

## Badanie wyładowania jarzeniowego metodą drgań relaksacyjnych

- I. Cel ćwiczenia :** zapoznanie się z problematyką przepływu prądu elektrycznego przez gaz i metodą oscyloskopową badania wyładowań elektrycznych.
- II. Przyrządy :** płytki montażowa z neonówką, kondensator dekadowy, oscyloskop, zasilacz prądu stałego, multimetr cyfrowy prądu stałego, sekundomierz.
- III. Literatura :**
- [1] S. Szczeniowski „Elektryczność i magnetyzm”,
  - [2] J. M. Meek, J.D. Craggs „Electrical break of gases”,
  - [3] N.A. Kapcow „Elektryczeskie jawnienia w gazach i wakuumie.
  - [4] A. Portis „Fizyczna laboratorija (Laboratory Physics, tłum. ros).

### IV. Wprowadzenie

#### IV.1 Przepływ prądu elektrycznego przez gaz.

Przepływ prądu elektrycznego przez gaz uwarunkowany jest istnieniem w gazie nie tylko pola elektrycznego, ale i swobodnych nośników ładunku w postaci elektronów i jonów. Procesy fizyczne, w wyniku których mogą pojawić się w gazie swobodne elektrony i jony są niezwykle różnorodne. Do elementarnych zaś procesów zaliczamy :

- a) jonizację gazu wywołaną przez czynniki zewnętrzne, stanowiącą najczęstszą przyczynę bezpośrednio inicjującą przepływ prądu przez gaz,
- b) jonizację i wzbudzenia atomów gazu przy zderzeniach elektronów i jonów poruszających się w gazie pod wpływem pola elektrycznego,
- c) emisję wtórną elektronów powstającą w wyniku uderzeń elektronów i jonów w elektrody,
- d) emisję fotonów przez wzbudzone atomy i drobiny,
- e) zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne i wewnętrzne zachodzące zarówno w gazie, jak i na powierzchniach elektrod,
- f) termoemisję elektronów,
- g) rekombinację elektronów i jonów,
- h) tworzenie się jonów ujemnych.

Przepływowi prądu przez gaz towarzyszy emisja światła, mogą też występować efekty akustyczne i reakcje chemiczne.

Zależność między natężeniem prądu przepływającym przez gaz, a różnicą potencjału między elektrodami na ogół nie przedstawia prostej proporcjonalności (prawo Ohma), natomiast często charakteryzuje się opadającą charakterystyką prądowo-napięciową  $I = f(U)$ , kiedy to przy wzroście natężenia prądu maleje różnica potencjałów między elektrodami, a opór różniczkowy

$$r = \frac{dU}{dI} \quad (1)$$

przyjmuje wartość ujemną.

#### IV.2 Klasyfikacja wyładowań elektrycznych w gazach.

Przez wyładowanie elektryczne w gazach rozumiemy różne postacie przepływu prądu elektrycznego przez gaz. Wychodząc z bezpośrednich wrażeń wzrokowych rozróżniamy np.

wyładowania ciemne o znikomej emisji światła, wyładowania jarzeniowe o w pełni zauważalnym świeceniu gazu i jaskrawo świecące wyładowania iskrowe i łukowe.

Jedną z podstawowych wielkości fizycznych stosowanych m.in. do opisu wyładowań jest gęstość prądu

$$\vec{j} = \sum_i Z_i e n_i \vec{v}_i \quad (2)$$

gdzie  $Z_i$  - ładunek nośnika typu  $i$  w jednostkach ładunku elementarnego,  
 $e$  - ładunek elementarny,  
 $n_i$  - koncentracja nośnika typu  $i$  w jednostce objętości,  
 $\vec{v}_i$  - prędkość ruchu uporządkowanego nośników.

Jeżeli gęstość prądu w każdym punkcie przekroju prostopadłego do  $\vec{j}$  jest stała, to natężenie prądu przepływającego przez pole przekroju  $S$  jest

$$I = |\vec{j}| S \quad (3)$$

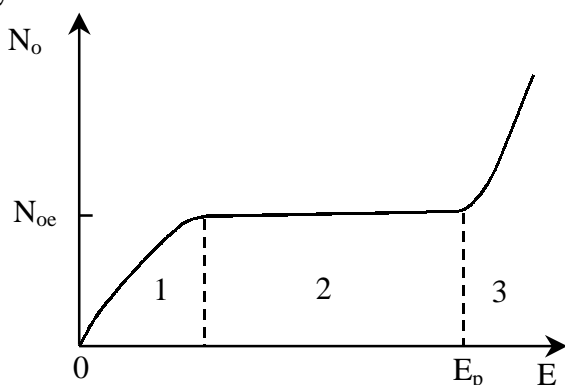
Natężenie emitowanego światła związane jest z gęstością prądu płynącego przez gaz. I tak wyładowania ciemne charakteryzują się bardzo małymi wartościami gęstości prądu w przeciwieństwie do wyładowań iskrowych i łukowych.

Wyładowania jarzeniowe są wyładowaniami typowym dla przepływu prądu przez gaz znajdujący się pod stosunkowo małym ciśnieniem.

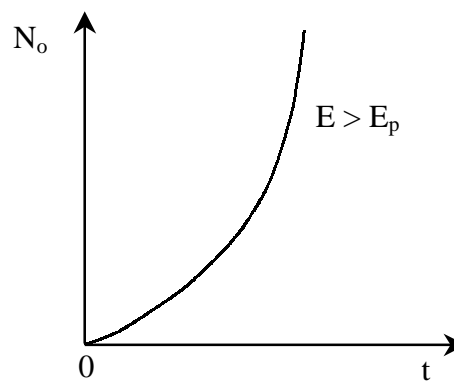
O rozwoju wyładowania jarzeniowego, zapoczątkowanego jonizacją gazu przez czynnik zewnętrzny (wyładowanie niesamoistne), a następnie jego podtrzymaniu bez względu na dalsze działanie zewnętrznego czynnika jonizacyjnego (wyładowanie samoistne) decydują głównie takie procesy elementarne, jak jonizacja i wzbudzenie atomów wskutek zderzenia elektronów z tymi atomami, emisja wtórna elektronów z katody powodowana uderzeniami jonów dodatnich i zjawisko fotoelektryczne, oraz rekombinacja jonów i elektronów.

Gdy bilans nośników ładunku staje się dodatni, tzn. gdy w jednostce czasu wytworzonych zostaje więcej nośników ładunku niż ich znika, wyładowanie niesamoistne przechodzi w samoistne, a napięcie przy którym to zachodzi nosi nazwę napięcia zapłonu ( $U_z$ ). Napięcie dla którego zachodzi proces odwrotny nazywamy napięciem gaśnięcia ( $U_g$ ).

Narastanie liczby nośników ładunku w gazie znajdującym się w polu elektrycznym o natężeniu  $E$  na tyle dużym, że prawdopodobieństwo rekombinacji jest małe w porównaniu z prawdopodobieństwem kreacji pary elektron - jon, zachodzi w sposób lawinowy, co ilustrują rys. 1 i 2.



**Rys.1** Zależność liczby elektronów  $N_e$  zbieranych w jednostce czasu z płaskich elektrod, pomiędzy którymi wytworzono pole elektryczne, od natężenia tego pola  $E$ .

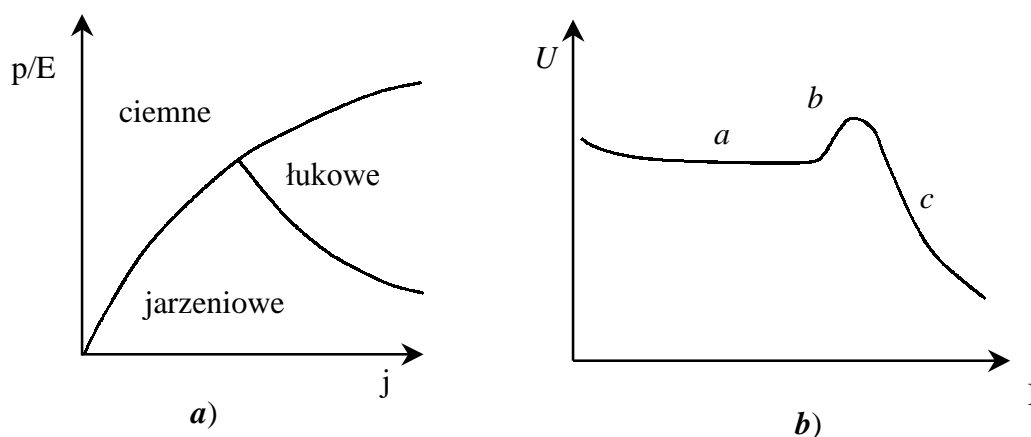


**Rys.2** Rozwój wyładowania w czasie. Wyładowanie rozwija się w jednorodnym polu elektrycznym o natężeniu  $E > E_p$ .

Zewnętrzny czynnik jonizujący wytwarza między elektrodami  $N_{0e}$  elektronów swobodnych w jednostce czasu. Po przekroczeniu pewnej granicznej wartości natężenia pola  $E_p$  dominującym procesem staje się proces wtórnej jonizacji gazu (3). W obszarze (1) dominują procesy rekombinacji, a w obszarze (2) liczba elektronów zebranych z elektrod jest równa liczbie elektronów wytworzonych w gazie.

O dalszym rozwoju wyładowania samoistnego decydują obok ciśnienia i rodzaju gazu, parametry obwodu elektrycznego zasilającego układ elektrod i rozwój ładunku przestrzennego w gazie. Ładunek przestrzenny w składający się z szybko poruszających się elektronów i wolno zdążających do elektrod jonów wytwarza wewnętrzne pole elektryczne skierowane przeciwnie do pola zewnętrznego.

Jeżeli możliwy jest dalszy wzrost gęstości i natężenia prądu (np. układ elektrod zasilany jest ze źródła o dużej mocy) wyładowanie jarzeniowe może przejść w wyładowanie łukowe, w którym na ogół dużą rolę odgrywa emisja termoelektronowa (rys.3).



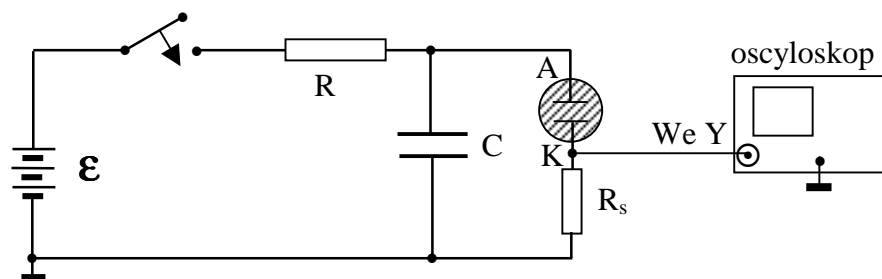
**Rys.3** *a)* obszar wyładowania ciemnego, jarzeniowego i łukowego przedstawiony w zmiennych  $p/E$ ,  $j$ , gdzie  $p$  – ciśnienie gazu,  $j$  - gęstość prądu,  $E$  – natężenie pola elektrycznego,  $I$  – natężenie prądu elektrycznego, *b)* charakterystyka prądowo-napięciowa wyładowania jarzeniowego i łukowego.

### IV.3 Znaczenie badań nad wyładowaniami elektrycznymi w gazach.

Badanie wyładowań w gazach posiada szczególne znaczenie ze względu na niedostatki teorii tego działu fizyki (wiele związków ma charakter empiryczny) i szerokie zastosowanie wyładowań zarówno w fizyce (detekcja cząstek elementarnych, pomiary próżni, badania własności plazmy itp.) jak i w technice (instalacje wysokiego napięcia, wykorzystanie własności plazmy, łuku elektrycznego, wyładowań iskrowych i jarzeniowych).

Rozwój lawin elektronowych i wyładowań elektrycznych badano za pomocą komory Wilsona, fotopowielaczy elektronowych i elektronicznych wzmacniaczy obrazu, metodą sond elektrycznych oraz metodą oscyloskopową, która to metoda jest tematem omawianego ćwiczenia.

## V. Metoda oscyloskopowa badania wyładowania w gazie. Drgania relaksacyjne



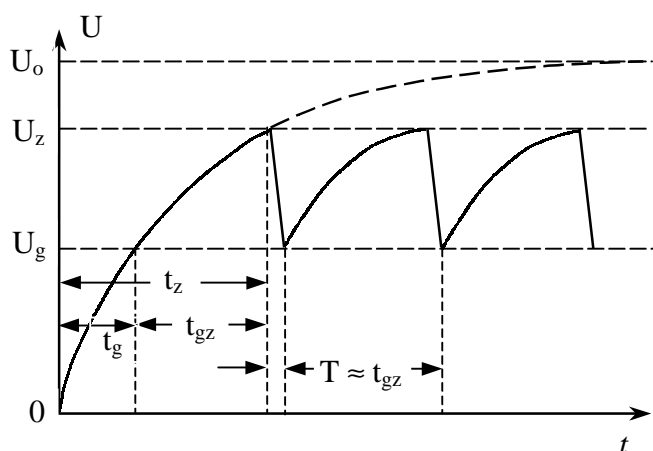
Rys.4 Schemat układu do badania przebiegu wyładowania w czasie.

Na rys.4 przedstawiony jest schemat typowego układu do badania przebiegu wyładowania w czasie. Źródło napięcia stałego  $\mathcal{E}$  połączone jest z układem elektrod AK umieszczonych w atmosferze badanego gazu poprzez układ całkujący (filtr dolnoprzepustowy) o odpowiedniej stałej czasowej  $\tau = RC$ , zabezpieczający źródło napięcia przed przeciążeniem.

Po włączeniu źródła zasilania napięcie między elektrodami narasta wg zależności (patrz ćwiczenie pt. „Rozładowanie kondensatora”).

$$U(t) = \mathcal{E} \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) \quad (4)$$

Początkowo wartość natężenia prądu płynącego przez gaz jest znikoma (obszar wyładowania ciemnego) i na ogół nie przekracza kilku mikroamperów. Po osiągnięciu przez napięcie wartości równej napięciu zapłonu  $U_z$  określonego typu wyładowania (jarzeniowego, iskrowego) natężenie prądu gwałtownie narasta, a oporność przerwy międzyelektrodowej szybko maleje. Zapoczątkowuje to proces rozładowania pojemności C, gdyż natężenie prądu płynącego przez gaz jest znacznie większe od natężenia prądu ładowania kondensatora. Napięcie na kondensatorze, a tym samym i różnica potencjałów między elektrodami szybko maleje. Po osiągnięciu wartości napięcia gaśnięcia  $U_g$  ( $U_g < U_z$ !) wyładowanie gaśnie i oporność przerwy staje się praktycznie nieskończenie wielką, od tej chwili kondensator ładowany jest powtórnie aż do napięcia  $U_z$  i proces powtarza się periodycznie, mówimy, że w obwodzie zostały wzbudzone drgania relaksacyjne.



Rys. 5 Drgania relaksacyjne.

Okres drgań relaksacyjnych jest w pierwszym przybliżeniu (tj. zanedbując czas rozładowania pojemności C od  $U_z$  do  $U_g$ ) opisany wzorem

$$T \cong RC \ln \frac{\mathcal{E} - U_g}{\mathcal{E} - U_z} = t_{zg} \quad (5)$$

gdzie  $t_{zg}$  jest czasem ładowania kondensatora od napięcia  $U_g$  do napięcia  $U_z$ .

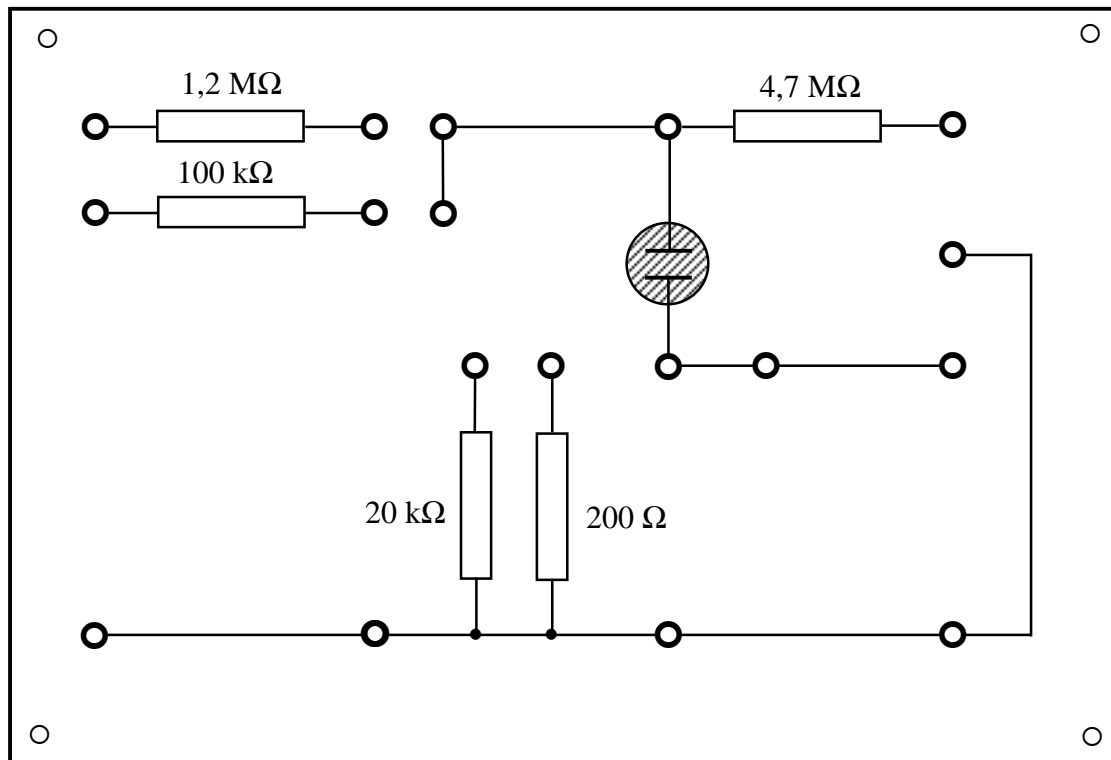
Rozwój wyładowania w czasie rejestrujemy za pomocą oscyloskopu mierzącego spadek potencjału na oporności  $R_s$ , co pozwala następnie odtworzyć zmianę natężenia prądu płynącego przez gaz w funkcji czasu.

Łącząc punkt A obwodu z wejściem X oscyloskopu i przełączając oscyloskop na pracę XY uzyskamy na ekranie wykres równo-

ważny wykresowi charakterystyki prądowo-napięciowej  $I = f(U)$  badanego układu elektrod AK (patrz rys.11).

## VI. Pomiary.

Neonówka z niezbędnymi oporami znajduje się na płytce montażowej. Rozmieszczenie elementów i połączeń pokazuje rysunek 6.

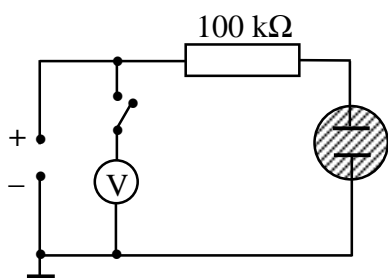


Rys. 6 Schemat płytki montażowej

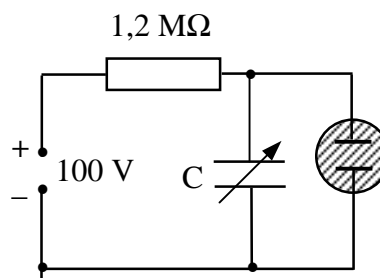
1. Wyznaczyć wartość napięcia zapłonu i gaśnięcia wyładowania jarzeniowego w neonówce zasilanej napięciem dodatnim, a następnie ujemnym. Zwrócić uwagę na ewentualne zmiany kształtu i położenia strefy jarzenia w gazie występujące przy przejściu od zasilania napięciem dodatnim do zasilania napięciem ujemnym.

### Uwaga!

*Ze względu na dopuszczalną wartość natężenia prądu płynącego przez neonówkę musi być ona zasilana poprzez oporność wynoszącą co najmniej 100kΩ (rys. 7) – niespełnienie tego warunku spowoduje zniszczenie neonówki.*

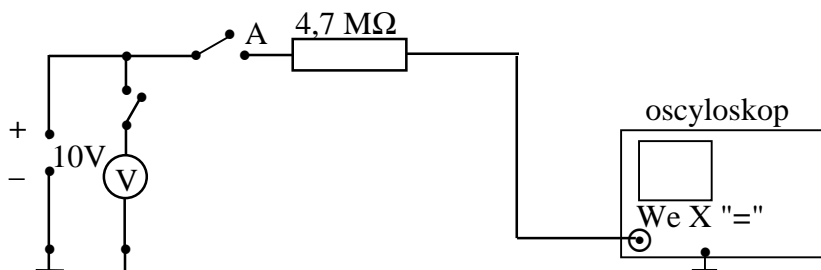


Rys. 7 Zabezpieczenie neonówki oporem



Rys. 8 Schemat układu do badania drgań relaksacyjnych

- Wyznaczyć zależność okresu drgań relaksacyjnych od pojemności  $C$  w przedziale wartości  $(1 \div 10)\mu\text{F}$  (rys.8). Pomiaru czasu dokonać stoperem.
- Przeprowadzić kalibrację napięciową stałoprądowego wejścia  $X$  oscyloskopu z włączonym szeregowo opornikiem  $4,7\text{M}\Omega$  (rys.9). Opornik ten zmniejsza wpływ oporności wewnętrznej (impedancji wejściowej) oscyloskopu na przebieg narastania napięcia na pojemności  $C$  (rys.10 oraz Uzupelnienia).



**Rys. 9** Schemat układu do kalibracji wejścia stałoprądowego  $X$  oscyloskopu z włączonym szeregowo opornikiem  $4,7\text{M}\Omega$ .

W tym celu ustalamy za pomocą multimetru cyfrowego wartość napięcia wyjściowego zasilacza na  $U = 10\text{V}$ , a następnie po odłączeniu multimetru cyfrowego łączymy wyjście zasilacza z wejściem „X” oscyloskopu poprzez opornik  $4,7\text{M}\Omega$  (rys.9) i mierzymy przesunięcie plamki świetlnej  $l_x$  dla nominalnej wartości współczynnika odchylenia  $0,2\text{V/cm}$ .

Możemy teraz wyznaczyć wartość poprawki uwzględniającej wpływ opornika  $4,7\text{M}\Omega$  na wynik pomiaru oscyloskopem potencjału w punkcie A:

$$K = \frac{1}{0,2\text{ V/cm}} \frac{U}{l_x} \quad (6)$$

Ponieważ impedancja wejściowa oscyloskopu jest stała dla wszystkich zakresów współczynnika odchylenia, poprawka ta pozwala nam mierzyć potencjały w punkcie A na dowolnym zakresie czułości oscyloskopu:

$$V_A = U_x = K l_x S_x \quad (7)$$

gdzie  $S_x$  – nominalna wartość współczynnika odchylenia,  $l_x$  – przesunięcie plamki świetlnej pod wpływem potencjału  $V_A$ .

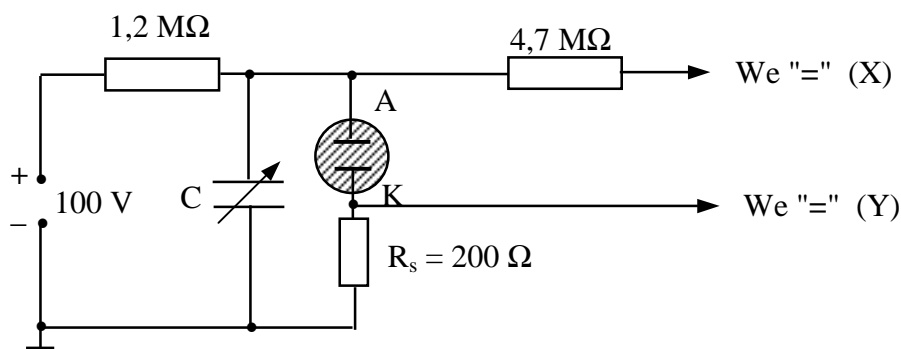
Dołączenie opornika do wejścia oscyloskopu powoduje rozszerzenie zakresu pomiarowego oscyloskopu i jest równoważne zmianie zakresu woltomierza przez szeregowo połączenie opornika i woltomierza.

- Wyznaczyć zależność okresu drgań relaksacyjnych od pojemności  $C$  w przedziale wartości  $(0,1, 30)\text{nF}$  i zależność oporności neonówki od przepływającego przez nią ładunku.

Należy w tym celu połączyć przyrządy według schematu przedstawionego na rys.10, przełączając oscyloskop na pracę dwukanałową.

Dla danej pojemności  $C$  wyznaczyć okres drgań relaksacyjnych i czas narastania napięcia na kondensatorze od  $U_g$  do  $U_z$ , oraz po przełączeniu oscyloskopu na pracę XY - zmierzyć napięcie zapłonu  $U_z$ , napięcie gaśnięcia  $U_g$ , maksymalną wartość natężenia prądu  $I_{\text{max}}$  płynącego przez neonówkę i odpowiadające jej napięcie  $U_I$  (rys.11).

Należy tu zwrócić uwagę na fakt, że wykres równoważny ściśle charakterystyce prądowo – napięciowej neonówki otrzymać możemy jedynie na ekranie oscyloskopu XY o wejściach różnicowych.



**Rys. 10** Schemat układu do badania drgań relaksacyjnych przy pomocy oscyloskopu

Zastosowany w omawianym ćwiczeniu oscyloskop nie pozwala nam w sposób bezpośredni mierzyć jednocześnie spadku potencjału na neonówce tj. różnicę potencjałów między punktami A i K (rys.10, kanał X) i spadku potencjału na oporniku  $R_s$  (kanał Y) proporcjonalnym do natężenia prądu płynącego przez neonówkę. Zmierzone bezpośrednio napięcie (rys.11b)

$$U_x = K I_x S_x \quad (8)$$

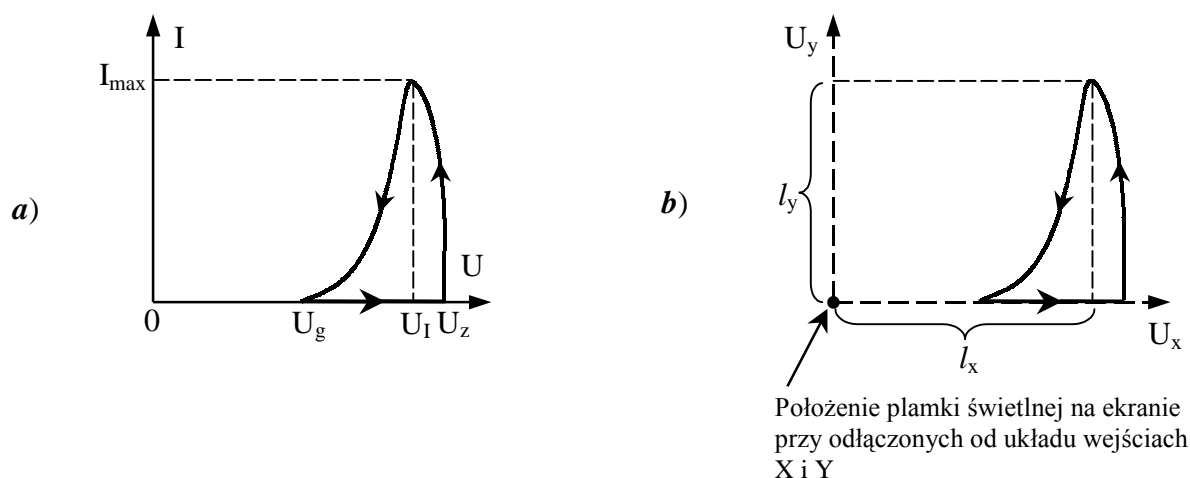
jest sumą wartości chwilowych: spadku potencjału na neonówce  $U_I$  i spadku potencjału na oporniku połączonym szeregowo z neonówką  $U_y$ , a zatem

$$U_I = U_x - U_y = K I_x S_x - R_s I_{max} \quad (9)$$

gdzie  $I_{max} = \frac{I_y S_y}{R_s}$ ,  $K$  – współczynnik uwzględniający wpływ opornika 4,7 MΩ,  $S_x$  i  $S_y$  –

współczynniki odchylenia układu odchylenia poziomego i pionowego.

Wynika stąd wniosek, że kształt obserwowanego na ekranie wykresu będzie tym bliższy rzeczywistej charakterystyce neonówki, im mniejszą wartość posiadać będzie opornik  $R_s$ . Pomiar wykonać w przedziale wartości pojemności  $C$  od 0.1nF do 30nF przeprowadzając równocześnie obserwację ewentualnych zmian kształtu charakterystyki prądowo-napięciowej i stref jarzenia w neonówce. Oszacować czas trwania wyładowania w neonówce.



**Rys. 11** Charakterystyka prądowo-napięciowa neonówki: a) wykres. b) obraz na ekranie oscyloskopu

- 5\* Interesującym jest zbadanie wpływu oporności  $R_s$  na kształt charakterystyki prądowo–napięciowej neonówki. W tym celu można powtórzyć jej pomiar z  $R_s = 20k\Omega$ .

## VII. Opracowanie wyników.

1. Przedstawić graficznie zależność  $T = f(C)$  i  $t_{zg} = f(C)$ , gdzie  $t_{zg}$  jest czasem narastania napięcia od  $U_g$  do  $U_z$ .

Porównać wyniki pomiarów z wartościami przewidywanymi dla podanych wartości  $R, C$  oraz zmierzonych  $U_g$  i  $U_z$ . W przypadku pomiarów wykonanych za pomocą układu przedstawionego schematycznie na rys.10 skorzystać ze wzoru ( patrz uzupełnienia)

$$T \cong t_{zg} = \frac{RC}{1 + R/R_x} \ln \left( \frac{U_{max} - U_g}{U_{max} - U_z} \right) \quad (10)$$

$$\text{gdzie } U_{max} = \mathcal{E} \frac{R_x}{R + R_x} \quad (11)$$

$R = 1.2M\Omega \pm 10\%$ ,  $R_x = 5.7M\Omega \pm 10\%$ .

Uwzględnić wartości błędów wyznaczonych wielkości  $U_g$  i  $U_z$ .

2. Wykreślić zależność minimalnej oporności neonówki od wartości maksymalnego natężenia prądu  $I_{max}$ :  $R_{min} = f(I_{max})$ . Wartość  $R_{min}$  jest określona jako

$$R_{min} = \frac{U_I}{I_{max}} \quad (12)$$

gdzie  $U_I$  jest spadkiem potencjału na neonówce przy maksymalnym natężeniu prądu  $I_{max}$ .

3. Dla wyładowania iskrowego znany jest empiryczny wzór Toeplera na wartość oporności kanału przewodzącego iskry

$$R_I = \frac{\alpha \cdot d}{Q} \quad (13)$$

gdzie  $\alpha$  - stała charakteryzująca gaz,  $d$  – długość iskry,  $Q$  – ładunek, jaki przepłynął przez kanał przewodzący do chwili wykonania pomiaru.

$$Q = \int_0^t I(t) \quad (14)$$

Można oczekiwać, że w przypadku wyładowania jarzeniowego zależność  $R_{min} = f(Q)$  będzie słabsza, niż w przypadku wyładowania iskrowego, np.

$$R_{min} \propto \frac{1}{Q^\beta} \quad (15)$$

gdzie  $\beta < 1$

Ładunek  $Q$  znaleźć możemy ze związku

$$Q \cong C (U_z - U_I) \quad (16)$$

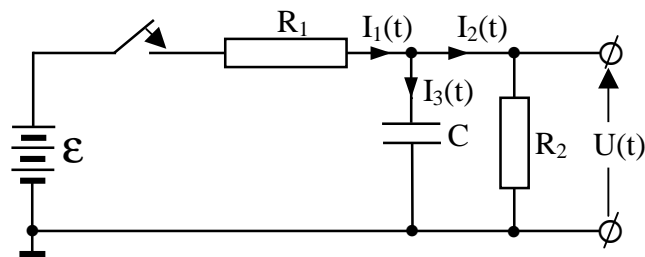
Przedstawić graficznie zależność  $\lg R_{min} = f(\lg Q)$  i oszacować wartość wykładnika  $\beta$ .

---

\* poszerzony wariant ćwiczenia



## Uzupełnienia.



**Rys. 12** Najprostszy schemat zastępczy układu z rysunku 10 dla przedziału czasu, w którym następuje ładowanie kondensatora C

Po zamknięciu wyłącznika rozpoczyna się proces ładowania kondensatora C, który kończy się w chwili (nie uwzględniając wpływu neonówki), kiedy różnica potencjałów między jego okładkami osiąga wartość  $U_{\max}$  równą :

$$U_{\max} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \mathcal{E} \quad (17)$$

W dowolnej chwili t są spełnione równania :

$$\mathcal{E} = R_1 I_1(t) + U(t) \quad (18)$$

$$U(t) = I_2(t) R_2 = \frac{1}{C} Q(t) \quad (19)$$

$$I_1(t) = I_2(t) + I_3(t) \quad (20)$$

gdzie  $Q(t)$  jest ładunkiem zgromadzonym na okładkach kondensatora.

Różniczkując (18) względem czasu i korzystając z zależności (19) i (20) otrzymamy

$$\frac{d^2 U(t)}{dt^2} + \frac{1 + R_1 R_2}{R_1 C} \frac{dU(t)}{dt} = 0 \quad (21)$$

które rozwiązujemy metodą podstawiania  $\frac{dU}{dt} = y$ .

Uwzględniając warunki brzegowe  $U(t=0) = 0$  i  $U(t \rightarrow \infty) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \mathcal{E} = U_{\max}$  otrzymamy

$$U(t) = (1 - e^{-\alpha t}) U_{\max} \quad (22)$$

gdzie  $\alpha = \frac{1 + R_1 / R_2}{R_1 C}$

Podstawiając dla chwili zgaśnięcia neonówki  $t = t_g$

$$U(t_g) = U_g = (1 - e^{-\alpha t_g}) U_{\max}$$

oraz dla chwili zapłonu  $t = t_z$

$$U(t_z) = U_z = (1 - e^{-\alpha t_z}) U_{\max}$$

otrzymujemy po prostych przekształceniach przybliżony wzór na okres drgań relaksacyjnych wzbudzonych w obwodzie przedstawionym na rys.10

$$T \cong t_z - t_g = \frac{R_1 C}{1 + R_1 / R_2} \ln\left(\frac{U_{\max} - U_g}{U_{\max} - U_z}\right) \quad (23)$$

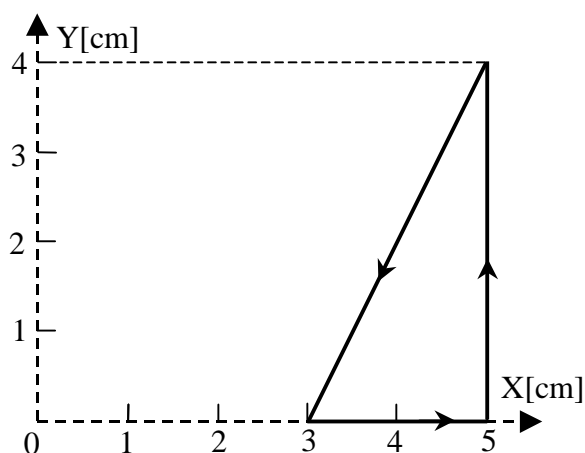
gdzie  $U_{\max} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \mathcal{E}$ .

Jeśli  $R_2 \rightarrow \infty$ , co odpowiada przypadkowi, przedstawionemu schematycznie na rys.8, to

$$T \cong R_1 C \ln\left(\frac{\mathcal{E} - U_g}{\mathcal{E} - U_z}\right) \quad (23a)$$

### Zagadnienia do samodzielnego opracowania.

1. Wysokość pola pomiarowego ekranu oscyloskopu wynosi 6cm, a maksymalna wartość współczynnika odchylenia – 5V/cm. Jaki opornik należy dołączyć szeregowo do wejścia oscyloskopu, aby rozszerzyć zakres pomiarów napięcia do 100V ? Ile wynosić będzie efektywna wartość współczynnika odchylenia tak zmodyfikowanego oscyloskopu przy nominalnej czułości 1cm/V ? Impedancja wejściowa oscyloskopu wynosi 1MΩ.
2. Stosując układ zbliżony do tego, jaki przedstawiono na rys.10 otrzymano charakterystykę, pokazaną na rys.13



**Rys. 13** Obraz na ekranie oscyloskopu (zagadnienie 2).

Jeśli  $R_s = 10k\Omega$ , a efektywne wartości współczynnika odchylenia są:  $S_x = 20V/cm$ ,  $S_y = 5V/cm$ , to jakie wartości średnie przyjmuje opór różniczkowy  $r = \frac{dU}{dI}$  neonówki w przedziale napięć ( $U_g, U_z$ ) ? Jaki jest przybliżony kształt rzeczywistej charakterystyki prądowo- napięciowej?