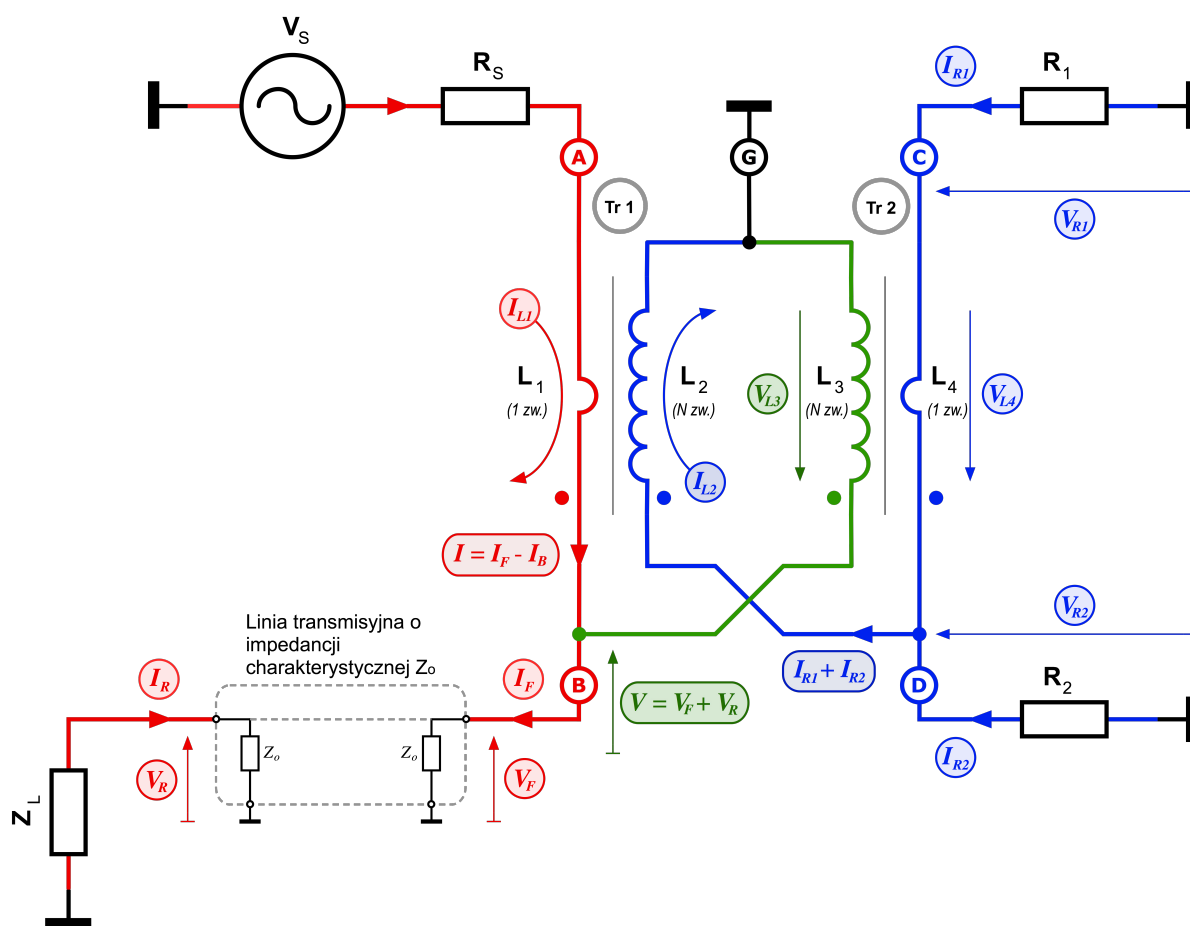


Jak działa sprzęgacz kierunkowy

Robert Jaremczak SQ6DGT

W trakcie prac nad uniwersalnym urządzeniem pomiarowym „radiotester”, opisanym we wcześniejszych numerach ŚR, zetknąłem się z problemem pomiaru współczynnika dopasowania VSWR. Jednym z głównych elementów układu pomiarowego jest sprzęgacz kierunkowy. Było dla mnie zagadką, jak prosty układ zawierający dwa transformatory, jest w stanie wydzielić z sygnału falę padającą i falę odbitą. Chcąc zrozumieć zasadę pracy sprzęgacza, spędziłem wiele godzin przeglądając dostępne w internecie materiały i ostatecznie udało mi się usystematyzować zebrane informacje w zwartą i mam nadzieję zrozumiałą całość. Dodatkowo sporządziłem odpowiednio opisany schemat, ilustrujący opisywane zagadnienie. Do zrozumienia artykułu wystarczą elementarne wiadomości z zakresu elektrotechniki i odrobina algebry.



Ogólna zasada działania i podstawowe założenia

W prezentowanym układzie, sprzęgacz włączony jest pomiędzy źródło sygnału V_s a linię transmisyjną, na końcu której znajduje się badane obciążenie Z_L . W celu uproszczenia analizy warto jest założyć, że sprzęgacz kierunkowy nie pobiera żadnej energii. Takie założenie ma następujące konsekwencje:

- na cewce L_1 nie występuje spadek napięcia. W praktyce jest to krótki kawałek przewodu więc to przybliżenie jest prawie idealne.
- przez cewkę L_3 nie płynie żaden prąd. Tutaj rzeczywistość odbiega już bardziej od założeń, jednak praktyka pokazuje, że takie przybliżenie jest w naszych rozważaniach uprawnione.

Dodatkowo musimy poczynić jeszcze następujące założenia:

- źródło sygnału V_s ma impedancję wewnętrzną R_s równą impedancji linii transmisyjnej Z_0 (np. impedancji fidera). Tylko wtedy cała energia ze źródła V_s zostanie bez odbić przesłana do linii transmisyjnej. Dodatkowo zakładamy, że impedancja ta ma czysto rezystancyjny charakter.
- rezystory R_1 i R_2 mają wartość równą impedancji linii transmisyjnej Z_0 .

Mamy więc następującą tożsamość:

$$R_N = R_1 = R_2 = R_s = Z_0 \quad (1)$$

Przez N oznaczmy liczbę zwojów cewek L_2 i L_3 . Cewki L_1 i L_4 mają po jednym zwoju. Teraz możemy przejść do właściwej analizy.

Tor sygnału i uzwojenia pierwotne Tr.1 i Tr.2

Dzięki powyższym założeniom widzimy, że fala odbita może powstać tylko wskutek niedopasowania impedancji odbiornika Z_L do impedancji linii Z_0 .

Sygnał z generatora V_s przepływa bez strat przez cewkę L_1 i jest w całości absorbowany przez linię transmisyjną. Żadna jego część nie ulega odbiciu ani nie odplywa do gałęzi transformatora **Tr.2** gdyż założyliśmy, że prąd płynący przez cewkę L_3 jest pomijalny. Korzystając z tożsamości (1) prąd fali padającej definiujemy jako:

$$I_F = \frac{V_F}{R_N} \quad (2)$$

Napięcie fali padającej to spadek napięcia jaki wywołuj prąd I_F na impedancji linii transmisyjnej Z_0 , czyli po zastosowaniu tożsamości (1) mamy:

$$V_F = I_F \cdot R_N \quad (3)$$

Analogicznie prąd i napięcie fali odbitej od obciążenia Z_L zapiszemy tak:

$$I_R = \frac{V_R}{R_N} \quad (4)$$

$$V_R = I_R \cdot R_N \quad (5)$$

Linia transmisyjna jest tylko medium przekazującym energię z jednego końca na drugi. Zachodzi to w obu kierunkach, więc prąd fali odbitej I_R wypływa z linii transmisyjnej po stronie cewki L_1 i nakłada się na prąd fali padającej I_F . Zauważmy, że prądy te są względem siebie przeciwnie skierowane, więc wypadkowy prąd I płynący przez cewkę L_1 można wyrazić wzorem:

$$I = I_{L1} = I_F - I_R \quad (6)$$

Analogicznie napięcie V_R pojawi się po drugiej stronie linii transmisyjnej i nałoży się na napięcie ze źródła V_S , czyli na napięcie fali padającej. Wypadkowe napięcie, które pojawi się na wyjściu (B) sprzęgacza oznaczmy jako V . Jest ono równe:

$$V = V_F + V_R \quad (7)$$

W tym przypadku napięcia się dodają ponieważ mają jednakowe polaryzacje. To samo napięcie występuje również na cewce L_3 więc $V_{L3} = V$.

Zauważmy, że **Tr.1** dokonuje niejako pomiaru sumarycznego prądu I płynącego w linii transmisyjnej, a **Tr.2** mierzy sumaryczne napięcie V . Te dwa transformatory są od siebie całkowicie niezależne. Często dla wygody lub oszczędności są umieszczane na wspólnym rdzeniu, jednak **nie ma między nimi sprzężenia**.

Istotą działania sprzęgacza kierunkowego jest właśnie pomiar prądu i napięcia na wejściu linii transmisyjnej, w punkcie (B). Jak zostanie pokazane dalej, po zsumowaniu wkładów pochodzących od transformatorów **Tr.1** i **Tr.2** na wyjściach (C) i (D) sprzęgacza pojawią się napięcia związane odpowiednio z napięciami fali padającej i fali odbitej.

Wkład pochodzący od transformatora Tr.1

Transformator **Tr.1** mierzy wypadkowy prąd na wejściu linii transmisyjnej, który jest równy różnicy prądów fali padającej i fali odbitej. Przekładnia prądowa **Tr.1** wynosi $1/N$ więc prąd uzwojenia wtórnego L_2 można zapisać jako:

$$I_{L2} = \frac{I_{L1}}{N} = \frac{I_F - I_R}{N} \quad (8)$$

Rezystory R_1 i R_2 mają jednakowe wartości dlatego prąd I_{L2} rozdziela się na dwa równe sobie prądy I_{R1} i I_{R2} . Zakładamy, że cewka L_4 nie stawia prądowi żadnego oporu. Można tak założyć ponieważ cewka ta jest wykonana jako odcinek przewodu. Uwzględniając tożsamość (1) możemy zapisać:

$$I_{R1} = I_{R2} = \frac{I_{L2}}{2}$$

po podstawieniu wzoru (8)

$$I_{R1} = I_{R2} = \frac{I_F - I_R}{2N} \quad (9)$$

Prądy I_{R1} i I_{R2} wypływają z masy więc spadki napięć na rezystorach R_1 i R_2 , mierzone względem masy, będą miały wartości ujemne. Składowe napięcia na rezystorach R_1 i R_2 pochodzące od transformatora **Tr.1** oznaczmy jako $V_{R1.1}$ i $V_{R2.1}$:

$$V_{R1.1} = -I_{R1} \cdot R_1, \quad V_{R2.1} = -I_{R2} \cdot R_2$$

po podstawieniu wzoru (9) ostatecznie mamy

$$V_{R1.1} = -\frac{I_F - I_R}{2N} \cdot R_1, \quad V_{R2.1} = -\frac{I_F - I_R}{2N} \cdot R_2 \quad (10)$$

Wkład pochodzący od transformatora **Tr.2**

Transformator **Tr.2** mierzy wypadkowe napięcie na wejściu linii transmisyjnej, które jest równe sumie napięć fali padającej i odbitej. Przekładnia napięciowa **Tr.2** wynosi $1/N$ więc napięcie na uzwojeniu wtórnym L_4 wynosi:

$$V_{L4} = \frac{V_{L3}}{N} = \frac{V_F + V_R}{N} \quad (11)$$

Zgodnie z przyjętą konwencją napięcia na rezystorach R_1 i R_2 pochodzące od transformatora **Tr.2** oznaczmy odpowiednio jako $V_{R1.2}$ oraz $V_{R2.2}$. Korzystając z prawa Kirchhoffa dla napięć oraz z faktu, że napięcie $V_{R1.2}$ jest skierowane przeciwnie do $V_{R2.2}$, możemy napisać:

$$V_{R1.2} + V_{L4} - V_{R2.2} = 0$$

$$V_{R1.2} - V_{R2.2} = -V_{L4}$$

$$\text{podstawiając } V_{R1.2} = -V_{R2.2}$$

$$V_{R1.2} + V_{R1.2} = -V_{L4}$$

$$\text{podstawiając wzór (11)}$$

$$2V_{R1.2} = -\frac{V_F + V_R}{N}$$

po przekształceniu ostatecznie mamy:

$$V_{R1.2} = -\frac{V_F + V_R}{2N} \quad \text{oraz} \quad V_{R2.2} = \frac{V_F + V_R}{2N} \quad (12)$$

Superpozycja napięć pochodzących z **Tr.1** i **Tr.2**

Napięcia V_{R1} i V_{R2} są kluczowe dla naszych rozważań ponieważ są w bezpośrednim związku z napięciami fali padającej i odbitej. Stanowi to samą istotę działania sprzęgacza kierunkowego, od konkluzji dzieli nas już tylko kilka kroków.

Obliczmy napięcie V_{R1} :

$$V_{R1} = V_{R1.1} + V_{R1.2}$$

po podstawieniu wzorów (10) i (12)

$$V_{R1} = -\frac{I_F - I_R}{2N} \cdot R_1 - \frac{V_F + V_R}{2N}$$

po podstawieniu wzorów (2) i (4) oraz tożsamości (1)

$$V_{R1} = -\frac{\frac{V_F}{R_N} - \frac{V_R}{R_N}}{2N} \cdot R_N - \frac{V_F + V_R}{2N}$$

$$V_{R1} = \frac{-V_F + V_R - V_F - V_R}{2N}$$

i ostatecznie:

$$V_{R1} = -\frac{V_F}{N} \quad (13)$$

Podobnie wygląda wyprowadzenie dla napięcia V_{R2} :

$$V_{R2} = V_{R2.1} + V_{R2.2}$$

po podstawieniu wzorów (10) i (12)

$$V_{R2} = -\frac{I_F - I_R}{2N} \cdot R_2 + \frac{V_F + V_R}{2N}$$

po podstawieniu wzorów (2) i (4) oraz tożsamości (1)

$$V_{R2} = -\frac{\frac{V_F}{R_N} - \frac{V_R}{R_N}}{2N} \cdot R_N + \frac{V_F + V_R}{2N}$$

$$V_{R2} = \frac{-V_F + V_R + V_F + V_R}{2N}$$

i ostatecznie :

$$V_{R2} = \frac{V_R}{N} \quad (14)$$

Jak widać napięcie V_{R1} jest proporcjonalne wyłącznie do napięcia fali padającej, a napięcie V_{R2} do napięcia fali odbitej. W ten sposób uzyskaliśmy pełną separację tych dwóch wielkości, dzięki którym można już obliczyć dopasowanie i pozostałe parametry zazwyczaj podawane przez analizatory wektorowe VNA.

Wyliczenie parametrów dopasowania

W praktyce napięcia V_{R1} i V_{R2} doprowadza się do wejścia układu, który oblicza stosunek tych wartości oraz opcjonalnie oblicza również przesunięcie fazowe między nimi. Przykładem jest układ **AD8302** firmy Analog Devices. Według noty katalogowej, napięcie na wyjściu **VMAG** układu jest proporcjonalne do:

$$V_{MAG} = 20 \log \left(\frac{V_{INPA}}{V_{INPB}} \right)$$

podając napięcie V_{R2} na wejście **INPA** oraz $-V_{R1}$ na wejście **INPB** oraz korzystając ze wzorów (13) i (14) mamy:

$$V_{MAG} = 20 \log \left(\frac{V_{R2}}{-V_{R1}} \right) = 20 \log \left(\frac{\frac{V_R}{N}}{\frac{V_F}{N}} \right) = 20 \log \left(\frac{V_R}{V_F} \right)$$

i jest to moduł tzw. współczynnika odbicia, wyrażonego w decybelach, czyli:

$$V_{MAG} = 20 \log(|\Gamma|)$$

Jednocześnie na wyjściu **VPHS** otrzymamy napięcie proporcjonalne do różnicy faz między falą odbitą a padającą. Z tych dwóch wartości możemy skonstruować zespolony współczynnik odbicia Γ . Dzięki niemu można wyliczyć praktycznie wszystko to, co urządzenia typu VNA są w stanie zmierzyć. Przykładowo napięciowy wsp. fali stojącej **VSWR** obliczamy następująco:

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (15)$$

Na tym chciałbym zakończyć niniejszy opis, a bardziej dociekliwych czytelników zachęcam do dalszych, samodzielnych poszukiwań.

Źródła

- K6JCA: Notes on Directional Couplers for HF
<http://k6jca.blogspot.com/2015/01/notes-on-directional-couplers-for-hf.html>
- Reflections III, Transmission Lines and Antennas
Walter Maxwell, W2DU
- Nota katalogowa układu AD8302 firmy Analog Devices
<http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8302.pdf>
- Wikipedia
https://en.wikipedia.org/wiki/Standing_wave_ratio
https://en.wikipedia.org/wiki/Reflection_coefficient
- AT&T Archives: Similarities of Wave Behavior
<https://youtu.be/DovunOxly1k>