

BADANIE LINII PRZESYŁOWEJ

- I. Cel ćwiczenia:** zapoznanie ze zjawiskiem odbicia, zjawiskiem fal stojących i najprostszymi elementami techniki impulsowej.
- II. Przyrządy:** linia przesyłowa, opornik dekadowy, generator impulsów, generator sygnałowy, oscyloskop.
- III. Literatura:**
1. Grawford F. S., Fale, PWN Warszawa 1972,
 2. Instrukcja do ćwiczenia M-14 - "Badanie fal stojących",
 3. Pracownia fizyczna dla zaawansowanych, UŁ.

IV. Wprowadzenie

Najprostszą linią przesyłową tworzą dwa równoległe do siebie przewody, umieszczone w ośrodku jednorodnym, którego właściwości dielektryczne i magnetyczne scharakteryzowane są wartościami względnej stałej dielektrycznej ϵ i względnej przenikalności magnetycznej μ . Fala napięcia i fala prądu rozchodzi się w takiej linii z prędkością fazową

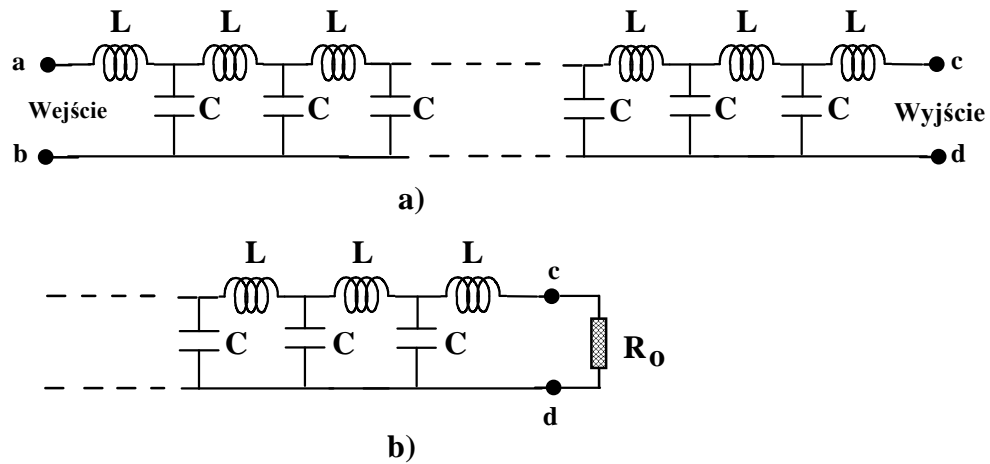
$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}} \quad (1)$$

gdzie $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ jest prędkością fal elektromagnetycznych w próżni. Jednostkowy odcinek takiej linii posiada określoną wartość indukcyjności L_1 (mierzonej wzdłuż linii) i pojemności C_1 (mierzonej między przewodami).. Wielkości te nazywamy odpowiednio indukcyjnością jednostkową wzdłużną linii (indukcyjnością rozłożoną) i pojemnością jednostkową poprzeczną linii (pojemnością rozłożoną). Jednostką L_1 w układzie SI jest henr na metr (H/m), a C_1 - farad na metr (F/m). Prędkość rozchodzenia się fali w linii przesyłowej o parametrach rozłożonych L_1 i C_1 wyrazić można wzorem

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}. \quad (2)$$

Najczęściej spotykaną w praktycznych zastosowaniach elektronicznych linią przesyłową jest przewód koncentryczny, w którym fala pokonuje odcinek o długości 1 m w czasie 4-5 ns, w żargonie właściwym technice impulsowej mówi się, że czas opóźnienia jednego metra takiego przewodu wynosi 4-5 ns.

Elektrycznym schematem zastępczym dwuprzewodowej linii w formie przewodu koncentrycznego jest schemat przedstawiony na rys. 1a, przy czym symbole L i C oznaczają w tym przypadku parametry rozłożone L_1 i C_1 . Linia przesyłowa zbudowana za pomocą zwojnic i kondensatorów w myśl schematu **1a** nosi nazwę linii łańcuchowej lub linii przesyłowej o elementach skupionych



Rys.1 Schemat linii łańcuchowej rozwartej na końcu (a) i "zamkniętej" rzeczywistą opornością obciążenia R_0 (b).

Dla linii przesyłowej, w której nie zachodzą straty energii (linia idealna) możemy napisać:

$$\frac{\partial U(x,t)}{\partial x} = -L_1 \frac{\partial I(x,t)}{\partial t} \tag{3}$$

$$\frac{\partial I(x,t)}{\partial x} = -C_1 \frac{\partial U(x,t)}{\partial t}$$

gdzie $U(x,t)$ oznacza falę napięcia rozchodzącą się wzdłuż osi OX, a $I(x,t)$ - falę natężenia prądu. Po dokonaniu odpowiednich przekształceń otrzymujemy równania

$$\frac{\partial^2 U(x,t)}{\partial x^2} = L_1 C_1 \frac{\partial^2 U(x,t)}{\partial t^2} \tag{4}$$

$$\frac{\partial^2 I(x,t)}{\partial x^2} = L_1 C_1 \frac{\partial^2 I(x,t)}{\partial t^2}$$

z których to równań wynika wzór (2).

Wielkość Z_0 równą

$$Z_0 = \frac{\partial U(x,t)}{\partial I(x,t)} = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \tag{5}$$

nazywamy opornością falową (impedancją falową, impedancją charakterystyczną) linii.

Oporność falowa długiej linii przesyłowej (linii długiej), w której nie występują straty energii jest niezależna od odległości x od wejścia linii, a ponadto nie zależy od częstości fali.

Założmy, iż do wejścia linii dołączyliśmy źródło napięcia zmiennego w czasie (generator), zaś do jej wyjścia - odbiornik energii o oporności rzeczywistej R_0 , np. opornik o oporze R_0 . W linii w stronę jej wyjścia biegnie fala napięcia. Jeśli oporność odbiornika energii nie jest równa oporności falowej, to fala biegnąca odbije się od końca linii i w linii będą rozprzestrzeniały się dwie fale: biegnąca w stronę wyjścia o amplitudzie A_0 i odbita, biegnąca w stronę wejścia o amplitudzie $A_o = pA_0$, gdzie

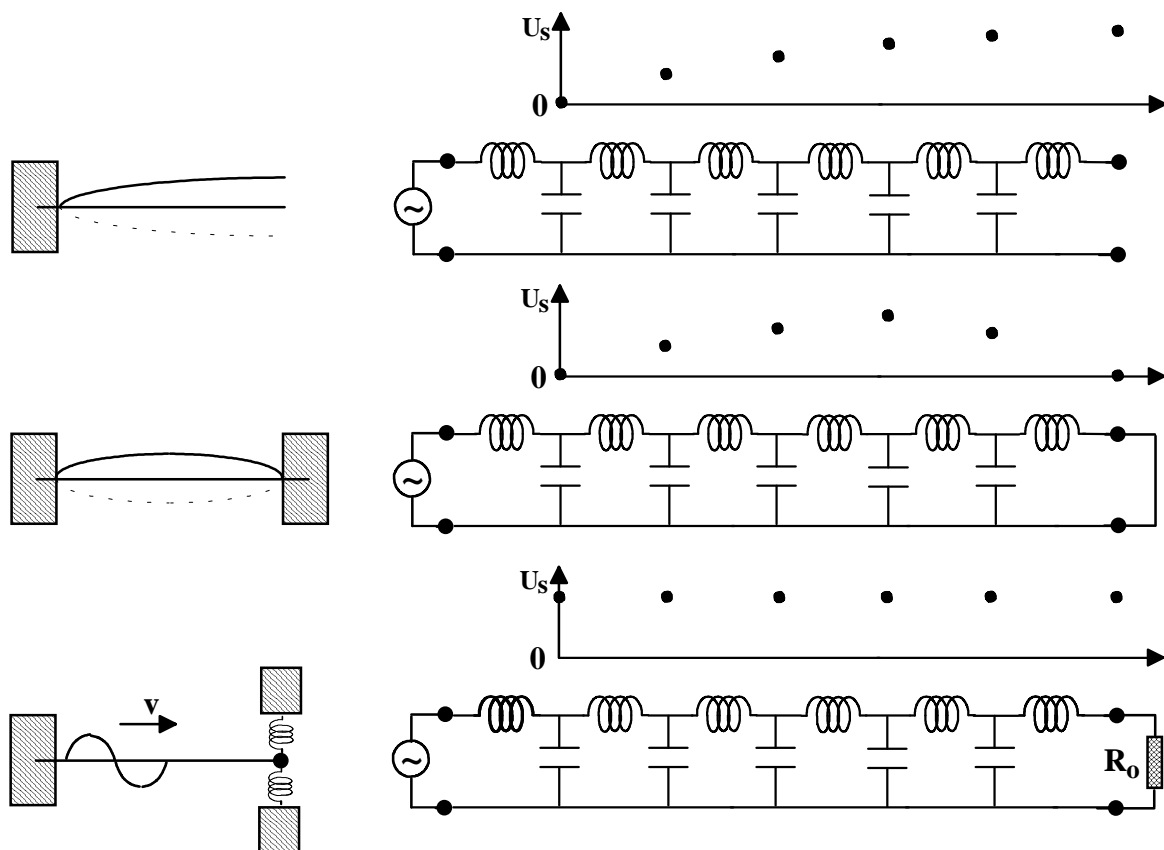
$$p = \frac{R_0 - Z_0}{R_0 + Z_0} \tag{6}$$

nazywamy współczynnikiem odbicia.

Rozróżnić możemy trzy przypadki szczególne:

- 1▪ Dla linii rozwartej, czyli takiej, do której wyjścia nie dołączono odbiornika energii; R_o ma wartość nieskończenie wielką i $p = 1$. Fala odbita ma w takim przypadku amplitudę równą co do wartości i znaku amplitudzie fali biegnącej, inaczej mówiąc fala odbija się bez zmiany fazy.
- 2▪ Dla linii zwartej tj. takiej, którą zamknięto zerową opornością rzeczywistą $R_o = 0 \Omega$, współczynnik odbicia $p = -1$, fala odbita ma amplitudę równą co do wartości bezwzględnej, a przeciwną co do znaku amplitudzie fali biegnącej. Fala odbija się ze zmianą fazy na przeciwną.
- 3▪ Dla linii zamkniętej opornikiem o oporze równym oporności falowej $R_o = \sqrt{L/C} = Z_o$ współczynnik odbicia przyjmuje wartość zerową $p = 0$ i zjawisko odbicia nie występuje

Fala odbita interferuje z falą biegnącą i jeśli spełnione są odpowiednie warunki - powstanie fala stojąca. W przypadku linii rozwartej na wyjściu musi powstać strzałka fali napięcia, na wejściu - węzeł, a na całej długości linii odkłada się całkowita wielokrotność jednej czwartej długości fali. Na wejściu i wyjściu linii zwartej powstają węzły fali napięcia, a na całej długości linii odkłada się całkowita wielokrotność połowy długości fali. Powstawanie fal stojących w linii rozwartej przebiega podobnie, jak w strunie zamocowanej jednostronnie, a w linii zwartej - jak w strunie zamocowanej obustronnie. Przypadek linii "zamkniętej" ("obciążonej") opornością rzeczywistą równą falowej odpowiada strunie pobudzonej do drgań, której jeden koniec umocowany jest sztywno, a drugi połączony jest z idealnym amortyzatorem (rys.2)



Rys.2 Podstawowe postacie fal stojących w strunie i linii łańcuchowej oraz postać drgań w strunie zakończonej idealnym amortyzatorem oraz w linii "zamkniętej" opornością falową. Na wykresach przedstawiono zależność napięcia skutecznego (lub amplitudy) od odległości od wejścia linii.

Linia przesyłowa zbudowana jest wg schematu przedstawionego na rys. 1a jest jednocześnie filtrem dolnoprzepustowym tj. takim, który tym silniej tłumi fale, im częściej ta fala jest większa od częstotliwości granicznej f_g równej

$$f_g = \frac{1}{\pi\sqrt{LC}}. \quad (7)$$

Fale o częstotliwościach mniejszych od granicznej będą biegły w linii bez strat energii. W szczególności w linii "zamkniętej" oporem równym oporności falowej rys.1b amplituda fali o częstotliwości mniejszej od granicznej jest stała na całej długości linii (rys.2).

Zgodnie z analizą fourierowską każdą falę o częstotliwości f przedstawić można w postaci superpozycji skończonej lub nieskończonej liczby fal sinusoidalnych o częstotliwościach równych całkowitym wielokrotnościom częstotliwości f - fale te nazywamy harmonicznymi danej fali (stąd synonimem analizy fourierowskiej jest termin analiza harmoniczna).

Linia łańcuchowa jako filtr dolnoprzepustowy tłumi harmoniczne o częstotliwościach wyższych od częstotliwości granicznej co powoduje zmiany charakteru fali nie będącej falą sinusoidalną - np. obserwując na ekranie oscyloskopu przebieg fali prostokątnej lub pojedynczego impulsu prostokątnego zauważymy zmianę jego kształtu na trapezoidalny o zaokrąglonych wierzchołkach.

Linie przesyłowe o niskiej wartości prędkości rozchodzenia się fali są stosowane jako tzw. linie opóźniające - ich zadaniem jest opóźnienie impulsów w układach elektronicznych. Czas opóźnienia t_d , wprowadzonego przez linię łańcuchową złożoną z n ogniów (komórek) LC jest określony zależnością

$$t_g = n\sqrt{LC}. \quad (8)$$

Z teorii linii przesyłowej wynika, iż w rozwartej linii złożonej z n identycznych ogniów LC może powstać n różnych fal stojących o częstotliwościach opisanych wzorem

$$f_l = f_g \sin\left(\frac{2l+1}{2n} \cdot \frac{\pi}{2}\right) \quad (9)$$

gdzie $l = 0, 1, 2, \dots, n-1$ a f_g jest częstotliwością graniczną

V. Pomiary

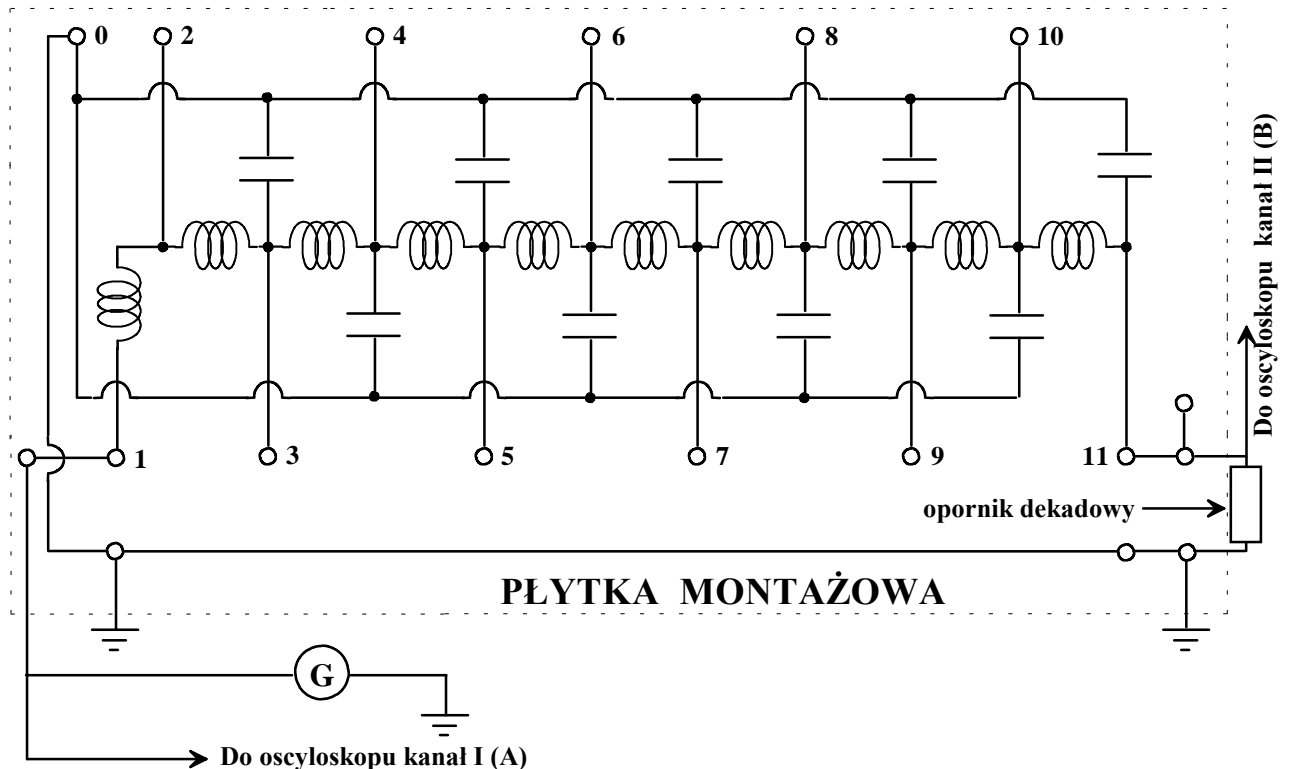
V.1 Badanie linii za pomocą generatora impulsów prostokątnych

Podstawowe parametry linii, tj. oporność falową Z_o , czas przejścia (opóźnienia) impulsu przez linię t_d i częstotliwość graniczną f_g wyznaczyć można za pomocą generatora impulsów prostokątnych i oscyloskopu dwukanałowego. Optymalnym rodzajem pracy oscyloskopu podczas tych pomiarów jest praca dwukanałowa z wyzwalaną zewnątrz podstawą czasu. Pierwszym krokiem podczas tej części ćwiczenia powinno być zapoznanie się z obsługą generatora impulsów i dobór warunków pracy generatora oraz oscyloskopu. W tym celu należy połączyć główne wyjście (50Ω) generatora z wejściem kanału I (A) oscyloskopu, a wyjście impulsów odniesienia (wyzwalania, synchronizacji) z wejściem zewnętrznego wyzwalań podstawy czasu oscyloskopu.

Wybieramy wstępnie czas trwania (szerokość) impulsu prostokątnego na ok. $1,5 \mu s$, minimalny czas narastania i opadania, czas (okres) powtarzania impulsów mniej więcej 10-krotnie dłuższy od czasu trwania. Czas opóźnienia impulsów prostokątnych względem impulsów wyzwalań powinien być taki, aby obraz impulsu prostokątnego powstał blisko lewej krawędzi ekranu oscyloskopu. Dobieramy tak rodzaj filtru częstotliwości i poziomu wyzwalań, aby obraz był stabilny i wyraźny.

Następnie łączymy przyrządy wg schematu przedstawionego na rys.3. Opornik dekadowy nastawiamy na taką wartość, aby amplituda impulsu na wyjściu linii była równa amplitudzie na wejściu,

a zniekształcenia impulsu były jak najmniejsze. Wyznaczamy tym sposobem wartość oporności falowej Z_0 .



Rys.3 Układ do badania fal stojących w linii przesyłowej.

UWAGA!

Jeśli wybieramy zbyt krótki czas trwania impulsu prostokątnego na wyjściu generatora, to wskutek silnego tłumienia przez linię jego wyższych harmonicznych może on przybrać formę trójkątną, a jego amplituda będzie istotnie mniejsza od amplitudy na wyjściu generatora. Z kolei zbyt długie wydlużenie impulsu spowoduje "zlewanie się" na ekranie oscyloskopu obrazów impulsów odbitych. Optymalny czas trwania impulsu prostokątnego wybieramy na zasadzie kompromisu między dwoma opisanymi powyżej efektami. Mieści się on w granicach od 1 do 1,5 μs .

Dla linii zamkniętej opornością falową mierzymy czas przejścia (opóźnienia) impulsu przez linię t_d . W celu sprawdzenia stopnia jednorodności linii wyznaczamy w tych samych warunkach amplitudę i czas opóźnienia impulsu dla poszczególnych odczepów linii.

Kolejnym krokiem jest połączenie jednego ze środkowych odczepów linii z wejściem kanału II (B) oscyloskopu i nastawienie na oporniku dekadowym wartości 0Ω - linia zostaje zwarta. Na ekranie powinniśmy zobaczyć całą sekwencję impulsów odbitych - impuls wytworzony przez generator po dojsciu do końca linii odbija się ze zmianą znaku amplitudy, biegnie w stronę wejścia linii, do którego dołączony jest przewód koncentryczny o oporności falowej 50Ω . Ponieważ oporność falowa linii jest znacznie większa od 50Ω impuls odbija się bez zmiany znaku amplitudy i po czasie t_d dociera ponownie do wyjścia linii, gdzie następuje kolejne odbicie itd. Mierzmy amplitudy kilku kolejno odbitych od wyjścia i wejścia linii impulsów. Pomiarów te powtarzamy dla linii rozwartej (opornik dekadowy odłączony od linii) oraz dla linii zamkniętej opornością np. dwukrotnie większą lub mniejszą od oporności falowej.

V.2 Badanie linii za pomocą generatora sygnałowego.

Wejście rozwartej linii przesyłowej łączymy z wyjściem generatora sygnałowego (napięcia sinusoidalnie zmiennego w czasie), a wyjście linii z wejściem kanału I (A) oscyloskopu.

Wyznaczamy zależność amplitudy sygnału na wyjściu linii od częstości dla stałej amplitudy napięcia wyjściowego generatora. Zgodnie z teorią oczekujemy, iż dla częstości wynikających ze wzoru (9) w linii będą powstawały fale stojące o coraz to mniejszych długościach. Oznaką powstania fali stojącej jest pojawienie się lokalnego maksimum amplitudy sygnału na wyjściu linii. Dobieramy wówczas bardzo dokładnie częstość sygnału tak, aby amplituda była jak największa, odczytujemy wartość częstości i mierzymy amplitudę sygnału na poszczególnych odczepach linii, aby móc określić formę fali stojącej i wartość stosunku długości fali stojącej do długości linii.

Pomiary te wykonujemy w przedziale częstości od 50-100 kHz aż do wartości równej ocenie częstości granicznej, dokonanej w oparciu o pomiary wykonane za pomocą impulsów prostokątnych, zwiększonej o wartość niepewności tej oceny. Następnie zamykamy linię opornością równą oporności falowej i wyznaczamy zależność amplitudy sygnału od odległości od początku linii (numeru odczepu) dla dwóch częstości, z których jedna powinna być istotnie mniejsza od częstości granicznej (np. dwukrotnie), a druga powinna być istotnie od niej większa.

VI. Opracowanie wyników pomiarów

- 1[▪] Na podstawie wyników pomiarów całkowitego opóźnienia linii (czasu przejścia impulsu przez linię) t_d i oporności falowej Z_0 obliczyć wartości indukcyjności L i pojemności C , przypadających na jedno ogniwo linii, oraz wartość częstości granicznej f_g . oszacować niepewności (niedokładności, błędy) tych wartości.
- 2[▪] Ocenić stopień jednorodności linii.
- 3[▪] Porównać wyniki pomiarów amplitud impulsów odbitych z wartościami przewidywanymi w oparciu o współczynniki odbicia, obliczone dla wyjścia i wejścia linii.
- 4[▪] Wykreślić zależność amplitudy sygnału na wyjściu linii rozwartej od częstości, a także zależność amplitudy sygnału od numeru odczepu linii dla tych częstości, dla których w linii powstała fala stojąca. Częstości te porównać z wartościami oczekiwanymi na podstawie wzoru (9).
- 5[▪] Wykreślić zależność stosunku długości fali stojącej od częstości i porównać ją z zależnością oczekiwaną na podstawie teorii.
- 6[▪] Przeprowadzić wszechstronną dyskusję przebiegu i wyników doświadczenia.

. Zagadnienia szczególnie przydatne przy wykonywaniu ćwiczenia E-34, a omówione w Pracowni fizycznej dla zaawansowanych

- 1[▪] Wzmacniacz odchyłania poziomego i układ generacji liniowej podstawy czasu oscyloskopu.
- 2[▪] Zasady łączenia oscyloskopu ze źródłem badanego sygnału.
- 3[▪] Dobór optymalnych warunków pracy oscyloskopu.
- 4[▪] Pomiar czasu oscyloskopem.
- 5[▪] Parametry przebiegów impulsowych.