

## ĆWICZENIE 40

### A) WYZNACZANIE CHARAKTERYSTYKI LAMPY NEONOWEJ

### B) GENERATOR DRGAŃ RELAKSACYJNYCH

Kraków 2016

#### **Zakres wymaganych wiadomości ze szkoły średniej:**

Pole elektryczne. Napięcie, natężenie, opór elektryczny. Prawa Coulomba, Ohma, Kirchhoffa. Prąd elektryczny w metalach i gazach. Pojemność elektryczna, kondensator, baterie kondensatorów.

## I. CZĘŚĆ TEORETYCZNA

### 1. Lampy gazowane.

Oprócz lamp próżniowych, dwu- lub więcej elektrodowych, istnieją lampy wypełnione gazem lub mieszaniną gazów o odpowiednim składzie i ciśnieniu. Są to tzw. **lampy gazowane**.

Przepływ prądu przez lampy gazowane, nazywany wyładowaniem, może mieć charakter **luku elektrycznego**, o niewielkim spadku napięcia i dużym natężeniu prądu, lub **wyładowania jarzeniowego** o znacznym i stosunkowo stałym spadku napięcia i niewielkim dopuszczalnym natężeniu prądu.

W lampie zwanej **neonówką** (lampa jarzeniowa, stabilwolt) wykorzystuje się właśnie wyładowanie jarzeniowe. Neonówka zbudowana jest z dwóch elektrod, anody i katody, zamkniętych w bańce szklanej wypełnionej gazem szlachetnym (neonem) o niewielkim ciśnieniu rzędu 20-40 mmHg (2,7-5,3 kPa). Katoda lampy pokryta jest tlenkiem metalu o bardzo niskiej pracy wyjścia, gdyż w przeciwieństwie do lamp próżniowych nie jest ona podgrzewana. Jest to tzw. **zimna katoda** emitująca elektrony w wyniku bombardowania jej powierzchni wysokoenergetycznymi jonami.

### 2. Wyładowanie jarzeniowe.

Mechanizm przepływu prądu przez neonówkę jest inny niż w lampach próżniowych. Gazy zalicza się do dobrych izolatorów, ponieważ pojedyncze atomy lub cząsteczki tworzące gaz nie przewodzą prądu elektrycznego. Jednakże w związku z występowaniem efektu fotoelektrycznego, a zwłaszcza na skutek jonizacyjnego charakteru promieniowania kosmicznego, również w gazie pojawiają się nośniki prądu. Są nimi swobodne elektrony i zjonizowane atomy lub cząsteczki gazu. Po przyłożeniu między katodę i anodę neonówki stałego napięcia przez lampę zaczyna przepływać niewielki prąd wywołany głównie ruchem elektronów. Prąd ten rośnie wraz ze wzrostem napięcia, a elektrony uzyskują w polu elektrycznym coraz większą energię kinetyczną. Stopniowo energia ta staje się na tyle duża, że elektrony mogą w wyniku zderzeń z obojętnymi atomami gazu wywołać ich jonizację i w efekcie wywarzać nowe pary elektron-jon. Dla dostatecznie wysokiego napięcia, zwanego **napięciem zapłonu  $U_z$** , jonizacja zaczyna wzrastać lawinowo i następuje zapłon o charakterze jarzeniowym. Wyładowaniu towarzyszy świecenie gazu, dla neonu o charakterystycznej pomarańczowej barwie.

W momencie zapłonu ulega zmianie początkowo jednorodny rozkład potencjału w lampie. Niemal cały spadek napięcia odkłada się w pobliżu katody. Powstaje tam obszar tzw. **normalnego spadku katodowego**, którego wielkość zależy od materiału katody jak i rodzaju i ciśnienia gazu.

Przyczyną powstawania spadku katodowego jest emisja elektronów przez katodę bombardowaną przez dodanie jony. Elektrony te, rekombinując z jonami, tworzą przykatodowy obszar obniżonej przewodności. W pozostałej części lampy tworzy się stan plazmy o bardzo dobrym przewodnictwie, a zatem o niemal stałym potencjale.

### 3. Charakterystyka prądowo-napięciowa neonówki.

Charakterystyczną cechą normalnego wyładowania jarzeniowego jest stałość gęstości prądu katody (natężenie przelatywające przez jednostkową powierzchnię). Wzrost prądu płynącego przez lampę wiąże się ze stopniowym powiększaniem powierzchni katody objętej wyładowaniem aż do momentu, gdy jarzenie obejmie całą powierzchnię. W efekcie charakterystyka prądowo-napięciowa zapalanej neonówki jest bardzo stroma: dużym zmianom natężenia prądu towarzyszą niewielkie zmiany napięcia międzyelektrodowego. Własność tę odzwierciedla niska wartość **oporu dynamicznego lampy** zdefiniowanego następująco:  $R_D = \Delta U / \Delta I$ .

W przedziale przewodzenia charakterystykę neonówki można opisać przybliżoną zależnością:

$$U = U_G + I R_D \quad (1)$$

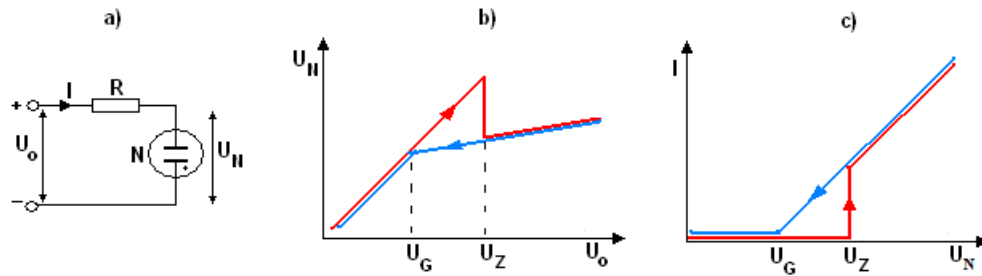
gdzie:  $U$  - napięcie,  $I$  - natężenie prądu,  $U_G$  - **napięcie gaśnięcia neonówki**,  $R_D$  - opór dynamiczny lampy.

Powyższe własności lampy neonowej wykorzystywano w budowie lamp gazowanych pełniących funkcje elementu stabilizującego napięcie w obwodach prądu stałego. Poprzez dobór odpowiedniego materiału katody i składu gazu uzyskiwano elementy stabilizujące napięcie w granicach od kilkudziesięciu do kilkuset wolt. Obecnie elementy te zastąpione zostały całkowicie przez tańsze, mniejsze i bardziej niezawodne elementy półprzewodnikowe zwane diodami Zenera.

### 4. Histereza charakterystyki neonówki.

Charakterystyka prądowo-napięciowa neonówki, oprócz nieciągłości związanych ze zjawiskiem zapłonu i gaśnięcia lampy, wykazuje zjawisko **histerezy**: w przedziale zawartym między napięciem zapłonu  $U_Z$  i napięciem gaśnięcia  $U_G$  neonówka może znajdować się w jednym z dwóch różnych stanów - przewodzenia lub nieprzewodzenia. Aktualny stan neonówki zależy bowiem od drogi, po której został on osiągnięty. Jeżeli zwiększano napięcie na nieprzewodzącej neonówce, to pozostała ona zgaszona aż do momentu osiągnięcia napięcia zapłonu  $U_Z$ . Jeżeli

natomiast obniżano napięcie przewodzącej neonówki, pozostanie ona zapalona aż do osiągnięcia napięcia gaśnięcia  $U_G$  o wartości o kilka lub kilkanaście woltów niższej od napięcia zapłonu  $U_Z$ .



Rys. 1. Histereza neonówki: a) układ pomiarowy, b) charakterystyka napięciowa, c) charakterystyka prądowo – napięciowa.

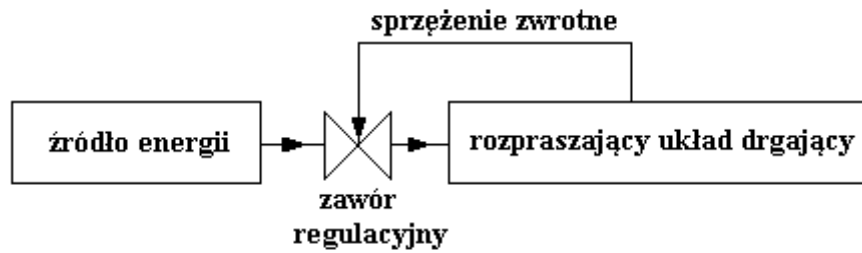
Efekt histerezy przewodzenia neonówki umożliwia wykorzystanie jej do budowy prostego generatora drgań relaksacyjnych.

## 5. Drgania relaksacyjne.

Drgania relaksacyjne są **drzganiami samowzbudnymi**, które mogą powstać w nieliniowym układzie drgającym, do którego doprowadzona jest energia ze źródła o stałym natężeniu. Różnią się one kształtem od drgań harmonicznycy, ponieważ w układzie relaksacyjnym istotną rolę odgrywają procesy **dyssypacji, tzn. rozproszania energii**. W układach mechanicznych jest to efekt działania zewnętrznych lub wewnętrznych sił tarcia, w układach elektrycznych przyczynę stanowi rezystancja (oporność czynna) rozpraszająca energię przepływającego prądu.

W największym uproszczeniu układ wykonujący drganie relaksacyjne składa się ze źródła energii zasilającego poprzez zawór regulujący rozpraszający energię układ drgający. Układ drgający i zawór objęte są **pętlą sprzężenia zwrotnego**. Na Rys.2 w sposób symboliczny przedstawiono układ generatora drgań relaksacyjnych.

Drgania odbywają się w układzie oscylującym pomiędzy dwoma różnymi stanami równowagi. Energia doprowadzana ze źródła poprzez otwarty zawór wyprowadza stopniowo układ drgający z początkowego do nowego stanu równowagi. Gdy wychylenie układu przekroczy górną wartość progową, zawór regulacyjny zostaje zamknięty działaniem pętli sprzężenia zwrotnego. Pozbawiony dopływu energii układ rozpoczyna powrót do stanu początkowego. Podczas tego procesu przekroczona zostaje dolna wartość progowa i sprzężenie zwrotne ponownie otwiera zawór regulacyjny. Cykl drgający ulega powtórzeniu.

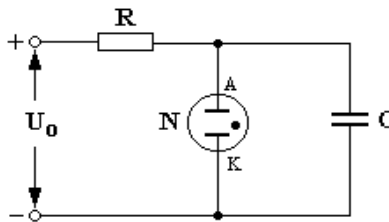


Rys. 2. Generator drgań relaksacyjnych.

Proces przejścia układu drgającego do stanu równowagi termodynamicznej nazywany jest **relaksacją**. Ponieważ relaksacji towarzyszy zamiana energii wewnętrznej układu na ciepło, jest to proces nieodwracalny w sensie termodynamicznym, związany ze wzrostem entropii układu drgającego.

## 6. Elektryczny generator drgań relaksacyjnych.

Najprostszy obwód elektryczny służący do wytwarzania drgań relaksacyjnych przedstawia



Rys. 3. Schemat generatora drgań relaksacyjnych

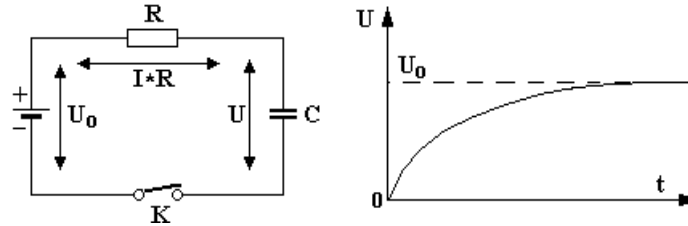
Drgania powstają w obwodzie kondensatora C ładowanego przez opornik R (element rozpraszający energię) ze źródła stałego napięcia  $U_0$  (źródło energii). Rolę zaworu decydującego o cyklicznie powtarzanych fazach ładowania i rozładowania kondensatora pełni przyłączona do niego równolegle neonówka N.

Po dołączeniu do obwodu źródła napięcia  $U_0$  kondensator zaczyna się ładować przez opór R. Jeżeli napięcie na kondensatorze osiągnie wartość napięcia zapłonu  $U_Z$  neonówki, lampa włączy się (zapali) i będzie przewodziła prąd rozładowując kondensator, dopóki napięcie na nim nie opadnie poniżej napięcia gaśnięcia neonówki  $U_G$ . Po wyłączeniu neonówki kondensator ponownie zaczyna się ładować i cały cykl powtarza się od nowa.

Okres drgań relaksacyjnych zależy od parametrów elementów tworzących generator. Ustalenie analitycznej postaci tej zależności wymaga przedstawienia szczegółowej analizy procesów ładowania i rozładowania kondensatora w obwodzie prądu stałego.

## 7. Ładowanie i rozładowanie kondensatora w obwodzie RC.

W obwodzie przedstawionym na Rys. 4, po zamknięciu klucza K kondensator C ładuje się poprzez opór R prądem  $I$  wypływającym ze źródła napięcia stałego  $U_0$ .



Rys. 4. Ładowanie kondensatora: a) schemat obwodu elektrycznego, b) charakterystyka czasowa.

Napięcie kondensatora  $U$  narasta wykładniczo w czasie aż do osiągnięcia napięcia źródła  $U_0$ :

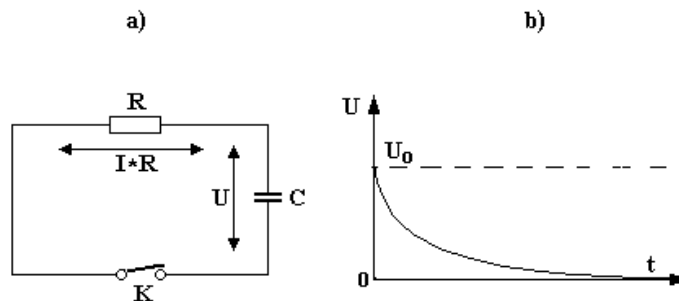
$$U = U_0(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (2)$$

Graficzną ilustrację powyższego rozwiązania przedstawia Rys. 4b. Wielkość  $RC$ , o wymiarze czasu, nazywana jest **stałą czasową** układu RC.

Naładowany do napięcia  $U_0$  kondensator może zostać rozładowany po zwarceniu jego zacisków oporem  $R$  (Rys.5 a). Napięcie  $U$  na kondensatorze maleje wówczas wykładniczo w funkcji czasu zgodnie z równaniem:

$$U = U_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (3)$$

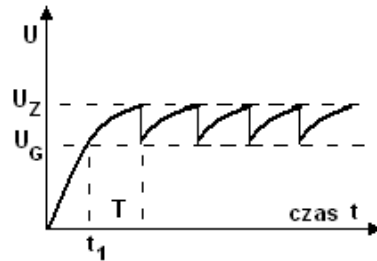
Charakterystykę czasową rozładowującego się kondensatora przedstawia Rys. 5b.



Rys. 5. Rozładowanie kondensatora : a) schemat obwodu elektrycznego, b) charakterystyka czasowa.

## 8. Okres drgań generatora drgań relaksacyjnych.

Korzystając z uzyskanych rozwiązań można przedstawić na wykresie (Rys. 6) charakterystykę czasową obwodu relaksacyjnego ukazanego na Rys. 3.



Rys. 6. Wykres drgań relaksacyjnych.

Wykres składa się z powtarzających się cyklicznie wykładniczych faz ładowania i rozładowania kondensatora. Szybkość rozładowania kondensatora jest znacznie większa od szybkości ładowania, ponieważ rozładowanie zachodzi poprzez opór wewnętrzny neonówki. Jest on dużo mniejszy (kilka rzędów wielkości) od oporu zewnętrznego  $R$ , decydującego o szybkości ładowania kondensatora. Można zatem przyjąć, że okres  $T$  drgań relaksacyjnych jest określony wyłącznie przez czas fazy ładowania.

Korzystając z równania (2) i przyjmując oznaczenia  $t_1$  i  $T$  tak jak na Rys. 6, można zapisać:

$$U_G = U_0 \left(1 - e^{-\frac{t_1}{RC}}\right)$$

$$U_Z = U_0 \left(1 - e^{-\frac{t_1+T}{RC}}\right)$$

gdzie  $U_Z$  - napięcie zapłonu,  $U_G$  - napięcie gaśnięcia.

Po wyeliminowaniu z układu równań zmiennej  $t_1$  uzyskuje się wyrażenie opisujące zależność okresu drgań  $T$  od parametrów obwodu drgającego  $R$ ,  $C$ ,  $U_0$ ,  $U_G$ ,  $U_Z$ :

$$T = RC \ln\left(\frac{U_0 - U_G}{U_0 - U_Z}\right) \quad (4)$$

Wartość logarytmu w powyższym równaniu zależy jedynie od typu neonówki i napięcia zasilania, jest zatem dla danego obwodu drgającego wielkością stałą. Wprowadzając oznaczenie

$K = \ln((U_0 - U_G)/(U_0 - U_Z))$  otrzymuje się:

$$T = KRC \quad (5)$$

Ponieważ okres drgań relaksacyjnych jest liniowo zależny od pojemności kondensatora  $C$ , opisany obwód drgający może służyć do dogodnego pomiaru nieznanymi pojemności.

## DODATEK

### 9. Ładowanie i kondensatora w obwodzie RC.

W obwodzie przedstawionym na Rys. 4 po zamknięciu klucza K kondensator C ładuje się poprzez opór R prądem I wypływającym ze źródła napięcia stałego  $U_0$ . Zgodnie z II prawem Kirchhoffa dla dowolnej chwili  $t$  można napisać:

$$U_0 = U + IR \quad (6)$$

gdzie  $U$  oznacza napięcie na kondensatorze C. Korzystając z definicji natężenia prądu i pojemności elektrycznej otrzymuje się zależność  $I = dQ/dt = CdU/dt$  umożliwiającą przekształcenie równania (6) do postaci dogodnej do scałkowania:

$$\frac{dt}{RC} = -\frac{dU}{(U_0 - U)} .$$

Powyższe równanie jest **równaniem różniczkowym pierwszego stopnia o zmiennych rozdzielonych**, a jego rozwiązanie ma ogólną postać:

$$\frac{t}{RC} = -\ln(U_0 - U) + k .$$

Z założenia, że dla  $t = 0$  napięcie na kondensatorze równa się zero, uzyskuje się wartość stałej całkowania  $k = \ln U_0$ . Ostateczną postać rozwiązania, opisującą zmianę napięcia na kondensatorze w trakcie jego ładowania, można przedstawić następująco:

$$U = U_0(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (7)$$

Graficzną ilustrację powyższego rozwiązania przedstawia Rys. 4b.

W zupełnie podobny sposób można przeanalizować proces rozładowywania kondensatora C przez opór R po zamknięciu klucza w obwodzie przedstawionym na Rys. 5a.



## A) WYZNACZANIE CHARAKTERYSTYKI LAMPY NEONOWEJ

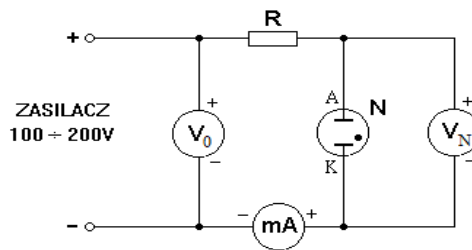
### II. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie charakterystyki prądowo-napięciowej neonówki typu StR 150/40Z oraz określenie wartości charakteryzujących lampę parametrów  $U_Z$ ,  $U_G$ ,  $R_D$ .

### III. WYKONANIE ĆWICZENIA

1. Zestawić obwód pomiarowy według schematu przedstawionego na Rys. 7 wykorzystując jako źródło zasilania zasilacz regulowany 100-200V. Jako woltomierze  $V_0$  i  $V_N$  zastosować multimetry cyfrowe ustawione na zakresie pomiarowym 200V DC (napięcie stałe), a jako amperomierz wykorzystać multimetr ustawiony na pomiar prądu stałego na zakresie 200mA. Opór  $R$  powinien mieć wartość rzędu kilku  $k\Omega$ .

**Poprawność obwodu sprawdza prowadzący zajęcia!**



Rys. 7. Schemat układu pomiarowego (pomiar charakterystyki neonówki)

2. Włączyć zasilacz i zwiększając stopniowo napięcie przy pomocy pokrętła regulacji napięcia zaobserwować moment zapłonu lampy. Zanotować wartość napięcia  $U_0$  w chwili zapłonu. Powtórzyć pomiar 3-krotnie i obliczyć średnią wartość napięcia zapłonu  $U_Z$ .
3. Ustalić napięcie zasilacza na poziomie ok. 20 V poniżej wartości  $U_Z$  i zwiększając stopniowo napięcie co ok. 4 V rejestrować wskazania przyrządów:  $V_0$ ,  $V_N$  i mA. Pomiar narastającej gałęzi charakterystyki zakończyć gdy natężenie prądu osiągnie wartość ok. 14 - 15 mA.
4. Zarejestrować charakterystykę opadającą (powrotną) zmniejszając napięcie co 4V i notując wskazania przyrządów pomiarowych  $V_0$ ,  $V_N$  i mA.

Wyniki pomiarów zanotować w tabelce:

$U_0$ (V)	$U_N$ (V)		I (mA)	
	charakterystyka		charakterystyka	
	narastająca	opadająca	narastająca	opadająca

5. Wyłączyć zasilacz, rozmontować obwód.

#### IV. OPRACOWANIE WYNIKÓW

1. Przedstawić na wykresie wyznaczoną doświadczalnie zależność napięcia neonówki  $U_N$  od napięcia zasilania  $U_0$ . Zaznaczyć punkty należące do charakterystyki narastającej i opadającej. Strzałkami zaznaczyć kierunek obiegu wykreślonej pętli histerezy.
2. Przedstawić na wykresie prądowo-napięciową charakterystykę neonówki w postaci zależności napięcia  $U_N$  od natężenia prądu I. (Uwzględnić jedynie zakres przewodzenia lampy tzn.  $I > 0$ ).
3. Z charakterystyki prądowo-napięciowej wyznaczyć metodą graficzną opór dynamiczny neonówki  $R_D$  i napięcie gaśnięcia  $U_G$ .

#### WSKAZÓWKA:

Doświadczalna prosta  $U_N(I)$  przedstawia charakterystykę neonówki opisaną równaniem 1):  $U = U_G + IR_D$ . Punkt przecięcia prostej z osią napięcia (dla  $I = 0$ ) wyznacza wartość wyrazu wolnego  $U_G$ , współczynnik kierunkowy prostej jest równy oporowi dynamicznemu lampy  $R_D$  wyrażonemu w  $k\Omega$ . Opis postępowania przedstawiono w instrukcji „Wprowadzenie do metod opracowywania wyników pomiarowych”.

#### V. ANALIZA NIEPEWNOŚCI

O konieczności przeprowadzenia analizy niepewności decyduje prowadzący zajęcia.

1. Oszacować niepewność standardową  $u(U_G)$  wyniku pomiaru napięcia gaśnięcia oraz niepewność standardową  $u(R_D)$  wyniku pomiaru oporu dynamicznego neonówki.
2. Zapisać wyniki pomiaru  $U_G$  i  $R_D$  łącznie z niepewnościami  $u(U_G)$  i  $u(R_D)$ .

**WSKAZÓWKA:**

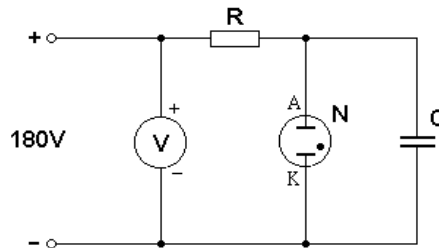
Możliwość oszacowania niepewności pomiarowych daje jedynie numeryczna analiza danych zwana metodą najmniejszych kwadratów (regresja liniowa), opisana szczegółowo w broszurze „Wprowadzenie do metod opracowania wyników pomiarowych” na str.18. Niepewność standardową oporu dynamicznego  $R_D$  określa niepewność współczynnika kierunkowego  $u(a)$  opisana wzorem (18), a niepewność standardową napięcia  $U_G$  niepewność wyrazu wolnego  $u(b)$  opisana wzorem (19).

**B) GENERATOR DRGAŃ RELAKSACYJNYCH****II. CEL ĆWICZENIA**

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie stałej  $K$  dla badanego generatora drgań relaksacyjnych a następnie wykorzystanie tego generatora do pomiaru pojemności nieznanymi kondensatorów.

**III. WYKONANIE ĆWICZENIA**

1. Połączyć obwód według schematu przedstawionego na Rys. 8.



Rys. 8. Schemat obwodu pomiarowego (pomiar drgań relaksacyjnych).

Jako  $R$  włączyć opór o wartości podanej przez prowadzącego zajęcia (co najmniej kilkuset  $k\Omega$ ), jako  $C$  - kondensator regulowany oraz jako  $V$  - multimetr cyfrowy ustawiony na zakres 200 V napięcia stałego (200DC). Kondensator regulowany stanowi zespół kondensatorów o pojemnościach 1, 2, 4 i  $8\mu F$  łączonych równolegle przy pomocy wyłączników. Ponieważ w takim połączeniu pojemności sumują się, możliwy jest wybór dowolnej pojemności od  $1\mu F$  do  $15\mu F$ .

2. Ustawić kondensator regulowany na pojemność  $1\mu F$ . Po sprawdzeniu obwodu przez **prowadzącego zajęcia** włączyć zasilacz. Pokrętelem potencjometru zasilacza ustawić napięcie równe 180 V (odczytane na woltomierzu  $V$ ).

3. Przy pomocy stopera zmierzyc czas równy 10-ciu okresom drgań, a następnie wyłączyć napięcie zasilania. (Jeżeli dla  $C=1 \mu\text{F}$  drgania są zbyt szybkie zwiększyć pojemność do 2 lub 3  $\mu\text{F}$ ).
4. Powtórzyć pomiar opisany w pkt. 3 dla kolejnych, stopniowo zwiększanych pojemności  $C$ . Ze względów praktycznych warto przeprowadzić kolejne pomiary dla pojemności zwiększanych o stałą wartość, np.  $1\mu\text{F}$  lub  $2\mu\text{F}$ . Wyznaczane okresy drgań będą wówczas również wzrastały monotonicznie. Jeżeli czas 10 drgań będzie większy niż ok.30s wystarczy mierzyć czas 5 okresów.

#### UWAGA !

Przed każdą zmianą pojemności lub zmianą kondensatora należy wyłączyć napięcie zasilania. Kondensatory można bezpiecznie odłączać dopiero wówczas, gdy napięcie w obwodzie spadnie poniżej 24V.

5. Zmierzyc czas 10-ciu okresów drgań dla nieznanymi pojemności  $C_{x1}$ ,  $C_{x2}$  i  $C_{x3}$ .

Wyniki pomiarów umieścić w tabelce:

R = .....( $\text{M}\Omega$ )		
C ( $\mu\text{F}$ )	t (s)	T = t/liczba okresów (s)

6. **Po wyłączeniu zasilacza i rozmontowaniu obwodu** zmierzyc dokładnie wartość oporu  $R$  multimetrem cyfrowym ustawionym na odpowiedni zakres pomiarowy.

#### IV. OPRACOWANIE WYNIKÓW

1. Przedstawić na wykresie liniową zależność okresu drgań  $T$  generatora od pojemności  $C$  kondensatora.
2. Korzystając z wykresu ustalić wartości nieznanymi pojemności  $C_x$ .
3. Metodą graficzną wyznaczyć wartość współczynnika kierunkowego  $a$  prostej doświadczalnej  $T = a \cdot C$ . Obliczyć wartość bezwymiarowej stałej  $K$  generatora, wiedząc że  $K = a/R$  (jeżeli pojemność  $C$  wyrażono w  $\mu\text{F}$  ( $10^{-6} \text{F}$ ), to opór  $R$  należy wyrazić w  $\text{M}\Omega$  ( $10^6 \Omega$ )).
4. Wykorzystując wyznaczone w części A wartości parametrów  $U_G$  i  $U_Z$  obliczyć dodatkowo wartość stałej  $K$  z równania  $K = \ln((U_0 - U_G)/(U_0 - U_Z))$  przyjmując wartość napięcia  $U_0 = 180\text{V}$ . Porównać wartości stałej  $K$  uzyskane dwiema metodami.

**LITERATURA**

1. Encyklopedia Fizyki, PWN, W-wa 1972
2. Encyklopedia Techniki, Elektronika, WNT, W-wa 1983
3. Kitajgorodzki A. I., Fizyka, PWN, W-wa 1963
4. Mroczek Cz., Podstawy elektroniki i urządzenia elektronowe, PWSZ, W-wa 1967
5. Piekara H., Elektryczność, materia i promieniowanie, PWN, W-wa 1986
6. Sawicki J., Układy elektroniczne, PWSZ, W-wa 1970
7. Seely S., Układy elektroniczne, PWSZ, W-wa 1972
8. Szczeniowski SZ., Fizyka doświadczalna, cz. III, Elektryczność i magnetyzm, PWN, W-wa 1966
9. Szydłowski H., Pracownia fizyczna, PWN, W-wa 1980