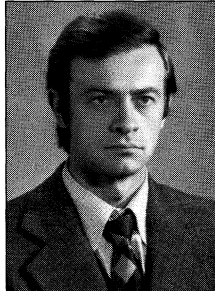


Swiatosław JACYSZYN, Bohdan STADNYK, Jarosław ŁUCYK, Filip SKOROPAD
 UNIwersytet Narodowy „POLITECHNIKA LWOWSKA”, UKRAINA

Efekty szumowe w termometrii

Dr inż. Swiatosław JACYSZYN

Docent w Instytucie Technologii Komputerowych, Automatyki i Metrologii Narodowego Uniwersytetu „Lwowska Politechnika” w Katedrze Technologii Informacyjno-Pomiarowych. Ukończył Politechnikę Lwowską w 1971 r. Stopień doktora uzyskał w 1977 roku. Specjalność naukowa: badanie stanów termodynamicznych układów, przetworniki temperatury, autor monografii.



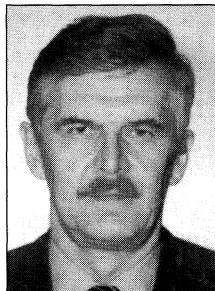
Prof. dr hab. inż. Bohdan STADNYK

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



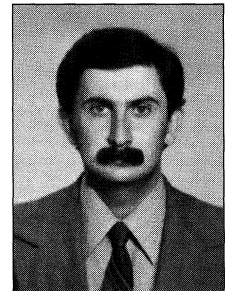
Dr hab. inż. Jarosław ŁUCYK

Profesor w Instytucie Technologii Komputerowych, Automatyki i Metrologii Narodowego Uniwersytetu „Lwowska Politechnika” w Katedrze Technologii Informacyjno-Pomiarowych. Ukończył Wydział Elektro-Fizyczny Politechniki Lwowskiej w 1970 r. Stopień doktora uzyskał w 1984 r., doktora habilitowanego w 1997 r. Specjalność naukowa: termometria ultradźwiękowa. Autor wielu publikacji i kilku monografii.



Dr inż. Filip SKOROPAD

Docent w Katedrze Technologii Informacyjno-Pomiarowej w Instytucie Technologii Komputerowych, Automatyki i Metrologii Narodowego Uniwersytetu „Lwowska Politechnika”. Absolwent Wydziału Mechanicznego Ukraińskiego Instytutu Poligraficznego we Lwowie w 1980 r. Stopień doktora uzyskał w 1990 r. w Politechnice Lwowskiej. Specjalność naukowa: stopy amorficzne, materiały konstrukcyjne czujników temperatury. Jest autorem lub współautorem ponad 60 artykułów.



Streszczenie

W artykule przedstawiono analizę efektów szumowych w termometrii. Na przykładach wyników badań przetworników szumowych, rezystancyjnych oraz termoelektrycznych wyznaczono rolę fluktuacji stanu termodynamicznego w stabilności charakterystyk statycznych nominalnych i ich zmian w czasie eksploatacji czujników.

Abstract

The analysis of noise effects in thermometry is presented here. The progress in signal processing based on the computer technologies is complicated. Therefore estimation of measurement errors considers the estimation of thermodynamic forces and flows. The forces and the flows of electric genesis in electro transducers are the main problem. They are responsible for the nominal characteristics and their changes by means of electro thermal noises. The other kinds of noises are responsible for the deviations of these characteristics. These kinds are considered with help of the main equation of thermodynamics.

The lack of processes in thermoelement material has been required the broad investigations with the help of different methods on the macro-, meso- and micro- levels, down to nanotechnology.

Słowa kluczowe: termometria, szum, fluktuacji, termodynamika

Keywords: thermometry, noise, fluctuations, thermodynamics

1. Wprowadzenie

Podczas pomiarów temperatury ma miejsce przepływ energii i dla jego uwzględnienia należy brać pod uwagę wpływy zmian stanu termodynamicznego tak materiału elementu czułego (dalej ECz) jak i środowiska badanego. Wynikające przy tym błędy powodują zmiany charakterystyki nominalnej statycznej (dalej ChNS) przetwornika i tym samym pogarszają dokładność pomiaru. W procesie pomiaru występuje przejście materiału ECz ze stanu termodynamicznie zrównoważonego do stanu niezrównoważonego. Realne energetyczne procesy niezrównoważone są często nieodwracalne. Dlatego zmieniają się ChNS przetworników: szumowych $T = bP_d$ oraz termoelektrycznych: $T = aV_d$ (gdzie $a; b$ - współczynniki przetwarzania), to znaczy że pojawiają się błędy pomiaru.

Przy tym istnieją pewne rozbieżności pomiędzy przetwornikami szumowymi i termoelektrycznymi. Polegają one na odmiennych związkach pomiędzy energetycznymi procesami w ECz przetworników i ich ChNS. W przetwornikach szumowych operuje się mocą energetyczną oraz gęstością strumienia entropii. Natomiast w przetwornikach termoelektrycznych podejście energetyczne nie jest jawne, ponieważ głównym parametrem wyjściowym jest napięcie elektryczne. Dlatego bilans termodynamiczny strumieni ciepłych i ładunkowych jest niezbędny dla rozważania ich wpływu na zmiany ChNS. Przy tym ECz czujników można przedstawić jako wyodrębniony układ termodynamiczny, a działanie środowiska na dany układ pominać.

2. Wykorzystanie metodologii termodynamiki statystycznej procesów niezrównoważonych

Makroskopowy, nieznacznie niezrównoważony stan wyodrębnionego układu termodynamicznego jest traktowany przez termodynamikę statystyczną procesów niezrównoważonych (dalej TSPN) jako istotne fluktuacje. Gradienty temperatury, gęstości, ciśnienia oraz innych parametrów które istnieją w danym układzie dzięki czynnikom tak zewnętrznym jak i wewnętrznym, podlegają tym samym regułom statystycznym, jak gradienty pochodzenia fluktuacyjnego [1]. Postulowanie połączenia fluktuacji spontanicznych oraz procesów przenoszenia stanowi osiągnięcie główne TSPN. Należy zauważyć że ewolucja układu nie zależy od tego czy stan początkowy był osiągnięty za pośrednictwem fluktuacji naturalnych, wskutek sztucznie stworzonych warunków lub usunięcia ograniczeń z zewnątrz. Obszary termodynamiki procesów zrównoważonych i niezrównoważonych łączą się dzięki prawu fluktuacyjno-dyssypacyjnemu. Przypadkiem szczególnym tego prawa jest znana zależność Nyquista, która wiąże gęstość widmową mocy szumu elektrycznego (fluktuacje ciepłe napięcia elektrycznego) z wartością rezystancji elektrycznej w pewnym paśmie częstotliwości.

Odchylenia stanu termodynamicznego wpływają na zmiany parametrów podstawowych układu termodynamicznego, który

obejmuje kilku poziomów (makro-, mezo- oraz mikro). Dla czujników temperatury decydującymi są odchylenia dewiacyjne stanu termodynamicznego materiału ECz, które realizują się poprzez fluktuacje różnego rodzaju. Kierunek „fluktuacje-samoorganizacja-porządek” jest środkiem osiągnięcia stabilności materiału ECz.

Zbiory parametrów wpływów: mechanicznego, chemicznego oraz cieplnego na ECz mogą być opisane bilansem energetycznym w materiale ECz. Przy tym ECz przetworników szumowego i rezystancyjnego odpowiednio do charakteru wykonania i wykorzystania można rozpatrywać w postaci jednorodnego układu skupionego, natomiast ECz przetwornika termoelektrycznego - w postaci układu rozproszonego. Analizując złożone procesy w materiałach ECz przetworników temperatury, można pominąć wszystkie składniki oprócz trzech podstawowych: składnika cieplnego, który wyznacza kierunek entropijny zachodzących procesów, składnika elektrochemicznego (podstawowego dla przetworników termoelektrycznych) oraz składnika mechanicznego. Wtedy podstawowy dla takich ECz stan termodynamiczny można przedstawić w postaci bilansu mocy:

$$T \frac{dS}{dt} = \frac{dU}{dt} + p \frac{dV}{dt} - \eta \frac{dN}{dt} \quad (1)$$

gdzie T - temperatura; S - entropia; t - czas; U - energia wewnętrzna; p - ciśnienie; V - objętość; h - potencjał elektrochemiczny; N - ilość nośników.

W materiałach ECz które w ciągu pewnego czasu podlegały intensywnej dyfuzji w tym równaniu należy zamienić składowe: $dU/dt + p dV/dt = P[D(\eta)]$, gdzie $D(\eta)$ - jest intensywnością dyfuzji, która jest określona wartością potencjału elektrochemicznego η . W wyniku tego pojawia się dodatkowa siła termodynamiczna połączona z potencjałem elektrochemicznym $\nabla\eta$.

Do opisu stanu materiału ECz zostały zastosowane parametry tak zwanych szumów „elektro-mechano-chemicznych”, pod którymi rozumie się elektroładunkowe przejawianie się ciągle zmieniającego się stanu sprężysto-deformacyjnego w materiale ECz. Wtedy stan materiału ECz przetwornikowy może być opisany wzorem:

$$T \frac{dS}{dt} = -\eta \frac{dN}{dt} + \sigma \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2)$$

W prawej części tej zależności składnik pierwszy opisuje szumy elektrochemiczne, a składnik drugi - szumy elektromechaniczne jako równoległy czynnik szumowy konkurencyjny w stosunku do szumów elektrochemicznych. Ponieważ potencjał elektrochemiczny η zależy od potencjału chemicznego μ oraz elektrycznego potencjału φ i ładunku q : $\eta = \mu + q\varphi$, dlatego wskutek wyodrębnienia szumów elektrycznych (które dotyczą tylko przetworników szumowych) oraz szumów chemicznych (które dotyczą przetworników termoelektrycznych), wzór (2) zmienia swoją postać:

$$T \frac{dS}{dt} = -\mu \frac{dN}{dt} - \varphi \frac{dq}{dt} + \sigma \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (3)$$

Połączone procesy przeniesienia ciepła i ładunku elektrycznego w materiałach ECz pozwalają na obliczenie ChNS wszystkich elektrycznych rodzajów przetworników temperatury. Analiza innych połączonych par sił i strumieni termodynamicznych razem ze składnikami sprężysto - deformacyjnym oraz chemiczno-masowym pozwala przypuszczać że one też mogą powodować odchylenia fluktuacyjno-dyssypacyjne ChNS poprzez odpowiednie szumy.

3. Przetworniki termoelektryczne

Rozpatrywanie za pośrednictwem TSPN materiału niejednorodnego ECz pozwala połączyć zmiany siły termoelektrycznej (dalej STE) $e = \int E(x)dx$ z podstawowymi parametrami termodynamicznymi. Można pokazać że dla jednego z najbardziej uniwersalnych parametrów - potencjału chemicznego przy $\nabla\mu \neq 0$ - wynikiem

rozwiązania równania przeniesienia ładunku i ciepła jest wartość natężenia pola elektrycznego $E = \alpha\nabla T + \frac{1}{q}\nabla\mu$. Oddziaływania na

układ są przyczynami zmiany potencjału chemicznego, który poprzez odchylenia fluktuacyjno-dyssypacyjne powoduje dryft ChNS i w konsekwencji błąd pomiaru.

Zmiany rozkładu makro-, mezo- i mikro- naprężeń w materiale ECz również wpływają przez szumy elektromechaniczne na STE. W przypadku kiedy proces dyfuzji nie zakończy się w zadanym przedziale czasowym wyrażenie (3) przyjmuje postać:

$$E = \alpha\nabla T + \frac{k}{e}\sigma \frac{d\varepsilon}{dt}, \text{ gdzie } k - \text{ jest stałym współczynnikiem.}$$

Dla rozkładu jednostajnego potencjału chemicznego w materiale ECz szumy elektrochemiczne powodują zmiany potencjału chemicznego, co prowadzi do dewiacji Δe_μ STE $e(t) = e_0 + \Delta e_\mu = \int \alpha(T)\nabla_x T dx + \frac{1}{e} \int \nabla_x \mu dx$ względem wartości pierwotnej e_0 .

Zmiany STE wskutek oddziaływania siły termodynamicznej powiązanej z gradientem $\nabla\sigma$ mogą być opisane wzorem

$$e(t) = e_0 + \Delta e_\sigma = \int \alpha(T)\nabla_x T dx + k \int \nabla_x \sigma dx$$

Jak wynika z analizy tych zależności, przy pomijaniu szumów czysto elektrycznych (co spełnia się prawie we wszystkich typowych pomiarowych narzędziach uśredniających) zmiany STE Δe_μ i Δe_σ są zależne odpowiednio od intensywności szumów elektrochemicznych oraz szumów elektromechanicznych. W przypadku pomijania dyfuzji i konsekwentnie szumów elektrochemicznych, można uzyskać dane o wpływie zniekształcenia hydrostatycznego na STEM. Wykorzystując prawo Hooke'a można pokazać że dla

$$1 \text{ mola materiału przyrost modułu Jounga wynosi } \Delta E_\mu = -\frac{\sigma}{\varepsilon^2} \Delta\varepsilon,$$

czyli wartość względna równa się $\delta E_\mu = -\delta\varepsilon$. Wskutek oddziaływania siły $\bar{X} = \alpha\nabla\sigma$ (przy zniekształceniu sprężystym) występuje zmiana współczynnika siły termoelektrycznej $\Delta\alpha_\sigma$, która jest odwrotnie proporcjonalna do zmiany modułu Jounga.

Powtarzalność ChNS także charakteryzuje pewne właściwości szumów elektrochemicznych. Jej wartość stanowi kilka mikrowoltów przy rezystancji kilku Ohm. Zatem wartość rzeczywistych fluktuacji technologicznych drutów ECz przetworników termoelektrycznych przekracza granicę czułości galwanometru, która wynosi ok. $\sim 10^{-9}$ A. Opisany powyżej szum wpływa na właściwości termoelektryczne materiału ECz zmieniając jego ChNS. Najczęściej wspomniane fluktuacje są połączone z obróbką mechaniczną lub termiczną w czasie produkowania samego materiału ECz. W największym stopniu odnosi się to do stopów amorficznych lub spiekanych.

4. Przetworniki szumowe

Przy pomijaniu szumów elektrochemicznych, co ma miejsce w przetworniku szumowym, wskutek malejącego gradientu temperatury: $\nabla T \rightarrow 0$, a także szumów elektromechanicznych (warunek wysokiej jakości wytwarzania przetworników), w bilansie mocy energetycznej pozostają wyjątkowo szumy elektryczne z mocą P_{el} , powiązane z dyssypacją entropii w czasie dS/dt . W wyniku ostatecznym otrzymuje się wzór bliski do wyrażenia Nyquista $T \frac{dS}{dt} = -q\varphi \frac{dq}{dt} = P_{el}$, skąd $T = b'P_{el}$, gdzie $b' = 1/dS/dt$ - jest stałą ChNS przetwornika. Przy tym zmiany ChNS, spowodowane działaniem szumów elektromechanicznych (które nie są znikomo małe): $T = b'(P_{el} - P_{mech})$.

Prędkość dyssypacji entropii była oceniana przy temperaturze

$T \leq 77 K$, przy której intensywność dyfuzji istotnie jest zmniejszona. Prędkość ta została wyrażona za pośrednictwem zmian entropii ΔS zachodzących w czasie relaksacji ze stałą czasową τ : $dS/dt = -\Delta S/\tau$. Nagromadzona w materiale plastycznie odkształconym przez skręcanie i rozciąganie energia wynosi około 3,4 i 2,1 kJ/kg odpowiednio dla Ni i Cu. W takim razie przy masie materiału ECz ponad 1g generowanie szumów niestacjonarnych o mocy 10^{-18}

W dla 77 K może trwać ponad 10^{12} sekund. Powrót do równowagi termodynamicznej lub do stanu stacjonarnego niezrównoważonego może odbyć się za pośrednictwem różnych mechanizmów. Przykładowo, energia sprężysta może się przekształcić w energię powierzchni mikropęknięć z jednym współczynnikiem relaksacji, a może być także odprowadzona od miejsca relaksacji z innym współczynnikiem. Takie odprowadzenie energii może odbyć się również wskutek ruchu i rozmnażania się dyslokacji przy innych współczynnikach.

Przy temperaturach ok. 300 K dominuje proces dyssypacji pochodzenia od mikropęknięć. Przy obniżeniu temperatury do temperatury azotowej coraz bardziej wpływa mechanizm odprowadzenia ciepła. Przy tym moc szumów elektrycznych zmienia się tak, że odchylenia ChNS sięgają kilku procent od wartości nominalnej T_n . W wyniku rozważania różnych mechanizmów relaksacyjnych, zo-

stał otrzymany wzór $\Delta T = T_n \frac{\tau_m}{\tau_h}$, jako wynik konkurencyjny dwóch

podstawowych procesów relaksacyjnych: gromadzenia energii sprężystej wskutek mikropęknięć ze stałą czasową τ_m oraz odprowadzania ciepła ze stałą czasową τ_h . Ważnym parametrem jest stosu-

nek podanych współczynników, definiowany jako $\frac{\tau_h}{\tau_m} = A \frac{c\sqrt{bd}}{\chi}$,

gdzie c - jest prędkością rozprzestrzeniania się dźwięku; b - wielkością ziarna krystalicznego w materiale ECz; d - rozmiarem atomowym; χ - przewodnością cieplną; A - jest stałą równania.

Materiały z wysoką przewodnością cieplną χ i małą prędkością rozprzestrzeniania dźwięku c , do których należą Ni, Cu, Pt, charakteryzują się znacznymi odchyleniami ChNS (nawet przy temperaturze ok. 4,2 K). Na odwrót, w materiałach z małą wartością χ i wysoką wartością c (np. w stopach oraz kompozytach) odchylenia ChNS nie zostały zarejestrowane.

Widmowa gęstość mocy $S(f)$ fluktuacji elektrycznych zwiększa się przy zmniejszeniu częstotliwości f . W przedziale 3...300 Hz istnieje charakterystyczna (dla 1/f szumu) zależność [2]. Przy częstotliwościach powyżej 1000 Hz intensywność szumu jest niezależna od częstotliwości, co odpowiada wzorowi Nyquista.

Charakter zależności widmowej gęstości mocy szumów elektrycznych jest podobny do wpływu zmęczenia mechanicznego, która była zbadana metodą tarcia wewnętrznego. To znaczy że istnieje mechanizm podstawowy, który łączy zmiany właściwości mechanicznych i elektrycznych. Pochłanianie energii oraz jej dyssypacja w materiale ECz mogą być opisane za pomocą tak zwanego mechanizmu dylatonowego [3]. Związki międzyatomowe w materiale ECz są rozciągnięte i dlatego energetycznie chłonne. Stosunek wchłanianej przez dylaton energii V_+ do szerokości pasma częstotliwości

Δf : $\frac{V_+}{\Delta f} = \frac{c}{a f}$ odpowiada nisko częstotliwościowej gęstości mocy

widmowej szumów nagromadzonej, a następnie rozpraszanej w układzie termodynamicznym. Wprowadzenie dylatonów było uwarunkowane zamiarem wykorzystania TSPN jako bazy podstawowej dla wyjaśnienia specyfiki zniekształcenia mechanicznego ECz. Dylatony charakteryzują się dwoma różnymi prędkościami relaksacji: prędkością V_b osiągnięcia stanu relaksacyjnego i prędkością V rozprzestrzeniania się fluktuacji w całym układzie, przy czym $V_b < V$. Cechą charakterystyczną kinetyki dylatona jak

układu otwartego w obszarze materiału ECz są trzy prędkości V_+, V_-, V_d , przy tym stan i ewolucja dylatona zależą od ich stosunków wzajemnych. Kiedy $V_+ < V_-$, dylaton pochodzenia fluktuacyjnego znika. Przy $V_+ > V_-$ dylaton nieodwracalnie gromadzi energię sprężystą, pochłaniając nadmierne fonony. Wskutek czego pojawiają się mikropęknięcia. Istnieje wyrażona równością $V_+(\epsilon_d) = V_-$

moc krytyczna dylatona $\epsilon_d = \frac{a}{G\Lambda}$ (gdzie G - stała Grjuneizena),

która rozdziela jego dwa etapy rozwoju - odwracalny ($\epsilon < \epsilon_d$) i nieodwracalny ($\epsilon > \epsilon_d$).

Można pokazać że częstotliwość krytyczną wyznacza przejście do obszaru częstotliwościowo niezależnych szumów cieplnych ze stałą widmową gęstością mocy. W materiale ECz tworzy się pole defektów termofluktuujących nie skorelowanych w paśmie częstotliwości wyższych (szumy cieplne) oraz skorelowanych w obszarze niskich częstotliwości (1/f -szumy).

5. Przetworniki elektryczne

W stopach amorficznych istnieją obszary rozciągania materiału które są zwane klasterami o objętości ok. 10..20 atomów. Te klastera są podobne do wymienionym wyżej dylatonów. Analiza szczegółowa za pomocą oprogramowania „Curvescript” otrzymanych zależności eksperymentalnych rezystancji stopów amorficznych $Fe_{40}Ni_{38}P_{13}B_9$ w punktach wrzenia gazów szlachetnych oraz w innych punktach skali temperaturowej (4,2...600 K) została przeprowadzona przy założeniu niejednorodnego pseudo dwufazowego materiału. W wyniku analizy teoretycznej udowodniono że zależności temperaturowe takich materiałów powinny być opisywane wielomianami algebraicznymi 3-go stopnia. Zbieżność uzyskanych wyników badań eksperymentalnych (z wykorzystaniem oprogramowania „Curvescript”) z wynikami teoretycznymi jest na poziomie $\leq 10^{-3}\%$.

6. Podsumowanie

- Całokształt procesów w materiałach elementów czułych przetworników temperatury może być bezpośrednio opisany przez szumy elektryczne lub pośrednio przez szumy elektrochemiczne oraz elektromechaniczne i one wyznaczają nie tylko kształt charakterystyk nominalnych statycznych, ale także ich powtarzalność oraz dryfty czasowe.

- Wiedza o pochodzeniu odchylen fluktuacyjnych pozwala na polepszenie powtarzalności charakterystyk czujników, a nawet na wyeliminowanie ich degradacji.

Literatura

- [1] N. Bułatow, A.Łundin: Termodynamika neobratimych fiziko-chimicheskich processow. Moskwa. Nauka, 1984.
- [2] Z. Kołodziej, B. Stadnyk, S. Jacyszyn: Termodynamiczni aspekty elektrycznych szumów w twerdyh tiałach. Zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej, No 192. Elektrotechnika, z.22. Metody i technika przetwarzania sygnałów w pomiarach fizycznych. Rzeszów, 2002, s. 119-124.
- [3] S. Żurkow: Dylatonnyj mechanizm procznosti twiordych tiał. W.Pietrow: Tiepłowyje fluktuacii kak generator zarodyszewych trieszczin. Fizika procznosti i płasticznosti. Leningrad. Nauka, 1986, s. 5-17.

Title: Noise effects in thermometry