

Prof. dr hab. inż. Jan Dorosz
Politechnika Białostocka
Wydział Elektryczny

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Mariusza Deląga p.t.: „Właściwości energetyczno-światłne liniowych niskociśnieniowych rtęciowych lamp wyładowczych zasilanych prądem o różnej częstotliwości”

Rozprawa doktorska mgr inż. Mariusza Deląga poświęcona jest badaniom wpływu zmiany temperatury środowiska pracy i częstotliwości prądu na parametry świetlno-energetyczne niskociśnieniowych rtęciowych lamp wyładowczych.

Zgodnie z dyrektywami Unii Europejskiej dotyczącymi produktów wykorzystujących energię elektryczną rozwijane będą jedynie źródła światła o dużej efektywności, a do takich źródeł należą niskociśnieniowe rtęciowe lampy wyładowcze (często określane jako lampy fluorescencyjne) o średnicy 16 mm. Aktualnie lampy fluorescencyjne stanowią ponad 45% udziału w rynku i są one obecne w około 70-80% ogólnej liczby instalacji oświetleniowych.

Wymagane minimalne progowe skuteczności świetlne dla lamp fluorescencyjnych o średnicy 16 mm wynoszą zależnie od mocy świetlnej i współczynnika korekcji wynikającego z typu źródła od 85 lm/W do 106 lm/W. Dla innych źródeł światła określono wymagania dotyczące skuteczności świetlnej na poziomie co najmniej 120 lm/W. Dlatego też należy poszukiwać nowych rozwiązań, w wyniku których niskociśnieniowe rtęciowe lampy wyładowcze o średnicy 16 mm będą charakteryzowały się lepszymi parametrami świetlno-energetycznymi, przekraczając próg skuteczności świetlnej 120 lm/W.

W dostępnej literaturze nie spotyka się opisu wpływu jednoczesnej zmiany temperatury środowiska pracy i częstotliwości prądu w obwodzie lampy na parametry świetlno-energetyczne lamp. Brak wyników badań w tym zakresie uniemożliwia prawidłowe określenie mocy świetlnej systemu oświetleniowego przy określonej temperaturze środowiska pracy i częstotliwości prądu w obwodzie lampy. Ponadto, parametry świetlne lamp zależne są od właściwości luminoforów. Dane charakteryzujące te luminofory są skrzętnie ukrywane przez producentów. Publikowane wyniki badań dotyczą głównie luminoforów pojedynczych barw, a nie ich mieszanin, stosowanych właśnie w lampach w zależności od wymaganego współczynnika oddawania barw i temperatury barwowej.

Niemniej jednak, także dane fizykochemiczne luminoforów wąskopasmowych i wielopasmowych są trudno dostępne. Można je określić jedynie poprzez badania eksperymentalne - morfologię luminoforów.

Tematyka badań będące podjętych w rozprawie doktorskiej mgr. inż. Mariusza Deląga jest w pełni uzasadniona.

Licząca 138 stron, edytorsko staranna praca jest napisana jasno i podzielona na 8 logicznie następujących po sobie rozdziałów. Zawiera ona, poprzedzoną zestawieniem stosowanych oznaczeń, analizę stanu wiedzy (rozdział 2), cel, tezę i zakres pracy (rozdz. 3) oraz badania własne (rozdziały 4 - 7). Taki układ pracy jest poprawny - pozwala na jednoznaczną ocenę własnych osiągnięć jej Autora.

Przedmiotem rozprawy jest rozwiązanie oryginalnego zagadnienia naukowego, polegającego na:

1. Opracowaniu koncepcji i wykonaniu stanowiska badawczego do pomiaru luminancji energetycznej wyładowania niskiego ciśnienia rtęciowych lamp wyładowczych.
2. Przeprowadzeniu pomiarów luminancji energetycznej wyładowania niskiego ciśnienia dominujących linii widmowych w funkcji zmian częstotliwości prądu w obwodzie lampy i temperatury środowiska pracy.
3. Przeprowadzeniu badań morfologicznych i spektralnych luminoforów stosowanych w lampach o różnych wskaźnikach oddawania barw.
4. Opracowaniu koncepcji stanowiska badawczego do pomiaru parametrów świetlnych lamp przy zmianie temperatury otoczenia i częstotliwości prądu w obwodzie lampy.

Powyższy zakres badań jest następstwem wnikliwej analizy aktualnego stanu wiedzy przeprowadzonej w oparciu o obszerną literaturę, obejmującą 159 pozycji (w tym 20, to współautorskie publikacje Autora – w 5-u jako pierwszy autor), co pozwala twierdzić, że Autor dysponuje głęboką wiedzą przedmiotu.

Na podstawie tej analizy mgr inż. Mariusz Deląg (w rozdziale 3) sformułował tezę:

Temperatura środowiska pracy oraz częstotliwość prądu w obwodzie niskociśnieniowej rtęciowej lampy wyładowczej w sposób istotny wpływają na parametry energetyczno-świetlne lamp.

oraz cel pracy:

1. *Przeprowadzenie badań wielkości luminancji energetycznej wyładowania niskiego ciśnienia dominujących linii widmowych w funkcji zmian częstotliwości prądu w obwodzie lampy i temperatury środowiska pracy.*
2. *Opracowanie modelu matematycznego luminancji energetycznej wyładowania niskiego ciśnienia dominujących linii widmowych w funkcji zmian częstotliwości prądu w obwodzie lampy i temperatury środowiska pracy.*
3. *Przeprowadzenie badań morfologicznych luminoforów stosowanych w lampach o różnym wskaźniku oddawania barw.*
4. *Określenie wpływu zmian temperatury środowiska pracy i częstotliwości prądu w obwodzie lampy na parametry świetlne lamp o różnych temperaturach barwowych.*
5. *Określenie wpływu zmian temperatury środowiska pracy i częstotliwości prądu w obwodzie lampy na parametry elektryczne lamp.*

6. Opracowanie modelu matematycznego opisującego wielkości elektryczne lamp.

W pierwszej części recenzowanej pracy mgr inż. Mariusz Deląg w wyczerpujący sposób scharakteryzował niskociśnieniowe lampy wyładowcze (rozdział 2), omówił układy pracy lamp, podstawy fizyczne działania, mechanizm świecenia oraz czynniki wpływające na ich parametry. Krytycznie odniósł się do znanych z literatury modeli opisujących działanie lamp wyładowczych. Stwierdził, że charakterystyki napięciowo-prądowe tych lamp uwzględniają tylko parametry elektryczne wyznaczone w warunkach określonej temperatury otoczenia, która nie jest definiowana dla określonej częstotliwości prądu w obwodzie lampy. Brak badań wpływu jednoczesnej zmiany temperatury środowiska pracy i częstotliwości prądu w obwodzie lampy na parametry świetlno-energetyczne lamp uniemożliwia prawidłowe określenie mocy świetlnej systemu oświetleniowego przy określonej temperaturze środowiska pracy i częstotliwości prądu w obwodzie lampy. To skłoniło Autora do podjęcia badań w tym zakresie.

W rozdziale 4 Autor szczegółowo scharakteryzował promieniowanie UV emitowane przez niskociśnieniowe lampy wyładowcze, ich układy zasilania istotnie wpływające na parametry świetlno-energetyczne lamp oraz na poziom i rodzaj generowanych zakłóceń do sieci. Wskazał, że największy wpływ na wartość parametrów świetlno-energetycznych lamp ma wartość częstotliwości prądu w obwodzie lampy.

W celu określenia parametrów promieniowania rezonansowego par rtęci oraz wyznaczenia widm promieniowania rezonansowego w funkcji zmian temperatury otoczenia i częstotliwości prądu w obwodzie lampy mgr inż. Mariusz Deląg zbudował, przedstawione w rozdziale 4.2, stanowisko badawcze. Jego konfiguracja jest poprawna. Dla lampy o mocy 38W wyznaczył zależność luminancji energetycznej 4-ch linii rezonansowych UV par rtęci od temperatury otoczenia w zakresie od -30°C do $+50^{\circ}\text{C}$ przy częstotliwości prądu w obwodzie lampy 50 Hz. Pokazał, że luminancja energetyczna głównych linii rezonansowych 253,7 nm i 184,9 nm silnie zależy od temperatury otoczenia. Dla temperatury $+30^{\circ}\text{C}$ osiąga wartość maksymalną - dla 0°C to 28% tej wartości, a dla -30°C wynosi zaledwie 17,5% wartości maksymalnej, co jest uzasadnione słusznym wnioskiem Autora, że w niskich temperaturach małe wzbudzenie atomów rtęci jest następstwem niskiego ciśnienia par rtęci wewnątrz rury. Nadto, stwierdził, że wraz ze wzrostem temperatury powyżej $+30^{\circ}\text{C}$ następuje spadek luminancji do poziomu 92% wartości maksymalnej, czego przyczyną jest wzrost samoabsorpcji promieniowania rezonansowego spowodowanej wzrostem ciśnienia par rtęci, a przez to zmniejszeniem się średniej drogi swobodnej fotonu. Porównując wyznaczone zależności luminancji energetycznej od temperatury otoczenia lamp o mocy 23W i 38W stwierdził, że dla obu przypadków maksymalne wartości oscylują wokół temperatury $+30^{\circ}\text{C}$ i silnie zależą od temperatury otoczenia, a praktycznie są niezależne od mocy lampy. Są to bardzo ważne ustalenia Autora, szczególnie w kontekście eksploatacji niskociśnieniowych lamp wyładowczych.

Autor, poprzez zmianę częstotliwości od 50Hz do 50 kHz ocenił wpływ częstotliwości prądu w obwodzie lampy na wielkość jej promieniowania UV. Znaczący wzrost luminancji energetycznej w granicach 25-27% (w odniesieniu do częstotliwości 50 Hz) zaistniał w zakresie częstotliwości od 1 kHz do 20 kHz. W zakresach od 50 Hz do 1 kHz i powyżej 20 kHz wzrost nie jest znaczący i osiąga poziom 2-3%. Poprawnie zostały wyjaśnione mechanizmy rządzące tymi zmianami.

Logicznym następstwem przeprowadzonych badań jest rozdział 4.5 rozprawy poświęcony ocenie wpływu jednoczesnego oddziaływania temperatury otoczenia i częstotliwości prądu na wartość promieniowania rezonansowego UV. Badano lampy o mocach od 14 W do 55 W poddawane zmianom temperatury od -30 °C do +50 °C i równocześnie zmianom częstotliwości od 50 Hz do 50 kHz. Tabela 4.2 zawiera wyniki badań lampy o mocy 38 W. Wynika z nich, że różnice wartości monochromatycznej luminancji energetycznej odniesionej do temperatury otoczenia +30°C i częstotliwości prądu 50 Hz ($Le\lambda\%$) lamp o różnych mocach w takich samych temperaturach otoczenia są poniżej 3%. Na podstawie otrzymanych wyników opracował Autor model matematyczny luminancji energetycznej w funkcji częstotliwości prądu w obwodzie lampy i temperatury otoczenia, opisany zależnością 4.9 i zweryfikowany doświadczalnie dla lampy 38W. Błąd względny zawiera się w granicach od 0,2% do niespełna 5%. Jest to potwierdzeniem poprawności postępowania.

Znaczącym dla wartości naukowej rozprawy jest rozdział 5 poświęcony konwersji promieniowania UV na promieniowanie widzialne. Pary rtęci generują bowiem aż w 97% promieniowanie w nadfiolecie i tylko 3% w paśmie widzialnym. Promieniowanie w zakresie widzialnym osiąga się w procesie konwersji głównie poprzez dobór odpowiedniego rodzaju luminoforu i jego ułożenia względem promiennika. Skuteczność tej konwersji zależy bowiem od tego, czy fotoluminescencja zachodzi w wyniku pochłaniania, czy też odbijania promieniowania pierwotnego. Autor scharakteryzował wszystkie znane luminofory ze szczególnym uwzględnieniem ich składu chemicznego i mechanizmów wpływających na kształt pasm absorpcyjno-emisyjnych. Wyniki przeprowadzonych przez Autora badań spektralnych luminoforów stosowanych w lampach o średnicy 16 mm przedstawione zostały na rysunkach 5.1 - 5.5. Zwrócił uwagę na rolę aktywatorów i ich stężenia, a także elementów uczulających w luminoforze na jego skuteczność świetlną. Mając na uwadze, że w luminoforze mogą zachodzić interakcje między poszczególnymi składnikami, które mogą powodować efekty antagonistyczne lub synergistyczne w wyniku których można uzyskać zupełnie inne własności niż wynikające z cech każdego z nich słusznie uznał, że jedynie przeprowadzenie badań eksperymentalnych lamp o różnych konfiguracjach pokryć luminoforów pozwala na ocenę wpływu poszczególnych luminoforów na parametry świetlne lamp zasilanych prądem o różnej częstotliwości i pracujących w różnych temperaturach otoczenia. Autor dokonał także oceny wpływu rozmiaru cząstek i grubości warstwy luminoforu na zachodzące w tej warstwie procesy dyfuzji promieniowania, a przez to na strumień świetlny lampy. Obraz nałożonego luminoforu na

wewnętrzną część rury wyładowczej lampy przedstawił na rysunku 5.10. W rozdziale 5.4 mgr inż. Mariusz Deląg dokonał energetycznego bilansu niskociśnieniowej rtęciowej lampy wyładowczej. Konwersja z promieniowania wysokoenergetycznego na promieniowanie niskoenergetyczne prowadzi do strat energii promieniowania, dlatego wyznaczył zależność opisującą sprawność energetyczną luminoforu (5.9). Na tej podstawie stwierdził, że w lampach będących przedmiotem badań w tej rozprawie ciśnienie par rtęci należy ustalać tak, by dominowała linia rezonansowa $\lambda = 253,7$ nm, a nie druga linia rezonansowa rtęci $\lambda = 184,9$ nm.

Do oceny wpływu zmian temperatury otoczenia i częstotliwości prądu na parametry świetlne lamp (strumień świetlny, temperaturę barwową) Autor zaprojektował układ pomiarowy i zbudował stanowisko badawcze (Rys. 6.1). Zbadał grupę lamp o takich samych gabarytach i mocy oraz współczynniku oddawania barw $Ra \geq 80$ i $Ra \geq 90$. W przypadku lamp o współczynniku oddawania barw $Ra \geq 80$ użył lamp o temperaturze barwowej 2700 K, 3000 K, 4000 K i 6500 K, natomiast w przypadku lamp o współczynniku oddawania barw $Ra \geq 90$: 4000 K, 5400 K i 6500 K. Dokonał pomiarów strumienia świetlnego tych lamp dla częstotliwości prądu w obwodzie lampy 50 Hz i temperatury środowiska pracy $+30^\circ\text{C}$. Słusznie odniósł wykonane obliczenia skuteczności świetlnej lamp o częstotliwości prądu w obwodzie lampy większej od 50 Hz do wartości skuteczności świetlnej lampy o częstotliwości prądu w jej obwodzie równej 50 Hz i temperatury środowiska pracy $+30^\circ\text{C}$ (zależność 6.2). Pozwoliło to na jednoznaczną ocenę wpływu zmian częstotliwości prądu w obwodzie lampy na wartość strumienia świetlnego i skuteczności świetlnej lamp o różnej temperaturze barwowej emitowanego światła oraz różnych współczynnikach oddawania barw. Autor, na podstawie wyników badań wykazał silną zależność skuteczności świetlnej lamp od częstotliwości prądu w ich obwodzie i wyjaśnił, że wzrost częstotliwości prądu w obwodzie lampy skutkuje wzrostem luminancji energetycznej wyładowania w parach rtęci.

W celu wyjaśnienia występujących różnic względnej skuteczności świetlnej lamp (o różnych temperaturach barwowych) o tej samej częstotliwości prądu w obwodzie lampy przeprowadził badania parametrów świetlnych lamp pokrytych luminoforami jednopasmowymi (Rozdział 6.3.1).

Wynika z nich, że maksymalna skuteczność świetlna osiągnięta jest przy częstotliwości prądu w obwodzie lampy wynoszącej 20-23 kHz. Największą względną skuteczność świetlną wykazuje lampa pokryta luminoforem czerwonym, a najmniejszą lampa pokryta luminoforem niebieskim - a zatem, najbardziej istotnym elementem decydującym o skuteczności świetlnej lamp jest luminofor. W celu wyjaśnienia tych różnic, posłużwszy się metodą skaningu elektronowego, przeprowadził szczegółowe badania morfologiczne stosowanych w lampach mieszanin luminoforów – w tym: procentowego udziału luminoforów jednopasmowych, wpływu wymiarów cząstek, jednorodności i granulacji luminoforu, grubości warstwy luminoforu na parametry świetlne badanych lamp o różnych temperaturach barwowych o współczynnikach $Ra \geq 80$ i $Ra \geq 90$. Autor ustalił, że procentowe udziały

poszczególnych granulacji kryształów w luminoforach stosowanych w badanych lampach niewiele odbiegają od siebie (+/-1%). Jednakże stwierdził, że znaczący wpływ na temperaturę barwową lampy mają wymiary cząstek luminoforu. W luminoforach lamp o wyższych temperaturach barwowych występuje procentowo więcej kryształów o większej granulacji. Cechują się one większą samoabsorbpcją, co skutkuje zmniejszeniem strumienia świetlnego lampy.

W Rozdziale 7 przedstawił Autor wyniki badań nad wpływem równoczesnej zmiany temperatury otoczenia i częstotliwości prądu na charakterystyki napięciowo-prądowe. Znajomość parametrów napięciowo-prądowych lamp o różnych parametrach (mocy, długości rury wyładowczej, prądu lampy) o różnej częstotliwości prądu w obwodzie lampy i pracujących w różnych temperaturach umożliwiło opracowanie opisu matematycznego charakterystyki napięciowo-prądowej lampy.

Opis analityczny wpływu poszczególnych procesów zachodzących podczas wyładowania w lampie na parametry energetyczne jest utrudniony ze względu na wielość zjawisk zachodzących w przestrzeni łukowej. Procesy zachodzące w przestrzeni łukowej należy rozpatrywać więc uwzględniając złożoność procesów zachodzących wewnątrz rury oraz czynników zewnętrznych. Dlatego Autor uznał, że jedynie wiarygodną ocenę wpływu parametrów palącego się łuku na wielkości energetyczne lamp, które są zależne od zmian częstotliwości prądu w obwodzie lampy i temperatury środowiska pracy, można dokonać jedynie na podstawie badań eksperymentalnych. Stąd, konieczność budowy kolejnego stanowiska badawczego. (Rys. 6.1). Rejestrowano parametry elektryczne (częstotliwość, napięcie, prąd oraz ich przebiegi czasowe) oraz temperaturę. Na bazie otrzymanych wyników Autor zaproponował model matematyczny, który wykorzystał do opisu i symulowania pracy lamp po jego implementacji w środowisku MatlabSimulink (Rys. 7.16).

Opracowany model umożliwia dowolną zmianę parametrów oraz porównanie danych uzyskanych w drodze symulacji z danymi pomiarowymi. Jako funkcję celu przyjął Autor maksymalizację wartości współczynnika dopasowania modelu do danych empirycznych na poziomie $R^2 \geq 0,95$. Porównanie danych uzyskanych w trakcie badań z danymi modelowymi (rys. od 7.27 do 7.30) wskazuje, że wartość współczynnika determinacji R^2 mieści się w przedziale od 0,975 do 0,988 - to potwierdza poprawność opracowanego modelu lampy, który może być stosowany do projektowania układów pracy niskociśnieniowych rtęciowych lamp wyładowczych - także o innych niż 16 mm średnicach rury wyładowczej.

Postawione zadanie mgr inż. Mariusz Deląg rozwiązał w sposób oryginalny, wykazując tym samym bardzo dobre przygotowanie do samodzielnego rozwiązywania trudnych zagadnień teoretycznych, jak i związanych z praktyczną realizacją eksperymentu. Potwierdził to poprzez działania mające na celu udowodnienie postawionej tezy, przedstawione na wstępie tej recenzji.

Jako oryginalne osiągnięcia Autora uważam:

1. Opracowanie modelu matematycznego luminancji energetycznej wyładowania niskiego ciśnienia w funkcji zmian częstotliwości prądu oraz temperatury środowiska pracy.
2. Badania morfologiczne luminoforów oraz ich warstw stosowanych w lampach o różnym wskaźniku oddawania barw – zagadnienie o szczególnym stopniu trudności z racji ograniczeń w dostępie do zagadnień technologii luminoforów.
3. Określenie wpływu zmian częstotliwości prądu w obwodzie lampy oraz temperatury jej środowiska pracy na parametry świetlne lamp.
4. Opracowanie modelu parametrów świetlnych w funkcji zmian częstotliwości prądu w obwodzie lampy oraz temperatury jej środowiska pracy.
5. Określenie wpływu zmian częstotliwości prądu w obwodzie lampy oraz temperatury środowiska jej pracy na parametry elektryczne.
6. Opracowanie modelu charakterystyki napięciowo-prądowej w funkcji zmian częstotliwości prądu w obwodzie lampy oraz temperatury jej środowiska pracy.

Należy wskazać też na wyjątkowo staranne i obszerne udokumentowanie zrealizowanych pomiarów oraz wnikliwą analizę uzyskanych wyników. Uważam, że rozprawa z racji szerokiej, interdyscyplinarnej tematyki znacznie wykracza poza standardowo przyjęte ramy dla rozpraw doktorskich.

Przyjęte w rozprawie założenia są uzasadnione, właściwy dobór metod badawczych i pomiarowych oraz wnioski wynikające z wykonanych badań pozwalają stwierdzić, że postawione Autorowi zadanie zostało rozwiązane poprawnie, a cel rozprawy osiągnięty. Godne uwagi jest też to, że Autor zdaje sobie sprawę, że uzyskane wyniki badań nie wyczerpują zrealizowanej tematyki i widzi kierunki dalszych badań, w szczególności w zakresie zwiększenia efektywności systemów oświetleniowych poprzez doskonalenie luminoforów głównie decydujących o parametrach świetlnych lamp i pragnie kontynuować podjęte w tej rozprawie zagadnienia.

Uwagi wynikające z lektury rozprawy:

1. Autor niezgodnie z polskim nazewnictwem użył określenia „intensywność świecenia” – poprawnie jest „natężenie promieniowania”.
2. W Rozdziale 4.5 Autor informuje, że badano lampy o mocach od 14W do 55W, tymczasem w pracy zawarł wyniki tylko dla lampy o mocy 38 W. Jednocześnie podane wnioski dotyczą wszystkich lamp.
3. Autor stwierdza (str. 52), że warstwa luminoforu w lampie powinna mieć grubość od 3 do 4 ziaren. W takim przypadku strumień świetlny osiąga najwyższe wartości – dlaczego?
4. W jaki sposób zabezpieczył się Autor przed oddziaływaniem promieniowania UV podczas realizacji eksperymentalnej części pracy?

Powyższe uwagi podnoszę z racji obowiązku recenzenta, głównie w celu rozważenia ich w przypadku kontynuowania badań w tej tematyce. Nie wpływają na wartość recenzowanej rozprawy doktorskiej, którą oceniam bardzo wysoko.

Recenzowana rozprawa jest wartościowym osiągnięciem Autora i czyni ją znaczącą nie tylko w zakresie badań, projektowania i wytwarzania niskociśnieniowych lamp wyładowczych. Wyróżnia się ona oryginalnymi walorami poznawczymi, użytkowymi i wdrożeniowymi, przez co będzie przydatną pracownikom naukowym, jak również praktykom projektującym i stosującym nie tylko tego rodzaju źródła światła.

Wniosek

Osiągnięcia poznawcze zaprezentowane w pracy mgr. inż. Mariusza Deląga pozwalają mi stwierdzić, że spełnia ona wszelkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony. Nadto, mając na względzie jej naukowe wyniki wnioskuję o jej wyróżnienie.

Białystok, 17.11.2022 r.

