

## BADANIE WPLYWU ODKSZTAŁCENIA NAPIĘCIA SIECI NA PRZEBIEG PRĄDU OBCIĄŻENIA WYBRANYCH LAMP OŚWIETLENIA ULICZNEGO

Stanisław CZAPP<sup>1</sup>, Kornel BOROWSKI<sup>2</sup>

1. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki  
tel.: 58 347-13-98 fax: 58 347-18-98 e-mail: stanislaw.czapp@pg.gda.pl
2. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki  
tel.: 58 347-26-63 fax: 58 347-26-63 e-mail: kornel.borowski@pg.gda.pl

**Streszczenie:** Cechą charakterystyczną większości rodzajów lamp jest odkształcony prąd obciążenia. W niektórych przypadkach odkształcenie prądu może być duże, co niekorzystnie wpływa na sieć zasilającą. Odkształcenie to pogłębia się, gdy lampy są zasilane odkształconym napięciem. W artykule przedstawiono wyniki badań prądu obciążenia następujących lamp stosowanych w oświetleniu ulicznym: lampy sodowej wysokoprężnej, lampy sodowej niskoprężnej i lampy ledowej. W pierwszym etapie badań lampy zasilano napięciem o pomijalnym odkształceniu, co pozwoliło wyznaczyć referencyjne przebiegi ich prądu obciążenia. Następnie zasilano je napięciem o coraz większym odkształceniu.

**Słowa kluczowe:** oświetlenie elektryczne, wyższe harmoniczne.

### 1. WSTĘP

Do oświetlenia ulicznego służą obecnie lampy sodowe wysokoprężne, w mniejszym stopniu lampy sodowe niskoprężne, a w nowych i modernizowanych instalacjach lampy ledowe. Wymienione lampy charakteryzują się odkształconymi przebiegami prądu obciążenia. Odkształcenie prądu obciążenia może być znaczne nawet przy sinusoidalnym napięciu zasilającym, a w przypadku napięcia zawierającego wyższe harmoniczne odkształcenie to jeszcze się pogłębia.

Odkształcony prąd obciążenia wpływa niekorzystnie na instalację zasilającą. Z powodu obecności prądów wyższych harmonicznych należy się liczyć ze zwiększonym obciążeniem przewodów fazowych oraz znacznym obciążeniem przewodu neutralnego (obwody trójfazowe). Prądy wyższych harmonicznych są źródłem dodatkowego ciepła niekorzystnie wpływającego na obciążalność transformatora. Przy odkształconym prądzie obciążenia o wartości skutecznej zbliżonej do prądu znamionowego transformatora może dojść do znacznego przekroczenia jego temperatury dopuszczalnej długotrwale [1-3].

W praktyce należy się liczyć z odkształconym napięciem zasilającym, w szczególności gdy lampy oświetlenia ulicznego znajdują się na terenie mocno uprzemysłowionym o znacznym udziale odbiorników nieliniowych.

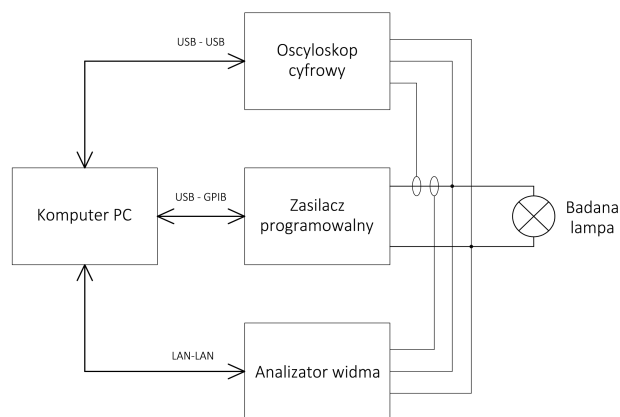
Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie wyników badań kształtu przebiegu prądu obciążenia wybranych lamp i zawartości w tym prądzie wyższych harmonicznych, przy odkształconym napięciu zasilającym.

### 2. PRZEBIEG I WYNIKI BADAŃ

Badania kształtu przebiegu prądu obciążenia i zawartości wyższych harmonicznych przeprowadzono dla trzech lamp stosowanych w oświetleniu ulicznym:

- sodowej wysokoprężnej (SON – moc znamionowa 70 W),
- sodowej niskoprężnej (SOX – moc znamionowa 91 W),
- ledowej (LED – moc znamionowa 52 W).

Układ do badania lamp składał się z zasilacza programowalnego, oscyloskopu cyfrowego Tektronix DPO 3034 oraz analizatora parametrów sieci Chauvin Arnoux C.A 8352, w którym korzystano z funkcji analizy widma sygnału. Urządzenia połączono zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 1.



Rys. 1. Uproszczony schemat układu do badania lamp

Kształt napięcia zasilającego lampy zadawano z komputera PC za pomocą oprogramowania dostarczonego przez producenta zasilacza programowalnego. Wykorzystano moduł pozwalający na generowanie napięcia zasilającego zawierającego określoną amplitudę, częstotliwość i fazę początkową wyższych harmonicznych. Zaprogramowano cykl generowanych napięć zawierających różne wartości harmonicznych i ich faz początkowych.

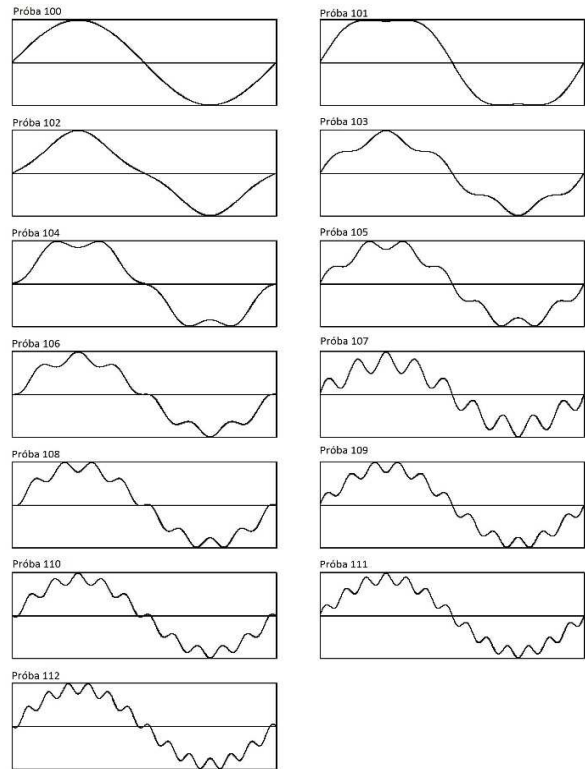
Każdą z wymienionych lamp zasilano kolejno napięciem o określonej zawartości wyższej harmonicznej. Zmieniano zarówno rząd, jak i udział wyższej harmonicznej, a jej fazę początkową przyjęto jako równą 0° lub 180°. Należy dodać, że przed rozpoczęciem pomiarów oprawy

były zasilane napięciem sinusoidalnym aż do uzyskania stanu ustalonego.

Dla każdej z opraw wykonano po dwanaście pomiarów dla trzech udziałów wyższej harmonicznej: udział 30% (próba 1xx), udział 15% (próba 2xx) i udział 10% (próba 3xx). Zestawienie udziału wyższej harmonicznej w poszczególnych próbach przedstawiono w tabelicy 1, a przykładowe kształty przebiegów odkształconych napięć zasilających na rysunku 2. We wszystkich cyklach pomiarowych wykonano również pomiar kontrolny przy zasilaniu napięciem nieodkształconym (próby 100, 200, 300). W rezultacie otrzymano trzydzieści dziewięć wyników pomiarów dla każdej z opraw. Dla każdego napięcia zasilającego uzyskano oscylogram przedstawiający przebieg prądu obciążenia oraz tabelaryczne zestawienie wartości wyższych harmonicznych prądu obciążenia.

Przełączanie przebiegów napięcia zasilającego odbywało się przy wykorzystaniu w zasilaczu funkcji zapobiegającej zanikom napięcia na jego wyjściu (w czasie przełączeń). Dzięki temu nie było potrzeby każdorazowego oczekiwania na ponowne rozświecenie lampy po chwilowym zaniku napięcia (w przypadku lamp sodowych wysokoprężnych czas ponownego rozświecenia lampy nagrzanej wynosi kilka minut). W przypadku badanej lampy ledowej diody załączały się jednak z pewnym opóźnieniem. Lampa ta była wyposażona w dwa zasilacze prądu stałego, przy czym zasilacz o mniejszej mocy zasiliał swoją grupę diod z opóźnieniem około 1-2 sekund.

Wartość skuteczna poszczególnych harmonicznych napięcia wyjściowego zasilacza programowalnego była tak dobrana, aby wartość skuteczna napięcia zasilającego w każdej próbie była równa 230 V. W czasie badań lampy sodowej wysokoprężnej okazało się, że przy próbie 107 (30% udział 9. harmonicznej) prąd pobierany przez oprawę przekracza 2,5 A, co jest największą dopuszczalną wartością dla wykorzystanego zasilacza. Wykonanie dalszych prób dla tej lampy nie były możliwe.



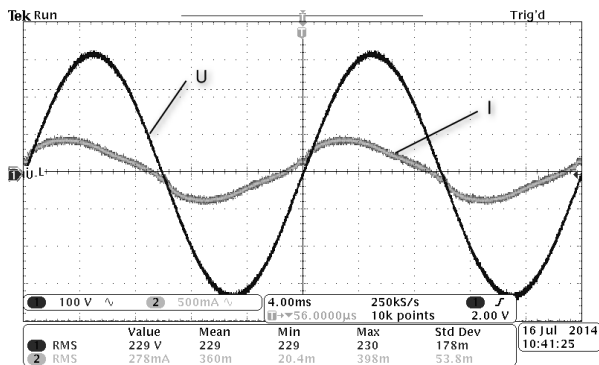
Rys. 2. Napięcia wyjściowe zasilacza programowanego dla ustawień zawartości harmonicznych zgodnie z tabelicą 1

Na rysunkach od 3 do 5 przedstawiono oscylogramy prądu obciążenia lamp przy ich zasilaniu napięciem nieodkształconym. Największe odkształcenie przebiegu prądu można zaobserwować dla lampy sodowej wysokoprężnej (SON).

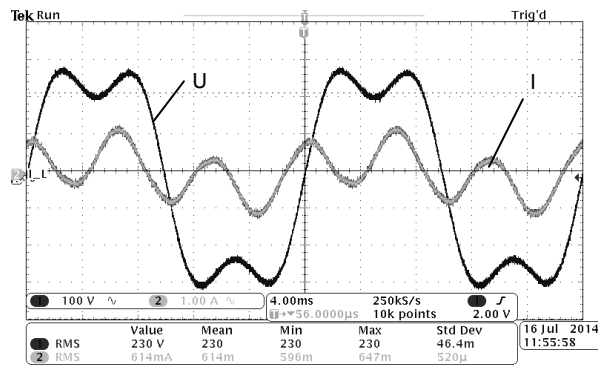
Rysunki od 6 do 14 przedstawiają oscylogramy prądu obciążenia dla odkształconego napięcia zasilającego (próby 101, 103 i 105). Zgodnie z oczekiwaniami, przy zasilaniu lamp napięciem odkształconym zwiększa się odkształcenie prądu pobieranego przez lampy.

Tabela 1. Zestawienie wartości procentowych poszczególnych harmonicznych w napięciu zasilającym  $U$  (szarym tłem oznaczono charakterystyczne wartości dla każdej z prób);  $\alpha$  – faza początkowa harmonicznej

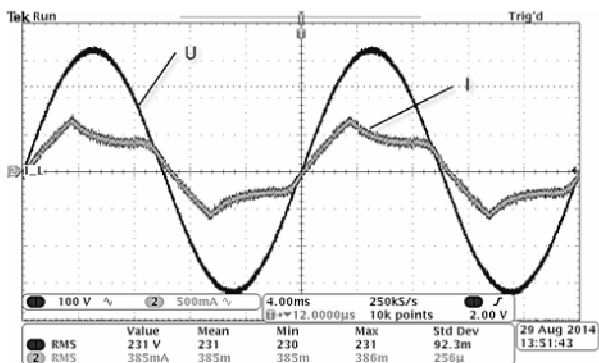
	Rząd harmon.	x00		x01		x02		x03		x04		x05		x06		x07		x08		x09		x10		x11		x12			
		$U$	$\alpha$	$U$	$\alpha$	$U$	$\alpha$	$U$	$\alpha$	$U$	$\alpha$	$U$	$\alpha$	$U$	$\alpha$	$U$	$\alpha$	$U$	$\alpha$	$U$	$\alpha$	$U$	$\alpha$	$U$	$\alpha$	$U$	$\alpha$	$U$	$\alpha$
		%	°	%	°	%	°	%	°	%	°	%	°	%	°	%	°	%	°	%	°	%	°	%	°	%	°	%	°
Próba 1xx	1	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0
	3	0	0	30	0	30	180	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	5	0	0	0	0	0	0	30	0	30	180	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	30	180	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	30	180	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	30	180	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	30	180	0	0	0	
Próba 2xx	1	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0
	3	0	0	15	0	15	180	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	5	0	0	0	0	0	0	15	0	15	180	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	15	180	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	15	180	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	15	180	0	0	0	0	0	0	0	0	
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	15	180	0	0	0	
Próba 3xx	1	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0
	3	0	0	10	0	10	180	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	5	0	0	0	0	0	0	10	0	10	180	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	10	180	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	10	180	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	10	180	0	0	0	0	0	0	0	0	
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	10	180	0	0	0	



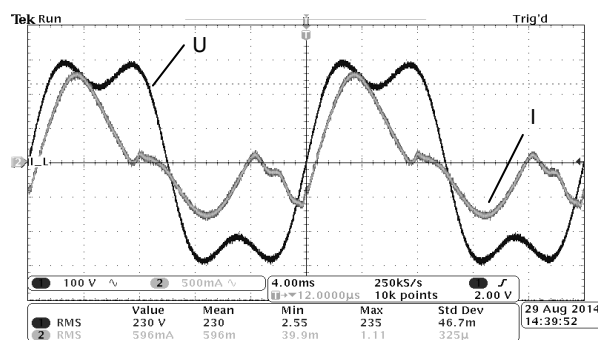
Rys. 3. Oscylogram prądu obciążenia  $I$  lampy LED oraz napięcia zasilającego  $U$ . Próba 100 – zasilanie napięciem sinusoidalnym



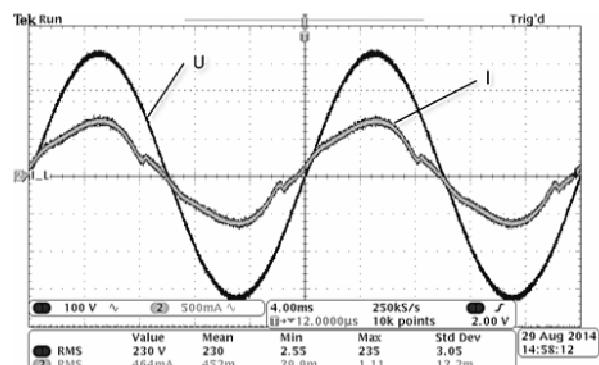
Rys. 7. Oscylogram prądu obciążenia  $I$  lampy SON oraz napięcia zasilającego  $U$ . Próba 101 – napięcie zasilające: 30% udział 3. harmonicznej o fazy początkowej  $\alpha = 0^\circ$



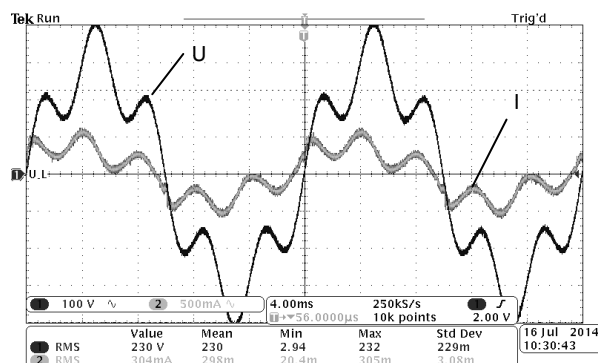
Rys. 4. Oscylogram prądu obciążenia  $I$  lampy SON oraz napięcia zasilającego  $U$ . Próba 100 – zasilanie napięciem sinusoidalnym



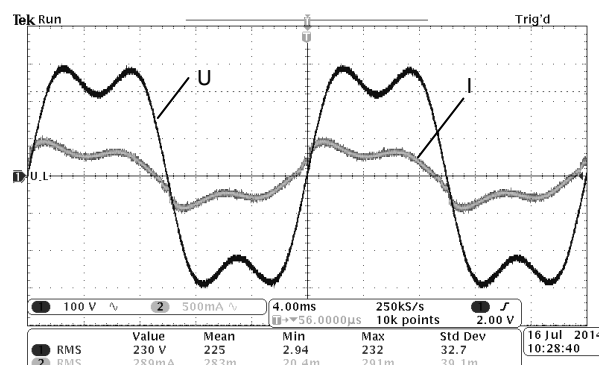
Rys. 8. Oscylogram prądu obciążenia  $I$  lampy SOX oraz napięcia zasilającego  $U$ . Próba 101 – napięcie zasilające: 30% udział 3. harmonicznej o fazy początkowej  $\alpha = 0^\circ$



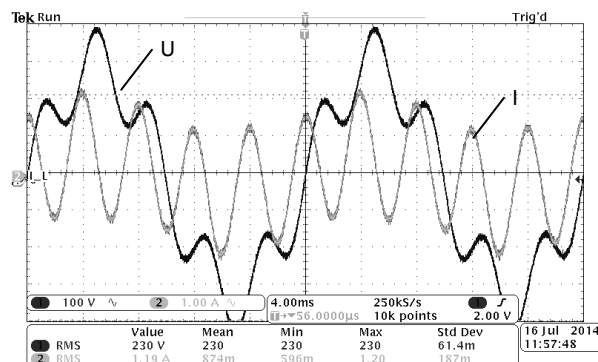
Rys. 5. Oscylogram prądu obciążenia  $I$  lampy SOX oraz napięcia zasilającego  $U$ . Próba 100 – zasilanie napięciem sinusoidalnym



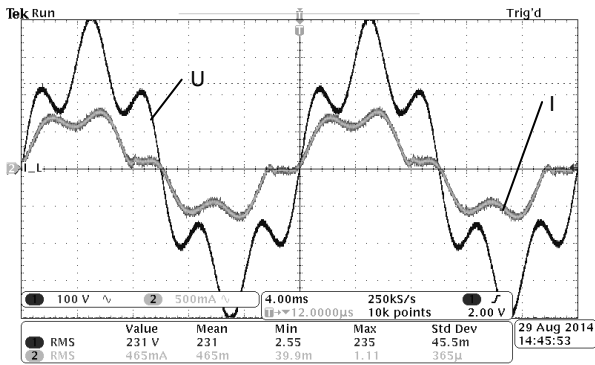
Rys. 9. Oscylogram prądu obciążenia  $I$  lampy LED oraz napięcia zasilającego  $U$ . Próba 103 – napięcie zasilające: 30% udział 5. harmonicznej o fazy początkowej  $\alpha = 0^\circ$



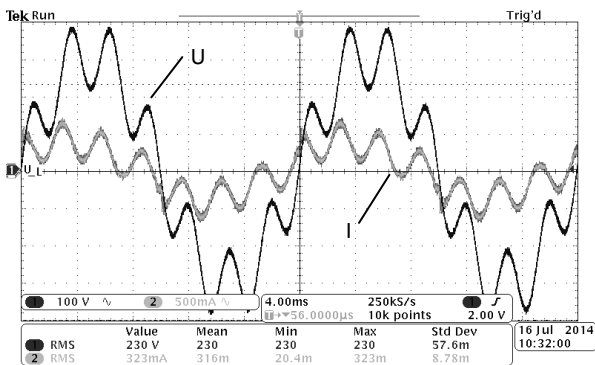
Rys. 6. Oscylogram prądu obciążenia  $I$  lampy LED oraz napięcia zasilającego  $U$ . Próba 101 – napięcie zasilające: 30% udział 3. harmonicznej o fazy początkowej  $\alpha = 0^\circ$



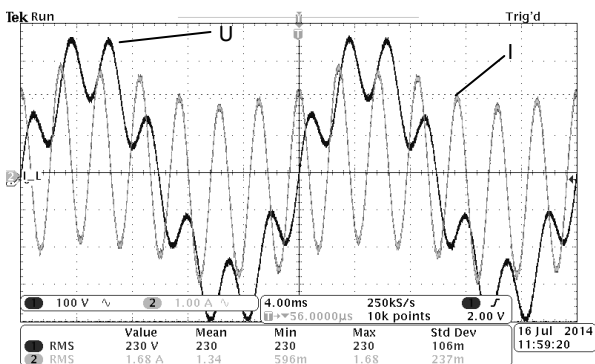
Rys. 10. Oscylogram prądu obciążenia  $I$  lampy SON oraz napięcia zasilającego  $U$ . Próba 103 – napięcie zasilające: 30% udział 5. harmonicznej o fazy początkowej  $\alpha = 0^\circ$



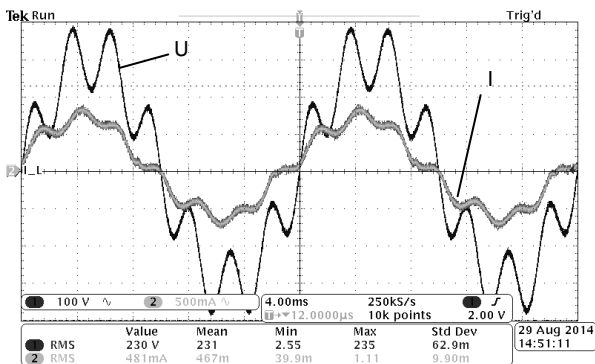
Rys. 11. Oscylogram prądu obciążenia  $I$  lampy SOX oraz napięcia zasilającego  $U$ . Próba 103 – napięcie zasilające: 30% udział 5. harmonicznej o fazy początkowej  $\alpha = 0^\circ$



Rys. 12. Oscylogram prądu obciążenia  $I$  lampy LED oraz napięcia zasilającego  $U$ . Próba 105 – napięcie zasilające: 30% udział 7. harmonicznej o fazy początkowej  $\alpha = 0^\circ$



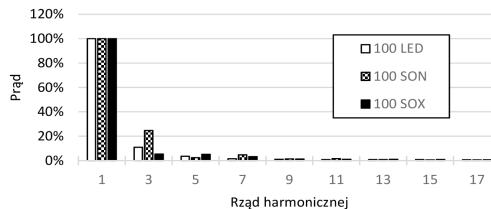
Rys. 13. Oscylogram prądu obciążenia  $I$  lampy SON oraz napięcia zasilającego  $U$ . Próba 105 – napięcie zasilające: 30% udział 7. harmonicznej o fazy początkowej  $\alpha = 0^\circ$



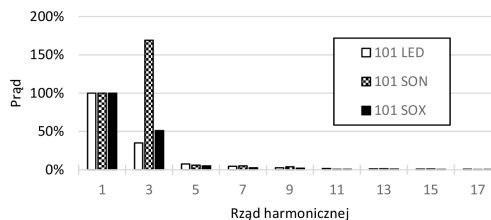
Rys. 14. Oscylogram prądu obciążenia  $I$  lampy SOX oraz napięcia zasilającego  $U$ . Próba 105 – napięcie zasilające: 30% udział 7. harmonicznej o fazy początkowej  $\alpha = 0^\circ$

Wrażliwość badanych lamp na odkształcenie napięcia jest jednak zróżnicowana. Najbardziej wrażliwa jest lampa sodowa wysokoprężna (SON). W przypadku znacznej zawartości 7. harmonicznej (rys. 13) zauważa się, że przebieg prądu obciążenia tej lampy wielokrotnie przechodzi przez zero w czasie 20 ms.

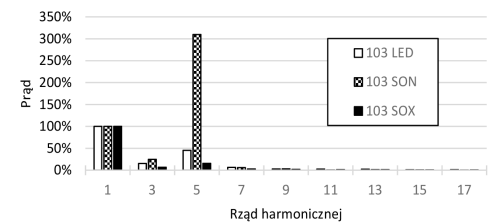
Rysunki od 15 do 19 przedstawiają udział procentowy w prądzie obciążenia poszczególnych wyższych harmonicznych w stosunku do składowej podstawowej.



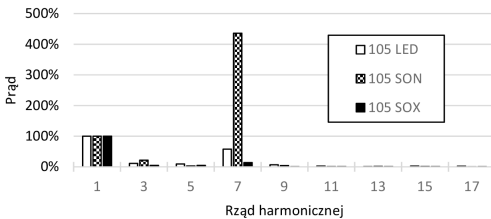
Rys. 15. Zawartość wyższych harmonicznych w prądzie obciążenia dla próby 100



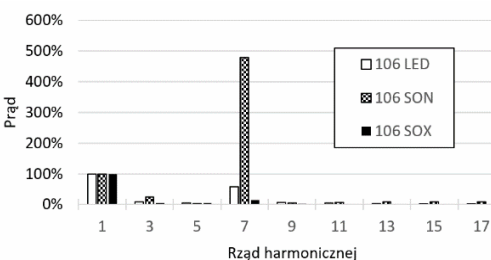
Rys. 16. Zawartość wyższych harmonicznych w prądzie obciążenia dla próby 101



Rys. 17. Zawartość wyższych harmonicznych w prądzie obciążenia dla próby 103



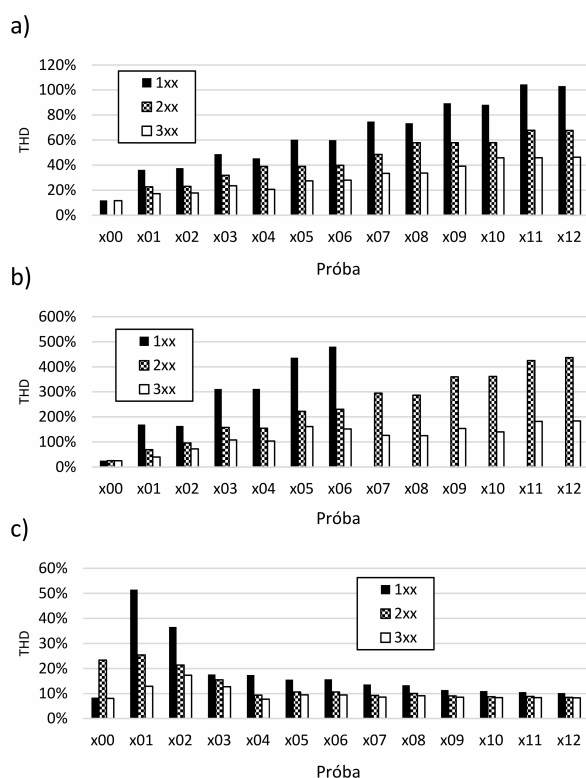
Rys. 18. Zawartość wyższych harmonicznych w prądzie obciążenia dla próby 105



Rys. 19. Zawartość wyższych harmonicznych w prądzie obciążenia dla próby 106

Jeżeli chodzi o stopień odkształcenia prądu THD, to w przypadku lampy ledowej i lampy sodowej wysokoprężnej wzrasta on w przybliżeniu liniowo wraz ze zwiększaniem się rzędu harmonicznej w napięciu zasilającym (rys. 20a i rys. 20b). W przypadku lampy sodowej niskoprężnej największy stopień odkształcenia prądu THD zaobserwowano dla próby 101, przy czym wartość jego malała wraz ze wzrostem rzędu harmonicznej napięcia (rys. 20c).

Najgorsza sytuacja występuje w przypadku lampy sodowej wysokoprężnej (SON), która jest szeroko stosowana w instalacjach oświetlenia ulicznego. W tym przypadku THD przy próbie 106 (30% zawartości 7. harmonicznej, faza początkowa 180°) wynosił około 500%. Taka sytuacja może bardzo negatywnie wpływać na sieć zasilającą, a w szczególności na transformator zasilający.



Rys. 20. Stopień odkształcenia prądu w próbach od „x00” do „x12” dla lampy: a) LED, b) SON, c) SOX

### 3. OCENA WPŁYWU ODKSZTAŁCENIA PRĄDU NA TRANSFORMATOR ZASILAJĄCY

Odkształcony prąd obciążenia o wartości skutecznej zbliżonej do prądu znamionowego transformatora może spowodować znaczne przekroczenie jego temperatury dopuszczalnej długotrwale. Należy więc wyznaczyć

współczynnik redukcji obciążalności transformatora przy przepływie prądu odkształconego [3-8]. Współczynnik ten wyznaczono na podstawie normy [8].

Przy odkształconym przebiegu prądu obciążenia transformator można obciążyć następującą mocą:

$$S_H = \frac{S_n}{K} \quad (1)$$

gdzie:

$S_H$  – moc pozorna, którą można obciążyć transformator przy danym odkształconym przebiegu prądu obciążenia,

$S_n$  – moc znamionowa transformatora,

$K$  – współczynnik redukcji obciążalności transformatora dla danego prądu odkształconego

$$K = \sqrt{1 + \frac{e}{1+e} \times \left(\frac{I_1}{I_\Sigma}\right)^2 \times \left[ \sum_{h=2}^{h=n} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 \times h^q \right]} \quad (2)$$

gdzie:

$e$  – stosunek strat obciążeniowych dodatkowych przy sinusoidalnie zmiennym prądzie obciążenia do całkowitych strat obciążeniowych, które występowałyby przy prądzie stałym (DC) o wartości identycznej, jak wartość skuteczna sinusoidalnie zmiennego prądu obciążenia (z braku danych można przyjąć 0,05-0,1),

$I_1$  – wartość skuteczna 1. harmonicznej prądu obciążenia,

$I_\Sigma$  – wartość skuteczna prądu obciążenia z uwzględnieniem wyższych harmonicznych,

$I_h$  – wartość skuteczna wyższej harmonicznej rzędu  $h$ ,

$h$  – rząd wyższej harmonicznej,

$q$  – wykładnik potęgi, zależny od wykonania uzwojenia i częstotliwości prądu (z braku danych można przyjąć: 1,7 – dla transformatora, którego uzwojenia niskiego i wysokiego napięcia są wykonane z drutu o przekroju okrągłym lub prostokątnym; 1,5 – dla transformatora o uzwojeniach niskiego napięcia z folii).

W tabelicy 2 zestawiono wyniki obliczeń współczynnika  $K$  i dopuszczalnej mocy, zgodnie z wzorem 2, jaką można obciążyć transformator badanymi lampami przy zasilaniu ich napięciem odkształconym jak w próbach 100, 101 i 105. Do obliczeń przyjęto  $e = 0,05$  oraz  $q = 1,7$ .

Z analizy danych zawartych w tabelicy 2 wynika, że największą redukcję obciążalności transformatora należy zastosować w przypadku lamp sodowych wysokoprężnych (SON). Przy przebiegu prądu oznaczonym „Próba 105” z transformatora można czerpać moc co najwyżej na poziomie 2/3 mocy znamionowej. Jeżeli zastosować lampy ledowe (LED), to dla identycznego odkształcenia napięcia zasilającego (Próba 105) wymagana redukcja obciążalności transformatora to tylko 14%.

Tabela 2. Współczynnik  $K$  i największe dopuszczalne obciążenie  $S_H$  transformatora o mocy znamionowej  $S_n = 400$  kVA dla przebiegów prądu zawierających wyższe harmoniczne z prób 100, 101 i 105.

Analizowany parametr	LED			SON			SOX		
	Próba 100	Próba 101	Próba 105	Próba 100	Próba 101	Próba 105	Próba 100	Próba 101	Próba 105
Współczynnik redukcji obciążalności transformatora $K$ [-]	1,004	1,022	1,16	1,011	1,111	1,495	1,004	1,033	1,014
Największe dopuszczalne obciążenie $S_H$ [kVA]	398	391	345	396	360	268	398	387	394
Największe dopuszczalne obciążenie procentowe	99,6	97,8	86,2	98,9	90,0	66,9	99,6	96,8	98,6

#### 4. WNIOSKI KOŃCOWE

Z przeprowadzonych analiz wynika, że najbardziej podatna na odkształcenie napięcia zasilającego jest badana lampa sodowa wysokoprężna. Odkształcenie tego napięcia wielokrotnie przechodził przez zero w czasie 20 ms. Znacznie bardziej odporna okazała się lampa sodowa niskoprężna. Korzystnie wypadła też lampa ledowa.

Jeżeli porównywać lampy wykorzystywane w oświetleniu terenów zewnętrznych, to z badań autorów oraz innych badań [2, 9] wynika, że w przypadku lamp ledowych zawartość wyższych harmonicznnych w ich prądzie obciążenia jest znacznie mniejsza niż w przypadku niektórych dotychczas stosowanych lamp wyładowczych.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

1. Czapp S.: Odkształcenie prądu pobieranego przez urządzenia oświetleniowe i jego wpływ na instalację zasilającą, *Automatyka Elektryka Zakłócenia*, 2011, nr 3, s. 30-45.
2. Czapp S.: Efektywność energetyczna urządzeń oświetleniowych a jakość energii elektrycznej. *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, 2012, nr 31, s. 195-200.
3. Kuśmierk Z.: Współczynnik obciążenia transformatora zasilającego odbiorniki nieliniowe i jego pomiar, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2004, nr 6, s. 636-638.
4. Faiz L., Sharifian M. B. B., Fakheri S. A., Sabet-Marzooghi E.: Derating of Distribution Transformers for Nonsinusoidal Load Currents Using Finite Element Method, *Iranian Journal of Science & Technology, Trans. B*, 2004, vol. 28, s. 315-322.
5. Filtracja i detekcja harmonicznnych, Schneider Electric, Materiały firmowe.
6. Kelley A. W., Edwards S. W., Rhode J. P., Baran M. E.: Transformer Derating for Harmonic Currents: A Wide-Band Measurement Approach for Energized Transformers, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1999, vol. 35, no. 6, s. 1450-1457.
7. Yildirim D., Fuchs E.F.: Measured Transformer Derating and Comparison with Harmonic Loss Factor (FHL) Approach, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2000, vol. 15, no. 1, s. 186-191.
8. PN-EN 50464-3:2010 – wersja polska. Transformatory rozdzielcze trójfazowe, olejowe, 50 Hz o mocy od 50 kVA do 2500 kVA i najwyższym napięciu urządzenia nieprzekraczającym 36 kV – Część 3: Wyznaczanie mocy znamionowej transformatora obciążonego prądami niesinusoidalnymi.
9. Olejniczak Ł.: Analiza jakości energii elektrycznej w instalacji oświetlenia zewnętrznego z diodowymi źródłami światła. Praca dyplomowa magisterska. Politechnika Gdańska, 2012.

### ANALYSIS OF LOAD CURRENT OF STREET LIGHTING LAMPS SUPPLIED BY DISTORTED VOLTAGE

A characteristic feature of most types of lamps is distorted load current. In some cases, the current distortion can be strong, which negatively affects the supply network. Current distortion is increased when the lamps are supplied by distorted voltage. The paper presents the results of the load current testing of selected lamps used in street lighting (high pressure sodium lamp, low pressure sodium lamp and LED lamp). In the first stage of the investigation the supply voltage was sinusoidal, which allowed for evaluation the reference waveform of the load current. Further, the supply voltage was of increasingly distorted.

**Key-words:** electric lighting, harmonics.