

DOI: 10.5604/01.3001.0010.4839

SYMULATOR ŹRÓDŁA ELEKTRONÓW Z GORĄCĄ KATODĄ

Bartosz Kania

Politechnika Lubelska, Katedra Automatyki i Metrologii

Streszczenie. W niniejszej pracy opisany został symulator źródła elektronów z gorącą katodą bazujący na modelu statycznym źródła. Został on zaprojektowany w ogólnym przypadku dla różnych rodzajów katod używanych w przyrządach próżniowych w celu umożliwienia łatwych i szybkich modelowych obliczeń numerycznych użytecznych m. in. w procesie projektowania regulatorów natężenia prądu termoemisji elektronowej. Umożliwia on m.in. wyznaczenie rozkładu temperatury i natężenia prądu termoemisji elektronowej włókna w stanie ustalonym.

Słowa kluczowe: model numeryczny, symulacja, prąd termoemisji elektronowej, próżnia

ELECTRON SOURCE WITH HOT CATHODE SIMULATOR

Abstract. Paper contains electron source with hot cathode simulator description. Simulator is made using LabView environment and it is based on static model of source. It is developed for different types of filaments used in vacuum instruments in order to enable easy and fast numerical calculations which are very useful in thermionic emission current controller designing process. Simulator, among other things, calculates temperature and electron emission current distribution along filament in steady state.

Keywords: numerical model, simulation, thermionic emission current, vacuum

Wstęp

W nauce i technice źródła elektronów z włóknami wykonanymi z metali lub kompozytów są szeroko wykorzystywane, między innymi, w mikroskopach elektronowych, synchronach, spektrometrach mas, próżniomierzach jonizacyjnych. Jednym z podstawowych zagadnień pracy źródła jest rozkład temperatury włókna w stanie równowagi termodynamicznej, gdyż ma on bezpośredni wpływ na wielkość prądu termoemisji elektronowej. Znane są prace w tym zakresie, między innymi, publikacje [5, 6], ale opublikowane w nich wyniki są satysfakcjonujące jedynie dla długich włókien i wysokich temperatur. Dokładniejsze obliczenia, zostały przedstawione w pracy [3], ale wymagają one znajomości temperatury końców włókna, a obliczenia są wykonywane metodą prób i błędów do momentu, gdy temperatury wyznaczona i zmierzona końców włókna są sobie równe.

Celem niniejszej pracy jest opracowanie i udostępnienie poręcznego narzędzia do szybkich i kompleksowych obliczeń, między innymi, natężenia prądu termoemisji elektronowej, rozkładu temperatury wzdłuż włókna, temperatury włókna nieskończenie długiego, rezystancji włókna dla stanu równowagi termicznej, przy zróżnicowanych parametrach włókna i wymuszeń, bez konieczności pomiarów temperatury końców katody.

Za godne uwagi uznane zostało środowisko LabView, dzięki jego możliwościom relatywnie szybkiego projektowania interfejsu użytkownika i tworzenia niezależnej aplikacji. Wykorzystany algorytm jest zmodyfikowanym algorytmem z prac wcześniejszych [2, 3] tak, aby nie był konieczny pomiar temperatury końców włókna, a także został poszerzony o procedury obliczenia rozkładu natężenia prądu termoemisji oraz jego całkowitego natężenia. Bazuje on na metodzie różnic skończonych i rozwiązuje równanie różniczkowe cząstkowe drugiego rzędu przewodności cieplnej włókna o skończonej długości. Dzięki zawartym w symulatorze danym materiałowym najpopularniejszych katod możliwe jest szybkie przeprowadzanie obliczeń dla katod o różnych wymiarach i materiałach.

1. Modelowanie

Z punktu widzenia projektowania regulatorów sterujących źródłem elektronowym najważniejsza jest wielkość natężenia prądu termoemisji elektronowej, opisana poniższą zależnością:

$$I_e(T) = AST^2 e^{-\frac{\varphi}{kT}} \quad (1)$$

gdzie A jest stałą Richardsona, S powierzchnią włókna, T temperaturą włókna, φ pracą wyjścia elektronów z materiału, k stałą Boltzmanna.

Aby wyznaczyć natężenie prądu termoemisji elektronowej należy wyznaczyć temperaturę włókna, która w przypadku włókna o skończonej długości jest zależna od punktu na długości włókna. W związku z czym konieczne staje się wyznaczenie rozkładu temperatury wzdłuż jego długości w celu obliczenia natężenia prądu termoemisji elektronowej.

W pierwszej kolejności pod uwagę wzięty został przypadek włókna nieskończenie długiego, którego wartość temperatury jest użyteczna w kontroli poprawności obliczeń lub jako wartość początkowa dla pozostałych przypadków. W warunkach wysokiej próżni włókno posiada jednolitą temperaturę na całej długości T_m , która jest opisana równaniem (2)[3]:

$$D\alpha(T_m^4 - T_a^4) = \frac{I^2 \rho}{F} \quad (2)$$

w którym ε i ρ są funkcjami temperatury:

$$\varepsilon(T) = \frac{\varepsilon_0 T}{1000} \quad (3)$$

$$\rho(T) = \rho_0(1 + \alpha(T - T_a) + \beta(T - T_a)^2) \quad (4)$$

D jest obwodem włókna, σ jest stałą Stefana-Boltzmanna, ε jest emisyjnością powierzchni włókna, I jest natężeniem prądu przepływającego przez włókno, ρ jest rezystywnością materiału, F jest powierzchnią przekroju poprzecznego włókna, T_a jest temperaturą otoczenia tj. ścian komory próżniowej, ρ_0 jest rezystywnością materiału włókna w temperaturze 300 K, α i β są współczynnikami temperaturowymi materiału, ε_0 jest empirycznie wyznaczonym współczynnikiem emisyjności materiału katody w temperaturze 300 K.

Na podstawie powyższego wzoru można wyznaczyć zależność na temperaturę maksymalną włókna nieskończenie długiego:

$$T_m = \sqrt[4]{\frac{I^2 \rho}{FD\alpha} + T_a^4} \quad (5)$$

Emisyjność ε oraz rezystywność ρ włókna są funkcjami temperatury w związku z czym możliwe jest obliczenie temperatury maksymalnej iteracyjnie jak to zostało wcześniej zaproponowane [3], lub przekształcając równanie (5) do wielomianu (6), a następnie numerycznie obliczając jego pierwiastki. Spośród pierwiastków poprawnym rozwiązaniem jest największy pierwiastek rzeczywisty.

$$A_1 T_m^5 + A_2 T_m^2 + A_3 T_m + A_4 = 0 \quad (6)$$

gdzie:

$$A_1 = \frac{D\alpha\varepsilon_0}{1000} \quad (7)$$

$$A_2 = -\frac{I^2 \rho_0 \beta}{F} \quad (8)$$

$$A_3 = \frac{2I^2\rho_0\beta T_a}{F} - \frac{I^2\rho_0\alpha}{F} - \frac{D\epsilon_0 T_a}{1000} \quad (9)$$

$$A_4 = -\frac{I^2\rho_0}{F}(1 - \alpha T_a + \beta T_a^2) \quad (10)$$

Tak obliczona temperatura włókna nieskończenie długiego może być podstawą do dalszych obliczeń.

W przypadku włókna o skończonej długości tj. rzeczywistego należy wziąć pod uwagę rozpraszanie ciepła przez umocowania katody. Moc elektryczna dostarczana do włókna jest rozpraszana przez promieniowanie zgodnie z prawem Stefana-Boltzmana oraz na sposób ciepła przez umocowania włókna. W najczęstszych zastosowaniach źródło elektronów pracuje w ciśnieniu rzędu 10^{-1} Pa, a wartości mocy termoisjacji są ponad 1000-krotnie mniejsze od mocy dostarczanej, dlatego straty ciepła wynikające z obecności gazu oraz moc termoisjacji zostały pominięte. Bilans mocy opisuje równanie (11):

$$\frac{I^2\rho}{F} = D\epsilon(T^4 - T_a^4) - F \frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{dT}{dx} \right) \quad (11)$$

gdzie λ jest zależną od temperatury przewodnością cieplną materiału, z którego wykonane jest włókno. Zależność ta może być wyrażona za pomocą prawa Wiedmanna-Franza (12):

$$\lambda(T) = \frac{LT}{\rho(T)} \quad (12)$$

gdzie L jest liczbą Lorentza. Według najnowszych badań jest ona różna dla różnych materiałów w różnych temperaturach [4]. Dla wolframu w temperaturze 273 K wynosi:

$$L = 3,04 * 10^{-8} \frac{W\Omega}{K^2} \quad (13)$$

Równanie (11) stanowi podstawę do obliczeń numerycznych zaimplementowanych w prezentowanym symulatorze.

2. Algorytm

Algorytm realizujący obliczenia numeryczne bazuje na metodzie różnic skończonych i jest zmodyfikowanym algorytmem przedstawionym w pracy [3]. Przekształcenia tam zaprezentowane prowadzą do równania opisującego różnicę temperatury w punkcie $x+h$ względem punktu x :

$$G_{x+h} = \frac{[\lambda_x G_x - h^2 V]}{\lambda_{x+h}} \quad (14)$$

gdzie

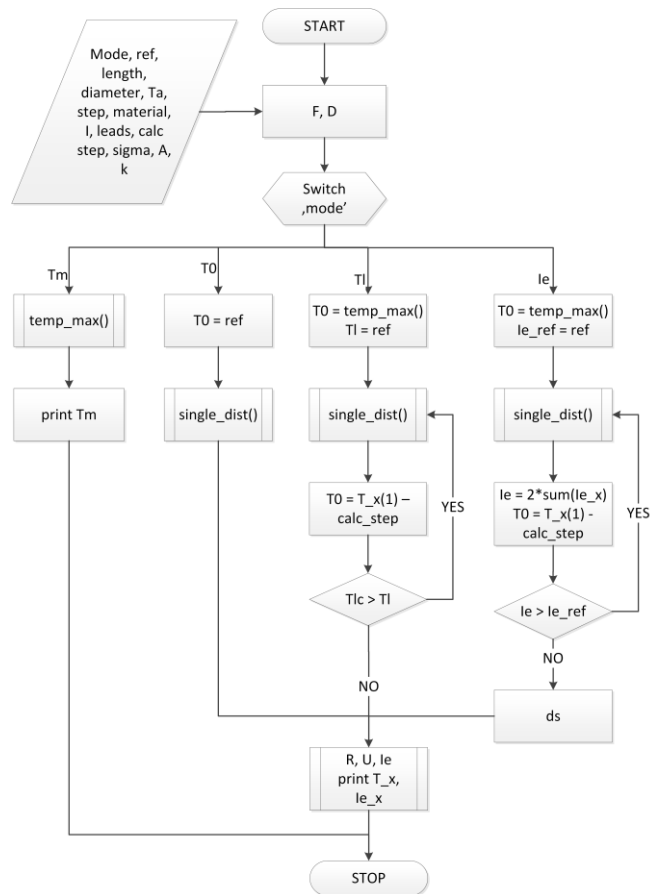
$$V = \left(\frac{I^2\rho}{F^2} - \frac{D\epsilon(T^4 - T_a^4)}{F} \right) \quad (15)$$

Za G_0 przyjęte zostało zero. Równanie (14) pozwala na obliczenie rozkładu temperatury wzdłuż włókna krok po kroku dla całej jego długości.

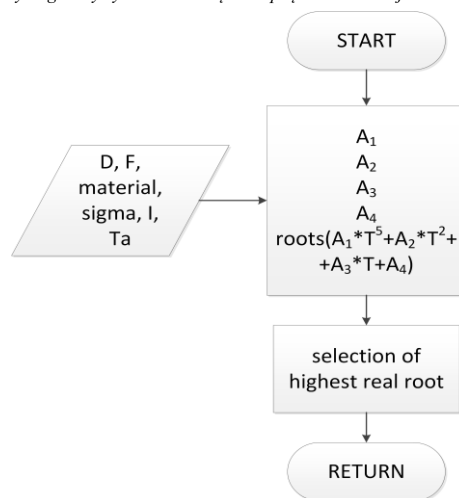
Algorytm pracy symulatora został w uproszczony sposób zaprezentowany na rys. 1. Zbiór danych wejściowych zebrany został w tabeli 1. W początkowej fazie na ich podstawie obliczane są wielkości takie jak obwód włókna D oraz powierzchnia przekroju poprzecznego F , a także definiowane są zmienne lokalne oraz ich wartości początkowe. Następnie algorytm podąża ścieżką adekwatną do wybranego trybu pracy. Dostępne są 4 warianty obliczeń.

Pierwszy z zaimplementowanych w symulatorze trybów (T_m) to funkcja $temp_max()$ obliczająca temperaturę włókna nieskończenie długiego zgodnie z metodą zaproponowaną w rozdziale 1 według rys. 2.

Kolejny tryb (T_0) pozwala obliczyć stacjonarny rozkład temperatury włókna o znanych parametrach geometrycznych i materiałowych, gdy znana jest temperatura w środku włókna. Wówczas zmienna ref traktowana jest jako znana temperatura środka włókna. Główna część obliczeń realizowana jest w funkcji $single_dist()$.



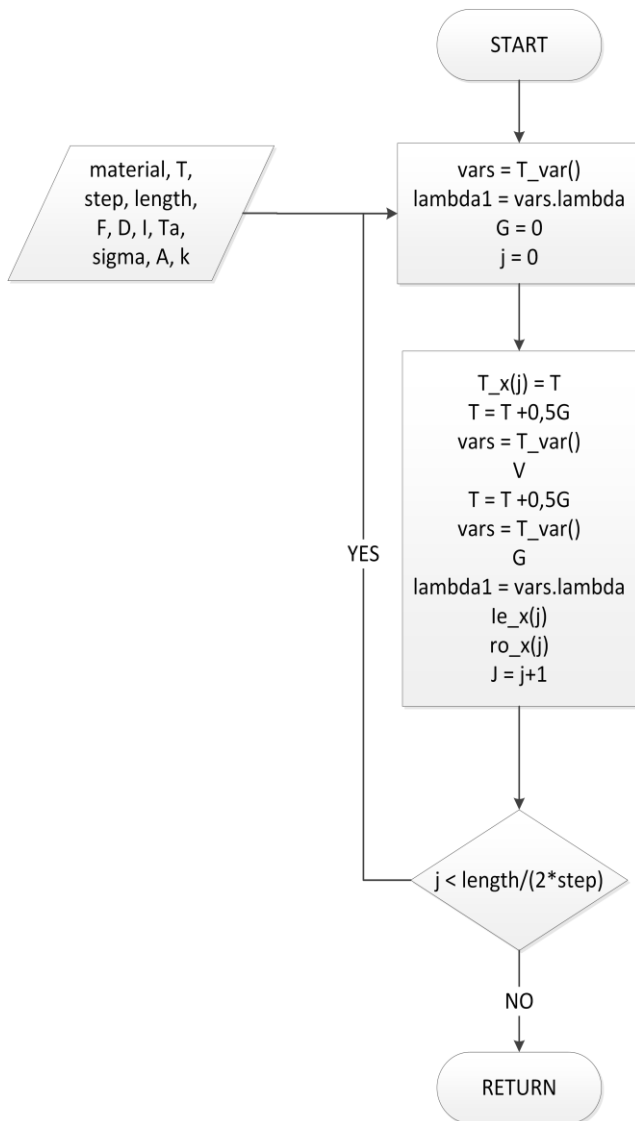
Rys. 1. Algorytm główny symulatora natężenia prądu termoisjacji elektronowej



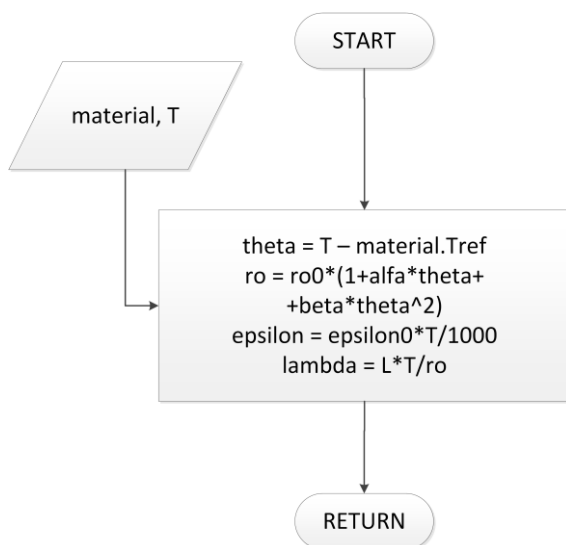
Rys. 2. Funkcja „temp_max()”

Tabela 1. Opis danych wejściowych

Dane wejściowe	Opis
mode	Wybór trybu obliczeń
ref	Wartość odniesienia różna dla różnych trybów
length	Długość włókna w milimetrach
diameter	Średnica włókna w milimetrach
Ta	Temperatura otoczenia w Kelwinach
step	Krok obliczeń h w milimetrach
material	Struktura zawierająca dane materiałowe włókna takie jak: rezystywność ρ_0 , emisyjność ϵ_0 , współczynniki temperaturowe rezystancji α i β , temperaturę odniesienia T_{ref} dla powyższych stałych, energię wyjścia elektronu ϕ
I	Prąd grzewczy w amperach
leads	Struktura opisująca materiał wyprowadzeń katody zawierająca współczynniki wielomianu aproksymującego przewodność cieplną w funkcji temperatury a_3, a_2, a_1, a_0
calc_step	Precyzja obliczeń
sigma	Stała Stefana-Boltzmana
A	Stała Richardsons
k	Stała Boltzmana



Rys. 3. Funkcja „single_dist()” obliczająca rozkład temperatury włókna dla danej temperatury w jego środku



Rys. 4. Funkcja „T_var”

Rezultaty takie jak rezystancja włókna R , spadek napięcia U , sumaryczny prąd termoemisji elektronowej I_e , rozkłady temperatury $T(x)$ i natężenia prądu termoemisji elektronowej $I_e(x)$ w funkcji długości włókna są wyświetlane użytkownikowi.

W ramach funkcji *single_dist()* (rys. 3) na podstawie danych wejściowych obliczane są wartości wielkości zależnych od temperatury tj. $\rho(T)$, $\alpha(T)$, $\lambda(T)$ w funkcji *T_var* (rys. 4), a także inicjalizowane są zmienne niezbędne w obliczeniach iteracyjnych. Następnie obliczona temperatura dla danego fragmentu włókna (kroku obliczeń h) jest zapisywana do tablicy T_x , po czym obliczana jest temperatura w środku cząstki włókna, uaktualniane są wartości zmiennych zależnych od temperatury oraz obliczana jest wartość zmiennej V na podstawie równania (15). W dalszej kolejności liczona jest temperatura na końcu danej cząstki włókna oraz zmiennej od niej zależne dla obliczonej wartości temperatury. Nowoobliczona przewodność cieplna $\lambda(T)$ wykorzystywana jest do obliczenia różnicy temperatur G dla kolejnej cząstki włókna zgodnie z (14), po czym stara wartość przewodności cieplnej jest nadpisywana. W ostatniej fazie tych obliczeń znajdowane jest natężenie prądu termoemisji dla danego fragmentu włókna na podstawie wzoru (16):

$$I_e = ADhT^2 e^{-\frac{\phi}{kT}} \quad (16)$$

bazującego na wzorze (1), po czym natężenie jest zapisywane do tablicy I_{e_x} . Obliczona wartość rezystywności dla danego fragmentu włókna zapisywana jest do tablicy ro_x . Następnie zwiększany jest indeks iteracji j i procedura, począwszy od zapisu aktualnej temperatury, jest powtarzana dla każdego fragmentu włókna.

Trzeci z zaimplementowanych trybów (TI) pozwala w iteracyjny sposób znaleźć rozkład temperatury i prądu termoemisji elektronowej, gdy znana jest temperatura końca włókna T_l . W tym celu wykorzystana została funkcja *single_dist()*. Jako początkowa wartość temperatury w środku włókna T_0 została przypisana wartość temperatury włókna nieskończenie długiego (funkcja *temp_max()*), natomiast zmienna *ref* oznacza znaną temperaturę na końcu włókna T_l . Funkcja *single_dist()* oblicza rozkłady dla danej wartości temperatury w środku włókna T_0 , po czym wartość ta zmniejszana jest o wartość zmiennej *calc_step*. Następnie sprawdzany jest warunek czy obliczona wartość temperatury na końcu włókna T_{lc} opisana wzorem (17) jest mniejsza od wartości referencyjnej T_l .

$$T_{lc} = T(x)|_{x=1} \quad (17)$$

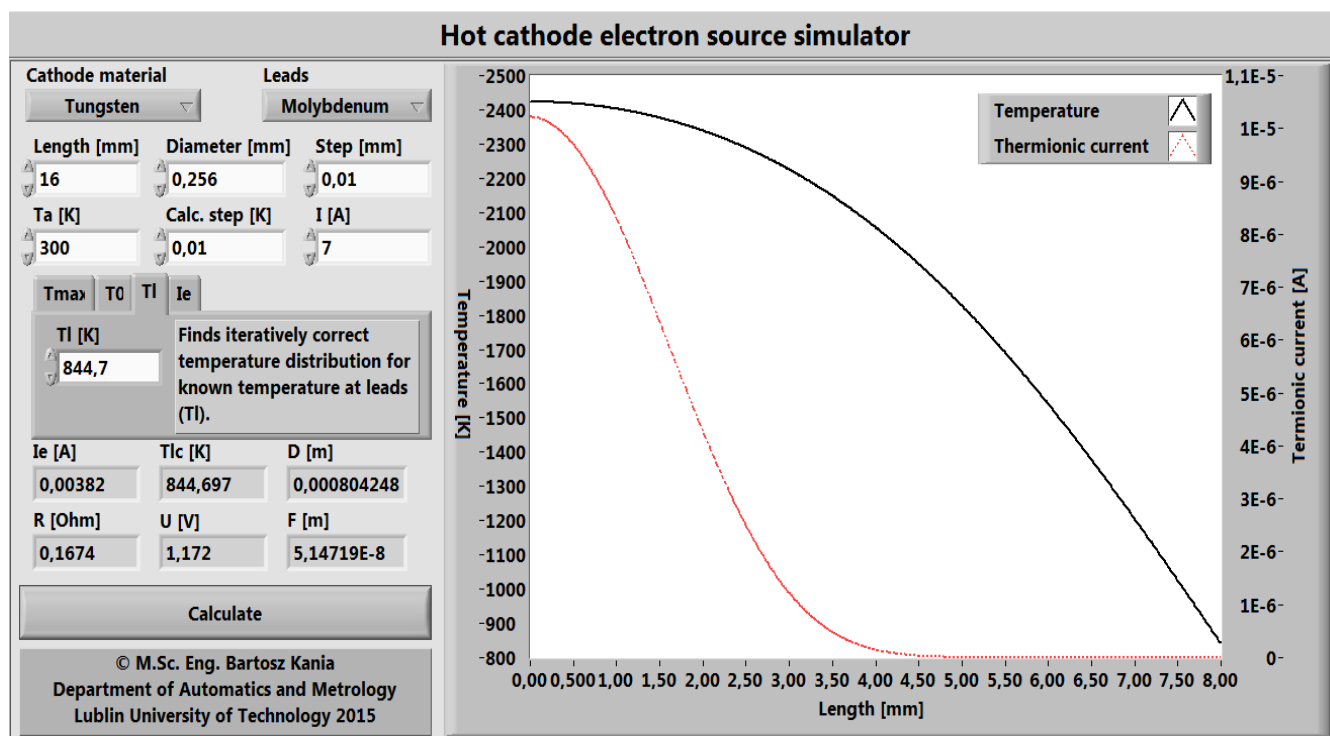
Jeśli nie, to obliczenia są powtarzane z coraz mniejszą wartością temperatury w środku włókna T_0 aż do znalezienia poprawnego rozkładu.

Czwarty tryb obliczeń (Ie) działa analogicznie do (TI), jednak warunkiem zakończenia obliczeń jest znalezienie rozkładu dla referencyjnej wartości prądu termoemisji elektronowej, a nie temperatury. Jeśli dla danego włókna zmierzony zostanie prąd termoemisji elektronowej, możliwe będzie przy pomocy tego trybu znalezienie rozkładu temperatury dla danych warunków pracy, a tym samym znany będzie rozkład temperatury przy nieznanymi warunkach brzegowych.

3. Weryfikacja

Interfejs symulatora zaprezentowany został na rys. 5. W lewej części ekranu zdefiniować można dane takie jak: materiał włókna, materiał wyprowadzeń, długość, średnicę włókna, krok obliczeń, temperaturę otoczenia, precyzję obliczeń oraz wartość natężenia prądu grzewczego. Ponadto można zdefiniować tryb obliczeń i wartość odniesienia. W dolnej części znajdują się indykatory wielkości skalarnych takich jak: sumaryczne natężenie prądu termoemisji elektronowej, temperatura końców włókna, rezystancja włókna i spadek napięcia na włóknie.

Aby zademonstrować poprawność działania symulatora przeprowadzone zostały symulacje dla wolframowej katody poddanej badaniom w [3]. Długość katody wynosi 16 mm, średnica 0,256 mm, temperatura otoczenia 300 K, krok obliczeń 0,01 mm, prąd grzewczy 7 A oraz krok zmniejszania temperatury środka włókna 0,01 K.



Rys. 5. Interfejs użytkownika symulatora wraz z wynikami symulacji

Temperatura włókna nieskończenie długiego obliczona przez symulator wynosi 2688,9 K, podczas gdy w [3] wyniosła 2693 K. Ta niewielka różnica wyników bierze się najpewniej z minimalnych różnic w wartościach stałych lub odmiennych metod obliczeń: rozwiązania wielomianu w niniejszej pracy oraz metody iteracyjnej wykorzystanej w [3].

Rysunek 4 przedstawia rezultaty symulacji. Rozkład temperatury wzdłuż długości włókna ma identyczny kształt jak rozkład z pracy [3] i niemalże identyczne wartości punktów wykresu. Poprawny rozkład temperatury został znaleziony dla $T_0 = 2426,5$ K, w pracy [3] $T_0 = 2433$ K. Podobnie jak w przypadku poprzednim niewielkie różnice wynikają najprawdopodobniej z wykorzystania nieco innych wartości stałych empirycznych. Prąd elektronowy wynosi ok. 4,1 mA, a spadek napięcia na włóknie ok. 1,174 V. Zbieżność wyników dowodzi poprawności metody obliczeniowej.

4. Wnioski

W niniejszej pracy zaprezentowany został autorski symulator źródła elektronów z gorącą katodą. Pozwala na wyznaczenie rozkładu temperatury katody i natężenia prądu termoemisji elektronowej wzdłuż włókna, sumarycznego prądu termoemisji elektronowej, rezystancji włókna i spadku napięcia na katodzie w stanie ustalonym. Umożliwia obliczenie dokładnych wyników przy znanych, oraz przybliżonych wyników przy nieznanymi warunkach brzegowych tj. temperaturze końców gorącego włókna. Ponadto zawiera zbiór danych materiałowych różnych materiałów wykorzystywanych w źródłach elektronów jako katody czy też ich mocowania oraz przyjazny i ergonomiczny interfejs, co znaczenie ułatwia prace badawcze. Jest on szczególnie użyteczny w procesie projektowania układów regulacji natężenia prądu termoemisji elektronowej jak również

w procesie projektowania samych źródeł elektronów z gorącym włókniem.

Weryfikacja eksperymentalna symulatora udowodniła jego poprawną syntezę i działanie.

Literatura

- [1] Donkov N., Knapp W.: Control of hot-filament ionization gauge emission current: mathematical model and model-based controller. *Measurement Science and Technology* 8/1997, 798–803, [DOI: 10.1088/0957-0233/8/7/016].
- [2] Durakiewicz T., Hałas S.: Computation of time-dependent temperature distribution along a filament heated in vacuo by electric pulses. *Journal of Vacuum Science & Technology* 16/1998, 194, [DOI: 10.1116/1.580968].
- [3] Hałas S., Durakiewicz T.: Temperature distribution along a metal filament heated in vacuum by DC current. *Vacuum* 49/1998, 331–336, [DOI: 10.1016/S0042-207X(97)00170-X].
- [4] Kmieć A.: *Procesy cieplne i aparaty*. OWPW, Wrocław 2005.
- [5] Krolopp W., Sikora J., Hałas S.: Simplified dynamic model of electron source with a hot filament. *Journal of Technical Physics* 1/1997, 87–95.
- [6] Langmuir I.: The effect of end losses on the characteristics of filaments of tungsten and other materials. *Physical Review* 35/1930, 478, [DOI: 10.1103/PhysRev.35.478].
- [7] *Smithells Metals Reference Book*, Butterworths, London, 1967.

Mgr inż. Bartosz Kania
e-mail: b.kania@pollub.pl

Jest absolwentem Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej na kierunku Elektrotechnika. W 2013 rozpoczął studia doktoranckie na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej w dyscyplinie Elektrotechnika. Jest także pracownikiem naukowo-dydaktycznym w Katedrze Automatyki i Metrologii Politechniki Lubelskiej. Praca naukowa skupia się m. in. na implementacji algorytmów sterowania oraz przetwarzania cyfrowych sygnałów pomiarowych.



otrzymano/received: 02.03.2015

przyjęto do druku/accepted: 01.06.2017