

# Zdalny miernik SWR i mocy via ethernet

Michael Clemens, DK1MI

[mc@qrz.is](mailto:mc@qrz.is)

Matthias Bopp, DD1US

[DD1US@amsat.org](mailto:DD1US@amsat.org)

## Spis treści

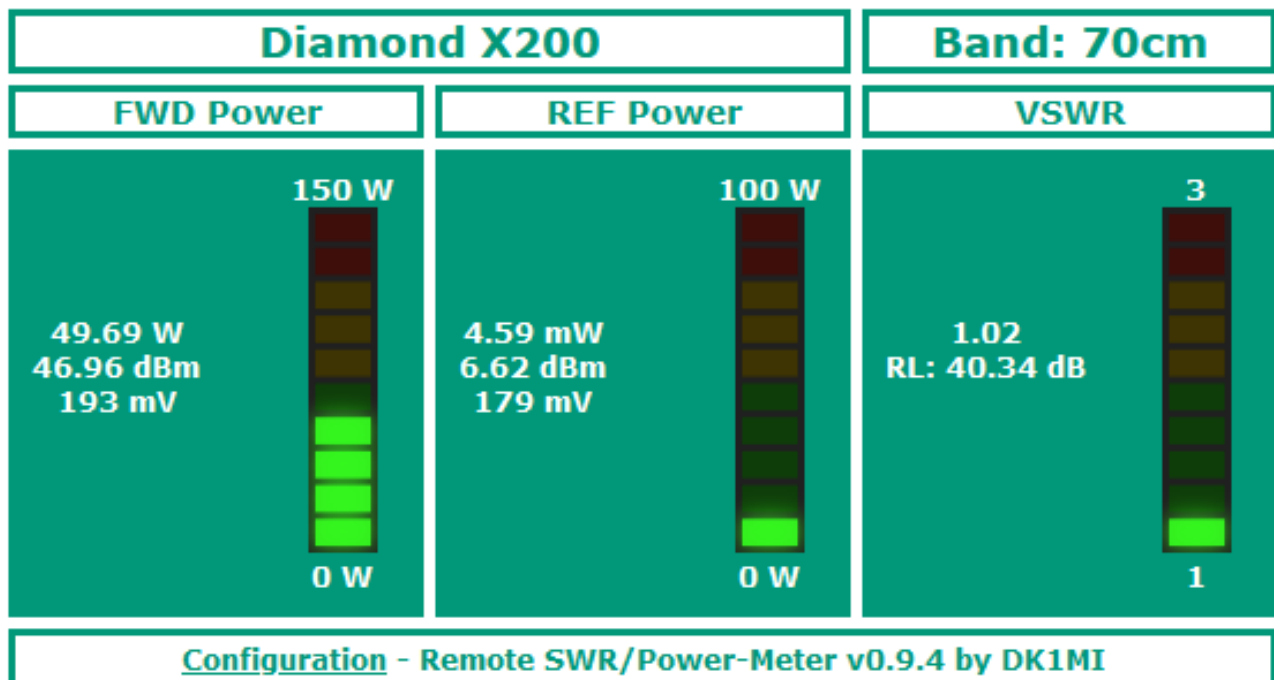
<b>Detektory</b> .....	4
<b>Detektory diodowe</b> .....	4
<b>Detektory logarytmiczne</b> .....	5
<b>Koncepcja</b> .....	6
<b>Oprogramowanie / Biblioteki</b> .....	7
<b>Instalacja środowiska programistycznego i oprogramowania Arduino</b> .....	7
<b>Programowanie płyty</b> .....	8
<b>Konfiguracja</b> .....	9
Ustawienia sieciowe .....	9
Definicja zakresów częstotliwości .....	9
Dostęp do interfejsu internetowego .....	10
Opcje konfiguracji w przeglądarce .....	10
Ogólne elementy konfiguracji .....	12
<b>Przykłady</b> .....	13
<b>Konfiguracja #1 Sprzęgacz kierunkowy ERICSSON i czujniki AD8318</b> .....	13
<b>Konfiguracja #2 Sprzęgacz kierunkowy NARDA i detektory AD8313</b> .....	17
<b>Struktura #3 Sprzęgacz kierunkowy ze starego miernika VSWR z wbudowanymi diodami detektora</b> .....	20
<b>Podsumowanie</b> .....	23

## Wprowadzenie

Często istnieją części systemu radiowego, w których komponenty są obsługiwane zdalnie. Najczęściej jest to tylko wzmacniacz mocy, ale czasami także transwerter lub kompletny transceiver oparty na SDR.

W tym przypadku pożądane jest zmierzenie zarówno mocy nadawczej, jak i mocy odbitej przez antenę w pobliżu anteny, aby następnie określić rzeczywiste dopasowanie anteny. Zwiększa to również dokładność pomiaru, ponieważ straty w kablu koncentrycznym między urządzeniem pomiarowym a anteną, które rosną wraz ze wzrostem częstotliwości, symulują lepsze dopasowanie niż w rzeczywistości.

W opisywanej tu koncepcji pomiary te są wykonywane przy użyciu sprzęgacza kierunkowego, dwóch detektorów mocy i mikroprocesora WT32/ESP32. Na mikroprocesorze ze zintegrowanym interfejsem Ethernet działa serwer WWW, dzięki czemu wyniki mogą być wizualizowane w dowolnej przeglądarce w sieci.

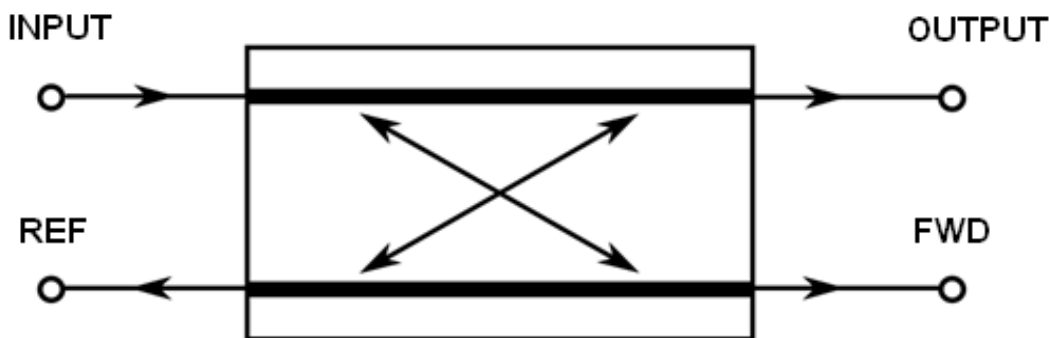


Rysunek 1: Wyświetlacz operacyjny (pulpit nawigacyjny) serwera WWW

Celem nie było konkurowanie z komercyjnymi urządzeniami pomiarowymi, ale stworzenie opłacalnego rozwiązania dla "amatorskiego urządzenia pomiarowego" o wystarczającej dokładności pomiarowej.

## Łącznik kierunkowy

Do planowanych pomiarów wymagany jest sprzęgacz kierunkowy. Sprzęgacze kierunkowe RF pozwalają na sprzęgnięcie pewnej ilości mocy elektromagnetycznej w linii przesyłowej z linią wtórną, umożliwiając wykorzystanie sygnału w innym obwodzie.



Rysunek 2: Zasada działania sprzęgacza kierunkowego

Sprzęgacz kierunkowy ma zależne od częstotliwości tłumienie sprzężenia zarówno w kierunku mocy padającej (FWD), jak i odbitej (REF). Te dwa tłumienia sprzężenia niekoniecznie są takie same i zwykle mieszczą się w zakresie od 10 dB do 40 dB.

Kierunkowość opisuje minimalne straty odbiciowe (na przykład z anteny), które można zmierzyć za pomocą sprzęgacza kierunkowego. W idealnej sytuacji, przy optymalnie dopasowanym obciążeniu podłączonym do OUTPUT, żadna odbita moc nie byłaby mierzona na REF. Kierunkowość byłaby wtedy nieskończona. Zazwyczaj wynosi ona od 20 do 40 dB. Przy kierunkowości 25,4 dB minimalny mierzalny VSWR wynosi 1,11, a przy 30,9 dB tylko 1,06. Kierunkowość zależy również od częstotliwości.

Tłumienność wtrąceniowa opisuje stosunek mocy na wyjściu OUTPUT do wejścia INPUT lub ile mocy podawanej do sprzęgacza kierunkowego jest tracone. Straty składają się z następujących części:

- straty spowodowane odbiciem części doprowadzonej mocy na wejściu sprzęgacza kierunkowego z powodu jego nieoptymalnego dopasowania do nadajnika (w tym linii zasilającej).
- tłumienie wewnątrz sprzęgacza kierunkowego (np. z powodu strat dielektrycznych)
- straty spowodowane odsprzęgnięciem części mocy przez wyjścia pomiarowe FWD i REF (im większa strata odsprzęgnięcia, tym mniejszy wpływ na tłumienność wtrąceniową)

Tłumienność wtrąceniowa jest również zależna od częstotliwości. Tłumienie wtrąceniowe na poziomie 0,05 dB oznacza utratę 1,2% mocy wejściowej. Przy mocy wejściowej 100 W będzie to zatem 1,2 W.

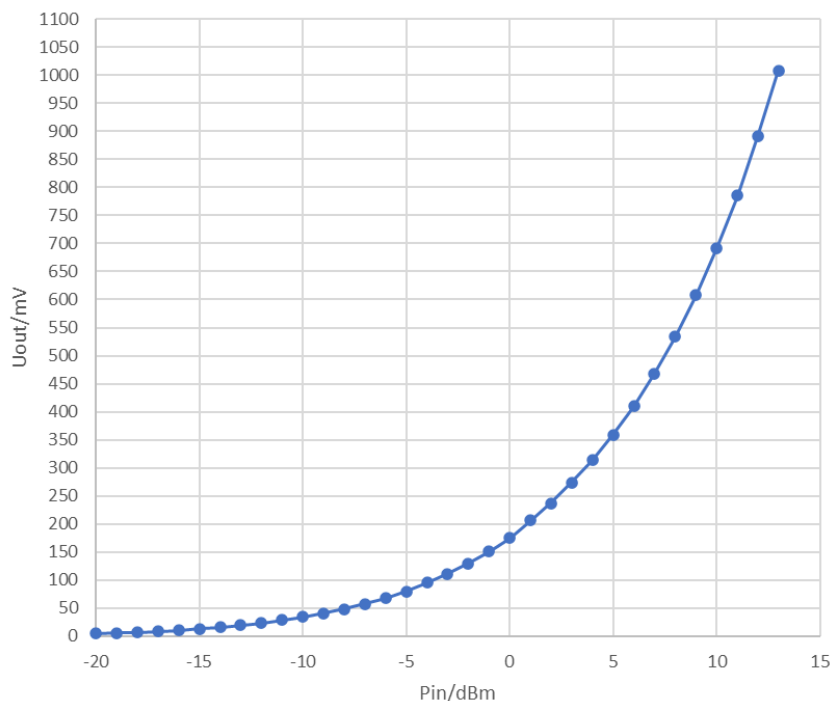
Jakość systemu pomiarowego zasadniczo zależy od zastosowanego sprzęgacza kierunkowego, w szczególności od jego kierunkowości.

## Detektory

Dołączona moc może być wykrywana za pomocą dyskretnych detektorów diodowych lub zintegrowanego detektora logarytmicznego. Oba typy detektorów przekształcają moc odsprężniętą od sprzęgacza kierunkowego na napięcie stałe, które jest następnie digitalizowane za pomocą konwertera AD. Mikroprocesor konwertuje wykryte napięcia DC na wskazania mocy RF, a także wykorzystuje je do określenia dopasowania (strat powrotnych) i SWR obciążenia.

### Detektory diodowe

Charakterystyka detektora diodowego jest silnie nieliniowa w dolnym zakresie, a następnie staje się bardziej liniowa przy wyższych poziomach. Oto przykład:



Rysunek 3: Krzywa charakterystyczna detektora diodowego

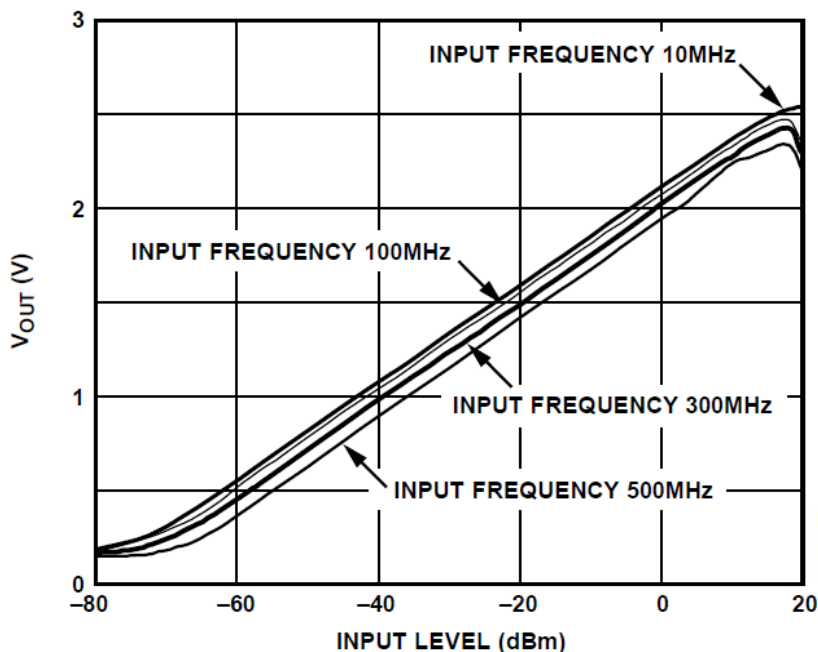
Charakterystyka jest również zależna od temperatury i częstotliwości. Na powyższym obrazku można szybko dostrzec problem detektorów diodowych: Przy niskich mierzonych mocach napięcie wyjściowe jest bardzo małe, a charakterystyka płaska. Oznacza to, że napięcie wyjściowe DC zmienia się bardzo nieznacznie w funkcji mocy wejściowej HF, a błąd pomiaru staje się duży.

W celu uzupełnienia należy wskazać, że istnieją detektory diodowe zarówno z ujemnym, jak i dodatnim napięciem wyjściowym (patrz przykład powyżej). Ponieważ konwertery AD prostych mikrokontrolerów mogą zazwyczaj mierzyć tylko napięcia dodatnie, w przypadku detektora z ujemnym napięciem wyjściowym, obwód inwertera analogowego ze wzmacniaczem operacyjnym jest zwykle używany do generowania dodatkowo wzmocnionego napięcia dodatniego dla konwertera AD.

Można spróbować przybliżyć krzywą charakterystyczną detektora diodowego za pomocą wzoru lub zapisać ją w tabeli (tabeli odnośników), w której krzywa charakterystyczna jest odtwarzana przez punkty interpolacji dla każdego zakresu częstotliwości.

## Detektory logarytmiczne

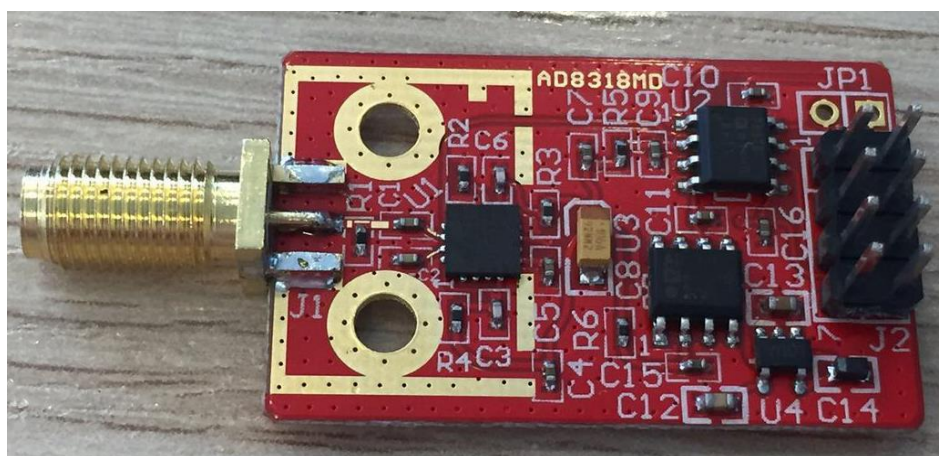
Zintegrowane detektory logarytmiczne są alternatywą dla detektorów diodowych. Przekształcają one moc wejściową RF (INPUT LEVEL w dBm) na liniowy w dB sygnał wyjściowy DC ( $V_{OUT}$  w V). W poniższym przykładzie wyraźnie widać zależność charakterystyki od częstotliwości. Charakterystyka wyjściowa jest bardzo liniowa w szerokim zakresie mocy wejściowej (>60 dB).



Rysunek 4: Krzywa charakterystyczna detektora logarytmicznego

Detektory logarytmiczne firmy Analog Devices są dość powszechne. Są one zwykle wbudowane w 8-pinową obudowę SMD i są łatwe w zastosowaniu. Zakres napięcia zasilania wynosi zwykle od 2,7 do 5,5 V.

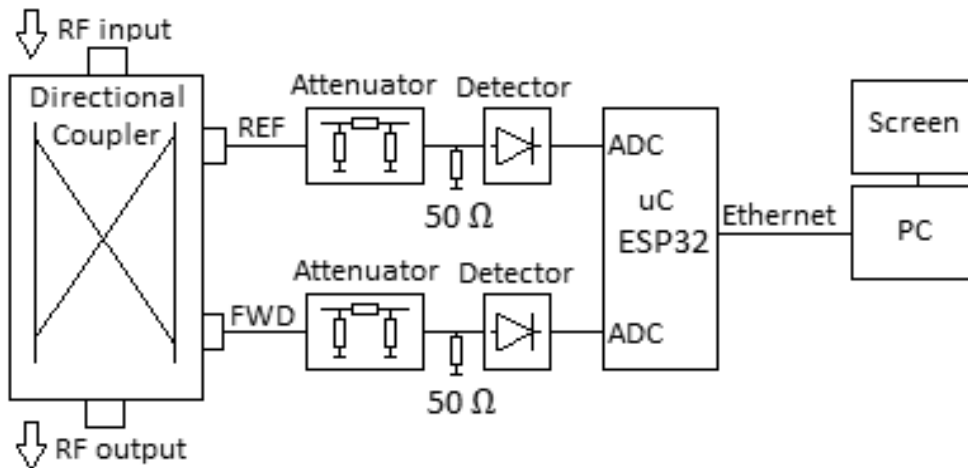
Istnieją dość tanie gotowe płytki z takimi układami scalonymi. Poniżej znajduje się przykład modułu z układem AD8318.



Ilustracja 5: Przykład płytki czujnika z AD8318

## Realizacja

### Koncepcja



Rysunek 6: Schemat blokowy konfiguracji

Sygnaly HF odłączone od sprzęgacza kierunkowego są przekazywane przez tłumiki do detektorów. Przetwarzają one sygnały RF dla FWD do przodu i REF do tyłu na napięcia stałe, które są następnie digitalizowane za pomocą przetworników AD (ADC). Konwersja tych napięć DC (mV) na odpowiadające im moce RF (dBm) odbywa się za pomocą tabel kalibracyjnych (lookup tables), które są przechowywane w mikrokontrolerze. Wreszcie, moc wyjściowa i moc zwrotna mogą być nadal konwertowane z dBm na W:

$$P(W) = 1W \cdot \frac{10^{\frac{P(dBm)}{10}}}{1000} = 10^{\frac{P(dBm)-30}{10}}$$

Strata odbiciowa w dB to różnica między tymi dwiema wartościami (do przodu i do tyłu w dBm). Możemy również obliczyć VSWR na podstawie strat odbiciowych w dB.

Obliczone wartości są udostępniane za pośrednictwem serwera WWW w celu wyświetlenia ich na dowolnym urządzeniu końcowym za pomocą przeglądarki.

### Sprzęt

Do tego projektu wymagany jest następujący sprzęt:

- wt32-eth01 Płytko rozwojowa ze zintegrowanym interfejsem Ethernet
- Adapter USB-Serial (FTDI)
- Sprzęgacze kierunkowe i detektory wysyłające napięcie stałe (od 0 do 3,3 V) proporcjonalne do mocy nadawania i odbioru.
- Skalibrowany miernik mocy do wstępnej regulacji ustawień

## Oprogramowanie / Biblioteki

- Arduino IDE
- Kod projektu: <https://codeberg.org/mclemens/wt32powermeter>
- Biblioteka WebServer\_WT32\_ETH01: [https://github.com/khoih-prog/WebServer\\_WT32\\_ETH01](https://github.com/khoih-prog/WebServer_WT32_ETH01)

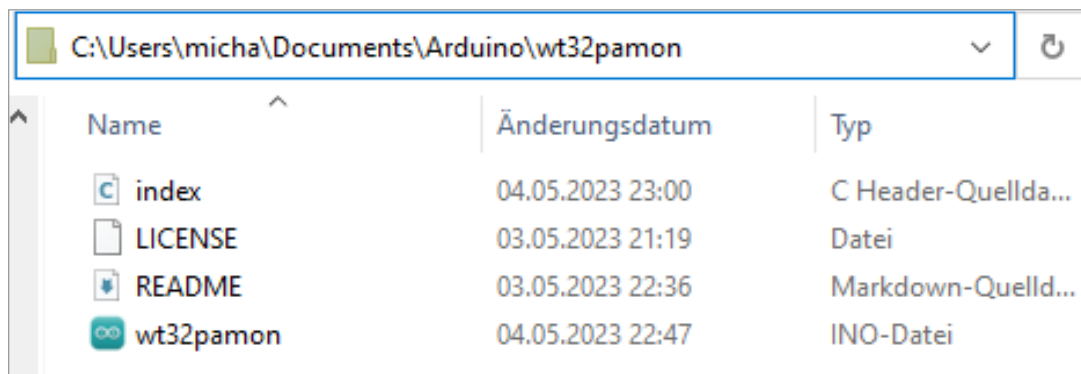
## Instalacja środowiska programistycznego i oprogramowania Arduino

Poniższe kroki są wymagane do skompilowania i przesłania kodu:

- Pobierz i zainstaluj Arduino IDE 2.1: <https://wiki-content.arduino.cc/en/software>
- Postępuj zgodnie z poniższymi instrukcjami, aby zainstalować definicje płytki ESP32: <https://randomnerdtutorials.com/installing-esp32-arduino-ide-2-0/>
- Wybierz odpowiednią płytkę w Arduino IDE: Tools → Board → esp32 → ESP32 Dev Module
- Zainstaluj wszystkie wymagane biblioteki: Narzędzia → Zarządzaj bibliotekami → → Wyszukaj "WebServer\_WT32\_ETH01" → Zainstaluj.

Teraz pobierz i zainstaluj wymagane oprogramowanie:

- Pobierz kod z repozytorium wt32powermeter-respository: <https://codeberg.org/mclemens/wt32powermeter/archive/main.zip>
- Rozpakuj kod do `C:\User\Documents\Arduino`:



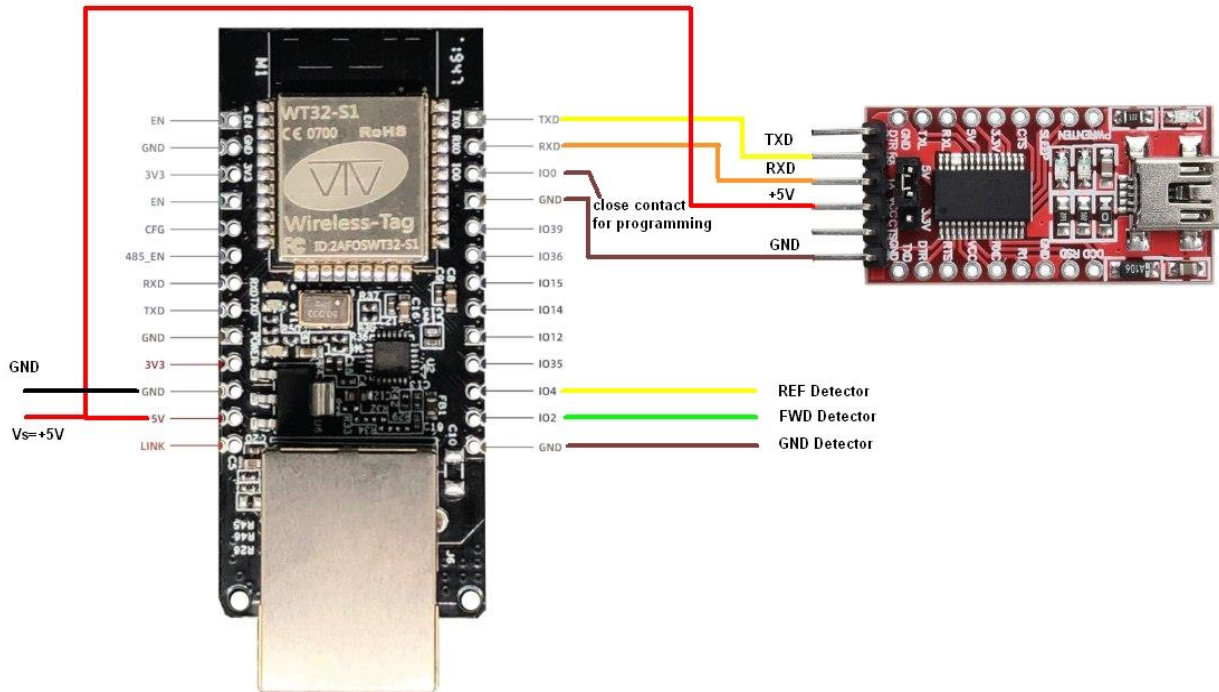
Rysunek 7: Rozpakowywanie oprogramowania

- Otwórz plik `wt32powermeter.ino` w Arduino IDE lub kliknij go dwukrotnie.

## Programowanie płyty

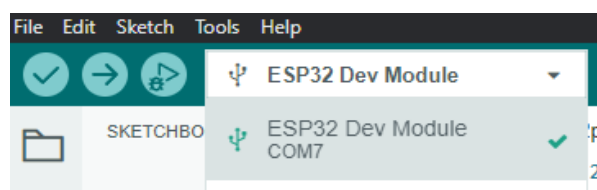
Płyta jest następnie programowana.

- Najpierw podłącz płytkę do adaptera USB-serial zgodnie z poniższą ilustracją i podłącz adapter do komputera przez USB:



Ilustracja 8: Podłączanie adaptera programowania do płytki

- Wybierz właściwy port COM w Arduino IDE: Narzędzia → Port → Wybierz port
- Wybierz "ESP32 Dev Module" jako płytkę:



Rysunek 9: Wybór modułu programistycznego ESP32

- Kliknij "Prześlij" (lewy górny róg, strzałka skierowana w prawo).

Podczas pracy adapter szeregowy USB nie musi być podłączony. Wystarczy podać napięcie zasilania i masę oraz podłączyć trzy styki IO2, IO4 i masę do dwóch detektorów FWD i REF.

Należy pamiętać, że dwa piny IO0 i GND muszą być zmostkowane tylko podczas programowania. Po zakończeniu programowania należy rozłączyć mostek.



## Konfiguracja

Dostosuj poniższe bloki kodu w pliku *wt32powermeter.ino* do swoich potrzeb:

### Ustawienia sieciowe

```
ETH.begin(ETH_PHY_ADDR, ETH_PHY_POWER);  
// Statyczne IP, pozostaw bez tego wiersza, aby uzyskać IP przez DHCP  
//ETH.config(myIP, myGW, mySN, myDNS);  
WT32_ETH01_waitForConnect();
```

Domyślnie wt32powermeter jest skonfigurowany w taki sposób, że mikrokontrolerowi przypisywany jest dynamiczny adres IP przez DHCP. Jeśli jest to pożądane, nie jest wymagane żadne działanie. Jeśli nie, należy usunąć dwa ukośniki na początku linii *ETH.config(myIP, myGW, mySN, myDNS)*, aby uzyskać statyczną konfigurację IP. Ustaw żadaną konfigurację sieci w następnej części kodu źródłowego:

```
// Wybierz adres IP zgodnie z siecią lokalną.  
IPAddress myIP(192.168.1.100);  
IPAddress myGW(192.168.1.1);  
IPAddress mySN(255.255.255.0);  
IPAddress myDNS(192.168.1.1);
```

### Definicja zakresów częstotliwości

Jak wyjaśniono wcześniej, konfiguracja pomiarowa wykazuje zachowanie zależne od częstotliwości. Dlatego zakresy częstotliwości, które mają być używane, można zdefiniować w oprogramowaniu. Aby dodać lub usunąć pasmo, możliwe jest dostosowanie w następującej części kodu źródłowego:

```
String band = "";  
String default_band = "70cm";  
String band_fwd = band + "_fwd";  
String band_ref = band + "_ref";  
String band_list[] = { "1.25cm", "3cm", "6cm", "9cm", "13cm", "23cm", "70cm", "2m",  
"HF" };
```

Dodaj lub usuń pasmo częstotliwości do zmiennej *band\_list[]* zgodnie z wymaganiami i ustaw żądane pasmo domyślne za pomocą *default\_band*.

### Dostęp do interfejsu internetowego

Otwórz preferowaną przeglądarkę i przejdź do *http://<IP\_ADDRESS>*, np. *http://192.168.1.100*.

Adres IP to adres zdefiniowany powyżej lub adres przypisany dynamicznie. Aby dowiedzieć się tego drugiego, możesz zalogować się do routera i poszukać pulpitu nawigacyjnego, który pokazuje wszystkie aktualnie podłączone urządzenia sieciowe. Alternatywnie, możesz aktywować wbudowany monitor szeregowy Arduino IDE z wciąż podłączonym adapterem USB-serial. Za każdym razem, gdy mikrokontroler jest ponownie uruchamiany, wysyła swoją bieżącą konfigurację sieci, między innymi, za pośrednictwem interfejsu szeregowego.

Nowoczesne przeglądarki często próbują wymusić bezpieczne połączenie przez HTTPS. W tym przypadku nie jest to pożądane. Upewnij się, że w wierszu adresu znajduje się *http://*, a nie *https://*.

### Opcje konfiguracji w przeglądarce

Pierwszym krokiem jest skonfigurowanie używanego łącznika kierunkowego wraz z detektorem poprzez kliknięcie przycisku "Configuration" (Konfiguracja) w lewym dolnym rogu ekranu roboczego serwera internetowego (patrz rys. 1 Dashboard). Otworzy się następujący ekran:

<b>Configuration</b>	<b>Band:</b> <span style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 2px 10px;">70cm ▾</span>
<b>Translation Detector Voltage /mV to RF-Power level /dBm</b>	
<b>70cm FWD (mV:dBm)</b>	<b>70cm REF (mV:dBm)</b>
<pre> 70:50.20000 590:49.20000 640:42.20000 760:42.20000 880:42.20000 1000:42.20000 1130:42.20000 1250:42.20000 1380:42.20000 1500:42.20000 1610:2.20000 1730:16.20000 1850:11.20000 1970:6.20000 2000:4.20000 2040:1.20000 2300:1.20000 2500:1.00000 2600:0.89656 2700:0.70000 </pre>	<pre> 60:1.00000 70:3.20000 590:5.20000 640:6.20000 760:7.20000 880:7.70000 1000:8.20000 1130:9.20000 1250:12.20000 1380:14.20000 1500:2.20000 1610:2.20000 1730:1.20000 1850:1.20000 1970:6.20000 2000:4.20000 2040:1.20000 2041:1.22000 </pre>
<span style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px 20px;">Save Calibration Data</span>	
<b>General Configuration Items</b>	
Show voltage in mV (yes/no)	<input checked="" type="checkbox"/>
Show power level in dBm (yes/no)	<input checked="" type="checkbox"/>
Show power in Watt (yes/no)	<input checked="" type="checkbox"/>
VSWR threshold that triggers a warning (e.g. 3)	<input style="width: 80px;" type="text" value="2"/>
Beep if VSWR threshold is exceeded (yes/no)	<input type="checkbox"/>
Name of the antenna	<input style="width: 150px;" type="text" value="Diamond X200"/>
Max. FWD power displayed by LED bar graph in W (e.g. 100)	<input style="width: 80px;" type="text" value="150"/>
Max. REF power displayed by LED bar graph in W (e.g. 100)	<input style="width: 80px;" type="text" value="100"/>
Max. VSWR displayed by LED bar graph (e.g. 3)	<input style="width: 80px;" type="text" value="3"/>
Show LED graph for FWD power (yes/no)	<input checked="" type="checkbox"/>
Show LED graph for REF power (yes/no)	<input checked="" type="checkbox"/>
Show LED graph for VSWR (yes/no)	<input checked="" type="checkbox"/>
Cable loss in db (e.g. 3)	<input style="width: 80px;" type="text" value="3"/>
<span style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px 20px;">Save Configuration</span>	
<a href="#">Back to Dashboard</a> - Version: 0.9.4	

Rysunek 10: Wyświetlanie konfiguracji na ekranie

### Utrzymanie danych kalibracyjnych

Najpierw wybierz pasmo częstotliwości, dla którego chcesz wprowadzić dane kalibracji w prawym górnym polu rozwijanym "Pasma".

Wstępnie ustawione wartości danych kalibracji są jedynie przykładowe i należy je zastąpić własnymi wartościami dla indywidualnej konfiguracji. Aby to zrobić, wprowadź pary wartości mV:dBm dla FWD i REF i kliknij "Zapisz dane kalibracji".

Dane można wprowadzać w dowolnym wierszu, ręczne sortowanie par wartości nie jest konieczne. Po zapisaniu danych są one automatycznie sortowane i prawidłowo wyświetlane.

### Ogólne elementy konfiguracji

Dla każdego pasma częstotliwości dostępne są następujące ogólne opcje konfiguracji:

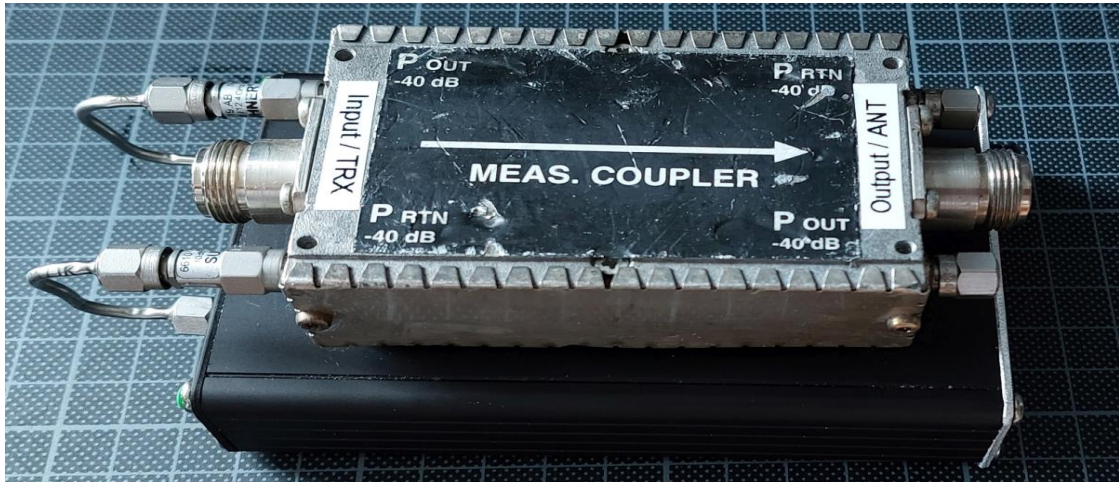
<b>Parametr</b>	<b>Funkcja</b>
<b>Pokaż napięcie w mV (tak/nie)</b>	Aktywuje lub dezaktywuje wyświetlanie zmierzonego napięcia
<b>Pokaż poziom mocy w dBm (tak/nie)</b>	Aktywuje lub dezaktywuje wyświetlanie zmierzonego poziomu mocy w dBm
<b>Pokaż moc w watach (tak/nie)</b>	Aktywuje lub dezaktywuje wyświetlanie zmierzonej mocy w watach
<b>Próg VSWR uruchamiający ostrzeżenie (np. 3)</b>	Każda obliczona wartość, która przekracza skonfigurowaną wartość, skutkuje ostrzeżeniem wizualnym i opcjonalnie dźwiękowym
<b>Sygnal dźwiękowy po przekroczeniu progu VSWR (tak/nie)</b>	Po przekroczeniu ustawionego powyżej progu rozlegnie się sygnał dźwiękowy. (Nie działa ze wszystkimi przeglądarkami)
<b>Nazwa anteny</b>	Dowolnie definiowalna nazwa anteny dla tego pasma
<b>Maks. Moc FWD wyświetlana na wykresie słupkowym LED w W (np. 100)</b>	Ustawia górną granicę paska LED dla obliczonej mocy FWD
<b>Maks. Moc REF wyświetlana na wykresie słupkowym LED w W (np. 100)</b>	Ustawia górną granicę paska LED dla obliczonej mocy REF
<b>Maks. VSWR wyświetlany na wykresie słupkowym LED (np. 3)</b>	Ustawia górną granicę wykresu słupkowego LED dla VSWR
<b>Wyświetlanie wykresu LED mocy FWD (tak/nie)</b>	Aktywuje lub dezaktywuje grafikę LED dla mocy FWD, która jest wzorowana na mierniku VU.
<b>Wyświetlanie wykresu LED mocy REF (tak/nie)</b>	Aktywuje lub dezaktywuje grafikę LED dla mocy REF, która jest wzorowana na mierniku VU.
<b>Pokaż wykres LED dla VSWR (tak/nie)</b>	Aktywuje lub dezaktywuje grafikę LED dla VSWR, która jest wzorowana na mierniku VU.
<b>Tłumienie kabla w dB (np. 3)</b>	Ustawia tłumienie kabla między DUT i zdalnym miernikiem.

Po wprowadzeniu żądanych zmian kliknij przycisk "Zapisz konfigurację".

## Przykłady

### Konfiguracja #1 Sprzęgacz kierunkowy ERICSSON i czujniki AD8318

Konfiguracja #1 jest wykonana się na sprzęgaczu kierunkowym firmy ERICSSON, 2 płytkach z detektorami logarytmicznymi AD8318 i module uC WT32-S1 ze zintegrowanym interfejsem Ethernet.

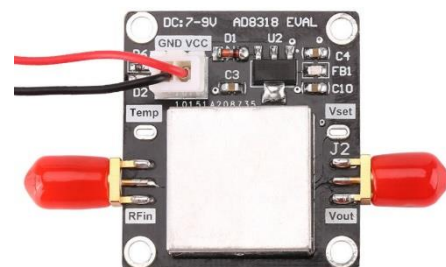


Ilustracja 11: Konfiguracja #1 ze sprzęgaczem kierunkowym firmy ERICSSON i czujnikami z AD8318

Sprzęgacz kierunkowy ma zależne od częstotliwości tłumienie sprzężenia  $D_{FWD}$  i  $D_{REF}$ . Oprócz tych wartości, kierunkowość  $DIR$  i tłumienność wtrąceniowa  $IL$  są również wymienione w poniższej tabeli.

Frequency /MHz	$D_{FWD}$ /dB	$D_{REF}$ /dB	$DIR$ /dB	$IL$ /dB
145	60,5	60,2	25,4	<0,05
435	51,2	51,0	26,8	<0,05
1296	42,3	42,5	38,1	<0,05
2400	38,6	38,7	30,9	<0,05

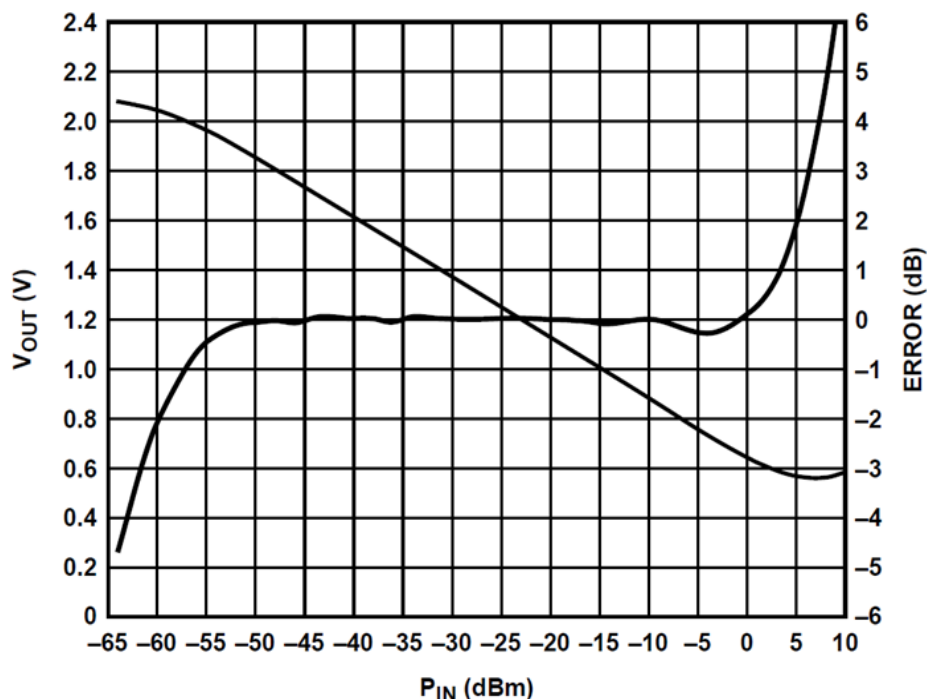
Detektory logarytmiczne AD8318 mają liniowy zakres dynamiki od -57 dBm do +3 dBm. Zakres dynamiki wynosi zatem 60 dB. Zakres częstotliwości obejmuje od 1 MHz do 8 GHz. Napięcie wyjściowe DC  $V_{OUT}$  maleje wraz ze wzrostem poziomu wejściowego RF. Nachylenie wynosi -25 mV/dB. Charakterystyka różni się przy różnych częstotliwościach i zależy od temperatury.



Ilustracja 12: Moduł czujnika z ekranowanym AD8318

Zależność od temperatury wynosi tylko 0,5 dB. Układ scalony zapewnia napięcie odniesienia zależne od temperatury, za pomocą którego można w razie potrzeby zrealizować kompensację temperatury za pomocą oprogramowania. Nie jest to jednak tutaj wykorzystywane.

Oprogramowanie może współpracować z detektorami logarytmicznymi o dodatnim lub ujemnym nachyleniu krzywej charakterystycznej. Oto typowa krzywa charakterystyki AD8318.



Rysunek 13: Typowa charakterystyka AD8318 przy częstotliwości 5,8 GHz

Przy mocy nadawania  $14 \text{ W} = 41,5 \text{ dBm}$  i stratach sprzężenia w paśmie 13 cm wynoszących  $38,6 \text{ dB}$ , poziom wejściowy na detektorze wynosiłby  $3,1 \text{ dBm}$ , tj. na górnej granicy zakresu wyjściowego AD8318.

Aby móc mierzyć wyższe poziomy mocy, pomiędzy wyjścia pomiarowe sprzęgacza kierunkowego i wejścia AD8318 wstawiono tłumik  $10 \text{ dB}$ . Zwiększa to maksymalny poziom wejściowy w paśmie 13 cm do  $140 \text{ W}$ .

Wykorzystując zakres dynamiki AD8318, teoretyczne maksymalne i minimalne poziomy wejściowe, które można zmierzyć za pomocą sprzęgacza kierunkowego ERICSSON z dodatkowymi tłumikami  $10\text{dB}$  są następujące:

Maksymalne poziomy wejściowe:

Frequenz /MHz	max. FWD-Power /dBm	max. FWD-Power /W	max. REF-Power /dBm	max. REF-Power /W
145	73,5	22400	73,2	20900
435	64,2	2600	64,0	2500
1296	55,2	330	55,5	350
2400	51,6	145	51,7	148

Maksymalna moc, dla której sprzęgacz kierunkowy jest odpowiedni, nie została jeszcze zbadana. Niestety, arkusz danych dla tego modelu nie jest dostępny. Ze względu na niską tłumienność wtrąceniową i wysokie tłumienie sprzężenia, zakłada się, że konfiguracja jest odpowiednia dla mocy do  $500 \text{ W}$  w paśmie 2 m i do  $150 \text{ W}$  w paśmie 13 cm. W paśmie 2 m można było już zmierzyć  $100 \text{ W}$  bez żadnych problemów, co zostanie pokazane później.



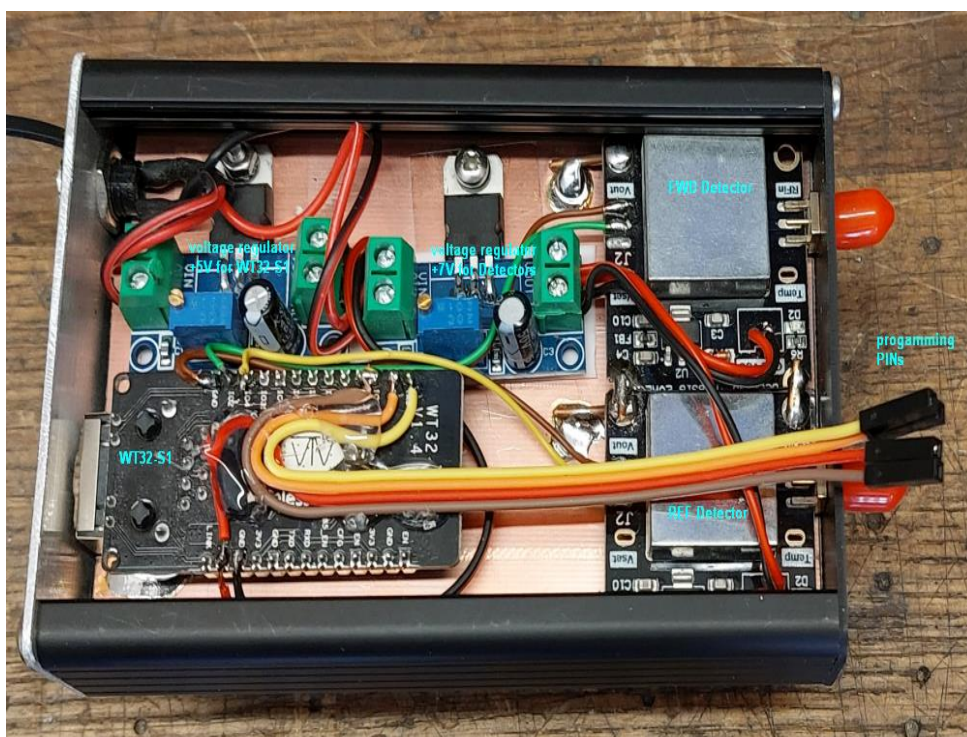
Minimalne poziomy wejściowe:

Frequenz /MHz	min. FWD-Power /dBm	min. FWD-Power /mW	min. REF-Power /dBm	min. REF-Power /mW
145	13,5	22,4	13,2	20,9
435	4,2	2,6	4,0	2,5
1296	-4,8	0,33	-4,5	0,35
2400	-8,4	0,145	-8,3	0,148

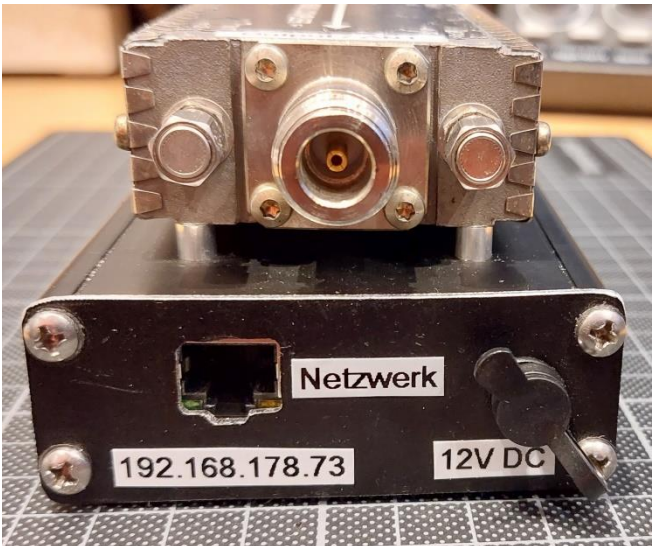
Jeśli uwzględniona zostanie zależna od częstotliwości kierunkowość sprzęgacza kierunkowego i wykorzystana zostanie pełna dokładność pomiarowa sprzęgacza kierunkowego, uzyskane zostaną następujące minimalne poziomy transmisji:

Frequenz /MHz	min. FWD-Power /dBm	min. FWD-Power /W
145	38,6	7,1
435	30,8	1,2
1296	33,6	2,3
2400	22,6	0,18

Oznacza to, że jeśli poziom nadawania w paśmie 13 cm jest mniejszy niż 0,18 W, moc wyjściowa jest mierzona prawidłowo (do 0,145 mW), ale moc odbita nie byłaby już wykrywana przy bardzo dobrze dopasowanej antenie (z tłumieniem powrotnym lepszym niż 30,9 dB). Tak więc pomiar VSWR nie jest już poprawny, VSWR jest wyświetlany gorzej niż w rzeczywistości.

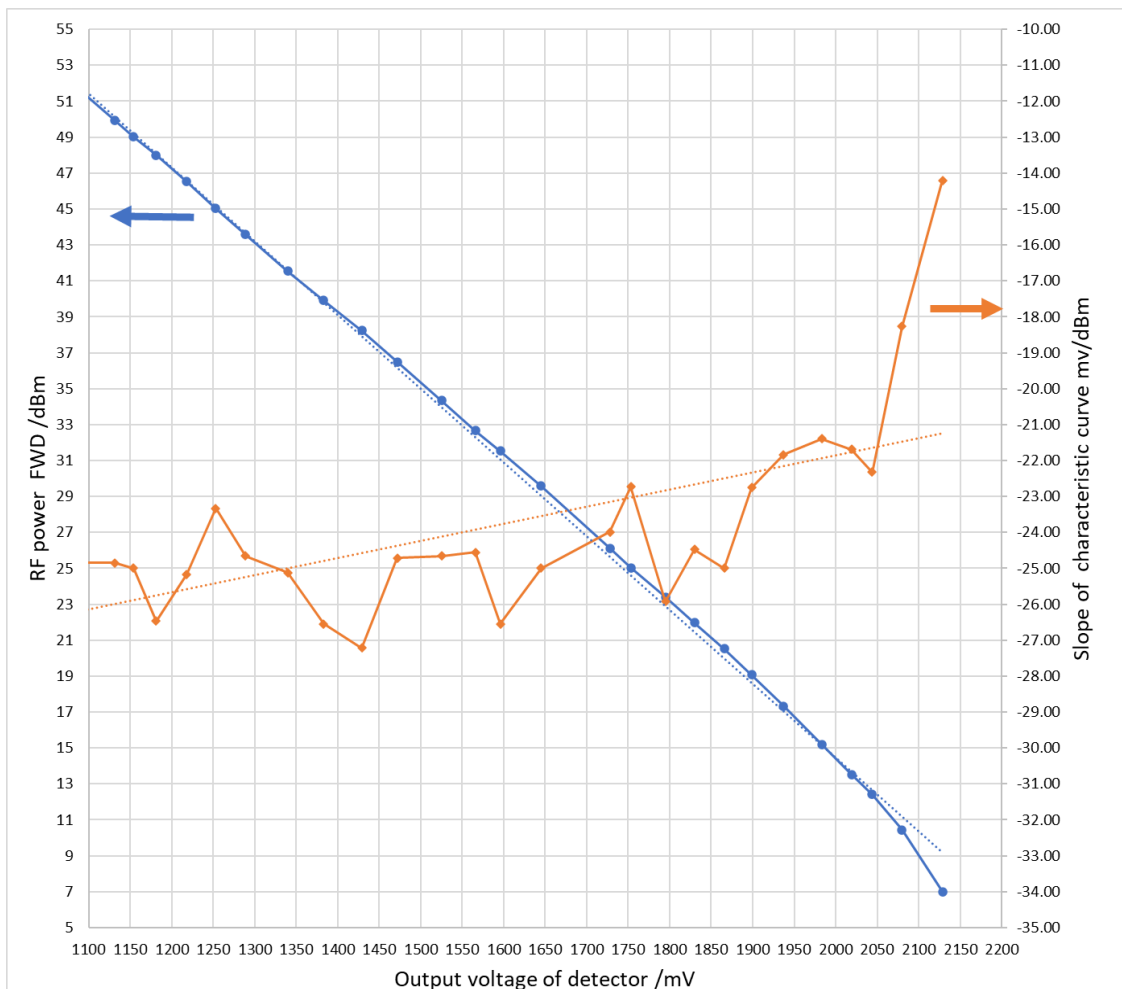


Ilustracja 14: Widok wnętrza konfiguracji z płytką ESP32, 2 płytkami detektorów i 2 regulatorami napięcia



Rysunek 15: Połączenia zdalnego miernika VSWR i mocy Rysunek 16: Połączenia zdalnego miernika VSWR i mocy

Poniżej przedstawiono przykład krzywej charakterystycznej konfiguracji zmierzonej przy częstotliwości 145 MHz. Maksymalna moc 50 dBm (100 W) była ograniczona mocą wyjściową używanego nadajnika.



Rysunek 17: Charakterystyka wyjściowa detektora w funkcji mocy RF na wejściu sprzęgacza kierunkowego

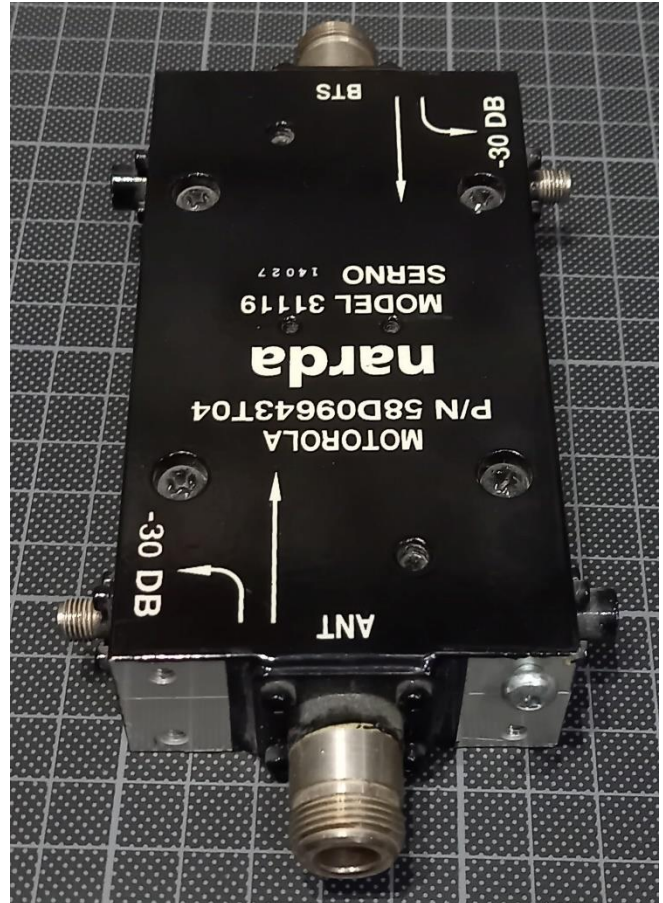


## Konfiguracja #2 Sprzęgacz kierunkowy NARDA i detektory AD8313

W drugim zestawie zastosowano sprzęgacz kierunkowy firmy NARDA o oznaczeniu typu 31119. Zgodnie z nadrukiem, ten sprzęgacz kierunkowy był oczywiście używany przez Motorolę w stacjach bazowych.



Rysunek 18: Łącznik kierunkowy NARDA 31119



Rysunek 19: Łącznik kierunkowy NARDA 31119

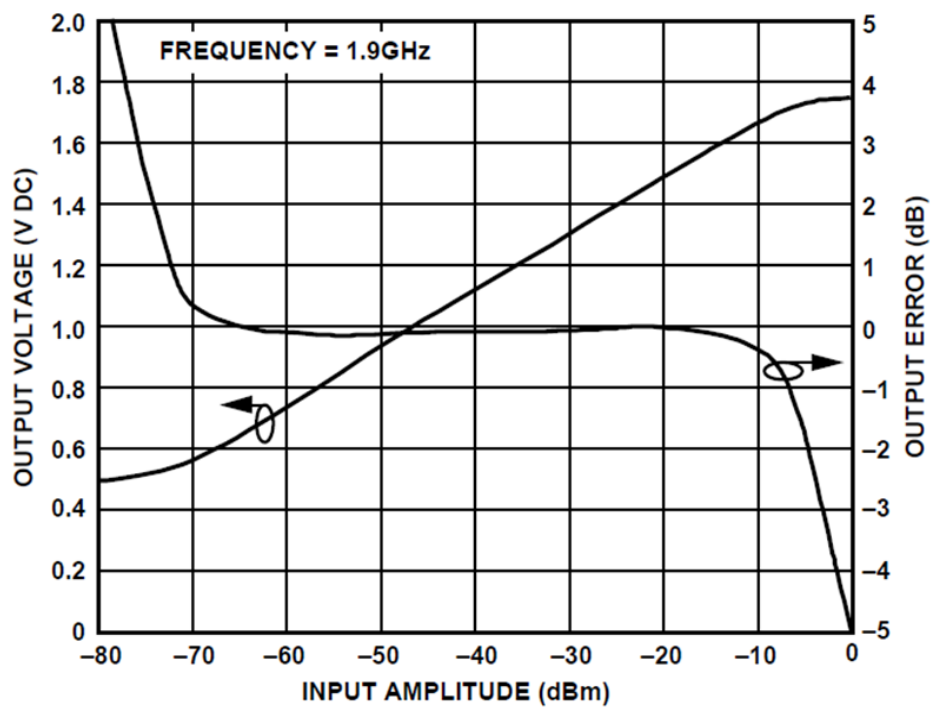
Tym razem zastosowano detektory logarytmiczne typu AD8313. Odpowiednie gotowe płytki można również tanio znaleźć w sklepach internetowych.



Ilustracja 20: Płytki czujki z AD8313

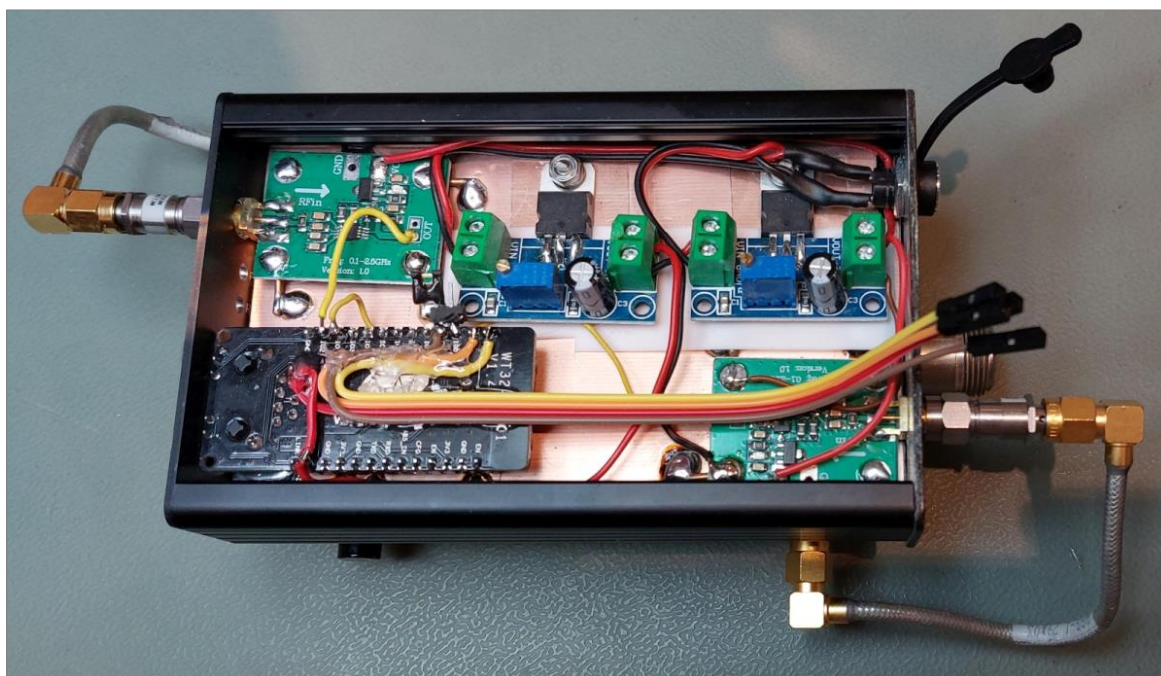
AD8313 ma liniowy zakres dynamiki od -75 dBm do -5 dBm. Zakres dynamiki wynosi zatem 70 dB. Zakres częstotliwości obejmuje od 100 MHz do 2,5 GHz.

W przypadku AD8313 napięcie wyjściowe DC wzrasta wraz ze wzrostem poziomu wejściowego RF. Zakres napięcia wyjściowego DC od 0,5 V do 1,75 V jest nieco mniejszy niż w przypadku AD8313.



Rysunek 21: Typowa charakterystyka AD8313 przy częstotliwości 1,9 GHz

Wykresy charakterystyki tego tańszego detektora wykazują nieco większą zależność od częstotliwości i temperatury. Do naszych celów amatorskich są pomijalne i wystarczające, bo zastosowań.



Ilustracja 22: Widok wnętrza obudowy z płytkami AD8313

Poniżej przedstawiono przykład danych kalibracyjnych dla zdalnego miernika VSWR i mocy w paśmie 70 cm:

## Configuration

Band Selection

70cm

Translation Detector voltage /mV to RF-Power level /dBm

### FWD

millivolt (mV)	decibel-milliwatts (dBm) Watt	Action
594	-7.000	0.00020 <a href="#">delete</a>
602	-4.600	0.00035 <a href="#">delete</a>
620	-1.600	0.00069 <a href="#">delete</a>
650	0.000	0.00100 <a href="#">delete</a>
663	1.800	0.00151 <a href="#">delete</a>
672	3.000	0.00200 <a href="#">delete</a>
709	5.200	0.00331 <a href="#">delete</a>
740	7.000	0.00501 <a href="#">delete</a>
784	9.000	0.00794 <a href="#">delete</a>
801	10.000	0.01000 <a href="#">delete</a>
857	13.000	0.01995 <a href="#">delete</a>
891	14.800	0.03020 <a href="#">delete</a>
915	16.000	0.03981 <a href="#">delete</a>
957	18.300	0.06761 <a href="#">delete</a>
1117	23.000	0.19953 <a href="#">delete</a>
1145	24.800	0.30200 <a href="#">delete</a>
1185	27.800	0.60256 <a href="#">delete</a>
1210	29.000	0.79433 <a href="#">delete</a>
1262	32.600	1.81970 <a href="#">delete</a>
1297	34.800	3.01995 <a href="#">delete</a>
1328	36.500	4.46684 <a href="#">delete</a>
1373	38.500	7.07946 <a href="#">delete</a>
1401	40.000	10.00000 <a href="#">delete</a>
1433	41.900	15.48817 <a href="#">delete</a>
1458	43.000	19.95262 <a href="#">delete</a>
1490	44.800	30.19951 <a href="#">delete</a>
1502	45.400	34.67370 <a href="#">delete</a>
1533	47.000	50.11872 <a href="#">delete</a>
1550	48.100	64.56540 <a href="#">delete</a>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<a href="#">add/edit</a>

### REF

millivolt (mV)	decibel-milliwatts (dBm) Watt	Action
596	-7.000	0.00020 <a href="#">delete</a>
600	-4.600	0.00035 <a href="#">delete</a>
620	-1.600	0.00069 <a href="#">delete</a>
629	-0.200	0.00095 <a href="#">delete</a>
664	3.000	0.00200 <a href="#">delete</a>
685	4.300	0.00269 <a href="#">delete</a>
717	6.200	0.00417 <a href="#">delete</a>
729	7.000	0.00501 <a href="#">delete</a>
771	9.000	0.00794 <a href="#">delete</a>
820	11.800	0.01514 <a href="#">delete</a>
847	13.000	0.01995 <a href="#">delete</a>
894	15.400	0.03467 <a href="#">delete</a>
918	17.000	0.05012 <a href="#">delete</a>
942	18.300	0.06761 <a href="#">delete</a>
1104	23.000	0.19953 <a href="#">delete</a>
1134	24.800	0.30200 <a href="#">delete</a>
1173	27.300	0.53703 <a href="#">delete</a>
1197	29.300	0.85114 <a href="#">delete</a>
1231	31.600	1.44544 <a href="#">delete</a>
1268	34.000	2.51189 <a href="#">delete</a>
1303	36.000	3.98107 <a href="#">delete</a>
1332	38.500	7.07946 <a href="#">delete</a>
1368	40.000	10.00000 <a href="#">delete</a>
1404	41.800	15.13561 <a href="#">delete</a>
1433	43.100	20.41737 <a href="#">delete</a>
1466	44.800	30.19951 <a href="#">delete</a>
1480	45.400	34.67370 <a href="#">delete</a>
1502	46.500	44.66836 <a href="#">delete</a>
1509	47.000	50.11872 <a href="#">delete</a>
1530	48.100	64.56540 <a href="#">delete</a>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<a href="#">add/edit</a>

Rysunek 23: Przykład tabeli danych kalibracyjnych w paśmie 70 cm

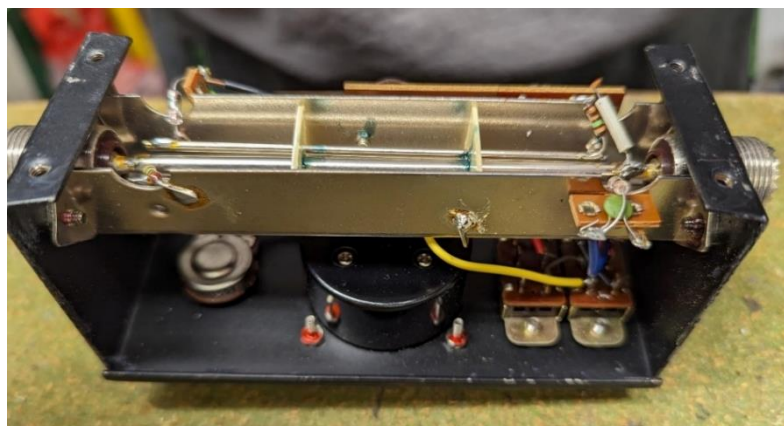


### Struktura #3 Sprzęgacz kierunkowy ze starego miernika VSWR z wbudowanymi diodami detektora

Podstawą tej konfiguracji jest stary VSWR/Powermeter dla fal krótkich, z którego wykorzystano sprzęgacz kierunkowy ze zintegrowanymi diodami detektora.



Rys. 24: Stary VSWR/miernik mocy dla fal krótkich



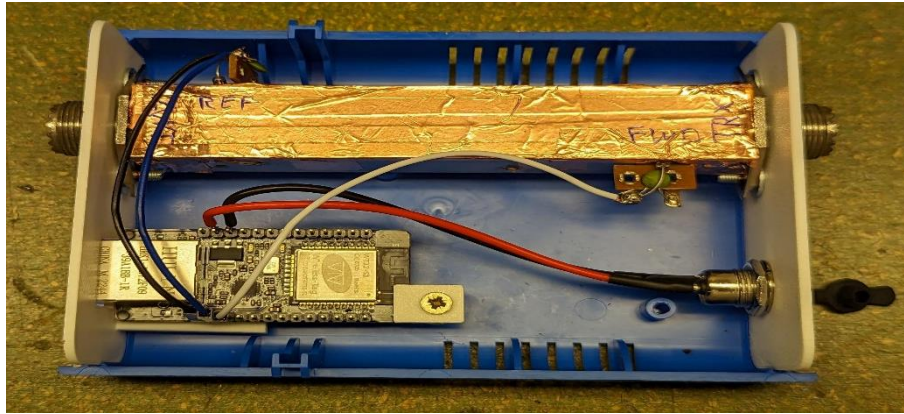
Rysunek 25: Sprzęgacz kierunkowy ze zintegrowanymi diodami detektora znajdujący się w mierniku VSWR.

Otwarta strona sprzęgacza została pokryta folią miedzianą, dla poprawienia ekranowania.

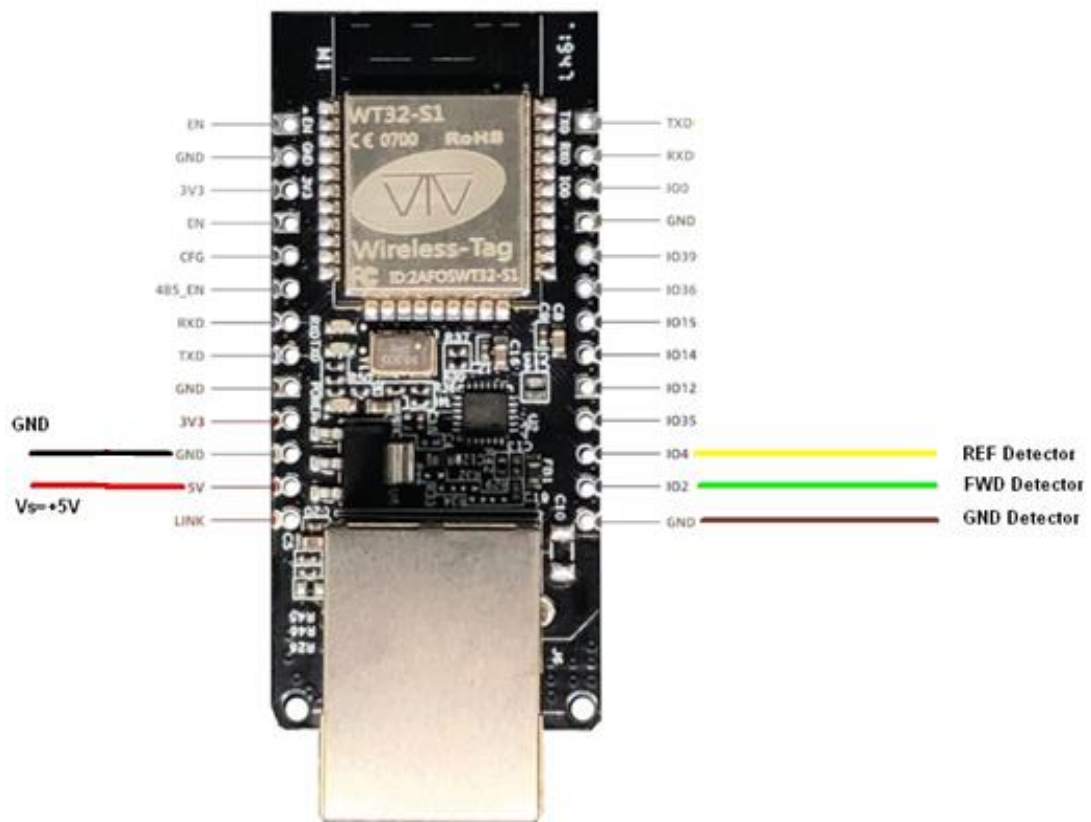


Ilustracja 26: Zdemontowany sprzęgacz kierunkowy z dodatkowym ekranowaniem

Złącze kierunkowe idealnie pasuje do ulubionej obudowy uniwersalnej Michaela (Donau Elektronik - KGB15 Euro Box small, Blue, 95x135x45).



Ilustracja 27: Sprzęgacz kierunkowy i płytka mikrokontrolera w obudowie



Rysunek 28: Schemat połączeń płytki mikrokontrolera



Ilustracja 29: Panel przedni i panel tylny został wyprodukowany przy użyciu druku 3D

Kalibracja zostanie ponownie wyjaśniona na przykładzie tej konfiguracji:

1. Podłącz komponenty pomiarowe w następujący sposób: Transceiver -> Zdalny miernik VSWR > Znany miernik mocy -> Sztuczne obciążenie 50om
2. Ustaw radiotelefon na żądane pasmo, tryb pracy FM
3. Ustaw moc na 1 W, naciśnij PTT, odczytaj zmierzoną mocy znanego miernika mocy i mierzone napięcie zdalnego miernika VSWR i wprowadź je do tabeli kalibracji. Tabela ta odnosi się do pomiaru FWD.
4. Powtórz krok 3, stopniowo zwiększając moc nadawania, aż do osiągnięcia mocy maksymalnej nadajnika
5. Rozłącz zdalny miernik VSWR. Zamień podłączenie IN z OUT. Podajemy moc na wyjście (OUT) przyrządu a wejście (IN) podłączamy do znanego miernika mocy.
6. Powtórz kroki 3 i 4, aby wygenerować kolejną tabelę REF.
7. Oblicz wartości dBm dla każdej zmierzonej mocy w tabelach:
8. Wzór 
$$P_{(\text{dBm})} = 10 \cdot \log_{10}(1000 \cdot P_{(\text{W})} / 1\text{W})$$
9. Teraz powinieneś mieć dwie tabele z parami wartości w formacie mV:dBm
10. Wpisz wartości obu tabel do strony konfiguracji zdalnego miernika VSWR i mocy.
11. Jeśli masz tabele dostępne w formie elektronicznej, np. w programie Excel, jest to szczególnie łatwe do wykonania poprzez kopiowanie i wklejanie.

## Podsumowanie

Zaprezentowano rozwiązanie zdalnego miernika VSWR i mocy. Dzięki uniwersalnemu interfejsowi Ethernet i zintegrowanemu serwerowi WWW, jednostka pomiarowa może być konfigurowana i odczytywana z dowolnego urządzenia końcowego za pomocą przeglądarki.

Koncepcja ta obsługuje dowolne sprzęgacze kierunkowe i detektory, a zatem oferuje idealną platformę eksperymentalną od fal krótkich do zakresu GHz.

Te i inne informacje można znaleźć tutaj:

<https://dk1mi.radio/remote-power-meter/>

<https://www.dd1us.de>

Aktualną wersję oprogramowania można znaleźć w kodzie źródłowym tutaj:

<https://codeberg.org/mclemens/wt32powermeter/>