

WŁAŚCIWOŚCI NISKOPRĘŻNYCH LAMP SODOWYCH I MOŻLIWOŚCI ICH ZASTOSOWANIA W KRAJOWYCH INSTALACJACH OŚWIETLENIOWYCH

Qualities of Low-pressure Sodium Lamps and Their Possible Applications in Domestic Lighting Systems

Zbigniew GABRYJELSKI

Politechnika Łódzka

Streszczenie: W artykule przedstawiono ogólny opis budowy i działania lamp sodowych niskoprężnych. Wyodrębniono najważniejsze parametry eksploatacyjne oraz cechy pozytywne i negatywne mające wpływ na możliwości ich zastosowania w krajowych instalacjach oświetleniowych. Wykazano, że wysoka skuteczność świetlna lamp sodowych niskoprężnych nie może być jedynym kryterium ich używania. W wielu przypadkach możliwości zastosowania mogą być ograniczone poprzez istotne negatywne cechy tych lamp.

Summary: The paper presents a general description of the construction and performance of low-pressure sodium lamps. The major operation characteristics and positive and negative features which influence the ways of their application in domestic lighting systems have been pointed out. It has been proved that the high luminous efficacy of low-pressure sodium lamps cannot be the only criterion for their applications, as in many cases the application possibilities are limited due to very significant negative features of these lamps.

1. WPROWADZENIE

Źródła światła o wysokiej skuteczności świetlnej wzbudzają zainteresowanie użytkowników oświetlenia zewnętrznego. Związane jest to przede wszystkim z chęcią ograniczenia opłat za energię elektryczną pobieraną do celów oświetlenia ulic, stąd częste zapytania ze strony gmin o możliwości użycia do oświetlenia ulicznego lamp sodowych niskoprężnych, będących źródłami światła o bardzo wysokiej skuteczności świetlnej. Zagadnienie to jest bardzo aktualne, także ze względu na przyszłościowy rozwój budowy w Polsce dróg szybkiego ruchu.

W kraju obserwuje się często rozbieżne poglądy na temat celowości stosowania tych lamp w instalacjach oświetleniowych. Artykuł ten ma na celu wyodrębnienie cech pozytywnych i negatywnych lamp sodowych niskoprężnych, jako źródeł światła i odbiorników energii elektrycznej, a przez to wyrobienie obiektywnego poglądu i ustalenie możliwego obszaru ich stosowania w krajowych instalacjach oświetleniowych.

2. LAMPY SODOWE W OSTATNIM STULECIU

Historia lamp sodowych niskoprężnych rozpoczęła się w roku 1920, kiedy odkryto specjalne szkło, odporne na działanie par sodu. W 1923 roku opublikowano pierwsze informacje, dotyczące wysokiej skuteczności świetlnej lamp sodowych, a w roku 1932 uruchomiona została w Holandii przez firmę Philips pierwsza instalacja, wykorzystująca lampy sodowe niskoprężne. Oświetlały one drogę pomiędzy Beek i Geleen; były niskonapięciowymi lampami prądu stałego, a ich skuteczność świetlna wynosiła 40 lm/W.

W tym samym roku była dostępna na rynku lampa na prąd przemienny o skuteczności świetlnej 60 lm/W. Aby utrzymać wysoką temperaturę pracy tej lampy, rurę wyładowczą umieszczono w dwuściennej, próżniowej osłonie. Rurze nadano kształt litery U, aby zredukować całkowitą długość lampy. Szkło użyte na rurę nie było w 100% odporne na sól i brązowało podczas działania lampy, zmniejszając w znacznym stopniu strumień świetlny.

W celu ograniczenia skutków ww. zjawiska wynaleziono nowe, bardziej odporne szkło, jednak sól nie trzymała się go. Zmusiło to producentów do wprowadzenia specjalnych zagłębień, które utrzymywałyby sól na miejscu. W celu ochrony podatnych na uszkodzenia zagłębień oraz redukcji strat ciepłych z gorącej rury wyładowczej, spowodowanych konwekcją, przewodzeniem i promieniowaniem, rurę umieszczono w odpompowanej bańce zewnętrznej, zamiast w odłączonej osłonie. Ten zupełnie nowy projekt wprowadzono w 1958 roku [1].

Od 1960 roku udoskonalenia skuteczności były głównie rezultatem lepszej izolacji cieplnoochłonnej rury wyładowczej, szczególnie redukcji strat promieniowania ciepłego. Pierwszą generacją filtra, który zatrzymywał ciepło, a przepuszczał światło, była powłoka z tlenku cyny na bańce zewnętrznej, wprowadzona w 1965 roku, która podniosła skuteczność świetlną do 140 lm/W [3].

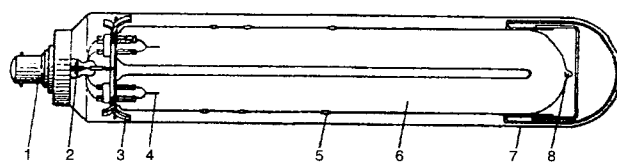
Użycie tlenku indu zamiast tlenku cyny umożliwiło w połowie lat 70. osiągnięcie 180 lm/W. Nowa generacja lamp z ulepszonymi odbłyśnikami podczerwieni została wprowadzona w 1983 roku. W tym okresie lampy sodowe niskiego ciśnienia osiągnęły skuteczność świetlną wynoszącą 200 lm/W. W 1993 roku na rynku pojawiła się najnowsza generacja lamp o podwyższonej trwałości.

Aż do lat siedemdziesiątych lampy sodowe niskiego ciśnienia działały w połączeniu z transformatorem rozproszeniowym, co dawało sinusoidalny kształt fali prądu lampy, chociaż działanie prądu o przebiegu prostokątnym jest bardziej efektywne i podnosi skuteczność świetlną. Nowy obwód, który produkuje kształt fali prądu zbliżony do prostokątnej, poprzez oddzielenie funkcji zapłonu i stabilizacji prądowej (funkcje te były spełniane w transformatorze rozproszeniowym), realizowany jest za pomocą tak zwanego statecznika hybrydowego (obwodu hybrydowego), który pozwala na zredukowanie strat mocy o 35% i zmniejszenie wagi układu w porównaniu z transformatorem rozproszeniowym.

Przyszłe, w pełni elektroniczne, układy zasilania sprawia, że skuteczność świetlna lamp sodowych niskiego ciśnienia wzrosła o następne 10%, do wartości 220 lm/W [7].

3. BUDOWA I ZASADA DZIAŁANIA LAMP SODOWYCH NISKOPRĘŻNYCH

Istnieje duże podobieństwo pomiędzy lampami sodowymi niskoprężnymi i lampami rtęciowymi niskoprężnymi (tj. świetłówkowymi) — działanie obu wymienionych typów lamp oparte jest na podobnym zjawisku, tzn. wyładowaniu elektrycznym w gazie, znajdującym się pod niskim ciśnieniem. Główna różnica polega na tym, iż w świetłówkach światło wytwarzane jest zasadniczo poprzez przekształcenie promieniowania ultrafioletowego, powstałego w następstwie wyładowania w parach rtęci, w promieniowanie widzialne za pomocą luminoforu, pokrywającego wewnętrzną powierzchnię rury wyładowczej, a w lampach sodowych niskoprężnych wytwarzane jest bezpośrednio w wyniku wyładowania elektrycznego w parach sodu. Głównymi częściami składowymi lampy sodowej niskoprężnej są: jarznik, elektrody, bańka zewnętrzna, gaz, wypełniająca jarznik i bańkę, oraz trzonek



Rys. 1. Niskoprężna lampa sodowa: 1 — trzonek bagnetowy do utrzymania pozycji; 2 — getter przeznaczony do utrzymania wysokiej próżni; 3 — sprężyny wsporcze; 4 — elektrody; 5 — zagłębienie do utrzymania sodu; 6 — szklany jarznik; 7 — bańka pokryta odbłyśnikiem promieniowania podczerwonego

(rys.1). W lampach sodowych niskoprężnych wyładowanie elektryczne dobiega się w specjalnie skonstruowanej rurce wyładowczej, zwanej jarznikiem. Podobnie jak w przypadku świetlówek, od mocy lampy zależy długość rury wyładowczej. Dla lamp o wyższych mocach ta długość jest znaczna (dochodzi do 1,1 m), w związku z tym jarznik lamp sodowych niskoprężnych prawie zawsze formowany jest w kształcie litery U, w celu zmniejszenia rozmiarów lampy, oraz zapewnienia lepszej izolacji termicznej [4].

Do konstrukcji jarznika nie stosuje się zwykłego szkła (nawet szkła kwarcowego), ponieważ pary sodu rozkładałyby krzem, a uwolniony krzem powodowałby, że szkło by mętniało i brązowieło. Zamiast szkła zawierającego krzem stosuje się więc specjalne szkła boranokrzemianowe. Szkło to jednak jest bardzo trudne do formowania i jednocześnie bardzo podatne na działanie par sodu. W związku z tym ostateczną postać szkła stosowanego na jarzniki lamp sodowych niskoprężnych uzyskuje się, pokrywając wewnętrzną powierzchnię szkła sodowo-wapniowego szkłem boranowym, tworzącym powłokę ochronną. Niezależnie od wszystkiego, należy ze szczególną ostrożnością wyżarzać bańkę szklaną, ponieważ pojawienie się w niej pęknięć doprowadzi do przedwczesnego zniszczenia lampy.

Jarznik lamp sodowych niskoprężnych zawiera pewną liczbę małych wydrzeń, w których podczas produkcji lampy składany jest sól. Mają one niższą temperaturę niż temperatura ścianki jarznika, przyciągają więc sól, który skrapla się, gdy lampa stygnie po wyłączeniu.

Rolę gazu buforowego spełnia mieszanina neonu (99% objętości) i argonu (1% objętości). Mieszanina ta zwana mieszaniną Penninga znajduje się pod ciśnieniem 1000 Pa.

Sól dodawany jest w fazie produkcji lampy. Proces ten trwa do momentu, aż wszystkie wydrzenia w jarzniku zostaną wypełnione.

Najnowsze lampy sodowe mają elektrody o zimnym zapłonie. Są one ukształtowane w formie trójskrętki, mogą więc pomieścić dużą ilość materiału emisyjnego. Jest to bardzo istotny czynnik, ponieważ w przypadku lamp o zimnym zapłonie występuje szybki ubytek materiału emisyjnego, pokrywającego elektrody, co prowadzi w konsekwencji do skrócenia żywotności lampy. Materiał emisyjny składa się z mieszaniny tlenku baru, strontu i wapnia.

Połączenia elektryczne z elektrodami są obecnie wykonywane ze stopu chromowo-żelazowo-niklowego. W przeciwieństwie do miedzi, wykazuje on dobrą odporność na działanie ciekłego sodu.

Z uwagi na znaczną wielkość jarznika i fakt, iż temperatura jego bańki musi być utrzymywana na poziomie 250 °C, dla uzyskania optymalnego ciśnienia par sodu, zasadnicze znaczenie dla pracy lampy sodowej niskoprężnej ma zapewnienie dobrej izolacji termicznej jarznika. Warunek ten spełniony jest dzięki odpowiedniej konstrukcji bańki otaczającej jarznik.

Bańka zewnętrzna, wykonana ze szkła sodowo-wapniowego musi wytrzymać wysoką próżnię, jeśli mają być zachowane jej właściwości termoizolacyjne. W celu utrzymania próżni w bańce, wprowadza się w obszar trzonka lustra getterowe, wykonane z baru. Bar usuwa z wnętrza bańki wodór, wydzielany podczas pracy lampy przez różne jej elementy.

Wszystkie jednostronnie trzonkowane lampy sodowe niskoprężne mają trzonek bagnetowy typu BY22. Zaletą trzonka bagnetowego, w porównaniu z trzonkiem z gwintem, jest możliwość dokładnego ustawienia lampy w oprawie oświetleniowej w stosunku do odbłyśnika. Jest to bardzo istotny element, ponieważ lampy sodowe niskoprężne nie mają symetrycznego rozsyłu strumienia świetlnego w płaszczyźnie prostopadłej do osi lampy.

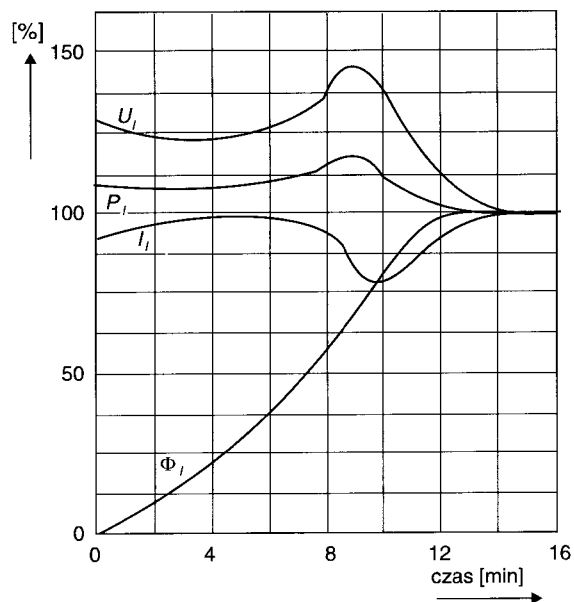
Skomplikowana budowa lampy, i co za tym idzie stosunkowo wysoka cena, może być uznana za jej cechę negatywną. Następną wadą lampy są jej duże wymiary liniowe, powodujące trudności z kształtowaniem odpowiedniego rozsyłu strumienia świetlnego.

Lampy sodowe niskoprężne prawie zawsze wyposażone są w nie podgrzewane elektrody, dlatego też proces zapłonu tych lamp można porównywać do zapłonu świetlówek o zimnych elektrodach. W obu przypadkach wielkość impulsu napięciowego, niezbędnego do zapłonu lampy, zależy w bardzo dużym stopniu od składu mieszaniny gazów w zimnej lampie.

W przypadku lamp sodowych niskoprężnych, sód nie tworzy mieszaniny Penninga z argonem (brak par sodu w zimnej lampie). Mieszaninę tę tworzy sam gaz buforowy, będący w istocie mieszaniną neonu i argonu i to pozwala uniknąć ekstremalnie dużego impulsu napięciowego dla uzyskania zapłonu lampy. W ten sposób zapłon lamp sodowych niskoprężnych możliwy jest już po przyłożeniu napięcia mieszczącego się w przedziale: 500–1500 V (w zależności od typu lampy).

Charakterystyki podstawowych parametrów podczas rozruchu lampy niskoprężnej sodowej (w stanie nieustalonym lampy) pokazano na rysunku 2.

Po zapłonie i jonizacji gazu powstaje w jarzniku wyładowanie neonowe, rozpoznawalne po jego charakterystycznej, czerwonej barwie. Ciepło, wytworzone przez wyładowanie elektryczne, szybko podgrzewa ścianki jarznika i topi sód oraz doprowadza do jego częściowego parowania. Ciśnienie par sodu rośnie, aż do wartości 0,7 Pa, przy temperaturze 260°C. W tym stanie jarznik emituje dwa promieniowania o długościach fal: 589 nm i 589,6 nm, tzw. dublet sodowy. Czerwona barwa promieniowania, wytworzonego przez promieniowanie neonowe, gwałtownie znika, ponieważ poten-



Rys. 2. Przebieg podstawowych parametrów sodówki niskoprężnej w zależności od czasu: U_1 — napięcie lampy; P_1 — moc lampy; Φ_1 — strumień świetlny lampy; I_1 — prąd lampy

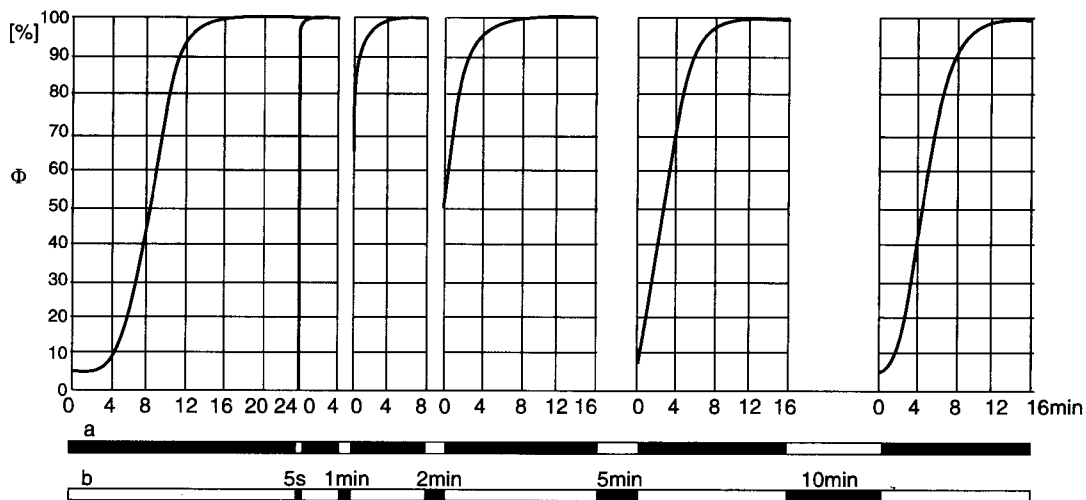
cjały wzbudzenia i jonizacji są znacznie niższe dla sodu niż dla neonu.

Podczas procesu rozświetlania, napięcie lampy zmienia się w dość szerokich granicach. Początkowo jest ono około 25% wyższe niż w stanie ustalonym (wyładowanie neonowe), potem natomiast wzrasta do wartości wynoszącej 150% wartości stanu ustalonego. Dzieje się tak, ponieważ sód zaczyna parować, a proces ten związany jest ze znacznymi stratami energii w wyładowaniu.

Lampy, znajdujące się w stanie rozświetlania, narażone są na szczególnie duże ryzyko wygaśnięcia. Powodem tego jest fakt, iż stan jonizacji gazu gwałtownie maleje, jeśli przez lampę nie płynie żaden prąd (dzieje się tak w momencie przejścia sinusoidy przez zero). Lampy małej mocy, mające niższe napięcie pracy, rozświetlają się natychmiast ponownie pod wpływem następnej sinusoidy napięcia zasilającego, lampy o większych mocach wymagają natomiast zastosowania w tym celu specjalnych środków. Pierwszym sposobem jest zwiększanie maksymalnej wartości sinusoidalnego napięcia zasilania. Drugi sposób polega na skróceniu „martwego okresu”, podczas którego prąd lampy zbliżony jest do wartości zerowej. Oba sposoby, zapewniające natychmiastowe ponowne rozświetlenie lampy, realizowane są za pomocą specjalnie skonstruowanych dławików.

Długi czas ustalania się parametrów elektrycznych i świetlnych podczas zapłonu zimnej lampy (około dwa razy większy niż innych lamp wyładowczych) oraz ryzyko zgaśnięcia podczas rozświetlania są poważnymi wadami lamp sodowych niskoprężnych.

Podobnie jak świetlówki (a w przeciwieństwie do lamp rtęciowych wysokoprężnych), lampy sodowe niskoprężne mogą być jednak ponownie zaświecone natychmiast po wystąpieniu przerwy w zasilaniu, co jest ich zaletą. Czas ustalania się parametrów zależy w tym przypadku od czasu przerwy w zasilaniu (rys. 3).

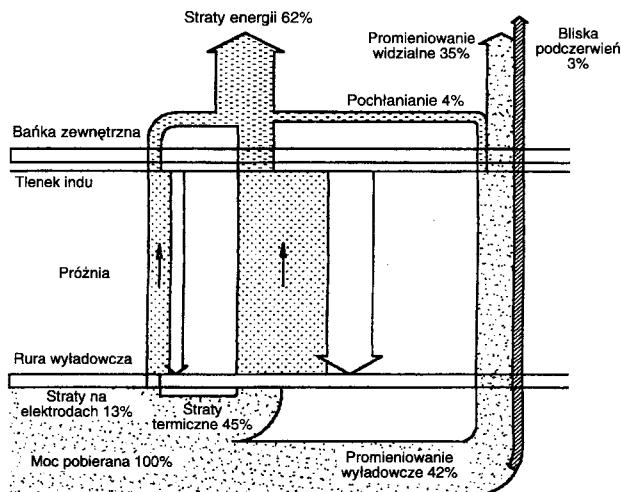


Rys. 3. Przebieg strumienia świetlnego lampy sodowej niskoprężnej w zależności od pracy (a) i wyłączenia (b)

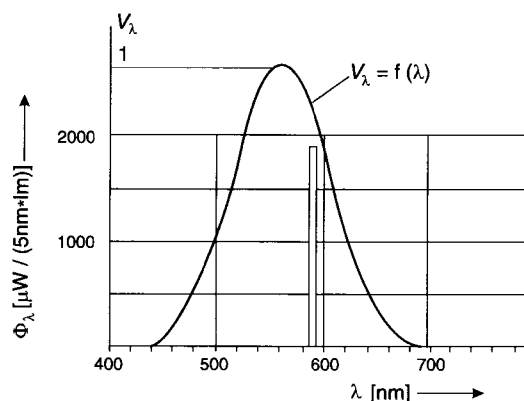
4. WŁAŚCIWOŚCI EKSPLOATACYJNE LAMP SODOWYCH NISKOPRĘŻNYCH

Bilans energetyczny i skuteczność świetlna lampy

W celu zmniejszenia strat ciepłych oraz utrzymania jednorodnego rozkładu temperatury na jarzniku, wynoszącej 260 °C, gwarantującego optymalne warunki pracy lampy, bańka zewnętrzna lampy sodowej niskoprężnej pokryta jest przezroczystą warstwą złożoną z tlenku indy (In_2O_3) aktywowanego cyną. Warstwa ta charakteryzuje się dobrą przepuszczalnością promieniowania widzialnego i dobrymi właściwościami odbijającymi dla promieniowania podczerwonego. Bilans energetyczny dla lampy sodowej niskoprężnej o mocy 180 W przedstawia się następująco: z mocy dostarczonej do jarznika, przyjętej za 100%, 13% tracone jest na elektrodach, 45% — na ściankach jarznika w postaci energii cieplnej, a 42% jest zamienione na promieniowanie, z czego 3% stanowi bliska podczerwień, 4% promieniowania widzialnego jest pochłaniane przez warstwę tlenku indy oraz bańkę zewnętrzną (rys.4) [8].



Rys. 4. Bilans energetyczny sodówki niskoprężnej o mocy 180 W



Rys. 5. Widmo promieniowania sodówki niskoprężnej

Promieniowanie lampy sodowej niskiego ciśnienia mieści się prawie całkowicie w przedziale promieniowania widzialnego. Pomimo tego, że tylko 35% mocy wejściowej zamieniane jest na promieniowanie w tym przedziale — w porównaniu z prawie 65% dla lamp rtęciowych niskoprężnych — skuteczność świetlna lamp sodowych niskoprężnych jest dwukrotnie wyższa niż skuteczność świetlna świetlówek. Dzieje się tak, ponieważ dwa prążki promieniowania lamp sodowych niskoprężnych znajdują się w pobliżu długości fali, przy której występuje maksymalna czułość widzenia oka ludzkiego (555 nm) — rysunek 5.

Sprawność fotometryczna określona wzorem:

$$\eta_f = \frac{\int_{\lambda=380}^{\lambda=780} P_\lambda V_\lambda d\lambda}{\int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} P_\lambda V_\lambda d\lambda} \quad (1)$$

gdzie:

P_λ — moc promieniowania przy długości fali świetlnej λ ,

V_λ — względna skuteczność widmowa promieniowania monochromatycznego,

jest dla tych lamp największa z wszystkich znanych lamp wyładowczych. Generalnie, im wyższa moc lampy sodowej niskoprężnej, tym większa jest skuteczność świetlna, np. dla lampy SOX-E 18 wynosi ona 103 lm/W, dla lampy SOX-E 66 — 165 lm/W, natomiast dla lampy SOX-E 131 — 203 lm/W. Warto zaznaczyć, że podane wartości skuteczności świetlnych odnoszą się do lamp, pracujących w określonych, optymalnych warunkach. W praktyce, lampy pracować muszą w powiązaniu z dławikiem, który charakteryzuje się określoną stratnością, co wpływa oczywiście ujemnie na sprawność układu. Przykładowe wartości najważniejszych parametrów elektrycznych i świetlnych dwóch lamp sodowych niskoprężnych produkcji firmy Philips podano w tabeli 1.

Tabela 1. Porównanie parametrów lamp SOX-E 131 i SOX-E 180

Typ lampy		SOX-E 180	SOX-E 131
Moc lampy	[W]	180	127
Moc systemu	[W]	212	147
Strumień świetlny	[lm]	32300	25800
Skuteczność świetlna lampy	[lm/W]	179	203
Skuteczność świetlna	[lm/W]	152	176

Spadek strumienia świetlnego

Podczas pracy lampy sód wykazuje tendencję do przemieszczania się w jarzniku w kierunku jego zagięcia. Dzieje się tak, ponieważ sód skrapla się w najchłodniejszych miejscach rury, tzn. w zagłębieniach i na jej zagięciu. Gęstość sodu w jarzniku zmniejsza się więc, co prowadzi do wzrostu napięcia wytworzonego łuku elektrycznego. Efekt ten jest częściowo zmniejszany poprzez zastosowanie specjalnych elementów (metalowe krążki), umieszczonych w zagięciu jarznika, które spełniają rolę osłon cieplnych, ale pomimo tego przemieszczenie sodu w jarzniku nadal występuje.

Zwiększenie się napięcia łuku prowadzi do zwiększenia mocy lampy, a więc wzrasta i jej strumień świetlny. Ten wzrost strumienia świetlnego kompensowany jest przez równoczesny spadek, spowodowany czernieniem jarznika (osadzanie się emitera na jego ściankach) i odparowaniem się szkła (agresywne działanie sodu).

Ostatecznym rezultatem opisanych powyżej zjawisk jest bardzo nieznaczny spadek strumienia świetlnego lampy sodowej niskoprężnej oraz zmniejszenie się w bardzo istotnym zakresie skuteczności świetlnej lampy.

Nadmierne przemieszczanie sodu może zostać ograniczone poprzez zapewnienie stabilnej, zgodnej z zaleceniami, pozycji świecenia źródła. Istotnym dla ww. kwestii jest również ograniczenie wibracji i wstrząsów opraw oświetleniowych, w których pracują lampy sodowe niskoprężne — instalacja oświetleniowa powinna być wykonana w sposób solidny, stabilny i pewny.

Trwałość ekonomiczna

Jest to czas świecenia wyrażony w godzinach, po którym następuje 30% spadek strumienia świetlnego w określonej instalacji oświetleniowej. Podana powyżej wartość spadku strumienia świetlnego instalacji obejmuje głównie redukcję strumienia świetlnego będącego konsekwencją wygaśnięcia części źródeł.

Trwałość ekonomiczna lamp sodowych wynosi około 10 000 godzin. Warto tutaj wspomnieć o nowej rodzinie lamp sodowych niskoprężnych oznaczonych symbolem SOX-PLUS.

W lampach SOX-PLUS zastosowano technologię lamp SOX-E, która różni się do standardowej lampy SOX konstrukcją bańki i elektrod. Producenci tych lamp gwarantują trwałość ekonomiczną 12 000 godzin (lub 3 lata eksploatacji). Sprawność świetlna tych lamp po gwarantowanym czasie użytkowania wynosi 85–95% stanu pierwotnego.

Trwałość eksploatacyjna

Jest to czas wyrażony w godzinach, po którym więcej niż 50% wszystkich zainstalowanych źródeł przestaje świecić. Trwałość eksploatacyjną źródeł wyznacza się w ściśle zdefiniowanych warunkach (dopuszczalne odchylenia napięcia zasilającego, temperatura otoczenia, pozycja pracy źródła, stabilność położenia), przy określonej częstotliwości załączeń i wyłączeń.

Głównymi czynnikami, limitującymi trwałość eksploatacyjną lamp sodowych niskoprężnych są: wyparowywanie emitera z elektrod oraz uszkodzenia mechaniczne jarznika i bańki zewnętrznej (pęknięcia, nieszczelności). Wyparowywanie emitera jest powodem wzrostu napięcia lampy, aż do jej uszkodzenia. Nieszczelności jarznika prowadzą do prawie natychmiastowego zniszczenia lampy, a nieszczelności w bańce zewnętrznej powodują utratę izolacji termicznej. W rezultacie lampa będzie świecić czerwonym światłem (wyładowanie neonowe), co wskazywać będzie na fakt, iż zbyt mała ilość par sodu bierze udział w wyładowaniu.

Dla lamp sodowych niskoprężnych trwałość eksploatacyjna określana jest na poziomie około 15 000 godzin. W porównaniu z trwałością lamp sodowych wysokoprężnych produkcji wiodących firm, wynoszącą około 24 000 godzin, trwałość eksploatacyjna lamp sodowych niskoprężnych jest stosunkowo niska, co można uznać za ich wadę.

Barwą światła i oddawanie barw

Kilka chwil po załączeniu lampy sodowej niskoprężnej i osiągnięciu przez gaz ułatwiający zapłon stanu zjonizowanego, lampy świecą przyjemnym dla oka czerwonym światłem. Gdy lampa się rozgrzewa, barwa jej stopniowo zmienia się, aż do osiągnięcia barwy żółtej — trwa to około 12 minut od momentu zapłonu. Temperatura barwowa najbliższa światła lampy sodowej niskoprężnej wynosi około 1700 K.

Jak już wcześniej wspomniano, lampy sodowe niskoprężne emitują promieniowanie monochromatyczne (rys. 5). Oddawanie barw w ich przypadku praktycznie nie istnieje — gdyby posługiwać się metodą wskaźnika oddawania barw R_a , to jego wartość dla lamp sodowych niskoprężnych byłaby równa zero. Dla porównania — dobre od-

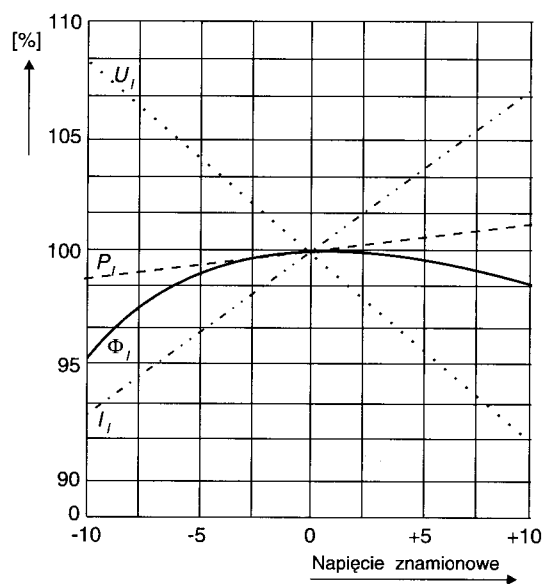
dawanie barw występuje, gdy wskaźnik $Ra = 85 \div 100$, średnie, gdy $Ra = 70 \div 85$, natomiast złe, gdy $Ra < 70$. Złe oddawanie barw jest największą wadą lamp sodowych niskoprężnych.

Wpływ temperatury otoczenia i napięcia zasilającego na pracę niskoprężnych lamp sodowych

Dzięki dobrej izolacji termicznej lamp sodowych niskoprężnych, zapewnionej przez bańkę zewnętrzną, zmiany temperatury zewnętrznej mają bardzo niewielki wpływ na właściwości eksploatacyjne lamp. Zapłon lamp nie jest uzależniony od temperatury otoczenia, ponieważ mieszanina gazów ułatwiających zapłon zachowuje podobne właściwości w bardzo szerokim zakresie temperatur.

Lampy sodowe zataczają się bez problemów w temperaturach do -50°C . Jedynym wyjątkiem są lampy, pracujące ze starterami elektronicznymi. Dla tych lamp minimalna temperatura otoczenia, przy której wystąpi pewny zapłon, wynosi -30°C (wartość ta uwarunkowana jest prawidłowym funkcjonowaniem elementów elektronicznych użytych w starterze).

Wpływ zmian napięcia na parametry lampy sodowej niskoprężnej pokazano na rysunku 6. W zakresie odchyłek napięcia wynoszących $\pm 0,05U_{zn}$ zarówno zmiany mocy lampy, jak i jej strumienia świetlnego są niewielkie, co także jest zaletą lampy sodowej niskoprężnej.



Rys. 6. Wpływ zmian napięcia na parametry lampy sodowej niskoprężnej: U_1 — napięcie lampy; P_1 — moc lampy; Φ_1 — strumień świetlny lampy; I_1 — prąd lampy

Pozycja pracy i tętnienie strumienia świetlnego

Dopuszczalne pozycje pracy dla lamp sodowych niskoprężnych uzależnione są od ich mocy. Lampy o mocach 18–55 W muszą pracować w pozycji pionowej z tolerancją $\pm 110^{\circ}$, lampy o wyższych mocach natomiast w pozycji poziomej z tolerancją $\pm 20^{\circ}$ [9].

Dopuszczalne pozycje pracy związane są przede wszystkim z ograniczeniem przemieszczania się ciekłego sodu w lampie i charakteryzują się większą dowolnością dla

lamp o niższych mocach, co wynika z niższej zawartości sodu w tych lampach.

Wprowadzenie odpornych na działanie sodu materiałów, z których wykonane są elementy zapewniające połączenia elektryczne wewnątrz lampy, pozwoliło na wyeliminowanie zjawiska natychmiastowego uszkodzenia się lamp w sytuacji, gdy ich pozycja pracy odbiega od pozycji dopuszczalnej, jednakże utrzymanie określonej pozycji lampy jest zawsze wymagane, co jest wadą tych lamp w porównaniu z innymi lampami wyładowcowymi.

Lampy sodowe niskoprężne pracują przy napięciu przemiennym o częstotliwości 50 Hz. Fakt ten, podobnie jak w przypadku pozostałych źródeł wyładowczych, jest bezpośrednią przyczyną zjawiska pulsowania strumienia świetlnego z częstotliwością równą dwukrotnej częstotliwości prądu płynącego przez lampę. Ponieważ lampy sodowe niskoprężne nie posiadają powłoki luminoforowej, współczynnik tętnienia strumienia świetlnego określany wzorem:

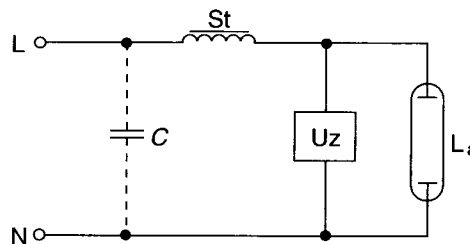
$$W = \frac{\Phi_{max} - \Phi_{min}}{\Phi_{max}} \quad (2)$$

jest większy niż np. w przypadku świetlówek. Dla typowych zastosowań lamp sodowych niskoprężnych fakt ten nie ma większego znaczenia i nie stanowi znaczącego problemu dla użytkowników.

5. UKŁADY PRACY LAMP SODOWYCH NISKOPRĘŻNYCH

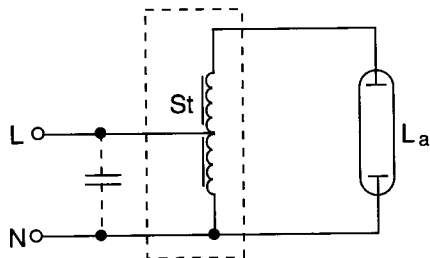
Układ z dławikiem

Lampy sodowe niskoprężne o małych mocach, charakteryzujące się stosunkowo niewielką długością i niskim napięciem pracy, mogą pracować w prostych obwodach elektrycznych, zawierających dławik włączony szeregowo z lampą i starter (tyrystorowy układ zapłonowy) włączony do niej równolegle (rys.7) [9].



Rys. 7. Zasilanie sodówek niskoprężnych — układ z dławikiem: St — statecznik; U_z — układ zapłonowy; C — kondensator; L_a — lampy; L, N — zaciski przyłączeniowe

W większych instalacjach oświetleniowych, część obwodów lamp musi być wyposażona w układy kompensacji mocy biernej (jest to realizowane za pomocą kondensatora, włączonego równolegle do sieci). W przypadku przesyłania przez sieć sygnałów wysokiej częstotliwości (np. zdalne sterowanie oświetleniem ulicznym), szeregowo z kondensatorem stosuje się filtr ww. sygnałów w postaci cewki.



Rys. 8. Zasilanie sodówek niskoprężnych — układ z transformatorem rozproszeniowym

Układy z dławikami są tańsze niż układy stałej mocy, lecz dzieje się to kosztem niższej skuteczności świetlnej systemu.

Układ z transformatorem rozproszeniowym

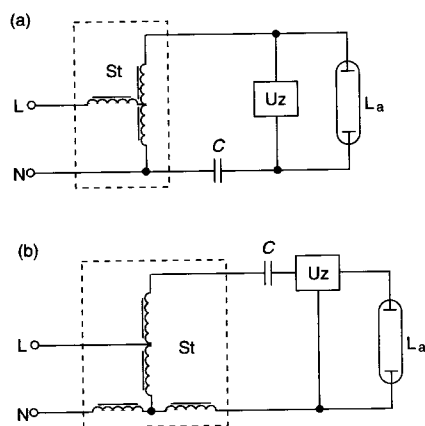
Ograniczenie prądu w lampach sodowych niskoprężnych było do niedawna realizowane za pomocą transformatorów rozproszeniowych. Jest to specjalny transformator, którego część uzwojeń spełnia rolę dławika (rys. 8). Stosunkowo wysoka wartość napięcia na wyjściu autotransformatora w stanie jałowym jest wystarczająca do uzyskania zapłonu lampy [9].

Podwyższenie napięcia konieczne jest nie tylko w celu zapłonu lampy, ma ono również znaczenie dla stabilnej pracy lampy w stanie rozświetlania, gdy napięcie na lampie gwałtownie wzrasta do wartości wynoszącej 150% napięcia nominalnego. Dzięki podwyższaniu napięcia skracany jest „martwy okres”, podczas którego prąd lampy zbliża się do wartości zerowej oraz zapewniony jest ponowny, pewny zapłon lampy po każdym przejściu sinusoidy napięcia zasilającego przez zero.

Istotna wada układów z transformatorami rozproszeniowymi związana jest z ich dużym ciężarem i dużymi stratami mocy. Oznacza to, że skuteczność świetlna systemu, w którym zastosowane są transformatory rozproszeniowe, jest generalnie niższa niż w przypadku pozostałych układów pracy lamp sodowych niskoprężnych.

Układy stałej mocy

Układy stałej mocy są tzw. układami hybrydowymi, składającymi się z kilku dławików, szeregowego kondensatora do kompensacji mocy biernej oraz elektronicznego zapłonika (rys.9).



Rys. 9. Układy hybrydowe zasilania sodówek niskoprężnych

Jedną z głównych funkcji tych układów jest uniemożliwienie wygaśnięcia lampy w czasie jej rozświetlania. Uzyskuje się to, wytwarzając napięcie o kształcie zbliżonym do prostokąta (zapewniony jest w ten sposób znacznie krótszy czas narastania impulsu napięciowego niż dla sygnału sinusoidalnego, a co za tym idzie — krótsza jest wartość „martwego okresu” napięcia i zmniejsza się ryzyko dejonizacji gazu).

Odpowiedni kształt napięcia uzyskiwany jest poprzez włączenie równoległe z lampą odpowiedniego układu elektronicznego (lub cewki o odpowiedniej impedancji), przy czym obwód elektroniczny jest integralną częścią zapłonika.

Układy stałej mocy mają szereg istotnych zalet w stosunku do układów z transformatorami rozproszeniowymi. Do najważniejszych z nich należą:

- wyższa skuteczność świetlna systemu,
- znacznie mniejsza waga,
- mniejsze tętnienie strumienia świetlnego,
- mniejszy wpływ zmian napięcia zasilania na moc lampy,
- brak problemów z zapłonem gorącej lampy.

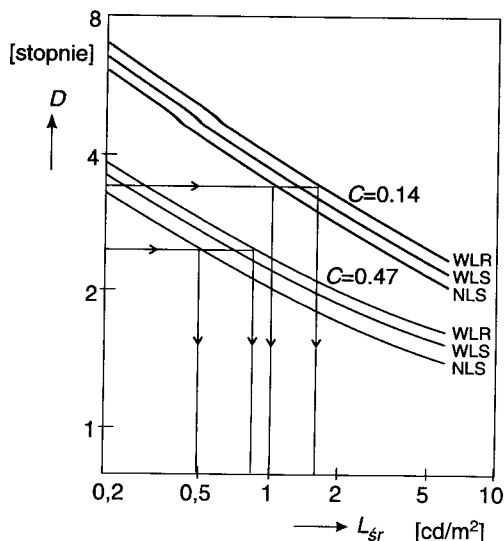
Natomiast wadą tych układów jest ich większy stopień skomplikowania w porównaniu z układami pracy np. lamp rtęciowych, czy lamp sodowych wysokoprężnych, a co za tym idzie ich znacznie wyższa cena i większa awaryjność.

6. WYDOLNOŚĆ WZROKOWA W ŚWIETLE LAMP SODOWYCH NISKOPRĘŻNYCH

Całkowita wydolność wzrokowa prowadzącego pojazd zależy od ostrości widzenia, szybkości percepcji i od czasu, jakiego potrzebuje kierowca, aby odzyskać równowagę po ostrym olśnieniu. Poniżej przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych w laboratorium na grupie obserwatorów, stosując do tego celu różne, używane w oświetleniu drogowym źródła światła: niskoprężne lampy sodowe (NLS), wysokoprężne lampy sodowe (WLS), wysokoprężne lampy rtęciowe (WLR) oraz żarówki (ŻAR) [11].

Ostrość widzenia

Zdolność dostrzeżenia małych szczegółów jest bardzo ważna w identyfikacji przeszkód na drodze. Badano ostrość widzenia grupy 26 osób, przy czym przedmiotem obserwacji była szczelina pierścienia Landolta, o wymiarze kątowym D , umieszczonego na ekranie w odległości 5 m, przy stałym kontraście C pomiędzy pierścieniem a ekranem. Czas ekspozycji wynosił 0,8 s. Stosowano trzy rodzaje źródeł światła, wyznaczając minimalny wymiar kątowy szczeliny pierścienia, jaki może być dostrzeżony przy danej luminancji tła L_{sr} [11]. Wyniki badań przedstawione zostały na rysunku 10. Z przedstawionych wykresów wynika, że aby osiągnąć tę samą ostrość widzenia luminancja tła (drogi) musi być ponad 1,5 razy większa przy oświetleniu WLR niż przy oświetleniu NLS. Wynika stąd pozytywna cecha niskoprężnych lamp sodowych jako źródeł stosowanych w miejscach, gdzie np. z uwagi na zapylenie (tunele) lub z przyczyn atmosferycznych występuje ograniczenie widoczności.



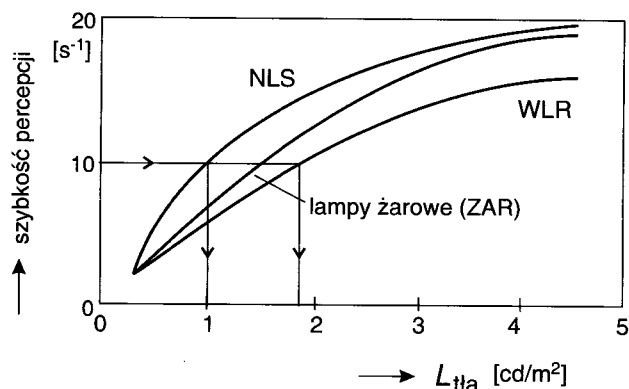
Rys. 10. Wymiar szczeliny D w pierścieniu Landolta, wymagany w celu poprawnej identyfikacji wynoszącej 80% w funkcji luminancji tła $L_{t\lambda}$ dla dwóch wartości kontrastu pierścieni

Szybkość percepcji

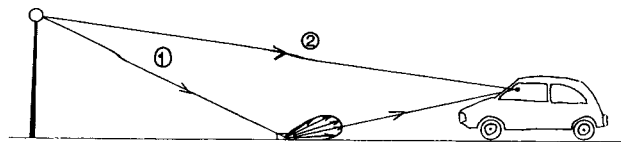
Szybkością percepcji S_p nazywa się odwrotność progowego czasu ekspozycji zgodnie z wzorem (3), gdzie t_{pe} jest najmniejszym czasem potrzebnym do identyfikacji przedmiotu. Badano doświadczalnie $S_p = f(L_{t\lambda})$ grupy obserwatorów dla przedmiotów w ruchu (pierścienie Landolta) ze szczeliną o wymiarze kątowym 4° , przy kontraście z tłem $C = 0,33$, przy oświetleniu kolejno trzema rodzajami źródeł światła [1].

$$S_p = \frac{1}{t_{pe}} \left[\frac{1}{s} \right] \quad (3)$$

Wyniki badań przedstawione zostały na rysunku 11. Z przedstawionych wykresów wynika, że dla zachowania tej samej szybkości percepcji luminancja tła przy oświetleniu WLR musi być około 1,5 do 1,8 razy większa niż przy stosowaniu NLS. Przy tej samej luminancji tła (drogi) szybkość percepcji jest największa w przypadku zastosowania NLS, co potwierdza przydatność stosowania tego rodzaju lamp do oświetlenia tras szybkiego ruchu.



Rys. 11. Zależności szybkości postrzegania S_p ruchomego przedmiotu przy kontraście 33% od luminancji tła $L_{t\lambda}$ dla trzech rodzajów źródeł światła



Rys. 12. Oświeślenie użytkownika drogi powodowane niewłaściwym rozsyłem światła oprawy oświetleniowej: (1) — światło oświetlające drogę, (2) — światło będące przyczyną oświeślenia

Czas odzysku wydolności

W instalacjach oświetlenia drogowego bardzo często zdarza się, że kierowca doznaje oświeślenia spowodowanego złym usytuowaniem opraw oświetleniowych albo ich niewłaściwym rozsyłem światłości (rys. 12). Czas potrzebny, aby kierowca odzyskał pełną wydolność wzrokową nazywa się czasem odzysku.

Badano czas odzysku wydolności wzrokowej dla trzech rodzajów źródeł światła (ŻAR, WLR, NLS), stosując jako obiekt identyfikacji pierścienie Landolta, przy luminancji tła $L_{t\lambda} = 0,5 \text{ cd/m}^2$ oraz luminancji zamglenia $L_v = 5 \text{ cd/m}^2$, wprowadzając źródło oświeślenia pod kątem 4° od osi wzroku. Następnie mierzono czas, jakiego obserwator potrzebował do określenia właściwego położenia obiektu obserwacji od momentu usunięcia źródła oświeślenia. Wyniki badań przedstawione są w tabeli 2.

Tabela 2. Czas odzysku wydolności po oświeśleniu

Źródło światła	Czas odzysku [s]
ŻAR	5,8
WLR	4,2
NLS	3,4

Czas odzysku wydolności jest najniższy w przypadku stosowania NLS, co przemawia za stosowaniem tych lamp w oświetleniu drogowym.

7. UWAGI KOŃCOWE

Bardzo nieliczne przypadki stosowania w kraju lamp sodowych niskiego ciśnienia do oświetlenia drogowego nie pozwalają na sformułowanie ogólnych stwierdzeń dotyczących eksploatacji tych lamp. Wydaje się jednak, że nadmierna liczba uszkodzeń mechanicznych jarzników lamp wynika z faktu instalowania opraw oświetleniowych na słupach, z których zdemontowane zostały oprawy do lamp rtęciowych. Drgania słupów i wysięgników, powodowane ruchem samochodowym, przenoszone są na lampy powodując ich przedwczesne uszkodzenia. Z poczynionych przez autora obserwacji wynika, że w Europie Zachodniej lampy sodowe niskoprężne stosowane są przede wszystkim w tzw. instalacjach łańcuchowych, gdzie oprawy mocowane są na linii nośnej, rozpiętej pomiędzy słupami umieszczonymi na pasie dzielącym jezdnię. Taka konstrukcja pozwala na łagodną amortyzację drgań, które nie wywołują oddziaływania mechanicznego na jarzniki lamp.

8. WNIOSKI

1. Stosowanie niskoprężnych lamp sodowych w instalacjach oświetleniowych jest bardzo ograniczone ze względu na złe oddawanie barw, związane z monochromatycznością promieniowania.
2. W krajowych instalacjach oświetleniowych niskoprężne lampy sodowe mogą znaleźć zastosowanie do oświetlenia dróg szybkiego ruchu, szczególnie w niekorzystnych warunkach atmosferycznych (mgła, deszcz) i przy dużym zapyleniu. Z możliwych zastosowań można tu wymienić także oświetlenie mostów i innych budowli wodnych, a także oświetlenie tuneli ze względu na możliwość uzyskania dużej luminancji w strefie progowej. Niskoprężne lampy sodowe mogą być także stosowane jako oświetlenie bezpieczeństwa wewnątrz sklepów i na zewnątrz domów prywatnych.
3. Dla konkretnego rozwiązania instalacji z użyciem lamp sodowych niskoprężnych należy szczegółowo rozważyć efekty, jakie uzyskujemy ze względu na ich wysoką skuteczność świetlną oraz koszty eksploatacyjne związane z wysoką ceną opraw, źródeł światła i pozostałego osprzętu.

LITERATURA

1. Begemann S., van Bommel W.: *Low-pressure sodium light and lighting — a review and a foresight*. Int. Light. Rev. 1983, 2.
2. *Fifty years sox*. Int. Light. Rev., 1982, 2.
3. *Informacje dla kierownictwa*. Centralny Ośrodek Badawczo-Rozwojowy COBR — POLAM, 1986, 1.
4. Philips Lighting Poland: *Katalog źródeł światła i baterii*, 1995, 4.
5. PN-76/E-02032 *Oświetlenie dróg publicznych*.
6. PN-91/E-04040 *Pomiary promieniowania optycznego. Pomiary fotometryczne*.
7. Riley D.: *SOX-PLUS saves You £'s*. Light. J. 1993, 6.
8. Sprengers L., Campbell R., Kostlin H.: *Low-pressure sodium lamps with a luminous efficacy of 200 lm/W*. J. IES 1985, 4.
9. Sturm V.: *Vorschaltgerätee und Schaltungen für Leuchtstofflampen*. BBC Brown-Boveri Cie A. G., Majnhelm, 1957.
10. *The Lighting Journal*, 1993, 6.
11. Van Bommel W. J. M., de Boer J. B.: *Oświetlenie dróg*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1984.



Dr inż. Zbigniew Gabryjelski

Adiunkt w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej. Urodzony 23.02.1943r. we Włocławku. Studia wyższe ukończył w 1969 na Wydziale Elektrycznym Politechniki Łódzkiej. W roku 1980 uzyskał stopień doktora nauk technicznych w dziedzinie elektroenergetyki. Jego działalność naukowa związana jest z elektroenergetyką przemysłową i oświetleniem elektrycznym. Jest autorem kilkudziesięciu publikacji

i opracowań naukowo-badawczych z dziedziny elektrycznego oraz autorem wielu wdrożonych projektów modernizacji oświetlenia ulicznego. Rzeczoznawca SEP w dziedzinie oświetlenia elektrycznego.

Dr inż. Adam SIWIK (Akademia Górniczo-Hutnicza)

Autor niezwykle ciekawie i obszernie omówił główne fotoelektryczne cechy niskoprężnych lamp sodowych, a nawet przedstawił podstawowe układy pracy tych lamp, wszak bez zwrócenia uwagi Czytelnikowi, że każda lampa wyładowcza jest nieliniowym odbiornikiem, a zatem może być traktowana jako źródło wyższych harmonicznych prądu i w pewnych określonych warunkach (przy odpowiedniej konfiguracji sieci, układzie zasilania oprawy, mocy zainstalowanych lamp, pojemności kompensujących kondensatorów itp.) może stać się źródłem różnorodnych zakłóceń sieciowych.

Wśród najistotniejszych potencjalnych zaburzeń sieci spowodowanych tego typu odbiornikami wymienia się [1–10] m.in.:

- odkształcenie od sinusoidy napięć ponad miary dopuszczalne przez odpowiednie standardy np. [5],
- możliwość cieplnego (prądowego) przeciążenia przewodów instalacji, w tym przede wszystkim przewodu ochronno-neutralnego PEN lub neutralnego N (szczególnie przy obecności harmonicznych prądu o kolejności zerowej),
- wzrost strat mocy czynnej w instalacji i urządzeniach,
- niską wartość współczynnika mocy konsumowanej energii,
- błędy w pomiarze energii indukcyjnymi licznikami,
- zjawisko flickeru,
- utrudnienie niektórych warunków pomiaru i diagnostyki w sieciach (np. wyładowań niezupełnych w izolacji [7]),
- duże wartości tzw. prądów włączania urządzeń indywidualnie kompensowanych,
- możliwość wystąpienia szeregowych i równoległych rezonansów w sieci,
- zawodność w działaniu wyłączników różnicowo-prądowych, instalowanych zwykle jako łączniki znamionowane na sinusoidalny prąd różnicowy.

Obecność większości wskazanych wyżej zaburzeń została potwierdzona w wybranych krajowych instalacjach oświetleniowych. I tak np., w instalacji oświetleniowej dużego miasta [10] zarówno ze źródłami sodowymi, jak i rtęciowymi stwierdzono istotne (powyżej 10% składowej podstawowej) zawartości wyższych harmonicznych prądu, rzędu 3, 5, 7, 9 i 11 oraz wartości współczynnika zawartości harmonicznych w prądzie — w przewodach fazowych — $THD_1 > 50\%$.

(THD — skrót z ang. „total harmonic distortion” — dla prądu określanego jako:

$$THD_1 = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{41} I_n^2}}{I_{50Hz}} \cdot 100\%$$

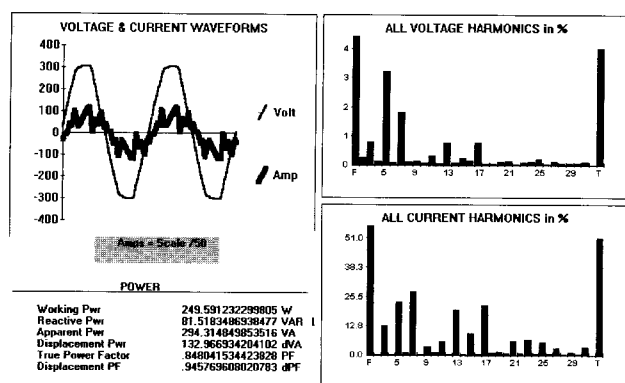
gdzie:

n — rząd harmonicznej)

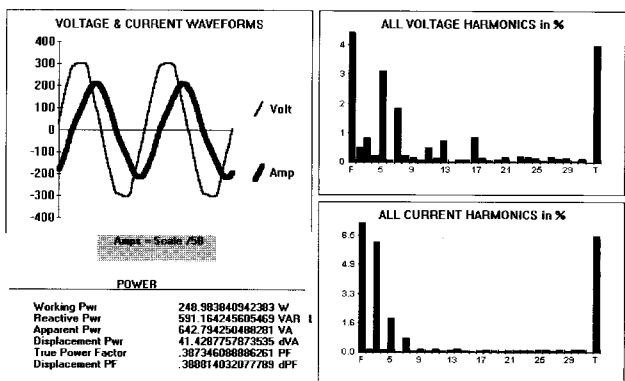
W szafie zasilającej oprawy ze źródłami sodowymi dobrze oświetlającymi drogę międzynarodową [10] stwierdzono nadmierne odkształcenie napięć od sinusoidy do poziomu $THD_U \approx 18\%$ wobec 8%, proponowanego przez [5].

Przypuszczam, że szczególne warunki pracy instalacji oraz wzrost zakłóceń w sieciach oświetleniowych będą

powodować układy zasilania opraw wyposażonych w indywidualne poprzeczne kondensatory kompensacyjne, takie jak Autor przedstawił na rysunkach 7 i 8. Na dowód tej prognozy na rysunkach 1 i 2 przedstawiam porównawcze wyniki pomiarów lampy sodowej o mocy 250 W umieszczonej w oprawie z kondensatorem poprzecznym o pojemności 32 μF zasilaną zgodnie z rysunkiem 7, a także tę samą lampę bez kondensatora. Pomiar wykonano w laboratorium Zakładu Elektroenergetyki AGH za pomocą przyrządu AMPROBE HARMONALYZER HA 2000.



Rys. 1. Kształt napięć i prądów, odpowiednie spektra częstotliwościowe oraz podstawowe dane źródła sodowego w oprawie z poprzecznym kondensatorem 32 μF . F — składowa podstawowa, T — współczynnik zawartości harmoniczných THD.



Rys. 2. Kształt napięć i prądów, odpowiednie spektra częstotliwościowe oraz podstawowe dane źródła sodowego, bez kompensacji mocy biernej.

Przy niskim poziomie harmoniczných w napięciu zasilającym — $\text{THD}_U < 5\%$ — lampę sodową (bez kondensatora w oprawie) eksponują się jedynie 3 i 5 harmoniczna prądu, przyjmując względne wartości do 5% wartości składowej podstawowej prądu, a więc zgodnie z np.[3]. W tych samych napięciowych warunkach zasilania, lecz przy poprzecznej kompensacji mocy biernej, oprawa stanowi już bardzo nieliniowy obiekt, o czym świadczy niezwykle szerokie spektrum prądów oraz wysoka wartość zawartości harmoniczných w prądzie przy $\text{THD}_I > 60\%$.

Podobne efekty występują także dla innych wyładow-

czych źródeł światła, przy skali zjawisk zależnej od wybranego układu zasilania i łącznej mocy zainstalowanych źródeł światła. Zdarzają się przypadki rezonansów szeregowych, prowadzących do trwałych, bądź okresowych przeciążeń instalacji lub aparatów elektrycznych. Obserwowano np. okresowe, kilkanaście lub kilkadziesiąt minut trwające wzrosty wartości prądów w całej instalacji zakładu, a szczególnie w obwodach oświetleniowych — przy przejściowych rezonansach, wywoływanych określonym stanem pracy energoelektronicznie sterowanych urządzeń technologicznych — ponad wartości przyjęte przy projektowaniu; niszczenie bezpieczników, a także prądowe przeciążenia kondensatorów małej mocy itp. W wielu przypadkach dla ograniczenia wartości płynących prądów, zlikwidowania prawdopodobieństwa zajścia rezonansu wystarczające jest użycie odpowiedniego dławika. Niejednokrotnie, z dobrym efektem dla użytkownika, można też zalecić zmniejszenie wartości pojemności kondensatorów poprzecznych w oprawach. Zmniejszenie udarowych prądów załączania oraz istotne ograniczenie generowanych harmoniczných prądu dla większości źródeł światła osiąga się poprzez stosowanie układów z szeregową kompensacją mocy biernej np. w tzw. układach hybrydowych, które Autor przedstawił na rysunku 9.

LITERATURA

1. Arsenau R., Ouellette M.: *The effects of supply harmonic on the performance of compact fluorescent lamps*. IEEE Trans. on Power Delivery 1993, 8, 2, 473–479.
2. Etezadi-Amoli, Florence T.: *Power factor and harmonic distortion characteristics of energy efficient lamps*. IEEE Trans. on Power Delivery 1993, 4, 3, 1965–69.
3. PN-EN 61000-3-2: 1997, *Kompatybilność elektromagnetyczna — Dopuszczalne poziomy — Dopuszczalne poziomemisji harmoniczných prądu* (fazowy prąd zasilania odbiornika $\leq 16\text{A}$)
4. Pietrucha R., Siwik A.: *Errors of electric energy measurement with three-phase meters in the presence of current higher harmonics*. Materiały 4 Międzynarodowej Konferencji Jakość i użytkowanie energii elektrycznej EPQU '97, Kraków-Przegorzały, 23–25 września, Kraków 1997, 277–284.
5. PN-EN-50160: *Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych (projekt)*.
6. Siwik A.: *Energooszczędne lampy wyladowcze jako źródła zakłóceń w sieciach niskich napięć*, JUEE 1996, II, 2, 3–8.
7. Siwik A.: *Jakość energii elektrycznej a zagrożenia eksploatacyjne i diagnostyczne przewodów i kabli elektroenergetycznych*, Mat. V Konf. „KABEL98” Politechniki Lubelskiej, Zakopane 1998, 232–245.
8. Siwik A.: *Ocena wybranych źródeł światła w aspekcie ich kompatybilności elektromagnetycznej i skuteczności świetlnej*, Mat. Konf. SEP, PKOŚ „Światło dla miasta i dla domu”, Warszawa 1995, 79–89.
9. Siwik A., Guła A., Hanzelka Z., Jaglarz A., Pietrucha R.: *Wyższe harmoniczne w instalacjach odbiorców komunalnych*, Mat. Konf. SEP Kraków, Inżynieria elektryczna w budownictwie-INELBUD'97, Politechnika Krakowska 1997, 40–46.
10. Siwik A., Guła A., Z. Hanzelka, A. Jaglarz: *Wyższe harmoniczne w miejskich sieciach oświetleniowych*. Mat. Konf. SEP „Energooszczędne oświetlenie w miastach”, Kraków 1997.