ĆWICZENIE 6

LINIE DŁUGIE I FALOWODY

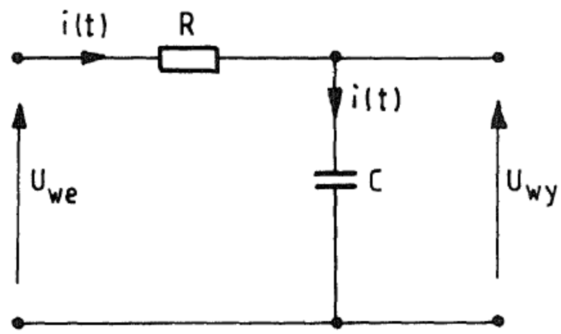
Opracował: mgr inż. Adam Kowalczyk

Pierwotna wersja ćwiczenia i instrukcji jest dziełem dra inż. Leona Tykarskiego

WPROWADZENIE

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z transmisją sygnałów elektrycznych w liniach długich, podstawowymi zasadami propagacji fal mikrofalowych w falowodzie oraz wykonanie pomiarów parametrów opisujących te sygnały.

W dotychczas spotykanych układach elektronicznych (filtry, układy RLC, wzmacniacze operacyjne itp.) przyjęto założenie, że zmiany napięć i prądów następują w całym obwodzie elektrycznym równocześnie. I tak np. w układzie całkującym *RC* (rys. 1) założone, że w oporniku *R* i w kondensatorze *C* płyną w każdej chwili takie same prądy elektryczne.



rys. 1 Układ całkujący RC.

Założenie to jest słuszne tylko wtedy, gdy rozmiary przestrzenne obwodu *RC* są bardzo małe w porównaniu z odległością, jaką przebywa fala elektromagnetyczna podczas mierzalnej zmiany napięcia wejściowego ΔU_{we}. Zatem rozważania na temat obwodów omawianych do tej pory odnosiły się jedynie do układów, których elementy skupione są w bardzo małym obszarze przestrzeni, albo do których dochodzą sygnały bardzo wolnozmienne w czasie.

Liniami długimi nazywane są takie układy przewodników służące do przekazywania sygnałów elektrycznych, których wymiary są porównywalne z długością fali odpowiadającą częstotliwości podstawowej transmitowanego sygnału.

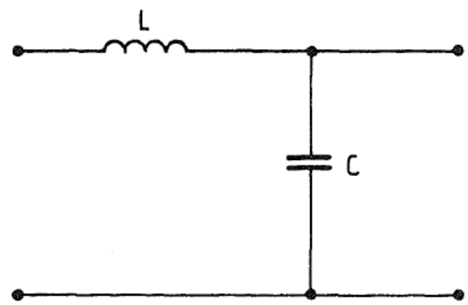
Przykład

Weźmy odcinek przewodu współosiowego o długości 1m, w którym fala elektromagnetyczne porusza się z prędkością $V = 2 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ (przewód wypełniony dielektrykiem).

a. Podczas transmisji sygnału o częstotliwości *f*=1 kHz:

$$\lambda_1 = V / 10^3 Hz = 2 \cdot 10^5 m$$

Układ taki zachowuje się jak układ o stałych skupionych L i C i można go scharakteryzować pojemnością C i indukcyjnością L (rys. 2)



rys. 2

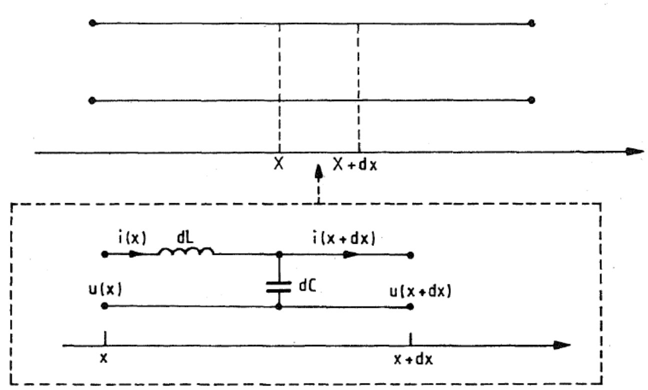
b. Podczas transmisji sygnału o częstotliwości *f*=300MHz:

$$\lambda_1 = V / 3 \cdot 10^8 Hz = 66{,}7 cm$$

Układ zachowuje się jak układ o stałych rozłożonych.

Układ o stałych rozłożonych

Układ taki można przedstawić jako połączone ze sobą bardzo krótkie (o długości dx) sekcje przewodu (rys. 3), z których każdą można scharakteryzować za pomocą przypisanych jej elementów, pojemności dC i indukcyjności dL (analogicznie jak dla całej linii w zakresie sygnałów o małych częstotliwościach).



rys. 3

Właściwości elektryczne elementu linii opisują równania:

$$-u(x) = L_1 dx \frac{di(x)}{dt} + u(x+dx) \tag{1}$$

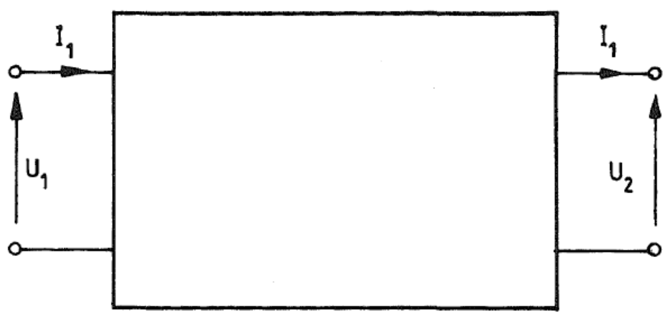
$$i(x) = C_1 dx \frac{du(x+dx)}{dt} + u(x+dx) \tag{2}$$

gdzie L_1 i C_1 są odpowiednio indukcyjnością i pojemnością jednostkową linii długiej (tzn. $[L_1] = 1\frac{H}{m}, [C_1] = 1\frac{F}{m}$).

Po rozwiązaniu powyższego układu równań okazuje się, że linię długą o długości *x* można przedstawić w postaci czwórnika, o elementach macierzy łańcuchowej [B] (rys. 4):

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = [B] \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \cos(\beta x) & iZ_0 \sin(\beta x) \\ i\frac{1}{Z_0}\sin(\beta x) & \cos(\beta x) \end{bmatrix}, \text{ gdzie } \begin{matrix} \beta = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{v} = \omega\sqrt{L_1 C_1} \\ Z_0 = \frac{\omega L_1}{\beta} = \sqrt{\frac{C_1}{L_1}} \end{matrix} \tag{4}$$



rys. 4

Na końcu linii długiej zamkniętej impedancją Z spełniony jest warunek:

$$U_2 = Z I_1 \tag{5}$$

W takiej sytuacji impedancja wejściowa wynosi:

$$Z_{we} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{U_2 cos\beta x + iZ_0 \frac{U_2}{Z} sin\beta x}{i\frac{U_2}{Z_0} sin\beta x + \frac{U_2}{Z} cos\beta x} \tag{6}$$

$$Z_{we} = Z_0 \frac{Z + iZ_0 tg\beta x}{Z_0 + iZ tg\beta x} \tag{7}$$

Napięcie wzdłuż linii (licząc od jej końca) zmienia się zgodnie z równaniem:

$$U(x) = U_2 \left(cos\beta x + i\frac{Z_0}{Z} sin\beta x \right) \tag{8}$$

Fala padająca w odległości x od końca linii wynosi:

$$U_p(x) = U_+ e^{i\beta x} = \frac{U_2\left(1+\frac{Z_0}{Z}\right)}{2} e^{i\beta x} \tag{9}$$

Fala odbita jest opisana równaniem:

$$U_0(x) = U_- e^{-i\beta x} = \frac{U_2\left(1-\frac{Z_0}{Z}\right)}{2} e^{-i\beta x} \tag{10}$$

Do opisu zjawisk zachodzących w linii długiej wygodnie jest posługiwać się pojęciem współczynnika odbicia:

Współczynnikiem odbicia $\Gamma(x)$ nazywa się stosunek:

$$\Gamma(x) = \frac{U_0(x)}{U_p(x)} = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} e^{-i2\beta x} \tag{11}$$

Współczynnik odbicia od końca linii wynosi:

$$\Gamma(0) = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} |\Gamma| e^{-i\varphi} \tag{12}$$

Dla linii zwartej na końcu współczynnik ten wynosi: $\Gamma_{zw}(0) = -1$

Dla linii rozwartej ($|Z|$ →∝): $\Gamma_{roz}(0) = +1$

Dla linii obciążonej elementem o oporności (impedancji) charakterystycznej $Z = Z_0$ współczynnik odbicia jest równy zero: $\Gamma(0) = 0$. W takim przypadku w linii nie występuje dala odbita ($U_- = 0$), a impedancja wejściowa dowolnie długiego odcinka linii obciążonej impedancją Z_0 (nazywa się to stanem dopasowania w linii) wynosi: $Z_{we} = Z_0$.

Przekształcając wzory (3) i (11) otrzymujemy wzór:

$$|U| = U_+(1 + 2|\Gamma| cos(2\beta x + \varphi) + |\Gamma|^2)^{1/2} \tag{13}$$

Jak widać z powyższego równania, napięcie wzdłuż linii zmienia się od wartości U_{min} do U_{max}, gdzie:

$$\begin{gathered} U_{min} = |U_+|(1 - |\Gamma|) \\ U_{max} = |U_+|(1 + |\Gamma|) \end{gathered} \tag{14}$$

Stosunek tych wartości nazywa się **współczynnikiem fali stojącej (WFS)** i oznaczany jest symbolem:

$$\varrho = \frac{|U_{max}|}{|U_{min}|} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \tag{15}$$

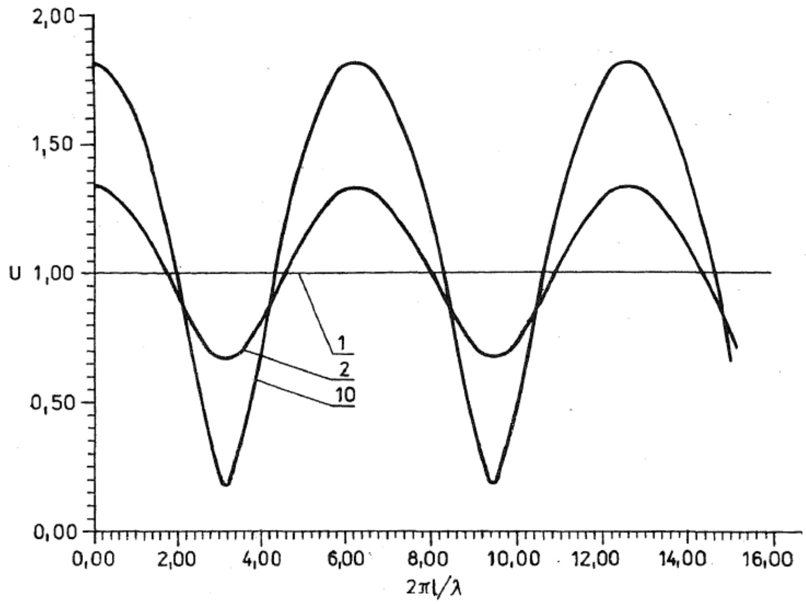
Dla linii bezstratnej Z jest rzeczywiste i współczynnik ten w linii wynosi:

$$\varrho = \begin{cases} \frac{R}{Z_0} \; dla \; R \geq Z_0 \\ \frac{Z_0}{R} \; dla \; R < Z_0 \end{cases} \tag{16}$$

Pomiar wartości współczynnika fali stojącej pozwala więc wnioskować o impedancji obciążenia, a szczegółowe pomiary rozkładu napięcia umożliwiają obliczenie zarówno modułu współczynnika odbicia, jak i jego kąta fazowego φ, a stąd i dokładnej wartości impedancji obciążenia.

W technice z reguły dąży się do uzyskania w linii przesyłowej stanu dopasowania, to znaczy wyeliminowania fali odbitej. W tych warunkach impedancja wejściowa linii równa jest jej impedancji charakterystycznej i nie zależy od długości linii, a amplituda napięcia w każdym punkcie linii jest taka sama

$(\varrho = 1)$ i wynosi $|U| = |U_+|$. Na rys. 5. przedstawiono rozkład napięcia wzdłuż linii dla różnych wartości współczynnika fali stojącej.

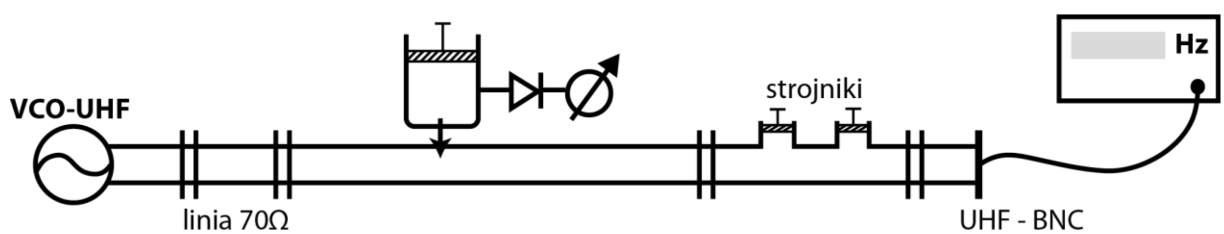


rys. 5

WYKONANIE ĆWICZENIA

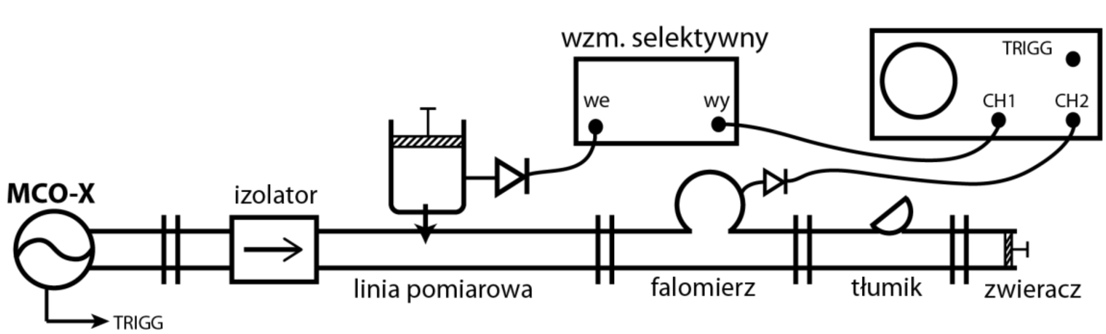
Podczas wykonania ćwiczenia należy dokonać pomiarów w trzech wstępnie zestawionych układach pomiarowych:

a) Układ do pomiaru fal decymetrowych



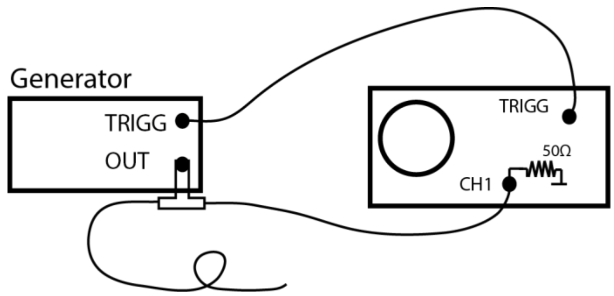
Należy dokonać pomiaru długości fali, częstotliwości oraz ρ (WFS)

b) Układ do pomiaru fal centymetrowych



W układzie należy dokonać pomiaru częstotliwości (korzystając z krzywej cechowania falomierza), długości fali oraz ρ (WFS) dla dwóch nastawień tłumienia.

c) Układ do pomiaru impulsów w liniach długich



W tym ćwiczeniu należy na podstawie pomiaru jednego kabla koncentrycznego wyznaczyć długość drugiego. Aby tego dokonać należy dokonać pomiaru długości krótszego kabla oraz czasu propagacji impulsu w obu liniach.

ZADANIA DO OPRACOWANIA

Na podstawie pomiarów wykonanych podczas zajęć w sprawozdaniu należy wyznaczyć:

a) Układ do pomiaru fal decymetrowych

- prędkość rozchodzenia się fali *v*
- współczynnik odbicia $|\Gamma|$
- straty odbiciowe *RL* [dB]
- straty wtrąceniowe *IL* [dB]

b) Układ do pomiaru fal centymetrowych

- prędkość fazową fali v_f
- prędkość grupową fali v_g
- długość fali odcięcia λ_{kr}
- współczynnik odbicia $|\Gamma|$
- straty odbiciowe *RL* [dB]
- straty wtrąceniowe *IL* [dB]

  (parametry które zmieniły się wraz z tłumieniem należy wyznaczyć dwa razy i je porównać)

c) Układ do pomiaru impulsów w liniach długich

- prędkość propagacji sygnału w kablu koncentrycznym *v*
- względną przenikalność elektryczną ε
- długość drugiego kabla koncentrycznego