

Piotr Janas
Pracownia Fizyczna, Uniwersytet Rolniczy

Do użytku wewnętrznego

ĆWICZENIE 38

WYZNACZANIE CHARAKTERYSTYK I PARAMETRÓW LAMP ELEKTRONOWYCH

Kraków 2019

ZAKRES WYMAGANYCH WIADOMOŚCI ZE SZKOŁY ŚREDNIEJ:

Ładunki elektryczne. Pole elektryczne. Prąd elektryczny. Napięcie, natężenie, opór elektryczny.
Prawa Coulomba, Ohma, Kirchhoffa.

I. CZĘŚĆ TEORETYCZNA

1. Wstęp

Skonstruowana w 1907r przez DeForesta trójelektrodowa lampa elektronowa zapoczątkowała rozwój elektroniki, pełniąc przez kilkadziesiąt lat rolę podstawowego elementu aktywnego wykorzystywanego w większości układów elektronicznych. Niektóre typy lamp znajdują nadal zastosowanie, głównie do generacji i wzmacniania sygnałów bardzo wysokiej częstotliwości lub bardzo dużej mocy. Przykładowo, w powszechnie stosowanych kuchenkach mikrofalowych źródłem promieniowania jest lampa elektronowa zwana magnetronem. Chociaż obecnie lampy elektronowe niemal całkowicie zostały wyparte przez różnego typu elementy półprzewodnikowe poznanie budowy, działania czy też metodyki pomiaru i wyznaczania charakteryzujących badaną lampę parametrów stanowi znakomity wstęp do zrozumienia funkcjonowania bardziej złożonych przyrządów współczesnej elektroniki.

2. Budowa lamp próżniowych

Próżniowa lampa elektronowa składa się z kilku współosiowo usytuowanych elektrod, umieszczonych wewnątrz odpompowanej z powietrza bańki szklanej. Najbardziej wewnętrzna elektroda, wykonana w postaci metalowej rurki, nazywana jest **katodą**. Wewnątrz katody znajduje się skręcony, izolowany drut oporowy (grzejnik), który pod wpływem przepływającego przez niego prądu żarzenia rozgrzewa katodę do wysokiej temperatury rzędu 700 - 1800°C. Katodę otacza metalowy cylinder - **anoda** lampy. Anoda, katoda i końce grzejnika połączone są galwanicznie z nóżkami lampy stanowiącymi jej zewnętrzne doprowadzenia elektryczne. Tak zbudowana dwuelektrodowa lampa nazywana jest diodą. W lampie trójelektrodowej (triodzie) pomiędzy anodą a katodą rozpięta jest dodatkowo metalowa siateczka zwana **siatką** lampy.

3. Termoemisja elektronów

W specyficznych warunkach elektrony mogą opuszczać wnętrze metalu w procesie tzw. emisji. Warunkiem koniecznym emisji jest dostarczenie elektronom energii przekraczającej wartość tzw. pracy wyjścia A_w , energii charakterystycznej dla danego metalu, potrzebnej do pokonania sił przyciągania kulombowskiego pomiędzy elektronem swobodnego gazu elektronowego, a sztywną siecią dodatnich jonów tworzących sieć krystaliczną metalu. Jedną z metod dostarczania odpowiedniej energii jest nagrzewanie metalu do wysokiej temperatury. Doprowadzona energia zwiększa energię kinetyczną i potencjalną sieci krystalicznej, a jej część jest przekazywana elektronom przewodnictwa. W efekcie pojawiają się elektrony o energii

większej od pracy wyjścia i pędzie skierowanym do powierzchni metalu, mogące opuścić jego wnętrze. Zjawisko to nosi nazwę termoemisji elektronów.

Potwierdzona doświadczalnie analiza teoretyczna wskazuje, że gęstość prądu termoemisji (stosunek natężenia prądu I do wielkości emitującej powierzchni S) silnie zależy od temperatury T metalu. Zależność ta, nazywana prawem Richardsona ma następującą postać:

$$\frac{dI}{dS} = aT^2 \exp\left(-\frac{A_w}{kT}\right) \quad (1)$$

gdzie: a - stała charakterystyczna dla danego metalu, A_w - praca wyjścia metalu,
 k – stała Boltzmanna.

Zjawisko termoemisji stanowi podstawę działania próżniowych lamp elektronowych.

4. Działanie diody

Nagrzana do odpowiedniej temperatury katoda emituje elektrony, które tworzą wokół niej chmurę elektronową o ujemnym ładunku. Pomiedzy chmurą a katodą powstaje pole elektryczne przeciwstawiające się emisji elektronów i zwiększające liczbę elektronów powracających do katody. W efekcie ustala się stan równowagi dynamicznej: gęstość prądu termoemisji jest równa gęstości prądu powrotnego. Na stan taki można wpływać przez zmianę potencjału drugiej elektrody - anody. Jeżeli do anody zostanie przyłożone napięcie dodatnie względem katody, pojawiające się we wnętrzu lampy pole elektryczne wymusi stały przepływ elektronów z chmury do anody co jest równoważne przepływowi prądu elektrycznego przez lampę. Wzrost napięcia anody wywołuje wzrost natężenia przepływającego przez lampę prądu kosztem zmniejszania się gęstości chmury otaczającej katodę. Wzrost prądu anodowego nie jest jednak nieograniczony. Całkowity zanik przykatodowej chmury elektronowej stabilizuje prąd anodowy na poziomie tzw. prądu nasycenia lampy (I_N na Rys. 1). Jego wartość zależy głównie od temperatury katody. W przypadku lamp o katodach tlenkowych (o niskiej pracy wyjścia) prąd nasycenia nie może być osiągnięty, gdyż już przy stosunkowo niewielkich napięciach anodowych przekroczona zostaje dopuszczalna gęstość prądu katodowego powodując trwałe uszkodzenie katody.

5. Charakterystyka prądowo - napięciowa diody

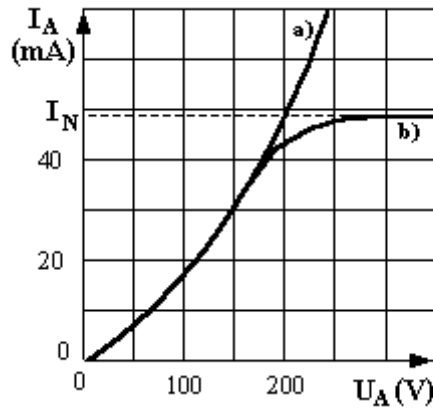
Mimo, że nośnikami ładunku w lampach, podobnie jak w metalach są elektrony, przepływ prądu przez lampę nie jest zgodny z prawem Ohma. Zależność między natężeniem prądu anodowego I_A i napięciem anodowym U_A , zwana charakterystyką prądowo - napięciową lampy, jest nieliniowa i może być opisana w szerokim zakresie zmian U_A następującym równaniem:

$$I_A = k \frac{(U_A)^{3/2}}{d^2} \quad (2)$$

gdzie: k - stała, d - odległość pomiędzy anodą i katodą.

Zależność ta znana jest w literaturze pod nazwą prawa Childa-Lanqmuira lub prawa trzech drugich.

Typowy kształt charakterystyk prądowo - napięciowych dla diody przedstawia Rys. 1.



Rys. 1. Charakterystyka prądowo-napięciowa diody próżniowej: a) katoda tlenkowa, b) katoda z czystego metalu.

Charakterystyki diody wykreślone są jedynie dla dodatnich wartości napięć anodowych, ponieważ przepływ prądu przez diodę możliwy jest wówczas, gdy potencjał anody jest wyższy od potencjału katody. W przeciwnym przypadku pole elektryczne pomiędzy elektrodami diody uniemożliwia przepływ prądu, którego nośnikami są elektrony o ujemnym ładunku.

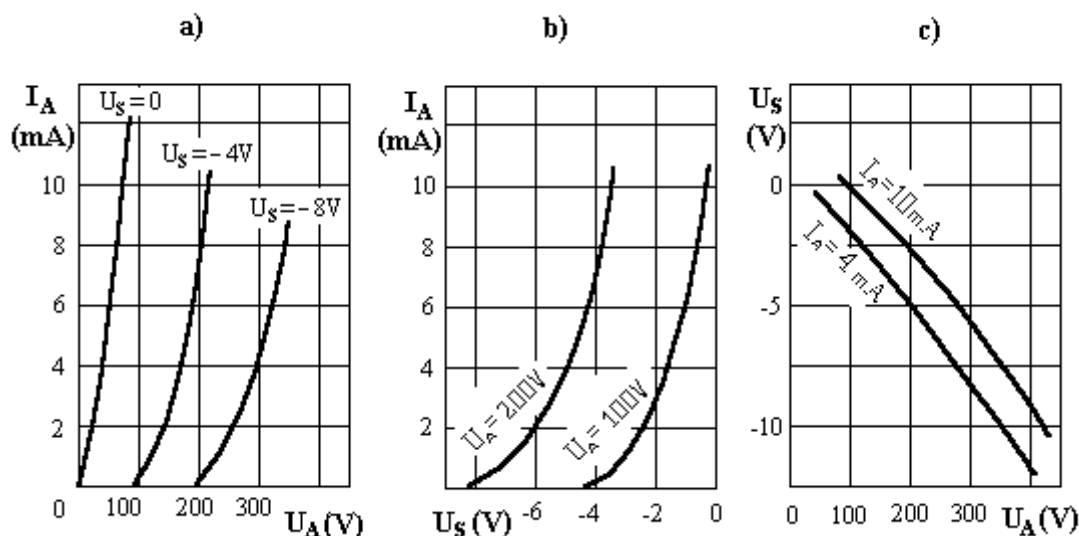
6. Działanie triody

W lampie trójelektrodowej (triocie) dodatkowa elektroda w postaci siatki umożliwia sterowanie prądem anodowym przy stałym potencjale anody. Ponieważ siatka znajduje się bardzo blisko katody, zmiany jej potencjału silniej wpływają na wielkość prądu anodowego niż zmiany napięcia anodowego. Jeżeli na siatce triody występuje napięcie ujemne względem katody, pole elektryczne wytworzone pomiędzy tymi elektrodami osłabia pole wytworzone przez anodę i w efekcie ogranicza prąd anodowy. Przy dodatnim potencjale siatki pole siatki i anody dodają się i zwiększają prąd anodowy, przy jednoczesnym pojawieniu się niezerowego prądu siatkowego. Część elektronów emitowanych przez katodę trafia bowiem do dodatnio spolaryzowanej siatki. Natężenie prądu katody I_K staje się równe sumie natężeń prądu anody I_A i siatki I_S . W praktyce, triody przeważnie pracują przy ujemnej polaryzacji siatki.

7. Charakterystyki triody

Dla lampy trójelektrodowej natężenie prądu anodowego I_A jest funkcją dwóch zmiennych, napięcia siatki U_S i napięcia anodowego U_A . Równanie triody, jako funkcję dwóch zmiennych, reprezentuje powierzchnia w przestrzeni trójwymiarowej (I_A, U_S, U_A).

Rzuty tej powierzchni na trzy płaszczyzny układu współrzędnych obrazują trzy rodziny charakterystyk triody $I_A(U_A)$, $I_A(U_S)$, i $U_S(U_A)$ przedstawione na Rys.2. Krzywe $I_A(U_A)$ noszą nazwę charakterystyk anodowych i opisują zmiany natężenia prądu anodowego I_A w funkcji potencjału anody U_A przy stałym napięciu siatki U_S . Charakterystyki $I_A(U_S)$ nazywane są siatkowymi i reprezentują zmiany prądu I_A w funkcji U_S , przy stałym napięciu anodowym U_A . Ostatnia grupa krzywych to charakterystyki izoprądowe $U_S(U_A)$ wyznaczone przy stałym prądzie anodowym I_A .



Rys. 2. Trzy rodziny charakterystyk triody ECC 91: a) anodowe, b) siatkowe, c) izoprądowe.

Z przedstawionych rodzin charakterystyk można wyznaczyć trzy podstawowe parametry określające właściwości triody:

$$\begin{aligned}
 \text{opór wewnętrzny (dynamiczny)} & \quad R = \Delta U_A / \Delta I_A \quad \text{dla } \Delta U_S = 0, \\
 \text{nachylenie charakterystyki} & \quad S = \Delta I_A / \Delta U_S \quad \text{dla } \Delta U_A = 0, \\
 \text{wzmocnienie (wsp. amplifikacji)} & \quad K = \Delta U_A / \Delta U_S \quad \text{dla } \Delta I_A = 0.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Łatwo wykazać, że parametry R , K i S związane są prostą zależnością: $R \cdot S = K$.

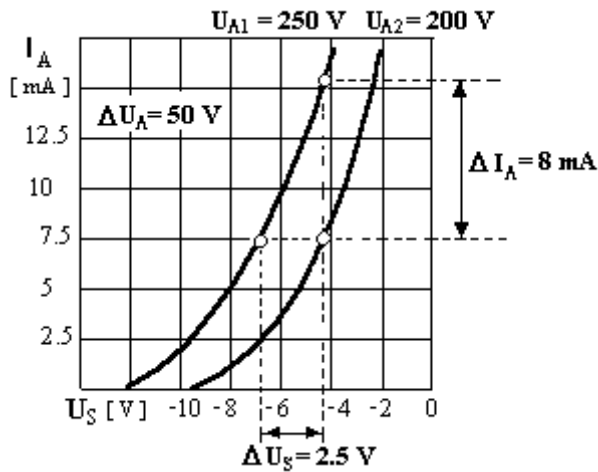
Ponieważ charakterystyki triody są nieliniowe, wartości parametrów S , K , R zmieniają się w zależności od punktu pracy lampy tj. stałych wartości I_A , U_A i U_S , wokół których określa się zmiany ΔI_A , ΔU_A i ΔU_S . Stałe S , K , R wyznacza się przeważnie w obszarze najbardziej liniowych zmian charakterystyk, ponieważ dla ograniczenia zniekształceń wzmacnianego przez lampę sygnału, w tym właśnie obszarze wybiera się **punkt pracy** lampy.

8. Metoda wyznaczania parametrów R , K , S

Dla wyznaczenia wartości parametrów R , K i S nie jest konieczny pomiar wszystkich trzech rodzin charakterystyk triody. W najprostszym przypadku wystarcza wyznaczenie dwóch

charakterystyk siatkowych przy dwóch różnych napięciach anodowych : $U_{A2} - U_{A1} = \Delta U_A$.

Sposób określania przyrostów ΔI_A i ΔU_S ilustruje Rys. 3.



$$R = \frac{50V}{8mA} = 6,25 k\Omega$$

$$S = \frac{8mA}{2,5V} = 3,2 mA/V$$

$$K = \frac{50V}{2,5V} = 20$$

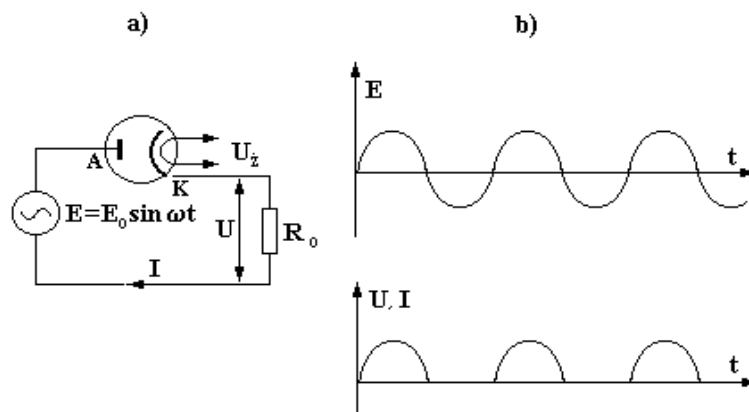
Rys. 3. Sposób graficznego wyznaczania przyrostów ΔI_A i ΔU_S z charakterystyk siatkowych triody.

9. Zastosowanie lamp elektronowych

9.1. Prostownicze działanie diody

Ściśle określony kierunek przepływu prądu przez diodę określa jej podstawową funkcję użytkową polegającą na prostowaniu prądu przemiennego. Dioda umieszczona w obwodzie zawierającym źródło napięcia przemiennego (tj. o zmieniającej się w czasie polaryzacji) wymusza jednokierunkowy przepływ prądu w tym obwodzie. W ten sposób możliwe jest np. zasilanie odbiornika prądu stałego, takiego jak radio, telewizor czy komputer z sieci energetycznej prądu przemiennego 230V.

Działanie diody w obwodzie prądu przemiennego ilustruje Rys. 4., na którym przedstawiono schemat ideowy najprostszego układu prostownika (a) i wykresy czasowe (b) zmian siły elektromotorycznej źródła E oraz prądu I i napięcia U na odbiorniku energii oznaczonym jako R_o .

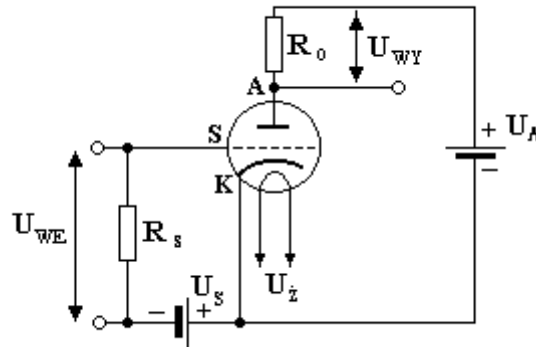


Rys. 4. Zastosowanie diody próżniowej: a) schemat ideowy obwodu prostownika,

b) wykresy zmian E, I i U.

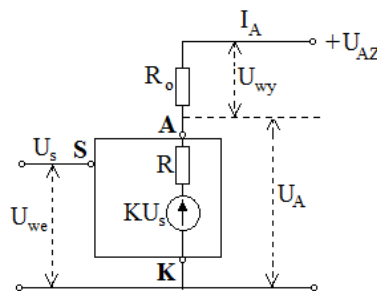
9.2 Trioda jako element wzmacniający

Trioda, jako element aktywny, umożliwia wzmacnianie napięć, prądów albo mocy prądów stałych i zmiennych. Dla poprawnej pracy wymaga zastosowania trzech różnych źródeł zasilania: napięcia anodowego E_A , napięcia siatkowego E_S i napięcia żarzenia U_Z . Najprostszy obwód wzmacniacza napięciowego przedstawia Rys.5.



Rys. 5. Schemat ideowy wzmacniacza napięciowego z triodą próżniową

Sygnał wejściowy w postaci napięcia zmiennego U_{WEJ} doprowadzony jest do opornika siatkowego R_s . Opór R_o reprezentuje obciążenie lampy (odbiornik wzmacnianego sygnału) i na nim określone jest napięcie wyjściowe U_{WYJ} . Dokładną analizę wzmacniającego działania triody można przeprowadzić metodą graficzną, korzystając z wyników pomiarów charakterystyk anodowych i siatkowych lub w sposób analityczny wykorzystując w obliczeniach zespół doświadczalnie wyznaczonych parametrów.



Rys. 6 Układ zastępczy triody ze źródłem napięciowym.

Aby można było opisać ilościowo działanie triody, w obwodzie elektrycznym musi ona być zastąpiona elementami spełniającymi prawa Kirchhoffa i Ohma. Najprostszy, przyrostowy model triody stanowi szeregowe połączenie źródła napięciowego o napięciu $K \cdot U_s$ i oporu R , gdzie K – współczynnik amplifikacji triody, R – opór wewnętrzny triody. Dla powyższego modelu (patrz Rys.6) , zgodnie z II prawem Kirchhoffa i prawem Ohma można zapisać układ równań:

$$U_{AZ} - I_A R_0 - I_A R + K U_S = 0 \quad U_{WY} = I_A R_0 \quad (4)$$

gdzie U_{AZ} – napięcie zasilania triody (anodowe).

Po zróżniczkowaniu powyższych równań i zastąpieniu różniczek skończonymi przyrostami ΔI_A , ΔU_S i ΔU_{WY} otrzymuje się:

$$-\Delta I_A (R_0 + R) + K \Delta U_S = 0 \quad \Delta U_{WY} = \Delta I_A R_0 \quad (5)$$

Wzmocnienie napięciowe triody k_U , określone jako stosunek zmian napięcia wyjściowego ΔU_{WY} do zmian napięcia wejściowego $\Delta U_{WE} = \Delta U_S$, można korzystając z równań 5) przedstawić w postaci:

$$k_U = \frac{\Delta U_{WY}}{\Delta U_{WE}} = \frac{\Delta U_{WY}}{\Delta U_S} = \frac{K R_0}{R_0 + R},$$

lub

$$k_U = \frac{K}{1 + \frac{R}{R_0}}. \quad (6)$$

Z równania 6) wynika, że wzmocnienie napięciowe k_U wzmacniacza wykorzystującego triodę jest zawsze mniejsze od wartości współczynnika amplifikacji lampy K .

LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA

1. Gray P.E., Searle C.L., Podstawy elektroniki, PWN, W-wa 1972
2. Marusak A., Urządzenia elektroniki, WSiP, W-wa 1976
3. Piekara A.H., Elektryczność, materia i promieniowanie, PWN, W-wa 1986
4. Sawicki J., Układy elektroniczne, PWSZ, W-wa 1970
5. Seely S., Układy elektroniczne, WNT, W-wa 1972
6. Szczeniowski Sz., Fizyka doświadczalna cz.III, PWN, W-wa 1966

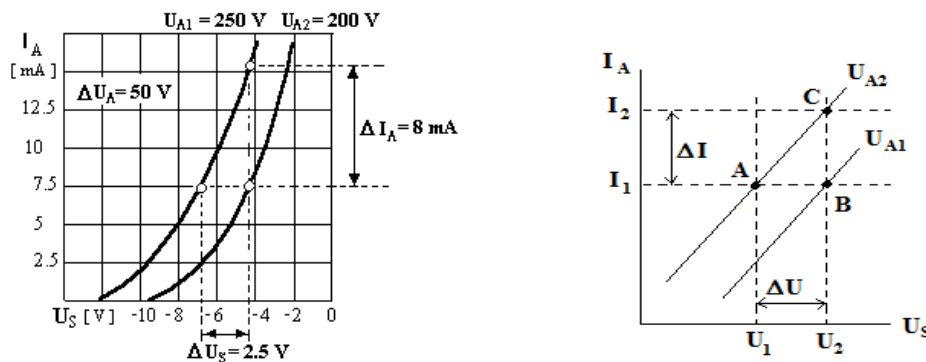
38 WYZNACZANIE CHARAKTERYSTYK LAMP ELEKTRONOWYCH

I WSTĘP

Charakterystyką siatkową triody nazywa się zależność natężenia prądu anodowego I_A od napięcia siatki U_S dla stałej wartości napięcia anodowego U_A . Pomiar charakterystyk umożliwia wyznaczenie wartości trzech podstawowych parametrów określających właściwości lampy elektronowej. Parametry te zdefiniowane są w następujący sposób:

$$\begin{aligned} \text{opór wewnętrzny (dynamiczny)} \quad R &= (\Delta U_A / \Delta I_A) \text{ dla } U_S = \text{const.}, \\ \text{nachylenie charakterystyki} \quad S &= (\Delta I_A / \Delta U_S) \text{ dla } U_A = \text{const.}, \\ \text{wzmocnienie (wsp. amplifikacji)} \quad K &= (\Delta U_A / \Delta U_S) \text{ dla } I_A = \text{const.} \end{aligned} \quad 1)$$

W najprostszym przypadku do wyznaczenia wartości stałych R , S , K wystarcza pomiar dwóch charakterystyk siatkowych przy dwóch różnych napięciach anodowych U_{A1} i U_{A2} . Ich różnica wynosi ΔU_A . Sposób określenia przyrostów ΔI_A i ΔU_S ilustruje Rys.1.



Rys.1 Graficzne wyznaczenie przyrostów ΔI_A i ΔU_S z charakterystyk siatkowych triody.

II CEL ĆWICZENIA

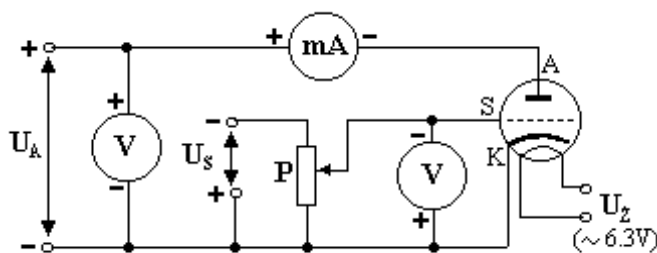
Wyznaczenie charakterystyk siatkowych triody typu ECC 82, obliczenie wartości parametrów S , K , R

III WYKONANIE ĆWICZENIA

1. Zmontować obwód pomiarowy według schematu przedstawionego na Rys.2 zwracając szczególną uwagę na właściwą polaryzację źródeł zasilania napięcia anodowego i siatkowego oraz polaryzację zacisków multimetrów. Zaznaczony na schemacie potencjometr (regulowany opór) P zamontowany jest na stałe w podstawie lampy. Jako źródła napięć U_A , U_S i U_Z należy użyć zasilacza stabilizowanego. Multimetr do pomiaru napięcia anodowego U_A ustawić na zakresie 200VDC, napięcia siatkowego U_S na zakresie 20VDC, a multimetr mierzący prąd anodowy I_A na zakresie 20mADC.

2. **Poprawność zmontowanego obwodu sprawdza prowadzący zajęcia. Prowadzący uruchamia zasilanie obwodu i ustala pierwszą wartość napięcia anodowego U_{A1} .**

Napięcie żarzenia ustalić na ok. 6V, napięcie siatkowe na 12V, a napięcie anodowe dobrać tak aby prąd anodowy nie przekroczył 13mA.



Rys.2 Schemat układu pomiarowego.

3. Zanotować w tabeli wartość napięcia anodowego U_{A1}
4. Ustalić przy pomocy potencjometru P zerowe napięcie siatkowe i zapisać w tabeli wartości U_s i I_A .
5. Zwiększając, przy pomocy potencjometru P napięcie siatkowe (np. co 0.2V), zanotować ok. 8 ÷ 12 odpowiadających sobie wskazań U_s i I_A .
6. Powtórzyć opisane w punktach 4-5 czynności dla drugiej wartości napięcia anodowego U_{A2} **ustalonej przez prowadzącego zajęcia. Uwaga !** Natężenie prądu anodowego **nie powinno** przekroczyć wartości 15mA.

Tabela wyników pomiarowych.

$U_{A1} =$ (V)		$U_{A2} =$ (V)	
U_s (V)	I_A (mA)	U_s (V)	I_A (mA)

IV OPRACOWANIE WYNIKÓW

Zalecane jest przeprowadzenie opracowania w arkuszu EXCEL.

1. Przedstawić na wykresie obie charakterystyki siatkowe lampy $I_A(U_s)$.
2. W przedziale niewielkich napięć siatkowych ($U_s < 3V$), gdzie charakterystyki są liniowe, dopasować proste regresji uzyskując równania:

$$I = a_1 U + b_1 \quad \text{dla } U_{A1} \quad 2)$$

$$I = a_2 U + b_2 \quad \text{dla } U_{A2} \quad 3)$$

3. Odległość $CB = \Delta I_A$ (patrz Rys.1) określa różnica wyrazów wolnych równań 2) i 3):

$$\Delta I_A = b_2 - b_1$$

4. Odległość $AB = \Delta U_s$ jest równa:

$$\Delta U_s = \left| \frac{b_2 - b_1}{a_2} \right|$$

5. Obliczyć wartości parametrów S , K , R zdefiniowanych równaniem 1). Opór R lampy wyrazić w $k\Omega$, a nachylenie S w mA/V . Wzmocnienie K jest wielkością bezwymiarową.