

Jacek CICHOSZ¹, Alicja KONCZAKOWSKA¹, Barbara STAWARZ-GRACZYK¹, Andrzej SZATKOWSKI²

¹ POLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTRONIKI, TELEKOMUNIKACJI I INFORMATYKI

² AKADEMIA POMORSKA W SŁUPSKU, INSTYTUT MATEMATYKI

Metody analizy szumu telegrafistów przyrządów półprzewodnikowych

Dr inż. Jacek CICHOSZ

Reprezentuje dyscyplinę elektronika, specjalność systemy pomiarowe szumów i zakłóceń. Obszar zainteresowań: identyfikacja i pomiary bardzo słabych sygnałów, układy małoszumowe, pomiary parametrów szumowych, udział w pracach konstrukcyjnych wielu urządzeń pomiarowych, szczególnie do pomiaru parametrów szumowych przyrządów półprzewodnikowych. Jest autorem i współautorem ponad 100 publikacji, w tym 2 skryptów i 1 podręcznika.



e-mail: jcichosz@eti.pg.gda.pl

Prof. dr hab. inż. Alicja KONCZAKOWSKA

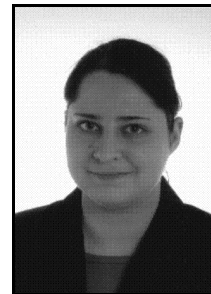
Reprezentuje dyscyplinę elektronika, specjalność miernictwo elektroniczne. Obszar zainteresowań: mechanizmy powstawania, analiza i pomiary szumów elementów elektronicznych oraz zakłóceń m.c.z., konstrukcja mierników i systemów do pomiarów szumów własnych elementów elektronicznych, ocena powiązań szumów z zakresu m.c.z. elementów elektronicznych z ich jakością i niezawodnością. Jest autorką i współautorką ponad 200 publikacji, w tym 4 monografi.



e-mail: alkon@eti.pg.gda.pl

Mgr inż. Barbara STAWARZ-GRACZYK

Reprezentuje dyscyplinę elektronika, specjalność skomputeryzowane systemy elektroniczne. Obszar zainteresowań: analiza i pomiary szumów przyrządów półprzewodnikowych, szczególnie transoptorów, konstrukcja systemów do pomiarów szumów, ocena powiązań szumów m. cz. transoptorów z ich jakością. Jest autorką i współautorką 12 publikacji, w tym 1 artykułu w czasopiśmie z listy filadelfijskiej. Uczestnik 4 roku Studium Doktoranckiego przy WETI PG.



e-mail: bstawarz@eti.pg.gda.pl

Dr inż. Andrzej SZATKOWSKI

Jest adiunktem w Instytucie Matematyki Akademii Pomorskiej w Słupsku. Zajmuje się matematyczną teorią systemów dynamicznych i jej zastosowaniami. Współpracuje też z Zespołem Miernictwa Sygnałów Losowych i Aparatury Pomiarowej Wydziału ETI Politechniki Gdańskiej zajmując się analizą komputerową sygnałów szumu występujących w przyrządach półprzewodnikowych.



e-mail: Andrzej-Szat@wp.pl

Streszczenie

Scharakteryzowano szum telegrafistów (Random Telegraph Signal – RTS), który może występować w szumie własnym przyrządów półprzewodnikowych, jako składowa niegaussowska. Podkreślono, że szum telegrafistów jest efektem defektów materiałów zastosowanych w produkcji przyrządów półprzewodnikowych lub nieprawidłowości procesu produkcyjnego. Przedstawiono metody identyfikacji wielopoziomowego szumu telegrafistów, na przykładzie przebiegów szumów własnych przyrządów półprzewodnikowych.

Słowa kluczowe: szum telegrafistów, metody identyfikacji szumu telegrafistów, przetwarzanie cyfrowe szumu.

Methods of analysis of random telegraph signal noise (RTS noise) of semiconductor devices

Abstract

The Random Telegraph Signal noise which can occur in inherent noise of semiconductor devices as a non-Gaussian component is characterized. It was emphasized that the RTS noise is caused by defects of applied materials or manufacturing incorrectness. The methods of identification of multilevel RTS noise in an inherent noise of semiconductor devices are presented.

Keywords: random telegraph noise signal, methods of RTS noise identification, digital processing of noise.

1. Wstęp

Szum własny przyrządów elektronicznych – jego poziom i charakter, świadczy o jakości zastosowanych przy ich wytwarzaniu materiałów oraz o staranności procesu produkcji [1, 2, 3, 4]. W zakresie małych częstotliwości można w przebiegu szumów własnych przyrządów półprzewodnikowych wyróżnić dwie składowe: składową o wartościach chwilowych o rozkładzie gaussowskim (są to np. szumy cieplne, śrutowe, szumy typu 1/f) oraz składową o wartościach chwilowych o rozkładzie niegaussowskim, np. przebieg określany jako szum wybuchowy lub szum

telegrafistów (Random Telegraph Signal – RTS). Szum RTS to ciąg impulsów o stałej amplitudzie, przypadkowym momencie występowania oraz czasie trwania); składowa szumu telegrafistów może nie występować w sygnale szumowym.

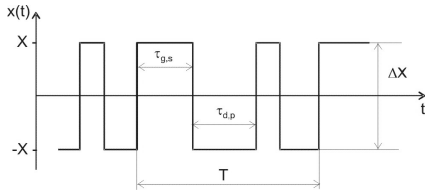
Szumy własne, które charakteryzują się rozkładem gaussowskim wartości chwilowych są spowodowane przez źródła szumów, które zawsze występują przy danej technologii wytwarzania. Ich poziom można wstępnie oszacować. Natomiast szumy własne, które charakteryzują się niegaussowskim rozkładem wartości chwilowych są spowodowane wadami przyrządów półprzewodnikowych lub nieprawidłowościami procesu technologicznego. Przykładem takiego szumu jest szum telegrafistów. Stwierdzono, że przy dobrze opanowanej technologii produkowane przyrządy półprzewodnikowe nie generują szumów wybuchowych. Pod koniec ubiegłego stulecia uznano, że problem szumów wybuchowych w przyrządach półprzewodnikowych nie jest istotny. Jednak dalsze zmniejszenie rozmiarów przyrządów półprzewodnikowych w sposób wyraźny wpłynęło na poziom i charakter ich szumów własnych. Stwierdzono, że im mniejsze rozmiary, tym wyższy poziom szumów [4, 5]. Wprowadzenie mikro- lub nanotechnologii w produkcji przyrządów półprzewodnikowych spowodowało więc ponowne zainteresowanie problemem szumów telegrafistów. Konieczne było i nadal jest wprowadzanie metod umożliwiających sprawne wykrywanie szumów RTS w szumach własnych przyrządów półprzewodnikowych. Metody te umożliwiają selekcję wadliwych egzemplarzy wśród produkowanych przyrządów półprzewodnikowych oraz identyfikację źródeł szumów RTS.

2. Parametry szumu RTS

Typowy przebieg dwupoziomowego szumu RTS przedstawiono na rys. 1.

Podstawowymi parametrami charakteryzującymi szum telegrafistów są: $\bar{\tau}_g$ – średni czas trwania impulsów w stanie górnym, czyli wartość średnia z przedziałów czasu $\bar{\tau}_{g,s}$, gdzie $s = 1, 2, \dots, S$, wyznaczona w przedziale T czasu obserwacji przebiegu szumu; $\bar{\tau}_d$ – średni czas trwania impulsów w stanie dolnym, czyli wartość średnia z przedziałów czasu $\bar{\tau}_{d,p}$, gdzie $p = 1, 2, \dots, P$, wyznaczona

na w przedziale T czasu obserwacji przebiegu szumu; ΔT – amplituda szumu RTS; f_{RTS} – częstotliwość charakterystyczna dla źródła szumu RTS, identyfikowana zwykle w zakresie małych częstotliwości.



Rys. 1. Dwupoziomowy szum RTS: $\tau_{g,s}$ czas trwania impulsu w stanie górnym, $\tau_{d,p}$ czas trwania impulsu w stanie dolnym, ΔX – amplituda impulsów

Fig. 1. Two-level RTS noise: $\tau_{g,s}$ the impulse duration in the up state, $\tau_{d,p}$ the impulse duration in the down state, ΔX – pulse amplitude

Częstotliwość f_{RTS} można oszacować na podstawie wartości średnich czasu trwania impulsów sygnału szumu w stanie górnym i dolnym

$$f_{RTS} = \frac{1}{\bar{\tau}} = \frac{1}{\bar{\tau}_g} + \frac{1}{\bar{\tau}_d} \quad (1)$$

W dalszej części artykułu przedstawiono metody umożliwiające identyfikację szumu RTS, oraz metody umożliwiające jego wydzielenie z całkowitego szumu danego przyrządu półprzewodnikowego.

3. Wykrywanie szumu telegrafistów w szumie przyrządów półprzewodnikowych

Identyfikacja szumu wybuchowego w szumie własnym przyrządów półprzewodnikowych może zostać wykonana w dziedzinie czasu albo w dziedzinie częstotliwości. Identyfikacji w dziedzinie czasu można dokonać poprzez obserwację przebiegu szumu na ekranie oscyloskopu (na ekranie komputera), ocenę kształtu histogramu wartości chwilowych przebiegu szumu oraz zastosowanie metody wzorów obrazów szumów, zaproponowanej w patencie [6] i artykułach [7, 8]. Typowe metody w dziedzinie częstotliwości, to obserwacja kształtu widma $S_N(f)$ analizowanego przebiegu szumu lub obserwacja kształtu zależności $f \cdot S_N(f)$ w celu wykrycia lokalnego maksimum przy częstotliwości f_{RTS} .

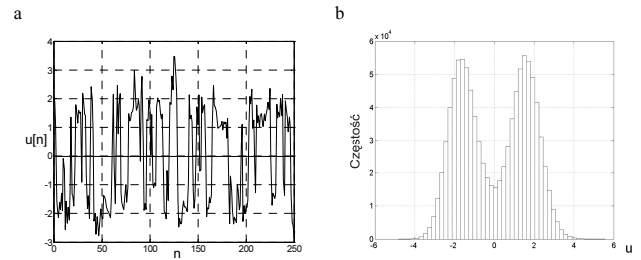
W artykule przedstawiono również oryginalne metody przetwarzania cyfrowego umożliwiające wydzielenie szumu RTS z zarejestrowanego sygnału szumu, które wykorzystują następujące algorytmy [9, 10]: wielorodzielczej analizy falkowej, filtracji o zasadzie średniej kroczącej, filtracji medianowej oraz aproksymacji odcinkowo stałej.

Pominięto szczegółowy opis stosowanych systemów pomiarowych oraz metod gromadzenia danych cyfrowych.

3.1. Identyfikacja szumu RTS w dziedzinie czasu

Obserwacja przebiegu na ekranie oscyloskopu jest najprostszą, powszechnie stosowaną, metodą pozwalającą stwierdzić, czy dany egzemplarz przyrządu półprzewodnikowego generuje szum RTS. Jest to metoda pracochłonna ze względu na szeroki zakres zmian czasu trwania impulsów szumu RTS i występowanie równocześnie innych rodzajów szumu.

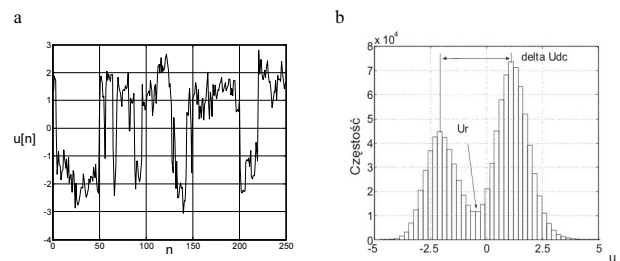
Analiza histogramu wartości chwilowych przebiegu szumu polega na wykrywaniu liczby maksimum lokalnych wykresu. Jeżeli na histogramie występuje jedno maksimum, to badany szum ma charakter szumu gaussowskiego. Jeżeli natomiast występują dwa lokalne maksima, to badany sygnał szumu zawiera dwupoziomowy szum RTS, jak to przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Dwupoziomowy szum RTS o zbliżonych czasach $\bar{\tau}_g$ i $\bar{\tau}_d$: a – odcinek 250 próbek zarejestrowanego szumu, b – histogram zarejestrowanych wartości 10^5 próbek szumu

Fig. 2. Two-level RTS noise with approximately equal values of $\bar{\tau}_g$ and $\bar{\tau}_d$: a – segment of 250 samples of the noise signal, b – histogram of 10^5 samples of noise

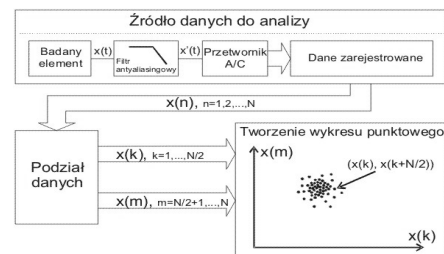
Z histogramu można oszacować wartość ΔX (na rys. 3 oznaczoną jako $\text{delta}U_{dc}$) i wartość średnią wartości chwilowych sygnału, będącą rzędną (oznaczoną na rys. 3 przez U_r) punktu minimum położonego pomiędzy maksimumami lokalnymi histogramu. Na podstawie histogramu nie można natomiast wyznaczyć wartości średnich czasu trwania impulsów. W przypadku, gdy średnie czasu trwania $\bar{\tau}_g$ i $\bar{\tau}_d$ bardzo się różnią, zaobserwować można jedynie asymetrię histogramu lub różne wysokości jego wierzchołków (rys. 3). Natomiast kształt histogramu na rys. 2 sugeruje, że wartości $\bar{\tau}_g$ i $\bar{\tau}_d$ są porównywalne.



Rys. 3. Dwupoziomowy szum RTS o znacznie różniących się wartościach $\bar{\tau}_g$ i $\bar{\tau}_d$: a – odcinek 250 próbek zarejestrowanego szumu, b – histogram zarejestrowanych wartości 10^5 próbek szumu

Fig. 3. Two-level RTS noise with distinctly different values of $\bar{\tau}_g$ and $\bar{\tau}_d$: a – segment of 250 samples of the noise signal, b – histogram of 10^5 samples of noise

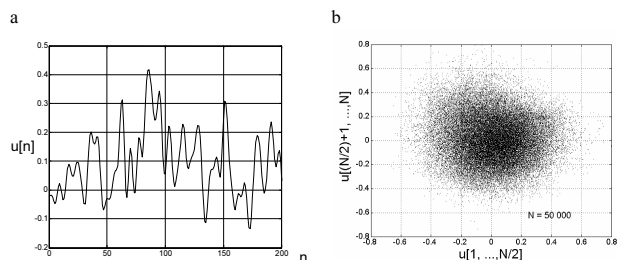
Metoda wzorów obrazów szumów (NSP – Noise Scattering Pattern) [6] umożliwia identyfikację szumu RTS w czasie niewiele dłuższym od czasu rejestracji ciągu próbek badanego sygnału szumu. Schemat funkcjonalny ilustrujący zasadę metody NSP, przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Identyfikacja szumu RTS z wykorzystaniem metody NSP: $x(t)$ – sygnał szumu, $x'(t)$ – sygnał szumu po filtracji antyaliasingowej, $x(n)$ – ciąg próbek sygnału $x'(t)$, oraz $x(k)$, $x(m)$ – podciągi powstałe po podziale ciągu $x(n)$, gdzie: $n = 1, 2, \dots, N$, $k = 1, 2, \dots, N/2$, $m = N/2 + 1, \dots, N$

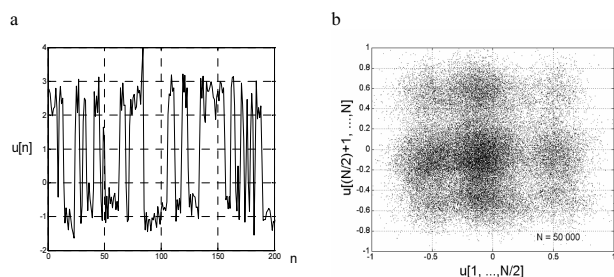
Fig. 4. Idea of NSP method: $x(t)$ – noise signal, $x'(t)$ – filtered noise signal, $x(n)$ – stored samples of $x'(t)$, and $x(k)$, $x(m)$ – subsequences obtained after splitting of the sequence $x(n)$, where: $n = 1, 2, \dots, N$, $k = 1, 2, \dots, N/2$, $m = N/2 + 1, \dots, N$

Przykłady zarejestrowanych przebiegów szumu tranzystorów bipolarnych i obrazy uzyskane metodą NSP przedstawiono na rys. 5, 6 i 7.



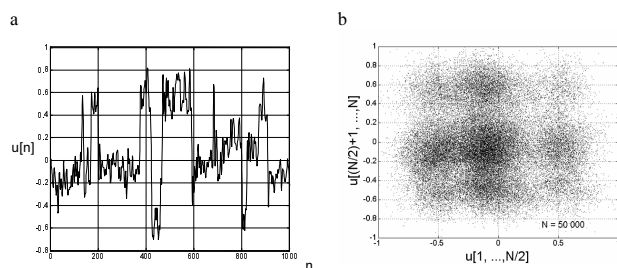
Rys. 5. Szum małej częstotliwości tranzystora bez szumu RTS: a – ciąg 200 próbek sygnału szumu, b – obraz NSP 50 000 próbek szumu

Fig. 5. Low frequency transistor's noise without RTS: a – sequence of 200 samples of noise signal, b – NSP graph of 50 000 samples of noise signal



Rys. 6. Szum małej częstotliwości tranzystora zawierający dwupoziomowy szum RTS: a – ciąg 200 próbek sygnału szumu, b – obraz NSP 50 000 próbek szumu

Fig. 6. Low frequency noise containing two-level RTS: a – sequence of 200 samples of noise signal, b – NSP graph of 50 000 samples of noise signal

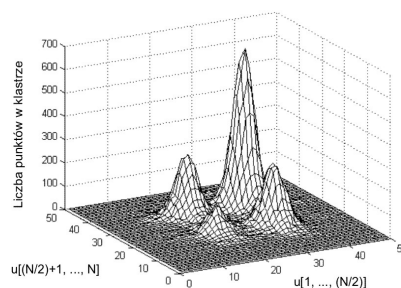


Rys. 7. Szum małej częstotliwości tranzystora zawierający trójpoziomowy szum RTS: a – ciąg 1000 próbek sygnału szumu, b – obraz NSP 50 000 próbek szumu

Fig. 7. Low frequency noise containing three-level RTS: a – sequence of 1000 samples of noise signal, b – NSP graph of 50 000 samples of noise signal

Przedstawione na rys. 5, 6 i 7 obrazy uzyskane metodą NSP bardzo silnie zależą od składowych sygnału szumowego. Szum gaussowski daje obraz kropek zgrupowanych w postaci koła (rys. 5), szum zawierający również składową o rozkładzie niegaussowskim jest przedstawiony w postaci czterech zakropkowanych kół – szum 2-poziomowy (rys. 6) lub w postaci dziewięciu zakropkowanych kół – szum 3-poziomowy (rys. 7). Tak więc, szumy o składowej gaussowskiej można bardzo łatwo odróżnić od szumów zawierających obie składowe.

Na rys. 8 przedstawiono trójwymiarowy histogram danych uzyskanych metodą NSP dla dwupoziomowego szumu RTS. Symetria wykresu względem płaszczyzny dwusiecznej świadczy o poprawności rejestracji próbek sygnału szumu. Z wysokości poszczególnych trójwymiarowych wierzchołków można wnioskować, że czas przebywania w stanie górnym i dolnym jest różny.



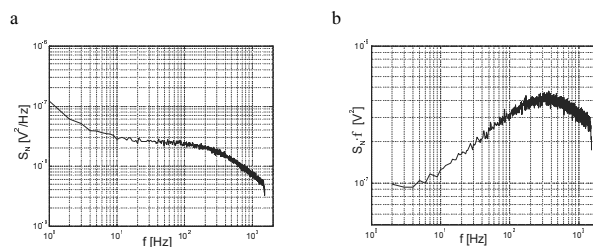
Rys. 8. Histogram w przestrzeni trójwymiarowej otrzymany na podstawie danych uzyskanych metodą NSP dla przyrządu półprzewodnikowego generującego dwustanowy przebieg RTS o różnych średnich czasach przebywania w stanie górnym i dolnym

Fig. 8. Example of the 3D histogram which has been performed with use of the NSP data. The NSP data have been obtained for a semiconductor device which generates two-level RTS noise with different mean times in levels up and down

3.2. Identyfikacja szumu RTS w dziedzinie częstotliwości

Metodą umożliwiającą wykrywanie szumu RTS w badanym przebiegu szumu jest obserwacja wykresu widma $S_N(f)$ lub wykresu zależności $f \cdot S_N(f)$. Jak przedstawiono na rys. 9a, występowanie lokalnego maksimum przy częstotliwości f_{RTS} , sygnalizującego występowanie w badanym przebiegu szumu RTS, jest na wykresie mało wyraźne. Określenie wartości częstotliwości, przy której występuje maksimum jest natomiast dużo łatwiejsze przy wykorzystaniu wykresu z rys. 9b.

Na podstawie analizy wykresu widma można wyznaczyć jedynie częstotliwość f_{RTS} . Nie jest natomiast możliwa ocena parametrów określanych w dziedzinie czasu.



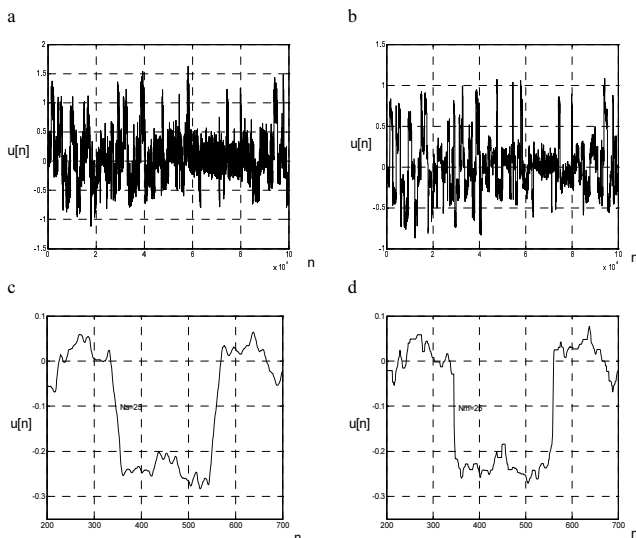
Rys. 9. Widma: a – wykres $S_N(f)$ gęstości widmowej mocy szumu, b – wykres gęstości widmowej mocy szumu pomnożonej przez częstotliwość

Fig. 9. Spectra: a – plot of noise power spectrum density $S_N(f)$, and b – plot of noise power spectrum density multiplied by frequency

4. Wydzielanie szumu RTS metodami przetwarzania cyfrowego

Poniżej przedstawiono wyniki zastosowania określonych algorytmów numerycznych wykorzystanych dla wydzielenia składowej niegaussowskiej z badanego przebiegu szumu. Wszystkie operacje związane z wydzieleniem składowej RTS szumu są wykonywane na spróbkowanym sygnale szumu, czyli na ciągu danych zarejestrowanych zgodnie z wymogami estymacji widma badanego przebiegu. Badany przebieg szumu jest przedstawiony na rys. 10a. Natomiast na rys. 10b przedstawiono wynik zastosowania algorytmu wielorozdzielczej analizy falkowej, dostępnego w postaci procedury komputerowej np. w programie MATLAB. Dekompozycję sygnału wykonano z wykorzystaniem ciągu falek Haara. Uzyskiwane wyniki nie są tu jednak w pełni zadawalające. Na rys. 10c przedstawiono wynik zastosowania algorytmu filtracji o zasadzie średniej kroczącej. Zaletą tej

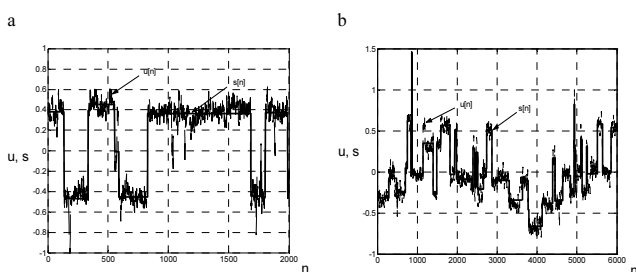
filtracji, w porównaniu z filtracją przy wykorzystaniu falek, jest prosty algorytm obliczeniowy. Dla uzyskania poprawnych (akceptowalnych) wyników filtracji konieczne jest dobranie rzędu filtru w zależności od czasu trwania impulsów RTS. Wadą filtracji o zasadzie średniej kroczącej w zastosowaniu do sygnałów RTS z szumem jest zniekształcanie zboczy impulsów. Wady tej nie posiada **metoda filtracji medianowej** [9], a wynik jej zastosowania przedstawiono na rys. 10d. Podsumowując można stwierdzić, że wyniki otrzymane przy zastosowaniu wymienionych algorytmów nie są w zasadzie satysfakcjonujące. Algorytmy te mogą być stosowane dla zgrubnej oceny parametrów składowej niegaussowskiej szumu.



Rys. 10. Odcinki sygnałów szumu: a – ciąg 10^5 próbek szumu m. cz. przed i po częściowym usunięciu szumu gaussowskiego zrealizowanym: b – przy wykorzystaniu algorytmu falkowe-go, c – z zastosowaniem filtracji o zasadzie średniej kroczącej (rzędz filtru $N_a = 25$) i d – z wykorzystaniem filtracji medianowej (rzędz filtru $N_m = 25$)

Fig. 10. Segments of noise signals: a – recorded sequence of 10^5 samples of the low frequency noise signal and the noise signal after partial removing of the Gaussian noise which has been done, respectively, with use of: b – the wavelet procedure, c – the mean value filtration (calculated for $N_a = 25$ points), and d – the median filtration (median is calculated for $N_m = 25$ points)

Przedstawiona w [10] metoda identyfikacji wielopoziomowego szumu RTS w sygnałach szumu małej częstotliwości przyrządów półprzewodnikowych jest znacznie dokładniejsza w porównaniu z wymienionymi algorytmami. Polega ona na zastosowaniu **algorytmu aproksymacji odcinkowo stałej** w odniesieniu do badanego sygnału szumu. Algorytm aproksymacji zawiera procedurę umożliwiającą wybór właściwej wartości progu wydzielenia impulsów RTS. Wyniki zastosowania procedury aproksymacji odcinkowo stałej przedstawiono na rys. 11.



Rys. 11. a, b – Sygnały szumu, oznaczone przez $u[n]$, i oznaczone przez $s[n]$ składowe RTS wydzielone z sygnałów szumu z zastosowaniem algorytmu aproksymacji odcinkowo stałej

Fig. 11. a, b – Low frequency noise signals, denoted by $u[n]$, and RTS components, denoted by $s[n]$, which have been numerically extracted by means of the piece-wise constant approximation algorithm

Metoda ta umożliwia ocenę czasów $\bar{\tau}_{g,s}$ i $\bar{\tau}_{d,p}$ przebywania impulsów w stanie górnym i dolnym odpowiednio, oszacowanie czasów średnich $\bar{\tau}_g$, $\bar{\tau}_d$, a następnie częstotliwości f_{RTS} . Z przedstawionych metod jest ona najdokładniejsza.

5. Podsumowanie

Przedstawione metody umożliwiają identyfikację oraz wydzielenie przebiegu szumu telegrafistów z szumów własnych przyrządów półprzewodnikowych. Obecność szumów telegrafistów świadczy o defektach (materiałów lub wprowadzonych w czasie produkcji) i występowanie szumu RTS sugeruje, że jakość danego przyrządu półprzewodnikowego jest mierna. Przedstawione metody identyfikacji szumu RTS w szumach własnych mogą być stosowane do oceny jakości produkowanych przyrządów i do selekcji tych przyrządów biorąc pod uwagę poziom ich jakości. W przypadku występowania w badanym przyrządzie wielopoziomowego szumu RTS otrzymuje się wiele maksimów, zarówno na histogramie wartości chwilowych, jak i w widmie badanego sygnału. Dla wielopoziomowego szumu RTS metody identyfikacji w dziedzinie czasu są dogodniejsze, ponieważ występujące w widmie kolejne maksima i odpowiadające kolejnym częstotliwościom f_{RTS_i} , są mało widoczne.

Metody wydzielenia szumu telegrafistów z szumów własnych przyrządów półprzewodnikowych mogą być stosowane do oceny i lokalizacji defektów powodujących generację szumu impulsowego. Umożliwiają one oszacowanie liczby poziomów szumów RTS, wartości amplitud i czasy przebywania impulsów w rozróżnialnych poziomach.

6. Literatura

- [1] C. Claeys, E. Simoen.: Noise as a diagnostic tool for semiconductor material and device characterization. J. Electrochem. Soc., vol. 145, no 6, 1998, pp. 2058-2067.
- [2] M. A. Abdala, B. K. Jones: Correlation between trap characterization by low frequency noise, mutual conductance dispersion, oscillations and DLTS in GaAs MESFETs. Solid-State Electronics, vol. 35, no 12, 1992, pp. 1713-1719.
- [3] A. Konczakowska: Szumy z zakresu małych częstotliwości. Metody pomiaru, zastosowanie do oceny jakości przyrządów półprzewodnikowych. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa, 2006.
- [4] T. G. M. Kleinpenning: On $1/f$ noise and random telegraph noise in very small electronic devices. Physica, vol. B164, 1990, pp. 331-334.
- [5] L. K. J. Vandamme, M. Macucci: $1/f$ and RTS noise in submicron devices: Faster is noisier, UPoN 2005. AIP Conference Proceedings, vol. 800, 2005, pp. 436-443.
- [6] J. Cichosz, A. Szatkowski: Sposób wykrywania szumów wybuchowych, zwłaszcza w przyrządach elektronicznych. Zgłoszenie patentowe P 375610, czerwiec 2005.
- [7] J. Cichosz, A. Szatkowski: Noise scattering patterns method for recognition of RTS noise in semiconductor components. Proc. of the 18th Inter. Conf. Noise and Fluctuations ICNF'2005. Salamanca, Spain, 19-23 September 2005, pp.673-676.
- [8] A. Konczakowska, J. Cichosz, A. Szweczyk, B. Stawarz: Identification of optocoupler devices with RTS noise. Fluctuation and Noise Letters, vol. 6, no 4, 2006, pp. L395-L404.
- [9] J. Cichosz, A. Szatkowski: Identyfikacja i przetwarzanie cyfrowe sygnałów szumów RTS występujących w przyrządach półprzewodnikowych. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki, nr 21, Gdańsk 2005, s. 29-37.
- [10] J. Cichosz, A. Konczakowska, A. Szatkowski: A method of identification of RTS components in noise signals. Metrology and Measurements Systems, vol. 13, no 4, 2006, pp. 373-382.