

EFEKTYWNOŚĆ ENERGETYCZNA URZĄDZEŃ OŚWIETLENIOWYCH A JAKOŚĆ ENERGII ELEKTRYCZNEJ

Stanisław CZAPP¹

1. Miejsce pracy: Politechnika Gdańska, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk
tel.: (58) 347 13 98 fax: (58) 347 18 98 e-mail: s.czapp@ely.pg.gda.pl

Streszczenie: Energooszczędne urządzenia oświetleniowe od wielu lat są stosowane m.in. w gospodarstwach domowych, obiektach użyteczności publicznej, obiektach przemysłowych i oświetleniu ulicznym, a obowiązująca od 2011 r. Ustawa o efektywności energetycznej z pewnością ich stosowanie zintensyfikuje. Urządzenia te pobierają prąd odkształcony, a w niektórych przypadkach – silnie odkształcony. Powoduje to różnorodne problemy instalacyjne. W pracy przeprowadzono analizę odkształcenia prądu pobieranego przez wybrane lampy i oceniono je z punktu widzenia wymagań odnośnie do jakości energii elektrycznej.

Słowa kluczowe: oświetlenie elektryczne, efektywność energetyczna, jakość energii elektrycznej

1. WSTĘP

Wprowadzanie urządzeń elektrycznych o wysokiej efektywności energetycznej przyczynia się do zmniejszenia zapotrzebowania na energię pierwotną, co pozwala oszczędzać jej zasoby globalne oraz ograniczyć emisję szkodliwych zanieczyszczeń. Dla użytkownika takich urządzeń ważne jest to, że przyczyniają się one do zmniejszania kosztów eksploatacyjnych.

Zwiększanie efektywności wykorzystania energii jest jednym z celów Unii Europejskiej. W zakresie oświetlenia elektrycznego bardzo istotne jest Rozporządzenie Komisji (WE) nr 244/2009 [1], które zainicjowało proces wycofywania żarówek z produkcji i z handlu. Rozporządzenia Komisji (WE) nr 245/2009 [2] i nr 347/2010 [3] służą dalszej poprawie efektywności energetycznej lamp wyładowczych oraz ich stateczników i opraw oświetleniowych. Pojawiły się programy [4, 5] i inicjatywy [6, 7] zachęcające inwestorów prywatnych i sektor publiczny do wdrażania energooszczędnych instalacji oświetleniowych.

Dla gospodarki krajowej kluczowym aktem prawnym dotyczącym efektywności energetycznej jest ustawa [8]. Wyznacza ona krajowe cele w zakresie oszczędnego gospodarowania energią. Do 2016 r. oszczędności energii finalnej mają wynosić nie mniej niż 9% średniego krajowego jej rocznego zużycia (uśrednienie obejmuje lata 2001÷2005). Aby ten wskaźnik uzyskać, należy przeprowadzić modernizację m.in. oświetlenia. Pojawiać się będzie coraz więcej inwestycji z energooszczędnymi źródłami światła, w szczególności diodami LED, ale również wysokosprawnymi świetłówkami i innymi lampami wyładowczymi.

W tablicy 1 przedstawiono skuteczność świetlną i trwałość elektrycznych źródeł światła. Z punktu widzenia efektywności energetycznej najistotniejsza jest skuteczność świetlna. Zwraca uwagę wysoka już osiągnięta skuteczność świetlna lamp diodowych, co sprzyja ich ekspansji.

Tablica 1. Orientacyjna skuteczność świetlna i trwałość źródeł światła [9-11]

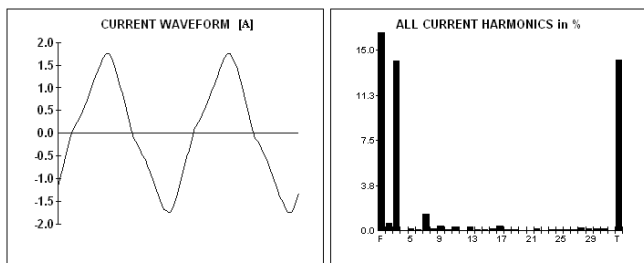
Źródła światła	Skuteczność świetlna [lm/W]	Trwałość [h]
żarówki zwykłe	8÷20	1000÷1500
żarówki halogenowe	12÷26	2000÷3500
świetłówki liniowe	40÷100	6000÷16 000
świetłówki kompaktowe	40÷80	6000÷8000
lampy rtęciowe wysokoprężne	35÷60	5000÷10 000
lampy rtęciowo-żarowe	17÷31	1000÷3000
lampy metalohalogenkowe	60÷100	2000÷15 000
lampy sodowe wysokoprężne	40÷150	4000÷18 000
lampy sodowe niskoprężne	100÷200	5000÷8000
lampy indukcyjne	65÷72	60 000
lampy diodowe (LED)	10÷110	20 000÷60 000

Energooszczędne źródła światła mogą jednak powodować problemy instalacyjne. Jak wynika z wcześniejszych badań [12], niektóre korzystne z punktu widzenia walorów oświetleniowych źródła światła, charakteryzują się silnym odkształceniem prądu, co może mieć negatywny wpływ na instalację zasilającą.

W kolejnych punktach przedstawiono przebiegi prądu obciążenia wybranych lamp, przeprowadzono analizę widmową tych przebiegów oraz oceniono je z punktu widzenia wymagań odnośnie do jakości energii elektrycznej.

2. BADANIE ODKSZTAŁCENIA PRĄDU POBIERANEGO PRZEZ WYBRANE LAMPY

Na rysunku 1 przedstawiono analizę prądu pobieranego świetłówkę kompaktową z indukcyjnym układem stabilizacyjno-zapłonowym. Ma ona dławik jako statecznik, ale nie ma kondensatora. Wpływa to na współczynnik mocy, który wynosi zaledwie 0,53. Dzięki rezygnacji z kondensatora pobierany prąd jest mało odkształcony. Oprócz składowej podstawowej w jego przebiegu dominuje 3. harmoniczna, a stopień odkształcenia wynosi $THD_3 = 14,2\%$.



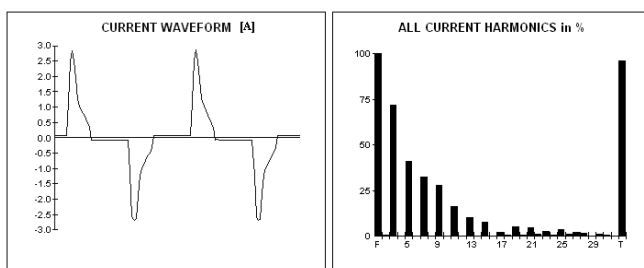
Przebieg prądu w czasie 40 ms

Widmo amplitudowe prądu

Harmoniczne nieparzyste				Harmoniczne parzyste			
H	%	RMS	Angle	H	%	RMS	Angle
1	100.0	1.09	+0	2	0.6	0.01	-160
3	14.1	0.15	+43	4	0	0	0
5	0.2	0.00	-129	6	0	0	0
7	1.4	0.02	-171	8	0.2	0.00	+9
9	0.4	0.00	+130	10	0	0	0
11	0.3	0.00	+1	12	0	0	0
13	0.3	0.00	-85	14	0.1	0.00	+139
15	0.1	0.00	-142	16	0.2	0.00	+49
17	0.4	0.00	+75	18	0	0	0
19	0.1	0.00	+40	20	0	0	0
21	0	0	0	22	0.2	0.00	-53
23	0	0	0	24	0	0	0
25	0.1	0.00	+75	26	0	0	0
27	0.1	0.00	+25	28	0.2	0.00	+116
29	0.1	0.00	-110	30	0.2	0.00	-126
31	0.2	0.00	+174	Even	0.8	0.01	
Tripln	14.1	0.15					
Odd	14.2	0.15					
THD	14.2	0.15					

Rys. 1. Analiza prądu pobieranego przez świetlówkę kompaktową ze statecznikiem indukcyjnym (ze względu na zastosowaną przekładnię przetwornika pomiarowego wartości prądu należy podzielić przez 10)

Nowocześniejsza świetlówka kompaktowa ze statecznikiem elektronicznym charakteryzuje się znacznym odkształceniem pobieranego prądu (rys. 2, $THD_i = 96,3\%$) oraz niekorzystnym współczynnikiem szczytu, równym 2,84.



Przebieg prądu w czasie 40 ms

Widmo amplitudowe prądu

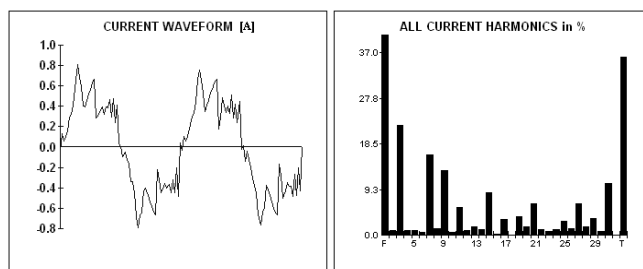
Harmoniczne nieparzyste				Harmoniczne parzyste			
H	%	RMS	Angle	H	%	RMS	Angle
1	100.0	0.70	+0	2	0.5	0.00	-112
3	72.0	0.50	-121	4	0.4	0.00	+80
5	41.2	0.29	+140	6	0.2	0.00	-39
7	32.7	0.23	+59	8	0	0	0
9	28.2	0.20	-41	10	0.3	0.00	+140
11	16.2	0.11	-140	12	0.2	0.00	+70
13	10.3	0.07	+146	14	0.2	0.00	+170
15	7.8	0.05	+54	16	0.2	0.00	+30
17	2.3	0.02	+3	18	0.5	0.00	-115
19	5.3	0.04	-45	20	0.8	0.01	+120
21	4.5	0.03	-155	22	0.9	0.01	+24
23	2.7	0.02	+146	24	0.7	0.00	-62
25	3.7	0.03	+52	26	1.1	0.01	-176
27	2.3	0.02	-74	28	1.7	0.01	+86
29	0.4	0.00	-30	30	1.5	0.01	-21
31	0.9	0.01	+157	Even	3.0	0.02	
Tripln	77.9	0.55					
Odd	96.2	0.67					
THD	96.3	0.67					

Rys. 2. Analiza prądu pobieranego przez świetlówkę kompaktową ze statecznikiem elektronicznym (ze względu na zastosowaną przekładnię przetwornika pomiarowego wartości prądu należy podzielić przez 10)

Z punktu widzenia walorów oświetleniowych oraz trwałości świetlówka ta jest rozwiązaniem lepszym od wspomnianej wyżej świetlówki ze statecznikiem indukcyjnym, ale może stwarzać kłopotliwe problemy instalacyjne.

Badana lampa sodowa wysokoprężna, stosowana głównie do oświetlenia zewnętrznego, w układzie z

ławikiem i kondensatorem (rys. 3) również pobiera prąd silnie odkształcony. Stopień odkształcenia wynosi $THD_i = 36,1\%$, a dominującymi harmonicznymi są 3., 7. i 9.



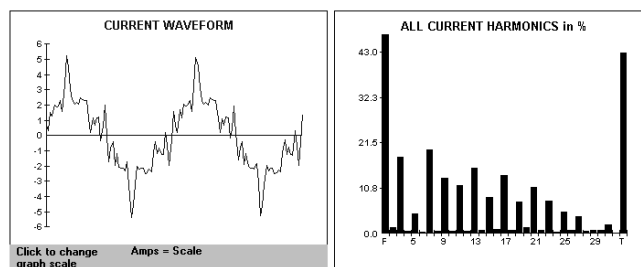
Przebieg prądu w czasie 40 ms

Widmo amplitudowe prądu

Harmoniczne nieparzyste				Harmoniczne parzyste			
H	%	RMS	Angle	H	%	RMS	Angle
1	100.0	0.40	+0	2	0.9	0.00	+120
3	22.2	0.09	-50	4	0.9	0.00	+121
5	1.0	0.00	-75	6	0.6	0.00	-170
7	16.3	0.07	+110	8	1.4	0.01	+19
9	13.1	0.05	-3	10	0.6	0.00	+91
11	5.8	0.02	+154	12	1.1	0.00	-116
13	1.8	0.01	+76	14	1.3	0.01	+56
15	8.7	0.04	+66	16	0.2	0.00	-127
17	3.3	0.01	-159	18	0.1	0.00	-105
19	3.7	0.02	-13	20	1.7	0.01	+119
21	6.5	0.03	+159	22	1.2	0.00	-130
23	0.9	0.00	+148	24	1.3	0.01	-108
25	2.9	0.01	+117	26	1.4	0.01	-146
27	6.4	0.03	-146	28	1.7	0.01	-109
29	3.5	0.01	-144	30	0.8	0.00	-98
31	10.6	0.04	-109	Even	4.3	0.02	
Tripln	28.8	0.12					
Odd	35.9	0.14					
THD	36.1	0.15					

Rys. 3. Analiza prądu pobieranego przez lampę sodową wysokoprężną

Również lampa metalohalogenkowa (rys. 4) pobiera prąd silnie odkształcony, o współczynniku szczytu równym 2,79 i stopniu odkształcenia $THD_i = 42,9\%$.



Przebieg prądu w czasie 40 ms

Widmo amplitudowe prądu

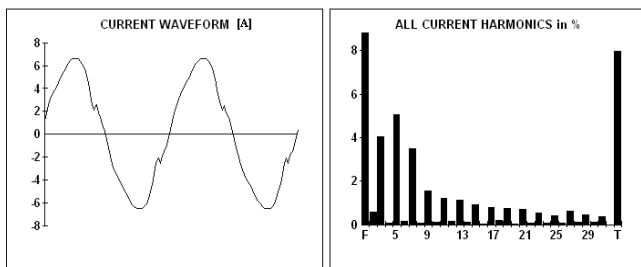
CURRENT ODD HARMONICS				CURRENT EVEN HARMONICS			
H	%	RMS	Angle	H	%	RMS	Angle
1	100.0	1.99	+0	2	1.4	0.03	-118
3	18.0	0.36	-89	4	0.4	0.01	+165
5	4.7	0.09	+117	6	0.3	0.01	-77
7	19.9	0.40	+35	8	0.5	0.01	-99
9	13.1	0.26	-115	10	0.4	0.01	+17
11	11.5	0.23	+115	12	0.5	0.01	-132
13	15.6	0.31	+72	14	0.7	0.01	+132
15	8.7	0.17	-164	16	0.9	0.02	+56
17	13.8	0.28	+177	18	0.7	0.01	+30
19	7.5	0.15	+161	20	1.4	0.03	+58
21	10.9	0.22	-116	22	0.7	0.01	-3
23	7.6	0.15	-88	24	0.3	0.01	+129
25	5.1	0.10	+138	26	0.8	0.02	-73
27	4.1	0.08	+127	28	0.5	0.01	-127
29	0.8	0.02	+117	30	0.7	0.01	+6
31	2.1	0.04	+70	Even	2.9	0.06	
Tripln	26.6	0.53					
Odd	42.8	0.85					
THD	42.9	0.86					

harm. nieparzyste

harm. parzyste

Rys. 4. Analiza prądu pobieranego przez lampę metalohalogenkową

Niedużym odkształceniem prądu charakteryzuje się lampa sodowa niskoprężna (rys. 5). Stopień odkształcenia wynosi $THD_i = 8\%$, a współczynnik szczytu – 1,46 i niewiele przekracza wartość charakteryzującą przebieg sinusoidalny.



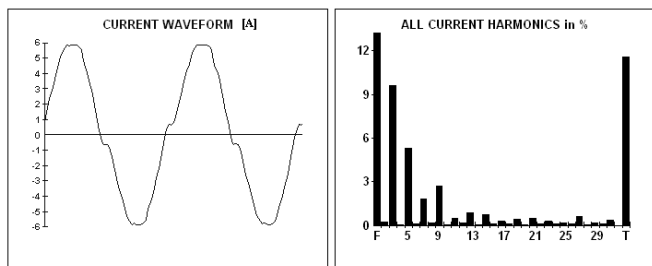
Przebieg prądu w czasie 40 ms

Widmo amplitudowe prądu

Harmoniczne nieparzyste				Harmoniczne parzyste			
H	%	RMS	Angle	H	%	RMS	Angle
1	100.0	4.45	+0	2	0.6	0.03	-104
3	4.1	0.18	+162	4	0	0	
5	5.1	0.23	-32	6	0.1	0.01	-6
7	3.5	0.15	+20	8	0	0	
9	1.5	0.07	+127	10	0.1	0.00	+133
11	1.2	0.05	-145	12	0.1	0.01	+148
13	1.1	0.05	-67	14	0	0	
15	0.9	0.04	+15	16	0	0	
17	0.8	0.04	+99	18	0.2	0.01	+148
19	0.8	0.03	+176	20	0	0	
21	0.7	0.03	-117	22	0	0	
23	0.5	0.02	-39	24	0	0	
25	0.4	0.02	+21	26	0	0	
27	0.6	0.03	+67	28	0.1	0.01	-64
29	0.4	0.02	+185	30	0.1	0.00	-33
31	0.4	0.02	-137	Even	0.7	0.03	
Tripln	4.5	0.20					
Odd	7.9	0.35					
THD	8.0	0.35					

Rys. 5. Analiza prądu pobieranego przez lampę sodową niskoprężną (ze względu na zastosowaną przekładnię przetwornika pomiarowego wartości prądu należy podzielić przez 10)

Lampa indukcyjna ma zasilacz wytwarzający prąd o częstotliwości rzędu megaherców. Prąd pobierany z sieci jest tylko nieznacznie odkształcony ($THD_i = 11,6\%$).



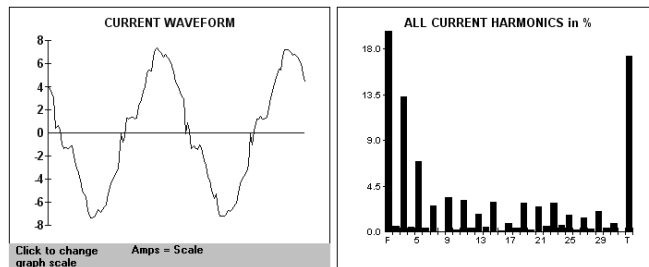
Przebieg prądu w czasie 40 ms

Widmo amplitudowe prądu

Harmoniczne nieparzyste				Harmoniczne parzyste			
H	%	RMS	Angle	H	%	RMS	Angle
1	100.0	4.00	+0	2	0.2	0.01	+145
3	9.6	0.38	-173	4	0	0	
5	5.3	0.21	-140	6	0	0	
7	1.8	0.07	-136	8	0.1	0.01	+94
9	2.7	0.11	-77	10	0	0	
11	0.5	0.02	-96	12	0.1	0.01	+12
13	0.9	0.03	-76	14	0	0	
15	0.8	0.03	+3	16	0	0	
17	0.3	0.01	-152	18	0.1	0.00	-154
19	0.4	0.02	-33	20	0	0	
21	0.5	0.02	+149	22	0	0	
23	0.3	0.01	-140	24	0.1	0.00	+175
25	0.2	0.01	-74	26	0	0	
27	0.6	0.03	-128	28	0	0	
29	0.2	0.01	+74	30	0.1	0.00	-91
31	0.3	0.01	-142	Even	0.4	0.02	
Tripln	10.1	0.40					
Odd	11.6	0.46					
THD	11.6	0.46					

Rys. 6. Analiza prądu pobieranego przez lampę indukcyjną (ze względu na zastosowaną przekładnię przetwornika pomiarowego wartości prądu należy podzielić przez 10)

Lampa diodowa [13] do oświetlenia drogowego charakteryzuje się mniejszym odkształceniem prądu (rys. 7) niż porównywalna lampa sodowa wysokoprężna (rys. 3) bądź metalohalogenkowa (rys. 4). Stopień odkształcenia prądu $THD_i = 17,3\%$ jest zbliżony do wartości zmierzonych w obwodach świetlówki kompaktowej ze statecznikiem indukcyjnym (rys. 1) i lampy indukcyjnej (rys. 6).



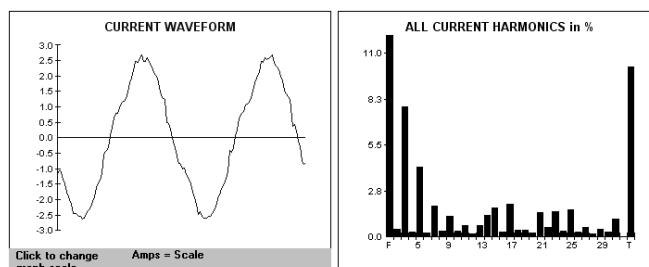
Przebieg prądu w czasie 40 ms

Widmo amplitudowe prądu

CURRENT ODD HARMONICS				CURRENT EVEN HARMONICS			
H	%	RMS	Angle	H	%	RMS	Angle
1	100.0	4.61	+0	2	0.6	0.03	-152
3	13.3	0.61	+69	4	0.5	0.02	-30
5	6.9	0.32	-62	6	0.4	0.02	-160
7	2.6	0.12	-149	8	0	0	
9	3.4	0.16	+130	10	0.2	0.01	-35
11	3.1	0.14	-130	12	0.4	0.02	-177
13	1.8	0.08	-156	14	0.5	0.02	+30
15	2.9	0.13	+140	16	0	0	
17	0.9	0.04	+143	18	0.4	0.02	-14
19	2.8	0.13	+71	20	0.2	0.01	-106
21	2.5	0.12	-29	22	0.6	0.03	-161
23	2.9	0.13	-40	24	0.7	0.03	+110
25	1.6	0.07	-105	26	0.2	0.01	+10
27	1.4	0.06	-127	28	0.3	0.01	+17
29	2.0	0.09	+173	30	0.4	0.02	-86
31	0.8	0.04	+157	Even	1.6	0.07	
Tripln	14.3	0.66					
Odd	17.2	0.79					
THD	17.3	0.80					

Rys. 7. Analiza prądu pobieranego przez lampę uliczną TECEO [13] z diodami LED (ze względu na zastosowaną przekładnię przetwornika pomiarowego wartości prądu należy podzielić przez 10)

Jeszcze mniejsze odkształcenie prądu odnotowano w przypadku grupy kilku lamp diodowych [14] oświetlających jedną z gdańskich ulic. Tu stopień odkształcenia prądu THD_i wynosi 10,2% (rys. 8).



Przebieg prądu w czasie 40 ms

Widmo amplitudowe prądu

CURRENT ODD HARMONICS				CURRENT EVEN HARMONICS			
H	%	RMS	Angle	H	%	RMS	Angle
1	100.0	1.74	+0	2	0.5	0.01	+173
3	7.8	0.14	+173	4	0.3	0.00	+57
5	4.2	0.07	+155	6	0.2	0.00	-25
7	1.9	0.03	+139	8	0.4	0.01	+169
9	1.2	0.02	+58	10	0.4	0.01	+41
11	0.7	0.01	-179	12	0.2	0.00	+119
13	0.7	0.01	-114	14	1.3	0.02	+137
15	1.7	0.03	-8	16	0.3	0.01	+12
17	1.9	0.03	+67	18	0.4	0.01	+154
19	0.4	0.01	-152	20	0.3	0.00	+112
21	1.5	0.03	-97	22	0.6	0.01	-27
23	1.5	0.03	+36	24	0.3	0.01	+63
25	1.6	0.03	+45	26	0.3	0.01	+93
27	0.6	0.01	+119	28	0.2	0.00	-85
29	0.5	0.01	-105	30	0.3	0.01	+3
31	1.1	0.02	+21	Even	1.8	0.03	
Tripln	8.3	0.14					
Odd	10.0	0.17					
THD	10.2	0.18					

Rys. 8. Analiza prądu pobieranego przez grupę lamp ulicznych HELIOS [14] z diodami LED

3. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ LAMP

Przedstawione wyżej przebiegi prądu pobieranego przez lampy oraz jego widma amplitudowe są rozbieżne. W tabelicy 2 uszeregowano źródła światła według malejącego stopnia odkształcenia prądu THD_i .

Tablica 2. Stopień odkształcenia prądu THD_i badanych lamp

Rodzaj lampy	THD _i [%]
światłówka kompaktowa ze statecznikiem elektronicznym	96,3
lampa metalohalogenkowa	42,9
lampa sodowa wysokoprężna	36,1
grupa lamp diodowych (LED2)	17,3
światłówka kompaktowa ze statecznikiem indukcyjnym	14,2
lampa indukcyjna	11,6
lampa diodowa (LED1)	10,2
lampa sodowa niskoprężna	8,0

Największym stopniem odkształcenia prądu (THD_i = 96,3%) charakteryzuje się światłówka kompaktowa ze statecznikiem elektronicznym. Najmniejszy stopień odkształcenia wykazuje prąd pobierany przez lampę sodową niskoprężną (THD_i = 8%).

Zawartość harmonicznych w poszczególnych przebiegach prądu oceniono według normy PN-EN 61000-3-2:2007 [15], której wymagania dla urządzeń oświetleniowych przedstawiono w tablicy 3. Na rysunku 9 zestawiono widma amplitudowe prądu pobieranego przez badane lampy dla harmonicznych nieparzystych od 3. do 31. oraz dla 2. harmonicznej. Dla każdej z wymienionych harmonicznych zaznaczono (linia pozioma przerywana) wartość dopuszczalną określoną w normie [15].

Żadna z badanych lamp nie przekracza poziomu dopuszczalnego 2. harmonicznej. W przypadku 3. i 5. harmonicznej poziom dopuszczalny przekracza tylko światłówka kompaktowa ze statecznikiem elektronicznym. Należy podkreślić, że przekroczenie to jest znaczne – ponad dwukrotne. Duże przekroczenie poziomu dopuszczalnego 7.

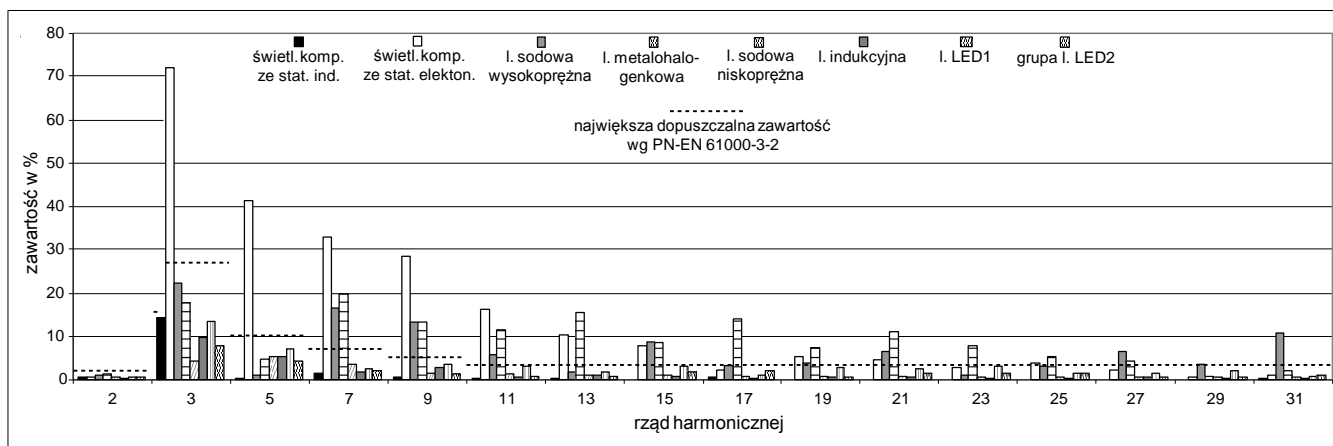
i 9. harmonicznej odnotowano dla światłówki kompaktowej ze statecznikiem elektronicznym, lampy sodowej wysokoprężnej i lampy metalohalogenkowej. Te lampy przekraczają poziomy dopuszczalny większości innych analizowanych harmonicznych. Pozostałe lampy nie przekraczają dopuszczalnego poziomu harmonicznych w całym badanym zakresie.

Tablica 3. Największe dopuszczalne poziomy wyższych harmonicznych dla sprzętu klasy C (oświetleniowego) [15]

Rząd harmonicznej h	Największy dopuszczalny prąd harmonicznej wyrażony w procentach harmonicznej podstawowej prądu
2	2
3	$30\lambda^*$
5	10
7	7
9	5
$11 \leq h \leq 39$ (tylko harmoniczne nieparzyste)	3

* λ – współczynnik mocy obwodu

Wynika z tego, że niektóre badane, powszechnie stosowane energooszczędne źródła światła, charakteryzują się znacznym odkształceniem pobieranego prądu i – co gorsza – przekraczają poziomy dopuszczalny wyższych harmonicznych określone w normie [15]. Korzystnymi wskaźnikami charakteryzują się lampy diodowe, które dynamicznie się rozwijają i będą coraz szerzej stosowane. Mogą konkurować w oświetleniu ulicznym jako zamiennik lamp sodowych wysokoprężnych [16], a ponadto nadają się do zasilania hybrydowego [17].



Rys. 9. Udział 2. harmonicznej i harmonicznych nieparzystych od 3. do 31. w analizowanych przebiegach prądu obciążenia oraz największe wartości wyższych harmonicznych dopuszczone przez normę [15]

4. WPLYW ODKSZTAŁCENIA PRĄDU POBIERANEGO PRZEZ LAMPY NA OBCIĄŻALNOŚĆ TRANSFORMATORA ZASILAJĄCEGO

Przy odkształconym prądzie obciążenia o wartości skutecznej zbliżonej do prądu znamionowego transformatora może dojść do znacznego przekroczenia jego temperatury dopuszczalnej długotrwale. Istnieje kilka metod [18-25] pozwalających na określenie współczynnika redukcji obciążalności transformatora. Niestety, zredukowana obciążalność transformatora wyznaczona tymi metodami jest niejednakowa.

Różnice mogą być znaczne. Poniżej przedstawiono sposób wyznaczania wartości współczynnika redukcji obciążalności transformatora podany w normie PN-EN 50464-3:2010 [24] przy założeniu, że jego całkowitym obciążeniem jest jednorodna grupa określonych lamp.

Przy odkształconym przebiegu prądu obciążenia transformator można obciążyć następującą mocą:

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

gdzie:

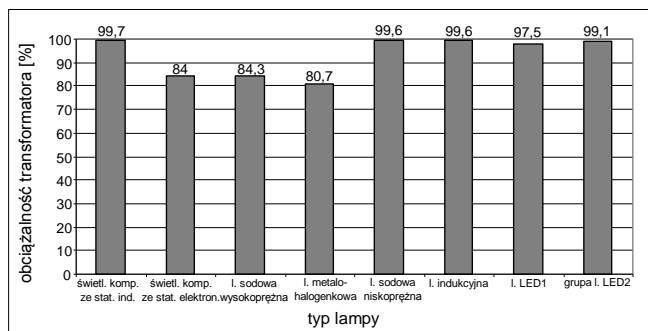
S_H – moc pozorna, którą można obciążyć transformator przy danym odkształconym przebiegu prądu obciążenia,
 S_n – moc znamionowa transformatora,
 K – współczynnik redukcji obciążalności transformatora dla danego przebiegu odkształconego.
Współczynnik K wyznacza się z zależności:

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

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 $0,05 \div 0,1$),
 I_1 – wartość skuteczna 1. harmonicznej prądu obciążenia,
 I_Σ – 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).

Biorąc pod uwagę przebiegi prądu pobieranego przez lampy przedstawione na rysunkach od 1 do 8, obliczono współczynnik K i określono, do jakiego poziomu można obciążyć transformator przy każdym ze wspomnianych przebiegów. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 10.



Rys. 10. Obciążalność transformatora w procentach mocy znamionowej przy przebiegach prądu obciążenia badanych lamp (przyjęto $e = 0,05$ oraz $q = 1,7$)

Niewielki wpływ na redukcję obciążalności transformatora ma odkształcenie prądu świetlówek kompaktowych ze statecznikiem indukcyjnym, lamp sodowych niskoprężnych, lamp indukcyjnych i lamp diodowych. Największa redukcja obciążalności byłaby wymagana w przypadku lamp metalohalogenkowych.

Jeżeli transformator o mocy znamionowej 400 kVA byłby obciążony tylko prądem pobieranym przez lampy metalohalogenkowe, to można by z niego długotrwale czerpać moc nie większą niż $0,807 \times 400 = 323$ kVA. W przypadku lamp LED1 byłaby to moc $0,975 \times 400 = 390$ kVA.

5. WNIOSKI

Przeprowadzona analiza prądu wykazała, że jego odkształcenie w przypadku niektórych lamp jest znaczne. Może to niekorzystnie wpływać na obciążalność transformatora zasilającego, powodować przepływ dużego prądu w przewodzie neutralnym oraz wymagać przestrzegania szczególnych zasad doboru aparatury łączeniowej i zabezpieczającej. Stosunkowo niewielkim odkształceniem prądu charakteryzują się badane lampy diodowe. To bardzo korzystne zważywszy, że nadają się one do różnorodnych zastosowań [26] i są coraz szerzej stosowane.

BIBLIOGRAFIA

1. 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.
2. Rozporządzenie Komisji (WE) nr 245/2009 z dnia 18 marca 2009 r. w sprawie wykonania dyrektywy 2005/32/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w odniesieniu do wymogów dotyczących ekoprojektu dla lamp fluorescencyjnych bez wbudowanego statecznika, dla lamp wyładowczych dużej intensywności, a także dla stateczników i opraw oświetleniowych służących do zasilania takich lamp, oraz uchylające dyrektywę 2000/55/WE Parlamentu Europejskiego i Rady.
3. Rozporządzenie Komisji (UE) nr 347/2010 z dnia 21 kwietnia 2010 r. zmieniające rozporządzenie Komisji (WE) nr 245/2009 w odniesieniu do wymogów dotyczących ekoprojektu dla lamp fluorescencyjnych bez wbudowanego statecznika, lamp wyładowczych dużej intensywności oraz stateczników i opraw oświetleniowych służących do zasilania takich lamp.
4. The European GreenLight Programme 2000-2008. Evaluation and Outlook. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy, Luxembourg 2010.
5. The European GreenLight Programme Efficient Lighting Project Implementation Catalogue 2005-2009. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy, Luxembourg 2011.
6. European Compact Fluorescent Lamps Quality Charter. European Commission, April 2009.
7. European LED Quality Charter. European Commission, February 2011.
8. Ustawa z dnia 15.04.2011 r. o efektywności energetycznej (Dz. U. z 2012, Nr 94, Poz. 551).
9. Musiał E.: Przegląd elektrycznych źródeł światła. Główne właściwości i tendencje rozwojowe. INPE: Informacje o Normach i Przepisach Elektrycznych, Miesięcznik SEP, 2006, nr 79, s. 3-66.
10. Nowy rekord skuteczności świetlnej LED <http://www.elektroonline.pl> (lipiec 2012).
11. Pieniżek S.: Unijna strategia zwiększania efektywności energetycznej – proekologiczne konstrukcje opraw drogowych do lamp wysokoprężnych. ELGO Lighting Industries SA, Efektywność energetyczna w oświetleniu, 02.2012.
12. Czapp S.: Odkształcenie prądu pobieranego przez urządzenia oświetleniowe i jego wpływ na instalację zasilającą. Automatyka Elektryka Zakłócenia, e-pismo naukowo-techniczne dla praktyków, 2011, nr 3, s. 30-45.
13. Karta katalogowa lampy LED TECEO, Schröder Polska Sp. z o.o.

14. Karta katalogowa lampy LED HELIOS, Siled Sp. z o.o.
15. PN-EN 61000-3-2:2007 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 3-2: Poziomy dopuszczalne – Poziomy dopuszczalne emisji harmonicznym prądu (fazowy prąd zasilający odbiornika ≤ 16 A).
16. Pabjańczyk W., Gabryjelski Z., Markiewicz P., Sikora R.: Analiza porównawcza zamiany opraw sodowych na oprawy LED w oświetleniu drogowym. *Wiadomości Elektrotechniczne*, 2012, nr 1, s. 29-31.
17. Pabjańczyk W., Markiewicz P.: Zasilanie oświetlenia zewnętrznego: zastosowanie systemów hybrydowych. *Energia Elektryczna*, czerwiec 2011.
18. Desmet J., Lemcko L.: Harmoniczne. Dopuszczalna obciążalność i dobór transformatorów do pracy z prądem odkształconym. Leonardo Power Quality Initiative. Jakość zasilania – poradnik, cz. 3.5.2, listopad 2005.
19. Faiz J., 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, Transaction B*, 2004, vol. 28, no. B3, s. 315-322.
20. Filtracja i detekcja harmonicznym, Schneider Electric, Materiały firmowe.
21. 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.
22. Kuśmierk Z.: Współczynnik obciążenia transformatora zasilającego odbiorniki nieliniowe i jego pomiar. *Przebieg Elektrotechniczny*, 2004, nr 6, s. 636-638.
23. Pierce L. W.: Transformer Design and Application Considerations for Nonsinusoidal Load Currents. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1996, vol. 32, no. 3, s. 633-645.
24. PN-EN 50464-3:2010 Trójfazowe olejowe transformatory rozdzielcze 50 Hz od 50 kVA do 2500 kVA o najwyższym napięciu urządzenia nieprzekraczającym 36 kV – Część 3: Wyznaczanie mocy znamionowej transformatora obciążonego prądem niesinusoidalnym.
25. Yildirim D., Fuchs E. F.: Measured Transformer Derating and Comparison with Harmonic Loss Factor (F_{HL}) Approach. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2000, vol. 15, no. 1, s. 186-191
26. Valentová M., Quicheron M., Bertoldi P.: LED Projects and Economic Test Cases in Europe. Work done in the context of the European Commission study "Preparing for the wide deployment of Solid State Lighting (SSL) in Europe" (SMART 2011/0069), December 2011.

ENERGY EFFICIENCY OF LIGHTING DEVICES VERSUS POWER QUALITY

Keywords: electrical lighting, energy efficiency, power quality

Energy efficient lighting is increasingly placed in residential, public and industrial indoors as well as in outdoor lighting. This process is assisted by Energy Efficiency Plan 2011 prepared by Euro Parliament. The load current of high efficient lamps usually is distorted and sometimes the distortion is remarkably high. This phenomenon can cause serious problems in the supply installation. This paper presents an analysis of current distortion in lamps circuits and evaluation of this distortion in terms of power quality standards.