

## Wyznaczenie pojemności kondensatorów z pomiarów drgań relaksacyjnych

### Cele ćwiczenia

- Zapoznanie się z budową i zastosowaniami kondensatora oraz procesem relaksacyjnym w układzie  $RC$ .
- Wyznaczenie pojemności elektrycznej badanych kondensatorów.

### Wprowadzenie

Kondensatory są powszechnie wykorzystywane w urządzeniach elektrycznych takich jak zasilacze, radiodbiorniki, lampy błyskowe, defibrylatory, komputery itp. Służą one m.in. do magazynowania energii elektrycznej, filtrowania zmiennych przebiegów elektrycznych, dostrajania aparatury radiowej i telewizyjnej, tworzenia pamięci komputerowych. Wyróżniamy bardzo wiele typów kondensatorów w zależności od ich budowy i zastosowania. Najprostszym modelem kondensatora jest tzw. kondensator płaski, wykonany z dwóch równoległych płaskich płytek (okładek) z przewodnika oddzielonych warstwą izolującą (nie przewodzącą prądu elektrycznego). Izolatorem może być próżnia lub materiał dielektryczny. Po podłączeniu do kondensatora źródła napięcia na jego okładkach odkładają się ładunki elektryczne przeciwnych znaków, a między nimi pojawia się pole elektryczne. Istotną wielkością charakteryzującą kondensator jest jego pojemność elektryczna. Pojemność elektryczną  $C$  próżniowego kondensatora płaskiego o powierzchni okładek  $S$  i odległości pomiędzy nimi  $d$  można obliczyć z następującego równania:

$$C = \varepsilon_0 \frac{S}{d}, \quad (1)$$

gdzie  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  F/m jest przenikalnością elektryczną próżni. Jednostką pojemności elektrycznej jest farad  $1F = 1C/1V$ . W przypadku, gdy przestrzeń między okładkami kondensatora wypełnimy dielektrykiem (np.: ebonit, bakelit, porcelana, olej transformatorowy) pole elektryczne między okładkami kondensatora ulega zmianie wskutek zjawiska polaryzacji elektrycznej. Pojemność takiego kondensatora rośnie i można ją zapisać następującym wzorem:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d}, \quad (2)$$

gdzie  $\varepsilon_r$  jest względną przenikalnością elektryczną dielektryka.

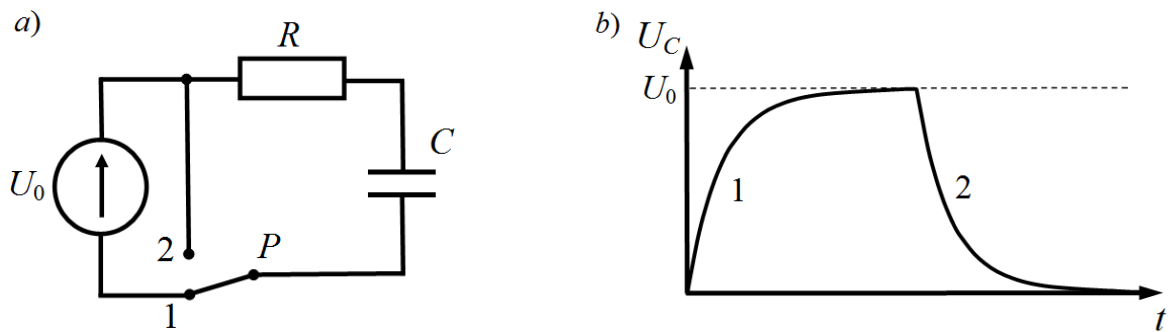
Rozpatrzmy proces ładowania i rozładowania kondensatora na przykładzie układu przedstawionego na rys. 1a. Do stabilizowanego źródła o napięciu  $U_0$  podłączono rezystor o rezystancji  $R$  i kondensator o pojemności  $C$ . Układ jest wyposażony dodatkowo w przełącznik  $P$ . W przypadku, gdy przełącznik jest ustawiony w pozycji 1, kondensator jest połączony ze źródłem i na okładkach kondensatora zaczyna gromadzić się ładunek elektryczny (kondensator ładuje się). Zależność napięcia na kondensatorze w funkcji czasu  $t$  dla procesu **ładowania** kondensatora ma postać (krzywa 1 na rys. 1b):

$$U_C(t) = U_0 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \right]. \quad (3)$$

Jeżeli po naładowaniu kondensatora przełącznik  $P$  ustawimy w pozycji 2, nastąpi proces jego rozładowania poprzez rezystor. Napięcie na kondensatorze w procesie **rozładowania** będzie się zmniejszało w czasie zgodnie z następującą zależnością (krzywa 2 na rys. 1b):

$$U_C(t) = U_0 \exp\left(-\frac{t}{RC}\right). \quad (4)$$

Analizując wzory (3) i (4), można przyjąć z niewielkim przybliżeniem, że po czasie  $t > 5RC$  napięcie na kondensatorze osiągnie napięcie zasilania  $U_0$  (krzywa 1 na rys. 1b) lub kondensator całkowicie rozładuje się (krzywa 2 na rys. 1b). Wynika z tego, że jeżeli rezystancja układu  $R$  jest niewielka, można kondensator szybko naładować lub rozładować. Efekt ten wykorzystuje się w przypadku, gdy chcemy energię elektryczną szybko zgromadzić lub odzyskać (np. w defibrylatorze, lampie błyskowej), wówczas kondensator ma przewagę nad akumulatorem, w którym te procesy przebiegają znacznie wolniej.



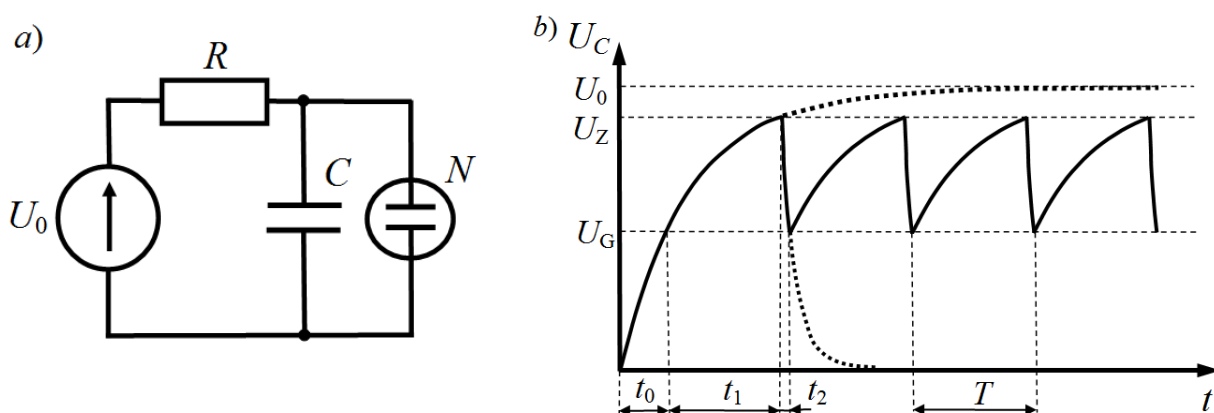
Rys. 1 a) schemat obwodu RC, b) zależność napięcia na kondensatorze w funkcji czasu dla procesów ładowania (1) i rozładowania (2) kondensatora.

### Powstawanie drgań relaksacyjnych w układzie RC

Relaksacją - ogólnie - nazywany jest powrót układu do stanu równowagi połączony z rozproszeniem jego energii. Jeżeli do układu dostarczana jest energia z zewnętrznego źródła, jest on wzbudzany, a następnie może wrócić do stanu równowagi. Taki proces może powtarzać się cyklicznie. Mamy wtedy do czynienia z drganiami relaksacyjnymi. W zależności od charakteru układu możemy mówić o drganiach np. cieplnych, mechanicznych, elektrycznych.

W ćwiczeniu posłużymy się zjawiskiem powstawania relaksacyjnych drgań elektrycznych w układzie RC do wyznaczenia pojemności badanych kondensatorów. Aby zrozumieć mechanizm powstawania tych drgań, poznamy budowę i zasadę działania neonówki, a następnie przeanalizujemy powstawanie drgań relaksacyjnych w układzie złożonym z zasilacza, rezystora, kondensatora oraz neonówki.

Neonówka jest to niewielka szklana bańka wypełniona rozrzedzonym gazem szlachetnym (neonem), w której wtopione są dwie metaliczne elektrody. Po podłączeniu do elektrod napięcia o wartości mniejszej od napięcia progowego (napięcia zapłonu) nie obserwujemy żadnego efektu. Wprawdzie w neonówce znajduje się zwykle niewielka ilość jonów, ale przepływ prądu jest znikomy. Możemy powiedzieć, że rezystancja neonówki  $R_N$  jest bardzo duża ( $R_N \rightarrow \infty$ ). Sytuacja ulega zmianie, gdy do elektrod neonówki podłączymy napięcie równe napięciu zapłonu  $U_Z$  lub większe od niego. Następuje wtedy lawinowa jonizacja gazu połączona z jego świeceniem. Jony gazu dobrze przewodzą prąd, a tym samym rezystancja neonówki staje się bardzo mała ( $R_N \rightarrow 0$ ). Należy jednak zauważyć, że zmniejszenie napięcia przyłożonego do świecącej neonówki do wartości niższej od  $U_Z$  nie powoduje jej natychmiastowego zgaszenia. Dopiero po zmniejszeniu napięcia do tzw. napięcia gaśnięcia  $U_G$  jonizacja lawinowa ustaje, neonówka gaśnie, a jej rezystancja rośnie skokowo do bardzo dużej wartości. Można więc powiedzieć, że neonówka stanowi rodzaj przełącznika, który zamyka obwód powyżej napięcia  $U_Z$  i otwiera go (wyłącza) po spadku napięcia poniżej wartości  $U_G$ .



Rys. 2 a) schemat obwodu RC z neonówką, b) zależność napięcia na kondensatorze w funkcji czasu w trakcie drgań relaksacyjnych.

Rozpatrzmy układ przedstawiony na rys. 2a złożony z zasilacza o stabilizowanym napięciu  $U_0$  ( $U_0 > U_Z$ ), rezystora o rezystancji  $R$ , kondensatora o pojemności  $C$  i neonówki  $N$ . Po włączeniu zasilacza kondensator

ładuje się, a przez rezystor  $R$  płynie prąd. Po osiągnięciu na kondensatorze napięcia zapłonu  $U_Z$  neonówka zapala się i zaczyna bardzo dobrze przewodzić prąd, a kondensator gwałtownie rozładowuje się aż do osiągnięcia napięcia gaśnięcia. Po zgaśnięciu neonówka przestaje przewodzić prąd i kondensator ładuje się do napięcia  $U_Z$ , przy którym neonówka ponownie się zapala i rozpoczyna się proces rozładowania. Omówiony proces powtarza się cyklicznie i w ten sposób obserwujemy drgania relaksacyjne. Na rysunku 2b pokazano zmiany napięcia na kondensatorze w funkcji czasu w procesie drgań relaksacyjnych. Okresowe zmiany napięcia można zaobserwować jako powtarzające się regularnie błyski neonówki.

Chcąc wyznaczyć okres  $T$  tych błysków, posłużymy się rysunkiem 2b oraz równaniami (3) i (4).

Jak widać na rysunku 2b, okres drgań relaksacyjnych  $T$  równa się sumie czasów  $t_1$  i  $t_2$  ( $T = t_1 + t_2$ ). Napięcia na kondensatorze w chwilach czasu  $t_0$  i  $t_0 + t_1$  wynoszą odpowiednio  $U_C(t_0) = U_G$  oraz  $U_C(t_0 + t_1) = U_Z$ . Podstawiając te dane do równania (3), otrzymamy następujące zależności:

$$U_G = U_0 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t_0}{RC}\right) \right]; \quad U_Z = U_0 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t_0 + t_1}{RC}\right) \right]. \quad (5)$$

Powyższe równania można zapisać w przekształconej formie:

$$U_0 - U_G = U_0 \exp\left(-\frac{t_0}{RC}\right); \quad U_0 - U_Z = U_0 \exp\left(-\frac{t_0}{RC}\right) \cdot \exp\left(-\frac{t_1}{RC}\right) \quad (6)$$

Dzieląc równania (6) stronami i obustronnie je logarytmując, uzyskamy zależność na czas  $t_1$ :

$$t_1 = RC \ln\left(\frac{U_0 - U_G}{U_0 - U_Z}\right). \quad (7)$$

Czas rozładowywania się kondensatora  $t_2$  można wyliczyć, posługując się równaniem (4). Zakładając, że w chwili rozpoczęcia rozładowania napięcie na kondensatorze wynosi  $U_Z$ , a po czasie  $t_2$  wynosi  $U_G$ , równanie (4) można zapisać następująco:

$$U_G = U_Z \exp\left(-\frac{t_2}{R_N C}\right), \quad (8)$$

gdzie  $R_N$  jest rezystancją neonówki w czasie zapłonu. Przekształcając równanie (8), uzyskamy zależność na czas rozładowania:

$$t_2 = R_N C \ln\left(\frac{U_Z}{U_G}\right). \quad (9)$$

Rezystancja neonówki  $R_N$  w trakcie zapłonu jest dużo mniejsza od rezystancji rezystora  $R$ , a tym samym czas ładowania kondensatora do napięcia  $U_Z$  jest znacznie większy od czasu jego rozładowania do napięcia  $U_G$  ( $t_1 \gg t_2$ ). Możemy więc zapisać, że okres drgań relaksacyjnych  $T$  jest w przybliżeniu równy czasowi  $t_1$  ( $T \approx t_1$ ). Korzystając z tych założeń i równania (7), otrzymamy zależność na okres drgań relaksacyjnych:

$$T = RC \ln\left(\frac{U_0 - U_G}{U_0 - U_Z}\right). \quad (10)$$

Wyrażenie  $\ln[(U_0 - U_G)/(U_0 - U_Z)]$  jest wielkością stałą dla danego typu neonówki i wartości napięcia zasilania, a więc można je zapisać w postaci pewnej stałej  $k$  (stała neonówki). Równanie (10) przyjmie wtedy następującą postać:

$$T = RCk. \quad (11)$$

### Układ pomiarowy

Do wyznaczenia pojemności badanych kondensatorów posłuży układ pomiarowy przedstawiony na rysunku 3. Składa się on z zasilacza o stabilizowanym napięciu  $U_0$ , rezystora o zmiennej rezystancji  $R$ , kondensatora wzorcowego o zmiennej pojemności  $C_w$ , szeregu badanych kondensatorów o pojemnościach  $C_x$ , neonówki  $N$  oraz przełącznika  $P$ .

## Pomiary i obliczenia

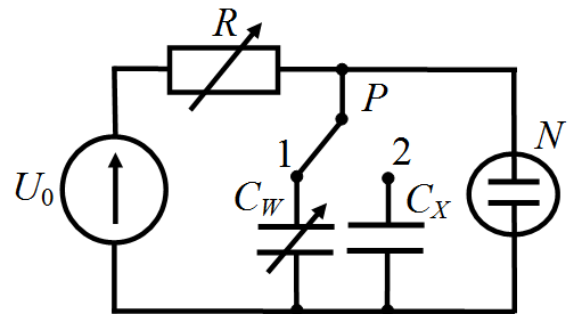
Ćwiczenie składa się z dwóch etapów. Celem pierwszego z nich jest wyznaczenie stałej neonówki  $k$ . Na początku należy przy pomocy przełącznika  $P$  włączyć do obwodu kondensator wzorcowy o zmiennej pojemności  $C_W$ , nastawić rezystancję rezystora na dowolną wartość z zakresu  $1 \div 5 M\Omega$ , a na zasilaczu wybrać napięcie około  $80 V$  (napięcia tego nie należy zmieniać podczas wykonywania ćwiczenia). Następnie przy pomocy stopera należy zmierzyć czas  $10 \div 20$  błysków neonówki. Dzielicz czas błysków przez ich ilość  $n$ , można wyznaczyć okres drgań relaksacyjnych  $T$ . Znajomość wielkości  $R$ ,  $C_W$  oraz  $T$  po podstawieniu do przekształconego wzoru (11) umożliwi wyznaczenie stałej neonówki  $k$ :

$$k = \frac{T}{RC_W} \quad (12)$$

Powtarzając te pomiary kilkunastokrotnie dla różnych wartości  $R$  i  $C_W$ , wielokrotnie wyznaczymy stałą neonówki  $k$  a następnie jej wartość średnią i niepewność pomiarową.

W drugim etapie pomiarów przy pomocy przełącznika  $P$  należy włączyć do obwodu jeden z kondensatorów badanych o pojemności  $C_X$ , a następnie wykonać szereg pomiarów czasów  $5 \div 15$  błysków neonówki, każdorazowo zmieniając rezystancję rezystora  $R$  w granicach  $1 \div 5 M\Omega$ . Dzielicz czas błysków przez ich ilość  $n$ , wyliczymy okres drgań relaksacyjnych  $T$ . Posługując się równaniem (11) oraz wielkościami  $R$ ,  $k$  oraz  $T$ , można wyznaczyć pojemność kondensatora  $C_X$ . Wyniki pomiarowe uzyskane dla różnych wartości rezystora  $R$  należy uśrednić i obliczyć ich niepewność pomiarową. Powyższe pomiary i obliczenia przeprowadzamy dla pozostałych kondensatorów badanych.

W układzie pomiarowym istnieje możliwość podłączenia oscyloskopu komputerowego równoległe do neonówki. W tym przypadku nie posługujemy się stoperem, a okres  $T$  wyznaczamy z pomiarów na wykresie drgań relaksacyjnych  $U_C = f(t)$  prezentowanym na monitorze komputera. Instrukcja obsługi oscyloskopu znajduje się na stanowisku laboratoryjnym.



Rys. 3 Schemat układu pomiarowego.

## Przebieg ćwiczenia

### A. Wyznaczenie stałej neonówki

1. Włączyć zasilacz, ustawić napięcie około  $80 V$  (nie należy zmieniać napięcia do końca zajęć) i odczekać około 5 minut.
2. Przy pomocy przełącznika  $P$  włączyć kondensator wzorcowy do obwodu, a następnie ustawić wartości rezystancji  $R$  i pojemności  $C_W$  tak, aby częstotliwość błysków umożliwiła ich zliczanie.
3. Wyznaczyć czas  $10 \div 20$  błysków neonówki  $t$ . Pomiar ten należy powtórzyć dla kilkunastu innych kombinacji rezystancji  $R$  i pojemności kondensatora wzorcowego  $C_W$ .
4. Wyznaczyć okresy drgań relaksacyjnych  $T$ , dzieląc zmierzony czas błysków  $t$  przez ich ilość  $n$  ( $T = t/n$ ).
5. Korzystając z zależności (12), wyznaczyć stałą neonówki  $k$  dla poszczególnych pomiarów a następnie ich średnią arytmetyczną i niepewność pomiarową.

### B. Wyznaczenie pojemności badanych kondensatorów

1. Włączyć do obwodu pierwszy z kondensatorów badanych, a następnie wyznaczyć czasy  $5 \div 15$  błysków neonówki, każdorazowo zmieniając rezystancję rezystora  $R$  w granicach  $1 \div 5 M\Omega$ .
2. Wyznaczyć okresy drgań relaksacyjnych  $T$ , dzieląc zmierzony czas błysków  $t$  przez ich ilość  $n$  ( $T = t/n$ ).
3. Korzystając z przekształconej zależności (11), wyznaczyć pojemności kondensatora  $C_X$  dla poszczególnych pomiarów a następnie ich średnią arytmetyczną i niepewność pomiarową.
4. Pomiary i obliczenia powtórzyć dla pozostałych badanych kondensatorów, zestawić wyniki końcowe i zapisać wnioski dotyczące ćwiczenia.