

Współczynnik fali stojącej

Prawda o SWR

Obserwując dyskusję na temat WFS przy opisie i ocenie anten można spostrzec, że wielokrotnie powtarzane są przeróżne stwierdzenia i oceny, nie oparte o podstawy teoretyczne. Młody krótkofalowiec, który zdał stosunkowo łatwy egzamin z podstaw elektrotechniki i teorii anten potrzebuje dodatkowych informacji, aby jego wysiłki przy budowie anten były racjonalne.

Spis literatury

- [1] Zdzisław Bienkowski, SP6LB, *Poradnik Ultrakrótkofalowca*, WKŁ Warszawa 1988, rozdział 3, Elementy i obwody pasywne
 [2] Zdzisław Bienkowski, SP6LB, Edmund Lipiński, *Anteny KF i UKF, Teoria i Praktyka*, WKŁ Warszawa 1978, rozdział 2, Elementy teorii anten
 [3] Henry Jasik, John Volakis, *Antenna Engineering Handbook*, Mc Graw Hill, 2007, rozdział 52
 Dopasowanie linii
 [4] I.A. Dombrowskij *Antenny*, GOSIZDAT–Moskwa 1951, rozdz. 2
 Równania obwodów elektrycznych
 [5] Jarosław Szóstka – Fale i Anteny, WKŁ Warszawa, 2001, rozdział 5, linie transmisyjne TEM
 [6] *ARRL Handbook* 2010, Nevington, USA 2010, wydanie 87, rozdz. 20
 Liniowe transmisyjne
 [7] *Antenna Book*, ARRL, wydanie 21, 2008, rozdział 24, Liniowe transmisyjne
 [8] *Rothammels, Antennen Buch*, DARC Baunatal, wydanie 12, rozdział 5, Przewody

Wśród amatorów panuje wiele błędnych teorii, nieopartych o prawa fizyki (elektrotechniki), które powodują przejmowanie się sprawami nieistotnymi, przy jednoczesnym nieuwzględnianiu spraw ważnych dla dobrej pracy radiostacji. Dość często słyszy się o „szczególnym osiągnięciu”, gdyż udało się zmniejszyć WFS z $s = 1,5 : 1$ na $s = 1,2 : 1$

W związku z powyższym w niniejszym artykule przeprowadzona będzie teoretyczna analiza znaczenia WFS na pracę transceivera z anteną.

Dla ułatwienia analizy przyjmuje się, że transceiver, jako generator, ma rezystancję wewnętrzną $R_g = 50 \Omega$ i wytwarza siłę elektromotoryczną (SEM) U_g niezależną od obciążenia, to znaczy, że jest to liniowe źródło energii.

Na **rysunku 1** pokazano schemat układu generatora o SEM = U_g i rezystancji wewnętrznej R_g zasilającego odbiornik o rezystancji R_o . Na wstępie przyjęto, że do generatora dołączono rezystor obciążenia $R_o = R_g = 50 \Omega$, to znaczy, że obciążenie jest optymalnie dopasowane do transceivera. Odpowiada temu współczynnik fali stojącej WFS = $1,0 : 1$.

W literaturze angielskiej, jako WFS, stosowane jest określenie Standing Wave Ratio (SWR). Dla ułatwienia

przebrnięcia przez opisy matematyczne przyjęto założenie, że obciążeniem jest czysta rezystancja R_o , bez składowej pojemnościowej lub indukcyjnej, to znaczy, że $Z = R + jX = R_o$, czyli $X = 0$. Stan taki występuje tylko wtedy, gdy antena znajduje się w rezonansie, a więc zależy od częstotliwości generatora. Przy takim założeniu można analizować zjawiska w układzie z rysunku 1 niezależnie od częstotliwości. Dla analizy sytuacji dla częstotliwości nierezonansowej należy stosować funkcje zmiennej zespolonej $Z = R + jX$ i metody rachunku wektorowego, opisane w [1]–[8]. Analiza prostego przypadku, jak to podano w założeniach, daje już bardzo dużo wartościowych informacji i nie wykracza poza poziom elektrotechniki w technikum elektrycznym.

Dla uniknięcia stosowania wzorów abstrakcyjnych, przyjęto założenie, że generatorem jest transceiver dostarczający do rezystora $R_o = 50 \Omega$ moc $P_o = 100 \text{ W}$ i że ma charakterystykę liniową w badanym zakresie. Jest to uzasadnione tym, że większość współczesnych transceiverów ma taką moc wyjściową. Pozwala to na operowanie realnymi wartościami prądu, napięcia i mocy, zamiast zapisem na wzorach ogólnych.

Wyniki analizy zestawiono w **tablicy 1** a rozdział mocy, przy zmiennym obciążeniu, na wykresie na **rysunku 2**. Dla ułatwienia wyciągnięcia wniosków w dalszej części będą podane objaśnienia zachowania się układu w zależności od rezystancji obciążenia R_o , więc od, WFS, przy stałej wartości R_g .

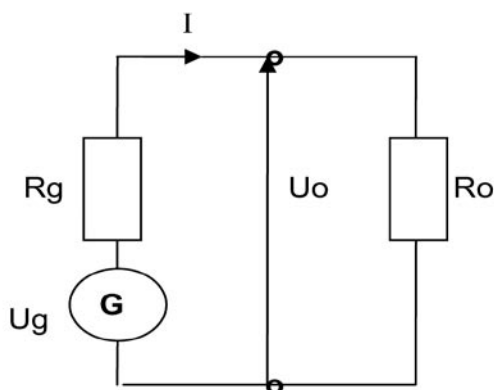
Analiza będzie przeprowadzona dla trzech przypadków: $R_o = R_g$, $R_o > R_g$, $R_o < R_g$. Stan dopasowania $R_o = R_g$. Punktem wyjściowym do analizy jest stan pełnego dopasowania, to jest, gdy $R_o = R_g = 50 \Omega$ i wtedy WFS $s = R_o/R_g = 1$. Oznacza to, przy podanym założeniu, że moc dostarczona do obciążenia $P_o =$

100 W, w układzie płynie prąd $I = 1,41 \text{ A}$, a na rezystorze występuje spadek napięcia 70,7 V. (**tablica 1**). Ten sam prąd płynie przez rezystancję generatora R_g , dając ten sam spadek napięcia 70,7 V i dlatego napięcie generatora $U_g = 2 \times 70,7 = 141,4 \text{ V}$. Jest to siła elektromotoryczna generatora (SEM). Dla dalszej analizy przyjmuje się, że jest ona stała (niezależna od obciążenia). Przy danym prądzie $I = 1,41 \text{ A}$ i napięciu $U_g = 141,4 \text{ V}$, generator musi dostarczyć moc $P_g = 200 \text{ W}$, która rozkłada się po połowie na rezystancji obciążenia ($P_o = 100 \text{ W}$) i na moc traconą w generatorze ($P_w = 100 \text{ W}$). Konstrukcja transceivera przewiduje odprowadzenie mocy od stopnia końcowego wzmacniacza. Stan niedopasowania $R_o > R_g$. Zbadajmy teraz, co będzie, jeśli zamiast 50Ω będzie do transceivera dołączony rezystor 100 Ω . Odpowiada temu WFS $s = R_o/R_g = 100/50 = 2:1$. Większość uzna tę sytuację jako niedobłą. Sprawdźmy, co się zmieniło w podziale mocy. Przy założeniu niezmiennego SEM, czyli $U_g = 141,4 \text{ V}$ obliczamy prąd w układzie: $I = 141,4 / (100 + 50) = 0,94 \text{ A}$. Prąd ten spowoduje spadek napięcia na rezystorze $R_o = 100 \Omega$ o wartości $U_o = I \times R_o = 0,94 \times 100 = 94 \text{ V}$. Napięcie więc wzrosło od 70,7 V do 94 V. Na rezystorze obciążenia wydzieli się moc

$P_o = I^2 \times R_o = 0,94^2 \times 100 = 88 \text{ W}$, zaś moc dostarczana przez generator maleje do $P_g = U_g \times I = 133 \text{ W}$. Wynika z tego, że zmalała moc tracona w generatorze $P_w = P - P_o = 133 - 88 = 45 \text{ W}$. Transceiver grzeje się mniej, ale towarzyszy temu spadek mocy na obciążeniu ze 100 W na 88 W. Wynika z tego przy $s = 2:1$ moc dostarczona do odbiornika spada tylko o 12%, czyli około 0,5 dB.

Jako krańcową dopuszczalną wartość WFS przyjmuje się 1:3, czyli przy $R_o = 150 \Omega$.

Z tabeli odczytujemy, że wtedy $I = 0,71 \text{ A}$, $U_o = 106,5 \text{ V}$, $P_o =$



Rys. 1. Schemat układu generatora o SEM = U_g i rezystancji wewnętrznej R_g zasilającego odbiornik o rezystancji R_o

75 W, a generator wytwarza moc $P_g = 100$ W, przy stratach własnych tylko 25 W. Moc wyjściowa maleje ze 100 W na 75 W, czyli o 1,3 dB. Powstaje więc pytanie, dlaczego we wszystkich instrukcjach podawane jest wymaganie aby WFS był mniejszy od $s = 3:1$, a nawet $s = 2:1$. Wyrażną wskazówkę da analiza przypadku, gdy $R_o = 250 \Omega$. Wtedy $s = 5,0 : 1$, prąd $I = 0,47$ A, ale $U_o = 117$ V, a moc w odbiorniku wynosi tylko 55 W.

Generator nie jest przeciążony ($P_g = 66$ W), ale zwróćmy uwagę nie tylko na spadek mocy niemal do połowy, ale także na napięcie. Napięcie wzrosło o 66%. Taki wzrost napięcia grozi uszkodzeniem stopnia końcowego wzmacniacza transceivera, przebiciami w dostrajaczu antenowym (skrzynka antenowa ATU), a dodatkowo rosną straty dielektryczne w linii przesyłowej, o czym będzie napisane później.

Konstruktorzy urządzeń nadawczych chronią stopień końcowy nadajnika przed takimi uszkodzeniami przez wprowadzenie wewnętrznego pomiaru WFS. Jeśli jest on zbyt duży, to układ automatycznej regulacji mocy zmniejsza wysterowanie, co powoduje zmniejszenie napięcia U_g i jednocześnie spadek mocy wyjściowej. Układy takie działają automatycznie, ale nie dają 100% pewności, gdyż np. przy przypadkowym odłączeniu anteny podczas nadawania, zanim układ automatycznej ochrony zareaguje (kilka do kilkunastu milisekund), przepięcie może spowodować uszkodzenie stopnia końcowego. W przypadku odłączenia obciążenia (anteny) napięcie rośnie aż do $R_g = 141,7$ V.

Pamiętać należy, że poza częstotliwością rezonansową antena lub wejście do linii zasilającej (feeder) ma składowe bierno, pojemnościowe lub indukcyjne, które mogą mieć znaczne wartości. W niektórych układach antenowych impedancje rzędu setek omów występują już przy kilkuprocentowych odstrojeniach od częstotliwości rezonansowej. Patrząc na **tabelę 1** i na krzywą przebiegu mocy na **rysunku 2**, widzimy, że przy zmianie WFS od $s = 1,0:1$ do $s = 2:1$ moc wyjściowa maleje zaledwie o 12% i poprawianie układu antenowego dla uzyskania WFS na przykład $s < 1,5:1$ mija się z celem. Ważniejszą sprawą niż $s < 2$ jest szerokopasmowość anteny.

Przeprowadzona analiza dotyczy sytuacji, gdy układ jest w rezonansie. Niektóre anteny przy zmianie częstotliwości mają impedancję $Z = R_o + jX$ znacznie odbiegając od 50Ω już przy niewielkim odstrojeniu, na przykład większość anten w paśmie 80 m, dostrojona dla pracy CW, ma na częstotliwości SSB $s > 3$. Stan niedopasowania $R_o < R_g$. Załóżmy, że miernik WFS wskazuje na przykład $s = 2,5 : 1$, ale nie wiemy, czy rezystancja obciążenia R_o jest powyżej, czy poniżej 50Ω . ($R_o > R_g$ czy też $R_o < R_g$). W pierwszym przypadku zagrożenie jest niewielkie (patrz wyżej), natomiast w drugim przypadku sytuacja jest niebezpieczna. Przy $R_o = 33 \Omega$, $s = 1,5$.

Jest to bliskie impedancji wejściowej tak zwanych anten niskoomowych (anteny UKF DK7ZB), które mają $Z_o = 33$ do $12,5 \Omega$. Dla prześledzenia sytuacji przy niskim R_o przyjąć można na przykład $R_o = 20 \Omega$ i $s = 2,5$ (patrz **tab. 1** i **rys. 2**). Wtedy $I = 2,02$ A, $U = 40,4$ V moc oddana $P_o = 82$ W, ale moc generatora wzrasta do 285 W i moc strat do $P_w = 203$ W.

Oczywiście, że ponaddwukrotny wzrost strat powoduje przegrzanie generatora. Szczególnie niebezpieczne jest zwarcie wyjścia generatora, gdyż straty wyniosą zamiast 100 W aż 400 W. Nawiązując do zastrzeżeń na początku artykułu, realny wzmacniacz na szczęście jest nieliniowy i ma zabezpieczenia termiczne, które powinny go ochronić przed „spaleniem”, niemniej jednak należy zdecydowanie uniknąć zwarcia na wyjściu (np. zwarcie we wtyku antenowym).

www.srt-radio.pl

SRT
radiokomunikacja

Wyłączny dystrybutor
produktów

Hytera
Respond & Achieve

HYT

SRT Sp. z o.o.
Al. Wojska
Polskiego 156
71-324 Szczecin
tel. +48 91 4829500
fax: +48 91 4829501

Hytera
PD785G

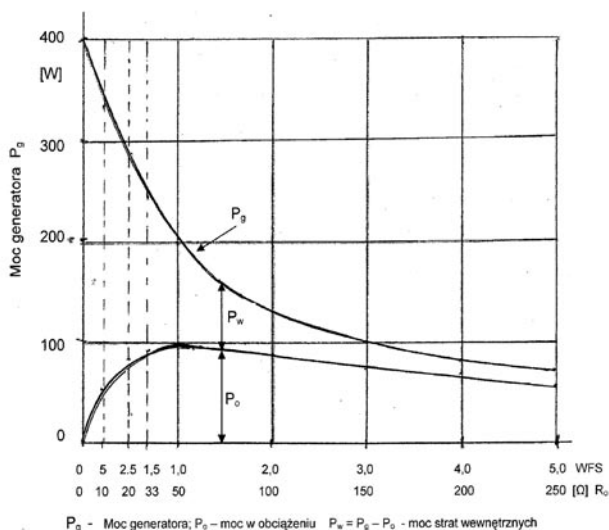
Radiotelefon cyfrowy DMR

- Pełna zgodność z normami ETSI - DMR
- Pasmo VHF lub UHF
- Tryb pracy analogowy i cyfrowy
- Kolorowy wyświetlacz LCD TFT 1.8"
- Interfejs użytkownika w języku polskim
- Ergonomiczne przyciski i pokrętła
- Zintegrowana antena radiowa i GPS
- Sygnalizacja 5 tone w standardzie
- Wbudowany GPS

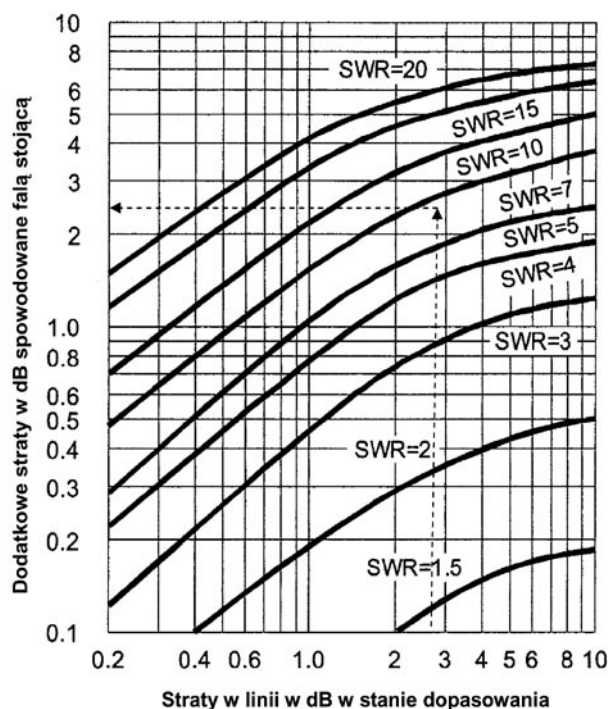
- Innowacyjna, zintegrowana antena radiowa i GPS
- Obudowa zgodna z normą IP57 (odporna na zanurzenie do głębokości 1 metra przez 30 minut)



www.srt-radio.pl



Rys. 2. Moc generowana rozkłada się, z podziałem uzależnionym od rezystancji obciążenia R_o i WFS, na moc w obciążeniu P_o i moc strat wewnętrznych P_w



Rys. 3. Straty dodatkowe w linii zasilającej spowodowane wysokim WFS mierzonym w miejscu jej obciążenia (wejście anteny). Dla określenia strat dodatkowych najpierw określamy straty w linii w stanie dopasowania (np. 2,86 dB), następnie dla $s = 6$ odczytujemy na osi pionowej straty dodatkowe 2,46 dB. Suma strat wyniesie 5,32 dB [6].

Straty w liniach zasilających

Często się słyszy, że duży WFS w linii zasilającej powoduje duże straty. Jest to prawda, ale warto uświadomić sobie, od czego te straty zależą i ile wynoszą. Straty w kablu koncentrycznym występują w miedzianej żyłce środkowej i w ekranie, a także w dielek-

R_o [Ω]	WFS [s:1]	I [A]	U_o [V]	P_g [W]	P_o [W]	P_w [W]	η %
0	∞	2,83	0	400	0	400	0
5	10,0	2,57	12,8	363	33	330	9
10	5,0	2,36	23,6	333	56	277	17
20	2,5	2,02	40,4	285	82	203	29
33	1,5	1,70	56,1	240	95	145	40
50	1,0	1,41	70,7	200	100	100	50
100	2,0	0,94	94,0	133	88	45	66
150	3,0	0,71	106,5	100	75	25	75
200	4,0	0,56	112,0	79	63	16	80
250	5,0	0,47	117,0	66	55	11	83

Tabela 1.

R_o = rezystancja obciążenia

WFS = współczynnik fali stojącej

(SWR) s : 1

I = prąd płynący w obwodzie

U_o = napięcie występujące

na obciążeniu R_o (50 Ω)

P_g = moc wytwarzana przez generator

P_o = moc oddawana do obciążenia

P_w = moc tracona w generatorze =

$P_g - P_o$

η = sprawność = P_o/P_g

tryku. Straty w części przewodzącej zależą od rezystancji przewodu i wielkości prądu ($I^2 \times R$).

Straty w dielektryku zależą od zastosowanego dielektryka, jego grubości i napięcia (U^2/R). W przypadku dopasowania kabla do anteny ($R_a = R_k$, gdzie R_a – rezystancja wejściowa anteny, R_k = impedancja falowa linii kablowej), nie ma fali odbitej, WFS na wejściu do anteny $s = 1$ i straty dodatkowe nie występują.

Jeśli występuje niedopasowanie, to generowana jest fala odbita, która powoduje wzrost natężenia prądu i napięcia. Te oba wzrosty powodują dodatkowe straty. Kabel koncentryczny ma straty proporcjonalne do jego długości oraz zależne od częstotliwości.

Pytanie stojące przed konstruktorem systemu antenowego jest następujące: co bardziej się opłaca – zainstalować gruby, ale drogi kabel, o mniejszej stratności i mniejszych stratach dodatkowych, spowodowanych występowaniem odbicia, czy też zastosować cieńszy, tańszy kabel, o większych stratach i pokryć je ewentualnym dodatkowym wzmacniaczem. Przy rozstrzygnięciu tej sprawy należy określić straty dodatkowe w kablu zasilającym. Opisywane straty powodują silniejsze nagrzewanie się kabla, aż do jego uszkodzenia.

Analiza strat będzie przeprowa-

dzona na podstawie przykładu zaczerpniętego z [6].

Najpierw obliczamy straty w dB w linii dopasowanej.

Na przykład kabel RG 213 ze stałym dielektrykiem ma na 28 MHz stratność 1,14 dB na 100 stóp (30,4 m), ale użyty kabel ma długość 250 stóp (76 m). W warunkach dopasowania kabel ma tłumienie 1,14 (250/100) = 2,86 dB. Założymy, że pomierzony WFS na przejściu z kabla do anteny $s = 6 : 1$.

Wzorem tu nieprzytaczanymi (patrz [6]), obliczamy straty całej niedopasowanej linii 5,32 dB. Stąd dodatkowe straty przy $s = 6 : 1$ na 28 MHz wynoszą 5,32 – 2,86 dB = 2,46 dB. (rys. 3) Jeśli zastosujemy kabel RG-58A, o połowę cieńszy niż RG-213, to przy tej samej długości 250 stóp na 28 MHz będzie miał on stratność przy dopasowaniu 7,0 dB. Przy $s = 6 : 1$ straty dodatkowe wyniosą 3 dB, co da w sumie straty kabla w tych warunkach = 10 dB.

Straty dodatkowe zazwyczaj stanowią mały procent strat podstawowych w kablu, ale się do nich dodają.

Kabel o znacznych stratach powoduje, że WFS mierzony na wejściu do kabla (od strony nadajnika) jest niższy od tego, jaki występuje na wejściu z kabla do anteny.

Na przykład przy wyżej opisanym kablu RG-213 przy $s = 6$ na wyjściu do anteny, na wejściu do kabla od strony transceivera pomierzy się tylko $s = 2,1 : 1$, a przy kablu RG-58A zmierzy się tylko $s = 1,4 : 1$.

O tym należy pamiętać przy ocenie systemu antenowego i nie sugerować się niskim WFS na wejściu do linii zasilającej antenę.

O tym będzie bliżej napisać w artykule o miernikach i pomiarach WFS.

Zdzisław Bieńkowski SP6LB