

# BIULETYN INFORMACYJNY

## INSTYTUTU TECHNIKI CIEPLNEJ

### POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

WARSZAWA

TEL. 215021 w. 32 i 48

NOWOWIEJSKA 25

Nr 4/K.T.M.C.3

kwiecień 1966

Mgr inż. M. Bednarkiewicz, mgr inż. J. Bzowski, dr inż. M. Zgorzelski  
Katedra Teorii Maszyn Ciepłych

#### WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH GENERATORÓW TERMoeLEKTRONOWYCH Z PARAMI CEZU

##### 1. Wstęp

Omówiony w niniejszej pracy eksperyment był pierwszą w Instytucie Techniki Ciepłej P.W. (i w kraju) próbą uruchomienia modeli generatora termoelektronowego do bezpośredniej konwersji ciepła w energię elektryczną o układzie diody plazmowej z parami cezu.

Eksperymenty i badania teoretyczne przeprowadzane w I.T.C. we wcześniejszych latach dotyczyły głównie generatorów próżniowych w układzie diody i triody magnetycznej por. np. (1), (2). Z uwagi na wzrastającą rolę i interesująco przedstawiającą się perspektywę zastosowań (3), (4) generatorów cezowych - zdecydowano się na rozpoczęcie badań eksperymentalnych tego typu urządzeń.

Zasadniczym celem omówionego poniżej eksperymentu było:

- 1) wywołanie zjawiska konwersji energii w generatorze cezowym,
- 2) pomiar podstawowych wielkości charakteryzujących generator (napiecie, prąd, moc itp.),

3) zaobserwowanie i możliwie wszechstronne rozpoznanie podstawowych trudności występujących w tego rodzaju eksperymencie.

Na podstawie danych w literaturze spodziewano się trudności o charakterze:

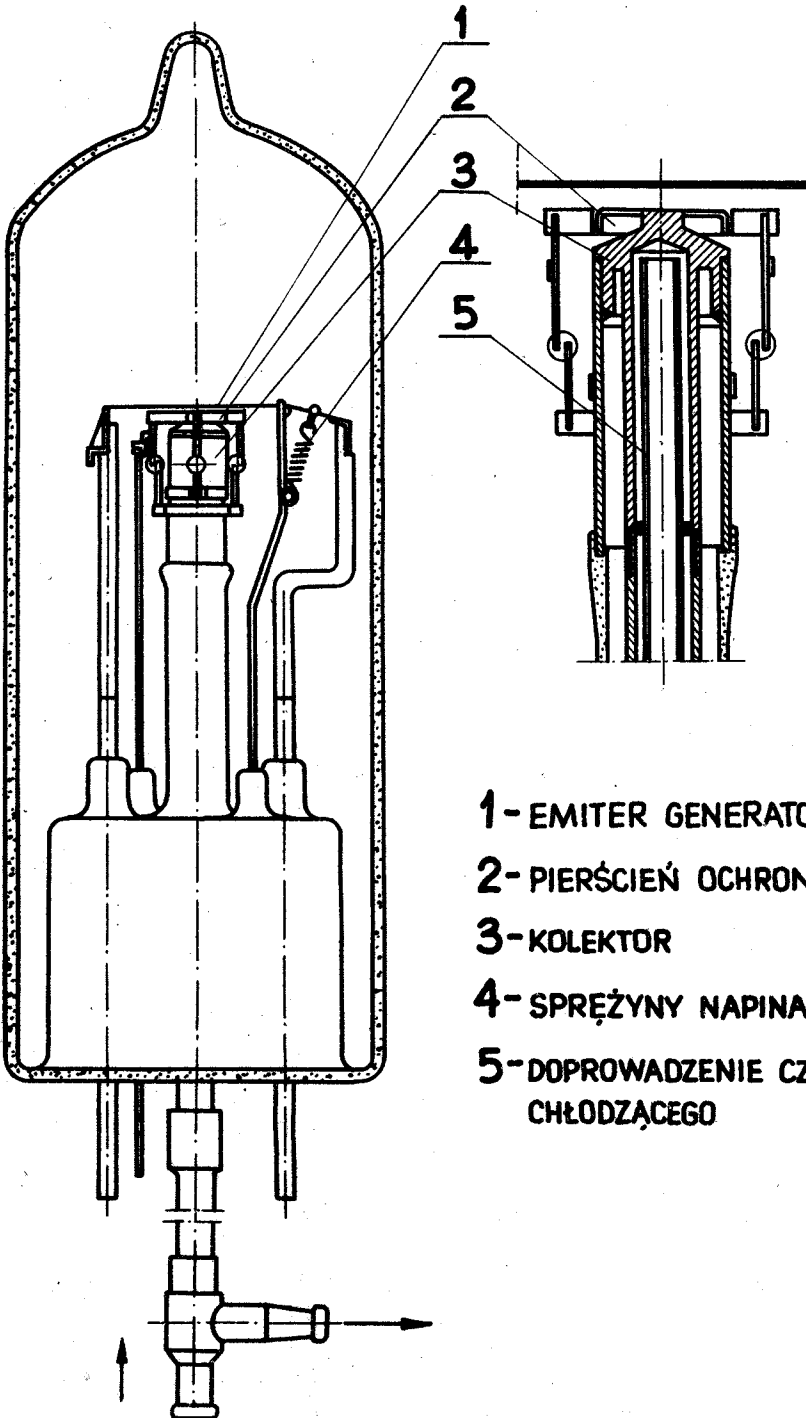
- a) konstrukcyjnym - przy opracowaniu konstrukcji modeli generatora, dostosowanych do krajowych możliwości wykonawczych,
- b) technologicznym - przy wykonaniu modeli,
- c) operacyjnym - przy uruchamianiu generatorów, obsłudze stanowiska, uruchamianiu układu regulacyjnego,
- d) pomiarowym - przy zaprojektowaniu i uruchomieniu układu pomiarowego,
- e) interpretacyjnym - przy opracowywaniu teoretycznym wyników eksperymentu.

Przeprowadzony eksperyment nie różnił się w sposób zasadniczy od podobnych eksperymentów przeprowadzonych wcześniej w innych krajach, bardziej zaawansowanych w badaniach nad termoelektronową konwersją energii.

## 2. Technika eksperymentu

Wykonano 3 egzemplarze modeli generatora termoelektronowego. Konstrukcję modeli przedstawia rys. 1. Emiterem elektronów była taśma tantalowa (1) napisana sprężynami (4) dla zachowania równoległości w stosunku do powierzchni kolektora. Kolektor (3) wykonany był z miedzi. Od wewnątrz korpus kolektora chłodzony był azotem doprowadzanym z zewnątrz rurką (5). Kolektor otoczony był pierścieniem ochronnym (2) utrzymywanym na tym samym potencjale dla zapewnienia jednorodności pola elektrycznego w przestrzeni międzyelektrodowej. Wykonane 3 generatory różniły się pomiędzy sobą jedynie odległością międzyelektrodową; wynosiła ona mianowicie 0,2; 0,5 i 1,0 mm.

Wewnątrz bańki szklanej generatora znajdował się cez. Podczas pomiarów cała bańka umieszczana była w termostacie, a temperatura jej kontrolowana była sześcioma termoelementami Ni - NiCr umocowanymi na powierzchni zewnętrznej i rejestrowana na kompensatorze rejestrującym. W temperaturze pokojowej

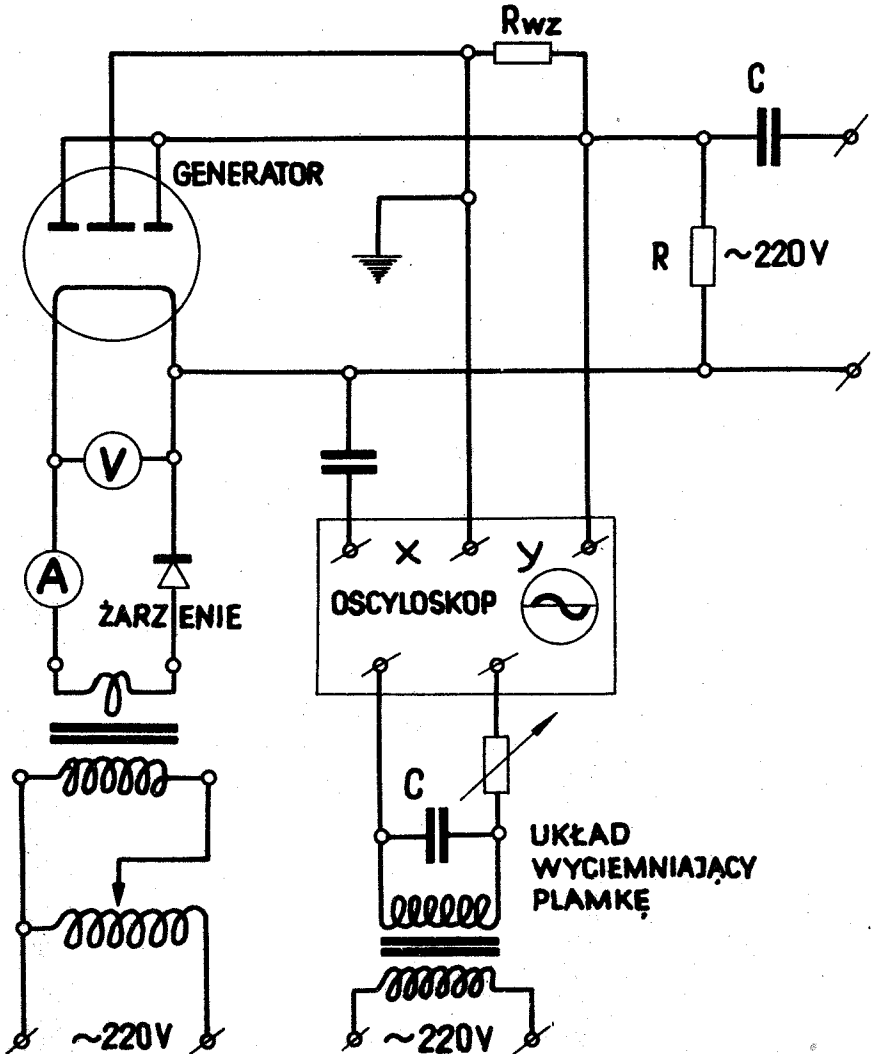


- 1 - EMITER GENERATORA
- 2 - PIERŚCIEŃ OCHRONNY
- 3 - KOLEKTOR
- 4 - SPRĘŻYNY NAPINAJĄCE
- 5 - DOPROWADZENIE CZYNNIKA CHŁODZĄCEGO

Rys.1

cez osadza się na ściankach bańki w postaci stałej; w temperaturach podwyższonych zaś ( $100-300^{\circ}\text{C}$ ) cez znajdował się w bańce częściowo w postaci cieczy, częściowo zaś w postaci pary nasyconej - temperatura bańki była więc miernikiem ciśnienia par cezu wypełniających bańkę.

Emiter elektronów ogrzewany był bezpośrednio prądem elektrycznym. Z uwagi na możliwy wpływ prądu grzejącego na pracę generatora zastosowano układ pomiarowy przedstawiony w uprosz-



Rys. 2

czeniu na rys. 2. Układ ten umożliwiał żarzenie emitera prądem zmiennym 50 Hz, prostowanym jednokierunkowo; ogrzewanie więc następowało jedynie przez 1/2 okresu zmienności (1/100 sek). W drugiej połowie okresu prąd żarzenia nie przepływał przez emiter. W tym czasie specjalny układ pomiarowy dokonywał pomiaru charakterystyki generatora (tj. pomiaru prądu przepływającego przez generator w funkcji napięcia na jego zaciskach). Napięcie  $U$  na zaciskach generatora zmieniało się od  $-5V$  do  $+5V$ . Napięcie to sterowało równocześnie poziomym wychyleniem plamki oscyloskopu. Równocześnie prąd  $J$  dawany przez generator mierzony był jako spadek potencjału na oporniku wzorcowym  $R_{wz}$  (rys. 2). Ten spadek potencjału sterował pionowym wychyleniem plamki oscyloskopu. Na ekranie otrzymywano więc bezpośrednio tzw. charakterystykę generatora: zależność  $J = f(U)$ . Charakterystykę tę rejestrowano metodą fotograficzną. W okresach kiedy przez emiter przepływał prąd żarzenia, specjalny układ wygaszał plamkę oscyloskopu i rejestracja nie następowała.

Temperatura emitera regulowana była podczas pomiarów natężeniem prądu żarzenia. Kontrola temperatury podczas pomiarów oparta była na kontroli natężenia prądu żarzenia, w oparciu o uprzednio otrzymaną przy pomocy pirometru optycznego zależność temperatury od prądu żarzenia. Bezpośredni pomiar pirometrem w czasie trwania pomiarów nie był możliwy z uwagi na konstrukcję termostatu i samego modelu generatora.

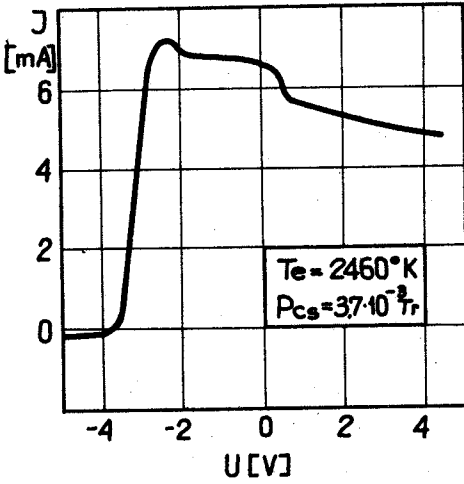
### 3. Wyniki badań

Na rys. 3 przedstawiono przykładowo cztery typowe przebiegi charakterystyk  $J = f(U)$  zarejestrowanych podczas badań modelu nr 1 (odległość międzyelektrodowa 1 mm). Jak wynika z rysunku otrzymano rezultaty dość typowe, pokrywające się co do charakteru krzywych i rzędów wielkości prądów i napięć z rezultatami uzyskiwanymi przez innych badaczy, por. np. (5), (6).

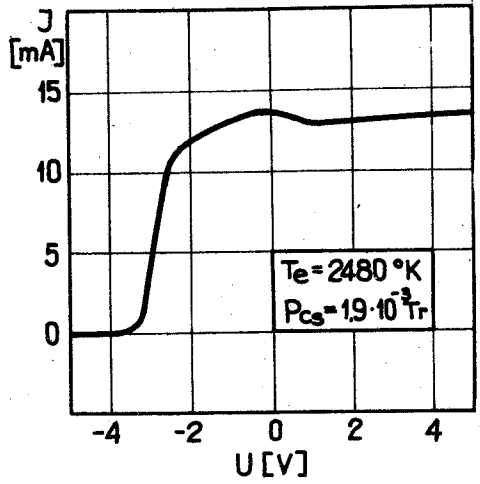
Opierając się na uzyskanych charakterystykach obliczono gęstości mocy oraz sprawności dla zbadanego modelu. Gęstość mocy obliczano jako

$$P = iU, \quad (1)$$

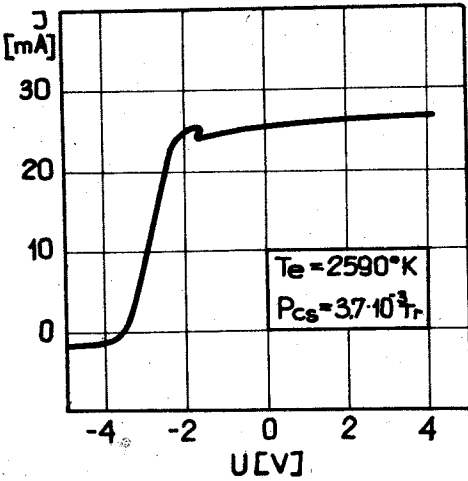
a)



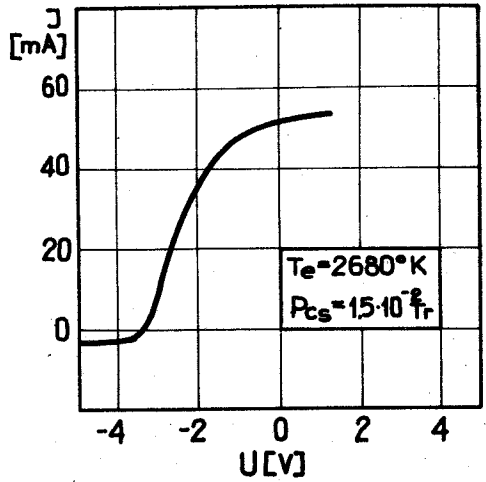
b)



c)



d)



Rys. 3

gdzie

$$i = \frac{J}{F} . \quad (2)$$

Sprawność obliczano jako

$$\eta = \frac{P}{q_e + q_r} , \quad (3)$$

gdzie strumień cieplny chłodzenia elektronowego  $q_e$  wyznaczono z zależności

$$q_e = i(\varphi_e + \frac{2k T_e}{e}) , \quad (4)$$

zaś strumień cieplny strat przez promieniowanie  $q_r$

$$q_r \cong E_{ef} \sigma T_e^4 . \quad (5)$$

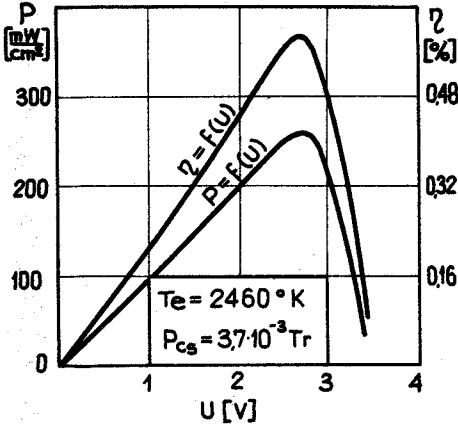
Potencjał wyjścia emitera  $\varphi_e$  we wzorze (4) wyznaczono opierając się na zależności Richardsona-Dushmana

$$i_s = A T_e^2 \exp\left(-\frac{e \varphi_e}{k T_e}\right) , \quad (6)$$

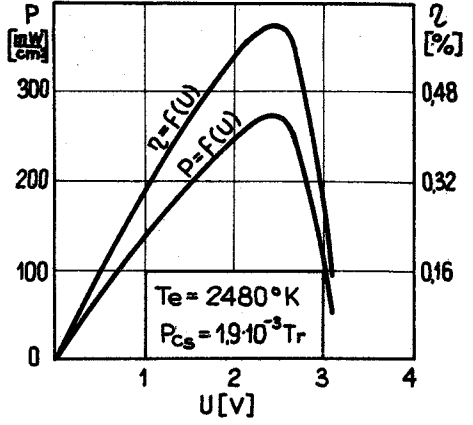
przy czym za gęstość prądu nasycenia  $i_s$  przyjęto dla każdej z charakterystyk maksymalną zarejestrowaną gęstość prądu; dodatkowy rachunek wykazał, że we wszystkich zarejestrowanych przypadkach występował w przestrzeni międzyelektrodowej znaczny nadmiar dodatnich jonów cezu - nie miało więc miejsca ograniczenie prądu nasycenia ujemnym ładunkiem przestrzennym elektronów. Wartość  $\varphi_e$  otrzymana w ten sposób była praktycznie jednakowa dla wszystkich zbadanych przypadków i wynosiła 4,8 V.

Na rys. 4 przedstawiono obliczone przy pomocy podanych wyżej zależności krzywe mocy i sprawności, dla tych samych czterech przypadków, dla których charakterystyki podano na rys. 3. Należy zaznaczyć, że napięcia  $U$  zaznaczone jako dodatnie na rys. 4 odpowiadają obszarowi pracy urządzenia jako generatora, tj. części charakterystyk położonej po lewej stronie osi  $U=0$  z rys. 3. Innymi słowy, napięcia oznaczone jako ujemne na rys. 3, zgodnie z powszechnie przyjętym sposobem przedstawiania charakterystyk, na rys. 4 traktowane są jako dodatnie.

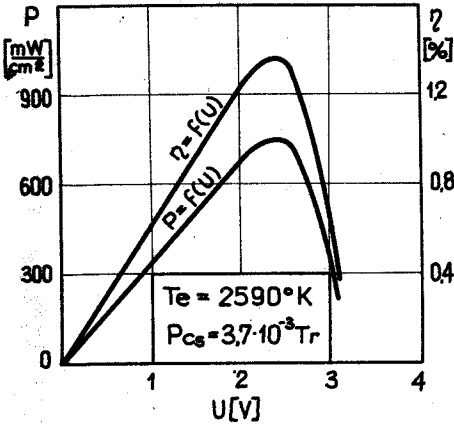
a)



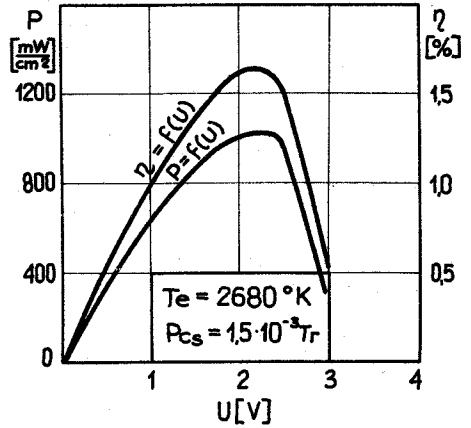
b)



c)



d)



Rys. 4



#### 4. Omówienie wyników

Uzyskane wyniki świadczą, że w zbadanych modelach generatora uzyskano zjawisko bezpośredniej konwersji ciepła w energię elektryczną.

Maksymalna zarejestrowana gęstość mocy wynosiła  $P = 1,03 \text{ W/cm}^2$  przy gęstości prądu  $i = 0,48 \text{ A/cm}^2$  i napięciu na zaciskach generatora  $U = 2,14 \text{ V}$ . Sprawność przetwarzania wynosiła dla tego przypadku  $\eta = 1,64\%$ .

Maksymalna gęstość prądu zwarcia (przy  $U = 0$ ) wynosiła  $i = 0,73 \text{ A/cm}^2$  (dane te odnoszą się do charakterystyki pokazanej na rys. 4d).

Powyższe wartości można uznać za zadowalające, biorąc pod uwagę fakt, że pomiary wykonano jedynie w zakresie jonizacji kontaktowej. Wyższe gęstości mocy i sprawności byłyby możliwe do uzyskania jedynie w warunkach jonizacji objętościowej, tj. przy wyższych ciśnieniach par cezu. Warunki takie zdołano wytworzyć, jednakże ze względów omówionych dalej w punkcie 5 nie zdołano w tych warunkach wykonać pomiarów, które można by uważać za pewne.

#### 5. Omówienie trudności eksperymentalnych

W przeprowadzeniu eksperymentów, zgodnie z oczekiwaniami, natrafiono na poważne trudności. Można wyróżnić dwie zasadnicze ich grupy:

##### a. Trudności związane z defektami modeli

Wprawdzie spodziewano się na podstawie danych literaturowych, że znaczna aktywność chemiczna cezu w stosunku do metali i tlenków może spowodować szybkie uszkodzenie zbudowanych urządzeń, jednakże defekty wystąpiły nadspodziewanie szybko. Model nr 1 przestał działać po kilkudziesięciu godzinach pracy na skutek utraty szczelności, zaś model nr 2 z tego samego powodu już po kilku godzinach pracy. Przyczyną utraty szczelności były w obu wypadkach uszkodzenia (pęknięcia) szkła w miejscach, w których wykonane były przepusty molibdenowych wprowadzeń elektrod.

Model nr 3 przestał działać po kilkunastu godzinach pracy wskutek defektu (zerwania) tantalowej taśmy emitera, spowodowanego prawdopodobnie wewnętrzną wadą materiału. W tym stanie rzeczy pełny komplet zdjęć charakterystyk zdołano uzyskać tylko z modelu nr 1.

b. Trudności związane z przeprowadzaniem pomiarów metodą dynamiczną

Jak już podano w punkcie 2 pomiar charakterystyk był wykonywany w sposób dynamiczny. Jak się okazało pomiar tego rodzaju przynosi dobre rezultaty w zakresie pracy generatora, w którym produkcja jonów cezu oparta jest na kontaktowej jonizacji termicznej na powierzchni emitera. Natomiast przy występowaniu jonizacji nietermicznej w przestrzeni międzyelektrodowej (tzw. jonizacji objętościowej), co ma miejsce przy wyższych ciśnieniach par cezu (gdy swobodna droga elektronu staje się mniejsza od odległości międzyelektrodowej) pomiar dynamiczny ma poważne wady. Mianowicie zjawiska jonizacji i dejonizacji nie przebiegają wtedy w sposób ustalony w czasie. Pojawienie się dodatkowego napięcia pomiarowego powoduje przyśpieszanie elektronów w przestrzeni międzyelektrodowej i intensyfikację procesu jonizacji, co z kolei powoduje wzrost prądu elektronów, co znowu wpływa na proces jonizacji itd. Również czasy dejonizacji, które są rzędu milisekund, są porównywalne z czasem wykonywania pomiaru (10 msek). Podczas pomiaru mogą występować więc w przestrzeni międzyelektrodowej zarówno jony powstałe w poprzednim okresie pomiarowym, jak też i w okresie żarzenia emitera. Zjawiska te powodują, że w zakresie jonizacji objętościowej charakterystyki były niestabilne, niepowtarzalne i zdjęć ich nie wykonywano. Ponadto powstawanie oscylacji w plazmie o bardzo wysokich częstościach (rzędu setek kHz) powodowało znaczne rozmycie plamki oscyloskopu w pewnych obszarach charakterystyki, utrudniając dodatkowo pomiar.

W efekcie wspomniany uprzednio komplet zdjęć charakterystyk dotyczy jedynie warunków jonizacji kontaktowej i wysokich temperatur emitera i niskich ciśnień par cezu.

W planowanych w I.T.C. dalszych eksperymentach nad plazmami generatorami termoelektronowymi niezbędne będzie podjęcie

różnego rodzaju kroków, zmierzających do częściowego przynajmniej zapobieżenia omówionym trudnościom.

Autorzy niniejszej pracy pragną podziękować pracownikom Przemysłowego Instytutu Elektroniki: mgr inż. Z.Biale, mgr inż. W.Szczerskiemu i mgr inż. J.Cieślakowi, którzy byli wykonawcami modeli generatora, za trud włożony przez nich w to trudne zadanie.

Autorzy pragną również podziękować studentom wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa: P.Jędrzejewskiemu, M.Kopciowi i A.Burakowskiemu, którzy brali udział w wykonywaniu licznych prac przygotowawczych i pomiarów.

### Wykaz oznaczeń

- $A = 120,1 \text{ A/cm}^2 \text{ } ^\circ\text{K}^2$  - stała Richardsona-Dushmana  
 $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$  - nabój elektronu  
 $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-12} \text{ W/cm}^2 \text{ } ^\circ\text{K}^4$  - stała Stefana-Boltzmana  
 $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$  - stała Boltzmana  
 $E_{ef}$  - emisyjność efektywna promieniowania dla układu elektrod  
 $J$  - natężenie prądu (A)  
 $i$  - gęstość prądu ( $\text{A/cm}^2$ )  
 $F$  - powierzchnia emitera ( $\text{cm}^2$ )  
 $T_e$  - temperatura emitera ( $^\circ\text{K}$ )  
 $T_{Cs}$  - temperatura par cezu ( $^\circ\text{K}$ )  
 $p_{Cs}$  - ciśnienie par cezu (Tr)  
 $\psi_e$  - potencjał wyjścia emitera (V)  
 $q_e$  - strumień ciepła chłodzenia elektronowego ( $\text{W/cm}^2$ )  
 $q_r$  - strumień ciepła promieniowania ( $\text{W/cm}^2$ )  
 $P$  - gęstość mocy generatora ( $\text{W/cm}^2$ )  
 $\eta$  - sprawność generatora  
 $U$  - napięcie na zaciskach generatora (V).

### Bibliografia

1. Zgorzelski M.: Optimization of the Magnetic-Triode Type Thermionic Converter. Journal of Applied Physics, Nr 1, 1964.

2. Zgorzelski M.: Results of some Experimental Investigations Concerning the Magnetic Triode Type Thermoelectron Converter Archiwum Budowy Maszyn, Nr 4, 1964.
3. Staniszewski B., Zgorzelski M.: Perspectives in the Application of Thermionic Converters in Connection with Conventional Power Plant. World Power Conf. Sect. Meet. Lausanne, 1964.
4. Urbaniec K.: Generatory termoelektronowe dla energetyki jądrowej. Przegląd Elektrotechniczny, Nr 5, 1966.
5. Dresser D.L.: Experimental Data for Analysis of Thermionic Converters. Amu-ANL Conf. on Direct Energy Conversion, Argonne, 1963.
6. Houston J.M., Webster H.F.: Thermionic Energy Conversion Adv. in Electron and Electron Phys., Academic Press, Vol. 17, 1962.

Nr 4/K.T.M.C.4