

## Ihor MYKYTYN<sup>1</sup>, Adam KOWALCZYK<sup>2</sup>, Bohdan STADNYK<sup>1</sup>

<sup>1</sup> NARODOWY UNIWERSYTET „LWOWSKA POLITECHNIKA”, UKRAINA

<sup>2</sup> ZAKŁAD METROLOGII I SYSTEMÓW POMIAROWYCH, POLITECHNIKA RZESZOWSKA

# Analiza doświadczeń w konstruowaniu termometru szumowego

### Dr inż. Ihor MYKYTYN

Docent w Instytucie Technologii Komputerowych, Automatyki i Metrologii. Ukończył Politechnikę Lwowską w 1987 r. Stopień doktora uzyskał w 2000 r. Pracuje w Katedrze Technologii Informatyko-Pomiarowych Politechniki Lwowskiej od roku 1987. Specjalność naukowa: metrologia, termometria szumowa, autor 18 artykułów.



### Profesor dr hab. inż. Bohdan STADNYK

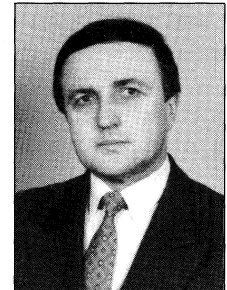
Dyrektor Instytutu Technologii Komputerowych, Automatyki i Metrologii Narodowego Uniwersytetu „Lwowska Politechnika”. Kierownik Katedry Technologii Informatyko-Pomiarowych. Ukończył Politechnikę Lwowską w 1958 r. Stopień doktora uzyskał w 1967 r., a doktora habilitowanego w 1981 r.; tytuł profesora w 1983. 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.



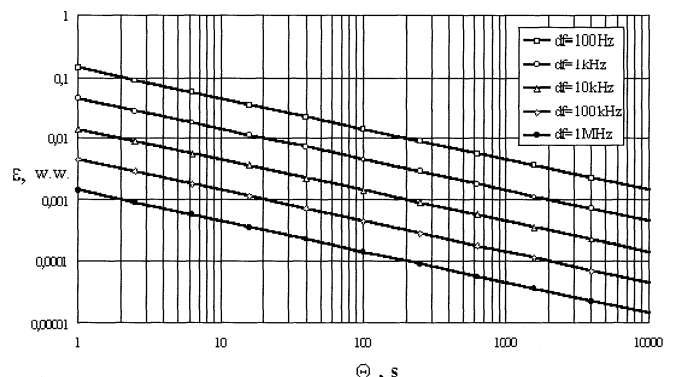
ani od jego właściwości fizycznych i stanu skupienia.

Opisywana metoda wciąż nie jest rozpowszechniona i ma jedynie zastosowanie laboratoryjne. Taką sytuację powodują istniejące problemy techniczne, które trzeba rozwiązać przy projektowaniu termometru szumowego. Najważniejsze z nich dotyczą:

- natury szumowej i niskiego poziomu sygnału użytecznego;
- zebrania oraz selekcji niskoszumowych aktywnych i pasywnych elementów elektronicznych;
- zapewnienia odporności na zakłócenia.

## 2. Natura i poziom sygnału użytecznego

Termometria szumowa bazuje na wzorze Nyquista [2], gdzie uśredniony kwadrat napięcia szumowego  $\overline{e_n^2(t)}$  na elektrycznie nieobciążonej rezystancji zależy od temperatury termodynamicznej  $T$ , pasma częstotliwości  $\Delta f$ , wartości rezystancji  $R_x$ . Podstawowa zależność została otrzymana za pośrednictwem termodynamiki statystycznej niezależnie od konkretnych właściwości rezystora. Sygnał użyteczny można przedstawić jako wypadkowe fluktuacje napięcia na rezystancji. Sygnał szumowy należy opisywać charakterystykami uśrednionymi ponieważ wartości chwilowe procesu stochastycznego są nieznanne. Rzeczywiste wartości charakterystyk uśrednionych można otrzymać, kiedy czas uśredniania jest nieskończony, co nie występuje w praktyce. Powstaje błąd statystyczny przy mierzeniu temperatury. Na rys. 1 pokazana jest zależność względnego odchylenia standardowego błędu pomiaru  $\epsilon$  od pasma częstotliwości i czasu uśredniania. Błąd mniejszy od 0,1% jest używany dla pasma 1 MHz przy czasie uśredniania 2 s, a dla pasma 10 kHz - 200 s.



Rys. 1. Zależność odchylenia standardowego błędu pomiaru  $\epsilon$  od pasma częstotliwościowego i czasu uśredniania (w.w. - wielkości względne)

### Streszczenie

W danym artykule są rozpatrywane problemy występujące przy projektowaniu termometrów szumowych. Do nich należą: niski poziom sygnału użytecznego, problemy doboru komponentów niskoszumowych, zapewnienie dostatecznej odporności na zakłócenia.

Przedstawiono ogólne podejście do analizy problemów w termometrii szumowej.

### Abstract

The problems considered in article are necessary for solving the design of the noise thermometer: the noise nature and the low level of a useful signal, problem of small noise components, noise proof feature maintenance. To be ensured temperature sensitivity 0.1 K it is necessary to achieve ten pV sensitivity. We have take into account parameters of an entrance circuit, such as the amplifier (one or two-channel) and noise parameters of operational amplifiers for a correct choice of the operational amplifier. There are considered the constructive works to maintenance the noise thermometer stability, composed into the complex approach.

**Słowa kluczowe:** termometr szumowy, projektowanie, zakłócenia

**Keywords:** noise thermometer, developing, disturbances

## 1. Wprowadzenie

Równoległe do doskonalenia metod tradycyjnych oraz środków metrologicznych są prowadzone ciągle poszukiwania nowych kierunków rozwoju termometrii, które bazują na współczesnych osiągnięciach nauki i techniki.

Termometria szumowa [1] pozwala zrealizować pomiar temperatury bezpośredniej według skali termodynamicznej. Szumowa metoda nie ma ograniczeń ze względu na zakres pomiaru temperatury. Oprócz tego, wynik pomiaru termometrem szumowym (TS) nie zależy od konsystencji materiału elementu czułego (czujnika)

Dla zmniejszenia czasu uśredniania pożądane jest zatem stosowanie szerokiego pasma  $\Delta f$  i szerokopasmowych wzmacniaczy. Przy czym 10-krotnie zmniejszenie błędu pomiaru wymaga 100-krotnego zwiększenia czasu uśredniania. Zatem zmniejszenie błędu pomiaru wywołuje pogorszenie szybkości działania - jednego z głównych eksploatacyjnych parametrów TS.

Wartości parametrów sygnału szumowego (z informacją o temperaturze) są bardzo małe. Pierwiastek kwadratowy z gęstości widmowej mocy  $S_x$  daje gęstość widmową napięcia  $U_x$  i odpowiednio z wartości średniokwadratowej daje odchylenie standardowe napięcia szumowego  $U_x$ . Dla pasma 100 kHz, rezystancji 100  $\Omega$ , przy temperaturze pokojowej otrzymuje się:

$$U_{fx} = \sqrt{S_x} = \frac{1.27 \text{ nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}, U_x = \sqrt{e_x^2(t)} = 0.4 \mu\text{V}.$$

Ważnym parametrem termometru szumowego jest czułość sygnału użytecznego, np. odchylenia standardowego napięcia szumowego  $U_x$  od temperatury. Zmiana temperatury o jeden stopień spowoduje zmiany napięcia  $U_x$  od wartości  $U_{x293K}$  do  $U_{x292K}$ , czyli o  $\Delta U_x = U_{x293K} - U_{x292K} = 0.40216 - 0.40148 = 0.68 \text{ nV}$ . Jeżeli założy się czułość względem pomiaru temperatury - 0,1 K, to wtedy  $\Delta U_x = 0.068 \text{ nV}$ .

Dlatego w konstrukcjach TS wykorzystywane są wzmacniacze o dużym współczynniku wzmocnienia. Ponieważ TS pracują w szerokim pasmie częstotliwościowym bardzo ważna jest odporność na zakłócenia zewnętrzne i wewnętrzne oraz stabilna praca wzmacniacza.

### 3. Wybór niskoszumowej bazy elektronicznej

W tabeli 1 podano parametry wybranych niskoszumowych wzmacniaczy operacyjnych (WO), które mogą być wykorzystane przy projektowaniu obwodów wejściowych termometru szumowego.

Tabela 1. Parametry szumowe wzmacniaczy operacyjnych

Typ WO	Gęstość widmowa własnego napięcia szumowego $U_{fop}$ , $\frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}$	Gęstość widmowa własnego prądu szumowego $I_{fop}$ , $\frac{\text{pA}}{\sqrt{\text{Hz}}}$
LT1028AM	0.85	1.6
AD745	4.0	0.0069
LT1127	5.5	0.3
AD711	16	0.01
AD549	35	0.00016

Jak widać najlepszy wzmacniacz - LT1028 charakteryzuje się gęstością widmową własnego napięcia szumowego

$$U_{fop} = \frac{0.85 \text{ nV}}{\sqrt{\text{Hz}}},$$

co odpowiada równoważnej rezystancji szumowej 45  $\Omega$ . Na rys. 2 podana jest zależność względnego odchylenia standardowego błędu  $\epsilon$  dla szumowego sygnału (z wliczeniem napięcia szumu własnego wzmacniacza) od czasu pomiaru dla różnych stosunków gęstości widmowych mocy sygnału użytecznego do sygnału nieinformacyjnego [3].

Jak wynika z rys. 2 dla przedziału stosunku (10...100) gęstości widmowej sygnału użytecznego do sygnału nieinformacyjnego względne odchylenie standardowe błędu  $\epsilon$  praktycznie nie zależy od czasu uśredniania. Dlatego można przyjąć, że optymalnym stosunkiem gęstości widmowej sygnału użytecznego do sygnału nieinformacyjnego jest wartość 10.

Przejście do gęstości widmowej napięcia szumowego da optymalny stosunek równy

$$\sqrt{\frac{S_x}{S_{op}}} = \frac{U_{fx}}{U_{fop}} = \sqrt{10} = 3.16.$$

Dla zagwarantowania obliczonego stosunku w urządzeniu z czujnikiem o rezystancji 100  $\Omega$  jest potrzebny wzmacniacz z gęstością widmową własnego napięcia szumowego

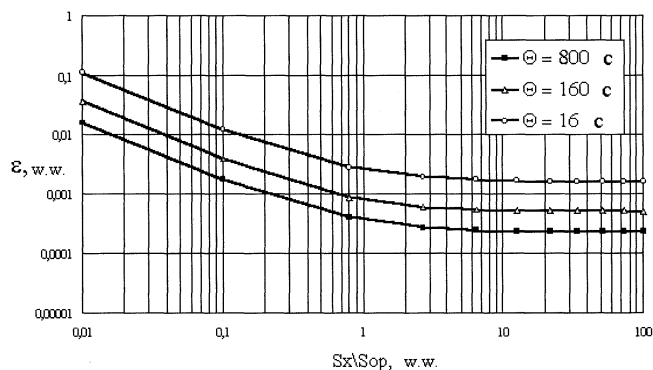
$$U_{fop} = \frac{U_{fx}}{3.16} = \frac{1.27}{3.16} = \frac{0.4 \text{ nV}}{\sqrt{\text{Hz}}},$$

której to wartości nie uzyskuje się we współczesnych wzmacniaczach operacyjnych. Z drugiej strony możliwe jest zwiększenie rezystancji czujnika i stąd poziomu sygnału użytecznego (wtedy otrzymuje się w y m a gany stosunek gęstości widmowej sygnału użytecznego do sygnału nieinformacyjnego). Wykorzystanie wzmacniacza LT1028 wymaga zastosowania przetwornika, dla którego

$$U_{fx} = 3.16 \cdot U_{fop} = 3.16 \cdot 0.85 = \frac{2.69 \text{ nV}}{\sqrt{\text{Hz}}},$$

co odpowiada wartości rezystancji 500  $\Omega$ . Przy projektowaniu obwodów wejściowych TS istotny jest szum prądu wejściowego wzmacniacza operacyjnego. Jego wpływ zwiększa się ze wzrostem wartości rezystancji przetwornika. Dla LT1028, przy rezystancji 500  $\Omega$  gęstość widmowa napięcia (dla prądu  $I_{fop}$  przetwornika z jednokanałowym wzmacniaczem) będzie równa

$$U_{fx} = R_x \cdot I_{fop} = 500 \cdot 1.6 \left( \frac{\Omega \text{ pA}}{\sqrt{\text{Hz}}} \right) = \frac{0.8 \text{ nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}.$$



Rys. 2. Zależność względnego odchylenia standardowego błędu  $\epsilon$  od stosunku gęstości widmowych sygnału użytecznego do sygnału nieinformacyjnego  $S_x/S_{op}$  przy różnych czasach uśredniania  $\Theta$  dla  $\Delta f = 100 \text{ kHz}$  [3]

Jak wynika z przedstawionych rozważań najbardziej istotny wpływ na niedokładność pomiaru mają własne napięcia szumowe i wejściowe prądy szumowe wzmacniaczy operacyjnych. Często WO z małymi napięciami szumowymi mają duże prądy szumowe - i odwrotnie (tabela 1).

Wykorzystanie wzmacniacza korelacyjnego pozwala zmniejszyć oddziaływanie napięcia szumowego WO [1], ale nie pozwala usunąć wpływu prądu szumowego. W rzeczywistości wzmacniacze dwukanałowe posiadają często różne własne prądy szumowe. W konsekwencji dla wzmacniacza dwukanałowego

$$U_{fx} = 2 \cdot R_x \cdot I_{fop} = \frac{1.6 \text{ nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}$$

i porównując tą wartość z wpływem własnego napięcia szumowego opisywanego wyżej, otrzymuje się przewagę wpływu prądu. Stąd wynika potrzeba zmniejszenia rezystancji czujnika. Ewentualnie można również wybierać WO z mniejszym prądem szumowym z podobnym skutkiem.

Jednak wykorzystanie WO z niewielkimi prądami szumowymi zwykle prowadzi do zwiększenia napięcia szumowego (tabela 1) i czasu pomiaru (rys. 2). Zmniejszenie rezystancji przetwornika

temperatury prowadzi do wzmacniania nieinformacyjnego napięcia szumowego wskutek przepuszczania własnego prądu WO przez przetwornik pierwotny.

A więc, optymalna rezystancja przetwornika temperatury zależy od parametrów szumowych WO. Jednokanałowy wzmacniacz charakteryzuje się następującym stosunkiem [3]:

$$\frac{S_X}{S_{sop}} = \frac{S_X}{S_{Iop} \cdot R_X^2 + S_{Uop}} \geq 10,$$

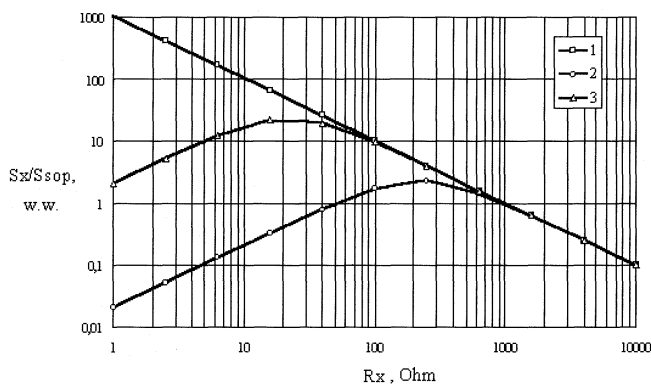
a korelacyjny (dwukanałowy) wzmacniacz odpowiednio

$$\frac{S_X}{S_{sop}} = \frac{S_X}{2 \cdot S_{Iop} \cdot R_X^2 + S_{Uop} / (\Delta f \cdot \Theta)} \geq 10$$

gdzie  $S_{sop}$  - całkowita gęstość widmowa mocy sprowadzona do wejścia;

$$S_{Uop} = U_{fop}^2,$$

odpowiednio gęstość widmowa mocy własnego szumowego prądu i napięcia szumowego WO. Analiza pierwszego wyrażenia prowadzi do wniosku że wzmacniacz jednokanałowy posiada tylko jedną wartość optymalnej rezystancji przetwornika, co wynika z obecności we wzorze jedynie stałych niezależnych od czasu uśredniania i pasma częstotliwości.



Rys. 3. Nomogram dla doboru rezystancji optymalnej przetwornika pierwotnego

Wzmacniacz korelacyjny różni się zasadniczo - wpływ własnych napięć szumowych stopniowo zmniejsza się wraz ze zwiększeniem  $\Delta f$  i  $\Theta$ . Kiedy  $\Theta \rightarrow \infty$ , stosunek  $S_{Uop} / (\Delta f \cdot \Theta) \rightarrow 0$ , a maksymalny stosunek występuje przy  $R_X \rightarrow 0$  (rys. 3, 1). Jeśli  $\Theta$  - ma wartość skończoną, to istnieje oporność optymalna przetwornika (rys. 3, 2-3), która zmniejsza się przy zmniejszaniu stosunku  $S_{Uop} / (\Delta f \cdot \Theta)$ .

Konstruowanie termometru szumowego wymaga zapewnienia optymalnych parametrów obwodu wejściowego, co jest realizowane przez dobór: pasma częstotliwościowego, czasu uśredniania, typu WO (1-kanałowy czy korelacyjny), wartości rezystancji przetwornika pierwotnego oraz parametrów szumowych wzmacniacza wejściowych.

#### 4. Odporność na zakłócenia

Słaby sygnał użyteczny o charakterze stochastycznym przy zastosowaniu wzmacniacza szerokopasmowego ze współczynnikiem wzmocnienia rzędu 100000 wymaga wysokiej odporności na zakłócenia toru pomiarowego szczególnie dla obwodów wejściowych. Znane są trzy podstawowe rodzaje zakłóceń:

- zakłócenia lokalne w torze sygnału (w tym na stykach elementów połączeniowych);
- zakłócenia zewnętrzne (od pól elektromagnetycznych);
- zakłócenia wewnętrzne (powstające na przewodach wspólnych).

Przewody wspólne przenoszą sygnały użyteczne oraz moce pobierane, czym stwarzają warunki dla powstawania zakłóceń na niejawnych parametrach rozłożonych obwodu.

Uwagi specjalnej wymaga równoległa praca cyfrowej i analogowej części układu. Wytwarzanie cyfrowych sygnałów jest związane ze stosowaniem impulsów napięcia, które mogą występować jako zakłócenia w analogowej części układu. Dlatego pożądane jest oddzielne konstruowanie obydwu części, co praktycznie jest realizowane przez zastosowanie izolacji galwanicznej.

Minimalizacja zakłóceń od pola magnetycznego wymaga takiego wykonania krytycznych obwodów sygnałowych, żeby pole przekroju tych obwodów było najmniejsze, a przewody elektryczne wykonane jako dwużyłowe. Zakłócenia od pola elektrycznego z częstotliwością 50 Hz wymagają użycia osłony elektromagnetycznej, którą należy podłączyć do wspólnej masy. Przy wykorzystaniu transformatora mocy należy zainstalować uzwojenie wtórne wewnątrz osłony, a uzwojenie pierwotne - zewnątrz. Oddziaływanie wzajemne uzwojeń pozostanie bez zmian, kiedy materiałem osłony będzie miedź lub aluminium. Wpływ pojemności pasozytniczych eliminuje się przez wprowadzenie dodatkowych osłon transformatora, oddzielnych dla każdego uzwojenia; przy czym jedna osłona służy dla zwiększenia odporności uzwojenia wtórnego z odpowiednimi układami, a druga - odpowiednio uzwojenia pierwotnego.

Ogólnie, ilość osłon nie połączonych elektrycznie między sobą ma się zgadzać z ilością przetwarzanych sygnałów, nie licząc osobnych osłon dla każdego zasilania.

#### 5. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonej analizy można wyodrębnić szczególnie ważne zagadnienia w procesie projektowania termometru szumowego dla zastosowania w przemyśle. Główna uwaga powinna być zwrócona na zapewnienie odporności termometru szumowego na zakłócenia, co komplikuje się ze względu na:

- a) wykorzystanie wzmacniaczy z dużym współczynnikiem wzmocnienia;
- b) wykorzystanie układów cyfrowo-analogowych;
- c) występowanie prądów upływowych i pól elektromagnetycznych o częstotliwości przemysłowej.

Oprócz tego otrzymywane charakterystyki uśrednione dla sygnału użytecznego cechują błędy statystyczne, wartości których można efektywnie obniżyć: optymalizując czas uśredniania i pasmo częstotliwości, doborem rodzaju wzmacniacza (1- czy 2-kanałowy), typu wzmacniacza operacyjnego (z obliczeniem własnych parametrów szumowych) i rezystancji przetwornika pierwotnego.

#### Literatura

- [1] A. Sawatiejew. Szumowaja tiernometrija. Leningrad. Energoatomizdat, 1987, 132 s.
- [2] H. Nyquist: Thermal agitation in conductors. *Phys.Rev.*, 1927, v.32, p.110-113.
- [3] I. Mykytyn. Termoszumowij termometr. Dysertacja. Lwiv, 2000, 131 s.

**Title:** The analysis of practical experience in noise thermometer developing