

Elektronika w eksperymencie fizycznym		Rok akademicki 2012-2013
Środa 14.15-17.00	Justyna Ilczuk Jacek Rosiński	Wykonane w dniu 3.04.2013
Ćwiczenie 6	Falowody i linie długie	Ocena:

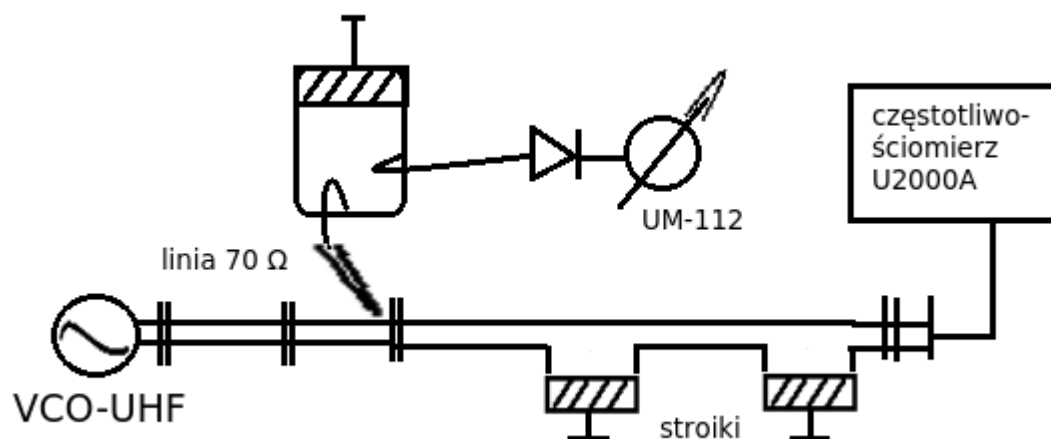
## 1 Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia było: zapoznanie się z transmisją sygnałów elektrycznych w liniach długich i przeprowadzenie pomiarów: długości fali, współczynnika fali stojącej, współczynnika odbicia.

## 2 Użyty sprzęt i układy pomiarowe

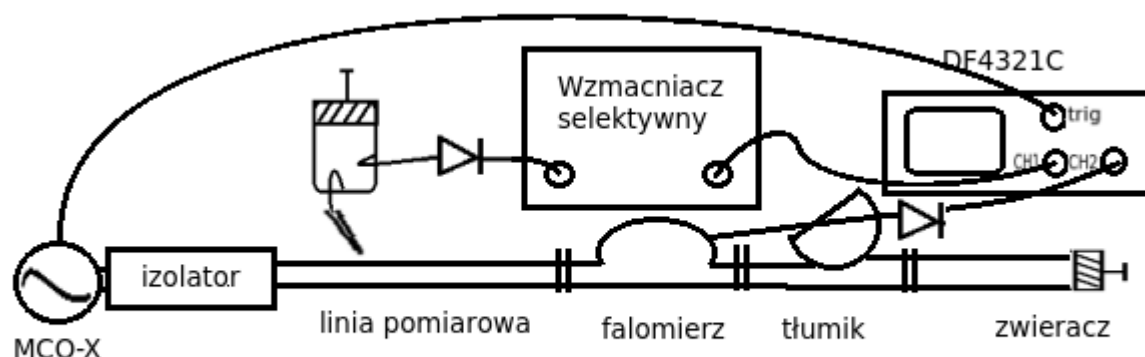
W naszym ćwiczeniu używaliśmy trzech układów pomiarowych.

W części pierwszej mierzyliśmy fale decymetrowe. Najpierw zmierzaliśmy kolejne miejsca, w których wystąpił węzeł fali stojącej, a potem po zmianie obciążenia na końcu linii, zmierzaliśmy wartość maksymalną i minimalną fali. Schemat układu do badania fal decymetrowych przedstawia poniższy rysunek:



VCO-UHF – generator fal decymetrowych. Linia 70  $\Omega$  - odcinek linii dopasowującej. Stroiki umożliwiają całkowite dopasowanie, co w rezultacie daje falę stojącą (w węzłach fali minimalne wartości). Linia pomiarowa składa się z anteny sprzężonej z rezonatorem, elementy te umieszczone są na ruchomej karetki z odpowiednią skalą umożliwiającą pomiar odległości np. między węzłami fali stojącej. Antena poprzez cienki otwór w falowodzie umieszczona jest wewnątrz jego. Układ anteny i rezonatora połączony jest z detektorem, na wyjściu którego mierzone jest napięcie przez miernik UM-112.

W części drugiej mierzyliśmy fale centymetrowe w analogiczny sposób. Tym razem jednak posłużyliśmy się schematem z poniższego rysunku:



MCO-X – generator fal centymetrowych modulowanych przebiegiem prostokątnym o częstotliwości 1kHz Izolator zapewnia tylko jeden kierunek fali zgodny ze strzałką, zapobiega to przesterowaniu generatora. Tłumik – służy do tłumienia fali odbitej, zbudowany jest z układu ruchomych płytek nieprzepuszczalnych dla fal EM. Dzięki takiej budowie możliwa jest płynna regulacja tłumienia.

W części trzeciej ćwiczenia generowaliśmy impuls w linii długiej, sygnał wpuszczaliśmy jednocześnie do oscyloskopu i do długiego kabla bez obciążenia. Sygnał ulegał odbiciu w linii długiej i na oscyloskopie mogliśmy zaobserwować dwa impulsy przesunięte w czasie. W tej części zmierzaliśmy różnice czasów dla dwóch kabli i długość jednego kabla. Schematycznie nasz układ pomiarowy można przedstawić jak na rysunku pod spodem:



DG-4062 – generator krótkich impulsów Linia zwinięta ( linia długa ) – kabel koncentryczny o impedancji charakterystycznej  $50 \Omega$ , rozarty na końcu (rezystancja dopasowująca nieskończona) co powoduje fale odbicie impulsu.

Podsumowując - wykonywaliśmy doświadczenia na falowodach - w tym przypadku prostokątnych będących kompleksowymi zestawami pomiarowymi - i podłączonych do nich miernikach i na kablach reprezentujących linie długie.

Użyte Przyrządy:

- UM 112B
- Miernik cyfrowy DS-1052E
- Oscyloskop DF4321C
- Miarka zwijana 40m
- Częstotliwościomierz U200A

## 3 Wstęp teoretyczny

### 3.1 Właściwości falowe

Klasyczne równanie falowe można zapisać w postaci:

$$\Psi(z, t) = \Psi(z - vt) + \Psi(x + v * t)$$

Prędkość fazową definiuje się przez:

$$v_r = \frac{dz}{dt}$$

Prędkość grupową definiuje się przez:

$$v_g = \frac{d\omega}{dk}$$

W przypadku fal harmoniczych:

bez dyspersji  $\omega = v_0 k \Rightarrow v_f = v_g = v_0$ .

Z dyspersją typu  $\omega^2 = \omega_0^2 + v_0^2 k^2 \Rightarrow v_f v_g = v_0^2$

### 3.2 Falowody

Falowodem nazywamy kanał dielektryczny służący do prowadzenia w przestrzeni fal elektromagnetycznych. Właściwości falowodu zależą od jego geometrii i rodzaju materiałów konstrukcyjnych: dielektryka wypełniającego przewód i przewodzących ścianek.

W falowodach mogą rozchodzić się dwa rodzaje fal:

- fale poprzeczne elektrycznie TE (ang. transverse electric)
- fale poprzeczne magnetycznie TM (ang. transverse magnetic)

Falowód prostokątny. Istnieje wiele rozkładów pola elektrycznego i magnetycznego spełniających równania Maxwella dla falowodu prostokątnego. Rozwiązania te nazywa się modami TEMn, występują powyżej pewnych częstotliwości granicznych.

W przypadku falowodu WR 90 (pasmo X) wymiary wynoszą  $a = 22,86$  mm,  $b = 10,16$  mm.

W praktyce wykorzystuje się najczęściej mod podstawowy  $TE_{01}$  występujący powyżej częstotliwości granicznej  $f_{kr} = \frac{c}{2a}$ , co odpowiada fali o długości  $\lambda_{kr} = \frac{c}{f_{kr}} = 2a$ . Używanie więcej niż jednego modu na raz niezwykle komplikowałoby na przykład dekodowanie sygnałów.

Prędkość fazowa fali elektromagnetycznej w falowodzie prostokątnym jest prędkością czoła fali wzdłuż rury. Porusza się ono szybciej niż sama fala i wynosi:

$$v_f = \frac{\omega}{k} = \lambda_f f = \frac{v_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{kr}}\right)^2}} < v_0$$

Energia jest jednak przenoszona przez falę z prędkością grupową, która wynosi:

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{kr}}\right)^2} > v_0$$

Długość fali elektromagnetycznej  $\lambda_0$  rozprzestrzeniającej się w falowodzie, długość fali stojącej  $\lambda_f$  oraz krytyczna długość fali  $\lambda_{kr}$  łączą się wzorem:

$$\lambda_f = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{kr}}\right)^2}}$$

Występują następujące zależności pomiędzy mocami fal rozchodzących się w falowodzie:

$P_{in}$  – moc fali padającej

$P_R$  – moc fali odbitej

$P_L$  – moc tracona w odbiorniku

$P_{in} = P_R + P_L$

### 3.3 Linie długie - układy o stałych rozłożonych

W przypadku linii długich, np. gdy długości przewodu współosiowego są porównywalne z długością fali odpowiadającą częstotliwości podstawowej przekazywanego sygnału, nie możliwy jest opis zakładający, że sygnał rozchodzi się z nieskończoną prędkością. Do opisu takiej linii stosuje się układy o stałych rozłożonych. Polega to na tym, że przedstawia się linię jako bardzo krótkie segmenty przewodu, połączone ze sobą. Każdy segment charakteryzuje się przez pojemność dC i indukcyjność dL (w przypadku linii bezstratnej, do opisu linii stratnej dodatkowo dochodzi oporność dR)

## 4 Wyniki pomiarów

### 4.1 Fale decymetrowe

Wartości zmierzone lub znane:

odległości kolejnych węzłów fali stojącej:

x [mm]
165.6
314
459

$$f = 1016.31 \pm 0.02 MHz$$

$$a = 22.86 mm$$

$$U_{max} = 0.075 \pm 0.2 V, U_{min} = 5.4 \pm 0.2 V$$

Wartości wyliczone:

$$\lambda = 293.4 \pm 4 mm$$

$$\rho = 4.41 \pm 0.26$$

$$v = 2.98 \pm 0.04 * 10^8 \frac{m}{s}$$

$$\Gamma = 0.63 \pm 0.02$$

$$\frac{P_r}{P_{in}} = 0.40 \pm 0.03$$

$$\frac{P_r}{P_{in}} \approx 40\%$$

$$\frac{P_L}{P_{in}} = 0.60 \pm 0.03$$

$$\frac{P_L}{P_{in}} \approx 60\%$$

## 4.2 Fale centymetrowe

Wartości zmierzone lub znane:

odległości kolejnych węzłów fali stojącej:

x [mm]
150
172
194
215
237

$$f = 9502 \pm 2 MHz$$

$$a = 22.86 mm$$

$$U_{max} = 5.4 \pm 0.2 mV, U_{min} = 5.4 \pm 0.2 mV$$

Wartości wyliczone:

$$\lambda = 43.5 \pm 2.9 mm$$

$$\rho = 7.71 \pm 2.3$$

$$v = 4.13 \pm 0.27 * 10^8 \frac{m}{s}$$

$$\Gamma = 0.77 \pm 0.06$$

$$\frac{P_r}{P_{in}} = 0.59 \pm 0.09$$

$$\frac{P_r}{P_{in}} \approx 60\%$$

$$\frac{P_L}{P_{in}} = 0.41 \pm 0.09$$

$$\frac{P_L}{P_{in}} \approx 40\%$$

$$\lambda_{kr} = 0.046 m$$

$$\begin{aligned}\lambda_0 &= 0.032m \\ \lambda_f &= 0.044m \\ v_f &= 4.14 \cdot 10^8 \frac{m}{s} \\ v_g &= 2.17 \cdot 10^8 \frac{m}{s}\end{aligned}$$

### 4.3 Linie długie

Wartości zmierzone lub znane:

Dla pierwszej serii pomiarów:

$$\begin{aligned}l_1 &= 16.4 \pm 0.1m \\ t &= 168 \pm 11ns \\ t_x &= 402 \pm 11ns \\ c &= 299792458 \frac{m}{s}\end{aligned}$$

Wartości obliczone:

prędkość rozchodzenia się impulsu:  $V = 0.20 \pm 0.02 \frac{m}{ns}$

Długość nieznanego kabla:  $l_2 = 39.3 \pm 2.7m$

Względna przenikalność elektryczna próżni:  $\epsilon = 2.4 \pm 0.3$

## 5 Dyskusja niepewności

Niepewności zostały wyliczone na podstawie instrukcji dołączonych do przyrządów pomiarowych oraz zasad propagacji niepewności.

Dla przykładu kilka źródeł niepewności w pomiarach i ich wielkości:

- w pomiarze długości fali w części pierwszej i drugiej mieliśmy do czynienia z mierzeniem długości przyrządem o podziałce milimetrowej z noniusem, który pozwalał na dokładniejszy odczyt, ale którego nie używaliśmy ze względu na to, że ciężko było dokładnie znaleźć węzły. Jako niepewność pojedynczego takiego pomiaru przyjęliśmy 2 mm.
- używając do pomiaru napięcia miernika UM 112 B z instrukcji odczytaliśmy klasę przyrządu i znając zakres na jakim dokonywaliśmy pomiary, obliczyliśmy niepewności.
- podczas pomiaru czasu na DS-10552E również stosowaliśmy się do uwag producenta.

$$\Delta t = (\text{odstęp próbek}) + 50 \cdot 10^{-6} \cdot \text{odczyt} + 0.5ns = (10 + 50 \cdot 10^{-6} \cdot 168 + 0.5)ns = 10.6ns$$

- przy pomiarze napięcia Oscyloskopem DF4321C, niepewność przyjęta przez nas to najmniejsza podziałka, czyli 1/5 zakresu na jakim dokonywaliśmy pomiaru.
- niepewności wyznaczanych przez nas wartości były liczone poprzez sumowanie pod pierwiastkiem kwadratów pochodnych danych przyczynków do błędu przemnożonych przez niepewność tych przyczynków. Czyli na przykład (już po przekształceniach):

$$\Delta\rho = \rho \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta U_{max}}{U_{max}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_{min}}{U_{min}}\right)^2}$$

Wszystkie obliczone i zmierzone wartości w tym sprawozdaniu mają policzone niepewności pomiarowe i zamieszczone obok wartości, jeśli było możliwe ich obliczenie. Przykładem wartości bez niepewności jest jeden z parametrów falowodu:  $a$ , który został podany nam przez prowadzącego.

Niepewności pomiarowe w większości przypadków nie były szczególnie duże, wynosiły mniej niż 10% wartości.

Jedną z największych niepewności spośród wyliczonych przez nas wartości ma:  $\rho = 7.71 \pm 2.2$  (pomiar decymetrowy) która wynosi  $\approx 29\%$ .

To bardzo duża niepewność, ale bardzo łatwo wyśledzić jej źródło: niepewność pomiaru napięcia minimalnego na oscyloskopie:  $U_{min} = 5.4 \pm 0.2mV$

## 6 Wnioski

### 6.1 Fale decymetrowe

- wyznaczona przez nas prędkość fali elektromagnetycznej jest większa od prędkości światła w próżni
- wartość współczynnika  $\Gamma$  wskazuje na niedopasowanie

### 6.2 Fale centymetrowe

- prędkość fali rozchodzącej się w falowodzie jest w ramach niepewności pomiarowych równa prędkości światła
- wartość współczynnika odbicia  $\Gamma$  wskazuje, że nie pracowaliśmy w stanie pełnego dopasowania. Jest to w pełni zrozumiałe, bo przed jego zmierzeniem użyliśmy stroików do uzyskania takiego stanu.
- badane fale centymetrowe należą do pasma mikrofal

### 6.3 Linie długie

- metoda wykorzystywana przy pomiarze nieznannej długości może być skutecznie stosowana do znajdowania uszkodzeń kabli koncentrycznych
- niepewność pomiarowa długości kabla wynika głównie z niedokładności pomiaru czasu
- wnioskujemy na podstawie wyznaczonej wartości przenikalności elektrycznej względnej izolatora, że może on być wykonany z polietylenu ( $\epsilon \approx 2,6$ ).

## 6.4 Podsumowanie

Pomiary zostały wykonane wystarczająco dokładnie, by niepewności pomiarowe nie przyjęły zbyt dużych wartości uniemożliwiających rzeczową ocenę wyników.

Wyniki pomiarów pokrywają się z naszymi oczekiwaniami i wyliczeniami teoretycznymi.