

ODKSZTAŁCENIE PRĄDU POBIERANEGO PRZEZ URZĄDZENIA OŚWIETLIENIOWE I JEGO WPŁYW NA INSTALACJĘ ZASILAJĄCĄ

dr inż. Stanisław Czapp / Politechnika Gdańska

1. BUDOWA LAMP WYŁADOWCZYCH I JEJ WPŁYW NA PRZEBIEG POBIERANEGO PRĄDU

1.1. Źródła światła i układy stabilizacyjno-zapłonowe

Do najbardziej popularnych i obecnie powszechnie stosowanych wyładowczych źródeł światła można zaliczyć:

- lampy rtęciowe niskoprężne (światłówki liniowe, światłówki kompaktowe)
- lampy rtęciowe wysokoprężne
- lampy metalohalogenkowe
- lampy sodowe wysokoprężne
- lampy sodowe niskoprężne
- lampy indukcyjne.

Cechą charakterystyczną lamp wyładowczych jest to, że do prawidłowego działania układu oprócz źródła światła konieczne jest stosowanie układu stabilizacyjno-zapłonowego. Układ ten ma za zadanie umożliwić zapłon lampy oraz stabilizować prąd wyładowania pomiędzy jej elektrodami. W zależności od typu lampy, do zapłonu konieczne jest napięcie od kilkuset woltów do kilku kilowoltów, a w układach umożliwiających zapłon gorącej lampy wysokoprężnej po krótkotrwałym zaniku napięcia (oświetlenie stadionu) wartość napięcia sięga kilkudziesięciu kilowoltów.

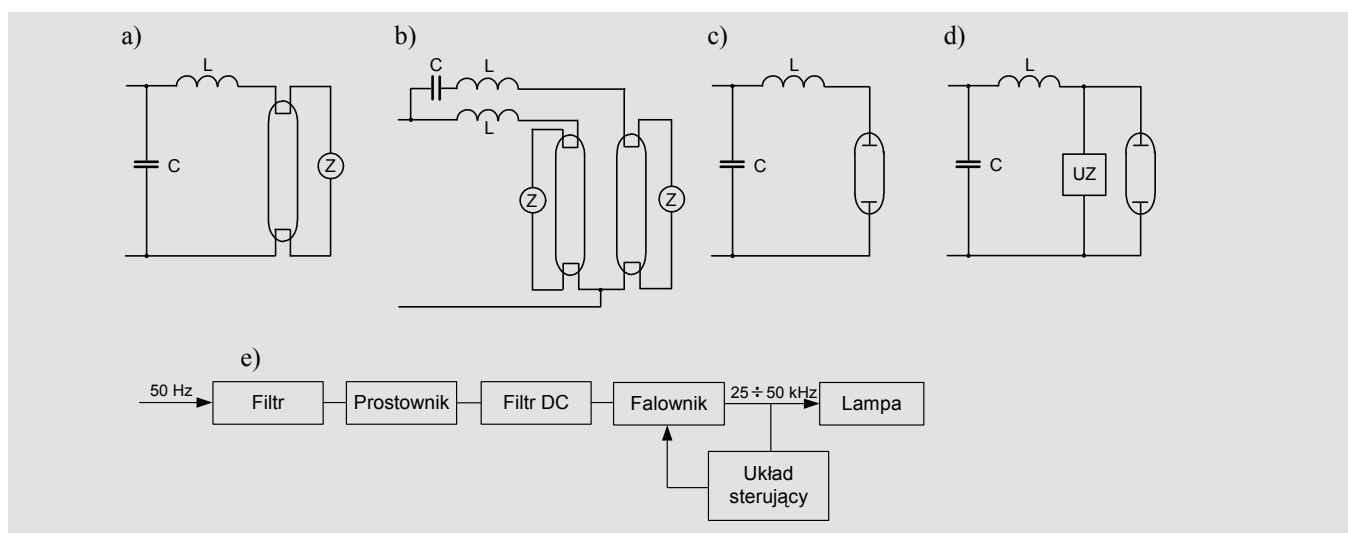
Wyładowanie w lampie charakteryzuje się opadającą charakterystyką napięciowo-prądową. Aby lampa nie uległa zniszczeniu, należy zastosować statecznik ograniczający prąd, który ustala punkt pracy układu. W rozwiązaniach konwencjonalnych stosuje się statecznik indukcyjny lub pojemnościowy. W większości lamp stosuje się dławik nieliniowy, który powoduje, że współczynnik mocy układu spada do poziomu 0,5. Poprawę współczynnika mocy uzyskuje się za pomocą indywidualnej kompensacji mocy biernej, instalując w oprawie kondensator. Wyładowanie w jarzniku można odwzorować nieliniową rezystancją. Biorąc pod uwagę również nieliniowość dławika oraz obecność kondensatora, pobierany przez lampę prąd jest odkształcony. Odkształcenie prądu może być znaczne również w elektronicznych układach stabilizacyjno-zapłonowych.

Na rysunku 1 przedstawiono przykładowe układy połączeń lamp wyładowczych. W układach z rysunków od 1a do 1d jarznik jest zasilany napięciem o częstotliwości 50 Hz, a w skład osprzętu wchodzi dławik, układ zapłonowy i kondensator kompensacyjny. Rysunek 1e przedstawia schemat blokowy zasilania światłówki ze statecznikiem elektronicznym. W tym przypadku jarznik jest zasilany napięciem o wysokiej częstotliwości, rzędu 25 ÷ 50 kHz. Układ lampy ze statecznikiem elektronicznym jest skomplikowany [19], ale przy zasilaniu napięciem o podwyższonej częstotliwości wzrasta skuteczność świetlna lampy [23, 25, 31] oraz możliwa jest płynna regulacja strumienia świetlnego.

Streszczenie

Większość powszechnie stosowanych energooszczędnych urządzeń oświetleniowych pobiera prąd odkształcony. W niektórych przypadkach odkształcenie prądu jest znaczne i może mieć istotny wpływ na dobór zabezpieczeń, przekroju przewodów i transformatora zasilającego. W artykule przedstawiono analizę widmową prądu pobieranego przez lampy wyładowcze oraz zasady doboru zabezpieczeń i przekroju przewodów w instalacjach oświetleniowych. Zwrócono także uwagę na konieczność redukcji mocy, którą można długotrwale pobierać z transformatora przy odkształconym przebiegu prądu.

Konstrukcja lampy i zastosowany osprzęt wpływa na kształt przebiegu pobieranego prądu [6, 8, 9, 13, 30, 33]. Lampy o zbliżonych parametrach użytkowych, jak strumień świetlny, barwa światła czy oddawanie barw, mogą znacznie różnić się kształtem pobieranego prądu.



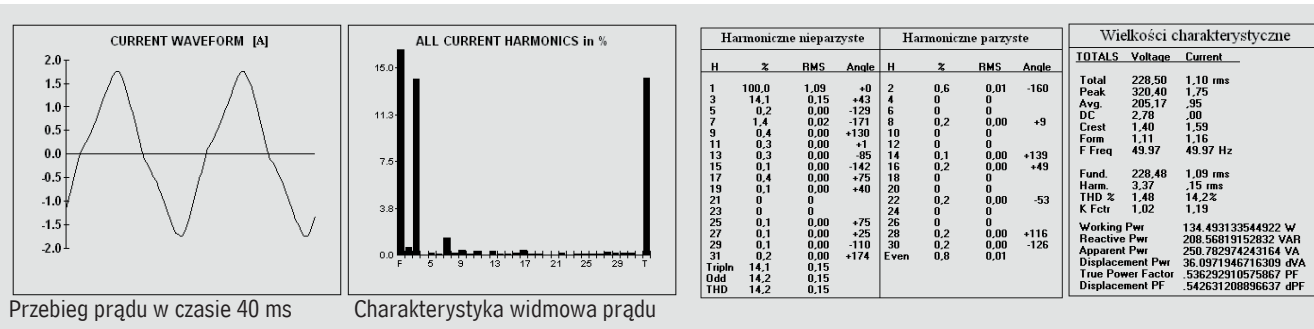
Rys. 1. Przykładowe układy połączeń lamp wyładowczych: a) jednoświetłówkowy z klasycznym układem stabilizacyjno-zapłonowym, b) dwuświetłówkowy w układzie antystroboskopowym, c) lampy rtęciowej wysokoprężnej, d) lampy sodowej wysokoprężnej, e) schemat blokowy układu zasilania świetłówki ze statecznikiem elektronicznym [10]; C – kondensator do poprawy współczynnika mocy, L – statecznik indukcyjny, Z – zapłonnik, UZ – układ zapłonowy

1.2. Analiza widmowa prądu pobieranego przez wybrane lampy wyładowcze

Do analizy prądu wybrano następujące lampy:

- świetłówkę kompaktową ze statecznikiem indukcyjnym
- świetłówkę kompaktową ze statecznikiem elektronicznym
- lampę rtęciową wysokoprężną
- lampę indukcyjną
- lampę sodową wysokoprężną
- lampę sodową niskoprężną
- świetłówkę liniową ze statecznikiem indukcyjnym
- świetłówkę liniową ze statecznikiem elektronicznym i regulatorem strumienia świetlnego
- lampę metalohalogenkową.

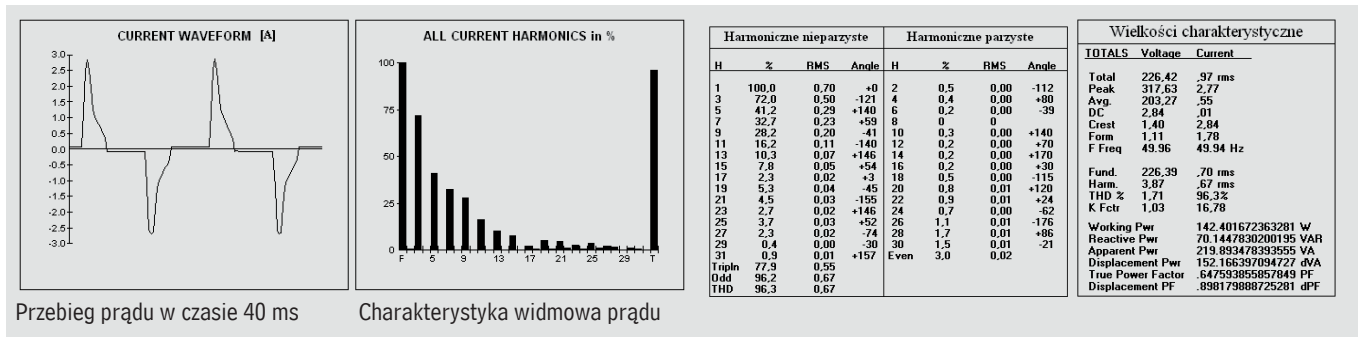
Analizę widmową prądu lamp wymienionych w podpunktach od a) do f) przeprowadzono dla stanu ustalonego, tzn. nagrzana lampa była zasilana napięciem znamionowym. Wyniki analizy przedstawiono w niniejszym punkcie artykułu. Analizę prądu dla lamp wymienionych w podpunktach od g) do i) omówiono odrębnie, gdyż przeprowadzono ją w różnych stanach pracy, tzn. w świetłównie liniowej ze statecznikiem indukcyjnym przeanalizowano wpływ stopnia kompensacji mocy bierniej na kształt pobieranego prądu (punkt 1.3), w świetłównie liniowej ze statecznikiem elektronicznym badano wpływ fabrycznego regulatora strumienia świetlnego (punkt 1.4), natomiast w lampie metalohalogenkowej (punkt 2.1) analizę rozszerzono o układ trójfazowy, co pozwala na badanie prądu w przewodzie neutralnym.



Rys. 2. Analiza prądu pobieranego przez pojedynczą świetłówkę kompaktową ze statecznikiem indukcyjnym (ze względu na zastosowaną przekładnię przetwornika pomiarowego wartości prądu i mocy należy podzielić przez 10)

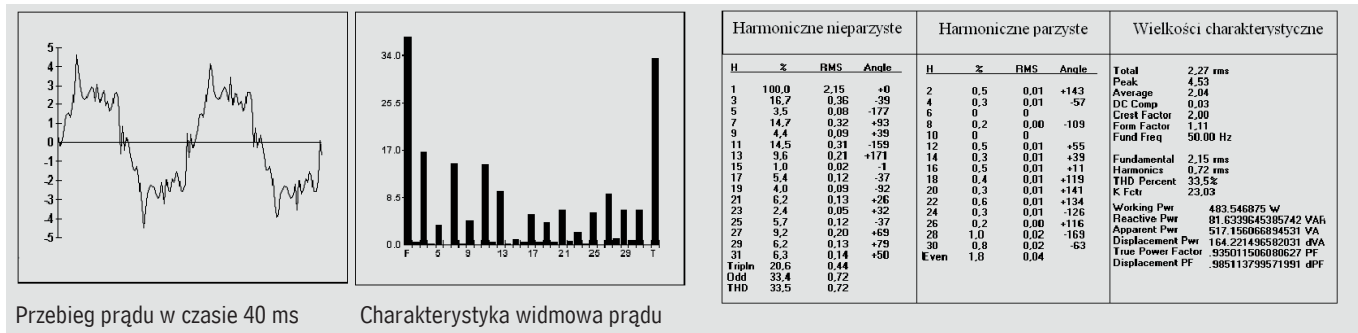
Na rysunku 2 przedstawiono analizę prądu pobieranego przez pojedynczą świetlówkę kompaktową z klasycznym układem stabilizacyjno-zapłonowym. Świetlówka taka zawiera dławik jako statecznik, ale nie zawiera kondensora. Wpływa to na współczynnik mocy, który wynosi około 0,53. Dzięki takiemu układowi pobierany prąd jest stosunkowo mało odształcony. Oprócz składowej podstawowej w przebiegu dominuje harmoniczna 3., a całkowity stopień odształcenia prądu wynosi $THD_i = 14\%$.

Zdecydowanie wyższym odształceniem pobieranego prądu charakteryzuje się świetlówka kompaktowa ze statecznikiem elektronicznym. Z punktu widzenia walorów oświetleniowych oraz trwałości świetlówka ta jest rozwiązaniem lepszym od świetlówki z klasycznym układem stabilizacyjno-zapłonowym. Charakteryzuje się też wyższym współczynnikiem mocy.



Rys. 3. Analiza prądu pobieranego przez pojedynczą świetlówkę kompaktową ze statecznikiem elektronicznym (ze względu na zastosowaną przekładnię przetwornika pomiarowego wartości prądu i mocy należy podzielić przez 10)

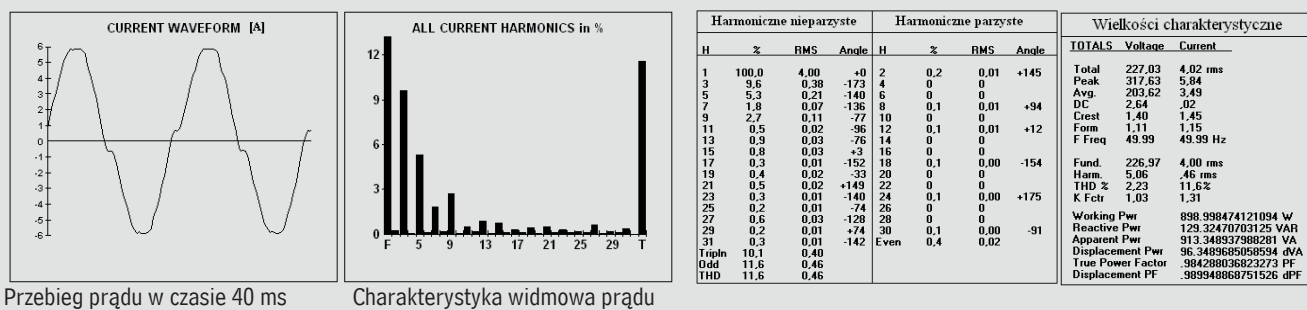
Jednakże rozważając jej wpływ na instalację elektryczną, dochodzi się do wniosku, że może ona powodować większe problemy. Zauważa się bardzo wysoki stopień odształcenia prądu, który wynosi ponad 96%. Duży jest udział harmonicznym nieparzystych rzędu od 3. do 15. Bardzo duży jest współczynnik szczytu osiągający wartość 2,84, co jest ważną informacją przy doborze urządzeń zabezpieczających.



Rys. 4. Analiza prądu pobieranego przez lampę rtęciową wysokoprężną ze statecznikiem indukcyjnym i kondensatorem

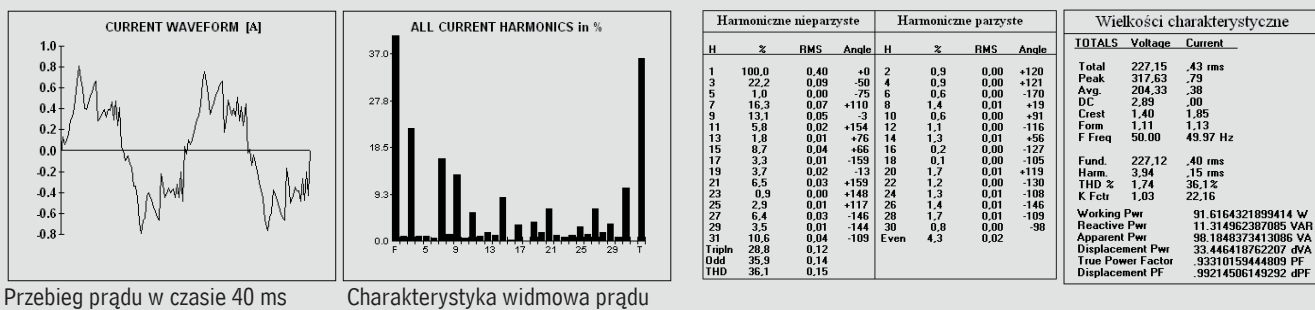
Lampa rtęciowa wysokoprężna w układzie z dławikiem i kondensatorem (rys. 4) również pobiera prąd dość silnie odształcony. Stopień odształcenia wynosi $THD_i = 34\%$, a dominującymi harmonicznymi są 3., 7. i 11. Mniejszy niż w przypadku świetlówki kompaktowej ze statecznikiem elektronicznym jest współczynnik szczytu i wynosi 2.

Rys. 5 przedstawia przebieg prądu pobieranego przez lampę indukcyjną. Lampę indukcyjną można zaliczyć do lamp rtęciowych, ale jest to specyficzne źródło światła o rekordowej trwałości (60 000 godzin). Tak wysoką trwałość lampa zawdzięcza konstrukcji bezelektrodowej. Źródło światła jest zasilane prądem o częstotliwości rzędu megaherców, jednakże prąd pobierany z sieci nie jest silnie odształcony. Stopień odształcenia prądu wynosi $THD_i = 12\%$. Zachowany jest bardzo wysoki współczynnik mocy osiągający wartość 0,98.



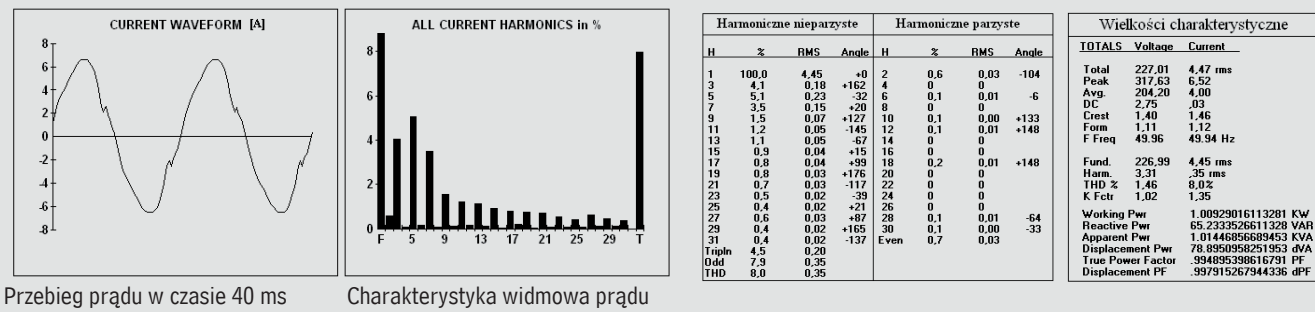
Rys. 5. Analiza prądu pobieranego przez lampę indukcyjną (ze względu na zastosowaną przekładnię przetwornika pomiarowego wartości prądu i mocy należy podzielić przez 10)

W lampie sodowej wysokoprężnej (rys. 6) kształt prądu jest podobny do kształtu prądu w lampie rtęciowej wysokoprężnej. Podobny jest też stopień odkształcenia prądu wynoszący $THD_i = 36\%$. Nieco inny jest jednak udział poszczególnych wyższych harmonicznych. Tu dominują harmoniczne 3., 7. i 9.



Rys. 6. Analiza prądu pobieranego przez lampę sodową wysokoprężną

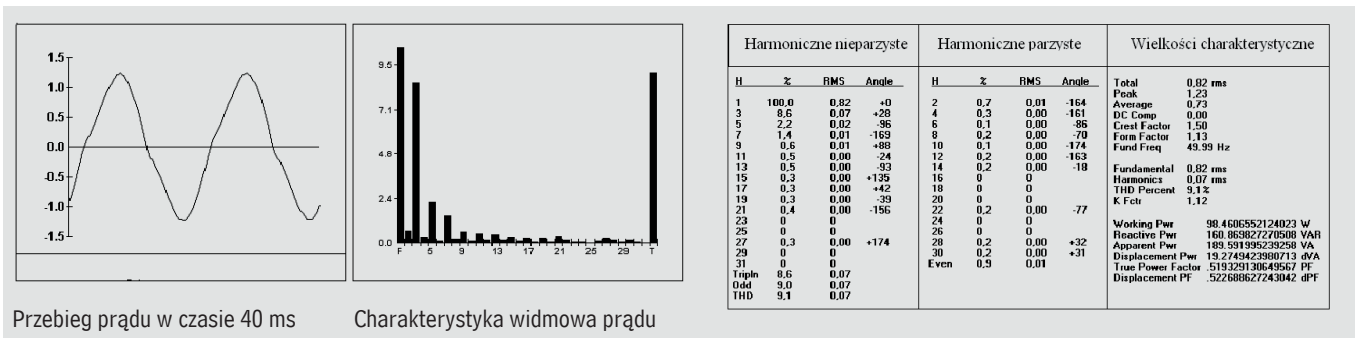
Niedużym odkształceniem pobieranego prądu charakteryzuje się lampa sodowa niskoprężna (rys. 7). Stopień odkształcenia prądu wynosi $THD_i = 8\%$, a współczynnik szczytu niewiele przekracza wartość 1,41, jak dla przebiegu nieodkształconego.



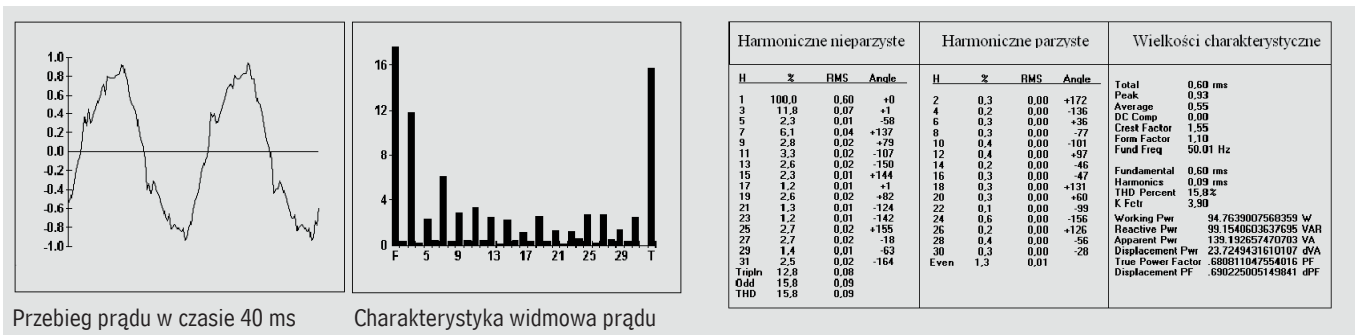
Rys. 7. Analiza prądu pobieranego przez lampę sodową niskoprężną (ze względu na zastosowaną przekładnię przetwornika pomiarowego wartości prądu i mocy należy podzielić przez 10)

1.3. Wpływ stopnia kompensacji mocy biernej lamp na kształt pobieranego prądu

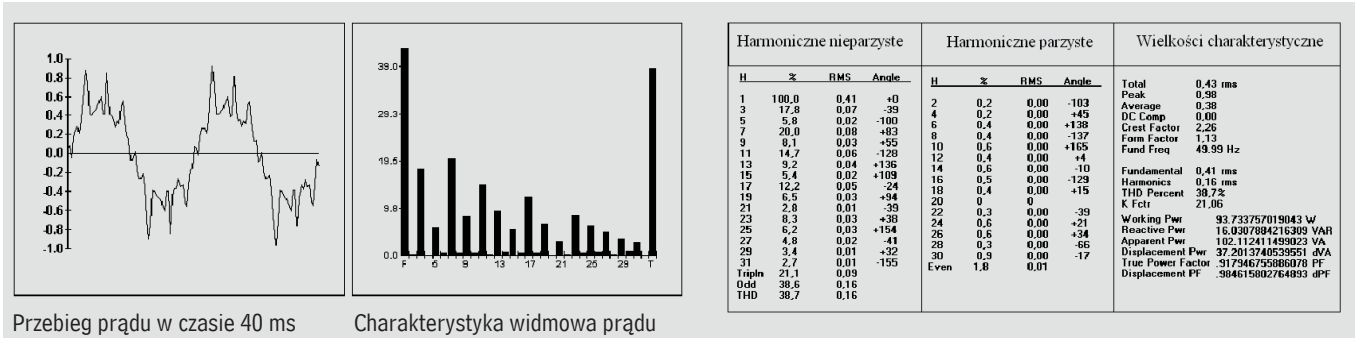
Odształcenie prądu pobieranego przez lampy z klasycznym układem stabilizacyjno-zapłonowym związane jest głównie z brakiem lub obecnością w oprawie kondensatora do indywidualnej kompensacji mocy biernej. Świetlówki bez kondensatora (rys. 8), charakteryzują się niskim współczynnikiem mocy około 0,5, ale pobierają prąd o niedużym odkształceniu ($THD_i = 9\%$). Zastosowanie kondensatora wpływa na zwiększenie odkształcenia pobieranego prądu. Jeżeli zastosować kondensator o pojemności zalecanej przez producenta (rys. 10), to stopień odkształcenia wzrasta czterokrotnie ($THD_i = 39\%$), natomiast po zastosowaniu kondensatora o pojemności mniejszej niż zalecana przez producenta (rys. 9) uzyskuje się współczynnik mocy o wartości tylko 0,68, ale odkształcenie prądu nie jest tak silne ($THD_i = 16\%$).



Rys. 8. Analiza prądu pobieranego przez świetlówki liniowe (oprawa dwuświetlówkowa) ze statecznikiem indukcyjnym bez kondensatora (ze względu na zastosowaną przekładnię przetwornika pomiarowego wartości prądu i mocy należy podzielić przez 2)



Rys. 9. Analiza prądu pobieranego przez świetlówki liniowe (oprawa dwuświetlówkowa) ze statecznikiem indukcyjnym i kondensatorem o pojemności mniejszej niż zalecana przez producenta (ze względu na zastosowaną przekładnię przetwornika pomiarowego wartości prądu i mocy należy podzielić przez 2)



Rys. 10. Analiza prądu pobieranego przez świetlówki liniowe (oprawa dwuświetlówkowa) ze statecznikiem indukcyjnym i kondensatorem zapewniającym kompensację zalecaną przez producenta (ze względu na zastosowaną przekładnię przetwornika pomiarowego wartości prądu i mocy należy podzielić przez 2)

Zastosowanie kondensatora w oprawie ma na celu ograniczenie poboru z sieci składowej indukcyjnej prądu. Należy jednak podkreślić, że można ograniczyć jedynie pobór harmonicznej podstawowej. Można to dostrzec, analizując wartość skuteczną poszczególnych harmonicznych w przebiegach z rysunków 8, 9 i 10. Po zastosowaniu kondensatora maleje wartość skuteczna harmonicznej podstawowej, natomiast wartość skuteczna poszczególnych wyższych harmonicznych nie zmienia się lub nieco wzrasta. Skoro stopień odształcenia prądu jest zdefiniowany jako

$$THD_i = \sqrt{\sum_{h=2}^{h=n} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2} \quad (1)$$

gdzie:

I_h – wartość skuteczna harmonicznej rzędu h ,

I_1 – wartość skuteczna harmonicznej podstawowej,

naturalną rzeczą jest to, że będzie on wzrastał przy malejącej harmonicznej podstawowej nawet wtedy, gdy wartość skuteczna wyższych harmonicznych pozostanie bez zmian.

Na podstawie analiz zawartych w publikacji Z. Gabryjelskiego i Z. Kowalskiego [10] można stwierdzić, że zawartość poszczególnych harmonicznych A_n , pobieranych z sieci przez kompletną oprawę oświetleniową, jest tyle razy większa od ich zawartości w prądzie płynącym bezpośrednio przez źródło światła A_{nL} , ile razy współczynnik mocy dla pierwszej harmonicznej λ_1 po skompensowaniu będzie większy od naturalnego współczynnika mocy λ_n (bez kondensatora). Zakładając, że naturalny współczynnik mocy wynosi 0,5, a po zastosowaniu kondensatora 0,95, udział 3. harmonicznej w prądzie lampy na poziomie 0,1 (10%) bez kompensacji spowoduje po kompensacji wzrost tej harmonicznej w prądzie pobieranym z sieci do poziomu:

$$A_3 = A_{3L} \times \frac{\lambda_1}{\lambda_n} = 0,1 \times \frac{0,95}{0,5} = 0,19 \quad (2)$$

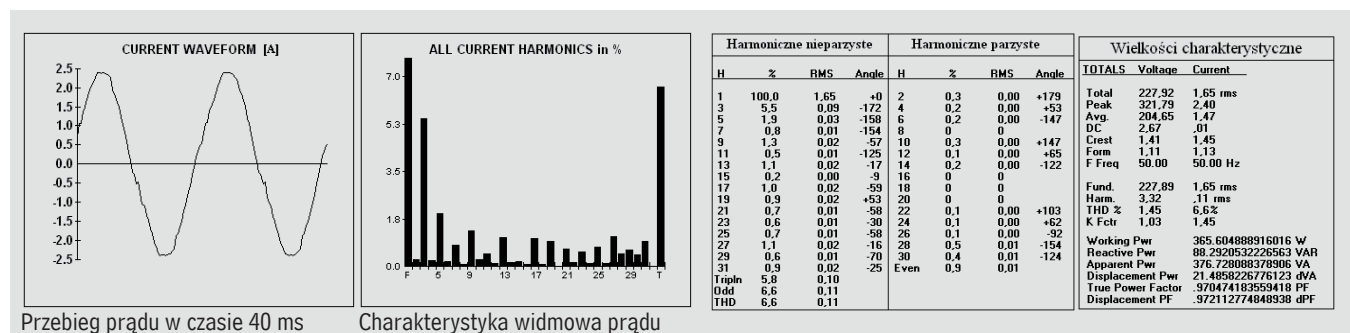
a więc jest to wzrost niemal dwukrotny.

Na podstawie powyższych analiz można stwierdzić, że w obiekcie o dużej liczbie lamp wyładowczych, w celu zmniejszenia odkształcenia pobieranego prądu, a tym samym zmniejszenia odkształcenia napięcia w punkcie zasilania, korzystne może być zastosowanie kondensatorów o pojemności mniejszej niż zaleca producent lub ich usunięcie z opraw oświetleniowych.

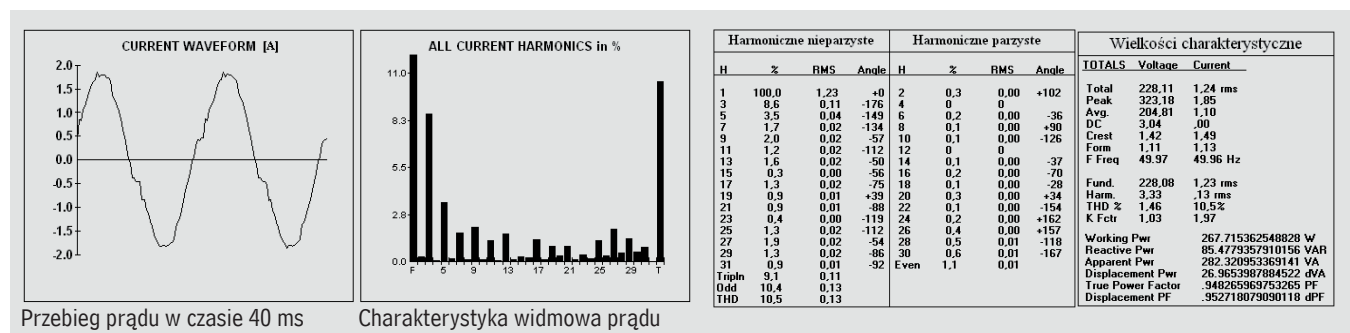
1.4. Wpływ regulatora strumienia świetlnego

Lampy wyładowcze do płynnej regulacji strumienia świetlnego wymagają skomplikowanych i kosztownych elektronicznych układów stabilizacyjno-zapłonowych. Schemat blokowy takiego układu przedstawiono na rysunku 1e. Lampa jest zasilana prądem o wysokiej częstotliwości i dzięki temu możliwe jest kształtowanie prądu lampy bez negatywnych skutków (przygasanie lampy), które występowałyby przy częstotliwości 50 Hz. Okazuje się, że płynna regulacja strumienia świetlnego świetlówek nie musi oznaczać silnego odkształcenia prądu, jak to ma miejsce podczas regulacji strumienia świetlnego lamp żarowych.

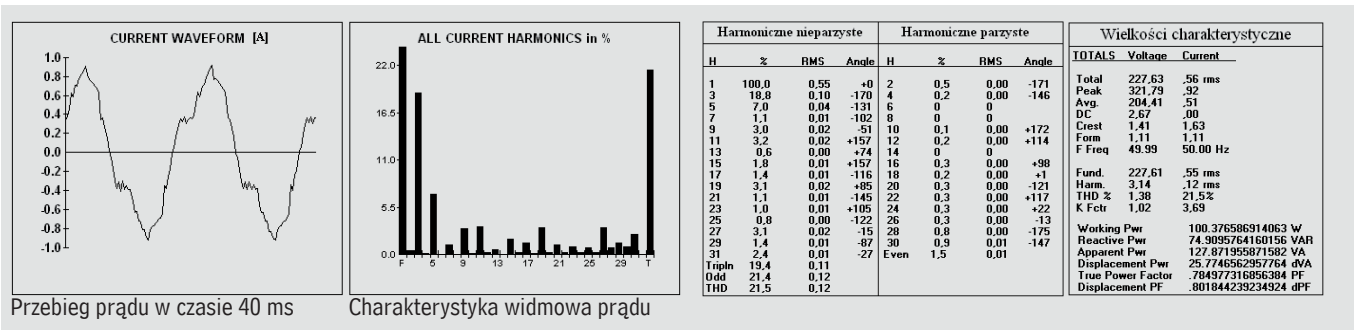
Jak wynika z przebiegów przedstawionych na rys. 11, 12 i 13, coraz mniejszy strumień świetlny uzyskuje się wprawdzie kosztem pewnego odkształcenia prądu, ale nawet przy minimalnym strumieniu świetlnym badanej oprawy (kilka procent pełnego strumienia) odkształcenie to nie jest bardzo silne.



Rys. 11. Analiza prądu pobieranego przez świetłówkę liniową ze statecznikiem elektronicznym umożliwiającym regulację strumienia świetlnego. Regulator nastawiony na maksymalny strumień świetlny (ze względu na zastosowaną przekładnię przetwornika pomiarowego wartości prądu i mocy należy podzielić przez 10)



Rys. 12. Analiza prądu pobieranego przez świetłówkę liniową ze statecznikiem elektronicznym umożliwiającym regulację strumienia świetlnego. Regulator nastawiony na pośredni strumień świetlny (ze względu na zastosowaną przekładnię przetwornika pomiarowego wartości prądu i mocy należy podzielić przez 10)



Rys. 13. Analiza prądu pobieranego przez świetlówkę liniową ze statecznikiem elektronicznym, umożliwiającym regulację strumienia świetlnego. Regulator nastawiony na minimalny strumień świetlny (ze względu na zastosowaną przekładnię przetwornika pomiarowego wartości prądu i mocy należy podzielić przez 10)

Należy zwrócić uwagę, że zmniejszaniu strumienia świetlnego towarzyszy zmniejszanie wartości skutecznej harmonicznej podstawowej prądu, a praktycznie bez zmian pozostaje wartość skuteczna poszczególnych wyższych harmonicznych. Dominującą wyższą harmoniczną jest harmoniczna rzędu 3. Wraz ze zmniejszaniem strumienia świetlnego zauważa się spadek wartości współczynnika mocy z 0,97 przy pełnym strumieniu świetlnym do 0,80 przy minimalnym strumieniu świetlnym.

2. WPŁYW ODBIORNIKÓW NIELINIOWYCH NA DOBÓR ZABEZPIECZEŃ I PRZEWODÓW

2.1. Obciążenie i dobór przewodów w instalacji z odbiornikami nieliniowymi

W instalacjach oświetleniowych, z powodu obecności prądów wyższych harmonicznych, należy się liczyć ze zwiększonym obciążeniem przewodów fazowych oraz znacznym obciążeniem przewodu neutralnego. Prądy wyższych harmonicznych powodują zwiększone nagrzewanie się przewodów fazowych, a w wyniku znacznego obciążenia przewodu neutralnego obciążalność całego układu może ulec redukcji.

Szczególną uwagę należy poświęcić obciążeniu przewodu neutralnego [7, 11, 32]. W obwodzie jednofazowym prąd obciążenia płynący przewodem neutralnym jest identyczny jak prąd płynący w przewodzie fazowym. Pewne niebezpieczeństwo może jednak wystąpić w obwodzie trójfazowym, gdyż w niektórych sytuacjach prąd w przewodzie neutralnym może mieć wartość większą niż prądy w przewodach fazowych, nawet przy symetrycznym rozmieszczeniu obciążeń na poszczególne fazy.

W układzie trójfazowym symetrycznym przebiegi harmonicznej podstawowej są przesunięte względem siebie o kąt $120^\circ \left(\frac{2\pi}{3}\right)$. Wyższe harmoniczne o rzędzie h są przesunięte o $h\frac{2\pi}{3}$. Harmoniczne podzielne przez 3, np. rzędu 3., 9., 15., 27. itd. sprawiają, że wyrażenie $\frac{h}{3}$ jest liczbą całkowitą, więc będą one ze sobą w fazie.

Na podstawie powyższego można stwierdzić, że prądy danej harmonicznej podzielnej przez 3, płynące w poszczególnych fazach, będą się sumowały arytmetycznie w przewodzie neutralnym. W tabeli 1 przedstawiono spodziewane wartości prądu w przewodzie neutralnym w zależności od obciążenia poszczególnych faz oraz udziału 1., 3. i 9. harmonicznej.

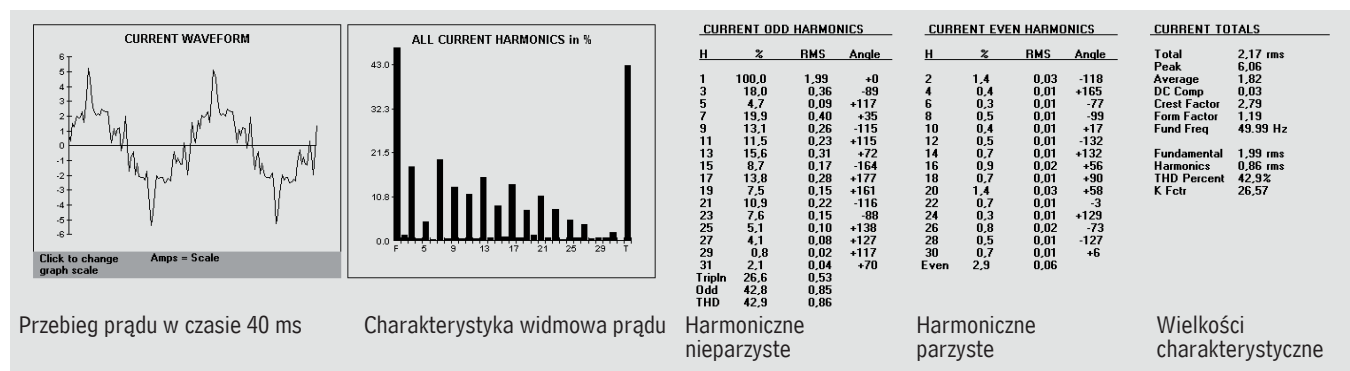
Tabl. 1. Wartość skuteczna prądu w przewodach fazowych i neutralnym przy różnym obciążeniu faz dla przebiegów odształconych z udziałem 1., 3. i 9. harmonicznej

I_{L1} [A]				I_{L2} [A]				I_{L3} [A]				I_N [A]
1.	3.	9.	I_{RMS}	1.	3.	9.	I_{RMS}	1.	3.	9.	I_{RMS}	I_{RMS}
obciążenie symetryczne												
100	15	0	101	100	15	0	101	100	15	0	101	45
100	33	0	105	100	33	0	105	100	33	0	105	99
100	45	0	110	100	45	0	110	100	45	0	110	135
100	55	0	114	100	55	0	114	100	55	0	114	165
100	33	15	105	100	33	15	105	100	33	15	105	109
obciążenie niesymetryczne												
0	0	0	0	100	33	15	106	100	33	15	106	124
10	3	0	10,4	100	33	0	105	100	33	0	105	113

Nietrudno zauważyć, że przy znacznej zawartości 3. harmonicznej prąd w przewodzie neutralnym może przyjmować wartość większą niż prąd w najbardziej obciążonej fazie (zaciemnione pola w tabl. 1). Dobór przekroju przewodu na podstawie szczytowego obciążenia przewodów fazowych może doprowadzić do przeciążenia i zniszczenia przewodu neutralnego.

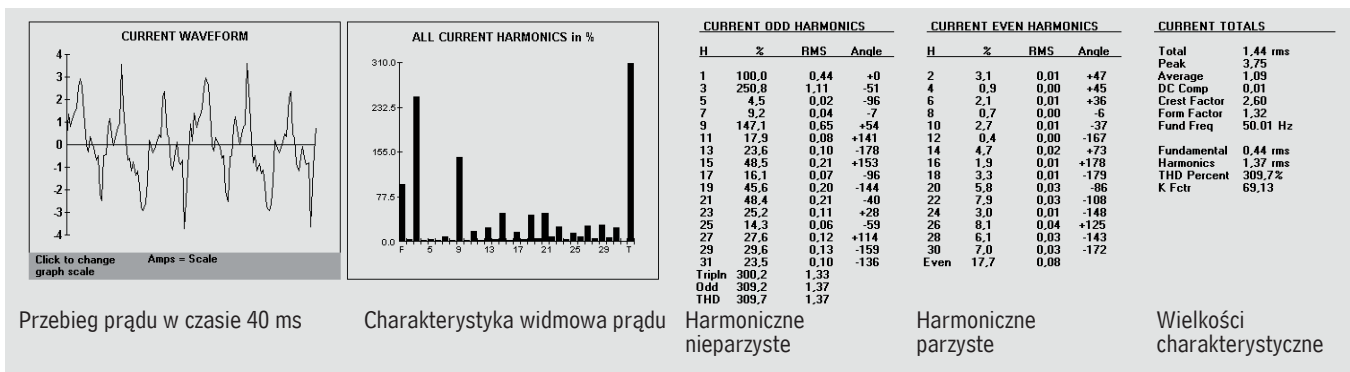
Zjawiska sumowania się w przewodzie neutralnym harmonicznym podzielnych przez 3 w praktyce zachodzą tylko w pewnym stopniu i są zależne od asymetrii obciążenia. Rzeczywisty prąd płynący w przewodzie neutralnym zawiera różne harmoniczne, również niepodzielne przez 3. Na rys. 14 i 15 przedstawiono przebiegi prądów w modelowej instalacji laboratoryjnej, natomiast na rys. 16 i 17 w rzeczywistej instalacji dużego obiektu z wieloma lampami metalohalogenowymi.

W laboratorium badaniom poddano trzy jednakowe lampy metalohalogenowe o mocy 400 W, połączone w układ 3-fazowy symetryczny. Analizowano przebieg prądu w przewodzie fazowym każdej lampy oraz prądu w przewodzie neutralnym.



Rys. 14. Analiza prądu pobieranego przez pojedynczą lampę metalohalogenową

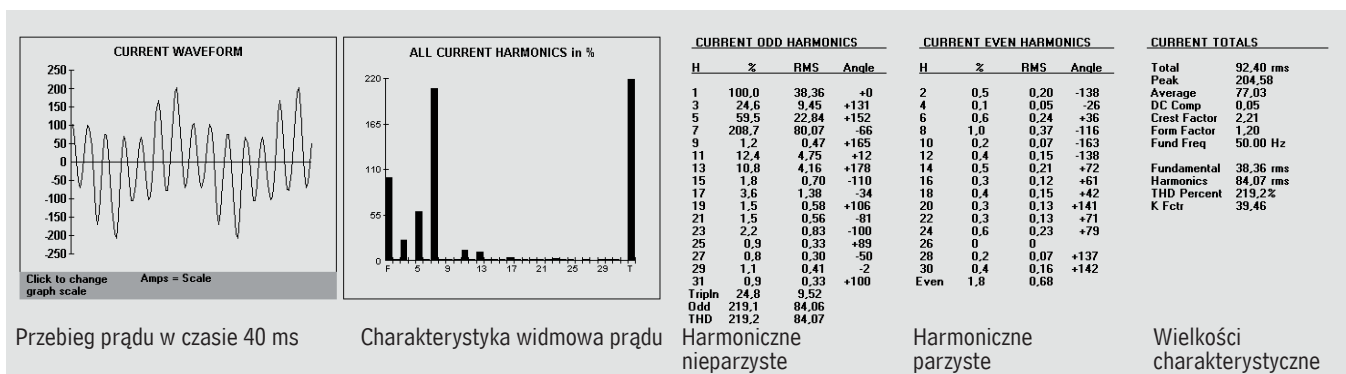
Przebieg na rys. 14 wykazuje, że prąd pobierany przez lampę jest znacznie odkształcony i charakteryzuje się dużym współczynnikiem szczytu, równym 2,79. W wyniku wielu pomiarów można stwierdzić, że stopień odkształcenia prądu THD_i osiąga wartości z przedziału 39 ÷ 54%; parametr ten zmienia się losowo, podobnie jak i wartość skuteczna pobieranego prądu.



Rys. 15. Analiza prądu płynącego w przewodzie neutralnym obwodu 3-fazowego obciążonego symetrycznie trzema lampami metalohalogenowymi (1 lampa/fazę)

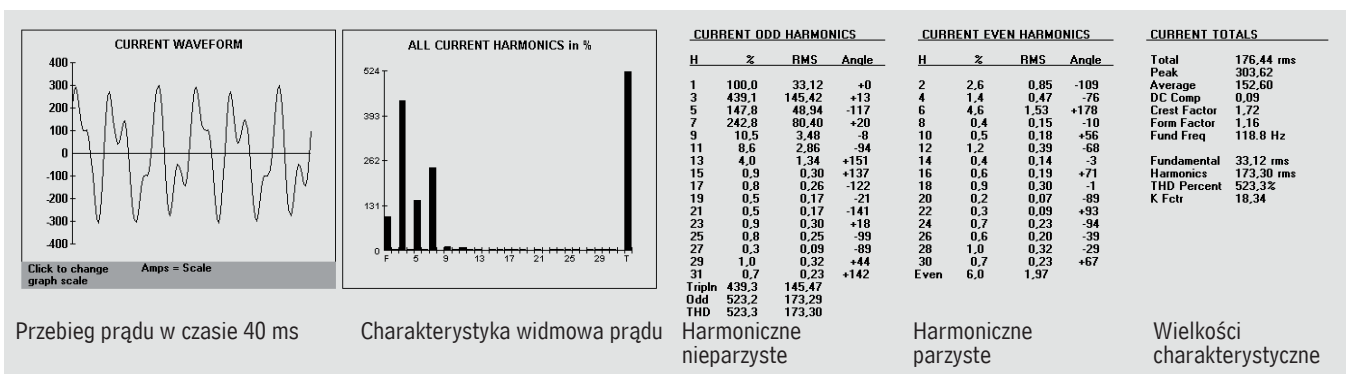
W prądzie płynącym w przewodzie neutralnym obwodu trójfazowego, symetrycznie obciążonego trzema lampami metalohalogenowymi o mocy 400 W (rys. 15), dominują harmoniczne nieparzyste podzielne przez 3, zwłaszcza 3. harmoniczna. Stopień odkształcenia prądu THD_i sięga rzędu 300%. Mimo symetrycznego obciążenia prąd w przewodzie neutralnym osiąga niemal 70% wartości prądu w przewodach fazowych.

Odkształcenie prądu pobieranego przez grupę kilkudziesięciu lamp o mocy 400 W (rys. 16) jest znacznie większe niż w warunkach laboratoryjnych. Stopień odkształcenia prądu THD_i w przewodach fazowych instalacji badanego obiektu osiąga poziom 70 ÷ 220%, w porównaniu z wartością 39 ÷ 54% zmierzoną w laboratorium. Zwraca uwagę niemal trzykrotnie większa wartość skuteczna prądu – 92,4 A, w stosunku do prądu harmonicznej podstawowej – 38,36 A.



Rys. 16. Analiza prądu pobieranego przez grupę lamp metalohalogenkowych

Ta sama lampa lub zespół lamp będzie pobierać prąd o innym kształcie w zależności od rodzaju i mocy źródła zasilania (transformator, przetwornica tyrystorowa) [13]. Pojedyncza lampa w zakresie dopuszczalnego odształcenia prądu powinna spełniać wymagania normy PN-EN 61000-3-2:2007 [27]. Z reguły jednak będzie pobierała prąd mniej odształcony niż grupa lamp zasilana z tego samego źródła. Grupa lamp stanowi zastępczy odbiornik o mocy nierzadko sięgającej kilkunastu, a nawet kilkudziesięciu kilowatów. To może doprowadzić do sytuacji, że pojedyncza lampa, w zakresie odształcenia prądu, będzie spełniała wymagania stawiane przez normę [27], ale grupa lamp już nie [16].



Rys. 17. Analiza prądu płynącego w przewodzie neutralnym obwodu oświetleniowego zawierającego dużą liczbę lamp metalohalogenkowych

Analiza prądu w przewodzie neutralnym obwodu, zawierającego kilkadziesiąt lamp metalohalogenkowych o mocy 400 W każda, wykazała (rys. 17), że dominującą harmoniczną jest 3. harmoniczna. Na podstawie analizy można również stwierdzić, że prąd w przewodzie neutralnym ma większą wartość niż prąd w przewodach fazowych, nawet przy niewielkiej asymetrii obciążenia. Wartość skuteczna tego prądu wynosi ponad 170 A, podczas gdy wartość skuteczna prądu w przewodach fazowych to ok. 90 A, co ma istotne znaczenie przy doborze przekroju przewodu neutralnego. Przekrój przewodu neutralnego w instalacjach z odbiornikami nieliniowymi w żadnym wypadku nie powinien być mniejszy niż przekrój przewodów fazowych.

2.2. Dobór zabezpieczeń nadprądowych

Zabezpieczenie przed skutkami przeciążeń i zwarć w instalacjach oświetleniowych jest realizowane za pomocą wyłączników nadprądowych lub bezpieczników. Przy doborze prądu znamionowego zabezpieczenia należy się kierować wartością skuteczną prądu z uwzględnieniem prądów wyższych harmonicznymi. Z uwzględnieniem prądów wyższych harmonicznymi wartość skuteczna prądu w przewodach fazowych pojedynczej lampy może być o kilkanaście procent większa niż składowej podstawowej (rys. 14). Udział wyższych harmonicznymi w prądzie może być większy, gdy łączna moc lamp stanowi znaczące obciążenie transformatora.

Cechą charakterystyczną lamp wyladowczych jest zwiększony pobór prądu po ich załączeniu. Wartość prądu załączeniowego jest ok. $1,4 \div 2,0^1$ razy większa od prądu znamionowego. Dane o prądzie załączeniowym dostarcza producent lampy. Na rys. 18 przedstawiono zmiany prądu pobieranego przez lampę od załączenia do stanu ustalonego dla lampy rtęciowej wysokoprężnej i lampy sodowej wysokoprężnej [10, 23]. Prąd załączeniowy w przeciągu kilku minut płynnie maleje do wartości prądu znamionowego.

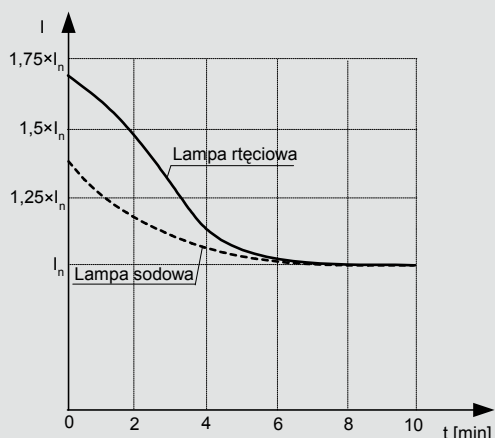
1 Wartość szczytowa impulsu prądu przy załączaniu lampy z kondensatorem równoległym może wynosić kilkadziesiąt amperów, ale impuls ten trwa bardzo krótko (kilkaset mikrosekund). Tego rodzaju zjawiska nie są w niniejszym artykule rozpatrywane.

Z uwagi na zwiększoną wartość prądu tuż po załączeniu lampy, prąd znamionowy ciągły wyłącznika nadprądowego powinien być większy, niż wynikałoby to z prądu szczytowego obciążenia w stanie ustalonym. W obwodzie z lampami wyładowczymi o kompensacji równoległej w uproszczeniu można przyjąć, że prąd znamionowy ciągły wyłącznika I_{nw} powinien być na tyle duży, aby jego wyzwalacz przeciążeniowy, w określonym czasie, nie reagował na prąd obciążenia wyrażony krotnością prądu znamionowego lamp I_{lam} (tabl. 2) [15]. Jak wynika z tabl. 2, prąd znamionowy ciągły wyłącznika powinien być co najmniej o 25% większy od prądu pobieranego przez lampy w stanie ustalonym.

Tabl. 2. Szacunkowe wartości prądu załączeniowego i czas jego przepływu w obwodach lamp wyładowczych o kompensacji równoległej

Czas	∞	4 min	2 min
Prąd obciążenia	$1,25 \times I_{lam}$	$1,6 \times I_{lam}$	$1,8 \times I_{lam}$

Przedstawione na rys. 18 zmiany prądu dotyczą wartości skutecznej, a jak wynika z przedstawionych w poprzednim punkcie oscylogramów, pobierany prąd może być silnie odkształcony. Wyniki badań przedstawione w publikacji M. Walejewskiego [34] wykazały, że prąd tuż po uruchomieniu lampy może być silniej odkształcony niż w stanie ustalonym. Dla doboru zabezpieczenia ma znaczenie również to, czy przebieg prądu charakteryzuje się dużym współczynnikiem szczytu. Wyzwalacz elektromagnetyczny wyłącznika jest pobudzany wartością szczytową przepływającego prądu i w celu uniknięcia zbędnych zasztań wartość szczytowa prądu niezadziałania wyzwalacza i_{nz} powinna być większa niż chwilowa wartość prądu i_{max} występującego we wszystkich przewidywanych stanach przejściowych [22].



Rys. 18. Zmiany prądu pobieranego przez lampy wysokoprężne: rtęciową i sodową od chwili zapłonu do stanu ustalonego [10, 23]; I_n – prąd pobierany w stanie ustalonym

Biorąc pod uwagę charakterystykę t-I wyłącznika i oznaczenia przedstawione na rys. 19 można wyrazić to następującą zależnością:

$$0,8 \times \sqrt{2} \times I_i \geq k_b \times i_{max} \quad (3)$$

gdzie:

k_b – współczynnik bezpieczeństwa $k_b \geq 1,25$.

W związku z powyższym wartość skuteczna prądu nastawczego I_i wyzwalacza zwarciovego wyłącznika powinna spełniać warunek:

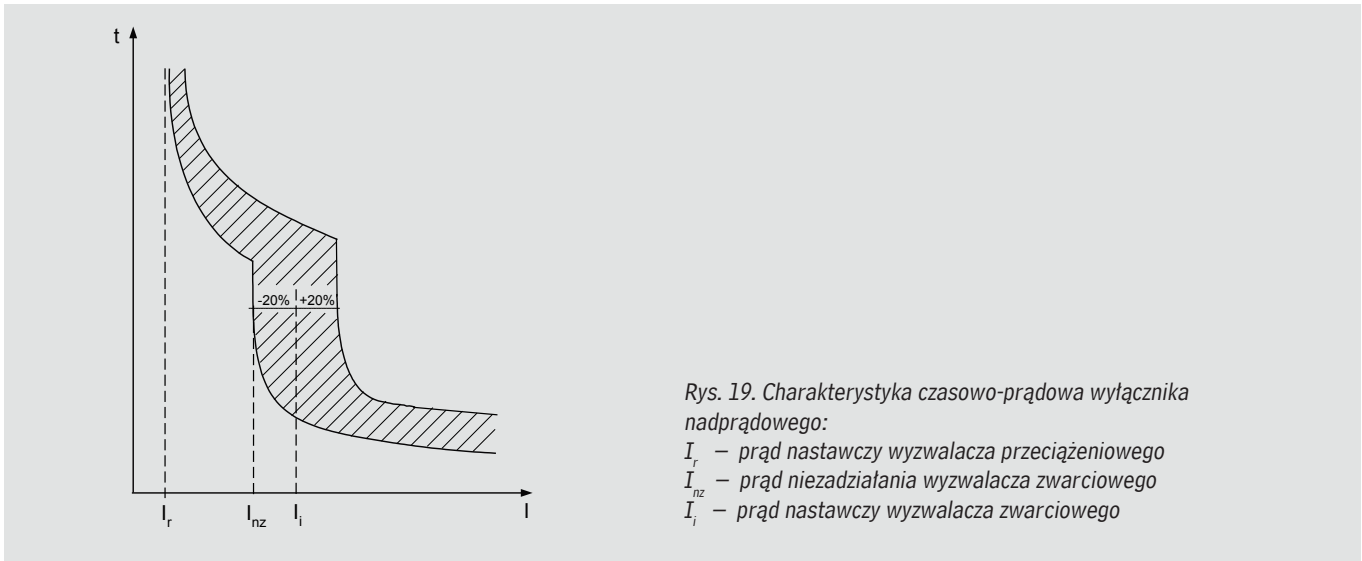
$$I_i \geq \frac{1,25}{0,8 \cdot \sqrt{2}} \times i_{max} \approx 1,1 \times i_{max} \quad (4)$$

Prąd nastawczy wyzwalacza zwarciovego przy przebiegu odkształconym powinien być większy od prądu nastawczego przy przebiegu sinusoidalnie zmiennym w stosunku:

$$I_{i_odksz} = \frac{k_s}{\sqrt{2}} \times I_{i_sin} \quad (5)$$

gdzie:

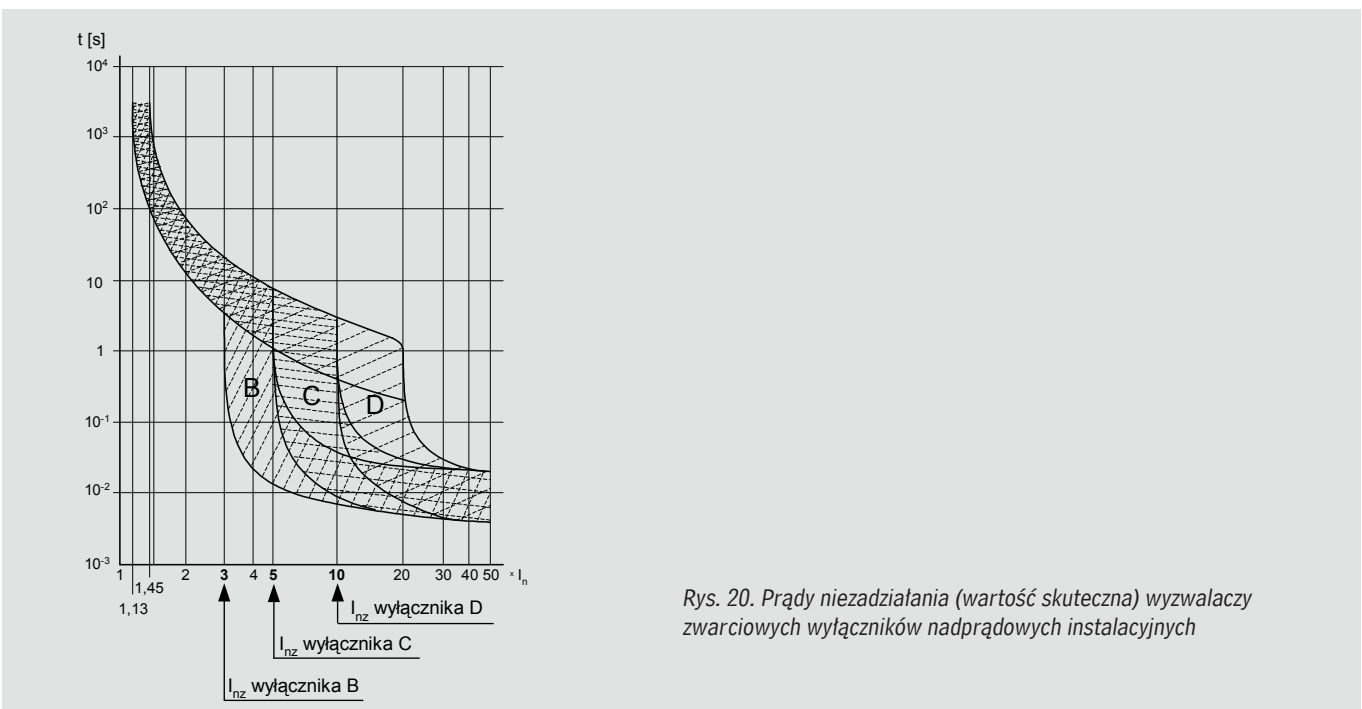
- I_{i_odksz} – prąd nastawczy wyzwalacza zwarciovego przy przebiegu odkształconym,
- I_{i_sin} – prąd nastawczy wyzwalacza zwarciovego przy przebiegu sinusoidalnie zmiennym,
- k_s – współczynnik szczytu.



Jeżeli w obwodzie zainstalowano świetlówki kompaktowe charakteryzujące się prądem obciążenia jak na

rys. 3, to prąd nastawczy wywalacza zwarcowego powinien być większy w stosunku $k_s / \sqrt{2} = 2,84 / \sqrt{2} = 2$ od prądu nastawczego przy przebiegu nieodkształconym. Tak należy postępować z wyłącznikami o nastawianym prądzie nastawczym wywalacza zwarcowego.

W typowych wyłącznikach instalacyjnych o charakterystykach B, C lub D nie ma możliwości nastawiania wywalacza zwarcowego. Prądy niezadziałania I_{nz} wywalaczy zwarcowych wyłączników instalacyjnych przedstawiono na rys. 20. W zależności od prądu załączeniowego i współczynnika szczytu należy dobrać typ charakterystyki B, C lub D. W każdym przypadku wartość szczytowa prądu niezadziałania wywalacza i_{nz} powinna być większa niż chwilowa wartość prądu i_{max} występującego we wszystkich przewidywanych stanach przejściowych. W przypadku zabezpieczania obwodu bezpiecznikami, aby nie doszło do przepalenia topika przy rozruchu lampy, prąd znamionowy wkładki topikowej powinien wynosić $I_{nb} \geq (1,4 \div 1,8) \times I_{lam}$, przy czym wartości większe dotyczą jednoczesnego załączania lamp o wydłużonym rozruchu [15]. W obwodach oświetleniowych stosuje się wkładki topikowe typu gG lub gF i nie ma konieczności dokonywania dodatkowej korekty prądu znamionowego wkładki ze względu na współczynnik szczytu. Korekta może być konieczna tylko w przypadku wkładek mających topiki o silnych przewężeniach (wkładki typu aR lub gR do zabezpieczania urządzeń półprzewodnikowych) [21].



2.3. Dobór przekroju przewodów

Zasady wymiarowania przewodów w obwodach obciążonych prądami zawierającymi wyższe harmoniczne są zawarte w normie PN-IEC 60364-5-523:2001 [28] „Obciążalność prądowa długotrwała przewodów”, załącznik C „Oddziaływanie wyższych harmonicznych prądów w układach trójfazowych obciążonych symetrycznie”. Jeżeli zawartość 3. harmonicznej przekracza 15%, to należy zastosować współczynniki korekcyjne przedstawione w tabl. 3. Aby uzyskać wymaganą obciążalność przewodu przy przebiegu odkształconym, wartość prądu obciążenia żyły fazowej lub neutralnej należy przedzielić przez określony współczynnik w tabl. 3. Współczynniki korekcyjne dotyczą tylko przewodów, w których przewód neutralny jest częścią przewodu cztero- lub pięcioletowego, jest wykonany z tego samego materiału i ma taki sam przekrój jak przewody fazowe. Wartości współczynników zostały obliczone tylko na podstawie zawartości 3. harmonicznej. Jeśli udział pozostałych harmonicznych podzielnych przez 3 może przekraczać poziom 10% harmonicznej podstawowej, to ich udział w obciążeniu przewodu neutralnego również należy uwzględnić.

Tabl. 3. Współczynniki korekcyjne dla wyższych harmonicznych prądów w 4- i 5-żyłowych przewodach [28]

Udział trzeciej harmonicznej w prądzie przewodu fazowego [%]	Współczynnik korekcyjny	
	Dobór przekroju przewodu na podstawie wartości prądu w przewodach fazowych	Dobór przekroju przewodu na podstawie wartości prądu w przewodzie neutralnym
0–15	1,0	–
15–33	0,86	–
33–45	–	0,86
> 45	–	1,0

Jeżeli liczba obciążonych żył jest większa niż cztery, to na podstawie [3] można obliczyć obciążalność przewodu w sposób następujący:

$$I_{zN} = \frac{I_{z1}}{\sqrt[3]{N_z}} \quad (6)$$

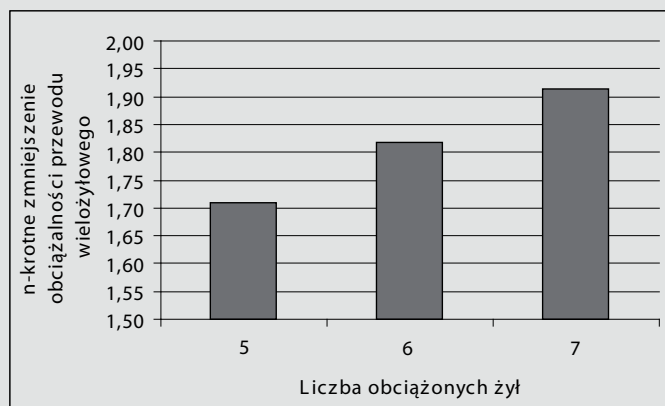
gdzie:

I_{zN} – obciążalność przewodu o N żyłach obciążonych,

I_{z1} – obciążalność przewodu jednożyłowego,

N_z – liczba obciążonych żył.

Powyższa zależność dotyczy przewodów, w których wszystkie żyły są jednakowo obciążone. Niedociążenie bądź brak obciążenia jednej lub więcej żył wpływa korzystnie na obciążalność całego przewodu.



Rys. 21. Zależność obciążalności przewodu wielożyłowego od liczby obciążonych żył

Rys. 21 ilustruje zmniejszenie obciążalności przewodu wielożyłowego w zależności od liczby obciążonych żył zgodnie z zależnością (6). Przy pięciu żyłach jednakowo obciążonych występuje nieco ponad 1,7-krotne zmniejszenie obciążalności każdej żyły w porównaniu z jedną żyłą obciążoną, natomiast przy siedmiu żyłach obciążonych obciążalność przewodu zmniejsza się niemal dwukrotnie.



Wskazówki zawarte w załączniku C normy [28] są mało precyzyjne. Bardziej precyzyjne wskazówki w zakresie doboru przekroju przewodów w obwodach o odształconym prądzie obciążenia podano w opracowaniach [12, 24], co przedstawia tabl. 4. Zawarty w tabl. 4 współczynnik poprawkowy r , przez który należy pomnożyć obciążalność długotrwałą przewodu z normy [28] dla trzech żył obciążonych, uzależniono od stosunku prądu w przewodzie neutralnym do prądu w przewodzie fazowym oraz od sposobu ułożenia przewodów. W niektórych przypadkach zaleca się zastosowanie przewodu neutralnego N o przekroju większym niż przekrój przewodów fazowych bądź zastosowanie dwóch przewodów neutralnych.

Tabl. 4. Współczynniki poprawkowe obciążalności układanych na stałe 4-żyłowych przewodów obwodów trójfazowych w zależności od względnej wartości prądu w żyłce neutralnej N (PEN) [12, 24]

Stosunek prądu w przewodzie neutralnym do prądu w przewodzie fazowym $v = \frac{I_N}{I_L}$	Sposób układania przewodów										
	A1	A2	B1	B2	C	E	F				
	w rurze lub listwie				bez rury lub listwy						
	w ścianie termoizolacyjnej		po wierzchu, na ścianie przewody stykające się			w odległości od ściany					
	jednożyłowe	wielozżyłowe	jednożyłowe	wielozżyłowe	wielozżyłowe	wielozżyłowe	jednożyłowe niestykające się				
								0,3 × d	1,0 × d		
										jednowarstwowo	wiązka
Współczynnik poprawkowy r											
$v \leq 0,2$	1,00	1,00	1,00		1,00			1,00	1,00		
$0,2 < v \leq 0,4$	0,97	0,97	0,97		0,97			0,97	0,96		
$0,4 < v \leq 0,6$	0,94	0,94	0,94		0,94			0,95	0,93		
$0,6 < v \leq 0,8$	0,91	0,91	0,91		0,91			0,93	0,90		
$0,8 < v \leq 1,0$	0,87	0,87	0,87		0,87			0,89	0,86		
$1,0 < v \leq 1,2$	0,83	0,83	0,83		0,83			0,85	0,82		
$1,2 < v \leq 1,4$	(0,78)	0,78	(0,78)		0,78			(0,80)	(0,77)		
$1,4 < v \leq 1,6$	(0,72)	0,72	(0,72)		0,72			(0,73)	(0,71)		
$1,6 < v \leq 1,8$	(0,65)	0,65	(0,65)		0,65			(0,66)	(0,64)		
$1,8 < v \leq 2,0$	(0,57)	0,57	(0,57)		0,57			–	–		

Uwagi:

- Przez współczynnik poprawkowy r należy pomnożyć obciążalność długotrwałą przewodów I_{23} odczytaną w PN-IEC60364-5-523 (dla 3 żył obciążonych prądem), aby otrzymać obciążalność przewodów czterożyłowych o identycznych żyłach (lub 4 identycznych przewodów jednożyłowych) $I_{24} = r \times I_{23}$, przy czym żyła neutralna (przewód neutralny) jest obciążona w stopniu v . Wszystkie wartości prądu są wartościami skutecznymi.
- W układzie TN-C stosunek v oznacza względną wartość prądu w przewodzie PEN. Układ TN-C jest niezalecany przy większych wartościach stosunku v , na przykład $v > 0,5$.
- Wartości współczynnika poprawkowego r podane w nawiasie oznaczają, że w tych przypadkach należy rozważyć zastosowanie przewodu neutralnego N o przekroju większym niż przekrój przewodów fazowych bądź zastosowanie dwóch przewodów neutralnych.

Informacja o wartości skutecznej prądu obciążenia z uwzględnieniem wyższych harmonicznym oraz wartości prądu w przewodzie neutralnym nie jest wystarczająca do określenia najmniejszego dopuszczalnego przekroju przewodu. Harmoniczne wysokich rzędów (np. 23., 49.) sprawiają, że trzeba bardziej przewymiarować przewód, niż kiedy w prądzie będą głównie harmoniczne stosunkowo niskich rzędów (np. 5., 7), nawet jeżeli w obu przypadkach stopień THD_i jest identyczny. Im wyższy rząd harmonicznym, tym bardziej wzrasta rezystancja przewodu w stosunku do warunków, kiedy przez przewód płynie prąd nieodkształcony (w wyniku zjawiska naskórkowości). W przewodzie powstają dodatkowe straty mocy, co oznacza wzrost jego temperatury. W większym stopniu wyższe harmoniczne będą wpływać na przewody o dużych przekrojach niż na przewody o małych przekrojach.



Dokładne uwzględnienie wpływu wyższych harmonicznych na obciążalność przewodów jest możliwe [1, 14], ale jest to zadanie skomplikowane. W pracy Ch. Demouliasa i wsp. [1] analizowano wpływ prądów o różnych kształtach na obciążalność przewodów czterożyłowych o przekrojach 16, 120 i 240 mm². Analizę przeprowadzono dla sytuacji, kiedy wszystkie żyły przewodu mają identyczny przekrój lub kiedy przewód neutralny ma przekrój mniejszy. Z analizy wynika, że przy prądach o dużej zawartości harmonicznych podzielnych przez 3 (prądy pobierane przez zasilacze impulsowe sprzętu elektronicznego, świetlówki kompaktowe) obciążalność przewodów ulega znacznej redukcji (o 29 ÷ 46%). Przy przebiegach prądów o małej zawartości harmonicznych podzielnych przez 3 należy zredukować obciążalność przewodów o kilka, kilkanaście procent.

3. REDUKCJA DOPUSZCZALNEGO OBCIĄŻENIA TRANSFORMATORA ZASILAJĄCEGO INSTALACJE OŚWIETLENIOWE

Straty w transformatorze dzieli się na jałowe i obciążeniowe. Straty jałowe nie zależą od obciążenia, a tym samym od tego, czy prąd obciążenia jest odkształcony czy nie. Straty obciążeniowe można podzielić na podstawowe i dodatkowe. Straty podstawowe powstają w uzwojeniach transformatora, a straty dodatkowe są wynikiem prądów wirowych w uzwojeniach pochodzących od strumieni rozproszenia oraz strat mocy zachodzących w częściach metalowych (np. kadź), obejmowanych przez strumienie rozproszenia. Prądy wyższych harmonicznych płynące przez uzwojenia transformatora powodują zwiększenie strat dodatkowych. Przyrost strat obciążeniowych oznacza wzrost temperatury uzwojeń, co przy odkształconym prądzie obciążenia o wartości skutecznej zbliżonej do prądu znamionowego transformatora może oznaczać przekroczenie temperatury dopuszczalnej długotrwale. Istnieje kilka metod [2, 4, 5, 17, 18, 26, 29, 35] pozwalających na określenie współczynnika redukcji mocy transformatora, którego uwzględnienie ma zapewnić, że przy danym odkształconym przebiegu prądu transformator nie zostanie cieplnie przeciążony. Niestety, wartość zredukowanej mocy transformatora wyznaczona różnymi metodami jest niejednakowa. Różnice mogą być znaczne. Poniżej zostanie przedstawiona metoda zawarta w normie PN-EN 50464-3:2007 [29].

Przy odkształconym przebiegu prądu obciążenia transformator można obciążyć następującą mocą:

$$S_H = \frac{S_n}{K} \quad (7)$$

gdzie:

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

S_n – znamionowa moc pozorna transformatora,

K – współczynnik redukcji mocy transformatora dla danego przebiegu odkształconego.

Współczynnik K wyznacza się z zależności:

$$K = \sqrt{1 + \frac{e}{1+e} \times \left(\frac{I_1}{I_\Sigma}\right)^2 \times \left[\sum_{h=2}^{h=n} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 \times h^q \right]} \quad (8)$$

gdzie:

e – stosunek strat obciążeniowych dodatkowych przy sinusoidalnie zmiennym prądzie obciążenia do całkowitych strat obciążeniowych, które występowałyby przy prądzie stałym (d.c.) o wartości identycznej, co wartość skuteczna sinusoidalnie zmiennego prądu obciążenia (z braku danych można przyjąć 0,05 ÷ 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 o rzędzie h ,

h – rząd wyższej harmonicznej,

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

Jeżeli transformator o mocy znamionowej 630 kVA byłby obciążony prądem o kształcie przedstawionym na rys. 14 (zasilanie pojedynczej lampy w warunkach laboratoryjnych), to można by z niego długotrwale czerpać moc równą:

$$S_H = \frac{S_n}{K} = \frac{630}{1,43} = 508 \text{ kVA} \quad (9)$$



czyli jego wykorzystanie byłoby ograniczone do poziomu 81% (przyjęto $e = 0,05$ oraz $q = 1,7$). W obiekcie o dużej liczbie lamp, które są dominującym obciążeniem transformatora, odształcenie prądu jest większe niż w warunkach laboratoryjnych (rys. 16) i trudne do przewidzenia [20]. Przy takim kształcie prądu moc, którą można długoterwale czerpać z tego transformatora, jest jeszcze mniejsza i wynosi 440 kVA ($0,7 \times S_n$).

4. WNIOSKI

Odształcenie prądu pobieranego przez urządzenia oświetleniowe zależy od zainstalowanego typu źródła światła i układu stabilizacyjno-zapłonowego, a także rodzaju i mocy źródła zasilania. Wpływ odształcenia prądu powinien być uwzględniony przy doborze zabezpieczeń, przewodów oraz transformatora zasilającego. Celowe jest więc dość dokładne rozpoznanie właściwości urządzeń oświetleniowych, które mają być zainstalowane w instalacji, w szczególności w zakresie zawartości wyższych harmonicznych w pobieranym prądzie. Jest to bardzo istotne wtedy, kiedy urządzenia te mają stanowić znaczny udział w łącznym zapotrzebowaniu na moc obiektu i obciążeniu transformatora zasilającego.

BIBLIOGRAFIA

1. Demoulias Ch., Labridis D.P., Dokopoulos S.P., Gouramanis K., Ampacity of Low-Voltage Power Cables Under Nonsinusoidal Currents. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2007, vol. 22, no. 1, s. 584–594.
2. Desmet J., Lemcko L., Harmoniczne. Dopuszczalna obciążalność i dobór transformatorów do pracy z prądem odształconym. Leonardo Power Quality Initiative. Jakość zasilania – poradnik, cz. 3.5.2, listopad 2005.
3. Det Norske Veritas. Rules for classification of ships. Part 4 – Machinery and Systems – Main Class. Chapter 4 – Electrical Installations. Edition 1999.
4. Faiz J., Sharifian M.B.B., Fakheri S.A., Sabet-Marzooghi E., Derating of Distribution Transformers for Non-sinusoidal Load Currents Using Finite Element Method. *Iranian Journal of Science & Technology*, Transaction B, 2004, vol. 28, no. B3, s. 315–322.
5. Filtracja i detekcja harmonicznych. Schneider Electric. Materiały firmowe.
6. Gabryjelski Z., Światłówki kompaktowe jako źródło zaburzeń elektromagnetycznych. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2007, nr 9, s. 100–103.
7. Gabryjelski Z., Praca świetlówek kompaktowych w sieci trójfazowej. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2007, nr 9, s. 42–43.
8. Gabryjelski Z., Odształcenie prądu w obwodach lamp fluorescencyjnych i wyładowczych połączonych ze statecznikiem indukcyjnym. *Archiwum Elektrotechniki*, 1982, t. XXXI, z. 1–2, s. 125–136.
9. Gabryjelski Z., Odształcenie prądu w obwodach lamp fluorescencyjnych i wyładowczych połączonych ze statecznikiem pojemnościowo-indukcyjnym. *Archiwum Elektrotechniki*, 1982, t. XXXI, z. 3–4, s. 571–581.
10. Gabryjelski Z., Kowalski Z.: Sieci i urządzenia oświetleniowe. Zagadnienia wybrane. Politechnika Łódzka. Łódź 1997.
11. Gabryjelski Z., Kowalski Z.: Przyczyny obciążania przewodów zerowych w sieciach oświetleniowych. *Gospodarka Paliwami i Energią*, 1977, nr 7, s. 21–23.
12. Hering E., Leitungen mit vier belasteten Leitern. *Elektropraktiker*, 2004, nr 9, s. 722–726.
13. Herlender K., Cadler E.: Wpływ sposobu zasilania nowoczesnych układów oświetleniowych na jakość energii elektrycznej. *Wiadomości Elektrotechniczne*, 2006, nr 3, s. 30–32.
14. Hiranandani A.: Calculation of Cable Ampacities Including the Effect of Harmonics. *IEEE Industry Applications Magazine*, March/April 1998, s. 42–51.
15. Instalacje elektryczne i teletechniczne. Poradnik monterów i inżynierów elektryków. Verlag Dashöfer. Część 5. Zabezpieczenia w instalacjach elektrycznych.
16. Kasprzak A., Orlikowski M., Brodecki D., O pewnych aspektach EMC dotyczących powszechnego wprowadzenia świetlówek energooszczędnych. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2007, nr 9, s. 104–105.
17. 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.
18. Kuśmierk Z., Współczynnik obciążenia transformatora zasilającego odbiorniki nieliniowe i jego pomiar. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2004, nr 6, s. 636–638.
19. Magdziak R. Układy zabezpieczeń w elektronicznych statecznikach świetlówek. *Elektronizacja*, 2000, nr 4, s. 18–19.
20. Musiał E., Czapp S., Opinia w sprawie zakłóceń wywołanych prądami wyższych harmonicznych w instalacji elektrycznej supermarketu OBI w Gdyni-Cisowej. Gdańsk 1999.
21. Musiał E., Bezpieczniki w nowoczesnych układach zabezpieczeń urządzeń niskiego napięcia. Ogólnopolskie Szkolenie Techniczne „Zabezpieczenia niskonapięciowych instalacji i urządzeń elektrycznych”. ENERGO-EKO-TECH, Poznań, październik 2001.
22. Musiał E., Zabezpieczanie silników zasilanych z pośrednich przemienników częstotliwości. INPE Informacje o Normach i Przepisach Elektrycznych, *Miesięcznik SEP*, 2004, nr 59–60, s. 3–35.



23. 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.
24. Musiał E., Obciążalność cieplna oraz zabezpieczenia nadprądowe przewodów i kabli. INPE Informacje o Normach i Przepisach Elektrycznych, *Miesięcznik SEP*, 2008, nr 107, s. 3–41.
25. Pabjańczyk W., Oszczędności energetyczne wynikające ze stosowania elektronicznych urządzeń stabilizacyjno-zapłonowych. *Wiadomości Elektrotechniczne*, 2000, nr 10, s. 540–543.
26. 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.
27. PN-EN 61000-3-2:2007 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Część 3-2: Poziomy dopuszczalne. Poziomy dopuszczalne emisji harmonicznych prądu (fazowy prąd zasilający odbiornika < lub = 16 A).
28. PN-IEC 60364-5-523:2001 Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych. Dobór i montaż wyposażenia elektrycznego. Obciążalność prądowa długotrwała przewodów.
29. PN-EN 50464-3:2007 Trójfazowe olejowe transformatory rozdzielcze 50 Hz od 50 kVA do 2500 kVA o najwyższym napięciu urządzenia nie przekraczającym 36 kV. Część 3: Wyznaczanie mocy znamionowej transformatora obciążonego prądem niesinusoidalnym. (oryg.)
30. Różowicz A., Systemy świetlne jako źródło zakłóceń. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2003, nr 4, s. 296–299.
31. Różowicz A., Skuteczność świetlna lamp fluorescencyjnych zasilanych prądem o różnej częstotliwości. *Wiadomości Elektrotechniczne*, 2004, nr 11, s. 15–18.
32. Rydzewski Z., Nowosielski J., Specyficzne cechy świetlówek jako odbiorników sieci trójfazowej niskiego napięcia. *Przegląd Elektrotechniczny*, 1973, nr 7, s. 331–335.
33. Starzak Ł., Bek S., Modelowanie kompaktowych lamp fluorescencyjnych do badań ich oddziaływania na sieć zasilającą. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2007, nr 9, s. 106–107.
34. Walejewski M., Analiza jakości energii elektrycznej w instalacjach oświetleniowych. Praca dyplomowa magisterska. Politechnika Gdańska, Gdańsk 2006.
35. 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.