

Roman BAJCAR, Zbigniew DĄBEK, Mykoła GINGIN, Petro G. STOLARCZUK

¹POLITECHNIKA LWOWSKA, KATEDRA METROLOGII, STANDARYZACJI I CERTYFIKACJI

²AKADEMIA TECHNICZNO-ROLNICZA W BYDGOSZCZY

Badanie charakterystyk PÓŁPRZEWODNIKOWYCH termorezystancyjnych przetworników pomiarowych z kryształami nitkowymi

Prof. dr hab. inż. Roman BAJCAR¹

Urodził się w 1947 roku. W 1975 roku ukończył studia na Politechnice Lwowskiej. W 1995 roku uzyskał habilitację. Profesor w Katedrze Metrologii, Standaryzacji i Certyfikacji Politechniki Lwowskiej. Specjalista w zakresie mikroelektroniki: budowa i eksploatacja mikroczujników. Autor ok. 210 prac naukowych.



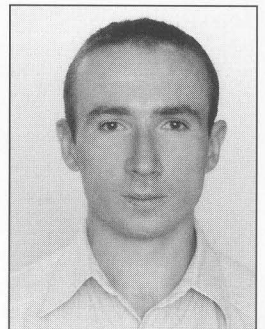
Dr hab. inż. Zbigniew DĄBEK²

Urodził się w 1936 roku. Prof. nadzwyczajny Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy, kier. Zakładu Metrologii Technicznej. Absolwent Politechniki Wrocławskiej Wydziału Mechanicznego (1960 mgr inż.), oraz Wyższej Szkoły Ekonomicznej we Wrocławiu Wydziału Gospodarki Narodowej, (1970 mgr). Doktor nauk technicznych 1971 – Politechnika Warszawska Wydz. Mechaniki Precyzyjnej, habilitacja 2001 – Białoruska Państwowa Politechniczna Akademia w Mińsku Białoruskim. Specjalizacja zawodowa: metrologia długości i kąta, analiza wielkości tolerowanych, analiza błędów pomiarów.



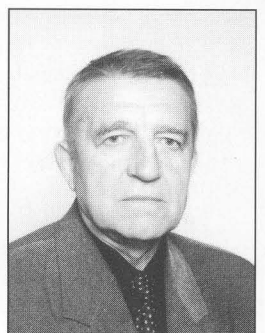
Inż. Mykoła GINGIN¹

Urodził się w 1974 roku. Absolwent Politechniki Lwowskiej (1998 r.), inż. elektronik. Asystent w Katedrze Metrologii, Standaryzacji i Certyfikacji Politechniki Lwowskiej, autor ok. 20 prac naukowych, specjalizacja: przetwarzanie sygnału.



Prof. dr hab. inż. Petro G. STOLARCZUK¹

Urodził się w 1939 roku. Absolwent Politechniki Lwowskiej (1968), doktorat 1976, habilitacja 1990. Profesor, z-ca dyr. Instytutu Techniki Komputerowej Automatyki i Metrologii, kier. Katedry Metrologii, Standaryzacji i Certyfikacji Politechniki Lwowskiej. Specjalista w zakresie pomiarów temperatury: budowa przyrządów, metody pomiarowe. Autor ok. 300 prac naukowych.



Streszczenie

Przedstawiono wyniki badań charakterystyk półprzewodnikowych termorezystancyjnych przetworników pomiarowych przemieszczenia lub innej wielkości mierzalnej, która może być sprowadzona do przemieszczenia. Wykorzystanie półprzewodnikowych mikrokrystalów umożliwia zmniejszenie rozmiarów czujnika i zwiększenie jego szybkości działania w porównaniu z klasycznymi czujnikami mechatronowymi.

Abstract

The class of thermoresistor converters which transform moving or other mechanical parameter which can be transformed in moving is considered in article. Using of semiconductor microcrystal enables to reduce the size of the gauge and to increase its speed in comparison with classical mechatronic converters.

Słowa kluczowe: Przetworniki pomiarowe termorezystancyjne, termistory, kryształy nitkowe.

1. Wstęp

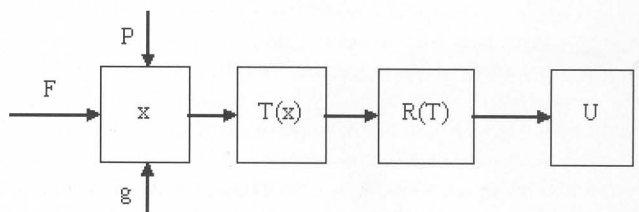
W pracy rozpatruje się termorezystancyjne półprzewodnikowe przetworniki pomiarowe z zastosowaniem kryształów nitkowych. Są to monokryształy o grubości od 10 do 30 μm i długości od 1 do 10 mm o idealnej sieci krystalicznej. Monokryształy te są wytwarzane sztucznie. Ciało stałe lub ciecz, które są materiałem wyjściowym do wytworzenia kryształów nitkowych umieszcza się w ampułce, a następnie poddaje się działaniu gazu (przenośnika), z którym tworzy się substancja lotna. Jeśli teraz ampułkę umieści się w piecu z gradientem temperatury, to następuje przenoszenie cząstek z obszaru wysokich temperatur do obszaru niskich tempera-

tur z tworzeniem się kryształów nitkowych. W ten sposób w czasie jednego cyklu technologicznego można uzyskać ok. 1000 termoczułych elementów. Jako materiał do badań, wybrano stały roztwór Si-Ge [1,2]. Nieograniczona wzajemna rozpuszczalność Si w Ge zapewnia stopowi możliwość ciągłości zmian właściwości elektrycznych oraz odporność na wpływ ciepła i promieniowania. Zmieniając procentowy udział składników w roztworze stałym, można sterować jego właściwościami tak, aby otrzymać praktycznie dowolne zależności rezystancji od temperatury (liniowa, potęgowa, wykładnicza).

Przetworniki termorezystancyjne z takimi charakterystykami pozwalają zlikwidować wady właściwe przetwornikom z drucianymi elementami termoczułymi oraz istotnie uprościć i zmniejszyć koszty ich wytwarzania w porównaniu z przetwornikami mechatronowymi.

2. Budowa przetwornika

Istotą przedstawionego sposobu przetworzenia przemieszczenia (lub innej wielkości mechanicznej, która może być sprowadzona do przemieszczenia) w sygnał elektryczny jest możliwość miejscowego pomiaru temperatury za pomocą miniaturowanego kryształu [3]. Fizyczny model takiego przetwornika, można przedstawić w postaci łańcucha ogniw ze znanymi funkcjami przetwarzania (rys. 1):

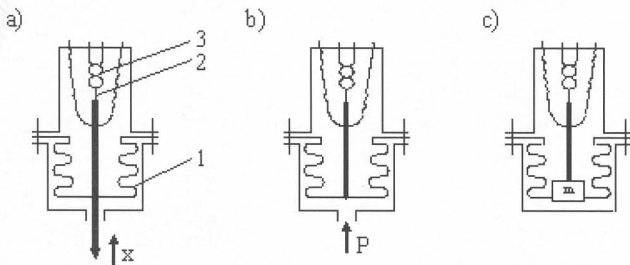


Rys. 1. Strukturalny schemat przetwornika

Poszczególne człony tego schematu to:

- mieszek sprężysty – sylfon, przyjmujący wielkość mierzoną (siłę F , ciśnienie P , przyspieszenie g) i przetwarzający ją w przemieszczenie liniowe x ,
- cylindryczny nagrzewacz, wytwarzający niejednorodny rozkład temperatur wzdłuż osi $T(x)$,
- element termoczuły \tilde{n} półprzewodnikowy kryształ nitkowy, zmieniający swoją rezystancję w zależności od temperatury wytwarzanej przez nagrzewacz $R(T)$,
- mostek pomiarowy U .

Wysoka czułość takiego schematu przetwarzania, zapewniona jest przez dużą wartość temperaturowego współczynnika rezystancji kryształu przy względnie małych jego przemieszczeniach w polu temperaturowym nagrzewacza. Szybkość działania przetwornika termorezystancyjnego zależy od szybkości ustalenia równowagi temperaturowej w układzie element termoczuły – źródło pola cieplnego, naruszonej w procesie mierzenia zmianą ich wzajemnego położenia. Wykorzystanie miniaturowych kryształów (długość 1-1,2mm, średnica 15-20 μ m) stałego roztworu Si-Ge jako elementu termoczułego ze stałą czasową mniejszą niż 0,01 s, pozwala istotnie skrócić czas zachodzącego procesu [4]. Schematy funkcjonalne przetworników termorezystancyjnych pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Schematy funkcjonalne przetworników termorezystancyjnych

a) przemieszczenia liniowego i siły,

b) ciśnienia,

c) przyspieszenia.

gdzie:

1. mieszek sprężysty (sylfon),

2. element termoczuły (kryształ nitkowy),

3. nagrzewacz.

3. Wyznaczanie charakterystyki przetwornika

Aby określić funkcję przetwarzania przetwornika jako całości, należy rozpatrzyć funkcje przetwarzania poszczególnych jego składników.

Charakterystykę przetwarzania sylfonu (zależność jego przemieszczenia liniowego x od ciśnienia p) można przedstawić w postaci:

$$x = p_0 + Ap + Bp^2 \quad (1)$$

Badania doświadczalne charakterystyki sprężystości sylfonu pozwoliły określić błąd uwarunkowany istnieniem histerezy i opóźnienia sprężystego, który przedstawia się w niestabilności parametry p_0 .

Rozkład temperatury wewnątrz nagrzewacza w ogólnym przypadku określony jest równaniem przewodnictwa cieplnego, którego rozwiązanie, przy zadanym polu temperaturowym, jest matematycznie dość skomplikowane. Dlatego też wyznaczono doświadczalnie rozkład temperatury wzdłuż osi nagrzewacza, którą po aproksymacji wielomianem można przedstawić w postaci:

$$T = T_0 + Mx + Nx^2 + Lx^3 \quad (2)$$

Ostatni człon wielomianu uwzględnia możliwość wystąpienia punktu przegięcia charakterystyki. W wyniku przeprowadzonych

pomiarów wyliczono współczynniki T_0 , M , N i L . Badania wykazały, że charakterystykę nagrzewacza można w znacznym stopniu zmieniać na drodze konstrukcyjnej. Zależność rezystancji kryształu od temperatury można zapisać w postaci:

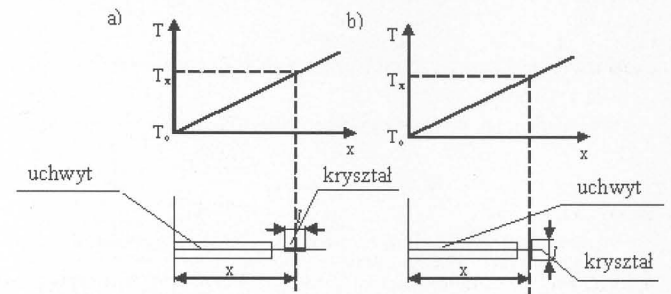
$$R = R_0[1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2] \quad (3)$$

gdzie:

R_0 – początkowa rezystancja kryształu przy temperaturze T_0 ($x_s = 0$),

α – temperaturowy współczynnik rezystancji kryształu,

β – współczynnik nieliniowości termometrycznej charakterystyki kryształu.



Rys. 3. Dwa warianty położenia elementu termoczułego w uchwycie:

a) kryształ jest umieszczony wzdłuż osi uchwytu

b) kryształ jest umieszczony prostopadle do osi uchwytu

Rozpatrzmy dwa możliwe warianty położenia elementu termoczułego w uchwycie mocującym kryształ (rys. 3), i ustalmy czułość przetwornika w obu tych przypadkach.

W pierwszym wariantcie (rys. 3a), kryształ jest umieszczony wzdłuż osi uchwytu. Znajdując się w niejednorodnym polu temperaturowym różne części kryształu będą nagrzane do różnych temperatur w zależności od rozkładu temperatury w nagrzewaczu.

W drugim wariantcie (rys. 3b), kryształ jest umieszczony prostopadle do jego osi. W tym przypadku, kryształ umieszczony w polu temperaturowym będzie jednakowo nagrzany do temperatury, która odpowiada położeniu końca uchwytu, tj. przemieszczeniu x_s .

Ustalmy teraz czułość przetwornika w obu tych przypadkach. Ponieważ rozmiar kryształu jest wielokrotnie mniejszy od nagrzewacza, to można założyć, że pole temperaturowe ma charakter liniowy typu:

$$T(x) = T_0 + Mx, \quad (4)$$

gdzie M jest współczynnikiem charakteryzującym gradient temperatury.

Rozkład temperatur wzdłuż osi kryształu w pierwszym wariantcie, można zapisać w postaci:

$$T(x_1) = T(x_s) + Mx_1, \quad (5)$$

gdzie:

x_s – współrzędna środka kryształu,

x_1 – współrzędna pewnego punktu kryształu (współrzędna względem środka).

W drugim przypadku, przy ustalonym x_s temperatura T kryształu jest stała.

Przyjmijmy, że istnieje liniowa zależność rezystywności kryształu nitkowego od temperatury:

$$\rho = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)], \quad (6)$$

gdzie ρ_0 – rezystywność kryształu przy $T = T_0$.

W pierwszym przypadku występuje niejednorodny rozkład rezystywności wzdłuż osi kryształu określony zależnością:

$$\rho(x_1) = \rho_0 \{1 + \alpha [T(x_1) - T_0]\} \quad (7)$$

Uwzględniając zależności (4) i (6) otrzymamy:

$$\rho(x_1) = \rho_0 + \rho_0 \alpha M x_1 \quad (8)$$

Rezystancja elementu termoczułego jest określona jako:

$$R(x) = \frac{1}{F} \int_{x-\frac{l}{2}}^{x+\frac{l}{2}} \rho(x') dx' \quad (9)$$

gdzie F jest powierzchnią przekroju poprzecznego, a l długością kryształu.

Uwzględniając wzory (8) i (9) i obliczając całkę otrzymujemy:

$$R(x) = R_0(1 + \alpha M x). \quad (10)$$

W drugim przypadku mocowania kryształu otrzymujemy taką samą zależność.

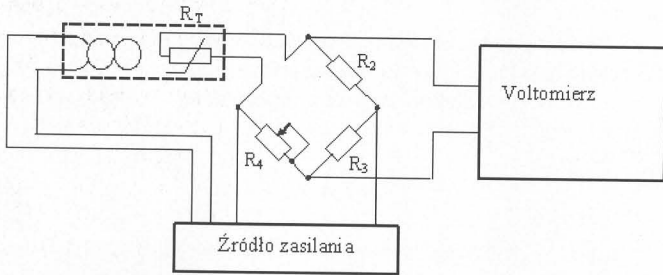
Czułość kryształu w obu przypadkach, zgodnie z (10) będzie równa:

$$S = \frac{dR}{dx} = R_0 \alpha M. \quad (11)$$

Badając działanie kryształu w mostku pomiarowym (rys. 4), ustalono, że wartość jego wyjściowego sygnału jest proporcjonalna do prądu płynącego przez kryształ I, początkowej rezystancji R_0 , względnego przyrostu rezystancji α i stosunku rezystancji w gałęziach mostka κ :

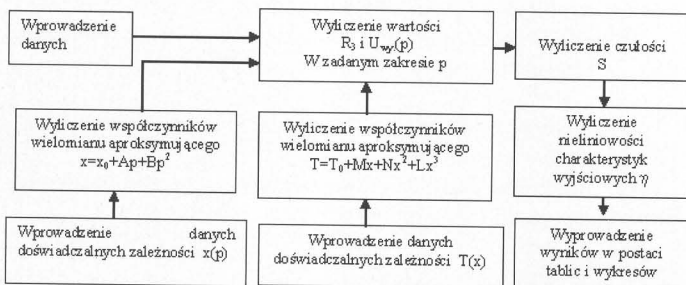
$$U = IR_0 \alpha \frac{\kappa}{\kappa + 1}. \quad (12)$$

Stosunek rezystancji w gałęziach mostka, zapewniający maksymalną czułość i liniowość charakterystyki na wyjściu, wynosi ~ 10 .



Rys. 4. Schemat pomiarowy usytuowania elementu termoczułego

Funkcja przetwarzania przetwornika, jako całości, może być ustalona w procesie obliczeniowym. Autorzy opracowali zarówno metodykę obliczeń jak również odpowiedni program, którego schemat blokowy przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Schemat blokowy wyznaczania charakterystyk przetwornika termorezystancyjnego

Tok obliczeń przebiegał w następującej kolejności. Danymi wejściowymi były zadane rezystancje gałęzi mostka (R_2 i R_3), napięcia zasilania U_0 i wyjściowe parametry elementu termoczułego – R_0 , α i β . Następnie przy pomocy standardowego podprogramu wprowadzano tablicę doświadczalnych wartości charakterystyki sylfonu, po czym metodą najmniejszych kwadratów wyznaczono wartości współczynników p_0 , A i B aproksymującego wielomianu (1). Podobnie wprowadzono tablicę doświadczalnych wartości rozkładu temperatur wzdłuż długości nagrzewacza i wyznaczono współczynniki M, N, L w wielomianie aproksymującym (2). Następnie wyznaczono wartości rezystancji R_4

$$R_4 = R_{T01} \frac{R_3}{R_2} \quad (13)$$

zapewniającą równowagę mostka przy początkowej temperaturze T_0 , odpowiadającej przemieszczeniu $x=0$ ($p=0$) i wyjściowego napięcia U , w zadanym zakresie wielkości wejściowej ciśnienia, z zadanym krokiem przy różnych wartościach współczynnika nieliniowości elementu termoczułego

$$\beta = \frac{R_1 - R_0(1 + \alpha \Delta T)}{R_0(\Delta T)^2} \quad (14)$$

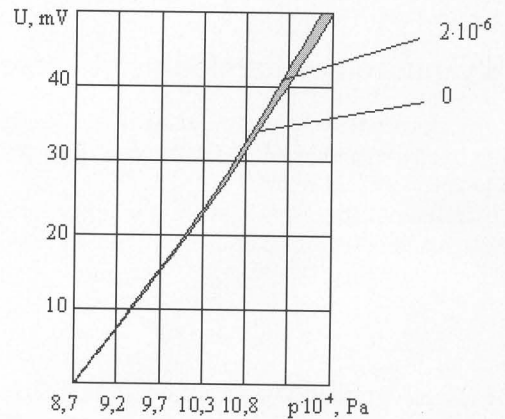
Następnym krokiem było wyznaczenie funkcji przetwarzania przetwornika jako $U=f(p)$ oraz jego czułości $S = dU/dp$ na drodze rozwiązania układu równań (1), (2), (3), (12).

Dla określenia nieliniowości charakterystyki, metodą najmniejszych kwadratów funkcję przetwarzania aproksymowano funkcją liniową $\bar{U}=f(p)$ i nieliniowość określono według wzoru:

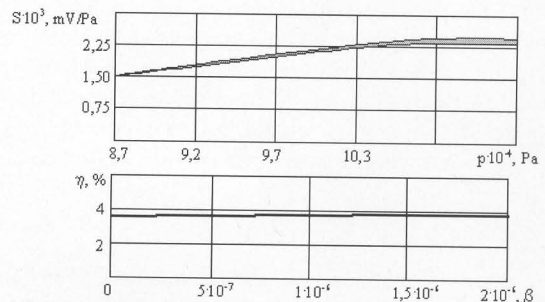
$$\eta = \frac{U - \bar{U}}{U_{\max} - U_{\min}} \cdot 100\%, \quad (15)$$

gdzie U_{\max} i U_{\min} jest maksymalną i minimalną wartością sygnału wyjściowego dla danego zakresu mierzonej wielkości wejściowej.

Na rys. 6 i 7 przedstawiono typowe charakterystyki termorezystancyjnego przetwornika ciśnienia otrzymane na drodze obliczeniowej.



Rys. 6. Zależność sygnału wyjściowego przetwornika termorezystancyjnego od ciśnienia dla różnych wartości nieliniowości kryształów: 0 ; $5 \cdot 10^{-7}$; $1 \cdot 10^{-6}$; $5 \cdot 10^{-7}$; $1,5 \cdot 10^{-6}$; $2 \cdot 10^{-6}$.



Rys. 7. Zależność czułości przetwornika od ciśnienia (a) i nieliniowości jego charakterystyki od nieliniowości zastosowanych kryształów (b).

4. Wnioski

1. Wyjściowe charakterystyki przetwornika praktycznie nie zależą od nieliniowości charakterystyk pojedynczych kryształów.
2. Stopień nieliniowości statycznej charakterystyki przetwornika jest określony w głównej mierze nieliniowością rozkładu temperatury wzdłuż osi nagrzewacza (jego rozwiązaniem konstrukcyjnym).
3. Jakkolwiek nieliniowości wszystkich ogniw dodają się, to zmniejszając nieliniowość charakterystyki nagrzewanego węzła, można kontrolować wielkość ogólnej nieliniowości i w ten sposób linearyzować charakterystykę przetwornika.
4. Przetwornik zapewnia dostatecznie wysoką czułość sygnału wyjściowego poprzez duży gradient temperaturowego pola nagrzewacza, wielkości temperaturowego współczynnika rezystancji kryształu i odpowiedni dobór rezystancji w gałęziach mostka.

Literatura

- [1]. Baitsar R., Vainberg V., Varshava S.: Application of semiconductor whisker crystals in low temperature electronics. *Journal de Physique IV*, V.6, 1996.

- [2]. Baitsar R. I., Varsawa S.S., Ostrowskaja A.S., Krasnozenow E.P.: Polucenije i nekotoryje swojstwa nitevidnych kristal'ov tverd. rastvora Si-Ge. *Taganrog: TGRU. Tezisy dokladov Vserossijskoj naucno-techniceskoj konferenciji s mezd. ucas. „Aktualnye problemy tverdotelnoj elektroniki i mikroelektroniki”*, c. I, 1994.
- [3]. Baitsar R. I., Varsawa S.S., Krasnozenow E.P., Ostrowskaja A.S.: Elektromechaniceskie, tepłovye i fotoelektriceskie preobrazovateli na osnove monokristal'ov Si-Ge. *Neorganiceskie matrialy 1996*. – T. 32. – nr 7. – s. 789-793.
- [4]. Baitsar R., Varshava S., Ostrovski I., Trots T.: Investigation of growth and doping of Si-Ge whiskers of their application in microelectronics. *Proceedings 2-nd Int. Symp. on Microelectronics Technologies and Microsystems*. Lviv Polytechnic State University. – 1998. – P. 163-167.

Title: Research of characteristics semiconductors thermoresistor measurement converters with wiskers

Artykuł recenzowany

RECENZJE

„ENCYKLOPEDIA TERMOMETRII” („Енциклопедия термометрії“)

Zespół autorski: J.T. Łucyk, L.K. Bunjak, J.K. Rudawskij, B.I. Stadnyk. Książka w języku ukraińskim.

Wydawnictwo Politechniki Lwowskiej, Lwów 2003. ISBN 966-553-313-4

Jest to książka opracowana przez zespół autorów zajmujących się od kilkudziesięciu lat rozległą dziedziną pomiarów termicznych – termometrią. Autorzy są pracownikami Katedry Technik Pomiarowo – Informacyjnych Politechniki Lwowskiej (National University «Lviv Polytechnic»). Katedra ta w swej działalności nawiązuje obecnie do polskich przedwojennych tradycji tej Uczelni, na której pracował wybitny metrolog elektryk – profesor Włodzimierz Krukowski, rozstrzelany przez Niemców we Lwowie w 1941r. Zarówno dzisiejszy kierownik tej Katedry prof. B.I. Stadnyk jak i wielu jego współpracowników (w tym kilku, jak on, pracujących też w Politechnice Rzeszowskiej) było uczniami docenta Koczana, wybitnego wychowanka prof. Krukowskiego i kontynuatora zainicjowanych i prowadzonych przez niego prac badawczo – rozwojowych z metrologii w Politechnice Lwowskiej. Katedra ta stanowi centrum Lwowskiej Szkoły Metrologii Elektrycznej i Termometrii. W ciągu kilku minionych dziesięcioleci opracowała ona wiele oryginalnych publikacji, podręczników i monografii z tego zakresu, znanych bardzo szeroko, w tym i w Polsce. Wydaje też od dość dawna własne czasopismo pomiarowe. O dużym doświadczeniu zespołu świadczy na przykład podręcznik „Температурные измерения”, kilkakrotnie wydawany przez wydawnictwo „Наукова Думка” z Kijowa w latach 1984 – 1989. Stanowił on podstawą pozycję dydaktyczną z zakresu pomiarów temperatury w całym ówczesnym Związku Radzieckim. Lwowska szkoła termometrii rozwinęła się między innymi także dzięki bliskiej współpracy z przedsiębiorstwem Термоприбор (obecnie Термоприлад), głównym dostawcą systemów do pomiaru temperatury dla przemysłu i gospodarki – w ramach obszaru działania ówczesnej Rady Wzajemnej Pomocy Gospodarczej oraz do zastosowań wojskowych i to nawet do dziś.

Omawiana encyklopedia stanowi naturalne uwieńczenie wcześniejszego dorobku Katedry. Liczy 428 stron i jest napisana zwięzle w języku ukraińskim. Ma charakter leksykonu naukowo technicznego zawierającego hasła z termometrii, która w większości

stanowi dział metrologii elektrycznej wielkości nieelektrycznych. Omówiono około 800 terminów i definicji wiążących się bezpośrednio z całym obszarem tej dziedziny. Wydzielenie z metrologii, w postaci osobnej pozycji książkowej, zestawu terminów tylko z termometrii jest uzasadnione w pełni tym, że szacunkowo około 30 % wszystkich pomiarów w technice i badaniach naukowych dotyczy pomiarów temperatur. W treści leksykonu zamieszczono w szczególności hasła opisujące podstawy teoretyczne działania termometrów i systemów do pomiaru temperatury, przykłady obliczeń składowych błędów występujących w różnych warunkach pomiarowych, przykłady budowy termometrów działających w oparciu o różne zasady pomiaru (tj. wykorzystujących różne zjawiska fizyczne) oraz metody i ograniczenia przy ich wzorcowaniu. Bardzo interesująco są omówione hasła dotyczące: mechanizmów wymiany ciepła, pomiarów temperatury powierzchni ciał z kompensacją odprowadzenia ciepła, błędów statycznych i dynamicznych (nie napisano jednak o niepewnościach), wzorców, podstaw teoretycznych pirometrii, punktów stałych w termometrii według Międzynarodowej Skali Temperatury (ITS-90), termoanometrów, wszystkich rodzajów termometrów, w tym także akustycznych, szumowych, rur cieplnych do chłodzenia np. elementów elektronicznych, i szereg innych. Hasła są bogato ilustrowane przez kolorowe rysunki i fotografie termometrów oraz różnych przyrządów produkowanych w lwowskiej firmie «Термоприлад».

Warto pochwalić Wydawnictwo Politechniki Lwowskiej za wyjątkowo staranną edytorsko postać leksykonu. Wydaje się jedynie, że 1/3 szerokości każdej strony niepotrzebnie zajmuje niebieski pasek z umieszczonym na nim bądź tylko tytułem omawianego hasła, bądź nawet pozostawiono go jako puste pole. Taki sposób prezentacji marnotrawi miejsce, które można by wykorzystać na tekst i niepotrzebnie powiększa objętość książki. W następnym wydaniu warto to zmienić.

Ciąg dalszy na stronie 25