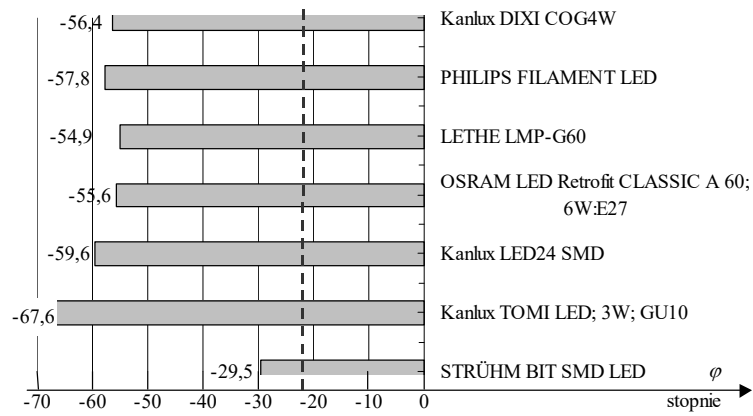
Na rys. 3 przedstawiono procentową zawartość poszczególnych wyższych harmonicznych prądów oraz  $THD_I$  podczas pracy żarówek LED. Z pomia-

rów wynika, iż urządzenia te pobierają nieparzyste harmoniczne do wartości 80% dla 3 harmonicznej oraz niższych wartości dla pozostałych. Całkowity  $THD_I$  osiąga nawet wartości 140%. Dla wszystkich źródeł LED kąt przesunięcia fazowego między napięciem i prądem dla podstawowej harmonicznej jest ujemny (rys. 4), a wartości ich wynoszą ok.  $-50^\circ$ ÷ $-60^\circ$ . Ujemny kąt powoduje pobór mocy biernej pojemnościowej. Przy wartościach od  $-30^\circ$  do  $-60^\circ$  pobór mocy biernej pojemnościowej może powodować konieczność jej kompensacji za pomocą dławików. Jest to nowe wyzwanie dla służb energetycznych. Do tej pory w elektroenergetyce występowała konieczność kompensacji mocy biernej indukcyjnej. Dodatkowo sprawę utrudnia generowanie do sieci wyższych harmonicznych prądów, które przy występowaniu odbiorników rezystancyjno-indukcyjnych oraz rezystancyjno-pojemnościowych (oprawy LED) może powodować powstawanie rezonansu prądowego. Skutkiem czego może być wzrost napięć wyższych harmonicznych powyżej wartości dopuszczalnych przez normy [2] i przepisy [4]. Dodatkowym negatywnym skutkiem rezonansu może być uszkodzenie samych odbiorników pojemnościowych.

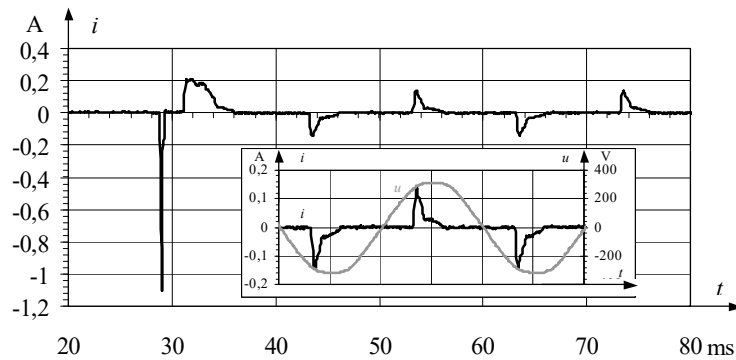
Na rys. 5 do rys. 9 przedstawiono przebiegi prądów i napięć w czasie załączenia źródeł światła oraz w czasie stanu ustalonego. Z wykresów wynika, iż w badanych żarówkach domowych zastosowano prostowniki w układzie Gretza z kondensatorem wygładzającym. Prąd pobierany jest impulsowy i zaczyna się przed szczytem napięcia, a kończy się w szczycie napięcia (rys. 5, 7 i 9). W oprawie domowej LETHE LMP-G60 najpierw ładowany jest kondensator, a dopiero po trzech okresach załącza źródło światła (rys. 6 i 7). Inaczej zachowuje się oprawa domowa Kanlux LED24 SMD, która pobiera prąd w pierwszej ćwiartce napięcia tj. od zera do szczytu napięcia.



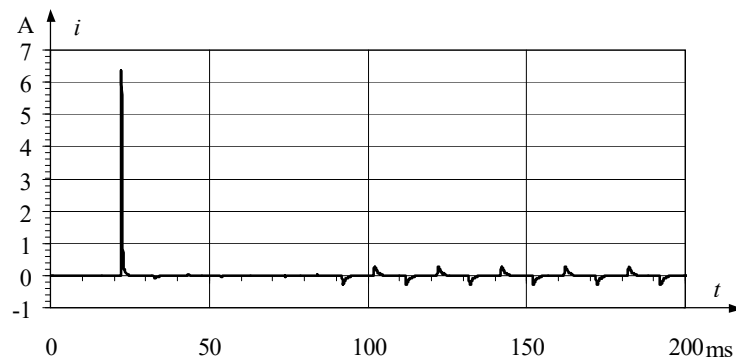
Rys. 3. Zawartość procentowa wyższych harmonicznych prądów oraz  $THD_I$  pobieranego z sieci zasilającej nn przez LED-owe oświetlenie domowe



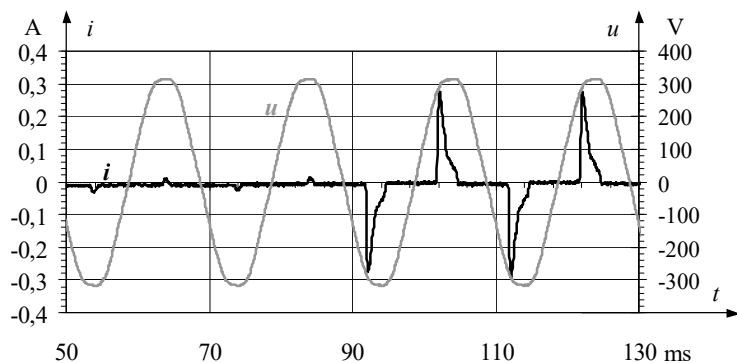
Rys. 4. Zmierzony kąt przesunięcia fazowego pomiędzy napięciem i prądem dla podstawowej harmonicznej dla różnych opraw LED-owych



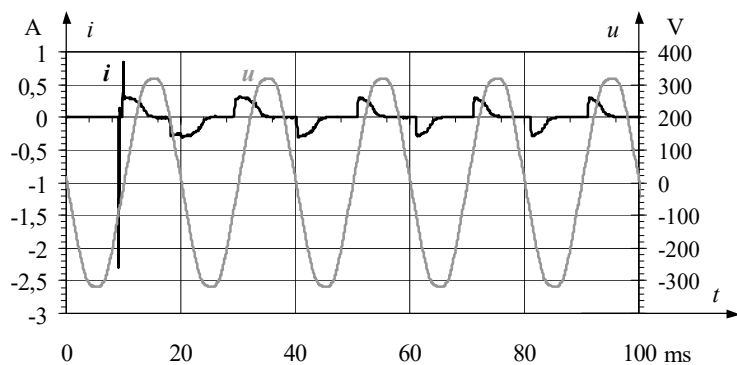
Rys. 5. Przebieg prądu pobieranego przez oprawę domową PHILIPS FILAMENT LED: 4 W; E27



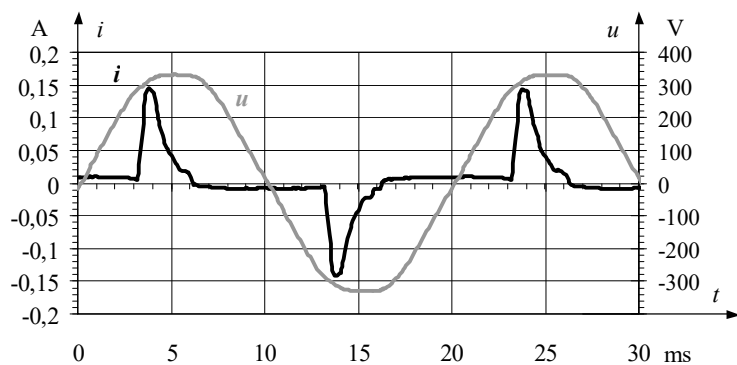
Rys. 6. Przebieg prądu pobieranego przez oprawę domową LETHE LMP-G60: 9,5 W; E27 - moment załączenia



Rys. 7. Przebieg prądu pobieranego przez oprawę domową LETHE LMP-G60: 9,5 W; E27 - moment załączenia - powiększenie z rys. 8



Rys. 8. Przebieg prądu pobieranego przez oprawę domową Kanlux LED24 SMD: 3 W; GU10 - moment załączenia



Rys. 9. Przebieg prądu pobieranego przez oprawę domową OSRAM LED Retrofit CLASSIC A 60; 6 W: E27 - stan ustalony

#### 4. UWAGI I WNIOSKI

Nowoczesne oświetlenie LED-owe mają nie tylko wysoką skuteczność świetlną i dużą trwałość, ale również powodują:

- pobieranie prądu odkształconego, co wiąże się z generowaniem do sieci wyższych harmonicznych prądów (rys. 3),
- pogorszenie współczynnika mocy przy stosowaniu oświetlenia LED-owego do  $PF=0,53$  dla żarówek domowych (rys. 4),
- większość opraw domowych wyposażone są w proste układy prostownikowe z kondensatorem do wygładzenia napięcia wyjściowego podawanego na diody LED (rys. 5, 7, 8 i 9) przez co mają większy kąt przesunięcia pomiędzy prądem a napięciem, który wynosi ok.  $-55^\circ$ . Przez to generują również wyższe wartości wyższych harmonicznych dochodzące do  $THD_I = 140\%$  (rys. 3),
- wzrost wartości wyższych harmonicznych w napięciu zasilającym w wyniku poboru wyższych harmonicznych prądów oraz możliwości wystąpienia rezonansów prądowych,
- pobieranie z sieci mocy biernej pojemnościowej,
- wszystkie przebadane w niniejszym artykule żarówki LED oprócz Kanlux TOMI LED; 3 W; GU 10 spełniają wymagania w zakresie współczynnika mocy PF (rys. 4 i tabela 8),
- wszystkie przebadane w niniejszym artykule żarówki LED spełniają wartości dopuszczalnych zawartości wyższych harmonicznych generowanych do sieci zasilającej (tabela 6).

#### LITERATURA

- [1] Kurkowski M., Mirowski J., Popławski T., Pasko M., Białoń T., Pomiary energii biernej w instalacjach niskiego napięcia. Przegląd Elektrotechniczny, R.92 (2016), nr 4, 144-147.
- [2] Mirowski J., Kurkowski M., Białoń T., Pasko M., Harmoniczne prądu w instalacjach oświetleniowych, Przegląd Elektrotechniczny R.91 (2015), nr 8, 180-184.
- [3] Prawo energetyczne z dnia 25 września 2012. Dz.U, poz. 1059, tom 1.
- [4] EMC 2014/30/UE - Dyrektywa 2014/30/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 26 lutego 2014 r. w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do kompatybilności elektromagnetycznej.
- [5] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczególnych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego. Dziennik Ustaw Nr 93 poz. 623.
- [6] PN-EN 50160: 1998, Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych.

- [7] IEEE Std 1459-2010 Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions; IEEE, New York, 2010.
- [8] PN-EN 61000-3-2:2014-10, Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) - Część 3-2: Poziomy dopuszczalne - Poziomy dopuszczalne emisji harmoniczných prądu (fazowy prąd zasilający odbiornika < lub = 16A).
- [9] PN-EN 61000-3-12:2012., Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) - Część 3-12: Poziomy dopuszczalne - Poziomy dopuszczalne emisji harmoniczných prądu dla odbiorników o znamionowym prądzie fazowym > 16A i < lub = 75A przyłączonych do publicznej sieci zasilającej niskiego napięcia.
- [10] PN-EN 61000-4-30:2015-05, Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 4-30: Metody badań i pomiarów - Metody pomiaru jakości energii.
- [11] PN-EN 61000-4-7:2007/A1:2011, Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) - Część 4-7: Metody badań i pomiarów - Ogólny przewodnik dotyczący pomiarów harmoniczných i interharmoniczných oraz przyrządów pomiarowych, dla sieci zasilających i przyłączonych do nich urządzeń.
- [12] Kurkowski M., Popławski T., Mirowski J., Energia bierna a przepisy Unii Europejskiej. Rynek Energii nr 2 (111) 2014, 18-25.
- [13] Rozporządzenie Komisji (UE) Nr 1194/2012 z dnia 12 grudnia 2012 r. w sprawie wykonania dyrektywy 2009/125/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w odniesieniu do wymogów dotyczących ekoprojektu dla lamp kierunkowych, lamp z diodami elektroluminescencyjnymi i powiązanego wyposażenia.
- [14] Rozporządzenie Komisji (WE) Nr 244/2009 z dnia 18 marca 2009 r. w sprawie wykonania dyrektywy 2005/32/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w odniesieniu do wymogów dotyczących ekoprojektu dla bezkierunkowych lamp do użytku domowego.
- [15] Wandachowicz K., Taisner M., Lampy i moduły diodowe zasilane napięciem przemiennym. Poznan University of Technology Academic Journals, No. 92, 2017, pp. 117-122.
- [16] Rozporządzenie Komisji (WE) Nr 244/2009 z dnia 18 marca 2009 r. w sprawie wykonania dyrektywy 2005/32/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w odniesieniu do wymogów dotyczących ekoprojektu dla bezkierunkowych lamp do użytku domowego.

#### **EFFECTS OF LED LIGHT SOURCES ON THE PARAMETERS DEFINING THE QUALITY OF ELECTRICITY, PART 1**

This article presents the applicable provisions of regulations and standards in the field of electric energy quality, with particular emphasis on the content of higher voltage and current harmonics in high, medium and low voltage power networks as well as PF power factor. The results of measurements of parameters determining the quality of electricity consumed by modern LED light sources are presented. In the second part of this article current waveforms of selected LED luminaires used for home use when switching them to the power grid are presented.

*(Received: 11.02.2018, revised: 06.03.2018)*