

Antoni RÓŻOWICZ
Sebastian RÓŻOWICZ
Mariusz DELĄG

IMPLEMENTACJA MODELU MATEMATYCZNEGO NISKOCIŚNIENIOWEJ RTĘCIOWEJ LAMPY WYŁADOWCZEJ W ŚRODOWISKU MATLAB/SIMULINK

STRESZCZENIE Przy projektowaniu układów pracy niskoprężnych rtęciowych lamp wyładowczych (lampa, układ stabilizacyjno-zapłonowy) konieczna jest dobra znajomość charakterystyk prądowo-napięciowych lampy oraz ich opis matematyczny. Opracowany model matematyczny o dużej wiarygodności odwzorowania pozwoli na szczegółową analizę układu pracy lampy, co jest bardzo ważne w aspekcie zwiększenia efektywności energetycznej układu. Do budowy modelu wykorzystano wyniki pomiarów na grupie lamp wyładowczych oraz wyniki symulacji komputerowych. Weryfikacja wyników symulacji potwierdziła wysoką zgodność z danymi pomiarowymi. Przedstawiono implementację modelu w postaci modułu utworzonego w Simulink. Gotowy moduł może stanowić jeden z elementów projektu układu zapłonowego lampy.

Słowa kluczowe: niskociśnieniowa rtęciowa lampa wyładowcza, układ zapłonowy, model matematyczny, simulink

dr hab. inż. Antoni RÓŻOWICZ, prof. P.Śk.

e-mail: rozowicz@tu.kielce.pl

mgr inż. Sebastian RÓŻOWICZ

e-mail: s.rozowicz@tu.kielce.pl

mgr inż. Mariusz DELĄG

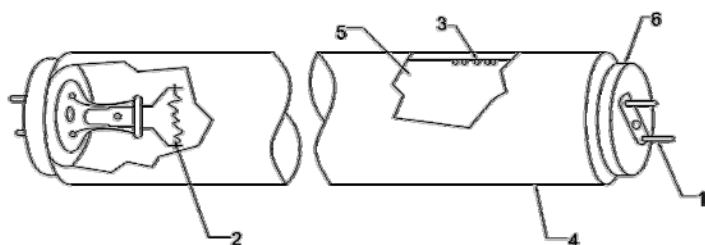
e-mail: m.delag@tu.kielce.pl

Katedra Urządzeń Elektrycznych i Techniki Świetlnej
Politechnika Świętokrzyska

1. WSTĘP

Najbardziej rozpowszechnioną niskociśnieniową rtęciową lampą wyładowczą jest lampa fluorescencyjna, zwana również świetlówką.

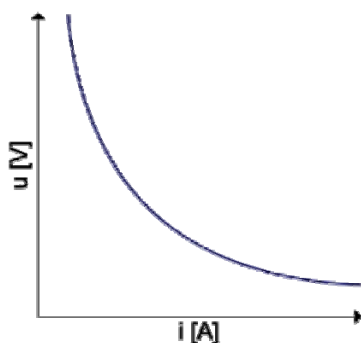
Zasada działania lamp fluorescencyjnych opiera się na wyładowaniu elektrycznym w parach rtęci o niskim ciśnieniu. Świetlówki są pokryte wewnątrz warstwą luminoforu, który wzbudzony przez promieniowanie nadfioletowe pochodzące z wyładowania emituje światło.



Rys. 1. Budowa świetlówki:
1 – kołki stykowe; 2 – elektroda; 3 – rtęć w stanie zimnym; 4 – rura szklana pokryta wewnątrz luminoforem; 5 – wypełnienie gazowe; 6 – trzonek

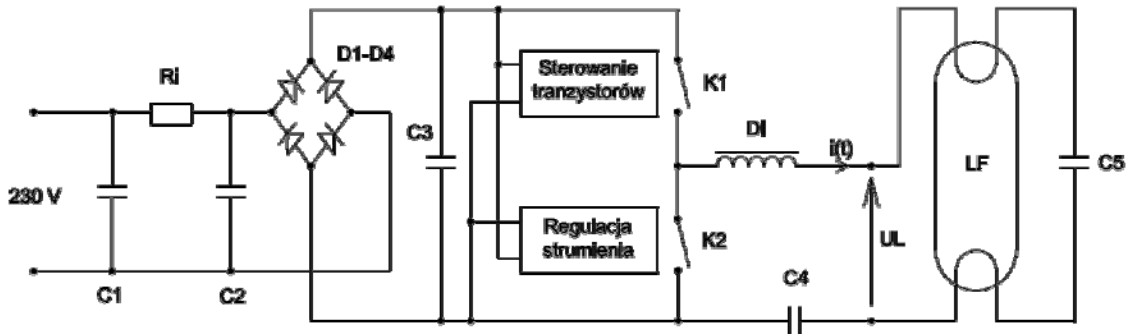
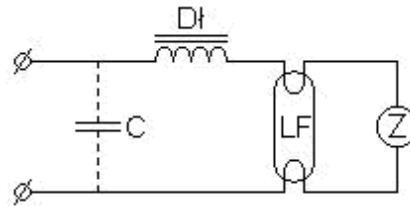
Niskociśnieniowe lampy wyładowcze zbudowane są z rury wyładowczej oraz elektrod. Wypełnia ją ściśle określona ilość rtęci oraz neutralny gaz szlachetny w celu regulacji łuku wyładowania i zapłonu lampy [3, 5]. Na wewnętrznej powierzchni rury nałożona jest cienka warstwa luminoforu, którego skład chemiczny wpływa na ilość, barwę oraz jakość emitowanego światła. Elektrody generują elektrony swobodne, które są przyspieszane przez pole elektryczne obecne w wyładowaniu, co w efekcie przekłada się na generację promieniowania UV konwertowanego przez luminofor na promieniowanie widzialne.

Lampa fluorescencyjna ma ujemną nieliniową charakterystykę napięciowo-prądową. Cecha ta nie pozwala na pracę tych lamp w obwodzie elektrycznym bez dodatkowego urządzenia, służącego do ograniczenia prądu lampy do określonej wartości. Najczęściej w tym celu stosuje układy pracy lamp ze statecznikami elektromagnetycznymi lub układy pracy lamp ze statecznikami elektronicznymi.



Rys. 2. Charakterystyka prądowo-napięciowa wyładowania w gazie

Rys. 3. Układ zasilania lampy fluorescencyjnej ze statecznikiem magnetycznym

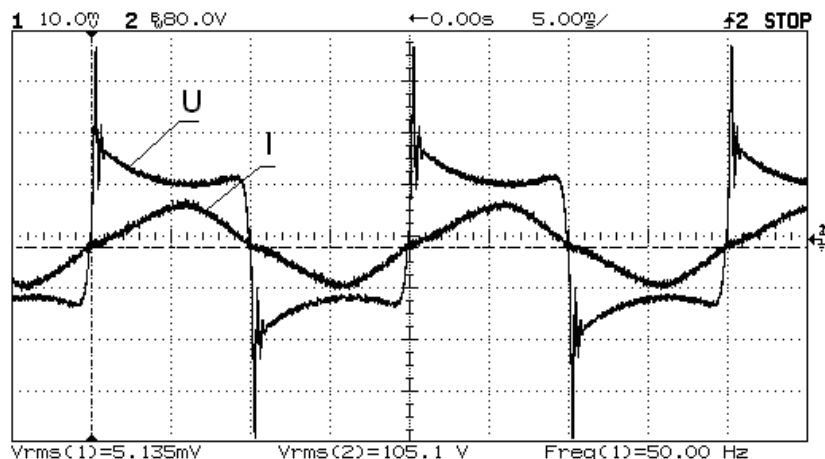


Rys. 4. Układ zasilania lampy fluorescencyjnej ze statecznikiem elektronicznym

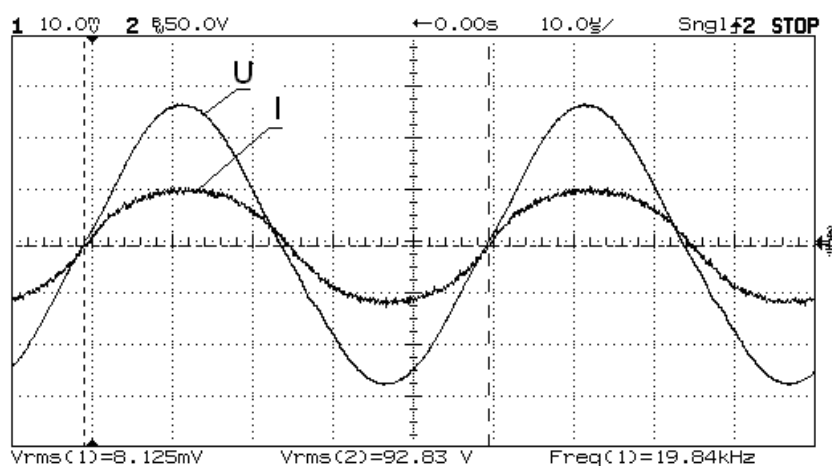
Konfiguracja ww. układów zasilania lamp w sposób istotny wpływa na parametry świetlne, jak i na poziom oraz rodzaj generowanych zakłóceń do sieci [14].

Układy pracy niskociśnieniowych rtęciowych lamp wyładowczych ze statecznikiem magnetycznym, a więc zasilanych częstotliwością 50 Hz, nie są najodpowiedniejsze ze względu na parametry energetyczno-optyczne [12]. Przy częstotliwości 50 Hz elektrony i zjonizowane atomy mają wystarczający czas, by rekombinować przy każdej zmianie kierunku prądu; z tego powodu wyładowanie jest zapalane dwa razy w każdym okresie. Efektem tego jest występowanie pików napięcia ponownego zapalenia, które są nawet kilkadziesiąt procent wyższe od normalnego napięcia wyładowania, które jest praktycznie stałe w półokresie, co zostało przedstawione na rysunku 5.

Rys. 5. Przebiegi czasowe prądu i napięcia lampy zasilanej częstotliwością sieciową



Praca lamp zasilanych prądem o podwyższonej częstotliwości dość znacznie różni się od pracy lamp zasilanych prądem o częstotliwości 50 Hz. Różnica ta wynika z faktu, iż przy wzroście częstotliwości prądu w obwodzie lampy powyżej 1 kHz [14] skraca się czas dejonizacji plazmy wyładowania, a więc zwiększa się gęstość elektronów – w konsekwencji zmniejszają się modulacje charakterystyk wyładowania, a więc wyładowanie w lampie dąży do równowagi dynamicznej. Oznacza to, iż przy wzroście częstotliwości prądu w obwodzie lampy, proces ponownego zapłonu lampy trwa coraz krócej. Krótszy czas ponownego zapłonu lampy prowadzi do zmniejszenia, a następnie zanik pików zapłonowych w krzywej napięcia lampy (rys. 6). Zanik pików napięcia ponownego zapalenia oznacza, że lampę można traktować niemal jako element o linowej rezystancji. Większość producentów lamp dostarcza dane lampy tylko dla pracy przy niskiej częstotliwości, gdzie lampa zachowuje się jako kwadrat fali napięcia źródła.



Rys. 6. Przebiegi czasowe prądu i napięcia lampy zasilanej częstotliwością 20 kHz

Jak widać z powyższego przykładu, przy projektowaniu układu stabilizacyjno-zapłonowego lampy zasilanej wyższą częstotliwością, lampę można modelować w funkcji impedancji lampy. Dlatego dla prawidłowego projektowania układów pracy niskoprężnych rtęciowych lamp wyładowczych (lampa, układ stabilizacyjno zapłonowy) konieczna jest dobra znajomość charakterystyk teoretycznych i eksperymentalnych lampy oraz ich opisu matematycznego.

W spotykanych rozwiązaniach przyjmuje się, że częstotliwość prądu lampy powinna wynosić nie więcej niż 50 kHz [9], choć istnieją także poglądy, że można ją zwiększyć do 100 kHz.

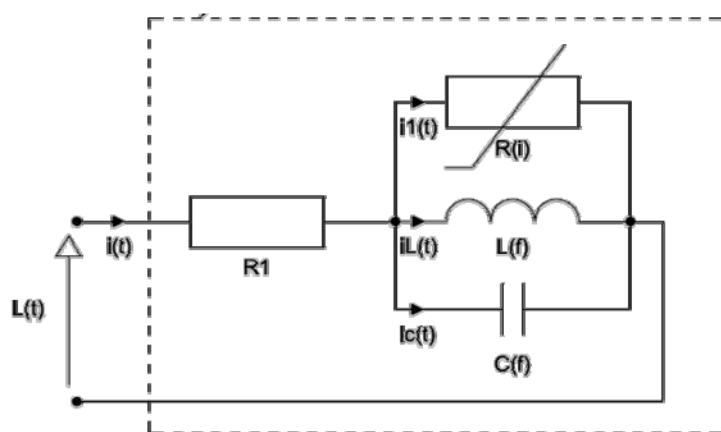
Obecnie coraz szerzej stosowane są elektroniczne układy zapłonowe, wyróżniające się kilkoma dodatkowymi cechami względem układów elektromagnetycznych; są to:

- brak pulsacji strumienia świetlnego;

- mniejszy pobór mocy dla układu statecznik-światłówka;
- natychmiastowy zapłon;
- możliwość łatwego ściemniania;
- cicha praca.

2. MODEL NISKOCIŚNIENIOWEJ RTĘCIOWEJ LAMPY WYŁADOWCZEJ

Dla prawidłowego projektowania układów pracy niskoprężnych rtęciowych lamp wyładowczych (lampa, układ stabilizacyjno-zapłonowy) konieczna



Rys. 7. Schemat zastępczy niskociśnieniowej rtęciowej lampy wyładowczej

jest dobra znajomość charakterystyk prądowo-napięciowych lampy oraz ich opis matematyczny. W literaturze spotyka się wiele koncepcji modeli [4, 6, 8, 11]. Opisywane w literaturze modele cechują się zróżnicowaną dokładnością odwzorowania charakterystyki napięciowo-prądowej lampy.

Podczas prac przy projektowaniu układu zapłonowego lampy można skorzystać z modelu opracowanego i zaprezentowanego w pracy [15], gdzie przedstawiono schemat zastępczy niskociśnieniowej rtęciowej lampy wyładowczej.

Model lampy został opisany równaniami:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{(t)} = A \cdot \sin(\omega t) \\ u_{L(t)} = L \frac{di_L}{dt} \\ i_{C(t)} = C \frac{du_C}{dt} \\ U_{R(i)} = i_1 \cdot w_1 \cdot \left(\frac{w_2}{w_3 \cdot i_1^2 + 1} + w_4 \right) \\ U_L = U_{R(i)} + R_1 \cdot i_{(t)} \end{array} \right. \quad (1)$$

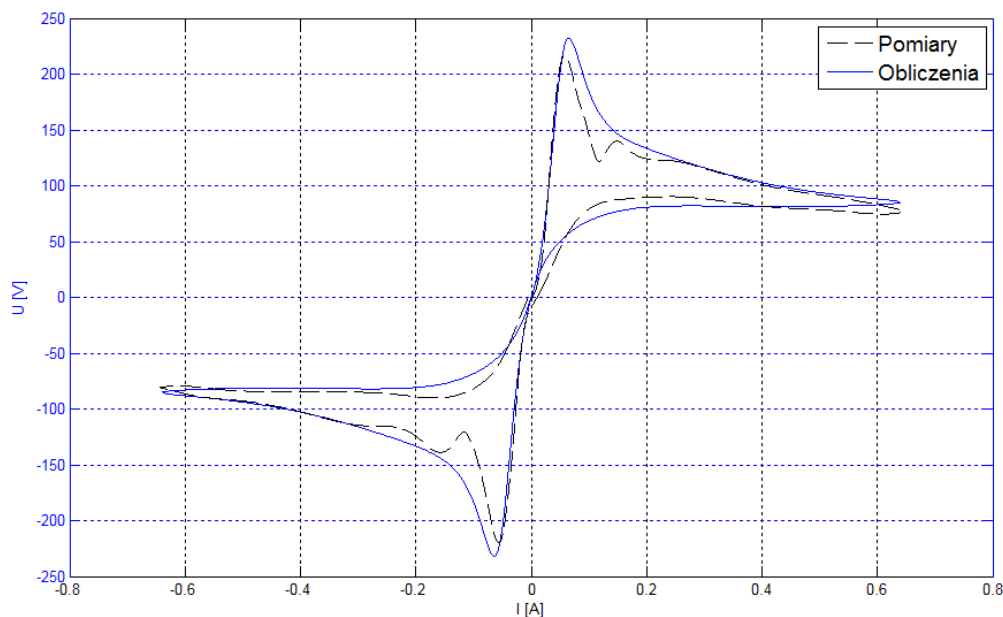
gdzie:

- ω – pulsacja prądu;
- $i(t)$ – wartość prądu chwilowego płynącego przez lampę;
- R_1 – rezystancja liniowa lampy;
- $R_{(i)}$ – rezystancja lampy zależna od płynącego prądu;
- C – pojemność układu;
- L – indukcyjność układu;
- U_L – wartość chwilowa napięcia na lampie;
- w_1, w_2, w_3, w_4 – parametry równania.

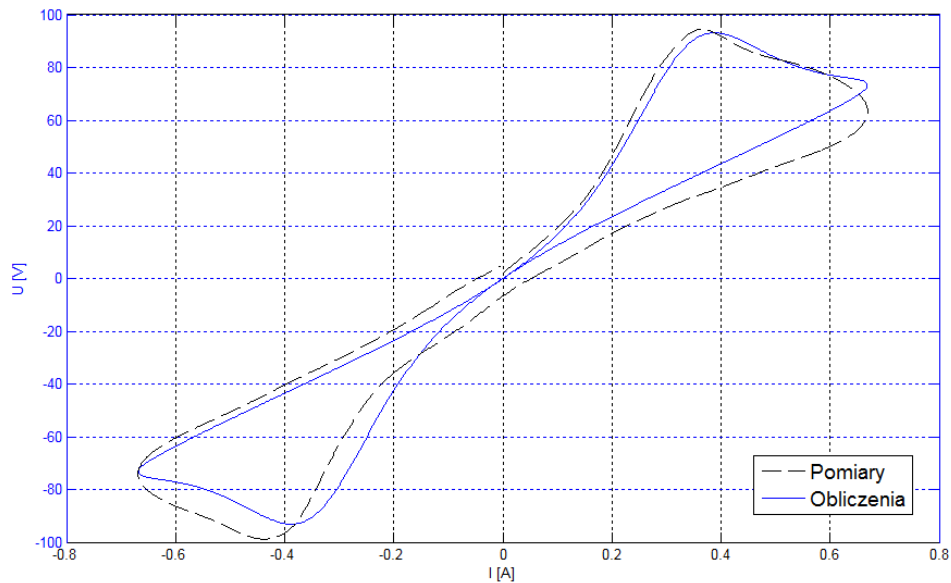
2.1. Weryfikacja modelu z wynikami badań empirycznych

Przedstawiony model prawidłowo odwzorowuje charakterystyki lampy, zarówno przy niskich, jak i podwyższonych częstotliwościach. Jakość dopasowania modelu do zmiennej objaśnianej mierzono wartością współczynnika determinacji R^2 , który w każdym przypadku był większy od 0,96. Przykładowe wyniki badań przedstawiono na rysunkach 8-10.

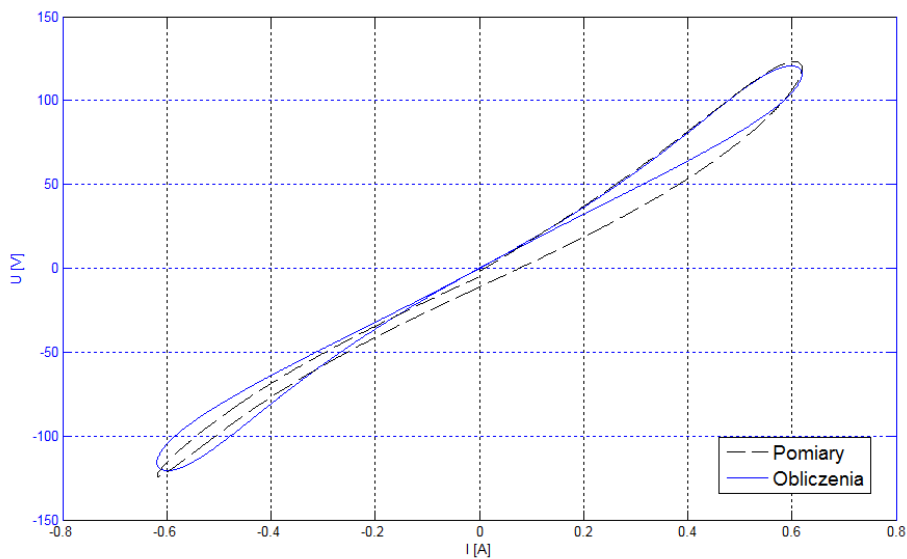
Dla częstotliwości powyżej 500 Hz można przyjąć, że układ ma charakter rezystancyjny (pojemność C oraz indukcyjność L są pomijane).



Rys. 8. Napięcie $u(t)$ na lampie dla częstotliwości 50 Hz dla badań modelowych oraz badań empirycznych



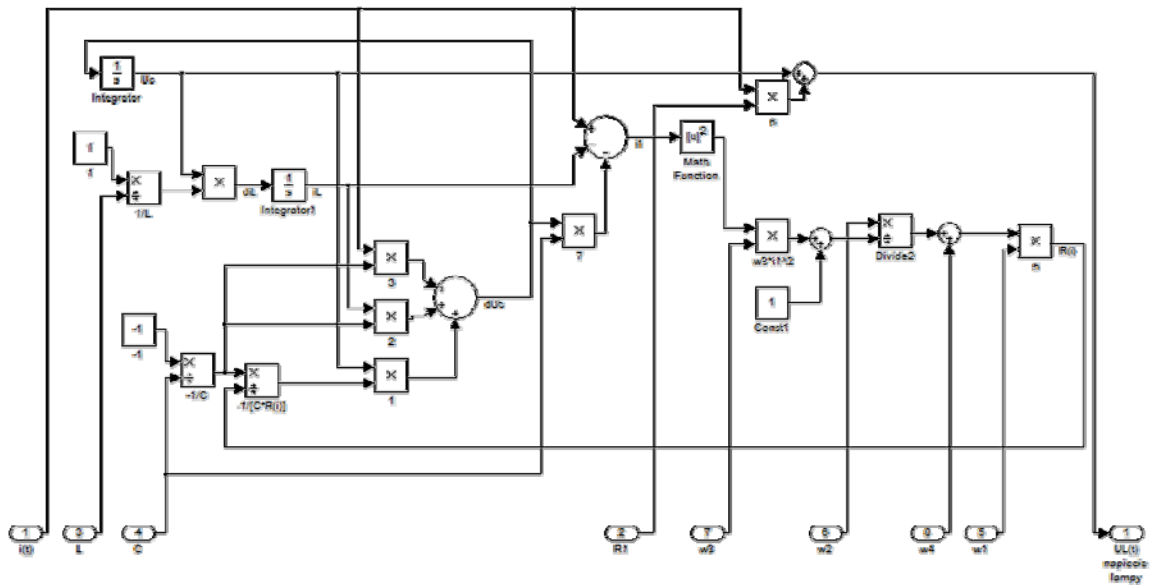
Rys. 9. Napięcie $u(t)$ na lampie dla częstotliwości 500 Hz dla badań modelowych oraz badań empirycznych



Rys. 10. Napięcie $u(t)$ na lampie dla częstotliwości 10 kHz dla badań modelowych oraz badań empirycznych

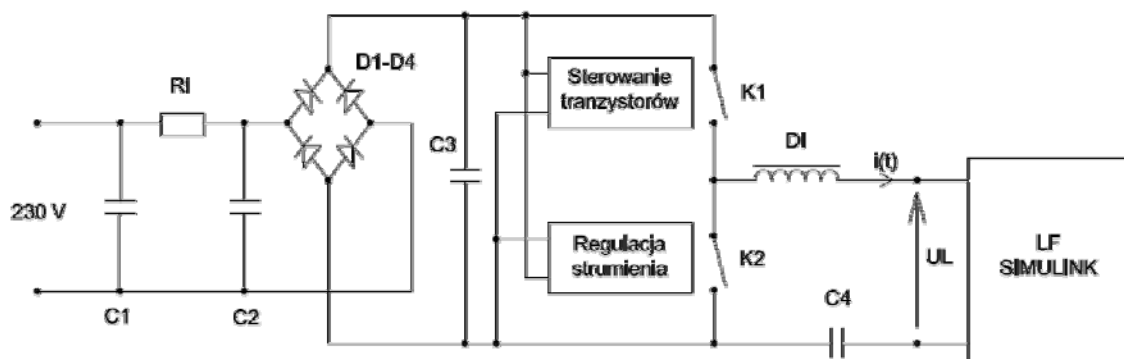
3. IMPLEMENTACJA MODELU NISKOCIŚNIENIOWEJ RTĘCIOWEJ LAMPY WYŁADOWCZEJ

Równanie (1) zostało zamodelowane w Simulinku za pomocą równań dynamicznych. Schemat blokowy przedstawiono na rysunku 11.



Rys. 11. Model lampy w Simulink

Zaprojektowany model ma osiem wejść (prądowe oraz parametry równania) oraz jedno wyjście – napięcie lampy. Model może zostać wykorzystany jako submodel, a więc element składowy szerszego projektu. Przede wszystkim zweryfikowany w zakresie współczynników równań submodel może znaleźć praktyczne zastosowanie przy projektowaniu układów pracy niskoprężnych rtęciowych lamp wyładowczych. Projektowanie układów pracy lamp w oparciu o poprawny model matematyczny będzie bardziej efektywne i mniej czasochłonne od projektowania tradycyjnego, opierającego się na wynikach pomiarów na rzeczywistych obiektach.



Rys. 12. Układ zasilania lampy fluorescencyjnej ze statecznikiem elektronicznym uwzględniający model zbudowany w Simulinku

4. WNIOSKI

Zaprezentowana implementacja modelu niskociśnieniowej rtęciowej lampy wyładowczej w środowisku Matlab/Simulink pozwala modelować układ pracy lampy wyładowczej zasilanej różną częstotliwością.

Matematyczny opis lampy pozwala na bardziej szczegółową analizę stanów pracy.

LITERATURA

1. Almeida M., Simonetti D.S.L., Veira J.L.F.: High-Power-Factor Electronic Ballast Based on a Single Power Processing Stage, IEEE Transactions on Industry Electronics, vol. 47, No. 4, 2000.
2. Alonso J.M.: Electronic Ballasts, Power Electronics Handbook, 2007.
3. Bąk J., Pabjańczyk W.: Podstawy Techniki Świetlnej, Politechnika Łódzka, 1994.
4. Francis V.J.: Fundamentals of discharge tube circuits, New York, J. Wiley&Sons Inc., 1948.
5. Praca zbiorowa członków Polskiego Komitetu Oświetleniowego pod red. Przewodniczącego P.K.Ośw. dr inż. J. Grzonkowskiego, Ed., Technika Świetlna '96, Warszawa, 1996.
6. Herrick P.R.: Mathematical models for High-Intensity Discharge lamps, Trans. Appl. Ind., 1980.
7. Kopmický J.: Electric conductivity model of discharge lamps, Technical University of Liberec, 2007.
8. Mader U., Horn P.: A dynamic model for the electrical characteristics of fluorescent lamps, IEEE Industry Applications Society Meeting, Conf. Records, pp. 1928-1934, 1992.
9. Mayer Ch., Nienhuis H.: Discharge lamps, Philips Technical Library, 1988.
10. Pabjańczyk W.: Rozprawa doktorska: Właściwości elektroenergetyczne lamp fluorescencyjnych zasilanych napięciem o podwyższonej częstotliwości, Politechnika Łódzka, 1984.
11. Peek S.C., Spencer D.E.: A Differential Equation for the Fluorescent Lamp, Illum. Ent., 1968.
12. Różowicz A.: Tętnienie niskoprężnych lamp wyładowczych zasilanych napięciem przemianym o różnych częstotliwościach, JiUEE, 2005.
13. Różowicz A.: Vmíst garmonik i koeficient potužnosti – parametri jakosti energii v ustavach žiwnenia ljunescenentnych lamp z elektromagnitnymi ta elektronnimi stabilizatorami, Lviv, Elektroinform, 2003.
14. Różowicz A.: Wpływ częstotliwości prądu zasilającego lampy fluorescencyjne na ich wybrane parametry eksploatacyjne, Politechnika Świętokrzyska, 2004.
15. Zissis G., Damelincoourt J.-J.: Modelling discharge lamps for electronic circuit designers, a review of the existing methods, Banff, Canada, 2002.

IMPLEMENTATION OF MATHEMATICAL MODEL
OF LOW-PRESSURE MERCURY DISCHARGE LAMP
IN MATLAB/SIMULINK SOFTWARE

Antoni RÓŻOWICZ
Sebastian RÓŻOWICZ
Mariusz DELĄG

ABSTRACT *Knowledge of voltage-current characteristics and their mathematical model description is needed to correct design of low pressure mercury discharge lamp systems (lamp, stabilizing and ignition system). Mathematical model showed in this paper causes possibility to optimal design of work lamp systems. It is very important in aspect of increasing system energy efficiency. Measurements on group of discharge lamps together with computer simulations are used to preparation of mathematical model. Conformity with measurements data is confirmed by verification of simulation results. The model implemented in Simulink is showed in the paper. Implemented module can be used to build and develop new ignition systems.*

Keywords: *low-pressure mercury discharge lamp, ignition system, mathematical model, Simulink*