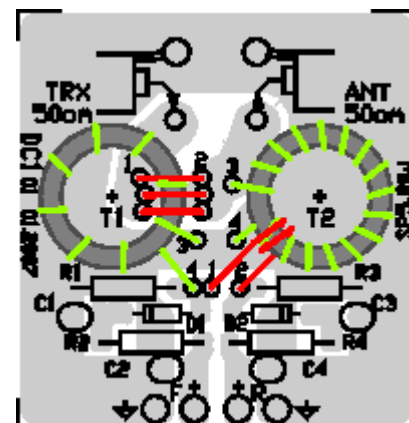


Większość fabrycznych reflektometrów jest przewidziana do pomiarów przy mocy rzędu dziesiątek i setek watów, więc ich dokładność przy kilku watach mocy w antenie jest niewystarczająca. Rozwiązaniem może być budowa własnego reflektometru, przewidzianego specjalnie do pracy przy małych mocach (QRP). Opisany układ jest dość prosty i tani. Można go wykorzystać do budowy miernika WFS i mocy lub do modernizacji fabrycznego reflektometru np. na pasmo CB. Artykuł poświęcony jest przede wszystkim zasadzie działania układu i metodom skalowania, pozostawiając szczegółowe rozwiązania obudowy i montażu inwencji konstruktorów.



### Sprzęgacz kierunkowy.

Najważniejszą częścią reflektometru jest sprzęgacz kierunkowy umożliwiający pomiar mocy padającej i odbitej w linii transmisyjnej. Do swojego projektu wybrałem znany układ "Tandem match" zbudowany na dwóch transformatorach szerokopasmowych z tradycyjnymi diodowymi detektorami szczytowymi. Sprzęgacz na dwóch transformatorach ma bardzo istotne zalety; prostą budowę i nie wymaga strojenia. Konstrukcja transformatorów musi jednak być dobrze przemyślana. Jeden z nich (TR1 o przekładni 1:8) jest transformatorem prądowym. Przez jego uzwojenie pierwotne płynie prąd mierzonej linii transmisyjnej. Drugi z transformatorów (TR2 o przekładni 8:1) jest transformatorem napięciowym, którego uzwojenie pierwotne jest włączone między wyjście a masę sprzęgacza. Wybrana przekładnia transformatorów pozwala mierzyć dokładnie WFS od mocy ok. 1,5W. Im większa przekładnia, tym mniejsza czułość układu ale również mniejszy wpływ sprzęgacza na mierzoną linię. Połączone uzwojenia wtórne transformatorów są obciążone dwoma rezystorami 51om (R1, R3). Na tych rezystorach odkładają się napięcia w.cz. zależne do mocy padającej i odbitej. Wielkość napięcia na rezystorach i tym samym wydzielona moc zależy od przekładni transformatorów. W tym układzie na rezystorze R3 będzie się wydzielać ok. 1/64 mocy padającej w linii, co oznacza tłumienie teoretyczne sprzęgacza mniejsze od 0,1dB. Stąd też wynika obciążalność rezystorów, która dla zakresu 10W powinna wynosić 0.25W.



Do każdego z rezystorów obciążających dołączony jest detektor szczytowy z układem filtrującym. Na wyjściach modułu otrzymujemy dwa napięcia stałe odpowiadające mocy padającej i odbitej w mierzonej linii. Dla przełożenia transformatorów 1:8 uzyskujemy napięcie wyjściowe rzędu 3,75V dla mocy 10W i 1,1V przy 1W. Przy niższych mocach napięcie, zwłaszcza na wyjściu fali odbitej staje się porównywalne z napięciem przewodzenia diod i dokładność pomiaru spada znacznie. Jeżeli przyrząd został wyskalowany przy mocy 5W, to moc ok. 1.5W jest dolną granicą, przy której błędy odczytu WFS nie powinny przekroczyć 10% w punkcie skali WFS=1.5.

Opisany układ ma płaską charakterystykę w zakresie 3,5-30MHz. Przy częstotliwościach 1.8 oraz 50MHz wykazuje nieznaczne pogorszenie parametrów.

Wszystkie elementy sprzęgacza mieszczą się na jednej, miniaturowej płytce drukowanej DC1. Układ jest prosty, więc równie dobrze można go zmontować „w powietrzu” na kawałku laminatu, pamiętając o zapewnieniu dużej powierzchni masy i jak najkrótszym połączeniu wejścia TRX z wyjściem ANT.

## Transformatory.

Konstrukcja transformatorów decyduje o parametrach całego sprzęgacza. Ich uzwojenia powinny mieć dostateczną indukcyjność, której reaktancja na najniższej częstotliwości powinna być znacznie większa od wartości 50 $\Omega$ . Liczba zwojów powinna być jednak jak mała, aby nie pogorszyć parametrów na wyższych częstotliwościach. Rdzenie transformatorów powinny więc mieć dużą przenikalność.

Oba transformatory są nawinięte na rdzeniach toroidalnych Amidon FT50-43. Transformator TR1 (1:8) ma uzwojenie pierwotne jednozwojowe złożone z trzech równoległych przewodów izolowanych. Poprawia to pracę transformatora przy dużych częstotliwościach. Uzwojenie wtórne ma 8 zwojów drutu 0.2-0.5mm, rozłożonych na całym obwodzie rdzenia. Uzwojenie pierwotne, dla zmniejszenia sprzężenia pojemnościowego jest nawinięte na "zimnym" końcu uzwojenia wtórnego (na tym końcu, który łączy się z masą). Transformator TR2 ma zwiększoną ilość zwojów, aby jego uzwojenie pierwotne (16zw drutu 0.2-0.5mm na całym obwodzie rdzenia) miało dostateczną reaktancję poniżej 3,5MHz. W tym transformatorze uzwojenie wtórne (2zw. drutu izolowanego) również jest nawinięte na "zimnym" końcu uzwojenia pierwotnego. Przy nawijaniu i lutowaniu transformatorów trzeba zwrócić uwagę na kierunki uzwojeń. Są one oznaczone na schemacie oraz na płytce.

## Detektory szczytowe.

Na płytce są dwa identyczne detektory; mocy padającej i odbitej. Można w nich stosować dowolne małosygnałowe diody Schottky'ego lub germanowe diody ostrzowe. Napięcie progowe stosowanych diod wyznacza czułość detektorów. Stąd właśnie wynika dolne ograniczenie mocy, przy której układ zachowa użyteczność. Jeśli zachodzi potrzeba zwiększenia czułości można na wyjściach detektorów zastosować wzmacniacze z kompensacją napięcia przewodzenia diod.

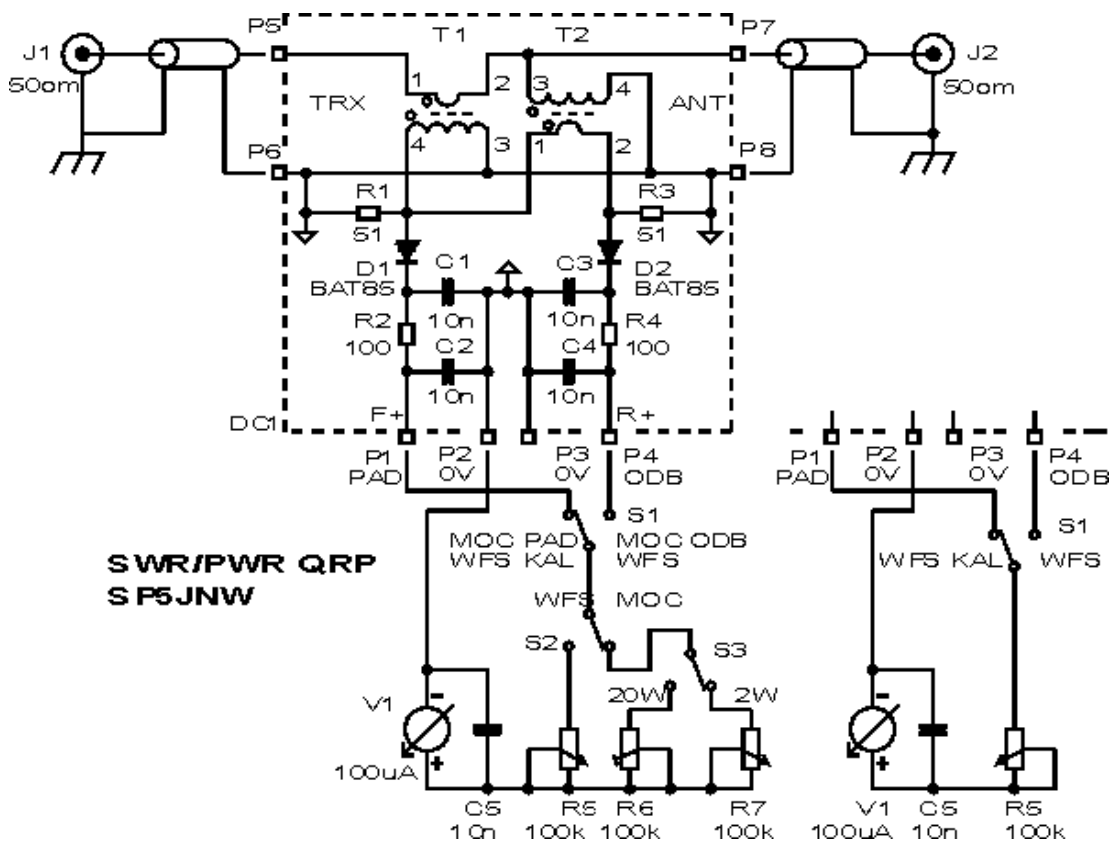
## Układ reflektometru.

Wykonanie reflektometru z użyciem modułu DC-1 wymaga w najprostszym przypadku dołączenia gniazd wejścia i wyjścia, potencjometru do kalibracji, przełącznika i mikroamperomierza. Wejście i wyjście w.cz. najlepiej podłączyć przewodem współosiowym 50 $\Omega$ , nawet na odcinku kilku centymetrów, od płytki do gniazd. Wyjścia napięć stałych mogą być podłączone przewodami nieekranowanymi. Płytką modułu doskonale mieści również się w obudowach małych, popularnych reflektometrów CB. Modyfikując taki przyrząd trzeba usunąć oryginalną płytkę sprzęgacza i zamiast niej umocować moduł DC-1. Oryginalne przewody wystarczy podłączyć do nowej płytki.

Moduł można wykorzystać do pomiaru WFS i pomiaru mocy. Schemat pokazuje dwa warianty. Pierwszy z pomiarem mocy wymaga dwóch przełączników i dwóch potencjometrów. Przełącznik S1 dołącza układ pomiarowy do wyjścia mocy padającej lub odbitej. Drugi z przełączników – S2 - pozwala wybrać pomiar WFS, przy którym używa się do regulacji pełnego wychylenia potencjometru R5 wyprowadzonego na płytę czołową lub pomiar mocy kalibrowany potencjometrem montażowym R6. Jeśli potrzebujemy kilku zakresów pomiaru mocy to należy dodać przełącznik S3 przełączający potencjometry do kalibracji każdego zakresów. Przełączanie można też rozwiązać przy pomocy jednego przełącznika obrotowego 2x4.

W wersji uproszczonej, wyłącznie do pomiaru WFS potrzebny jest tylko przełącznik S1 i potencjometr regulacyjny R5.

Opisany układ jest klasycznym rozwiązaniem reflektometru z ręczną kalibracją przy pomiarze WFS. Proponuję go jako rozwiązanie najprostsze i najtańsze, a zarazem gwarantujące wiarygodne wyniki pomiaru przy podanym sposobie wykonania i wzorcowania. Znanych jest oczywiście wiele układów mikroprocesorowych ze scalonymi detektorami napięcia w.cz. i bezpośrednim, cyfrowym odczytem wartości WFS i mocy ale są to układy dużo bardziej złożone i kosztowne. Ich zaletą jest owszem możliwość pomiaru na poziomie miliwatów ale dokładność i tak zależy od kalibracji, jaką w warunkach amatorskich możemy wykonać.



## Wskaźnik i jego skalowanie.

W swoim opisie przewiduję użycie wskaźnika wychyłowego, który łatwo samodzielnie wyskalować. Im większa czułość wskaźnika, tym lepiej. Mikroamperomierze o zakresie 100uA są do zdobycia i nadają się doskonale. Mierniki o zakresie 500uA też będą dobre jeśli operujemy mocami 5-10W. Takie wskaźniki są w szukaczach sygnału satelitarnego, które też nadają się do przeróbki na miernik WFS.

Jeżeli modyfikujemy gotowy reflektometr (np. CB), to wyskalowany mikroamperomierz mamy już gotowy. Najlepiej znaleźć miernik, który ma również podziałkę do odczytu mocy. Skale są jednak wykonywane różnie i nie wszystkie będą przydatne. Podziałka WFS powinna być tak zrobiona, aby punkt WFS=3 wypadł mniej więcej w jej środku. W tym samym punkcie powinna wypaść 1/4 zakresu pomiaru mocy, czyli na ogół 2,5W. Znalezienie przyrządu z taką skalą nie jest jednak łatwe.

Jeśli mikroamperomierz musimy skalować sami, to można posłużyć się podanymi tabelkami. Wartości w tabelach są obliczone dla mocy nadajnika 5W, z uwzględnieniem napięcia progowego typowych diod Schottky'ego i zweryfikowane praktycznie w układzie z diodami BAT85 i mikroamperomierzem o zakresie 100uA.

<b>WFS</b>		1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,25	2,5	2,75	3	3,5	4	4,5	5
<b>Skala</b>	<b>[%]</b>	0	2	5	6	10	14	17	20	23	25	28	33	38	42	46	52	57	61	64

Jeśli mikroamperomierz nie ma własnej typowej podziałki, która umożliwi znalezienie punktów podanych w tabeli, to można użyć zasilacza regulowanego i woltomierza. Do punktów P1 i P2 przykładamy napięcie o wartości 10,00V. Potencjometrem R5 ustawiamy pełne wychylenie wskazówki, a następnie ustawiamy po kolei wartości 0,02V (WFS=1.1), 0,05V (WFS=1.2) itd, zaznaczając na skali odpowiednie punkty.

Dysponując zestawem rezystorów bezindukcyjnych możemy przeprowadzić (lub sprawdzić) skalowanie odczytu WFS empirycznie, z użyciem nadajnika, dołączając do wyjścia ANT rezystory obciążające zgodnie z tabelą.

<b>WFS</b>	1,00	1,20	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00	3,50	4,00
<b>Ro</b>	50,0	41,7	33,3	28,6	25,0	22,2	20,0	18,2	16,7	14,3	12,5

Do skalowania nadają się rezystory węglowe i metalizowane o mocy 1-2W. Najlepiej łączyć je równolegle skracając końcówki do minimum. Skalowanie trzeba wykonać na jak najniższej częstotliwości (np. 3,5MHz), aby wpływ indukcyjności rezystorów był jak najmniejszy.

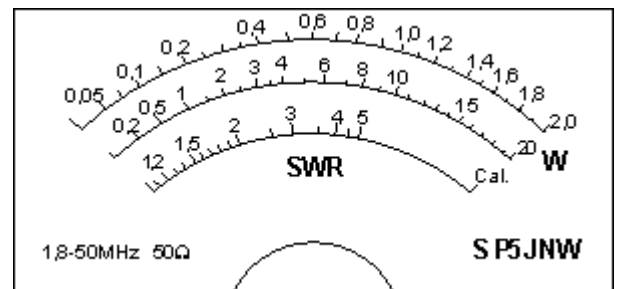
Po wyskalowaniu wskaźnika według powyższego opisu reflektometr jest w pełni gotowy do pomiarów. Trzeba pamiętać o każdorazowym ustawianiu pełnego wychylenia wskazówki potencjometrem P5 przed przełączeniem przełącznika w pozycję „ODB” i odczytem wartości WFS.

Miernik wyskalowany dla mocy 5W będzie dawał niższe wskazania przy mniejszej mocy i większe przy wyższej. Poniższa tabela pokazuje, jak zmienia się odczyt wartości WFS=1:1.5 przyrządu skalowanego dla 5W, przy innych mocach.

<b>P[W]</b>	10	<b>5</b>	2	1	0,5
<b>WFS</b>	1,6	<b>1,5</b>	1,4	1,25	1,1

### Skalowanie pomiaru mocy.

Przy użyciu wskaźnika o czułości 100uA można z opisanym sprzęgaczem mierzyć moc od 0.05W. W układzie prototypowym zostały wypróbowane praktycznie dwa zakresy pomiaru mocy: 2W i 20W. Punkty skali dla wartości zakresowej 2W nie pokrywają ze punktami zakresu 20W ze względu na nieliniowość detektora diodowego przy małych amplitudach. Dobrą podziałkę można wykonać jedynie przez skalowanie z użyciem przyrządu wzorcowego lub kalibrowanego źródła. Przy braku aparatury skalę można zrobić w oparciu o poniższą tabelę. Są w niej podane wartości w procentach pełnego wychylenia wskazówki dla szeregu wartości mocy, dla zakresów 2W, 10W i 20W. Tabela została wykonana w oparciu o pomiary prototypu sprzęgacza z diodami BAT85. Punkty skali można nanieść z użyciem zasilacza i woltomierza, jak przy skalowaniu WFS.

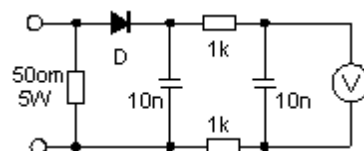


<b>P[W]</b>	0,05	0,075	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
<b>..[%]</b>	6	10	14	19	24	28	32	35	39	45	50	55	59	64	68	71	75	79	82	85	88	91	94	97	100
<b>P[W]</b>	0,2	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<b>..[%]</b>	7	13	20	25	29	33	37	40	43	48	53	58	62	66	70	73	77	80	83	86	89	92	95	98	100
<b>P[W]</b>	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0
<b>..[%]</b>	11	18	24	28	32	35	39	42	45	47	52	57	61	65	69	73	76	80	83	86	89	92	95	97	100

Skala w prototypie pokazana na rysunku została narysowana przy pomocy edytora graficznego i wydrukowana na papierze. Podkładem do projektu był zeskanowany obraz oryginalnej skali mikroamperomierza z opisem od 0 do 100uA.

Poza wykonaniem skali trzeba również wykonać kalibrację korzystając ze źródła o znanej mocy lub innego miernika. Kalibracja polega na ustawieniu odpowiedniego wskazania potencjometrami R6 i R7 zgodnie z odczytem (nastawą) wzorca. Kalibracja nie musi być wykonana przy pełnym wychyleniu wskazówki ale powinna być to wartość raczej z górnej połowy skali.

Nie dysponując przyrządami wzorcowymi można posłużyć się własnym nadajnikiem mierząc jego moc przy pomocy detektora diodowego i multimetru cyfrowego, w układzie podanym na rysunku.



Moc oblicza się z napięcia wskazywanego przez woltomierz napięcia stałego V ze wzoru:

$$P_o = \frac{(V_o + V_f)^2}{2 * R_o}$$

Gdzie  $P_o$ -moc wyjściowa [W],  $V_o$ - napięcie wyjściowe [V] wskazane przez woltomierz,  $V_f$ -napięcie przewodzenia diody [V] (0.3V dla diod Schottky'ego, 0.6V dla diod zwykłych krzemowych np. 1N4148),  $R_o$ -rezystancja obciążenia. Jeśli zastosujemy w detektorze diodę 1N4148 i odczytamy przykładowo na woltomierzu 20V, to moc nadajnika będzie równa:

$$P_o = \frac{(20V + 0.6V)^2}{2 * 50\Omega} = 4.24W$$

## Dane techniczne

Reflektometr z modułem DC1 i wskaźnikiem o czułości 100uA.

impedancja znamionowa	50om
moc znamionowa ciągła	15W
moc chwilowa	20W
zakres częstotliwości	1.8 - 50MHz
zakres pomiaru mocy <sup>(1)</sup>	0.05 - 20W
zakres mocy dla pomiaru WFS <sup>(1)(2)</sup>	1,5 - 10W
WFS własny	1.05 (3.5 - 30MHz)
	1.1 (1.8 - 50MHz)
tłumienie	<0.1dB (obl. teoretycznie)
wymiary modułu DC1	39x41 mm

<sup>(1)</sup> - dla wskaźnika o czułości 100uA

<sup>(2)</sup> - dla błędu pomiaru WFS <10%, w zakresie WFS=1.5 - 3.0 (skalowanie WFS przy mocy 5W)

## Lista elementów sprzęgacza kierunkowego.

L.p.	Oznaczenie	Typ/wartość	Opis	Szt.	Zamiennik
1	C1, C2, C3, C4	10nF / 50V	kondensator ceramiczny	4	10 - 47nF
2	D1, D2	BAT85	dioda Schottky'ego	2	BAT41, 1N5711, AAP153, GD507..
3	R1, R3	51om / 1% / 0.25W	rezystor metalizowany	2	
4	R2, R4	100om / 0.25W	rezystor metalizowany	2	
5	T1	1:8 / FT50-43	transformator wg. opisu	1	
6	T2	16:2 / FT50-43	transformator wg. opisu	1	
7		DC1 01	plytka drukowana	1	

Marcin Świetliński, SP5JNW  
styczeń 2007.

Literatura:

[1] J. Erben OK1AYY, „Ameterske konstrukce kmitoctove nezavislych SWR/PWR metru pro KV” (1, 2), Radioamater 3/2002

[2] M. G. Ellis, „RF Directional Couplers”, <http://michaelgellis.tripod.com/tutorial.html>