

Krzysztof Dzwonek, Romuald Mosdorf
Mieczysław Poniewski

Instytut Techniki Ciepłej
Politechniki Warszawskiej

FENOMENOLOGICZNA INTERPRETACJA NIESTABILNOŚCI NISKOCIŚNIENIOWEGO GENERATORA TERMIONICZNEGO ¹⁾

Hipotezę minimum funkcjonału ewolucji systemu termodynamicznego, przedstawioną w [8], zastosowano do uzasadnienia fluktuacji prądowo-napięciowych w generatorze termionicznym dla $\beta = 1$. Sposoby usuwania niestabilności generatora, wynikające z przeprowadzonej analizy, są zgodne z doświadczeniem.

Oznaczenia

| | |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| A, B | - stałe |
| E^* | - lokalny potencjał |
| e | - ładunek elektronu |
| f_e, f_i | - funkcje rozkładu elektronów i jonów |
| $J, J_{es}, \tilde{J}_{es}$ | - gęstość prądu, gęstości prądów nasycenia emitera (elektronowy i jonowy) |
| k | - stała Boltzmana |
| $L_{qq}^{e,i}, L_{qe}, L_{qi}$ | - współczynniki kinetyczne |
| M | - masa atomowa |
| m, m_e, m_i | - masa; masa elektronów lub jonów |
| n_{e0}^+, n_{i0}^+ | - gęstość emitowanych elektronów i jonów w punkcie za emitorem |

1) Praca została wykonana w ramach Problemu MR.I.10 pod tytułem "Optymalizacja procesów termodynamicznych i przepływowych", koordynowanego przez Instytut Techniki Ciepłej i Silników Spalinowych Politechniki Poznańskiej.

| | |
|----------------|----------------------------------------------------|
| q | - ciepło |
| t | - czas |
| T_e | - temperatura emitera |
| T^0 | - stacjonarny rozkład temperatur |
| T^+ | - rozkład temperatur zaburzony przez fluktuacje |
| V, V_e, V_i | - prędkość; prędkości elektronów i jonów |
| U_i | - potencjał jonizacji |
| WE | - wielkość ekstensywna |
| x | - współrzędna |
| β | - współczynnik kompensacji ładunku przestrzennego |
| ϕ_e | - praca wyjścia elektronów |
| ψ, ψ^0 | - potencjał; potencjał w stanie stacjonarnym |
| Ω | - funkcjonal ewolucji |
| r^0, r^+ | - bodziec w stanie stacjonarnym i niestacjonarnym. |

WSTĘP

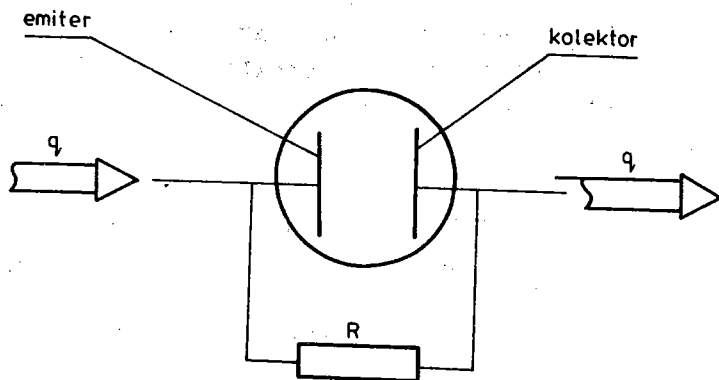
W termoelektronowej konwersji energii wykorzystuje się zjawisko termoemisji elektronów i innych cząstek z powierzchni metali pod wpływem wysokiej temperatury. Zjawiska fizyczne zachodzące w generatorze termionicznym można podzielić na zjawiska emisji, które są w znacznej mierze wspólne dla wszystkich typów generatorów oraz zjawiska transportu wielkości ekstensywnych, które różnią się znacznie w zależności od typu generatora (diody próżniowe z małą odległością międzyelektrodową, triody elektrostatyczne i triody magnetyczne, diody plazmowe).

Ze zjawiskami transportu związany jest efekt ujemnego ładunku przestrzennego, tworzonego przez elektrony podczas ich ruchu w przestrzeni międzyelektrodowej. Powstająca wówczas bariera potencjału poważnie ogranicza gęstość prądu generatora. Spośród wielu możliwych sposobów ograniczania ujemnego wpływu ładunku przestrzennego za najbardziej skuteczny uważa się wprowadzenie do przestrzeni międzyelektrodowej par substancji o niskim potencjale jonizacji, najczęściej cezu (ge-

neratory plazmowe). Absorpcja atomów cezu powoduje znaczne obniżenie prac wyjścia elektrod. Część atomów cezu ulega przy tym jonizacji powierzchniowej i w wyniku termoemisji dostaje się do przestrzeni międzyelektrodowej, gdzie neutralizuje ładunek przestrzenny elektronów.

1. GENERATOR PLAZMOWY

Obiektem rozważań jest generator plazmowy, niskociśnieniowy (rys.1), w którym zarówno efekty zderzeń pomiędzy cząst-



Rys.1. Schemat ideowy generatora termionicznego

kami w przestrzeni międzyelektrodowej jak i emisja wsteczna kolektora są do pominięcia.

Gęstość prądu elektronowego emitowanego z katody określa równanie Richardsona-Dushmiena

$$J_{eS} = AT_e^2 \exp\left(-\frac{e\phi_e}{kT_e}\right). \quad (1)$$

Analogiczne równanie można wyprowadzić dla prądu jonowego

$$\tilde{J}_{eS} = B \left\{ 1 + 2 \exp\left[\frac{(U_1 - \phi_e)}{kT_e}\right] \right\}^{-1}. \quad (2)$$

Gęstość prądu elektronów, które osiągają kolektor wynosi

$$J = J_{eS} \exp\left(-\frac{e\Delta\psi}{kT_e}\right), \quad (3)$$

gdzie:

$\Delta\psi$ - bariera potencjału spowodowana ładunkiem przestrzennym elektronów.

Stopień neutralizacji ładunku przestrzennego określa współczynnik β zdefiniowany następująco:

$$\beta = \frac{n_{e0}^+}{n_{i0}^+}, \quad (4)$$

gdzie:

n_{e0}^+ i n_{i0}^+ oznaczają odpowiednio gęstości tylko tych elektronów i jonów, w obszarze tuż za emiternem, które poruszają się w kierunku kolektora.

Współczynnik β można również wyrazić za pomocą prądów J_{es} i \tilde{J}_{es} [1], które oblicza się z (1) i (2) lub wyznacza doświadczalnie

$$\beta = \left(\frac{m_i}{m_e} \right)^{1/2} \left(\frac{\tilde{J}_{es}}{J_{es}} \right). \quad (5)$$

Ze wzoru (4) wynika, że całkowita neutralizacja ładunku przestrzennego powinna wystąpić dla $\beta = 1$. Na podstawie licznych eksperymentów [7] stwierdzono jednak, że w miarę zbliżania się do wartości $\beta = 1$, w układzie pojawiają się silne, niegasnące oscylacje napięcia zewnętrznego i prądu, będące wynikiem fluktuacji plazmy w przestrzeni międzyelektrodowej generatora.

Zjawiska transportu w przestrzeni międzyelektrodowej opisuje układ równań Własowa i Poissona [2], [3]. Dla stanów stacjonarnych przyjmują one postać

$$v_e \frac{\partial f_e}{\partial x} + \frac{e}{m_e} \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial f_e}{\partial v_e} = 0,$$

$$v_i \frac{\partial f_i}{\partial x} + \frac{e}{m_e} \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial f_i}{\partial v_i} = 0, \quad (6)$$

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = 4\pi e \int_{-\infty}^{+\infty} (f_e - f_i) dv.$$

Analiza wyników obliczeń numerycznych wykonanych przez McIntyre'a [2] prowadzi do wniosku, że dla wartości β zbliżających się do jedności model stacjonarny traci sens.

Prowadzone były również badania symulacyjne, opierające się na rozwiązaniu niestacjonarnego równania Własowa [4], [5]. Badania te wykazały pojawienie się silnych oscylacji w miarę wzrostu β od zera do jedności.

Zależność (5) można wyrazić za pomocą energii kinetycznych emitowanych jonów i elektronów

$$\beta^2 = \frac{m_i n_i^2 \bar{v}_i^2}{m_e n_e^2 \bar{v}_e^2} \quad (7)$$

Zależność (7) sugeruje możliwość zastosowania wariacyjnej hipotezy przejść fazowych [8] do analizy stabilności generatora plazmowego.

2. WARIACYJNA HIPOTEZA PRZEJŚĆ FAZOWYCH

Ewolucja niestacjonarnych układów termodynamicznych przebiega w kierunku stanów stacjonarnych lub stanów równowagi. W pracy [8] uznano, że do opisu możliwych przejść fazowych nie jest konieczna znajomość rozwiązań niestacjonarnych równań bilansu WE, a wystarcza jedynie znajomość pewnych charakterystycznych własności stanów stacjonarnych, zdefiniowanych w [8] poprzez sposoby przenoszenia (dysypacji) WE. Do opisu własności stacjonarnych układów termodynamicznych wykorzystano koncepcję lokalnego potencjału i zaproponowano funkcjonal ewolucji w postaci [8]

$$\Omega = \int_0^{\infty} \left(\frac{\partial}{\partial t} E^* \right) dt = E^*(r^0, r^0) - E^*(r^0, r^+) \leq 0. \quad (8)$$

Przyjęto hipotezę [8], że rzeczywiste procesy wymiany WE w układzie zachodzą tak, że Ω obliczane wzdłuż rzeczywistej trajektorii stanów stacjonarnych ma wartość minimalną w porównaniu z wartościami, jakie Ω przybiera wzdłuż trajektorii

wariacyjnych. Odstępstwo od tej reguły występuje tylko w obszarze, w którym w zasięgu małych fluktuacji znajduje się konkurująca faza (konkurujący system przenoszenia WE). Dochodzi wówczas do nierównowagowego przejścia fazowego

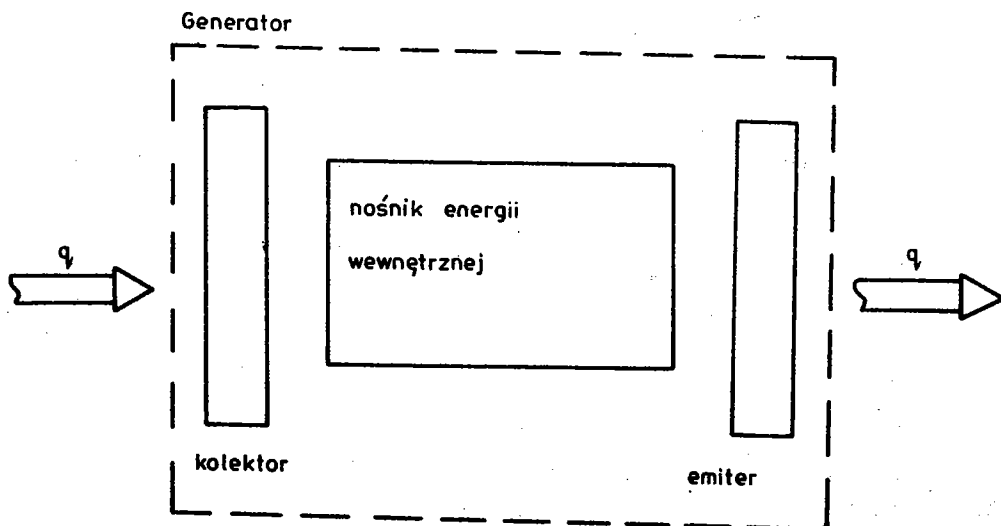
$$\Omega^I = \Omega^{II} \quad (9)$$

3. ANALIZA STABILNOŚCI GENERATORA

Zgodnie z wynikami przedstawionymi w punkcie 1, do rozważań przyjęto przypadek, gdy w układzie generatora plazmowego nie jest wykonywana praca, tzn. gdy różnica potencjałów elektrostatycznych jest równa zero

$$\Delta\psi = 0. \quad (10)$$

Warunek (10) oznacza, że równe są gęstości jonów i elektronów poruszających się w kierunku kolektora. Wobec braku pracy w układzie całe wymienione ciepło jest równoważne zmianie energii wewnętrznej. Przyjęto, że jony i elektrony biorące udział w transporcie energii od emitera do kolektora, ze względu na założony brak zderzeń, nie powodują dysypacji



Rys.2. Schemat transportu energii cieplnej w generatorze termionicznym

energii wewnętrznej układu. Schemat transportu energii cieplnej przedstawia rys.2.

Przy zaniedbaniu promieniowania, gęstość strumienia ciepła [9] zapisuje się zależnością

$$q = L_{qq}^0(T^0) \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{T^0} + L_{qe}^0(\psi^0) \frac{\partial}{\partial x} \psi^0 + L_{qi}^0(\psi^0) \frac{\partial}{\partial x} \psi^0. \quad (11)$$

Wobec warunku (10) w zależności (11) zanikają drugi i trzeci człon prawej strony. Zgodnie z przyjętą hipotezą [8] wyróżniono dwa pierwotne systemy przenoszenia - pierwszy to generator termioniczny zawierający w przestrzeni międzyelektrodowej wyłącznie elektrony, drugi to układ wyłącznie z jonami. Należy zaznaczyć, że w rozważanym stanie stacjonarnym cały układ jest obojętny elektrycznie i dlatego przy konstrukcji pierwotnych systemów przenoszenia przyjęto, że można pominać wpływ ładunków elektrycznych jonów i elektronów na procesy dyssypacyjne. Kryterium przejścia fazowego przyjmuje postać:

$$e_{\Omega} = i_{\Omega}$$

$$e_{\Omega} = \frac{1}{2} \int_a^b \left\{ L_{qq}^e(T^0) \left(\frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{T^0} \right)^2 - L_{qq}^e(T^0) \left(\frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{T^+} \right)^2 \right\} dx \quad (12)$$

$$i_{\Omega} = \frac{1}{2} \int_a^b \left\{ L_{qq}^i(T^0) \left(\frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{T^0} \right)^2 - L_{qq}^i(T^0) \left(\frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{T^+} \right)^2 \right\} dx$$

T^0 jest stacjonarnym rozkładem temperatur w generatorze, gdy spełniony jest warunek (10). Natomiast T^+ jest niestacjonarnym rozkładem temperatur, w którym spełniony jest warunek (10). Gdy gęstości nośników energii są jednakowe, warunek (10) dla układu niestacjonarnego jest równoważny zależności

$$\int_a^b L_{qq}^e(T^0) \left(\frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{T^+} \right)^2 dx = \int_a^b L_{qq}^i(T^0) \left(\frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{T^+} \right)^2 dx. \quad (13)$$

Zależność (13) pozwala zapisać (12) w postaci

$$\int_a^b L_{qq}^e(T^0) \left(\frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{T^0} \right)^2 dx = \int_a^b L_{qq}^i(T^0) \left(\frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{T^0} \right)^2 dx, \quad (14)$$

a stąd

$$L_{qq}^e = L_{qq}^i. \quad (15)$$

Z (15) wynika, że elektrony i jony transportują taką samą ilość energii wewnętrznej badanego układu. W przestrzeni międzyelektrodowej energia wewnętrzna układu może być transportowana tylko w postaci energii kinetycznej jonów i elektronów. Stąd warunek (15) można zapisać w postaci:

$$m_i n_{i0}^+ \bar{v}_i^2 = m_e n_{e0}^+ \bar{v}_e^2$$

lub

$$\frac{m_i n_{i0}^+ \bar{v}_i^2}{m_e n_{e0}^+ \bar{v}_e^2} = \beta = 1. \quad (16)$$

Jeżeli w warunkach pracy generatora opisanych zależnościami (10) i (16) dochodzi do zmian energii wewnętrznej spowodowanych dyssypacją energii elektromagnetycznej, to funkcjonal ewolucji (12) należy zapisać

$$\Omega^+ = \Omega_{\text{przewodzenie}} + \Omega_{\text{energia elektromagnetyczna}} \quad (17)$$

Stąd wynika, że

$$\Omega^+ < \Omega_{\text{przewodzenie}} \quad (18)$$

Zgodnie z (18) i zaproponowaną w [8] zasadą minimum funkcjonalu ewolucji większe prawdopodobieństwo występowania będzie miał układ z dyssypacją energii elektromagnetycznej.

W tym miejscu należy poczynić kilka uwag na temat przeprowadzonych rozważań i otrzymanych wyników (16) i (18).

Warunek (10) pozwala traktować omawiany generator jako układ z przewodzeniem ciepła (dla $\beta = 1$). Stan generatora, w którym spekniony jest ten warunek można traktować jako stan równowagi chwiejnej. Uzasadnić to można poprzez następujące rozumowanie. W każdym układzie termodynamicznym występują fluktuacje parametrów opisujących układ. W generatorze opisanym zależnościami (10) i (11) fluktuacje te powinny pojawiać się w postaci fluktuacji gęstości jonów i elektronów. Rozpatrywane cząstki mają ładunki elektryczne i dlatego fluktuacje ich gęstości będą powodować powstanie w układzie chwilowej różnicy potencjałów, co spowoduje powstanie systemu przenoszenia z dyssypacją energii elektromagnetycznej, opisanego funkcjonalem ewolucji (17). Warunki brzegowe (10) będą powodowały wygaszanie zjawisk związanych z dyssypacją energii elektromagnetycznej, tzn. przywracanie stanu równowagi chwiejnej $\Delta\psi = 0$. Odchodzenie od tego stanu równowagi, wywołane fluktuacjami gęstości nośników ładunków, odbywać się będzie zgodnie z zasadą minimum Ω . Oznacza to, że w rozważanym generatorze w warunkach (10) i (16) obserwowane będą niegasnące fluktuacje potencjału elektrostatycznego (fluktuacje prądowo-napięciowe w obwodzie zewnętrznym generatora).

Zgodnie z (12) i (17) można uniknąć występujących w generatorze niestabilności, generując w układzie dodatkowe sposoby dyssypacji dające różne wartości funkcjonala Ω dla jonów i elektronów. Pierwszy sposób polega na wprowadzeniu różnicy potencjałów między elektrody generatora. Taki stan układu można uznać za stabilny dlatego, że brak w nim mechanizmu powodującego zmiany stanu układu. Zarówno warunki brzegowe jak i zasada minimum działają w tym samym kierunku, tj. w kierunku osiągnięcia przez układ stanu stacjonarnego. Drugi sposób usuwania niestabilności polega na wprowadzeniu obcych atomów do przestrzeni międzyelektrodowej. Spowoduje to wystąpienie dodatkowych procesów dyssypacyjnych, związanych ze zderzeniami elektronów i jonów z atomami obcej substancji. W rozważanym przypadku różnica funkcjonali ewolucji jonów i elektronów wynika z różnicy wytracanej energii kinetycznej na atomach obcej substancji, na skutek znacznej różnicy mas jonów i elektronów. Doświadczalnie wykazano, że wprowadzenie obcej substancji

znacznie osłabia fluktuacje prądowo-napięciowe, a przy znacznej gęstości atomów obcych w przestrzeni międzyelektrodowej pozwala usunąć niestabilność [6], [7].

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Zaproponowany model opisu uzasadnia, poprzez zasadę minimum Ω , powód występowania fluktuacji prądowo-napięciowych jako przejaw dążności układu do uruchomienia dodatkowych sposobów dyssypacji energii. Zgodnie z hipotezą zaproponowaną w [8], fluktuacje te powinny posiadać własności samopodtrzymywania się, co w przypadku braku różnicy potencjałów między elektrodami, powoduje dużą niestabilność procesu, w tym samym niemożność opisanego go poprzez stacjonarne równania postaci (6) (wyniki obliczeń w pracach [2], [4], [5]). Z przeprowadzonych rozważań wynika, że przyczyną fluktuacji jest równość energii kinetycznych jonów i elektronów, a nie tylko jak zasugerowano to w pracy [6] różnica mas obu nośników. Wykryte, za pomocą przeprowadzonej analizy, dwa sposoby usuwania niestabilności są zgodne z wnioskami przedstawionymi w pracy [6]. Sposoby te podlegają również weryfikacji doświadczalnej. Zaproponowana metoda analizy niestabilności nie pozwala oszacować rzeczywistych wielkości fluktuacji energii, ani określić granicznych wartości parametru β przy jakim dochodzi do powstania pierwszych oscylacji. Przeprowadzone rozważania i ich wyniki pozwalają stwierdzić, że postawiona w [8] hipoteza jest słuszna.

BIBLIOGRAFIA

- [1] H a t s o p o u l o s G.N., G y f t o p o u l o s E.P.: Thermionic Energy Conversion, vol.II, SUSDE, 1979.
- [2] M c I n t y r e R.G.: J. Appl. Phys., vol.33, p.2485 (1962).
- [3] A u e r P.L.: J. Appl. Phys., vol.31, p.2096 (1960).
- [4] B u r g e r P.: J. Appl. Phys., vol.38, p.3360 (1967).

- [5] Burger P.: J. Appl. Phys., vol.36, p.1936 (1965).
- [6] Norris W.T.: J. Appl. Phys., vol.35, p.3260 (1964).
- [7] Houston J.M.: Proc. 22nd Phys. Electron. Conf., MIT 1962.
- [8] Mosdorf R., Poniewski M., Urbanski M.: Archiwum Termodynamiki, vol.5 (1984), nr 1, s.21-29.
- [9] Wiśniewski S., Staniszewski B., Szymanik R.: Termodynamika procesów nierównowagowych. PWN, Warszawa 1973.

ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ НЕСТАБИЛЬНОСТИ
ТЕРМОЭМИССИОННОГО ГЕНЕРАТОРА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

К р а т к о е с о д е р ж а н и е

Гипотеза о минимуме функционала эволюции термодинамической системы, представленная в работе [8], была использована для обоснования наличия флуктуации тока и напряжения в термоэмиссионном генераторе при $\beta = 1$. Методы устранения флуктуаций в генераторе, вытекающие из проведенного анализа, согласуются с экспериментальными данными.

PHENOMENOLOGICAL INTERPRETATION OF LOW PRESSURE
THERMIONIC GENERATOR INSTABILITY

S u m m a r y

The hypothesis of a functional minimum of a thermodynamic system evolution presented in [8] has been used to substantiate the current and voltage fluctuations in a thermionic generator at $\beta = 1$. The methods for elimination of a generator instability resulting from the performed analysis have been in good agreement with an experiment.