

Uniwersytet Warszawski
Wydział Fizyki

Marysia Nazarczuk

Nr albumu: 417755

KABEL KONCENTRYCZNY

Streszczenie

W doświadczeniu użyliśmy kabli o oporach $75\ \Omega$. Celem doświadczenia było zbadanie impedancji kabla koncentrycznego ($Z_{\text{dobry}} = (76.19 \pm 1.76)\ [\Omega]$ i $Z_{\text{zły } 75\ \Omega} = (88.18 \pm 2.06)\ [\Omega]$) oraz prędkości rozchodzenia się impulsu ($v_{\text{dobry}} = (2.02 \pm 0.03) \cdot 10^8\ [\frac{m}{s}]$ i $v_{\text{zły}} = (2.56 \pm 0.01) \cdot 10^8\ [\frac{m}{s}]$). Przy pomiarach wykorzystamy zjawisko odbicia w kablu. Na podstawie wyników wyznaczyliśmy wartości pojemności $c_{\text{dobry}} = (67.71 \pm 0.11)\ [\frac{pF}{m}]$ i $c_{\text{zły}} = (44.34 \pm 0.26)\ [\frac{pF}{m}]$ oraz indukcyjności liniowej $l_{\text{dobry}} = (393 \pm 9)\ [\frac{\mu H}{m}]$ i $l_{\text{zły}} = (345 \pm 11)\ [\frac{\mu H}{m}]$. Praca została przygotowana zgodnie z instrukcją [1]

Spis treści

1. Wstęp teoretyczny	5
2. Wyznaczeniu prędkości propagacji prądu	7
2.1 Układ doświadczalny	7
2.2 Przeprowadzenie doświadczenia	7
2.2.1 Pomiar czasu propagacji sygnału dla kabla dobrego	8
2.2.2 Pomiar czasu propagacji sygnału dla kabla złego	8
2.3 Analiza pomiarów	8
2.4 Wyniki, niepewności, wnioski	9
2.4.1 Wyniki	9
2.4.2 Niepewności	9
2.4.3 Wnioski	10
3. Wyznaczeniu napięcia w kablu koncentrycznym	11
3.1 Układ doświadczalny	11
3.2 Przeprowadzenie doświadczenia	11
3.2.1 Pomiar amplitudy fali odbitej dla kabla dobrego i dla kabla złego	12
3.3 Analiza pomiarów	12
3.4 Wyniki, niepewności, wnioski	13
3.4.1 Wyniki	13
3.4.2 Niepewności	14
3.4.3 Wnioski	14
4. Podsumowanie	15
Bibliografia	17

1. Wstęp teoretyczny

Kiedy kabel koncentryczny jest podłączony do źródła szybko zmieniającego się napięcia przemiennego, powstaje rozkład napięć i prądów wzdłuż jego długości. Ten rozkład można opisać równaniem falowym:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = lc \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \quad (1.1)$$

gdzie U oznacza napięcie między przewodem wewnętrznym a ekranem w funkcji położenia x i czasu t , l to indukcyjność na jednostkę długości kabla, a c to pojemność na jednostkę długości. Równanie to opisuje falę poruszającą się z prędkością

$$v = \frac{1}{\sqrt{lc}} \quad (1.2)$$

Ponieważ chwilowe wartości napięcia i prądu w kablu propagują się jak fala, zjawisko odbicia fali od przeszkody, takiej jak rezystor, ma na nie wpływ. Amplituda fali odbitej U_1 jest opisana wzorem

$$U_1 = U_0 \cdot \frac{R_L - Z}{R_L + Z} \quad (1.3)$$

gdzie U_0 to amplituda fali padającej, Z to impedancja falowa kabla, a R_L to rezystancja obciążenia na końcu kabla. Z równania tego wynika, że fala odbita zanika, gdy $R_L = Z$. Impedancja falowa kabla jest opisana zależnością

$$Z = \sqrt{\frac{l}{c}} \quad (1.4)$$

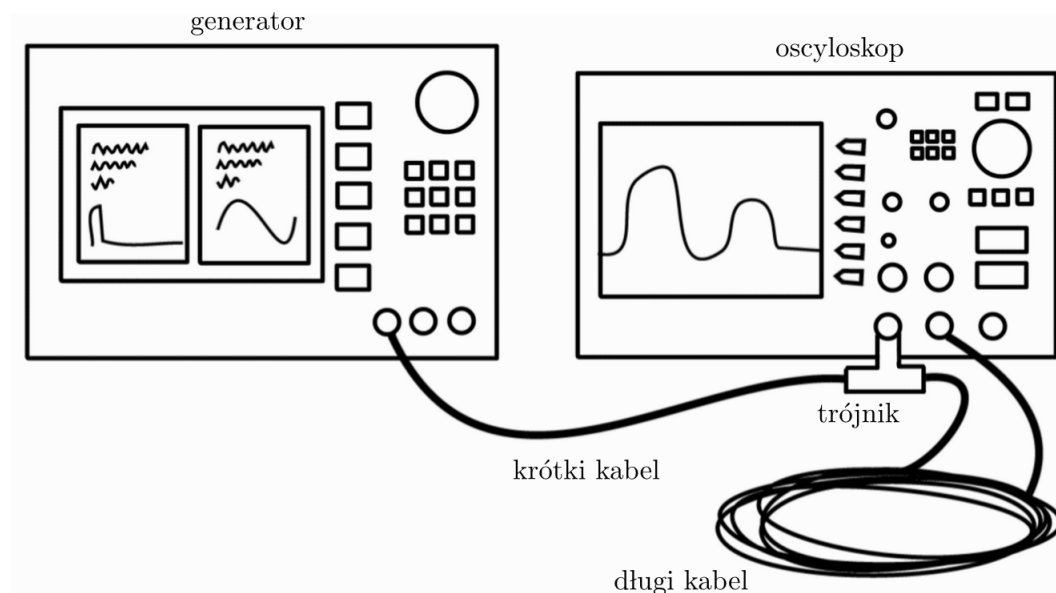
Znając prędkość propagacji impulsu w kablu i jego impedancję falową, można obliczyć indukcyjność i pojemność kabla na jednostkę długości.

2. Wyznaczeniu prędkości propagacji prądu

Pomiary dzielimy na dwie części. Pierwsza z nich posłuży wyznaczeniu prędkości propagacji prądu i napięcia w kablu koncentrycznym.

2.1. Układ doświadczalny

Poniżej znajduje się układ doświadczalny dla danego eksperymentu. Wykorzystując trójnik łączymy wyjście generatora krótkim kablem koncentrycznym z 1. kanałem oscyloskopu oraz 1. kanał oscyloskopu łączymy długim kablem z 2. kanałem oscyloskopu.



Rysunek 2.1: Układ doświadczalny służący do wyznaczenia prędkości propagacji

2.2. Przeprowadzenie doświadczenia

Przeprowadzono pomiary dla kabla "dobrego", o oporności znamionowej 75Ω oraz dla kabla "złego", o oporności znamionowej 75Ω . Dla każdego kabla badano dla różnych długości wartości czasu propagacji impulsu. Na każdym kablu była napisana jego długość w metrach, trudno jest więc określić niepewność długości kabla. Możemy uznać, że jest to wartość $u(L) = 0.1$ m. Niepewność wyznaczenia czasu propagacji jest różna dla każdego pomiaru i została zapisana w tabeli.

Otrzymano dwie serie pomiarów czasu propagacji impulsu, po jednej dla każdego kabla. Każda seria składała się z dziesięciu punktów pomiarowych – pięć dla impulsu z generatora oraz pięć dla impulsu odbitego.



Rysunek 2.2: Zdjęcie ekranu oscyloskopu wykonane w trakcie pomiarów

2.2.1. Pomiar czasu propagacji sygnału dla kabla dobrego

Tabela 2.1: Impuls z generatora

Długość kabla [m]	Czas propagacji [ns]
25	130 ± 3
50	256 ± 3
75	390 ± 4
100	504 ± 4
125	652 ± 6

Tabela 2.2: Impuls odbity

Długość kabla [m]	Czas propagacji [ns]
50	254 ± 4
100	500 ± 4
150	768 ± 3
200	1000 ± 4
250	1270 ± 5

2.2.2. Pomiar czasu propagacji sygnału dla kabla złego

Tabela 2.3: Impuls z generatora

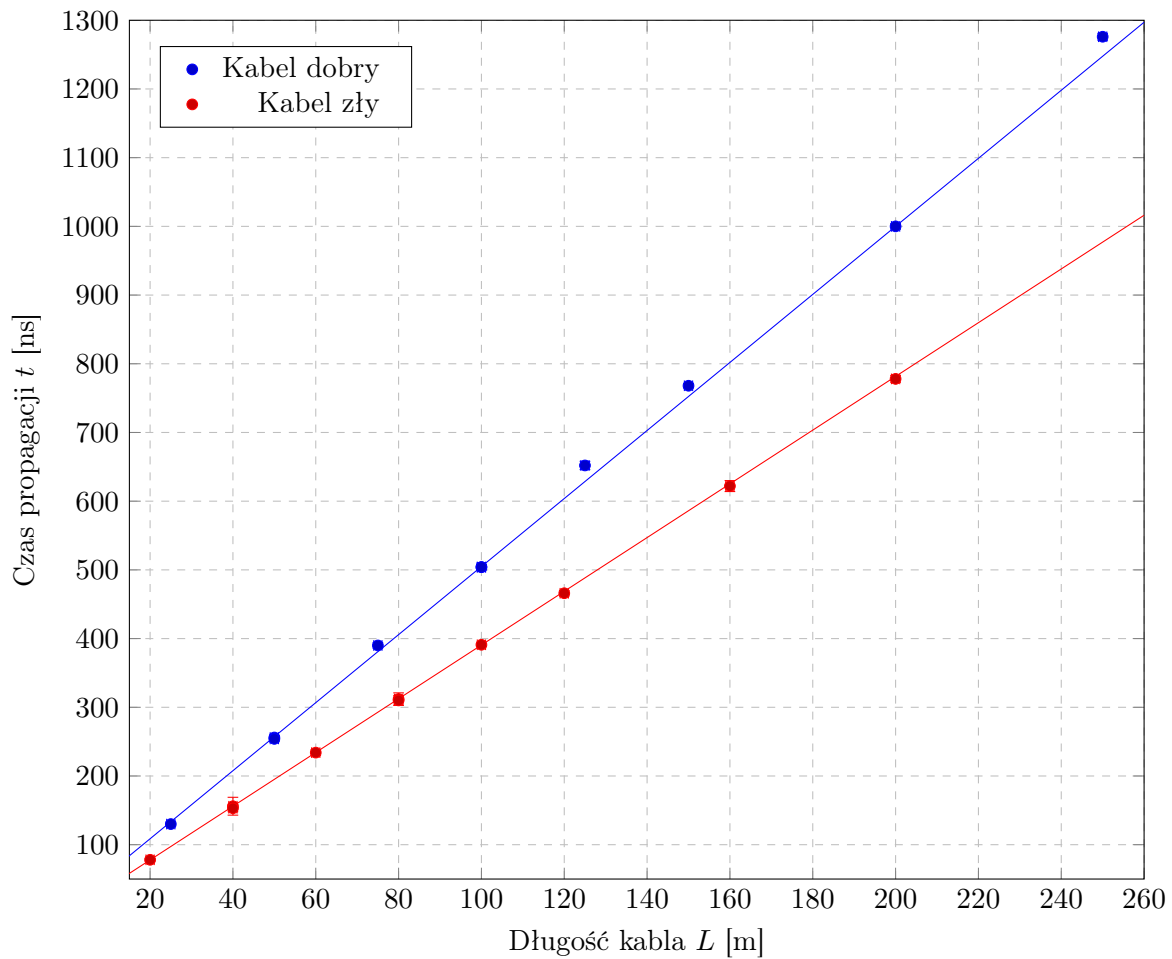
Długość kabla [m]	Czas propagacji [ns]
20	78 ± 2
40	156 ± 13
60	234 ± 4
80	312 ± 9
100	391 ± 2

Tabela 2.4: Impuls odbity

Długość kabla [m]	Czas propagacji [ns]
40	153 ± 5
80	310 ± 7
130	466 ± 4
160	622 ± 8
200	778 ± 5

2.3. Analiza pomiarów

Przy założeniu stałej prędkości propagacji, czas potrzebny na przejście impulsu przez przewód opisano jako $t = \frac{L}{v}$, co jest zależnością liniową z stałą nachylenia równą $\frac{1}{v}$.



Rysunek 2.3: Wykres zależności czasu propagacji impulsu od długości kabla

Korzystając z metody najmniejszych kwadratów uzyskujemy dla kabla dobrego

$$v_{\text{dobry}} = (2.02 \pm 0.03) \cdot 10^8 \left[\frac{m}{s} \right] \quad (2.1)$$

oraz dla kabla złego

$$v_{\text{zły}} = (2.56 \pm 0.01) \cdot 10^8 \left[\frac{m}{s} \right] \quad (2.2)$$

2.4. Wyniki, niepewności, wnioski

2.4.1. Wyniki

Uzyskaliśmy prędkość propagacji

- Kabla dobrego $v_{\text{dobry}} = (2.02 \pm 0.03) \cdot 10^8 \left[\frac{m}{s} \right]$
- Kabla złego $v_{\text{zły}} = (2.56 \pm 0.01) \cdot 10^8 \left[\frac{m}{s} \right]$

2.4.2. Niepewności

Główną przyczyną niepewności jest niedokładność ustawienia kursora w odpowiednich punktach na wykresie oscyloskopu. Innym ważnym czynnikiem są zakłócenia, które dodatkowo utrudniają dokładne ustawienie kursora. Niezerowy wyraz wolny wyznaczony podczas dopasowania prostej sugeruje wpływ czasu przepływu sygnału przez oscyloskop, który jednak nie jest ujęty w analizie błędów.

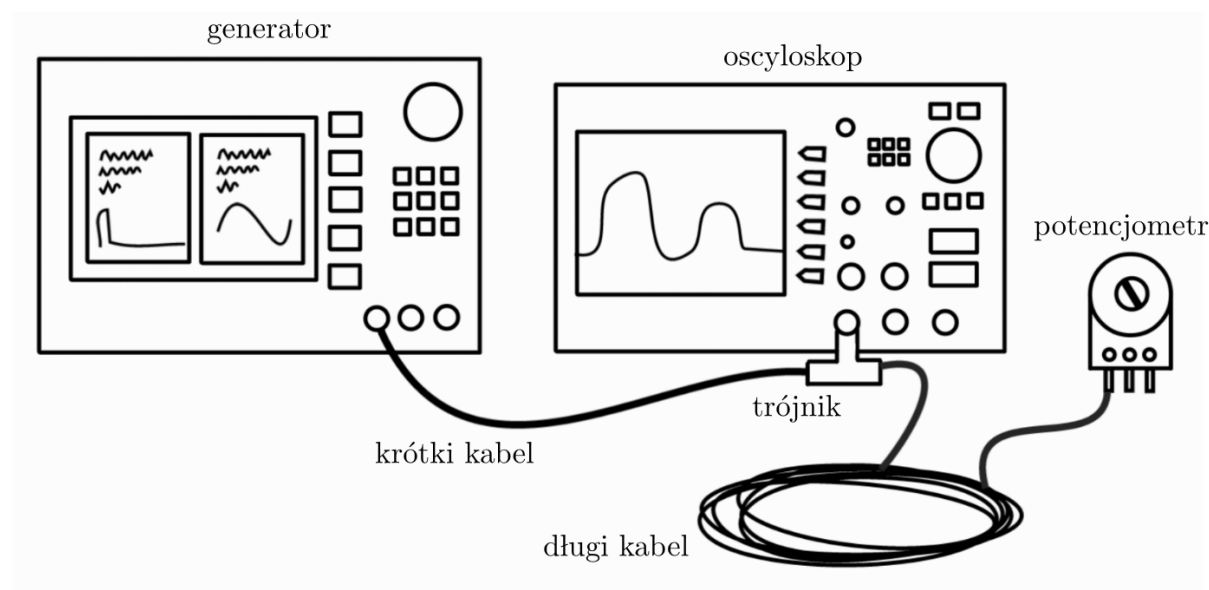
2.4.3. Wnioski

Uzyskaliśmy większą wartość impulsu dla kabla złego niż kabla dobrego, co zgodne jest z oczekiwaniami. Jednak przy zbliżonych wartościach impedancji powoduje to większe wartości indukcyjności i pojemności, co przyczynia się do mniejszego tłumienia sygnału. Tłumienie to nie jest uwzględnione w przyjętym tu modelu teoretycznym.

3. Wyznaczeniu napięcia w kablu koncentrycznym

3.1. Układ doświadczalny

Poniżej znajduje się układ doświadczalny dla danego eksperymentu. Wykorzystując trójnik łączymy wyjście generatora krótkim kablem koncentrycznym z 1. kanałem oscyloskopu oraz 1. kanał oscyloskopu łączymy długim kablem potencjometrem.

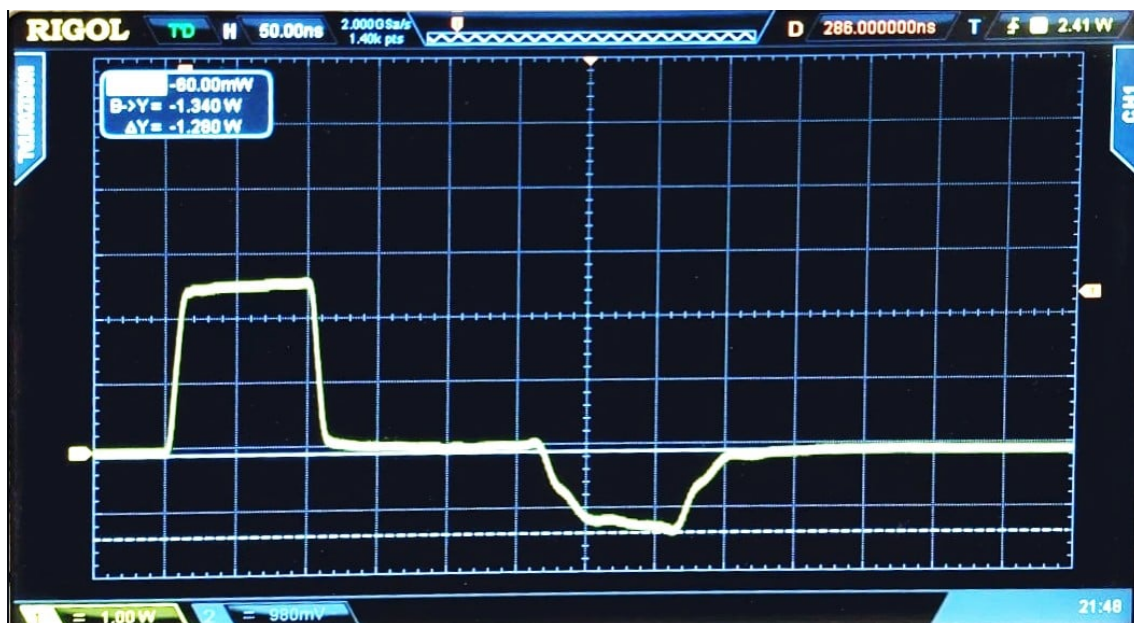


Rysunek 3.1: Układ doświadczalny służący do wyznaczenia impedancji kabla

3.2. Przeprowadzenie doświadczenia

Przeprowadzono pomiary dla kabla "dobrego", o oporności znamionowej $75\ \Omega$ oraz dla kabla "złego", o oporności znamionowej $50\ \Omega$. Wartość niepewności pomiaru rezystancji potencjometru wynosi $u(R) = 0.2\ \Omega$, zaś wartość niepewności pomiaru amplitudy opisana jest w tabelach.

Przeprowadzono dwie serie pomiarów amplitudy fali odbitej, po jednej dla każdego rodzaju kabla. Każda seria zawierała piętnaście punktów pomiarowych – dla amplitud dodatnich i dla amplitud ujemnych.



Rysunek 3.2: Zdjęcie ekranu oscyloskopu wykonane w trakcie pomiarów

3.2.1. Pomiar amplitudy fali odbitej dla kabla dobrego i dla kabla złego

Tabela 3.1: Kabel dobry

Opór [Ω]	Amplituda [mV]
0.0	-2040 ± 20
5.3	-2080 ± 20
13.4	-1660 ± 30
20.8	-1350 ± 30
30.1	-1010 ± 20
39.6	-740 ± 40
48.0	-510 ± 40
66.3	-130 ± 20
75.2	0 ± 60
87.0	170 ± 20
100.8	340 ± 20
150.4	770 ± 30
228.1	1110 ± 30
388.4	1550 ± 40
512.7	1740 ± 30

Tabela 3.2: Kabel zły

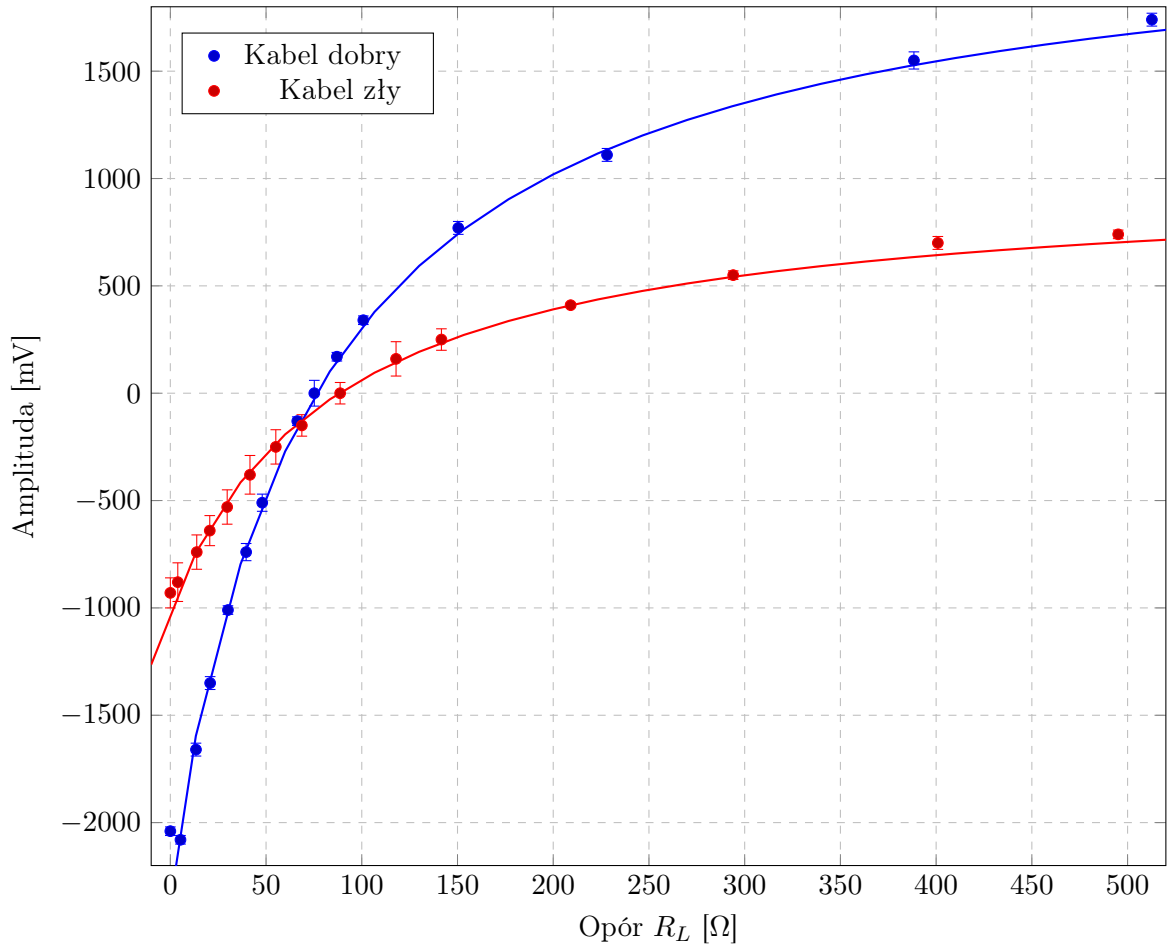
Opór [Ω]	Amplituda [mV]
0.0	-930 ± 70
3.9	-880 ± 90
13.8	-740 ± 80
20.6	-640 ± 70
29.7	-530 ± 80
41.6	-380 ± 90
55.1	-250 ± 80
68.7	-150 ± 50
88.7	0 ± 50
117.9	160 ± 80
141.6	250 ± 50
209.1	410 ± 10
294.0	550 ± 20
400.9	700 ± 30
495.1	740 ± 20

3.3. Analiza pomiarów

Dla zebranych danych, dopasowano funkcję

$$U_1(R_L) = U_0 \cdot \frac{R_L - Z}{R_L + Z} \quad (3.1)$$

Wartość U_0 była parametrem dopasowania. Jako zmienną niezależną wybrano opór, gdyż względna niepewność pomiaru oporu była mniejsza niż względna niepewność pomiaru amplitudy.



Rysunek 3.3: Wykres zależności amplitudy fali odbitej od oporu R_L

Szukana impedancja falowa kabla Z jest, punktem przecięcia wykresu z prostą $U_1 = 0$. Otrzymujemy dla kabla dobrego

$$Z_{\text{dobry}} = (76.19 \pm 1.76) [\Omega] \quad (3.2)$$

oraz dla kabla złego

$$Z_{\text{zły}} = (88.18 \pm 2.06) [\Omega] \quad (3.3)$$

Liczymy indukcyjność i pojemność na jednostkę długości. Otrzymujemy indukcyjność dla kabla dobrego

$$l_{\text{dobry}} = (393 \pm 9) \left[\frac{\mu\text{H}}{\text{m}} \right] \quad (3.4)$$

oraz dla kabla złego

$$l_{\text{zły}} = (345 \pm 11) \left[\frac{\mu\text{H}}{\text{m}} \right] \quad (3.5)$$

Otrzymujemy pojemność dla kabla dobrego

$$c_{\text{dobry}} = (67.71 \pm 0.11) \left[\frac{\text{pF}}{\text{m}} \right] \quad (3.6)$$

oraz dla kabla złego

$$c_{\text{zły}} = (44.34 \pm 0.26) \left[\frac{\text{pF}}{\text{m}} \right] \quad (3.7)$$

3.4. Wyniki, niepewności, wnioski

3.4.1. Wyniki

Uzyskaliśmy impedancje

- Kabla dobrego $Z_{\text{dobry}} = (76.19 \pm 1.76) [\Omega]$
- Kabla złego $Z_{\text{zły}} = (88.18 \pm 2.06) [\Omega]$

indukcyjności

- Kabla dobrego $l_{\text{dobry}} = (393 \pm 9) \left[\frac{\mu\text{H}}{\text{m}} \right]$
- Kabla złego $l_{\text{zły}} = (345 \pm 11) \left[\frac{\mu\text{H}}{\text{m}} \right]$

oraz pojemności

- Kabla dobrego $c_{\text{dobry}} = (67.71 \pm 0.11) \left[\frac{\text{pF}}{\text{m}} \right]$
- Kabla złego $c_{\text{zły}} = (44.34 \pm 0.26) \left[\frac{\text{pF}}{\text{m}} \right]$

3.4.2. Niepewności

Główną przyczyną niepewności jest niedokładność ustawienia kursora w odpowiednich punktach na wykresie oscyloskopu. Innym ważnym czynnikiem są zakłócenia, które dodatkowo utrudniają dokładne ustawienie kursora.

3.4.3. Wnioski

Uzyskane wyniki są zgodne z oczekiwaniami, zwłaszcza to, że wyznaczona impedancja kabla dobrego jest bardziej zbliżona do nominalnej niż w przypadku kabla złego.

4. Podsumowanie

W doświadczeniu wyznaczono różne własności kabli koncentrycznych. Zebrane wyniki zostały umieszczone w tabeli 4.1.

Tabela 4.1: Wyniki

	Dobry	Zły	Jednostka
v	$(2.02 \pm 0.03) \cdot 10^8$	$(2.56 \pm 0.01) \cdot 10^8$	$\frac{m}{s}$
Z	76.19 ± 1.76	88.18 ± 2.06	Ω
l	393 ± 9	345 ± 11	$\frac{\mu H}{m}$
c	67.71 ± 0.11	44.34 ± 0.26	$\frac{pF}{m}$

Pomimo zaobserwowanej rozbieżności przyjętego modelu teoretycznego z wynikami pomiarów, uzyskane wartości prędkości fali i impedancji są zgodne z oczekiwanymi. Zmierzona impedancja jest prawie równa nominalnej wartości dla kabla dobrego oraz nieznacznie (rzędu wielkości jest w porządku) większa od nominalnej.

Wszelkie rachunki przeprowadziłam ręcznie, posługując się jedynie kalkulatorem prostym oraz arkuszem kalkulacyjnym Google. Na każdym etapie obliczeń zaokrąślałam wynik do dwóch miejsc znaczących. Ostateczne wyniki sprawdziłam przy użyciu programów napisanych w Pythonie i na podstawie tych wyników dopasowałam krzywą do danych na wykresach. Do szacowania niepewności pomiarowych użyłam metody obliczania niepewności pomiarowej za pomocą pierwiastków elementów na diagonalu macierzy kowariancji, a także oszacowałam błędy za pomocą propagacji małych błędów.

Bibliografia

[1] Piotr Fita. Instrukcja do zadania - kabel koncentryczny, 02.03.2023.