

Ćwiczenie: A5

Tytuł ćwiczenia: Mikrofale

I. Cel ćwiczenia

Podczas wykonania ćwiczenia student zdobędzie wiedzę z zakresu mikrofal oraz metod ich generacji, przesyłania i detekcji. Nabędzie także umiejętności obsługi aparatury takiej jak: generator mikrofalowy, linia Lechera, regulowana wnęka mikrofalowa oraz pozna metodę wyznaczania częstości mikrofal i dobroci wnęki mikrofalowej.

II. Zakres ćwiczenia (zadania do wykonania)

1. Pomiar długości mikrofal za pomocą linii Lechera.
2. Sporządzenie krzywej cechowania wnęki rezonansowej czyli zależności położenia śruby przestrajania wnęki od częstości mikrofal we wnęcie.
3. Sporządzenie krzywej rezonansowej wnęki.
4. Wyznaczenie dobroci przestrajalnej wnęki rezonansowej.

III. Zagadnienia do kolokwium

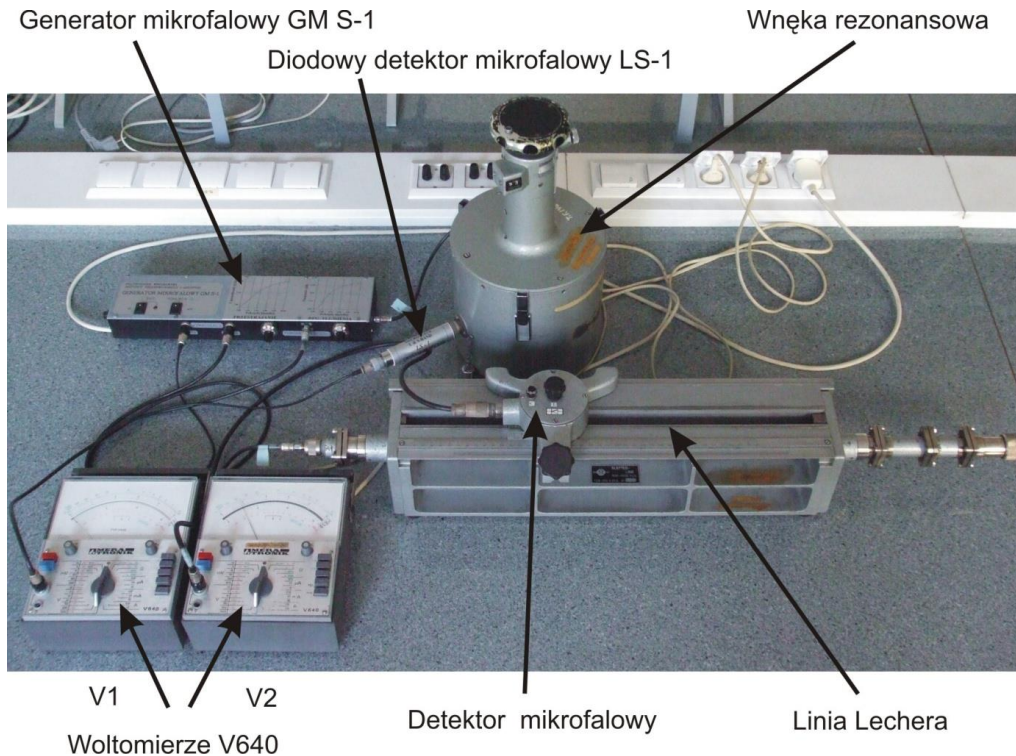
1. Równania Maxwella [1,5,7,11]
2. Własności fal elektromagnetycznych w zakresie mikrofalowym [5,10]
3. Propagacja fal elektromagnetycznych:
 - a) przesyłanie fal liniami i falowodami cylindrycznymi i prostokątnymi [2,5,6,7,11,12],
 - b) linia Lechera [10, 4, 6, 7],
 - c) prostopadłościenną, cylindryczną wnęką rezonansową i ich dobroć [2, 5, 11, 7, 12].
4. Generacja i detekcja mikrofal:
 - a) zasada działania klustronu [10, 4, 11, 7, 12]
 - b) mikrofalowe diody generacyjne Gunna [7, 9, 12]
 - c) diodowe detektory mikrofalowe [7, 9, 12].

IV. Opis urządzeń i przyrządów używanych w eksperymencie

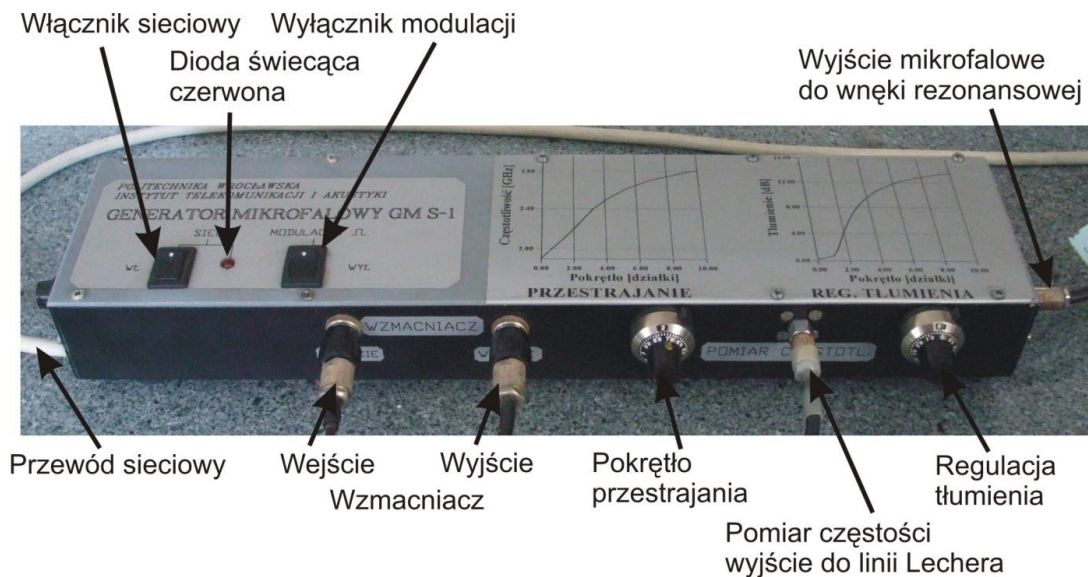
Wykaz aparatury pomiarowej:

1. Generator mikrofalowy GM S-1 z dzielnikiem mocy, tłumikiem mikrofalowym, modulatorem oscylatora mikrofalowego i wzmacniaczem. Schematy szczegółowe elementów składowych generatora znajdują się w osobnej instrukcji.
2. Linia Lechera z detektorem mikrofalowym.
3. Przestrajalna cylindryczna wnęka rezonansowa na zakres mikrofalowy 2,29÷2,58 GHz (60÷30 działek).
4. Diodowy detektor mikrofalowy LS-1.
5. Dwa woltomierze V640 (V1 i V2).

Zestawiony układ do badania mikrofal przedstawia Rys. 1.



Rys. 1. Prawidłowo połączony zestaw pomiarowy przygotowany do pracy



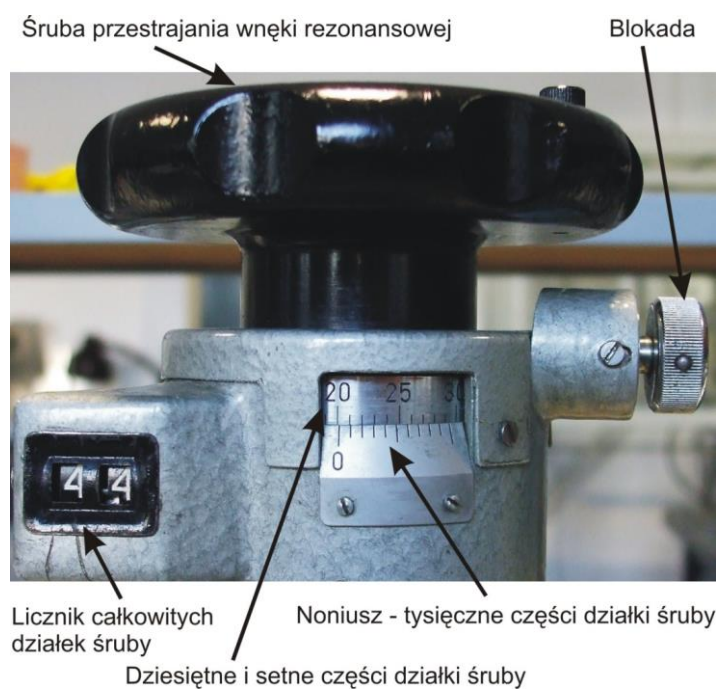
Rys. 2. Generator mikrofalowy GM S-1

Obsługa generatora. Przed włączeniem wtyczki przewodu sieciowego do sieci, należy upewnić się czy pokrętło **Reg. Tłumienia** jest ustawione w położeniu 6,00 działek. Następnie włącznikiem sieciowym **WŁ** włącza się generator mikrofalowy (część przycisku oznaczona białą kropką wciśnięta do dołu). Stan włączenia pokazuje świecenie się czerwonej diody obok włącznika sieciowego (Rys. 2). Przyciskiem modułacji **WYŁ** włącza się modulację wciskając przełącznik z białą kropką do dołu. Zmniejszenie tłumienia przy pomocy pokrętła **Reg. Tłumienia** do 0,8 i regulacja pokrętłem **Przestrojanie** pozwala dostroić generator do częstości rezonansowej dla zadanych ustawień wężki rezonansowej.

Obsługa wnęki rezonansowej. Przygotowanie wnęki rezonansowej do pracy polega na zdjęciu pokrywy wnęki po odpięciu zapinek (widocznych na Rys. 3) i odblokowaniu obrotów **śruby przestrajania wnęki** przez odciągnięcie blokady (Rys. 4). Obracanie **śruby przestrajania wnęki** powoduje przesuwanie się ruchomego denka i zmianę jej wymiaru, a tym samym częstości rezonansowej wnęki. Wielkość wnęki charakteryzowana jest przez położenie śruby odczytywanej z dokładnością do tysięcznych części skali z noniusem, Rys. 4.

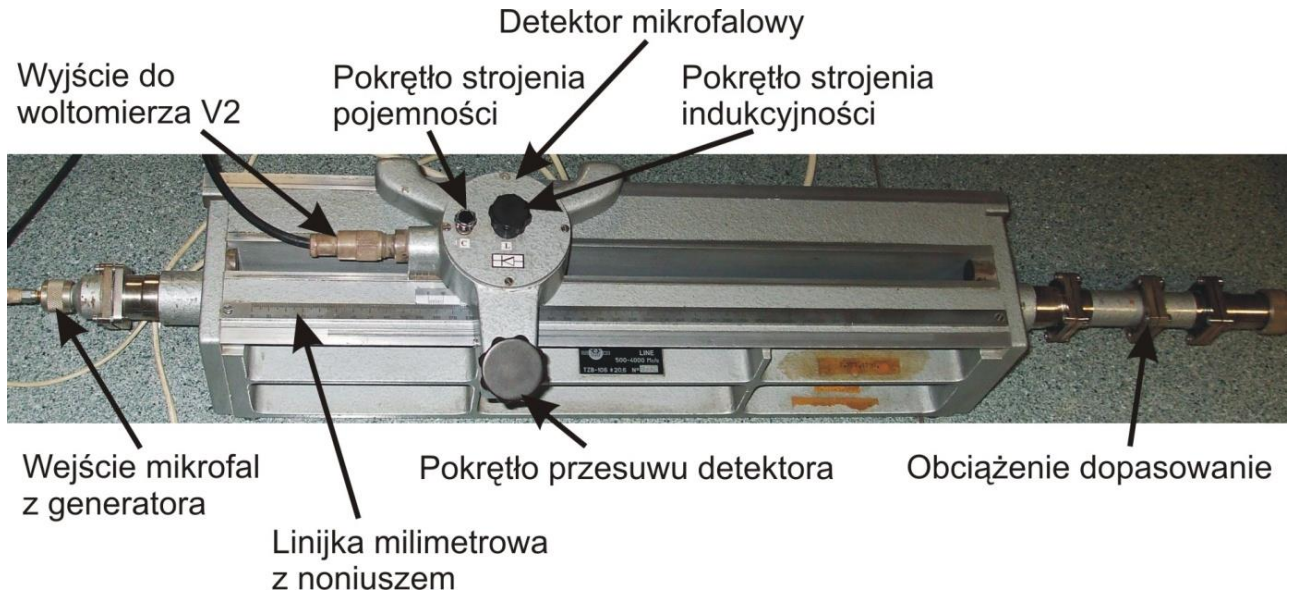


Rys. 3. Cylindryczna wnęka rezonansowa



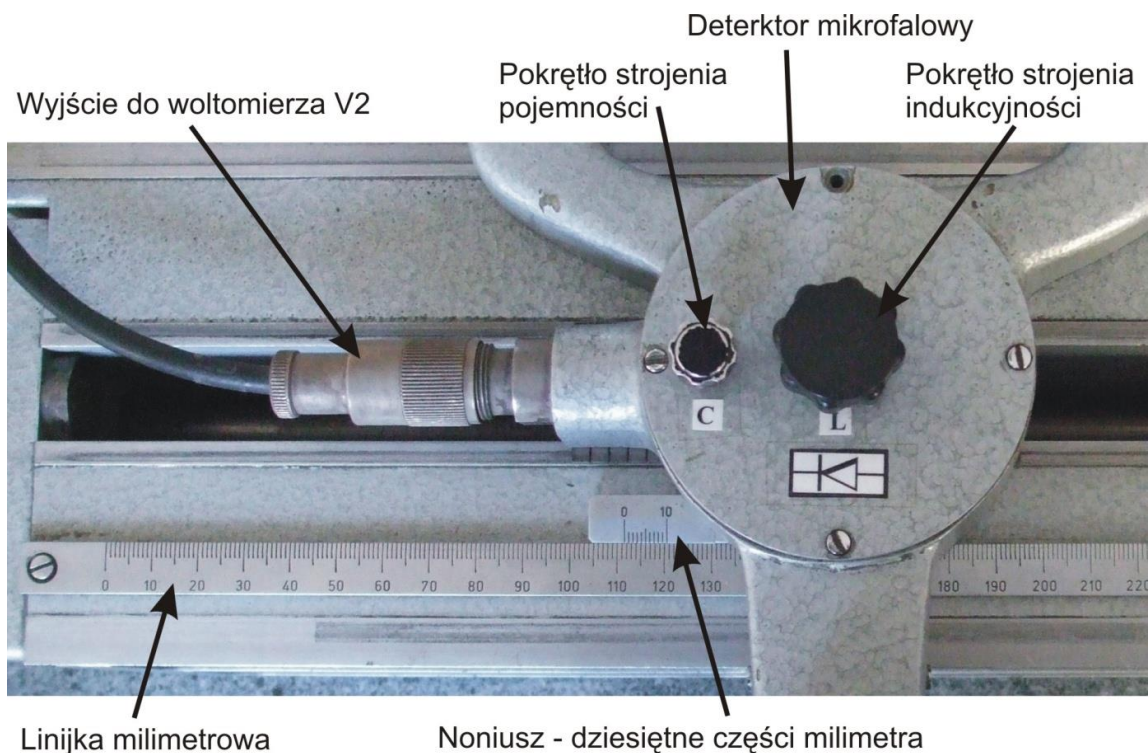
Rys.4. **Śruba przestrajania wnęki** rezonansowej z pokazanym odczytem działek 44,202.

Sposób odczytu liczby **śruby przestrajania wewnętrznej** rezonansowej. Całkowitą ilość działek odczytuje się z licznika, natomiast liczbę dziesiętnych i setnych części działki odczytuje się z górnej skali w miejscu zera dolnej skali noniusza. Kreska zera noniusza wskazuje położenie między 0,20 a 0,21. Liczbę tysięcznych części działki określa ta działka z 10 działek skali noniusza, która pokrywa się dokładnie z działką górnej skali dziesiętnych i setnych (na Rys. 4 jest to druga kreska). Ostatecznie odczyt położenia **śruby przestrajania wewnętrznej** rezonansowej na Rys. 4 wynosi 44,202 dz.



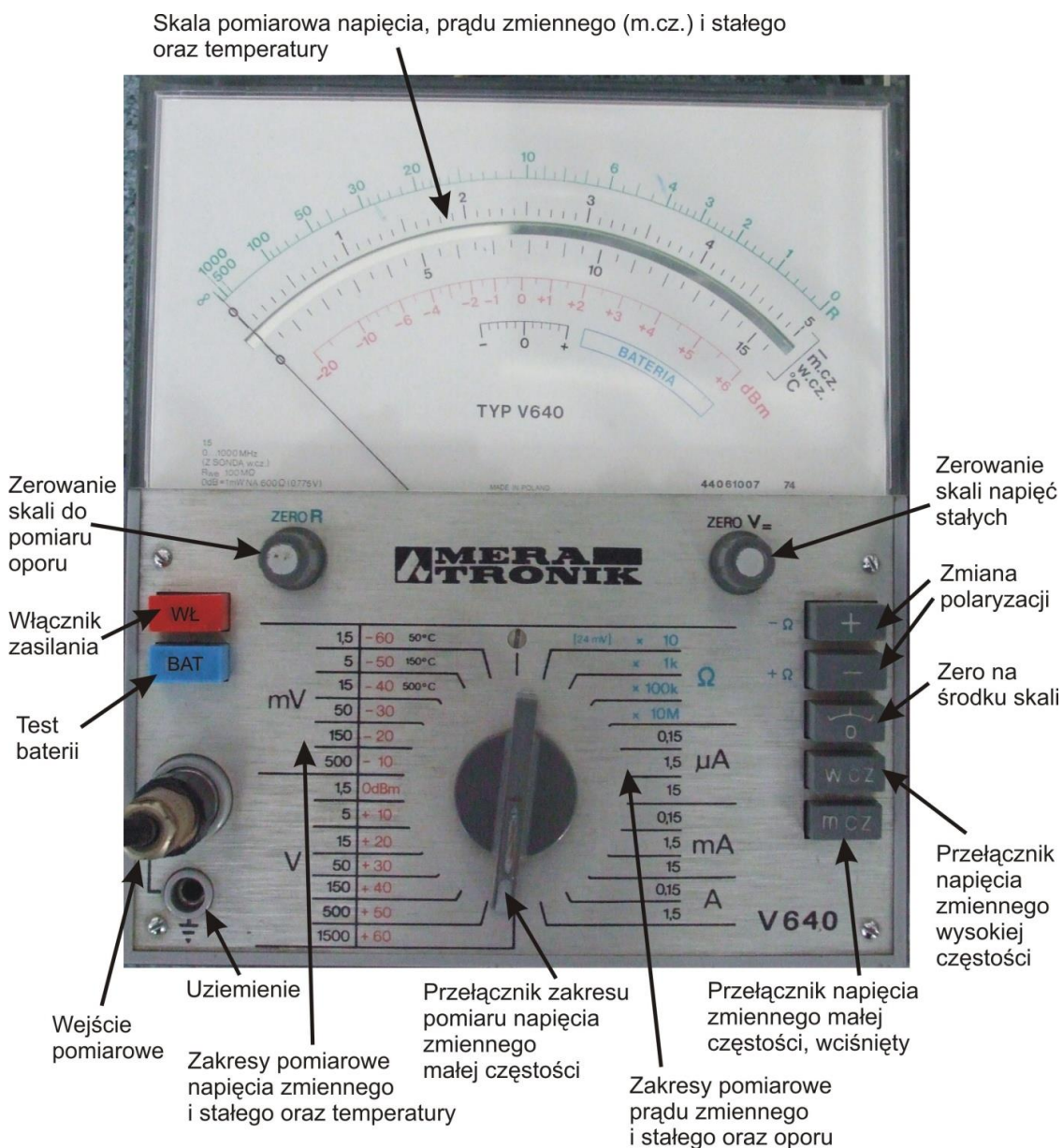
Rys. 5. Linia Lechera

Linia Lechera, Rys. 5 i Rys. 6, służy do pomiaru długości mikrofal. Długość mikrofal mierzy się zmieniając położenie detektora mikrofal wzdłuż linii Lechera za pomocą **pookrętko przesuwu detektora** i rejestrując sygnał napięcia **V2** na woltomierzu. Mikrofałe z generatora doprowadzane są do wejścia linii Lechera i wzdłuż linii tworzą się fale stojące, które obrazuje napięcie detektora na woltomierzu **V2**.



Rys. 6. Linia Lechera z pokazaną linijką z noniuszem.

Odczyt długości z linijki z noniuszem. Liczbę milimetrów należy odczytać z linijki milimetrowej do kreski oznaczonej zerem na noniuszu. W celu odczytania dziesiątych części milimetra jeżeli zero noniuszu wypadnie między kreskami milimetrowymi linijki, należy znaleźć kreskę noniusza pokrywającą się dokładnie z dowolną kreską skali linijki milimetrowej. Numer tej kreski noniusza liczony od zera wskazuje liczbę dziesiątych części milimetra, którą trzeba dodać do całkowitej liczby milimetrów, w przykładzie na Rys. 6 jest to 5, a ostateczny wynik pomiaru wynosi 111,5 mm.



Rys. 7. Woltomierz V640

Woltomierze V640 służą do pomiaru napięć z diodowego detektora wnęki rezonansowej LS-1 (Rys. 3) i detektora mikrofalowego linii Lechera (Rys. 5 i 6), sygnały doprowadzone są do wejścia pomiarowego (Rys. 7). Przed włączeniem woltomierza należy sprawdzić czy **przełącznik zakresu pomiaru napięcia** jest ustawiony na 1500 V i czy jest wciśnięty **przełącznik napięcia zmiennego małej częstotliwości (m.cz.)**. Woltomierz włącza się wciskając czerwony **włącznik zasilania**. **Przełącznikiem zakresu pomiaru napięcia** wybiera się odpowiedni zakres napięcia małej częstotliwości, oznaczony **mV**, a odczyt następuje ze skali pomiarowej napięcia zmiennego oznaczonej symbolem **m.cz.** (Rys. 7).

V. Wykonanie ćwiczenia

(sposób postępowania, schematy blokowe, uwagi dotyczące obsługi aparatury i BHP)

Opis pomiarów właściwych

Pierwszym punktem jest sporządzenie wykresu przebiegu napięcia V_2 detektora mikrofalowego wzdłuż linii Lechera i wyznaczenie częstości mikrofal, przy której został wykonany pomiar. Położenia ekstremów sygnału odpowiadają lokalizacji strzałek fali stojącej.

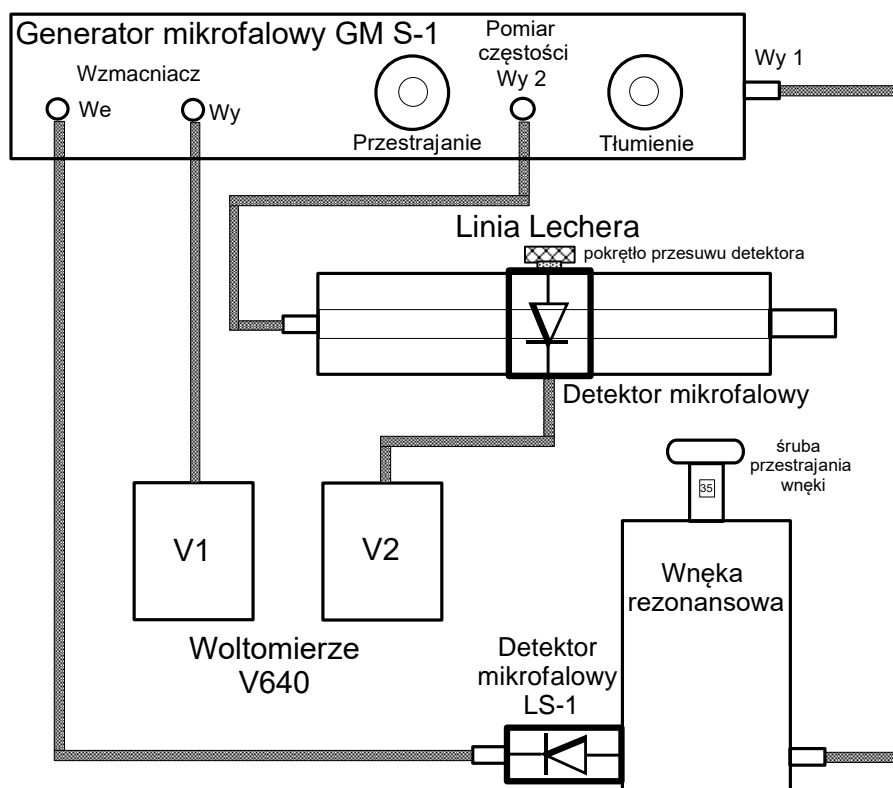
Następnym zadaniem jest sporządzenie krzywej cechowania wnęki rezonansowej czyli zależności położenia śruby przestrajania wnęki od częstości mikrofal we wnęce. Częstość mikrofal wyznaczana jest z pomiarów długości mikrofal za pomocą linii Lechera.

Uwaga: zadanie czasochłonne – o jego wykonaniu decyduje nauczyciel prowadzący.

Kolejny etap to sporządzenie krzywej rezonansowej wnęki, który polega na pomiarze zależności napięcia mierzonego woltomierzem V_1 od położenia **śruby przestrajania wnęki** rezonansowej dla wybranej częstości generatora mikrofal. Po przeliczeniu wartości położenia **śruby przestrajania wnęki** cylindrycznej na częstość, sporządza się wykres krzywej rezonansowej $U(\nu)$ i oblicza wartość dobroci wnęki.

Instrukcje połączenia zestawu pomiarowego i jego obsługi

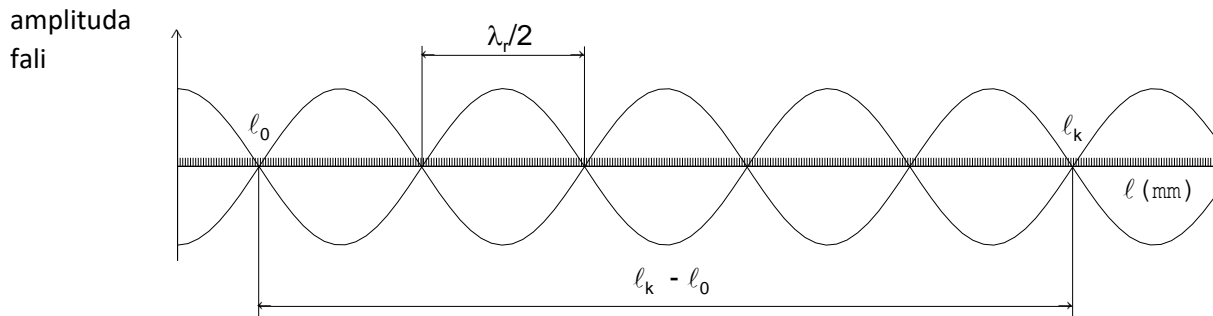
Zestaw pomiarowy należy połączyć zgodnie ze schematem na Rys. 8. Przewodami łączącymi są 3 kable koncentryczne małej częstości z tym, że generator z wnęką mikrofalową i linią Lechera połączone są dwoma mikrofalowymi kablami współosiowymi (układ połączeń jest standardowo zmontowany ale należy sprawdzić poprawność połączeń korzystając ze schematu).



Rys. 8. Schemat blokowy mikrofalowego układu pomiarowego

Pokrętkiem generatora mikrofalowego **Przestrajanie** i **Tłumienie** należy operować z ostrożnością i powoli. Pokrętko **Przestrajanie** służy do regulacji częstości generatora, natomiast **Tłumienie** do zmiany mocy mikrofalowej na wyjściu generatora.

Szczegółnej uwagi wymaga pomiar napięcia w węzłach fali stojącej za pomocą Linii Lechera (Rys. 9). W miarę przemieszczania **detektora mikrofalowego** linii Lechera do węzła fali należy odpowiednio zmniejszać zakres pomiarowy woltomierza V2, w celu zwiększenia dokładności odczytu.



Rys. 9. Maksymalne wychylenie składowej pola elektrycznego mikrofal wzdłuż linii Lechera. Wytworzona została fala stojąca z zaznaczonymi węzłami l_0 i l_k .

Włączanie aparatury

1. Uwaga! Przed włączeniem generatora pokrętko **Reg. Tłumienia** powinno być ustawione w położeniu 6,00 działek. Należy także sprawdzić czy przed włączeniem woltomierze V640 są ustawione na zakresach 1500 V.
2. Po odpięciu zapinek należy zdjąć pokrywę wnęki rezonansowej i odblokować **śrubę przestrajania wnęki** rezonansowej pokrętkiem oznaczonym **Blokada** na Rys. 4.
3. Przewody sieciowe generatora mikrofalowego i obu woltomierzy V640 należy włączyć do sieci.
4. Włączyć generator mikrofalowy wciskając przełącznik **WŁ SIEĆ** (wciśnięta część przycisku z białą kropką). Powinna zapalić się czerwona dioda obok włącznika oznaczonego **WŁ SIEĆ**.
5. Włączyć modulację przełącznikiem **WYŁ**.
6. Zmniejszyć tłumienie – ustawić pokrętko **Reg. Tłumienia** w położeniu 0,80 działki.
7. Włączyć woltomierze V640 wciskając czerwone przyciski **WŁ (ON)** i sprawdzić czy są wciśnięte przyciski trybów pracy **m.cz. (LF)**.

Wyłączanie aparatury

1. Ustawić przełączniki zakresów woltomierzy V640 na zakresach 1500 V, a następnie wyłączyć wyciskając czerwone przyciski **WŁ (ON)**.
2. Regulator **Reg. Tłumienia** ustawić w położeniu 6,00 działek.
3. Wyłączyć modulację przełącznikiem **WYŁ**.
4. Wyłączyć generator przełącznikiem **WŁ SIEĆ**. Wtedy czerwona dioda obok włącznika **WŁ SIEĆ** powinna zgasnąć.
5. Przewody sieciowe generatora mikrofalowego i obu woltomierzy V640 należy wyłączyć z sieci.
6. Zablokować **śrubę przestrajania wnęki** rezonansowej pokrętkiem oznaczonym na Rys. 9 **Blokada**, następnie założyć pokrywę wnęki rezonansowej i zapiąć zapinki.

Zadanie 1. Pomiar długości mikrofal za pomocą linii Lechera

- Pomiary zaczyna się od ustawienia **śruby przestrajania wnęki** rezonansowej na wybraną liczbę działek (n) z zakresu **38÷60** na liczniku wnęki (wartość podawana przez nauczyciela prowadzącego).
- Pokrętkiem **Przestrajanie** dostraja się częstość generatora do ustawionej częstości rezonansowej wnęki, tak aby uzyskać możliwie maksymalną wartość napięcia U na woltomierzu **V1**. Następnie należy dalej delikatnie dostroić do maksimum napięcia tylko **śrubą przestrajania wnęki** (poprzez zmianę rozmiarów wnęki) i zapisać tak ustawioną wartość n_r (śruba przestrajania wnęki) oraz n_g (wskazania pokrętkła przestrajania generatora).
- W dostrojonej wnęcie rezonansowej, należy zmierzyć długość mikrofal. Długość mikrofal mierzy się za pomocą linii Lechera, przy maksimum napięcia na woltomierzu **V1**, któremu odpowiada ilość n_r działek **śruby przestrajania wnęki**. Dostosować zakresy woltomierzy do sygnałów np. **V1** (500mV) i **V2** (100mV).

- Przed pomiarami z wykorzystaniem linii Lechera należy ją dostroić. W tym celu **detektor mikrofalowy** należy ustawić w miejscu na linii, gdzie jest maksimum napięcia **V2** (strzałka fali) i dostroić tak, aby otrzymać maksymalne napięcie mierzone woltomierzem **V2**. Strojenie **detektora mikrofalowego** wykonuje się obracając powoli w pierwszej kolejności **pokrętem strojenia pojemności**, a następnie **pokrętem strojenia indukcyjności L** (Rys. 5 i 6), do maksymalnego wychylenia wskazówki miernika **V2**. Należy pamiętać przy tym o zmianie zakresu pomiarowego napięcia na większy, gdy wskazówka przekroczy wartość maksymalną na skali miernika **V2**.

- W celu wyznaczenia przebiegu napięcia wzdłuż dostrojonej linii Lechera należy przesuwając detektor mikrofalowy linii Lechera co ok. 5 mm (lub przy węzłach i strzałkach mikrofal co 1-2 mm) i odczytywać napięcie na woltomierzu **V2**. Wyniki pomiarów należy zapisać w tabeli. Długość linii Lechera, wzdłuż której można badać rozkład napięcia wynosi około 380 mm. Przykładowe wyniki pomiarów przedstawione są w tabeli 1.

Tabela 1. Przykład zapisu pomiarów przebiegu napięcia wzdłuż linii Lechera

	$l(\text{mm})$	$U(\text{mV})$
1	0	38
2	5	19,7
3	10	3,8
4	12	0,024
5	14	1,96
...

Zadanie 2. Sporządzenie krzywej cechowania wnęki rezonansowej czyli zależności położenia śruby przestrajania wnęki od częstości mikrofal we wnęce.

Uwaga: W przypadku pominięcia tej części pomiarów w dalszych badaniach można skorzystać z gotowej krzywej cechowania wnęki rezonansowej przedstawionej na Rys. 12 i jej postaci analitycznej (1).

Sporządzenie krzywej cechowania wnęki rezonansowej wymaga wykonania następujących czynności:

- Należy zmieniać wartości pokręta **przestrajania** generatora z zakresu $n_g = 2,30 \div 3,94$ działek (nie rzadziej niż co 0,4 działki, aby krzywa cechowania zawierała co najmniej 5 punktów).

- Dla każdego ustawienia n_g dostrajać położenie **śruby przestrajania wnęki** tak, aby wartość napięcia na woltomierzu **V1** była maksymalna. Zapisać wartość położenia śruby przestrajania wnęki n_r dla każdego n_g .

- Przy ustalonych wartościach n_g oraz n_r zmierzyć długość mikrofal za pomocą linii Lechera (notując położenia l_0 , l_k i ilość węzłów fali, k). Przykładowy pomiar wartości ustawienia pokręta przestrajania generatora od długości mikrofal przedstawia tabela 2.

Tabela 2. Przykład zapisu pomiarów wartości ustawienia pokręta przestrajania generatora i śruby wnęki od długości mikrofal

	n_g (dz)	n_r (dz)	l_0 (mm)	l_k (mm)	$\frac{l_k - l_0}{k}$ (mm)	$\lambda(m)$	ν (GHz)
1	2,3	60,09			326/5	0,1304	
2	2,42	57,09			323/5	0,1292	
3	2,51	55,07			256,6/4	0,1283	
	

Z otrzymanych wyników pomiarów należy sporządzić krzywą cechowania wartości pokręta **przestrajania** generatora od częstości wyliczonej z długości mikrofal, co zostało omówione w części VI.

Zadanie 3. Sporządzenie krzywej rezonansowej wnęki

Pomiary wykorzystywane do wyznaczenia **krzywej rezonansowej wnęki** wykonuje się zmieniając położenie (n) **śruby przestrajania wnęki** przy ustalonej częstości generatora mikrofal. W tym celu należy:

- Ustawić pokrętko **przestrajania** generatora na wskazaną przez prowadzącego zajęcia wartość z zakresu $n_g = 2,30 \div 3,94$ działek.
- Dla wybranego n_g dostroić położenie **śruby przestrajania wnęki** tak, aby wartość napięcia na woltomierzu **V1** była maksymalna i zapisać wskazanie położenia tej śruby, n_r (warunek rezonansu we wnęce).
- Następnie zmieniać położenie **śruby przestrajania wnęki** (bez zmiany częstości generatora) w zakresie $n = n_r \pm 2,50$ działek (gdzie n_r jest liczbą działek **śruby przestrajania wnęki** dla maksymalnej wartości napięcia **V1**). Zmiany położenia śruby przestrajania wnęki powinny być nie większe niż co 0,25 działki tak, aby na krzywej rezonansowej wnęki znalazło się co najmniej 20 punktów.

Przykład zapisu części wyników pomiarów został podany w Tabeli 3. Nie należy zmieniać częstości generatora podczas pomiarów zależności rezonansowej, jeżeli stanie się to w trakcie pomiarów to trzeba powtórzyć je od początku.

Tabela 3. Schemat zapisu wyników pomiarów dla $n_r = 46$ dz (liczba działek **śruby przestrajania wnęki** w maksimum napięcia rezonansowego U_r).

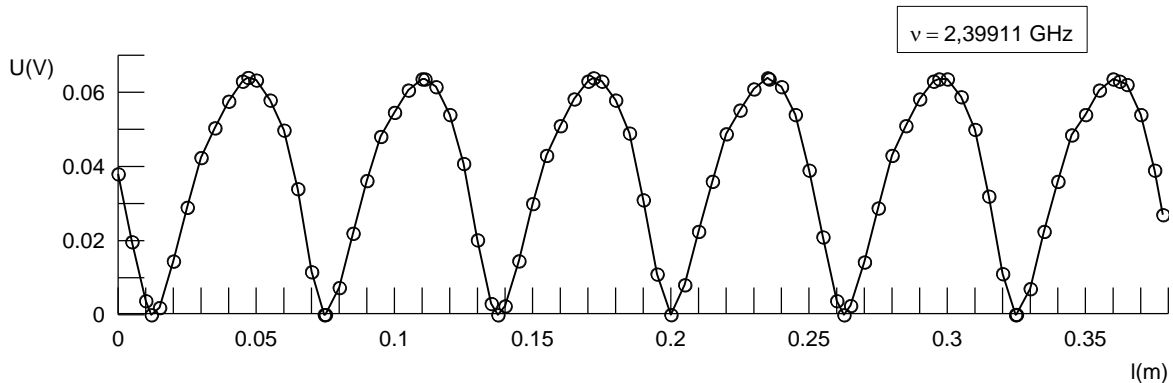
	n (dz)	U (mV)
1	45,490	130
2	45,517	135
3	45,545	140
4	45,570	145
5	45,600	150

VI. Opracowanie wyników i raport końcowy

Zadanie 1. Pomiar długości mikrofal za pomocą linii Lechera

Wyniki pomiarów zapisane w tabeli 1 należy zaprezentować na wykresie (jak np. na Rys. 10), wraz z podaniem częstości obliczonej zgodnie z procedurą opisaną poniżej.

Położenia detektora mikrofalowego przesuwanego wzdłuż linii Lechera, w których napięcie woltomierza V_2 osiąga minima, określają węzły mikrofal (Rys. 9). Ten fakt wykorzystujemy do wyznaczenia położenia pierwszego (l_0) i ostatniego (l_k) węzła mikrofal (najczęściej $k = 4 - 5$, gdzie k oznacza liczbę półfal od węzła l_0 do k -tego węzła l_k).



Rys. 10. Przebieg napięcia wzdłuż linii Lechera

Z odczytanych położenia węzłów krańcowych (zawierających kilka półfal, $k = 4 - 5$) wyliczamy długości mikrofal:

$$\lambda = 2(l_k - l_0) / k$$

Następnym krokiem jest wyliczenie częstości mikrofal z zależności:

$$\nu = c / \lambda = \frac{c \cdot k}{2(l_k - l_0)}$$

Przykład obliczania częstości mikrofal w maksimum rezonansowym dla zależności z Rys. 10.

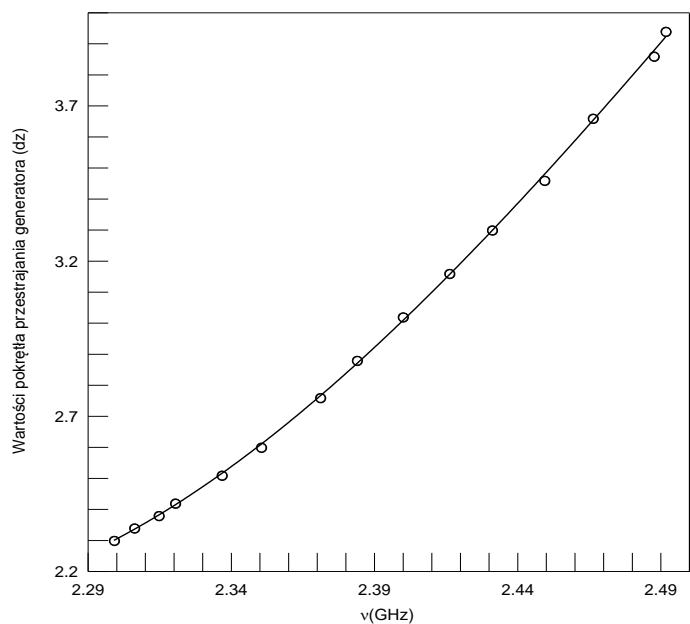
$n_r \cong 46$ dz (położenie **śruby przestrajania wnętrza** w maksimum dostrojenia),

$$\lambda_r = 2(l_k - l_0) / k = 2 \cdot (325,4 - 13) \text{ mm} / 5 = 124,96 \text{ mm}$$

$$\nu_r = c / \lambda_r = \frac{299792458 \text{ m/s}}{0,12496 \text{ m}} = 2,39911 \text{ GHz}$$

Zadanie 2. Sporządzenie krzywej cechowania wnętrza rezonansowej

Na podstawie wyników pomiarów z tabeli 2 sporządzamy wykres zależności ustawienia **pokrętła przestrajania generatora** n_g w funkcji częstości mikrofal, (porównaj Rys. 11). Należy zauważyć, że wartości ustawień pokrętła generatora nie wskazują częstości generowanych mikrofal.

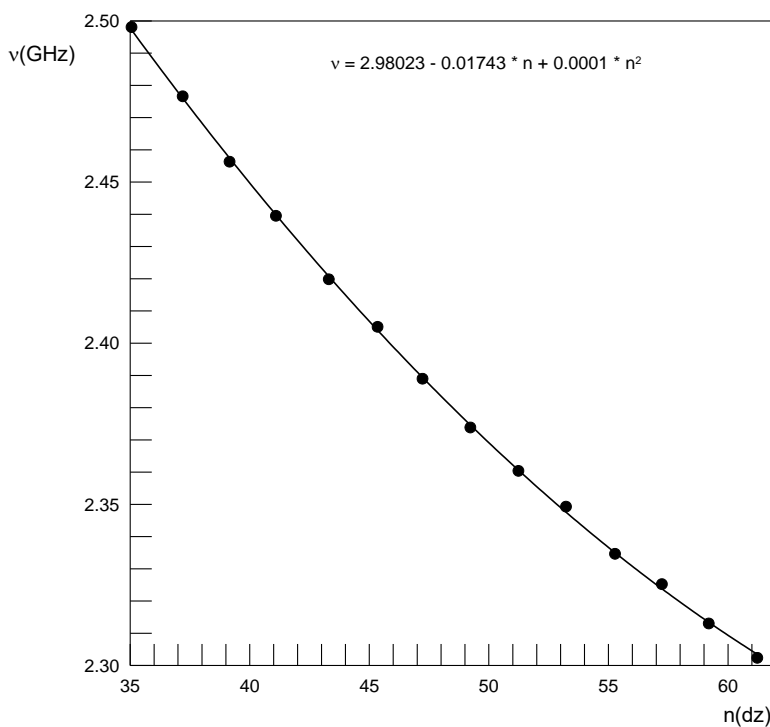


Rys. 11. Zależność wskazań pokręta przestrajania generatora od częstości mikrofal

Następnie należy sporządzić krzywą cechowania wnęki rezonansowej wykreślając zależność częstości mikrofal od położenia **śruby przestrajania wnęki** rezonansowej, n_r (tak jak na Rys. 12). W punkty pomiarowe należy wpisać krzywą najlepszego dopasowania - w omawianym przykładzie jest to parabola opisana równaniem:

$$\nu = 2,98023 \text{ GHz} - 0,01743 \text{ GHz/dz} \cdot n + 0,0001 \text{ GHz/dz}^2 \cdot n^2, \quad (1)$$

gdzie $n = n_r$ jest liczbą działek położenia **śruby przestrajania wnęki** rezonansowej. Tym sposobem można znaleźć częstość rezonansową mikrofal odpowiadającą dowolnej wartości n .



Rys. 12. Krzywa cechowania wnęki rezonansowej (częstość mikrofal w funkcji wartości położenia **śruby przestrajania wnęki**).

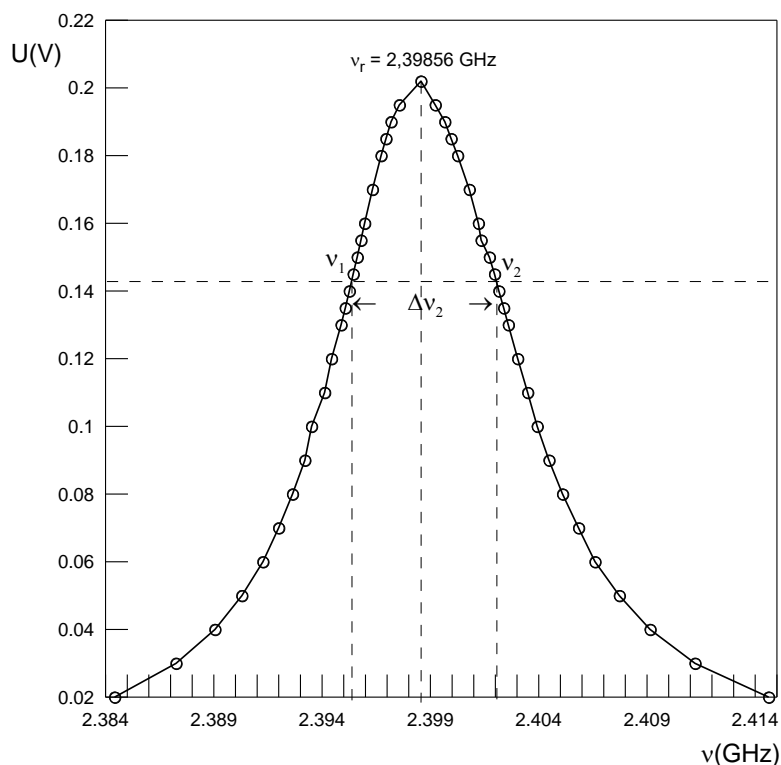
Zadanie 3 i 4. Sporządzenie krzywej rezonansowej wnęki i obliczenie dobroci wnęki

Korzystając z danych pomiarowych z tabeli 3 oraz wyników cechowania wnęki rezonansowej, Rys. 12, możemy przypisać położeniom śruby przestrajanania wnęki, n , odpowiadające im wartości częstotliwości (korzystając z krzywej najlepszego dopasowania przy wyznaczaniu krzywej cechowania wnęki lub ze wzoru 1), przykładowe wyniki przedstawia tabela 4.

Tabela 4. Przykład obliczenia częstotliwości dla fragmentu danych, częstotliwość rezonansowa $\nu_r = 2,39856 \text{ GHz}$, $n_r = 46$ dz (liczba dźwięków **śruby przestrajanania wnęki** w maksimum napięcia).

	n (dz)	U (mV)	ν (GHz)
1	45,490	130	2,4025972
2	45,517	135	2,4023821
3	45,545	140	2,4021593
4	45,570	145	2,4019605

Następnie na podstawie wyników z tabeli 4 należy sporządzić wykres zależności zmierzonego napięcia U od częstotliwości wnęki ν . Przykładowy wykres przedstawiony jest na Rys. 13.



Rys. 13. Krzywa rezonansowa, czyli zależność napięcia mierzonego woltomierzem $V1$ od częstotliwości w pobliżu częstotliwości rezonansowej wnęki (ν_r).

Obliczanie dobroci wnęki rezonansowej

Dobroć wnęki rezonansowej wyznacza się ze wzoru:

$$Q = \frac{\nu_r}{\Delta\nu},$$

ν_r - częstotliwość rezonansowa, $\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1$ jest to szerokość krzywej rezonansowej $U(\nu)$ obliczona dla wartości $\frac{U_r}{\sqrt{2}}$ ($0,707 \cdot U_r$) jak pokazano na Rys. 13.

Obliczanie niepewności wartości dobroci wnęki rezonansowej

Niepewność wyznaczenia częstości rezonansowej ν_r jest związana z dokładnością wyznaczenia długości fali z podziałki milimetrowej z noniusem, czyli położenia węzła początkowego i końcowego $\Delta l (= \Delta l_0 = \Delta l_k) = 0,0002$ m. Na wartości niepewności częstości ν_1 i ν_2 składają się: niepewność odczytu z Rys. 13 równa $\Delta \nu_{od} = 0,0001$ GHz oraz niepewność wynikająca z przeliczenia działek **śruby przestrajania wnęki** rezonansowej na częstość $\Delta \nu_p$ (Tabela 4), zgodnie z zależnością (1). Z tego wzoru, dla prezentowanych powyżej danych, można obliczyć niepewność częstości metodą różniczkową:

$$\Delta \nu_p = \left| \frac{\partial \nu_p}{\partial n} \right| \cdot \Delta n = |-0,01743 \text{ GHz/dz}| \cdot 0,01 \text{ dz} + |0,0001 \text{ GHz/dz}^2 \cdot 2n| \cdot 0,01 \text{ dz} = 0,000266 \text{ GHz}$$

gdzie $\Delta n = 0,01$ dz, $n = 46$ dz. Ostatecznie niepewność bezwzględna częstości wynosi:

$$\Delta \nu (= \Delta \nu_1 = \Delta \nu_2) = \Delta \nu_p + \Delta \nu_{od} = 0,000266 \text{ GHz} + 0,0001 \text{ GHz} = 0,000366 \text{ GHz}.$$

Niepewność systematyczna względna odczytu napięcia w 0,707 wysokości krzywej rezonansowej zawiera się w zakresie od jednego do pięciu procent i można ją zaniedbać.

Dobroć wnęki rezonansowej po przekształceniach przedstawia wyrażenie:

$$Q = \frac{\nu_r}{\Delta \nu} = \frac{\nu_r}{(\nu_2 - \nu_1)} = \frac{k \cdot c}{2(l_k - l_0)(\nu_2 - \nu_1)}.$$

Niepewność wyznaczania dobroci wnęki oblicza się metodą różniczkową:

$$\Delta Q = k \cdot c \left(\frac{\Delta l}{(l_k - l_0)^2 (\nu_2 - \nu_1)} + \frac{\Delta \nu}{(l_k - l_0) (\nu_2 - \nu_1)^2} \right).$$

Literatura

1. Feynman R. P., Leighton R. B., Sands M. *Feynmana wykłady z fizyki*. Tom 2.1. Warszawa: PWN, 2002a.
2. Feynman, R. P., Leighton R. B. Sands, M.,. *Feynmana wykłady z fizyki*. Tom 2.2. Warszawa: PWN, 2002b.
3. Francik, A. *Stanowisko do mikrofalowych badań materiałowych*. Wrocław: Inst. Telekom. i Akustyki Politechniki Wrocławskiej, 1996.
4. Ginter, J. *Fizyka fal, Promieniowanie i dyfrakcja, Stany związane*. Warszawa: PWN, 1993.
5. Halliday, D., Resnick R. *Fizyka*. Tom 2. Warszawa: PWN, 1996.
6. Kohlraush, F. *Fizyka laboratoryjna*. Tom II. Warszawa: PWN, 1961.
7. Litwin, R., Suski M. *Technika mikrofalowa*. Warszawa: WNT, 1972.
8. Meratronik. „Instrukcja obsługi V-640.” *Multimetr elektroniczny V-640. Opis techniczny. Instrukcja obsługi i instrukcja serwisowa*. Warszawa: Zjednoczone Zakłady Elektronicznej aparatury Pomiarowej "Meratronik", 1973.
9. Swit, A., Pułtorak J. *Przyrządy półprzewodnikowe*. Warszawa: WNT, 1979.
10. Szczeniowski, Sz. *Fizyka doświadczalna, Elektryczność i magnetyzm, cz. III*. Warszawa: PWN, 1980.
11. Szydłowski, H. *Pracownia fizyczna*. Warszawa: PWN, 1999.
12. Thomas, H. E. *Techniki i urządzenia mikrofalowe. Poradnik*. Warszawa: WNT, 1978.

Appendix: Materiały pomocnicze

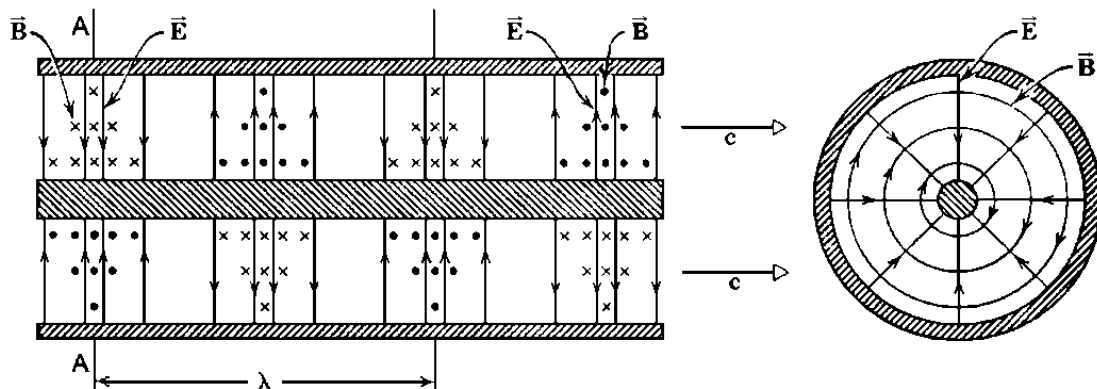
1.1. Propagacja fal elektromagnetycznych

Fale elektromagnetyczne mogą być prowadzone w dwóch przewodach równoległych, przewodach współosiowych (kabel koncentryczny) oraz w falowodach prostokątnych i cylindrycznych.

1.1.1. Przesyłanie fal liniami i falowodami

Kabel koncentryczny

Jednym z rodzajów linii jest kabel koncentryczny, w którym fala elektromagnetyczna może przenosić się ze skończoną prędkością równą prędkości światła, przy założeniu, że linia jest doskonale przewodząca i nie ma między przewodem wewnętrznym i zewnętrznym dielektryka. Pole elektryczne w kablu koncentrycznym jest radialne, a pole magnetyczne tworzy współosiowe koła wokół wewnętrznego przewodnika (Rys. 1). Praktycznie przewód koncentryczny stanowi pojedynczy drut otoczony dielektrykiem i plotem miedzianym.

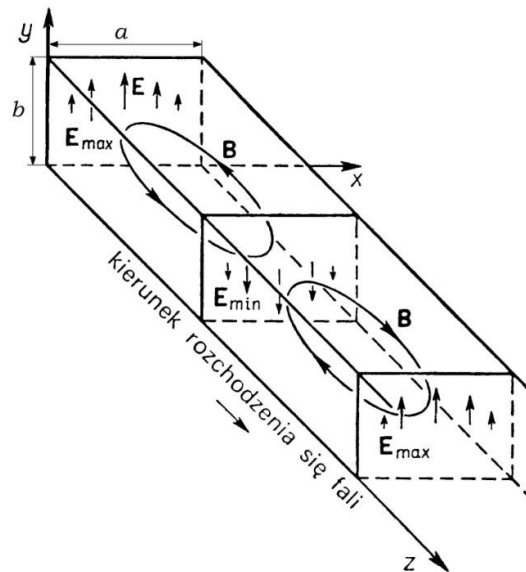


Rys. 1. Fala elektromagnetyczna w kablu koncentrycznym przemieszczająca się w prawą stronę z prędkością światła z zaznaczonym rozkładem pól elektrycznych i magnetycznych i przekrój kabla w płaszczyźnie AA (Halliday 1996)

Falowód prostokątny

Falowodem prostokątnym (Rys. 2) jest rura o przekroju prostokątnym. Pole magnetyczne lub elektryczne w falowodzie ma składową równoległą do kierunku rozchodzenia się mikrofal, mimo że jest falą poprzeczną w wolnej przestrzeni. Do falowodu wprowadza się falę za pomocą anteny, pętli lub odpowiednio umieszczonego otworu. Antena powinna znajdować się w maksimum pola elektrycznego, umieszczona równolegle do linii sił tego pola i w odległości $\frac{1}{4}$ od końca falowodu, natomiast pętla w maksimum pola magnetycznego, tak aby jego zmiany indukowały prąd w pętli.

W falowodzie prostokątnym rozchodzi się fala spolaryzowana liniowo (pole elektryczne ma ściśle określony kierunek). W celu zmiany polaryzacji należy używać falowodów o przekroju kołowym. W falowodzie prostokątnym można wzbudzić fale H ze składową magnetyczną i fale E ze składową elektryczną pola wzdłuż falowodu. Każdy z tych typów fal może różnić się jeszcze rzędem, oznaczanym wskaźnikami m i n , które podają liczbę półfal (lub płaszczyzn węzłowych magnetycznych i elektrycznych) wzdłuż boku a i wzdłuż boku b , odpowiednio (Rys. 2). W przypadku $a > b$ podstawowym rodzajem fali jest H_{10} i E_{11} (Kohlraush 1961) (Litwin 1972).



Rys. 2. Fale elektromagnetyczne w falowodzie prostokątnym (Feynman 2002b)

1.1.2. Linia Lechera

Linia Lechera jest to linia o długości większej od długości fali elektromagnetycznej rozchodzącej się w niej, w postaci dwóch (zwartych lub rozwartych na końcu) przewodów o średnicy dużo mniejszej od odstępów między nimi. Zamiast przewodów stosowane są również koncentrycznie umieszczone rurki lub płaskie taśmy. Linie te stosuje się do wytwarzania fal stojących i wyznaczania długości fal elektromagnetycznych.

Układ Lechera może być otwarty lub zamknięty przez pętlę zwierającą. Do pomiarów długości fali, układ jest zakończony pętlą zwierającą lub mostkiem płytkowym, który można przesuwając po drutach aż do uzyskania rezonansu. Mostek płytkowy stanowi krążek o średnicy większej od odstępów drutów z dobrze przewodzącego materiału. Po stronie zwróconej do początku układu posiada detektor. Na początku otwartego układu drutów występuje strzałka napięcia. Jeżeli przewody Lechera mają skończoną długość, fala odbija się od końca i powstaje fala stojąca.

W celu wyeliminowania błędów stosuje się pomiary różnicowe mierząc ilość półfal między położeniem pierwszego i ostatniego węzła (Kohlraush 1961):

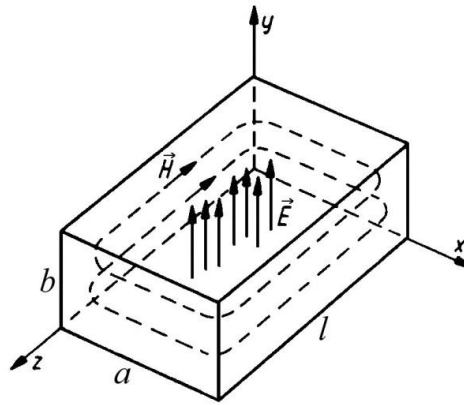
$$\lambda = 2(l_n - l_0) / n; \quad k = 0, 1, 2, \dots, n.$$

1.2. Wnęki rezonansowe

Wnęki rezonansowe (zwane rezonatorami) są to metalowe, całkowicie zamknięte komory, które w zakresie mikrofal pełnią rolę obwodów rezonansowych. Ściany wykonane są z metalu o dużej przewodności lub są pokryte wewnątrz warstwą takiego metalu. Fale elektromagnetyczne w rezonatorach są związane i jest tam magazynowana energia elektromagnetyczna w postaci pola elektrycznego i magnetycznego. Wnękę rezonansową stanowi zwarty na obu końcach odcinek falowodu prostokątnego, kołowego lub współosiowego.

1.2.1. Wnęka prostopadłościenna

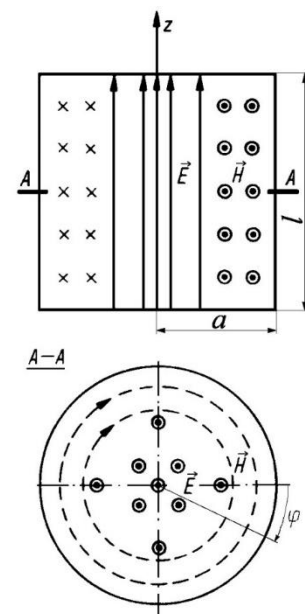
Wnęka prostopadłościenna utworzona z odcinka falowodu prostokątnego charakteryzuje się określonym rodzajem rozkładu pola, określanym podobnie jak w falowodach z tym, że trzeci indeks wskazuje na liczbę połówek fal wzdłuż osi z wnąki (Rys. 3). W przypadku wnąki utworzonej z falowodu o falach typu E_{mn} możliwe są rodzaje rezonansowe E_{mnp} ($p = 0, 1, 2, \dots$), natomiast dla wnąki wykonanej z falowodu H_{mn} możliwe są rodzaje H_{mnp} ($p = 1, 2, \dots$; $p = 0$ jest niemożliwy).



Rys. 3. Linie pola elektromagnetycznego podstawowego rodzaju H_{101} w rezonatorze prostopadłościennym (Litwin 1972)

1.2.2. Wnęka cylindryczna

Wnękę cylindryczną tworzy zwarty na obu końcach odcinek falowodu o przekroju kołowym (Rys. 4). Dwa pierwsze wskaźniki m i n oznaczają rodzaj fali w falowodzie kołowym, a trzeci wskaźnik p wskazuje na liczbę połówek fal wzdłuż osi z rezonatora. Dla bardzo krótkich rezonatorów ($\frac{2a}{l} > 1$), rodzajem któremu odpowiada największa długość fali rezonansowej ($\lambda_r \approx 2,62a$) jest E_{010} . Rodzaj ten charakteryzuje się symetrycznym rozkładem pola względem osi z i brakiem zmian tego pola wzdłuż długości rezonatora. Wektor natężenia pola elektrycznego ma tylko składową osiową, zaś natężenie pola magnetycznego tylko składową azymutalną (Litwin 1972).



Rys. 4. Linie pola elektromagnetycznego podstawowego rodzaju E_{010} w rezonatorze cylindrycznym (Litwin 1972)

Rezonatory dostraja się do wymaganej częstości przez mechaniczną zmianę wymiarów (przesuwając denko lub ściankę wnętrza), bądź wprowadzając do ich wnętrza pręty metalowe lub ferrytowe. Sprzężenie z wnętrza realizuje się przez umieszczenie sondy pojemnościowej w obszarze maksymalnego natężenia pola elektrycznego, lub pętli indukcyjnej w obszarze o maksymalnym natężeniu pola magnetycznego, a także za pomocą szczelin. Mikrofalowe wnętrza rezonansowe stosowane są w generatorach, wzmacniaczach, filtrach oraz połączeniach hybrydowych (Szydłowski 1999) (Litwin 1972) (Thomas 1978).

1.2.3. Dobroć wnętrza

Parametrem wnętrza rezonansowej jest dobroć zdefiniowana jako (Szydłowski 1999) (Litwin 1972) (Szczeniowski 1980):

$$Q = 2\pi \cdot \frac{\text{maksymalna energia zawarta w rezonatorze}}{\text{średnia energia tracona w czasie jednego okresu}}$$

Średnia energia tracona (strata energii na ciepło Joule'a) w czasie jednego okresu jest równa średniej mocy tłumienia pomnożonej przez okres drgań. **Inaczej współczynnik dobroci Q równy jest pomnożonemu przez 2π stosunkowi maksymalnej energii zawartej w rezonatorze lub obwodzie rezonansowym do średniej straty energii na ciepło Joule'a w ciągu jednego okresu drgań.**

Po przekształceniach otrzymuje się ostatecznie wzór na dobroć Q (Szydłowski 1999):

$$Q = \frac{\omega_r}{\Delta\omega} = \frac{\nu_r}{\Delta\nu},$$

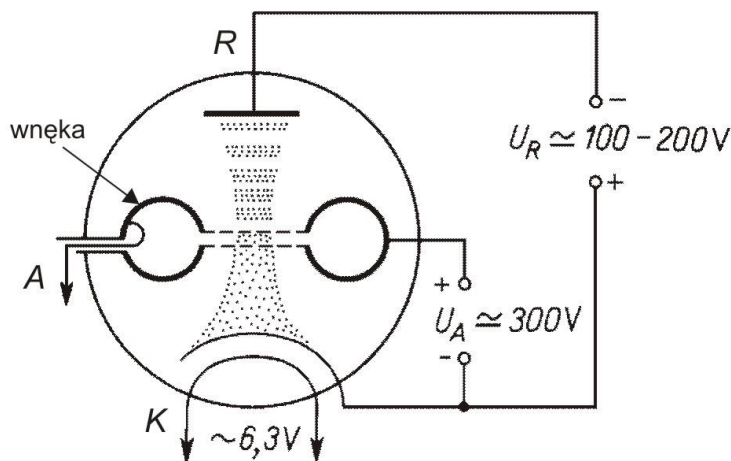
gdzie $\omega_r = 2\pi\nu_r$ jest częstotliwością rezonansową, a $\Delta\omega = 2\pi\Delta\nu$ jest szerokością krzywej rezonansowej $U(\nu)$ na jej wysokości równej $\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot U_r$ (czyli 0,707 maksymalnego napięcia w rezonansie).

1.3. Generacja i detekcja mikrofal

1.3.1. Klustron

Klustrony służą do wzmacniania i generacji mikrofal. Dzielą się na jednowętkowe (refleksowe), dwuwętkowe i wielowętkowe oraz posiadające wewnętrzne i zewnętrzne rezonatory. Klustrony na fale krótsze od 10 cm mają już z reguły rezonatory wewnętrzne. Największe generowane częstotliwości za pomocą klustronów refleksowych dochodzą do 100 GHz ($\lambda = 3$ mm) (Litwin 1972).

Klustron jest próżniową lampą przelotową, której działanie polega na wykorzystaniu zjawisk zachodzących podczas przelotu wiązki elektronowej przez obszary lampy pozbawione pól elektrycznych. W wiązce o modulowanej prędkości, na wejściu obszaru przelotowego wskutek grupowania się elektronów, uzyskuje się modulację ładunku i generację drgań rezonansowych o wysokiej częstotliwości, równej częstotliwości własnej użytych rezonatorów.



Rys. 5. Budowa klustronu refleksowego (jednowętkowego) (Szydłowski 1999)

Najbardziej rozpowszechnionym generatorem małej mocy jest klustron refleksowy (Rys. 5). Środkowa część wnęki posiada ścianki z siatki drucianej, które są jednocześnie anodą. Naprzeciw katody, która emituje elektrony, po przeciwnej stronie anody znajduje się reflektor o potencjale ujemnym. Elektrony przechodzą przez obszar wnęki, i drobne nieregularności w ich przepływie wzbudzają elektromagnetyczne drgania własne wnęki, które modulują prędkość elektronów. Wskutek tej modulacji elektrony grupują się w paczki po przejściu przez wnękę. Następnie pole elektryczne reflektora hamuje je i zawraca na powrót do wnęki, tworząc paczki modulowane z częstotliwością drgań własnych wnęki. Napięcie reflektora steruje czasem po którym zawrócone elektrony ponownie trafią do wnęki. Napięcie dobiera się tak, aby wzrost pola elektrycznego podczas przejścia paczki dodawał się do pola fali istniejącej wewnątrz wnęki, kompensując straty energii drgań odprowadzane na zewnątrz przez antenę-pętlę A (Szydłowski 1999). Grupowanie elektronów jest możliwe, ponieważ: czas przelotu elektronów między siatkami jest krótki względem okresu drgań, elektrony nie zmieniają swojej prędkości, podczas przechodzenia obszaru wnęki, gdy pole elektryczne jest zerowe, elektrony, które trafią na zgodnie skierowane pole ulegają przyspieszeniu, zaś trafiające na przeciwne pole są spowalniane (Thomas 1978).

1.3.2. Mikrofalowe diody generacyjne Gunna

Działanie diody Gunna opiera się na efekcie Gunna, który polega na wzbudzeniu się oscylacji elektrycznych, w niektórych półprzewodnikach typu n (GaAs, GaP, InP, CdTe, ZnSe). Oscylacje powstają w wyniku pojawienia się dynamicznej ujemnej rezystancji, wywołanej międzypolinowymi przejściami elektronów w paśmie przewodnictwa pod wpływem odpowiednio dużych pól elektrycznych. Po spolaryzowaniu diody Gunna w kierunku przewodzenia i umieszczeniu jej w rezonatorze uzyskuje się generację drgań od kilku do ponad 40 GHz, natomiast uzyskiwana moc pracy ciągłej wynosi kilkaset miliwatów (Szydłowski 1999) (Thomas 1978). Praca impulsowa umożliwia uzyskanie większych mocy rzędu setek watów i sprawności do 25% (Litwin 1972).