

Bohdan STADNYK, Zenowij KOLODIJ

NARODOWY UNIWERSYTET „LWOWSKA POLITECHNIKA”, UKRAINA

Adam KOWALCZYK

ZAKŁAD METROLOGII I SYSTEMÓW POMIAROWYCH, POLITECHNIKA RZESZOWSKA

Fenomen fluktuacji niskoczęstotliwościowych z widmem 1/f**Profesor dr. hab. inż. Bohdan STADNYK**

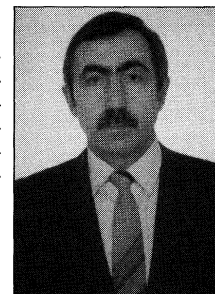
Dyrektor Instytutu Technologii Komputerowych, Automatyki i Metrologii Narodowego Uniwersytetu „Lwowska Politechnika”. Kierownik Katedry Technologii Informatyko-Pomiarowych. Ukończył Politechnikę Lwowską w 1958 r. Stopień doktora uzyskał w 1967 r., a doktora habilitowanego w 1981 r.; tytuł profesora w 1983 r. Specjalności naukowe - przyrządy do pomiaru wielkości nieelektrycznych, sensory wielkości fizycznych, m.in. temperatury, autor 12 podręczników i monografii oraz 80 patentów; wypromował 23 doktorów i 9 doktorów habilitowanych.

**Dr hab. inż. Adam KOWALCZYK, prof. PRZ**

Profesor nadzwyczajny Politechniki Rzeszowskiej. Kierownik Zakładu Metrologii i Systemów Pomiarowych. Ukończył specjalność Miernictwo Elektryczne i Przyrządy Pomiarowe na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej w 1973 roku. Stopień doktora uzyskał w 1983 r., a doktora habilitowanego w 1992 r. Dyscyplina i specjalność naukowa: elektronika, metrologia elektryczna i elektroniczna, miernictwo wielkości nieelektrycznych, przetwarzanie sygnałów stochastycznych. Jest autorem i współautorem ponad 100 prac naukowych i ponad 20 opracowań konstrukcyjnych zastosowanych w przemyśle. Członek organizacji, stowarzyszeń i rad naukowych.

**Dr. inż. Zenowij KOLODIJ**

Docent w Instytucie Telekomunikacji, Radioelektroniki i Techniki Elektronicznej w Katedrze Radiotechniki Teoretycznej i Miernictwa Radiotechnicznego Politechniki Lwowskiej. Ukończył Politechnikę Lwowską w 1975 r. Stopień doktora uzyskał w 1988 r. Specjalność naukowa - radiotechnika, w tym szumy elektroniczne, autor 26 artykułów i 5 patentów.



Celem danej pracy (której wyniki zostały skrótkowo przedstawione w artykule) jest:

- przegląd charakterystyk opisujących widmo niskoczęstotliwościowych fluktuacji - widmo energetyczne, widmo mocy, gęstość widmowa, itp. dla interpretacji, co rozumie się pod określeniem „niskoczęstotliwościowe fluktuacje z widmem 1/f^α”;
- analiza wiarygodności otrzymywanych charakterystyk opisujących rozpatrywane fluktuacje, szczególnie dla dolnej granicy pasma oraz wyjaśnienie czy reprezentują one procesy rzeczywiste, czy też są wynikiem badań fluktuacji i wprowadzenia błędów w wyniku przetwarzania fluktuacji.

Znane są następujące metody otrzymywania gęstości widmowej fluktuacji w badaniach eksperymentalnych.

1. Metoda filtracji - wydzielenie wąskich pasm widma sygnału użytecznego za pomocą urządzenia z ustaloną charakterystyką amplitudowo - częstotliwościową. Elementem głównym tego analizatora jest filtr środkowoprzepustowy z odpowiednio wąskim pasmem przepuszczania Δf . Gęstość widmową fluktuacji wyznacza wzór

$$S(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{S_{U,I}^2}{\Delta f}$$

gdzie $S_{U,I}$ - sygnał fluktuacji o charakterze napięcia albo prądu.

2. Wykorzystanie przekształcenia Fouriera procesów stochastycznych

$$\text{do wyznaczenia gęstości widmowej } S(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\left| \int_{t_1}^{t_2} S(t) \cdot e^{-i2\pi ft} dt \right|^2}{T}$$

3. Zastosowanie znanej lub wyznaczonej funkcji korelacyjnej dla obliczenia gęstości widmowej odpowiednio z zależności Wienera-Chinczyzna $S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) \cdot e^{-i2\pi f\tau} d\tau$.

4. Mało rozpowszechniona metoda wykorzystania funkcji znakowych dla wyznaczania gęstości widmowej.
5. Mało rozpowszechniona metoda aparaturowa wykorzystania funkcji ortogonalnych (Walsch, Haar, Radamacher) dla wyznaczenia gęstości widmowej.

Oczywiście, że niezależnie od sposobu wyznaczenia gęstości widmowej sygnałów fluktuacyjnych jej, wartości mają być jednakowe dla takich samych sygnałów, niezależnie od metody analizy.

2. Fluktuacje z gęstości widmową 1/f - realnie istniejące czy błędy eksperymentalne?

W większości prac [2-5] wyznaczano gęstość widmową fluktuacji z wykorzystaniem metody filtracji. Zwężenie pasma częstotliwościowego Δf wymaga odpowiedniego zwiększenia czasu pomiaru T ,

Streszczenie

W artykule przedstawiono problemy analizy fluktuacji niskoczęstotliwościowych w jednorodnych i niejednorodnych metalach i półprzewodnikach. Postawiono tezę o wpływie ruchu Browna cząstek elementarnych na fluktuacje niskoczęstotliwościowe. Zaproponowano model fluktuacyjny wiążący nagromadzoną wewnętrzną energię oraz strukturę sieci krystalicznej z parametrami szumowymi.

Abstract

In the paper the problems of analysis of low frequency fluctuations in the samples of metals and semiconductors were presented. We came to conclusion that there is the dependence between fluctuations and the Brown's movement. The proposed fluctuational model connects the spared internal energy and the crystal structure with power of fluctuations.

Słowa kluczowe: niskoczęstotliwościowe fluktuacje, energia wewnętrzna, sieć krystaliczna

Keywords: low frequency fluctuations, internal energy, crystal structure

1. Wprowadzenie

Fluktuacje traktowane jako skutki procesów fizycznych, które występują w układzie, są sygnałami informacyjnymi. Dlatego pojęcia „fluktuacje” i „szumy” są nieco odmienne. Szumy są fluktuacjami parametrów układu niepożądanymi ze względu na stan sygnału użytecznego.

Status osobliwy zajmuje szum niskoczęstotliwy z gęstością widmową $S(f) \sim 1/f$ ($\alpha=0,8-1,8$), pochodzenie którego jak i mechanizm powstawania nie są ostatecznie wyjaśnione. Dalej w artykule korzystamy z terminu „fluktuacje niskoczęstotliwościowe” lub „fluktuacje z widmem 1/f^α” ponieważ wyjaśnienie ich istoty ma znaczenie informacyjne [1].

Fluktuacje z widmem 1/f^α występują nie tylko w elektronice, ale także w innych dziedzinach techniki [2, 3] i w publikacjach prowadzone są dyskusje na temat fizycznych mechanizmów powstawania fluktuacji z takim widmem.

wychodząc z zasady nieoznaczoności - $T \cdot \Delta f = \text{const}$. względem stałości błędu pomiaru. Zwężenie pasma przy niezmiennym czasie pomiaru zwiększa odchylenia fluktuacyjne gęstości widmowej mocy

$S(f)$. Odchylenia zmniejszają się kiedy $T \geq \tau_k$, gdzie $\tau_k \approx \frac{1}{\Delta f}$ - inter-

wał korelacji procesu niskoczęstotliwościowego. Wpływ parametrów filtru na $S(f)$ potwierdza praca [6], w której jest podane założenie o działaniu na filtr z pasmem przepuszczania Δf fluktuacji stacjonarnych, gęstość widmowa których nie odpowiada zależności $1/f$. Ten wpływ jest decydujący jeśli interwał korelacji wspomnianych

fluktuacji $\tau_k \geq \frac{1}{\Delta f}$, co jest ekwiwalentne warunkowi $\frac{\Delta f}{\Delta f_{fl}} \geq 1$; gdzie

Δf_{fl} - pasmo częstotliwościowe tych fluktuacji.

Spełnienie ostatniego warunku zakłada istnienie fluktuacji wejściowych dla niskiej częstotliwości, interwał korelacji których jest znacznie większy od czasu ustalenia się procesów przejściowych w analizatorze widma w przypadku pomiarów analogowych lub czasu realizacji T_0 fluktuacji w przypadku pomiarów cyfrowych.

Większość znanych prac [2, 5, 10-16] dotyczących badań szumów niskoczęstotliwościowych nie podważa istnienia fluktuacji z widmem $1/f$. Jednak zastosowanie dotychczas znanych mechanizmów fizycznych nie pozwoliło na wyjaśnienie decydującego wpływu fluktuacji dla niskich częstotliwości.

3. Dolna granica fluktuacji niskoczęstotliwościowych

Ważne znaczenie przy badaniu niskoczęstotliwościowych fluktuacji z widmem $1/f$ ma określenie dolnej granicy częstotliwościowej dla tych fluktuacji.

Wyznaczenie środkami eksperymentalnymi stanu nasycenia gęstości widmowej przy obniżeniu częstotliwości może być potwierdzeniem istnienia składowych procesów odpowiedzialnych za widmo $1/f$. Takiego nasycenia nie zanotowano do częstotliwości 10^{-7} Hz [2, 8]. W pracy [17], rozszerzono pasmo częstotliwości badań do zakresu $10^{23} + 10^{-17}$ Hz (10^{23} Hz odpowiada czasowi przejścia światła na odległość równą w przybliżeniu klasycznemu promieniowi orbity elektronu; zaś 10^{-17} Hz - jest w przybliżeniu porównywalne z wiekiem Wszechświata). Przy tym ogólna moc energetyczna $1/f$ fluktuacji w tym paśmie po przeprowadzonych obliczeniach była równa $3,5 \cdot 10^{-7}$ W, co znacznie ustępuje odpowiednim parametrom przyrządów pomiarowych.

4. Model fluktuacji niskoczęstotliwościowych

Przegląd publikacji, głównie w rosyjsko-języcznej literaturze technicznej [2-16, 18] pozwala uogólnić niektóre prawidłowości dotyczące fluktuacji: zależność ich w metalach i półprzewodnikach od rezystancji (większej rezystancji odpowiadają większe fluktuacje) oraz od technologii produkcji materiału [2, 3, 15, 16]; niejednoznaczność charakteru zależności temperaturowych fluktuacji w półprzewodnikach (od ich zwiększania do ich zmniejszania z temperaturą [2, 14, 16]); zwiększanie poziomu fluktuacji niskoczęstotliwościowych w metalach, proporcjonalnie do temperatury oraz do temperaturowego współczynnika rezystancji; niestacjonarność fluktuacji niskoczęstotliwościowych w półprzewodnikach [4, 7] i w ceramicznych przewodnikach [19, 20].

Wytwarzanie fluktuacji niskoczęstotliwościowych zależy od struktury wewnętrznej materiału [3-6, 8-16, 18] a same fluktuacje z widmem $1/f$ są wynikiem ruchu Browna cząstek elementarnych.

Podstawą dla uogólnień o fluktuacjach niskoczęstotliwościowych są rezultaty badań fluktuacji z widmem $1/f$ w próbkach wzorcowych bez przepuszczania prądu elektrycznego. Wtedy fluktuacje prądu czy napięcia są spowodowane albo fluktuacjami ruchliwości ładunków albo fluktuacjami ich koncentracji. Ostatnia możliwość jest bardziej

wiarygodna [13, 14]. Kiedy defekty wewnętrzne są rozłożone równomiernie w materiale, czyli ich stężenie jest dostateczne, to fluktuacje elektryczne są bliskie do szumu cieplnego. Odwrotnie kiedy defekty wewnętrzne charakteryzują się małym stężeniem lub istnieje niejednorodność budowy, wtedy zwiększa się ilość nieskompensowanych ładunków na powierzchniach granicznych, co powoduje fluktuacje, właśnie typu $1/f$ z zależnością od rezystancji właściwej.

Prawie wszystkie prace rozpatrują moce lub energie fluktuacyjne i opierają się przy tym na charakterystykach termodynamicznych. Również zastosowanie wzoru Einsteina [21] zwiększa wiarygodność połączenia procesów stochastycznych z parametrami termodynamicznymi do których zalicza się zmiany entropii ΔS . Te zależą od częstotliwości fluktuacji f i czasu relaksacji τ , przy czym związek między nimi ujmuje wzór: $\Delta S = C \cdot k \cdot f \cdot \tau$ (C, k - stałe) [22].

Do przykładu można podać dla próbki wzorcowej, która znajduje się przy stałej temperaturze, fluktuacje w paśmie od $f_n \rightarrow 0$ do $f_w \rightarrow \infty$. Dla wysokiej częstotliwości ($f_w \rightarrow \infty$) czas relaksacji $\tau \rightarrow 0$ pozostawiając stały iloczyn $f \cdot \tau = \text{const}$. Dla niskiej częstotliwości ($f_n \rightarrow 0$) czas relaksacji $\tau \rightarrow \infty$. Jednak dla układów z niejednorodnościami wewnętrznymi w pewnym stopniu uporządkowanymi czas ich relaksacji w paśmie niskoczęstotliwościowym $\tau < \infty$. Wtedy zmniejsza się ΔS

i odpowiednio zwiększa się gęstość widmowa fluktuacji $S(f) \cong A \cdot k \frac{\overline{\Delta x^2}}{\Delta S}$

($A \cdot k$ - stała, $\overline{\Delta x^2}$ - średnia energia fluktuacji [22]). Dla materiałów z niejednorodnościami wewnętrznymi które nie są uporządkowane, czas relaksacji w paśmie niskoczęstotliwościowym $\tau \rightarrow \infty$, pozostawiając niezmienny iloczyn $f \cdot \tau = \text{const}$. Przy tym, gęstość widmowa fluktuacji $S(f)$ niezmienna, dla wysokich częstotliwości zbliża się do gęstości szumu białego.

5. Podsumowanie

Parametry fluktuacyjne układu jakie występują w pewnych pasmach częstotliwościowych można uważać za czynnik informacyjny o energii nagromadzonej i dalej rozpraszanej oraz przetwarzanej w energię cieplną. Zależnie od stanu struktury wewnętrznej, układy z dużym stopniem uporządkowania łatwiej przetwarzają energię w fluktuacje typu $1/f$, szczególnie w paśmie niskich częstotliwości, co odwzorowuje osobliwości zbiorowego ruchu ładunków elektrycznych w skutkach ich dyssypacji na niejednorodnościach strukturalnych. W paśmie wysokiej częstotliwości występują wyłącznie szumy cieplne niezależne od częstotliwości, a zależne od temperatury, co jest świadectwem zmian mechanizmu dyssypacji na korzyść silniejszego mechanizmu przetwarzania energii w ciepło.

Uzyskanie struktur materiału (w elementach aparatury pomiarowej) z regulowanym poziomem i mocą energetyczną szumów użytecznych - fluktuacji włącznie z widmem $1/f$ - pozwoli wpływać na zakres pomiaru, jego czułość oraz dokładność, a także badać mezo- i mikroskopowe charakterystyki wymienionych materiałów.

Literatura

- [1] Stadnyk B.I., Kolodiy Z.O., Sanoocky Y.W. Szum-informacyjny parametr. // Miżwidomczy naukowo-techniczny zbirnyk "Wymirjuwalna technika ta metrolohia", 1998, No 52, s.5-8.
- [2] Kohan S.Z.M. Nizkożastotny tokowy szum so spektrom tipa $1/f$ w twerdych telach. // Uspechi fiziczeskich nauk, 1985, t. 145, wyp.2, s.285-325.
- [3] Karmanenko S. F., Semenow A.A. i dr Istożniki fliker-szuma i tehnologia swerchprowodiaszczich mikropoloskow na osnovie plonok ittrij-barijewo koprata. // žurnal tehničeskoj fiziki, 2000, t.70, wyp. 4, s. 63-72.
- [4] Makarow S.W., Medwedew S.J., Jakimow A.W. Korrelacja meźdu intensiwnostjami spektralnych komponent $1/f$ szuma. // Izwestija wuzow. Radiofizika, 2000, t. XL111, No 11, s.1016-1023.
- [5] Bitjučkaja L.A., Selesnjow H.D. Teplowoy fliker-szum w dissipatiwnych procesach predplawlenija kristaliczeskich wezestw. // Fizika tverdoho tela. 1999, t.41, wyp. 9, s. 1679-1682.
- [6] Szulman A. JA. K woprosu o prirode szuma $1/f$. // žurnal eksperimentalnoj i teoretizėskej radiofiziki, 1981, t. 81, wyp. 2(8), s. 784-797.

- [7] Makarow S.W., Medwedew S.J., Jakimow A.W. Wlijanie nehausowosti na pohresznost izmerenija filtrowanoho flikernoho szuma. //Izwestija wuzow.Radiofizika, 1999, t. XL11 No 3, s. 278-286.
- [8] Bożkow H.N. Kuzowlow JU.E. Nowoe w issledowanijach 1/f szuma. // Uspechi fizyčeskich nauk, 1983, t. 141, wyp. 1, s. 151-176
- [9] Kuzowlow JU.E., Medwedew JU.W., Hriszin A.M. Effekty kwantowej diskretnosti i flikernyje fluktuacyi tunelnoy przewodimosti. // Fizika tverdogo tela, 2002, t. 44, wyp. 5, s. 811-819.
- [10] Kowerda W.P., Skokow W.N. Kriticzeskoe powiedjenje i 1/f - szum pri peresečenii dwuch fasowych perechodow w sosredotoženych sistemach. // žurnal techničeskoj fisiki, 2000, t. 70, wyp. 10, s. 1-7.
- [11] A. Wan-der-Zil. Edinoe predstavlenie szumow tipa 1/f w elektronnych priborach: fundamentaľnye istoźniki. //TIHER, 1988, t. 76, 73, s. 28-55.
- [12] Bobyl A.W. Hajewskiy M.E. Dedoborec A.I. Izbytochny szum epitaksialnych plenok $YBa_2Cu_3O_7$ i mikrobolometry antennoho tipa na ich osnowe. //Fizika tverdogo tela, 1999, t. 41, wyp. 11, s. 1931-1935.
- [13] Jakimow A.W. Mohut li podwižnyje defekty wyzwat' 1/f szum w poluprowodnike? //Izwestija wuzow.Radiofizika, 1999, t. XL11, No 6, s. 590-594.
- [14] Tkaženko M.M., Stroitelewa N.I. Spektry strumowoho szumu fotoprowidnyka $Hg_3In_2Te_6$. // Ukrainsky fizyčny žurnal. 1999, t. 44, wyp. 6, s. 748-751.
- [15] Kowaluk Z.D., Orlečky W.B., Budzułak I.M Charakter szumiw u szaruwatych monokrystalach i pliwkach $InSe$. // Jurnal fizyčnych doslidžen, 2001, t. 5, No 1, s. 43-45.
- [16] Djakonowa N.W., Łewinszteyn M.E. Nizkoczastotny szum w n-GaN. // Fizika i technika poluprowodnikow. 1998, t. 32, No 3 s. 285-289.
- [17] I.Flinn. Extent of the 1/f noise spectrum. Nature, 1968, 219, 1356-1357.
- [18] Bożkow W.H., Tabakaewa T.M., Usołcew A.A. Issledowanie korelaczij meźdu niskoczastotnym szumom i wolt-ampernoy charakteristikoy dioda s barjerom Szotki na osnowe GaAs. //Izwestija wuzow.Radiofizika, 2003, t. XLV, No 7 s. 607-612.
- [19] Kolodiy Z.O. Nestacionarnist' nyskoczastotnych fluktuaczij w prowidnykach z riznym charakterem elektroprowidnosti. //Wymirjuwalna technika ta metrolohia", 2000, No 56, s.34-37.
- [20] Kolodiy Z.O. Nyskoczastotni fluktuaczij w radioelektronnij aparaturi. // Wisnyk NU "Lwiwska politechnika" "Radioelektronika ta telekomuniczaj", 2000, No 399, s. 186-190.
- [21] Hlensdorf P., Prygożyn I. Termodinamiczeskaj teoria struktury, ustoyczywoći i fluktuaczij. M. Mir, 1973.
- [22] Kolodiy Z.O. Nizkotemperaturnyje termoszumowyje preobrazowateli. Kand. dissert. Łwow, 1988, 138 s.

Title: Phenomena of the low frequency fluctuations with 1/f spectrum

Artykuł recenzowany

INFORMACJE

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ
ul. Akademicka 5, 44-100 GLIWICE
tel./fax (0-32) 237-13-81, 237-48-48
DZIAŁ SPRZEDAŻY I REKLAMY
<http://loki.polsl.pl/wydawnictwo>
wydawnictwo_mark@polsl.pl

Wydawnictwo poleca następujący tytuł autorstwa prof. Tadeusza Skubisa:

„Opracowanie wyników pomiarów”

W podręczniku przedstawiono 150 przykładowych zadań z opracowania wyników pomiarów, wraz z rozwiązaniami. Zilustrowano typowe sposoby postępowania w sytuacjach spotykanych w praktyce najczęściej.

Zaletą książki jest pokazanie, jak należy szacować niepewność wyniku pomiaru zgodnie z zaleceniami aktualnych dokumentów metrologicznych. Pojęcia błędów i niepewności używane są wyłącznie w ich właściwych, odrębnych znaczeniach, Ten aspekt książki należy podkreślić, ponieważ pojęcie niepewności wyniku wprowadzone zostało stosunkowo niedawno i ciągle jest przedmiotem nieporozumień, Zadania ilustrują również sposób zaokrąglania wyniku zapisu wyniku pomiaru i jego interpretację a także przykładowe wykorzystanie modeli statystyki matematycznej do opracowania wyniku pomiaru.

W rozwiązaniach zadań zamieszczono komentarze zwracające uwagę czytelnika na te problemy, które najczęściej są źródłem nieporozumień albo są niewłaściwie interpretowane.

Spis treści:

1. Zaokrąglanie i zapis wyników, błędów i niepewności
2. Podstawowe parametry przetworników pomiarowych
3. Obliczenia na liczbach przybliżonych
4. Podstawy obliczania błędów i niepewności
5. Wartości średnie
6. Podstawowe właściwości rozkładu wyników losowych
7. Estymacja wartości oczekiwanej i odchylenia standardowego wyników o niejednakowej precyzji
8. Obliczanie przedziałów ufności i poziomów ufności wyników
9. Obliczanie niepewności metodą typu A
10. Obliczanie niepewności złożonej
11. Regresja liniowa
12. Testowanie hipotez

Dodatek. Tablice rozkładów

Cena 27 zł, str. 234, format B5, ISBN – 83-7335-059-4