

Janusz POREBSKI

WOJSKOWY OŚRODEK METROLOGII,
ul. W. Miegonia 45, 81-122 Gdynia

Stanowisko do półautomatycznego pomiaru współczynnika fali stojącej

Mgr inż. Janusz POREBSKI

Ukończył studia na Wydziale Elektroniki Politechniki Gdańskiej w roku 1979. Po studiach pracował krótko jako asystent w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN. Późniejsza Jego działalność zawodowa zawsze była związana z praktycznymi aspektami wykorzystywania urządzeń i układów elektronicznych, początkowo w medycynie, a następnie w informatyce. Od 2007 roku jest specjalistą w Zakładzie Kalibracji Elektrycznych Przyrządów Pomiarowych w 1 WOM.



e-mail: jotporebski@gmail.com

Streszczenie

Poniższe opracowanie zawiera opis stanowiska do komputerowo wspomaganego pomiaru współczynnika fali stojącej (WFS) elementów sieci wielkiej częstotliwości i mikrofalowych, w zakresie częstotliwości od 0,1 do 18 GHz. Podstawowym elementem w zastosowanej metodzie pomiarowej jest podwójny sprzęgacz kierunkowy. Wynikiem pomiarów jest wartość WFS badanego elementu oraz niepewność rozszerzona zmierzonych wartości. Przedstawione wyniki pomiarów testowych uwiarygodniają tezę o przydatności opisanego stanowiska do wykonywania pomiarów WFS w warunkach laboratorium mikrofalowego.

Słowa kluczowe: pomiar WFS, pomiar mocy w.cz., sprzęgacz kierunkowy.

Semiautomatic standing wave ratio measurement system

Abstract

The standing wave ratio (SWR) is one of most important and most often measured parameters of the microwave technology. Most commonly the SWR values are measured using a slotted line or a network analyser. This paper describes a semiautomatic SWR measurement system based on a dual directional coupler, which does not have the typical drawbacks of the slotted line technique and does not require the expensive network analysers at the same time. The system allows for measurements in the frequency range from 0,1 to 18 GHz. The proposed setup is shown in Fig. 1. The measurement method specified in Section 3 requires two measurements of the forward and reflected wave power. In the first step a reference load with known SWR is connected to the setup. Afterwards, the device under test is connected in the place of the reference load. The measurement is controlled by a VBA (Visual Basic for Applications) program described in Section 5. The program also calculates the SWR value and the expanded uncertainty for each frequency defined by a user. The expanded uncertainty is determined with use of the method described in Section 4. The test measurement results presented in Section 7 demonstrate the applicability of the proposed setup for measurements of SWR values up to 3. For typical SWR values in the range between 1,1 and 1,7 the relative expanded uncertainty is below 5%.

Keywords: SWR measurement, RF power measurement, directional coupler.

1. Wstęp

W warunkach laboratoriów metrologicznych pomiarów współczynnika fali stojącej, zwanego dalej WFS, elementów torów mikrofalowych dokonuje się najczęściej jedną z następujących metod:

- z wykorzystaniem koncentrycznych lub falowodowych linii pomiarowych ze szczeliną;
- z wykorzystaniem analizatorów obwodów.

Stosowane od lat metody wykorzystujące linie pomiarowe ze szczeliną, stosunkowo proste w realizacji i wymagające niezbyt zaawansowanych technologii, powoli wychodzą z użycia. Decy-

duje o tym ich czasochłonność, ograniczona ze strony producentów oferta nowego sprzętu, ale przede wszystkim całkowita ich niepodatność na jakąkolwiek automatyzację oraz skomplikowane i niejednoznaczne metody szacowania niepewności pomiarów. Ponadto, uzyskiwane wyniki są mało powtarzalne i silnie zależą od staranności i doświadczenia operatora wykonującego pomiary.

Zupełnym przeciwieństwem są metody pomiarowe z wykorzystaniem analizatorów obwodów. Niejako z definicji są to metody automatyczne. Sprzęt umożliwia pełną współpracę z komputerem klasy PC, a niepewność pomiaru jest łatwo wyliczalna wg reguł podanych przez producenta analizatora. Także rynkowa oferta sprzętowa, zarówno w odniesieniu do urządzeń podstawowych jak i wyposażenia dodatkowego jest niezwykle bogata. Niestety podstawową barierą w szerokim rozpowszechnieniu tego rodzaju sprzętu jest jego wysoka cena.

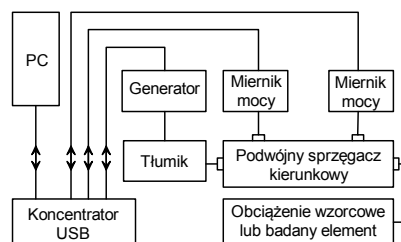
Z problematyką pomiarów urządzeń mikrofalowych z wykorzystaniem sprzęgaczy kierunkowych można się zapoznać np. w łatwo dostępnych publikacjach [1, 2].

Poniżej przedstawiono opis praktycznie sprawdzonego stanowiska do pomiaru WFS, którego podstawowym elementem jest podwójny sprzęgacz kierunkowy.

Metodę określono jako półautomatyczną; ustawienia parametrów przyrządów oraz odczyty wartości mierzonych wielkości dokonywane są przez program sterujący. Operator, w trakcie jego realizacji, musi jedynie odłączyć od układu obciążenie wzorcowe i w jego miejsce podłączyć element sprawdzany.

2. Stanowisko pomiarowe

Zastosowana metoda pomiaru WFS realizowana jest w układzie pomiarowym przedstawionym na rys. 1.



Rys. 1. Stanowisko do pomiaru WFS
Fig. 1. SWR measurement system

Stanowisko składa się z następujących elementów:

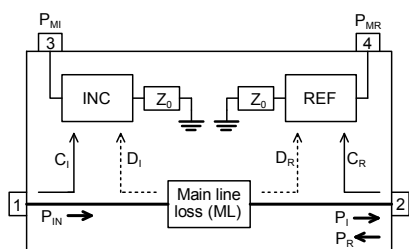
- podwójny sprzęgacz kierunkowy; w zależności od częstotliwości pomiaru wykorzystywany jest sprzęgacz typu 772D lub 778D firmy Agilent,
- miernik mocy Agilent U2000A 2 szt.,
- generator w.cz. R&S SMF 100A,
- tłumik 6 dB, DC ÷ 18 GHz,
- obciążenie wzorcowe 50 Ω Agilent 909F,
- koncentrator 4xUSB,
- komputer klasy PC.

Elementy aktywne stanowiska, tj. mierniki mocy oraz generator sygnałowy, wyposażone są w złącza sterujące w standardzie USB lub GPIB. Komputer sterujący pracuje pod kontrolą systemu operacyjnego MS Windows XP®. Wymagane jest zainstalowanie arkusza kalkulacyjnego MS Excel® z obsługą języka programowania VBA, oraz biblioteki procedur sterujących przyrządami pomiarowymi IO Library Suite® firmy Agilent.

3. Metoda pomiarowa

Zastosowana metoda pozwala na ograniczenie wpływu na niepewność pomiaru skończonej wartości kierunkowości portu REFLECTED. W metodzie tej pomiary wykonuje się w dwóch krokach. W kroku pierwszym mierzy się i zapamiętuje moc fal padającej i odbitej dla obciążenia wzorcowego o znanej wartości WFS, odpowiednio P_{MI1} i P_{MR1} . W kroku drugim wykonuje się identyczne pomiary dla obciążenia sprawdzanego, z tym zastrzeżeniem, że poziom sygnału z generatora koryguje się tak, aby zmierzona moc fali padającej P_{MI2} była równa mocy fali padającej zmierzonej w kroku pierwszym; zapamiętywana jest wartość mocy fali odbitej P_{MR2} . Spełnienie powyższego warunku sprawia, że czynnik zakłócający prawidłowy pomiar na wyjściu portu REFLECTED jest taki sam w obu krokach. Wyliczając różnicę obu zmierzonych na tym wyjściu mocy otrzymujemy wartość, w której czynnik zakłócający jest pomijalnie mały.

Do wyliczenia mierzonego WFS wykorzystano model rozplywu mocy w sprzęgaczu podwójnym przedstawiony na rys. 2.



Rys. 2. Uproszczony schemat rozplywu mocy w sprzęgaczu typu „dual coupler”
Fig. 2. Simplified diagram of power propagation in the dual directional coupler

Znaczenie poszczególnych symboli i elementów występujących w powyższym schemacie jest następujące:

- 1 port wejściowy sprzęgacza (INPUT),
- 2 port wyjściowy sprzęgacza (TEST PORT),
- 3 port sprzężony sprzęgacza fali padającej (INCIDENT),
- 4 port sprzężony sprzęgacza fali odbitej (REFLECTED),
- Z_0 obciążenie dopasowane,
- ML parametr opisujący straty w torze głównym sprzęgacza,
- C_I współczynnik sprzężenia sprzęgacza INCIDENT,
- D_I kierunkowość sprzęgacza INCIDENT,
- C_R współczynnik sprzężenia sprzęgacza REFLECTED,
- D_R kierunkowość sprzęgacza REFLECTED,
- P_{IN} moc dostarczona do wrót wejściowych sprzęgacza,
- P_{MI} moc mierzona fali padającej,
- P_{MR} moc mierzona fali odbitej,
- P_I moc fali padającej w płaszczyźnie portu wyjściowego,
- P_R moc fali odbitej w płaszczyźnie portu wyjściowego.

W dalszych rozważaniach założono, że moc mierzona jest nie w dBm lecz w watach; ponadto przeliczono wyrażone w decybelach wartości sprzężenia i tłumienia na niemianowane wartości sprzężenia i tłumienia obowiązujące dla skali liniowej, jak poniżej:

$$k_{CI} = 10^{\frac{-C_I}{10}}, \quad k_{CR} = 10^{\frac{-C_R}{10}}, \quad k_{ML} = 10^{\frac{-ML}{10}}.$$

Mierzoną moc fali padającej P_{MI1} , przy podłączonym obciążeniu wzorcowym, możemy wyrazić wzorem:

$$P_{MI1} = k_{CI} \times P_{IN}. \quad (1)$$

Jest to pewne uproszczenie, polegające na zaniedbaniu wpływu przenikania fali odbitej na wyjście sprzężone sprzęgacza INCIDENT (port nr 3). Można wyliczyć, że dla wartości WFS wynoszącej ok. 3, przy kierunkowości sprzęgacza INCIDENT nie

gorszej niż 27 dB (dane producenta sprzęgacza 772D) popełniamy z tego powodu błąd (względny) około 0,05%. Wobec względnej niepewności standardowej pomiaru, wynoszącej w takim przypadku ok. 5% jest to wartość zupełnie bez znaczenia.

Moc P_{IN} na wejściu sprzęgacza (port nr 1) możemy wyrazić zależnością:

$$P_{IN} = \frac{P_{MI1}}{k_{CI}}, \quad (2)$$

moc fali padającej P_I w płaszczyźnie portu nr 2 wynosi:

$$P_I = (P_{IN} - P_{MI1}) \times k_{ML}, \quad (3)$$

podstawiając zależność (2) otrzymujemy:

$$P_I = P_{MI1} \left(\frac{1}{k_{CI}} - 1 \right) \times k_{ML}. \quad (4)$$

Moc fali odbitej P_{R1} w płaszczyźnie portu nr 2 wyliczamy z zależności:

$$P_{R1} = P_I \times \rho_{wz}^2, \quad (5)$$

gdzie: ρ_{wz} - moduł współczynnika odbicia obciążenia wzorcowego.

Po podstawieniu zależności (4):

$$P_{R1} = P_{MI1} \left(\frac{1}{k_{CI}} - 1 \right) \times k_{ML} \times \rho_{wz}^2. \quad (6)$$

Moc mierzona P_{MR1} na wyjściu portu nr 4:

$$P_{MR1} = k_{CR} \times P_{R1}, \quad (7)$$

$$P_{MR1} = P_{MI1} \left(\frac{1}{k_{CI}} - 1 \right) \times k_{ML} \times k_{CR} \times \rho_{wz}^2. \quad (8)$$

Niech:

$$s = \left(\frac{1}{k_{CI}} - 1 \right) \times k_{ML} \times k_{CR}, \quad (9)$$

wówczas równanie (8) możemy zapisać w postaci:

$$P_{MR1} = P_{MI1} \times s \times \rho_{wz}^2. \quad (10)$$

Analogiczną zależność można wyprowadzić dla pomiarów realizowanych w drugim kroku, dla obciążenia sprawdzanego:

$$P_{MR2} = P_{MI2} \times s \times \rho_L^2, \quad (11)$$

gdzie: P_{MR2} - moc mierzona fali odbitej dla obciążenia sprawdzanego, P_{MI2} - moc mierzona fali padającej dla obciążenia sprawdzanego, ρ_L - moduł współczynnika odbicia obciążenia sprawdzanego.

Pamiętamy, że wartości mocy fali padającej w obu krokach są jednakowe, zatem:

$$P_{MI1} = P_{MI2}, \quad (12)$$

$$P_{MI1} - P_{MI2} = N, \quad N = 0,$$

$$P_{MI2} = P_{MI1} - N. \quad (13)$$

Stałą N równą zero wprowadzono celowo, zostanie ona wykorzystana przy szacowaniu niepewności pomiaru. Podstawiając zależność (13) do równania (11) otrzymujemy:

$$P_{MR2} = (P_{MI1} - N) \times s \times \rho_L^2. \quad (14)$$

Tworząc różnicę zmierzonych mocy fali odbitej w obu krokach otrzymujemy:

$$P_{MR2} - P_{MR1} = (P_{MI1} - N) \times s \times \rho_L^2 - P_{MI1} \times s \times \rho_{wz}^2. \quad (15)$$

Stąd możemy już wyliczyć wartość modułu współczynnika odbicia obciążenia sprawdzanego:

$$\rho_L = \sqrt{\frac{P_{MR2} - P_{MR1}}{s \times (P_{MI1} - N)} + \frac{P_{MI1}}{P_{MI1} - N} \times \rho_{wz}^2}, \quad (16)$$

podstawiając $N=0$ otrzymujemy:

$$\rho_L = \sqrt{\frac{P_{MR2} - P_{MR1}}{s \times P_{MI1}} + \rho_{wz}^2}. \quad (17)$$

Wartość mierzonego WFS obliczamy ze wzoru:

$$WFS_L = \frac{1 + \rho_L}{1 - \rho_L}. \quad (18)$$

Formuły realizujące powyższe zależności zapisano w arkuszu kalkulacyjnym, będącym częścią składową skoroszytu MS Excel zawierającego program sterujący pomiarami.

4. Szacowanie niepewności pomiaru

Oszacowanie niepewność pomiaru przeprowadzono wykorzystując równanie (16).

Zgodnie z prawem propagacji niepewności złożoną niepewność standardową $u(\rho_L)$ pomiaru wartości modułu współczynnika odbicia sprawdzanego obciążenia można wyliczyć z następującej zależności:

$$u(\rho_L) = \sqrt{\sum_i (ci \times u(i))^2}; \quad (19)$$

$$i \in [P_{MR2}, P_{MR1}, P_{MI1}, \rho_{wz}, N, s].$$

Zmienne ci w powyższym wzorze oznaczają współczynniki wrażliwości, zaś zmienne $u(i)$ to niepewności standardowe wielkości reprezentowanych przez i . Współczynniki wrażliwości wyliczono z zależności:

$$ci = \frac{\partial(\rho_L)}{\partial(i)}. \quad (20)$$

Do obliczenia pochodnych cząstkowych, kolejno względem wszystkich zmiennych funkcji ρ_L , wykorzystano dostępny na licencji GPL program MAXIMA [3]. Na podstawie otrzymanych postaci algebraicznych ułożono stosowne formuły we wspomnianym wyżej arkuszu kalkulacyjnym.

Do obliczenia niepewności standardowych wszystkich pomiarów mocy wykorzystano udostępniony przez firmę Agilent arkusz kalkulacyjny „U2000 Uncertainty calculator rev3.xls” [4]. Arkusz ten uzupełniono parametrami użytych sprzęgaczy i obciążenia wzorcowego. Dodano mianowicie, dla różnych częstotliwości z zakresu od 0,1 do 18 GHz, wartości sprzężenia sprzęgaczy INCIDENT i REFLECTED, wartości WFS portów pomiarowych sprzęgaczy, wartości tłumienia toru głównego oraz wartości WFS obciążenia wzorcowego. Wartości te, wraz z niepewnościami,

zaczepnięto ze świadectw kalibracji sprzęgaczy i obciążenia wzorcowego.

Na uwagę zasługuje wprowadzona we wzorze (13) stała N . Mówi ona o tym, z jaką dokładnością można spełnić warunek równości zmierzonych mocy fali padającej w obu krokach pomiaru. Równanie definiujące tę stałą możemy zapisać następująco:

$$N = P_{MI1} - P_{MI2} + \Delta N. \quad (21)$$

Wartość oczekiwana N jest oczywiście równa zero, natomiast czynnik ΔN jest zależny od rozdzielczości ustawienia poziomu mocy wyjściowej generatora. W zastosowanym generatorze rozdzielczość ta wynosi 0,01 dBm. Z taką samą rozdzielczością można mierzyć moc za pomocą przetworników U2000A. Odpowiada to zakresowi $(-0,230 \div +0,231)\%$ wartości mierzonej mocy P_{MI1} . Uwzględniając fakt, że wszystkie wartości w tym przedziale są jednakowo prawdopodobne, można łatwo wyprowadzić zależność na niepewność standardową czynnika ΔN :

$$u(\Delta N) = 0,0013 \times P_{MI1}. \quad (22)$$

Ostatecznie otrzymujemy:

$$u(N) = \sqrt{2 \times u^2(P_{MI1}) + (0,0013 \times P_{MI1})^2}. \quad (23)$$

Dysponując obliczoną niepewnością standardową modułu współczynnika odbicia $u(\rho_L)$ możemy wyliczyć interesującą nas niepewność złożoną mierzonego parametru, czyli $u(WFS)$. Korzystając z równania (18) otrzymujemy:

$$u(WFS) = \frac{2}{(1 - \rho_L)^2} \times u(\rho_L). \quad (24)$$

Ostatecznie, niepewność rozszerzoną pomiaru przy założeniu normalnego rozkładu prawdopodobieństwa, poziomu ufności 95% i współczynnika rozszerzenia $k = 2$ można wyliczyć z zależności:

$$U(WFS) = \frac{4}{(1 - \rho_L)^2} \times u(\rho_L). \quad (25)$$

Oczywiście wszystkie obliczenia wg przedstawionych powyżej zależności realizowane są w arkuszu kalkulacyjnym i nie wymagają żadnych działań ze strony wykonującego pomiary.

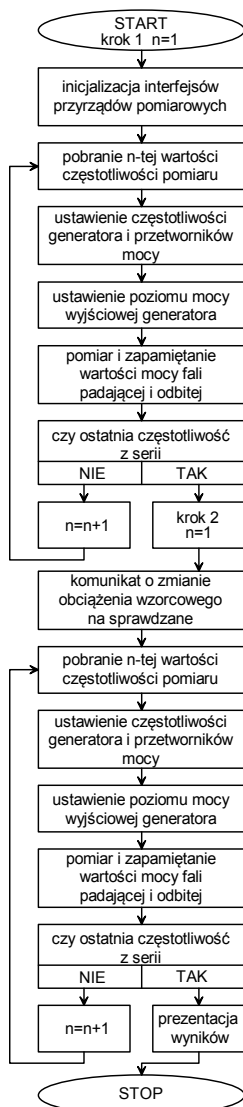
5. Program sterujący

Program sterujący przebiegiem pomiarów napisano w języku Visual Basic for Applications, będącym integralną częścią arkusza kalkulacyjnego MS Excel. Wykorzystano protokoły komunikacji z urządzeniami pomiarowymi zawarte w bibliotece IO Library Suite firmy Agilent.

Aby uruchomić pomiary należy otworzyć skoroszyt Excela z zapisanym programem. Skoroszyt ten może mieć postać protokołu pomiarów, ułożonego wg szablonu stosowanego w laboratorium, co znacznie ułatwia proces tworzenia dokumentacji związanej z pomiarami. Przed uruchomieniem pomiarów operator musi wpisać w odpowiednie komórki arkusza serię wartości częstotliwości, przy których będą wykonywane pomiary.

Program działa wg algorytmu przedstawionego schematycznie na rys. 3.

Po wykonaniu operacji w pierwszym kroku pomiaru program wyświetla komunikat o konieczności podłączenia obciążenia sprawdzanego w miejsce obciążenia wzorcowego i zawieszają swoje działanie do momentu potwierdzenia przez operatora gotowości do realizacji kroku drugiego.



Rys. 3. Schemat działania programu sterującego
Fig. 3. Control program flow chart

Po zrealizowaniu wszystkich operacji w kroku drugim, następuje przepisanie wyników pomiarów do arkusza wyliczającego wartości WFS i niepewności pomiaru dla każdej z ustalonych wcześniej wartości częstotliwości. Na koniec program wypełnia zmierzonymi i wyliczonymi wartościami odpowiednie komórki tabeli z wynikami pomiarów.

6. Wyniki pomiarów testowych

W ramach testowania zarówno samej metody jak i opracowanych arkuszy wykonano pomiary obciążeń wzorcowych o znanych WFS, wynoszących odpowiednio 1,2 i 2,0. Wyniki przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Wyniki pomiarów testowych
Tab. 1. The results of test measurements

Częstotliwość pomiaru [GHz]	WFS obciążenia		Niepewność rozszerzona
	wg danych producenta	zmierzony	
0,5	1,2	1,208	0,018
1,0		1,208	0,018
2,0		1,214	0,021
0,5	2,0	1,953	0,113
1,0		1,953	0,113
2,0		1,991	0,128

Pomiary wykonywano wielokrotnie w ciągu trzech dni, w tej samej konfiguracji stanowiska. Uzyskane wyniki cechowały się rozrzutem wartości nie większym niż $\pm 0,005$.

Wykonano również serię pomiarów dla różnych obciążeń niekalibrowanych. Dla zmierzonych wartości WFS z zakresu od 1,08 do 3,0 wyliczone w programie niepewności rozszerzone pomiaru wynosiły odpowiednio od 0,009 do 0,347.

7. Podsumowanie

Przeprowadzone testy dają podstawę do stwierdzenia, że opisane powyżej stanowisko z powodzeniem można wykorzystywać w procesie kalibracji elementów torów mikrofalowych wymagających określenia dla wejść lub wyjść wartości WFS. W praktyce, elementy te, jeśli oczywiście są sprawne, charakteryzują się wartościami WFS nie większymi od $1,5 \div 1,7$. W tym zakresie uzyskano za pomocą stanowiska wyniki z względną niepewnością rozszerzoną nie gorszą niż 5%. W technice mikrofalowej jest to niepewność bardziej niż zadowalająca.

Dla WFS równego 3 względna niepewność rozszerzona wynosi ok. 10%. Wydaje się, że jest to kres górny przedstawionej metody. Wynika to z tego, że przy wzroście wartości mocy fali odbitej zaczynają w sprzęgaczu dominować zjawiska, których wpływ w przedstawionym opisie metody pomiarowej świadomie pominięto, jak chociażby wpływ skończonej wartości kierunkowości na wynik pomiaru wartości mocy fali padającej. Autor, jak dotąd, nie spotkał się jednak ze sprawnym urządzeniem mikrofalowym, sprawdzanym w laboratorium, którego wejście lub wyjście charakteryzowałoby się wartością WFS większą od 2.

Należy sobie zdawać sprawę, że opisane stanowisko w najmniejszym stopniu nie jest rozwiązaniem alternatywnym dla analizatora obwodów, którego możliwości pomiarowe wykraczają bardzo daleko poza pomiary WFS czy współczynnika odbicia. Na podkreślenie zasługuje jednak fakt, że w zasadzie bez dodatkowych nakładów, wykorzystując przyrządy pomiarowe znajdujące się już wcześniej na wyposażeniu laboratorium, udało się zbudować system pomiarowy skutecznie eliminujący główne wady metod wykorzystujących linie pomiarowe ze szczeliną.

Oprogramowanie jest łatwo przenośne. Jedynym wymaganym komponentem spoza podstawowych produktów firmy Microsoft – systemu operacyjnego i arkusza kalkulacyjnego – jest zestaw procedur obsługi interfejsów stosowanych w przyrządach pomiarowych IO Library Suite firmy Agilent. Jest on standardowo dołączany do podstawowego wyposażenia przyrządów pomiarowych tej firmy. Najnowszą wersję tej biblioteki można bezpłatnie pobrać ze strony producenta.

Obsługa programu nie jest skomplikowana. Poprzez wyświetlanie stosownych komunikatów program informuje operatora o konieczności podjęcia określonych działań. Tym niemniej, podstawowe umiejętności z zakresu posługiwania się arkuszem kalkulacyjnym oraz ogólna znajomość właściwości wykorzystywanego sprzętu mogą okazać się bardzo pomocne.

8. Literatura

- [1] Fundamentals of RF and Microwave Power Measurements (Part 3). Agilent Application Note 1449-3.
- [2] Reflectometer Measurement – Revisited. <http://eu.anritsu.com/files/11410-00214.pdf>.
- [3] <http://maxima.sourceforge.net/documentation.html>.
- [4] U2000 Series USB Power Sensor Uncertainty Calculator. <http://www.agilent.com>.
- [5] Agilent Technologies: Agilent U2000 Series Power Sensors Programming Guide.
- [6] Rohde&Schwarz: Signal Generator R&S SMF 100A. Manual.
- [7] Dokument EA-4/02. Wyrażanie niepewności pomiaru przy wzorcowaniu.