



BIULETYN WAT
VOL. LV, NR 1, 2006

Elektronicznie sterowany generator szumów odniesienia radiometru mikrofalowego

BRONISŁAW STEC, WALDEMAR SUSEK

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Radioelektroniki,
00-908 Warszawa, ul. Kaliskiego 2

Streszczenie. W artykule przedstawiono rozwiązanie generatora szumów, w którym występuje możliwość zmiany wartości gęstości widmowej mocy generowanego sygnału. Taki generator wykorzystywany jest między innymi w układach mikrofalowych radiometrów zrównoważonych jako źródło sygnału odniesienia. Prezentowany generator szumów charakteryzuje się wysoką stabilnością generowanej mocy oraz ma możliwość elektronicznej regulacji jej poziomu. Artykuł zawiera także dyskusję niepewności określenia temperatury szumów wyjściowych sterowanego elektronicznie generatora szumów. Na zakończenie zaprezentowano wyniki pomiarów eksperymentalnych, potwierdzające poprawność przeprowadzonych analiz.

Słowa kluczowe: radiometria mikrofalowa, generator szumów, pomiar temperatury

Symbole UKD: 621.396.96

1. Wprowadzenie

Generator szumów jest źródłem wzorcowych stacjonarnych sygnałów losowych. Sygnały te powszechnie wykorzystywane są do pomiarów parametrów szumowych układów elektronicznych, takich jak współczynnik szumów czy skuteczna wejściowa temperatura szumów. Wzorcowe źródła szumów charakteryzują się najczęściej stałą gęstością widmową mocy generowanego sygnału, definiowaną przez parametr ENR (*Excess Noise Ratio*).

Metoda pomiaru współczynnika szumów, wywodząca się z samej definicji współczynnika szumów, polega na pomiarze całkowitych mocy szumów P_1 i P_2 na wyjściu układu dla przypadków, gdy do jego wejścia podłączono dopasowane obciążenie o fizycznej temperaturze T_0 — moc P_1 , a następnie kalibrowany ge-

nerator szumów o znanej wartości ENR — moc P_2 . Współczynnik szumów można obliczyć z zależności:

$$F = ENR - 10 \log \left(\frac{P_2}{P_1} - 1 \right), \quad (1)$$

gdzie F oraz ENR są wielkościami wyrażonymi w dB.

Skuteczną wejściową temperaturę T_e szumów układu można obliczyć z zależności [1]:

$$T_e = \frac{T_2 - Y \cdot T_1}{Y - 1}, \quad (2)$$

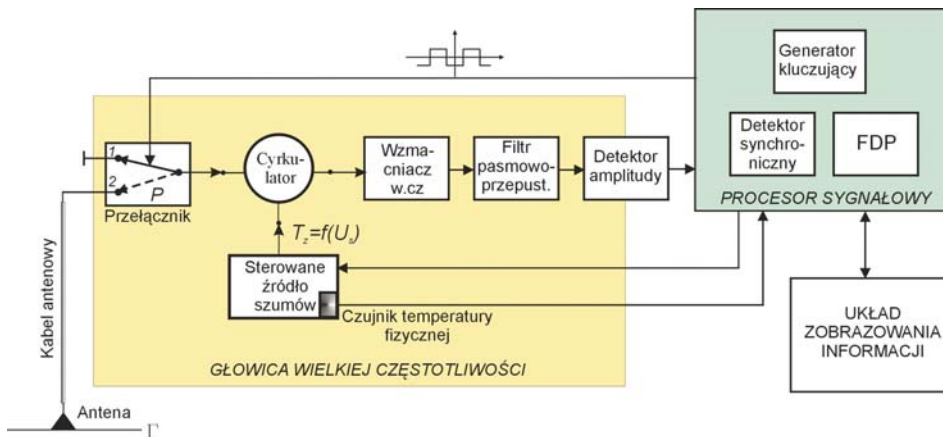
gdzie T_1 T_2 są wartościami temperatur szumów źródeł włączonych na wejście badanego układu, które można wyznaczyć z zależności:

$$T_x = T_0 \left(1 + 10^{\frac{ENR_x}{10}} \right) \quad \text{gdzie } x = 1, 2, \quad (3)$$

a parametr Y stanowi iloraz odpowiadający temperaturom T_1 i T_2 wartości mocy szumów wyjściowych P_1 i P_2 taki, że

$$Y = \frac{P_2}{P_1}. \quad (4)$$

W przedstawionych powyżej metodach pomiarowych (współczynnika szumów i temperatury szumów) wykorzystywane są generatory szumów charakteryzujące się stałą wartością parametru ENR określoną na etapie kalibracji. Istnieją



Rys. 1. Schemat blokowy zrównoważonego radiometru mikrofalowego

także rozwiązania układowe wymagające stabilnych źródeł szumów odniesienia, od których wymaga się możliwości zmiany wartości parametru ENR w czasie normalnej pracy. Takimi urządzeniami są radiometry zrównoważone, umożliwiające odbiór i pomiar promieniowania cieplnego w zakresie mikrofalowym.

Schemat blokowy radiometru zrównoważonego [2, 3], wykorzystującego regulowane źródło szumów, przedstawia rysunek 1.

2. Budowa generatora szumów

2.1. Charakterystyka ogólna

Generatory szumów jako źródła stacjonarnych sygnałów przypadkowych można scharakteryzować przez rozkład prawdopodobieństwa wartości chwilowych przebiegów wyjściowych tych przyrządów oraz przez ich funkcję korelacji lub równoważną jej widmową gęstość mocy. Są to urządzenia wykorzystujące pierwotne źródło przebiegu przypadkowego, którym mogą być zjawiska fizyczne, bądź algorytmy matematyczne. Struktura generatora szumów składa się z pierwotnego źródła stacjonarnego przebiegu przypadkowego oraz z układu kształtowania rozkładu wartości chwilowych i funkcji korelacji (gęstości widmowej mocy), jak również układu ustalenia poziomu generowanego sygnału i wartości impedancji wyjściowej.

Pierwotne źródła szumów powinny charakteryzować się następującymi właściwościami:

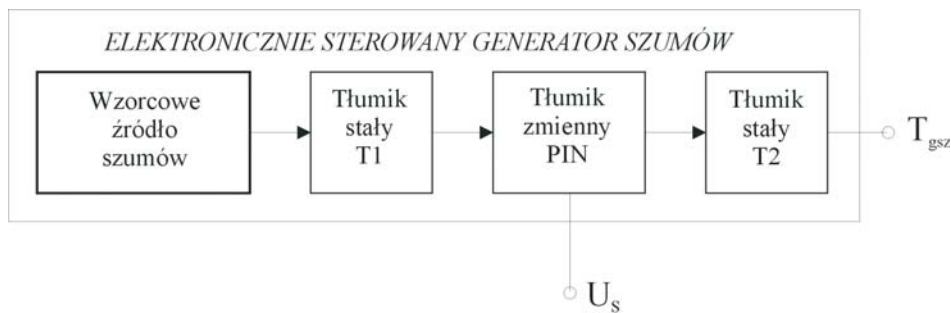
- stałą gęstością widmową mocy w szerokim zakresie częstotliwości,
- dużą intensywnością generowanego sygnału,
- stałością właściwości w czasie i przy zmianach parametrów środowiskowych,
- impedancją wyjściową równą impedancji charakterystycznej linii transmisyjnej w zakresie wielkich częstotliwości.

Jako pierwotne źródła szumów można wykorzystać źródła mechaniczne, materiały promieniotwórcze, rezystory, lampy próżniowe i gazowane, fotorezystory czy inne elementy półprzewodnikowe. W prezentowanym generatorze jako wzorcowe źródło szumów wykorzystano rezystor oraz diodę półprzewodnikową. Szumy cieplne rezystora są szumem białym w szerokim paśmie częstotliwości o rozporządzałnej gęstości widmowej mocy równej kT . Z kolei złącza półprzewodnikowe p-n i n-p, przy polaryzacji wstecznej na skutek zjawiska lawinowego, wykazują znaczny wzrost poziomu szumów śrutowych związanych z przepływem prądu. Najczęściej stosowanymi źródłami półprzewodnikowymi szumów są diody Zenera, które charakteryzują się stosunkowo dużą stabilnością (małą wartością współczynnika temperaturowego zmian poziomu szumów — ok. 0,008 dB/°C),

dużą intensywnością generowanego sygnału i stałą rozporządzalną gęstością widmową mocy w szerokim zakresie częstotliwości [4].

2.2. Schemat blokowy generatora szumów

W zaprojektowanym i wykonanym zgodnie ze schematem blokowym przedstawionym na rysunku 2 generatorze szumów, którego moc wyjściową można zmieniać elektronicznie, wykorzystano pierwotne półprzewodnikowe źródło szumów. Źródłem tym jest wysokostabilny kalibrowany generator diodowy firmy *AilTech* o ENR = 15 dB [5].



Rys. 2. Schemat blokowy elektronicznie sterowanego generatora szumów

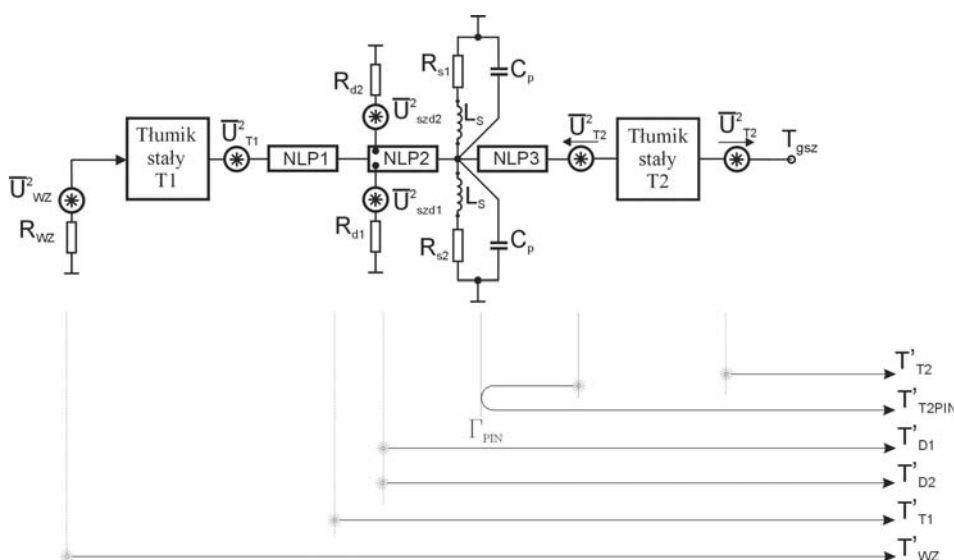
Tłumiki T1 i T2 są tłumikami mikrofalowymi w obudowach umożliwiających montaż powierzchniowy w liniach mikropaskowych. Tłumiki stałe ustalają poziom mocy szumów generowanych przez wzorzec, natomiast tłumik regulowany PIN zmienia wartość tego poziomu w zależności od prądu polaryzacji płynącego przez diody. Tłumiki stałe, których wartości wynoszą odpowiednio 10 i 16 dB separują także wzorcowe źródło i obciążenie od oddziaływania na nie odbiciowego tłumika PIN. W związku z tym, że tłumiki stałe są źródłem mocy szumów cieplnych, generator wyposażony jest w układ do pomiaru ich temperatury fizycznej. Pomiar temperatury fizycznej tłumików jest niezbędny do określenia mocy szumów na wyjściu generatora, przy ustalonej wartości prądu polaryzacji diod.

3. Analiza parametrów generatora szumów

Pierwotne źródło szumów generuje szum o stałej gęstości widmowej mocy N_{wz} w rozpatrywanym zakresie częstotliwości, której wartość określona jest zależnością:

$$N_{wz} = kT_0 \left(1 + 10^{\frac{ENR}{10}} \right). \quad (5)$$

Tłumiki stałe, znajdujące się w temperaturze T_{fiz} , obniżają moc szumów pochodzących z źródła pierwotnego i spełniają funkcję separującą odbiciowy tłumik PIN. Zastępczy schemat szumowy generatora przedstawia rysunek 3. Zastosowano w nim jednolity układ zastępczych napięciowych źródeł szumów zarówno dla diod PIN, jak i dla elementów biernych. Źródła te opisane są kwadratami wartości skutecznych, a więc proporcjonalnymi do wartości mocy źródeł szumów, jakie reprezentują.



Rys. 3. Zastępczy schemat szumowy sterowanego elektronicznie generatora szumów

Analizę przeprowadzono w oparciu o zasadę superpozycji, ze względu na addytywny charakter szumów generowanych przez podzespoły generatora, jak również ich statystyczną niezależność. Generator przedstawiony na rysunku 3 generuje na swoim wyjściu szum o stałej gęstości widmowej mocy, można więc przyrównać szum wyjściowy generatora do szumu termicznego i opisać jego widmową gęstość mocy w postaci:

$$N_{gsz} = kT_{gsz}. \quad (6)$$

Wyjściowa temperatura szumów generatora w sposób jednoznaczny opisuje więc moc generowanego sygnału przy określonej impedancji.

Po uwzględnieniu powyższych założeń, wyrażenie na temperaturę szumów generatora przyjmuje postać:

$$T_{gsz} = T'_{wz} + T'_{T1} + T'_{D1} + T'_{D2} + T'_{T2PIN} + T'_{T2}. \quad (7)$$

Składniki wyrażenia (7) opisane są następującymi zależnościami:

$$T'_{wz} = T_0 \left(1 + 10^{\frac{ENR}{10}} \right) k_{ps}^{T1} k_{ps}^{T2} k_{ps}^{PIN} \quad (8)$$

$$T'_{T1} = T_{fiz} \left(1 - k_{ps}^{T1} \right) k_{ps}^{T2} k_{ps}^{PIN} \quad (9)$$

$$T'_{T2} = T_{fiz} \left(1 - k_{ps}^{T2} \right) \quad (10)$$

$$T'_{D1} = \frac{1}{2} T_{szd1} k_{ps}^{D1} k_{ps}^{T2} k_{ps}^{PIN} \quad (11)$$

$$T'_{D2} = \frac{1}{2} T_{szd2} k_{ps}^{D2} k_{ps}^{T2} k_{ps}^{PIN} \quad (12)$$

$$T'_{T2PIN} = T_{fiz} \left(1 - k_{ps}^{T2} \right) \Gamma_{PIN}^2 k_{ps}^{T2}, \quad (13)$$

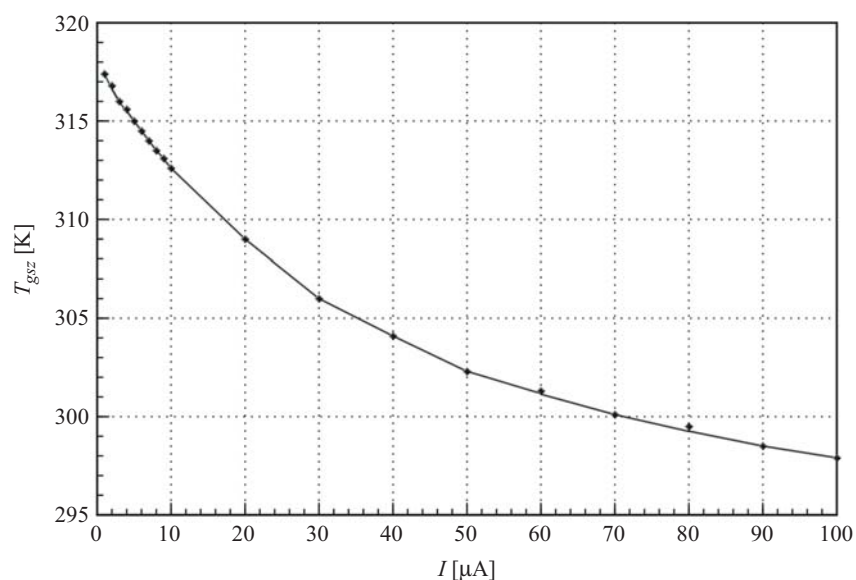
gdzie: poszczególne k_{ps} są skutecznymi wzmocnieniami mocy podzespołów generatora, T_{szd} jest temperaturą szumów diody PIN, a T_{fiz} jest temperaturą fizyczną podzespołów generatora.

Wyrażenia (11) i (12) opisują szумы wnoszone przez diody PIN. W analizowanym przypadku były to dwie diody umieszczone w tym samym miejscu linii transmisyjnej tłumika regulowanego. Diody te polaryzowane są jednakowym prądem, więc wyrażenia (11) i (12) są sobie równe. Wyrażenie (13) opisuje szумы wnoszone przez tłumik T2, generowane w kierunku tłumika PIN. Ulegają one odbiciu od tłumika PIN ze współczynnikiem Γ_{PIN} zależnym od prądów polaryzujących diody PIN i po przejściu przez tłumik T2 stają się składnikiem szumów wyjściowych. Wyrażenia (9) i (10) reprezentują natomiast szумы wnoszone do układu przez stratne elementy bierne generatora szumów, jakimi są tłumiki T1 i T2. Biorąc powyższe pod uwagę, temperaturę wyjściową sterowanego elektronicznie generatora szumów wyraża się wzorem:

$$T_{gsz} = \chi \left[T_0 k_{ps}^{T1} \left(1 + 10^{\frac{ENR}{10}} \right) + T_d (1 - 0,5n) k_{ps}^D \right] + T_{fiz} \chi \left[\frac{(1 - k_{ps}^{T2}) (\Gamma_{PIN}^2 k_{ps}^{T2} + 1)}{\chi} + (1 - k_{ps}^{T1}) \right], \quad (14)$$

gdzie: $\chi = k_{ps}^{T2} k_{ps}^{PIN}$.

Wyrażenie (14) w pełni opisuje wyjściową temperaturę szumów generatora. Wynika z niego, że temperatura szumów generatora zależy w sposób bezpośredni od szumów użytego pierwotnego źródła szumów (ENR), temperatury fizycznej (otoczenia) T_{fiz} i rodzaju tłumika PIN, a w sposób pośredni — od prądu polaryzacji diod, który determinuje parametry transmisyjne, tj.: k_{ps}^{PIN} , k_{ps}^D i współczynnik odbicia Γ_{PIN} . Na rysunku 4 przedstawiono zmiany temperatury szumów analizowanego generatora w funkcji prądu polaryzacji tłumika PIN.



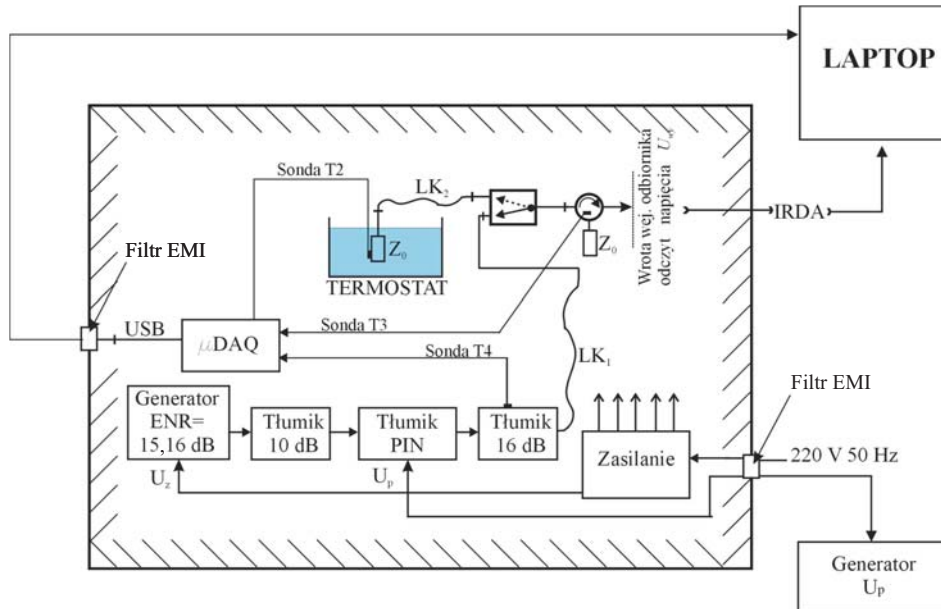
Rys. 4. Charakterystyka symulacyjna sterowanego elektronicznie generatora szumów przy założonej temperaturze fizycznej (otoczenia) $T = 295$ K i $ENR = 15,16$ dB

Charakterystyka ta została wyznaczona na podstawie zależności (14), w której parametry transmisyjne określono na podstawie obliczeń symulacyjnych.

4. Wyniki pomiarów eksperymentalnych

Pomiary przeprowadzono w klatce ekranującej, zaprojektowanej i wykonanej w Zakładzie Mikrofal IRE WEL WAT na potrzeby pomiarów radiometrycznych. Sygnały wejściowe i wyjściowe oraz zasilania doprowadzono do klatki za pomocą filtrów EMI . Stanowisko pomiarowe przedstawiono poglądowo na rysunku 5.

Do kontroli temperatury w poszczególnych punktach układu pomiarowego wykorzystano platynowe sondy rezystancyjne. Sygnały z sond przez układ kondy-

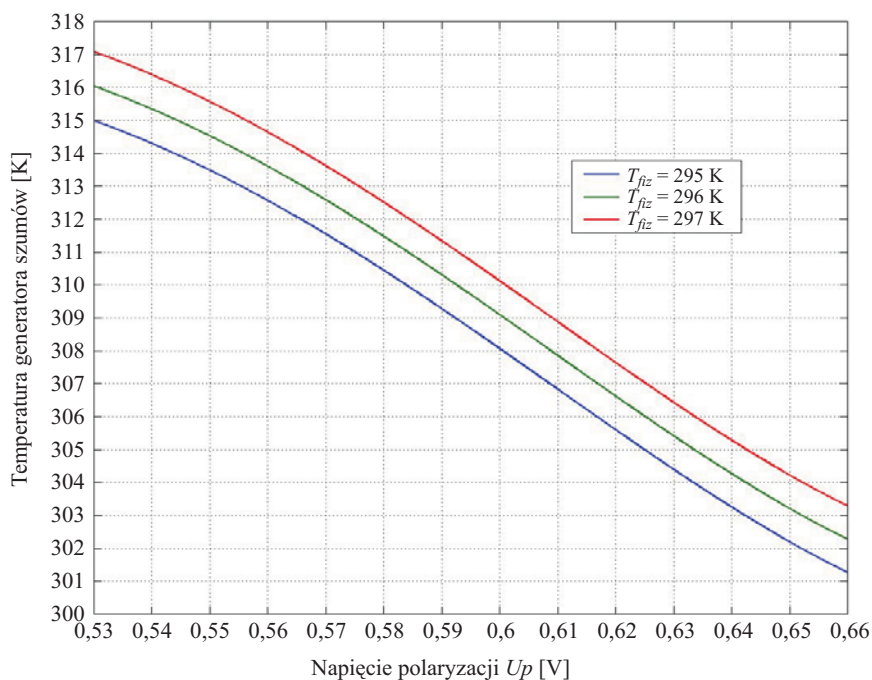


Rys. 5. Schemat układu pomiarowo-kalibrującego sterowanego elektronicznie generatora szumów

cjonujący doprowadzane były do karty akwizycji danych, a następnie torem USB przekazywane do komputera. Pomiarów dokonano za pomocą radiometru modulacyjnego, pracującego w układzie umożliwiającym porównanie mocy szumów cieplnych generowanych przez obciążenie $Z_0 = 50 \Omega$ umieszczone w termostacie i mocy szumów pochodzących z generatora.

W tak skonstruowanym układzie pomiarowym dokonano kalibracji zbudowanego regulowanego generatora szumów, której wynikiem jest przebieg zmienności wyjściowej temperatury szumów od napięcia polaryzującego diody PIN tłumika regulowanego. Charakterystykę zmian temperatury wyjściowej przedstawia rysunek 6.

Przebieg charakterystyki tak zaprojektowanego generatora w szerokim zakresie napięć polaryzujących jest quasi-liniowy, co znaczenie upraszcza zagadnienie sterowania jego pracą.



Rys. 6. Charakterystyka sterowanego elektronicznie generatora szumów

5. Dyskusja niepewności

Do oceny niepewności przyjęto założenie o statystycznej niezależności niepewności określających dokładność wyznaczenia wartości poszczególnych wielkości występujących w funkcji (14). Takie założenie pozwala wyznaczyć niepewność standardową określenia temperatury szumów generatora jako

$$u(\hat{T}_{gsz}) = \sqrt{u^2(T'_{wz}) + u^2(T'_{T1}) + u^2(T'_D) + u^2(T'_{T2PIN}) + u^2(T'_{T2})}. \quad (15)$$

Poszczególne niepewności występujące pod pierwiastkiem w wyrażeniu (15) zostały określone na podstawie zależności (8)-(13) z uwzględnieniem prawa propagacji niepewności.

W celu określenia wartości niepewności ustawienia temperatury szumów dla układu generatora przedstawionego na rysunku 2, przeprowadzono obliczenia dla następujących danych:

$$\begin{aligned} k_{ps}^{T1} &= -10 \text{ dB} & u(T_1) &= 0,02 \text{ dB} \\ k_{ps}^{T2} &= -16 \text{ dB} & u(T_2) &= 0,02 \text{ dB} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 k_{ps}^{PIN} &= -4 \text{ dB} & u(T_{PIN}) &= 0,03 \text{ dB} \\
 ENR &= 15,16 \text{ dB} & u(ENR) &= 0,30 \text{ dB} \\
 T_{fiz} &= 295 \text{ K} & u(T_{fiz}) &= 0,30 \text{ K}
 \end{aligned}$$

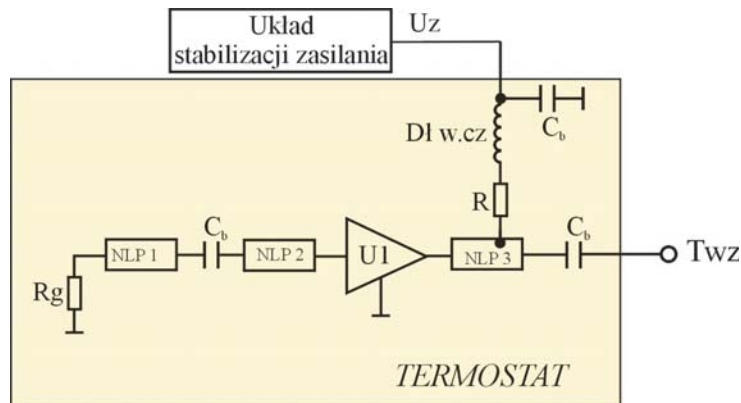
Dla tak określonych parametrów wejściowych, poszczególne niepewności określone są następująco:

$$\begin{aligned}
 u(T'_{wz}) &= 0,564 \text{ K}, & u(T'_{T1}) &= 0,018 \text{ K}, & u(T'_D) &= 0,005 \text{ K}, \\
 u(T'_{T2PIN}) &= 0,022 \text{ K}, & u(T'_{T2}) &= 0,295 \text{ K},
 \end{aligned}$$

a niepewność standardowa określenia temperatury szumów wynosi

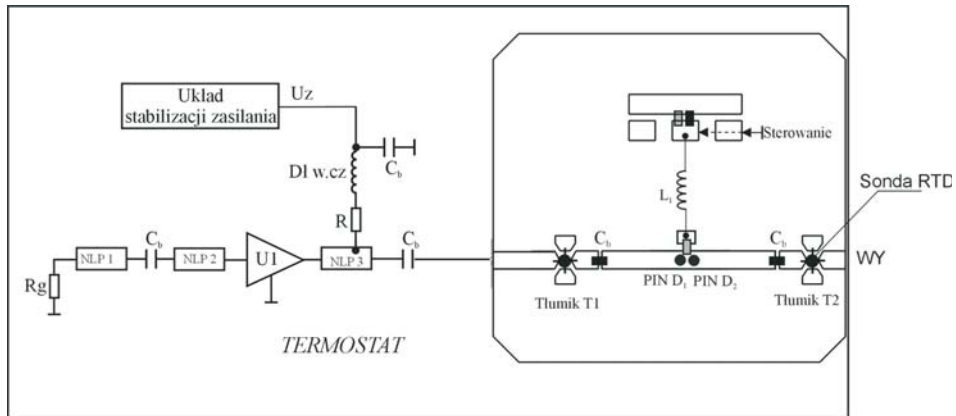
$$u(\hat{T}_{gsz}) = 0,64 \text{ K}.$$

Z przeprowadzonej analizy i rezultatów obliczeń wynika, że największy wkład do niepewności określenia temperatury generatora wnosi wielkość niepewności określenia ENR generatora wzorcowego i niepewność określenia temperatury fizycznej (otoczenia) układów radiometru. Uzyskanie mniejszej niepewności jest możliwe poprzez zastąpienie diodowego generatora wzorcowego układem przedstawionym na rysunku 7.

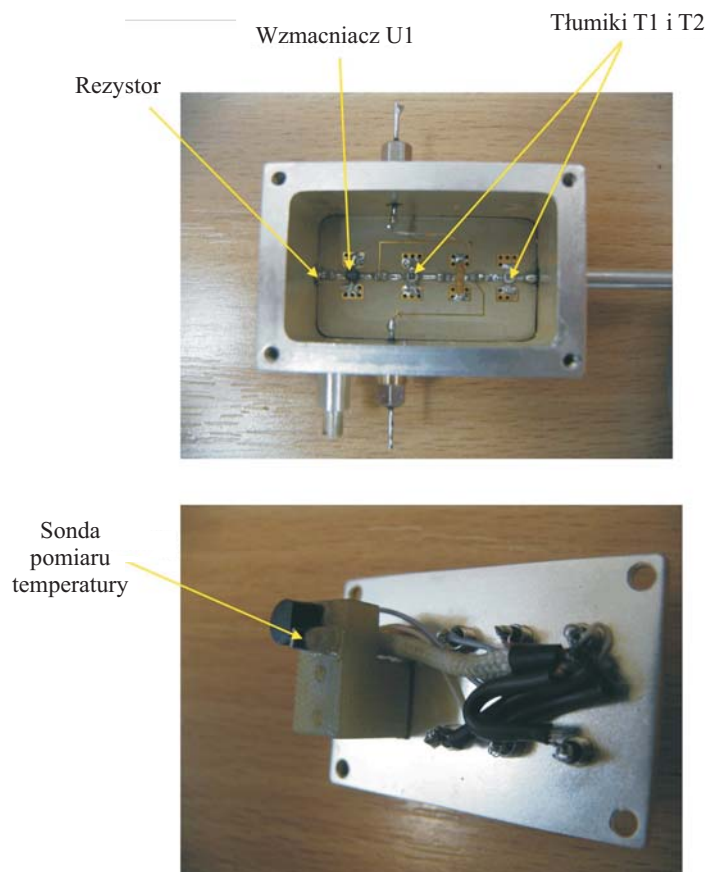


Rys. 7. Pierwotne źródło szumów składające się z rezystora i układu wzmacniacza

W prezentowanym układzie, pierwotnym źródłem szumów jest rezystor utrzymywany w stałej temperaturze. Generowane przez niego szumy wzmacniane są we wzmacniaczu mikrofalowym, wyposażonym w układy stabilizacji termicznej i stabilizacji zasilania. Układy stabilizacji minimalizują fluktuacje wzmocnienia



Rys. 8. Schemat blokowy zmodyfikowanego, sterowanego elektronicznie generatora szumów



Rys. 9. Widok części mikrofalowej sterowanego elektronicznie generatora szumów

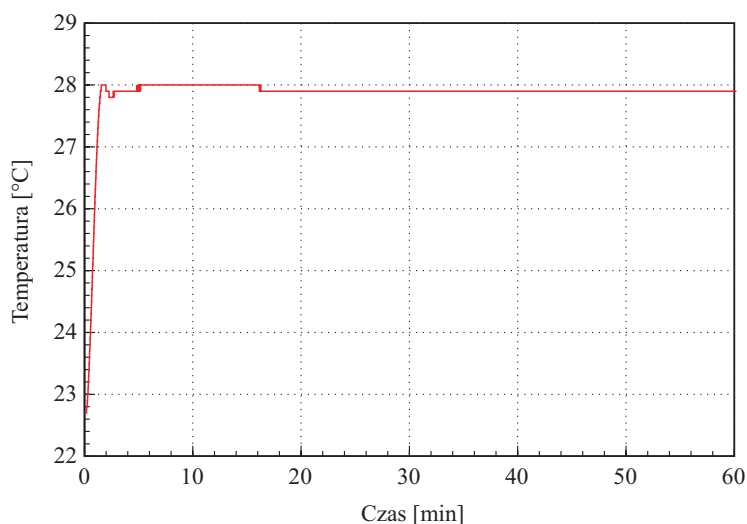
wzmacniacza i pozwalają na uzyskanie względnych fluktuacji wzmocnienia na poziomie 10^{-4} , przy pracy wzmacniacza w paśmie L i wzmocnieniu rzędu 15 dB.

Schemat blokowy zmodyfikowanego generatora szumów przedstawiono na rysunku 8. Wykorzystano w nim pierwotne źródło szumów przedstawione na rysunku 7, oraz opisany w punkcie 3 układ regulacji poziomu mocy szumów wyjściowych. Układ regulacji poziomu mocy szumów umieszczono także w termostacie, który wyposażono w precyzyjną platynową sondę rezystancyjną do pomiaru temperatury fizycznej podzespołów generatora, a w szczególności — temperatury fizycznej tłumików stałych T1 i T2. Widok wykonanego w Zakładzie Mikrofal IRE WEL WAT generatora przedstawia rysunek 9.

Jakość pracy zaprojektowanego i wykonanego dla potrzeb opisywanego generatora termostatu przedstawia zamieszczona na rysunku 10 charakterystyka. Pozwala ona określić wymagany czas stabilizowania się parametrów termicznych wewnątrz termostatu, który w tym przypadku wynosi 20 min. Po tym czasie zmiany temperatury wewnętrznej termostatu są mniejsze niż 0,1 K.

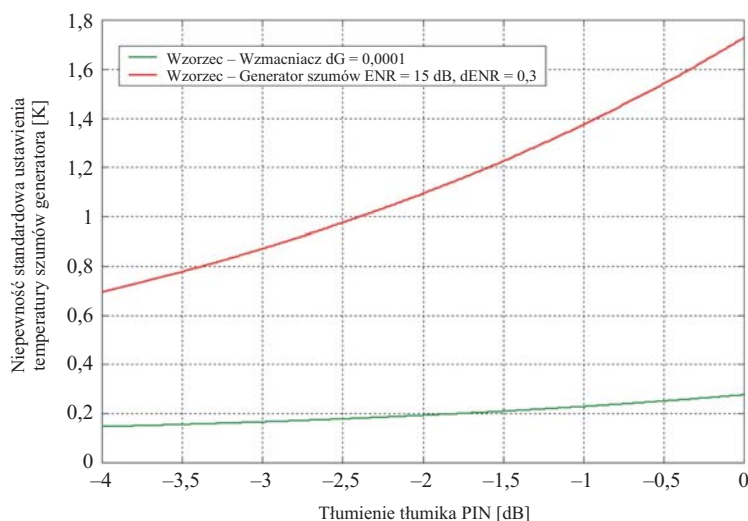
Porównanie niepewności określenia temperatury szumów generatora, w którym zastosowano jako pierwotne źródło szumów wzorcowy generator diodowy i układ rezystora wraz ze stabilizowanym wzmacniaczem, przedstawia rysunek 11. Wynika z niego, że w analizowanym generatorze większą dokładność ustawienia wyjściowej temperatury szumów uzyskuje się w układzie ze źródłem pierwotnym przedstawionym na rysunku 7.

Na uwagę zasługuje także fakt niewielkiej wrażliwości niepewności standardowej na zmiany tłumienia tłumika PIN. W układzie tym można uzyskać niepewno-



Rys. 10. Charakterystyka zmian temperatury fizycznej wewnątrz termostatu

ści rzędu $\pm 0,2\text{K}$ przy zmianie poziomu generowanych szumów wyjściowych w przedziale $(300 \div 320)\text{K}$.



Rys. 11. Niepewność standardowa ustawienia temperatury szumów generatora z dwoma różnymi pierwotnymi źródłami szumów

6. Wnioski

Prezentowany generator szumów został zaprojektowany i zbudowany w Zakładzie Mikrofal Instytutu Radioelektroniki WEL WAT. Może być on stosowany zarówno jako źródło szumów o stałej gęstości widmowej mocy, wykorzystywane w pomiarach parametrów szumowych układów elektronicznych, jak i źródło szumów o zmiennej wartości gęstości widmowej mocy, wykorzystywane w radiometrii mikrofalowej. Wyniki pomiarów wykazały bardzo dobrą zgodność parametrów uzyskanych na drodze pomiarowej z założonymi na etapie projektowania. Generator pracuje w zakresie częstotliwości od 0,5 GHz do 5 GHz i ma możliwość zmiany wartości generowanej temperatury szumów w granicach od 300 do 320 K z dużą rozdzielczością (mniejszą od 0,1 K).

Istotną cechą prezentowanego generatora jest możliwość regulacji w sposób elektroniczny poziomu mocy generowanych szumów przy zachowaniu niepewności ustawienia wartości parametru ENR charakterystycznej dla stałych wzorcowych generatorów szumów. Rozwiązania generatora omawiane w komunikacie spełniają bardzo dobrze oczekiwania odnośnie szumowych źródeł odniesienia radiometrów mikrofalowych, tzn. możliwości regulacji poziomu generowanego sygnału, krótkiego czasu ustalenia się poziomu generowanego sygnału oraz dużej dokładności i rozdzielczości ustawienia temperatury szumów wyjściowych.

Artykuł wpłynął do redakcji 20.10.2005 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w marcu 2006 r.

LITERATURA

- [1] N. S. Krejngiel, *Szumowyye parametry radiopijemnych ustrojstw*, Energija, Leningrad 1969.
- [2] B. Stec, W. Susek, A. Dobrowolski, *Ocena dokładności pomiaru temperatury radiometrem mikrofalowym*, Kwartalnik Elektroniki i Telekomunikacji PAN, nr 54, z. 1, Warszawa 2005.
- [3] B. Stec, M. Żurawski, *Compensated microwave thermometer for medical applications*, Asia Pacific Microwave Conference, 17(2), Tokyo 1994, 405-408,
- [4] L. Hasse, L. Spiralski, *Szumy elementów i układów elektronicznych*, WNT, Warszawa 1981.
- [5] http://www.valuetronics.com/Details.aspx?ProdID=4967&Model=Ailtech_7616.

B. STEC, W. SUSEK

Electronically controlled generator of reference noise for microwave radiometer

Abstract. In the paper, a design of noise generator with a possibility of a changing generated signal value by spectral power density is presented. The generator can be used, among others, in balanced radiometers as a reference source. The presented noise generator is characterized by high stability of output power which can be electronically controlled. Experimental results are also shown.

Noise generator is a source of stationary random signals. Those signals are commonly used for measurements of noise parameters of electronic systems like noise factor or effective input noise temperature. These sources can be usually characterized by constant spectral power density of a signal, defined by ENR (Excess Noise Ratio) parameter. There exist also the systems which need stable generators of reference noise (Fig. 1), capable of changing the ENR parameter value during a standard operation. Balanced radiometers are the systems which enable us also reception and measurement of thermal radiation in a microwave range.

The structure of the noise generator includes primary source of a random course, shaping system both for random values and correlation function (spectral power density) distributions, and a system for determining a level of generated signal and output impedance value as well. A block diagram for the generator is shown in Fig. 2. Primary source of noise is a resistor maintained in a constant temperature. Thermal noise generated in the resistor is then gained in a microwave amplifier with the systems both for thermal and power supply stabilization. Stabilization systems minimize gain fluctuations of the amplifier at the level of 10^{-4} (relative fluctuations) for amplifier operation in the band L and gain of 15 dB. The attenuators minimize an influence of the PIN reflection attenuator on operation of primary noise source and on matching at the generator output. The PIN adjustable attenuator changes values of noise power depending on polarization current passing through PIN diodes.

The presented in the paper noise generator can be used both in measurements for noise parameters of electronic systems and as a noise source with variable spectral power density for microwave radiometry. The generator operates in 0.5-5 GHz frequency range and its noise temperature can be changed from 300 to 320 K with 0.1 K resolution. Its crucial feature is a capability of electronic control of power level of generated noise with the uncertainty of temperature value setting lower than 0.3 K. Generator design fairly meets requirements for reference noise sources of microwave radiometers, namely control of generated signal level, small setting time of generated signal, and high precision and resolution of output noise temperature settings.

Keywords: microwave radiometer, noise generator, temperature measurement

Universal Decimal Classification: 621.396.96