

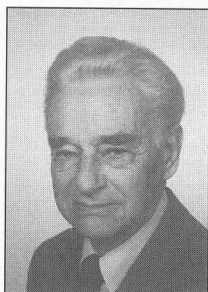
Ludwik MICHALSKI, Jacek KUCHARSKI

POLITECHNIKA ŁÓDZKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I ELEKTRONIKI, KATEDRA ELEKTROTERMII

400 lat pomiarów temperatury, pierwszy termometr - Galileusz, 1602r

Prof. zw. dr hab. inż. Ludwik Michalski

b. kierownik Katedry Elektrotermii Politechniki Łódzkiej. Specjalność naukowa: elektrotermia oraz pomiary i regulacja temperatury. Autor lub współautor 7 książek z dziedziny pomiarów i regulacji temperatury w tym książki "Temperature measurement" wyd. J. Wiley & Sons, W. Brytania w 1991r. Autor ponad 100 publikacji oraz licznych referatów na konferencjach krajowych i zagranicznych.



Dr inż. Jacek Kucharski

absolwent Wydziału Elektrotechniki i Elektroniki Politechniki Łódzkiej (1990), doktorat tamże (1993), obecnie adiunkt w Katedrze Elektrotermii Politechniki Łódzkiej. Zainteresowania naukowe: pomiary i regulacja temperatury, komputerowe systemy pomiarowo-sterujące, wykorzystanie nowoczesnych technik informatycznych, w tym teorii zbiorów rozmytych, w procesach technologicznych. Autor i współautor ponad 50 publikacji naukowych w tym dwóch książek i jednego patentu RP.



Streszczenie

W związku z czterechsetną rocznicą opracowania przez Galileusza pierwszego termometru, ściśle termoskopu, w pracy podano zwięzłą historię rozwoju termometrii. Praca została podzielona między innymi na następujące działy: Era prac pionierskich, Skale temperatury z uwzględnieniem obowiązującej obecnie Międzynarodowej Skali Temperatury ITS-90, Nowa era - termometry elektryczne, Metody bezstykowe - pirometry i termografia oraz Nowe metody. W dziale nowe metody wzmiankowano: termometry kwarcowe, ultradźwiękowe, szumowe i termometry o stałych rozłożonych.

Abstract

At the four hundredth anniversary of inventing the thermometer, precisely a thermoscope, by Galileo Galilei, a concise history of development of thermometry is presented. The course of development is divided into several periods, such as: Era of Pioneering Works, including the appearance of the first graduated thermometer (Fig.2). next part was devoted to Temperature Scales, up till currently used International Temperature Scale, ITS-90, followed by New Era- Electrical Thermometers covering resistance, thermoelectric and semiconductor thermometers. Era of Pyrometers started with direct eye observation of hot bodies (Fig.4), leading to ingenious thermal imaging systems. Contemporary trends concentrate on computerised temperature measuring systems, resulting in conceiving intelligent sensors and virtual instruments.

Słowa kluczowe: pomiar temperatury, skala temperatury, termometr
Key words: temperature measurement, temperature scale, thermometer

Temperatura

Z zagadnieniem pomiaru temperatury nieodłącznie wiąże się sama definicja stanu cieplnego ciała i fizjologicznego jego odczuwania. Już w II wieku przed naszą erą w Rzymie C. Galen zaproponował wprowadzenie czterech stopni ciepła lub zimna zależnie od wpływu różnych specyfików na organizm ludzki, które ten organizm nagrzewały lub ochładzały. Wprowadził on również pojęcie stopnia obojętnego, przypisując mu intuicyjnie wartość zerową i stwierdzając, że zależy ona od szerokości geograficznej.

Trafna jest definicja J.C. Maxwella, iż temperatura jest stanem cieplnym ciała, będącym miarą jego zdolności przekazywania ciepła innym ciałom.

Daleka była jednak droga do pomiaru temperatury, przy czym pierwsze próby w tym względzie przypisuje się Galileuszowi.

Artykuł niniejszy jest próbą przedstawienia rysu historycznego rozwoju metod pomiaru temperatury ze szczególnym uwzględnieniem okresu powstawania każdej z metod.

Era prac pionierskich

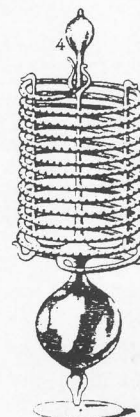
Mija właśnie 400 lat od czasu gdy Galileusz - Galileo Galilei ok. 1602 roku, inspirowany pracą greka Hero z I wieku przed naszą erą, zbudował pierwszy przyrząd do określenia stopnia ciepła lub zimna, zwany termoskopem, który uznać można za pierwowzór termometru. Szkic przyrządu przedstawiony w 1617 roku przez G. Biancani

pokazano na rys.1 [4]. Powietrze zawarte w szklanej bańce, B, pod wpływem zmian jej temperatury powodowało ruch słupka cieczy, D, w długiej szklanej rurce, O. Urządzenie to było wrażliwe na zmiany ciśnienia atmosferycznego i wpływ odparowywania wody. Jako ciecz stosowano również spirytus i olej.

Termoskop Galileusza nie posiadał skali, a około roku 1613 podobny przyrząd G. Sagredo [4] we Włoszech wyposażył w prowizoryczną skalę oznaczając pewne wybrane temperatury. Podobne urządzenia opracowali członkowie Florenckiej Akademii Nauk wprowadzając spiralną rurkę z podziałką (rys.2), nie przypisując jednak poszczególnym działkom wartości liczbowych [8].



Rys.1. Termoskop Galileusza z 1617 roku



Rys.2. Termometr Florenckiej Akademii Nauk (1650 rok)

Znacznym postępem było uszczelnienie układu, aby uniezależnić wskazania od zmian ciśnienia atmosferycznego, wprowadził je w 1654 r. Wielki Książę Toskanii, Ferdynand II [4].

Pierwszą próbę przypisania wartości liczbowych poszczególnym podziałkom podjął R. Hooke w Londynie w 1663 roku, zaś Royal Society of London wyraziło zgodę aby jeden z termometrów Hooke'a stanowił wzorzec dla innych użytkowników [4].

Skale temperatury

Z biegiem lat niezbędne i ściśle związane z rozwojem termometrii stało się opracowanie skali temperatury.

W pierwszych latach XVIII wieku duński astronom O. Romer [4] wprowadził liniowy podział obszaru między punktem topnienia lodu i punktem wrzenia wody. W 1708 roku gdańszczanin G.D. Fahrenheit nawiązał współpracę z Romerem i rozpoczął produkcję termometrów ze zmodyfikowaną skalą Romera, a następnie z własną skalą używaną do dziś w krajach anglosaskich - skalą Fahrenheita [5]. Skala ta bazowała na dwóch punktach termometrycznych: mieszaninie lodu i wody, +32° i temperaturą ciała ludzkiego, 96°. Po przyjęciu tej skali w Wielkiej Brytanii, wskazanie +212° odpowiada temperaturze wrzenia wody.

W roku 1740 A.Celsiusz z Uppsali wprowadził skalę stustopniową, przypisując wartość 100° punktowi lodu i 0° punktowi wrzenia wody, zaś Stromer w 1742 odwrócił te wartości. Od 1948 roku, zastępując punkt lodu punktem potrójnym wody, skala ta znana jest pod obowiązującą obecnie nazwą skali Celsjusza.

W roku 1911 Niemcy, W. Brytania i USA przyjęły jedną, wspólną skalę temperatury, która w 1927 została nazwana Międzynarodową Skalą Temperatury. Była ona następnie modyfikowana w latach 1968, 1975, 1976 i ostatecznie w 1989 roku, przyjmując nazwę Międzynarodowa Skala Temperatury 1990 (International Temperature Scale, ITS-90).

Skala ta bazuje od roku 1954 na termodynamicznej skali Kelvina z punktem potrójnym wody równym 273,16 Kelvinów, jako podstawowym punktem termometrycznym. Nawiązuje ona do propozycji Lorda W. Kelvina z 1848 roku [5].

Termometry nieelektryczne

W roku 1660 Robert Boyle jako pierwszy opisał fundamentalną zależność $pV = \text{const}$ dla gazów, zaś prace te kontynuował Joseph Gay-Lussac, formułując w 1802 roku znaną zależność objętości gazu od temperatury przy stałym ciśnieniu. W 1834 roku Emile Clapeyron połączył te osiągnięcia dochodząc do równania dla gazu doskonałego $pV = RT$. Równanie to stało się podstawą budowy termometrów gazowych, stosowanych do dziś w badaniach laboratoryjnych.

W połowie XIX wieku do powszechnego użytku weszły szklane termometry cieczowe oraz termometry manometryczne cieczowe membranowe lub z rurką Bourdona. Są one stosowane do dziś, dzięki ich prostej konstrukcji, trwałości i możliwości stosowania w pomieszczeniach zagrożonych wybuchem. Pierwszy szklany termometr rtęciowy do pomiarów w medycynie wprowadził Fahrenheit ok. 1715 roku.

W tym samym okresie pojawiły się termometry bimetalowe i termometry dylatacyjne, również trwałe i proste w konstrukcji.

Nowa era - termometry elektryczne

Termometry rezystancyjne

Momentem przełomowym w rozwoju termometrii było wprowadzenie termometrów rezystancyjnych, zapoczątkowane przez C.W. Siemensa, który w 1871 roku przedstawił na zebraniu Royal Society w Londynie pierwszy czujnik rezystancyjny platynowy. Wyłoniony wówczas specjalny Komitet stwierdził, że czujnik ten nie zapewnia dostatecznej dokładności pomiarów. Wkrótce C.W. Siemens przedstawił zmodyfikowaną wersję czujnika, w którym uzwojenie platynowe było zabezpieczone przed wpływem redukującej atmosfery przez osłonę platynową lub ceramiczną, co przedstawiono na rys.3 [2].

Wzór interpolacyjny wyrażający zależność rezystancji czujnika od jego temperatury, podany przez Siemensa, został w 1887 roku zmodyfikowany przez H.L. Callendara (Anglia), który następnie zaproponował nową, do dziś stosowaną konstrukcję czujnika rezystancyjnego z uzwojeniem platynowym nawiniętym na kształtce z miki. Czujniki rezystancyjne są stosowane w zakresie od -220 °C do +850 °C.

Do pomiarów rezystancji czujnika stosowane były różne typy układów mostkowych równoważonych ręcznie i samoczynnie. Obecnie najczęściej stosuje się układy mostkowe niezrównoważone z miernikiem cyfrowym.

Termometry rezystancyjne są dla temperatur od 13,8 K do punktu

krzepnięcia srebra (961.78 °C) narzędziem interpolacyjnym Międzynarodowej Skali Temperatury 1990 i w tym zakresie są do dziś jednym z najdokładniejszych przyrządów.

Termometry termoelektryczne

Prawie jednocześnie z termometrami rezystancyjnymi powstały pierwsze termometry termoelektryczne, bazujące na odkrytym w 1821 roku przez T.J. Seebecka (Niemcy) zjawisku powstawania siły termoelektrycznej w obwodzie dwóch różnych metali, gdy miejsca ich styku znajdują się w różnych temperaturach.

Za powstanie termometru termoelektrycznego uznać można zastosowanie w 1885 roku przez H. LeChatelier (Francja) termoelementu (ogniwa) Pt-Pt90%Rh10% do pomiaru temperatury. Termoelement ten był stosowany od 1927 do 1990 roku jako narzędzie interpolacyjne Międzynarodowej Skali Temperatury w zakresie od punktu krzepnięcia aluminium (660°C) do punktu krzepnięcia złota (1064°C). Metalowe i niemetalowe termoelementy są stosowane do 3000 °C.

Ważnym etapem w rozwoju termometrów termoelektrycznych było wprowadzenie ich w 1957 roku w formie tzw. czujników płaszczowych, które charakteryzują się małymi średnicami, giętkością i trwałością.

Do pomiaru siły termoelektrycznej były i są stosowane miliwoltomierze magnetoelektryczne wyskalowane w jednostkach temperatury.

Mierniki te nie zapewniają wysokiej dokładności pomiarów w odróżnieniu od układów kompensacyjnych. Kompensator prądowy wprowadzili Lindeck i Rothe ok. 1900 roku, zaś kompensator napięciowy J.C. Poggendorf w 1906 roku. Były to kompensatory ręcznie obsługiwane [6].

Przełom w dziedzinie pomiarów i rejestracji temperatury nastąpił przez wprowadzenie do produkcji w 1935 roku samoczynnych elektromechanicznych kompensatorów napięciowych Micromax firmy Leeds & Northrup, (USA) o dokładności rzędu $\pm 0,2\%$. W końcu lat pięćdziesiątych układ elektromechaniczny do sprawdzania stanu równoważenia został zastąpiony przez układ elektroniczny, a następnie fotoelektryczny i półprzewodnikowy.

Podobnie jak w termometrach rezystancyjnych powszechnie stosowane są obecnie mierniki cyfrowe.

Termometry półprzewodnikowe

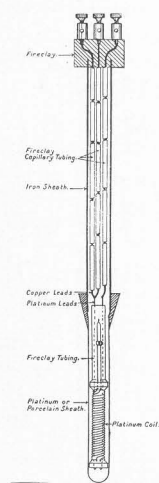
Trzecią zasadniczą grupę termometrów elektrycznych stanowią termometry półprzewodnikowe, związane z badaniami cieplnych właściwości półprzewodników przez W. Faradaya w 1834 roku. Produkcję przemysłową czujników półprzewodnikowych - termistorów - rozpoczęto w roku 1930 jednocześnie w Bell Telephone Company (USA) i firmie Osram (Holandia). Są one produkowane do dziś, charakteryzując się małymi wymiarami i dużą czułością, jednak ich nieliniowe własności i sposób produkcji nie umożliwiają znormalizowania ich charakterystyk. W latach sześćdziesiątych opisano [9] pierwsze zastosowania tranzystorów i diod do pomiaru temperatury.

D.F. Hilbiber w 1964 roku i R.J. Widler w 1965 roku opisali pierwsze zastosowania półprzewodnikowych układów scalonych, produkowanych przez kilka czołowych firm światowych. W zakresie od -50 °C do 150 °C zapewniają one wysoką czułość, wyższą niż termistory.

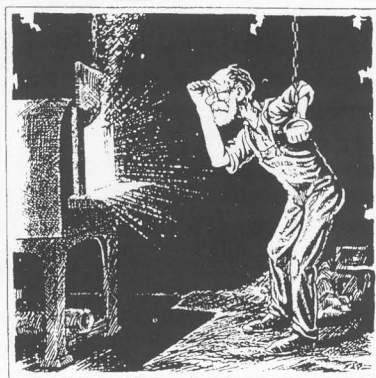
Metody bezstykowe - pirometry

Jednocześnie z termometrami elektrycznymi rozwijała się pirometria optyczna obejmująca zdalne, bezstykowe pomiary temperatury. Był to przełom w metodach pomiaru temperatury.

Rozwój bezstykowych metod pomiaru temperatury bazował na spostrzeżeniu, że obserwując ciało nagrzane do temperatury powyżej ok. 600°C można orientacyjnie określić stopień jego nagrzania według jego barwy, jak to dowcipnie pokazano na rys.4 podanym za [8]. W obróbce cieplnej metali doświadczeni praktycy potrafia

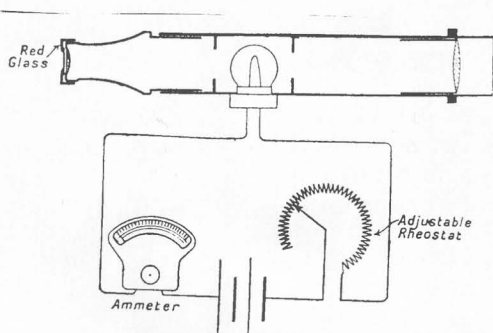


Rys.3. Czujnik rezystancyjny platynowy wg. W.Siemensa (ok. 1871 roku)



Rys.4. Pierwsze pirometryczne pomiary temperatury (wg. Temperature ..., 1941) ocenić temperaturę ciała z dokładnością wystarczającą dla prostszych procesów obróbki cieplnej.

W 1892 roku H. LeChatelier (Francja) zbudował przyrząd, który uznać można za pierwszy pirometr. W rzeczywistości był to układ optyczny porównujący przez czerwony filtr natężenie promieniowania obiektu i lampy olejowej. W 1888 roku S.F. Morse (USA) [2] opracował pierwszy pirometr optyczny z zanikającym włóknem w 1902, zmodyfikowany przez L. Holborna i F. Kurlbauma (Niemcy) przez dodanie soczewki skupiającej i okularu (rys.5). Pirometr ten od roku 1927, w zakresie powyżej punktu krzepnięcia złota, był przyrządem wzorcowym Międzynarodowej Skali Temperatury, ITS - 27.



Rys.5. Pirometr optyczny z zanikającym włóknem

W 1902 roku C. Féry (Francja) [4] skonstruował pierwszy pirometr radiacyjny soczewkowy oraz w 1904 roku [4] pirometr radiacyjny zwierciadłowy, które w technologicznie zmodyfikowanej formie są stosowane również obecnie. Zastąpienie pierwotnie stosowanych detektorów termoelektrycznych przez detektory fotoelektryczne zaproponował H.E. Ives [8] w 1920 roku. Pierwsze pirometry fotoelektryczne zostały wprowadzone na rynek w 1932 roku, a w okresie powojennym zaczęto produkcję pirometrów z detektorami fotorezystancyjnymi i półprzewodnikowymi. Główną zaletą detektorów fotoelektrycznych są ich małe stałe czasowe w porównaniu z detektorami termoelektrycznymi.

Znacznym postępem w budowie pirometrów było wprowadzenie pirometru dwubarwowego eliminującego wpływ emisyjności ciała badanego na wynik pomiaru. Określenie temperatury następuje tu wg ilorazu natężeń promieniowania w dwóch wybranych długościach fal w zakresie promieniowania widzialnego. Opis takiego pirometru podał W.E. Forsythe [5]. Automatyczny pirometr dwupasmowy opisali W.H. Russel, C.F. Lucks i L.G. Turnbull w 1939 roku [8]. Był on zbudowany na bazie samoczynnego kompensatora elektromechanicznego z układem fotokomórek próżniowych. Stosowane obecnie automatyczne pirometry dwupasmowe są budowane w oparciu o detektory fotoelektryczne i układ mikroprocesorowy.

Jako dalsza ewolucja pirometru dwupasmowego powstał pirometr wielopasmowy opisany w 1992 roku przez A. Cezairliyan'a i innych [5]. Służą one do pomiaru temperatury powierzchni o niskiej emisyjności.

Do metod bezstykowych zaliczyć można również metody wizualizacji pól temperatury. Metody te zwane termografią zapoczątkowała w 1965 roku szwedzka firma AGEMA wprowadzając termowizję opartą o optoelektroniczny układ skaningowy. Układy te są wypierane obecnie przez układy matrycowe, całkowicie elektryczne, produkowane między innymi przez firmę FLIR (Szwecja). Układy te, dając dwuwymiarowy obraz pola temperatury z wielorakimi opcjami i zastosowaniami, uznać można za jedną z bardziej uniwersalnych metod pomiaru temperatury o ogromnym znaczeniu na przyszłość.

„Nowe metody“

Ostatnie trzydzieści lat przyniosły rozwój tzw. „nowych metod“ pomiaru temperatury, do których zalicza się między innymi:

- **Termometry kwarcowe** opisane przez P. Scholtzela w 1970 roku, służące do precyzyjnych pomiarów temperatury [7].
- **Termometry ultradźwiękowe**, rozwijające od początku lat siedemdziesiątych [1]
- **Termometry szumowe**, których podstawy bazują na pracach A. Einsteina z lat 1905-1908 i H. Nyquista z 1928 roku a zostały wprowadzone do użytku w latach siedemdziesiątych.
- **Termometry o stałych rozłożonych**: światłowodowe, półprzewodnikowe i termoelektryczne [5].

Zakończenie

Ostatnie lata znamienne są powszechnym wprowadzaniem systemów komputerowych i mikroprocesorowych do układów pomiarowych temperatury. Trend ten owocuje obecnie między innymi takimi rozwiązaniami jak czujniki inteligentne czy przyrządy wirtualne, których cechą charakterystyczną są coraz bardziej wyrafinowane, cyfrowe metody przetwarzania sygnałów pomiarowych np. eliminacja zakłóceń z wykorzystaniem zbiorów rozmytych, oraz bogata w formę wizualizacja procesu pomiarowego. Technika cyfrowa otwiera także nowe możliwości w zakresie rejestracji (archiwizacji) wyników pomiarów jak również sprzyja tworzeniu zamkniętych układów regulacji temperatury, w których pomiar temperatury odgrywa istotną rolę.

Patrząc na historię współczesnej termometrii należy podkreślić, iż krokiem milowym w jej rozwoju były materiały opublikowane w 1941 [8] roku w zbiorze referatów z historycznego Sympozjum „Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry“, które odbyło się w listopadzie 1939 roku w Nowym Jorku.

Literatura

- [1] J.U.W. Bell, Ultrasonic thermometry using resonance techniques, Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry, 4(1), (1972), Instrument Society of America, Pittsburgh, 709-713.
- [2] E. Griffith, Methods of Measuring Temperature, Charles Griffin & Co. Ltd. London, (1947) UK.
- [3] D.F. Hilbiber, A new semiconductor voltage standard, ISSCC Dig. Tech. Papers, (1964), 32-33.
- [4] T.D. McGee, Principles and Methods of Temperature Measurement, J. Wiley & Sons, New York, (1988), USA.
- [5] L. Michalski, K. Eckersdorf, J. Kucharski, J. McGhee, Temperature Measurement, John Wiley & Sons, Chichester, (2001) UK.
- [6] A. Palm, Elektrische Messgeräte und Messeinrichtungen, Springer-Verlag, (1963) Berlin, (Niemcy).
- [7] P. Scholtzel, Temperaturmessung mit Quarzsensoren, VDI-Z, 112 (3), 1970, 14-18.
- [8] Temperature: Its Measurement and Control In Science and Industry. Proc. of Symposium, American Institute of Physics (1941), Reinhold Publ. Corp. New York, (1970) (USA)
- [9] A. Ziel van der, Solid State Physical Electronics, Prentice - Hall, Englewood Cliffs, NJ, (1968) (USA)

Title: 400 years of temperature measurement, first thermometer - Galileo Galilei, 1602