

Proste metody sprawdzania dokładności precyzyjnych mostków termometrycznych (1)

Rys historyczny, zasada działania i parametry mostków AC, niekonwencjonalna metoda kontroli zera mostka

Aleksander A. Mikhal*, Zygmunt L. Warsza**

*Instytut Elektrodynamiki Narodowej Akademii Nauk Ukrainy, Kijów

**Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP

Streszczenie: W dwuczęściowej publikacji zostaną omówione niekonwencjonalne metody kontroli dokładności wysokoprecyzyjnych mostków termometrycznych przeznaczone do stosowania przy ich kalibracji i w pomiarach temperatur wzorcowych. W części pierwszej przedstawiono w zarysie rozwój historyczny przyrządów do dokładnych pomiarów temperatury, porównano podstawowe parametry metrologiczne współczesnych mostków termometrycznych oraz omówiono zasadę działania precyzyjnych mostków AC z regulowanymi dzielnikami indukcyjnymi. Podano model błędu systematycznego samego mostka, zawierający składową addytywną, multiplikatywną i błąd liniowości. Omówiono sposób pomiaru temperatur tym mostkiem przy użyciu platynowych czujników wzorcowych. Zaproponowano metodę sprawdzania błędu zera mostka polegającą na niekonwencjonalnym dołączaniu do jego wejścia 4-końcówkowych rezystorów wzorcowych. Przy rezystancjach znamionowych w zakresie $0,1 \Omega - 100 \text{ M}\Omega$ uzyskano na wejściu mostka rezystancję zastępczą o wartości mniejszej niż $10^{-10} \Omega$. Jako weryfikację eksperymentalną metody podano wyniki sprawdzenia zera mostka AC własnej konstrukcji. Otrzymano wskazania zbliżone dla każdego z jego zakresów, które nie przekraczały 0,5 LSB i były niezależne od użytej rezystancji standardowej.

Słowa kluczowe: precyzyjny mostek temperaturowy AC, metoda kontroli błędu zera mostka

1. Rys historyczny i parametry precyzyjnych mostków temperaturowych

Podstawą metrologiczną wzorcowych pomiarów temperatury jest skala międzynarodowa ITS-90. Ma ona szereg punktów kontrolnych (reperów). Temperaturę pomiędzy tymi punktami wyznacza się z pomiarów wzorcowymi rezystorowymi czujnikami platynowymi SPRT (ang. *Standard Platinum Resistance Thermometer*), stosując zalecane wzory interpolacyjne z dopuszczalnym błędem $\pm 0,0001 \text{ K}$. Rezystancję takiego czujnika mierzy się wysokoprecyzyjnymi mostkami prądu stałego (DC) lub przemiennego (AC) z odniesioną do zakresu pomiarowego rozszerzoną niepewnością względną

poniżej $(1-3) \cdot 10^{-7}$, tj. o dwa rzędy wyższą niż w pomiarach rezystancji mostkami uniwersalnymi.

Przez wiele dziesięcioleci precyzyjne pomiary rezystancji elektrycznej były wykonywane kompensatorami i mostkami prądu stałego (DC). Pierwszą wzmiankę o możliwości zastosowania transformatora różnicowego do pomiaru rezystancji podał D. Rosenthal dokładnie 130 lat temu [1, 2], ale dopiero w latach 70. XX wieku rolę tę przejęły mostki AC z dzielnikami indukcyjnymi napięcia (lub prądu) o silnym sprzężeniu magnetycznym. Rozwój techniki pomiarów rezystancji opisał Hall [3].

Pierwsze mostki transformatorowe do pomiarów temperatury z czujnikami rezystancyjnymi opracowali Gibbings, Hill i Foord ze swoimi współpracownikami [4-6]. Podstawowym wymaganiem dla mostków termometrycznych, poza zapewnieniem dokładnego stosunku parametrów ramion, jest czterozaciskowe dołączanie rezystancji wzorcowej i mierzonej, w celu zminimalizowania wpływu rezystancji przewodów doprowadzających. Wpływ niemierzonej składowej reaktywnej na czułość układu mostków AC eliminuje się bez straty dokładności przez kompensację lub detekcję fazoczułą.

Znaczne zwiększenie rozdzielczości i dokładności pomiarów uzyskano w mostkach AC z wielostopniowymi dzielnikami indukcyjnymi [7-9]. Wysoka impedancja tych dzielników umożliwiła zachowanie zalet mostków podwójnych DC. Powstały też warunki do automatyzacji równoważenia ich układów pomiarowych.

Układy stosowanych w termometrii mostków transformatorowych opracowano 30-35 lat temu. Były one następnie ciągle doskonalone i wyposażane w najnowszą technikę cyfrową. Podstawowe dane metrologiczne wysokoprecyzyjnych przyrządów do pomiarów rezystancji czujników temperatury podano w tab. 1. Z danych w niej przedstawionych wynika, że obecnie najbardziej zaawansowany technicznie jest automatyczny mostek AC o symbolu F900 firmy ASL [10], ale czas realizacji pomiaru jest dość długi. Takich parametrów jeszcze nie osiągnęły intensywnie ostatnio rozwijane układy do pomiarów impedancji z cyfrowym przetwarzaniem chwilowych wartości napięć szeregowo połączonych rezystora wzorcowego z badaną impedancją, zrealizowanym za pomocą szybkich procesorów DSP.

Tab. 1. Podstawowe parametry metrologiczne kilku precyzyjnych mostków temperaturowych (dane ze stron internetowych)
Tab. 1. Basic metrological data of some precision thermometric bridges (from websites)

Producent	Tinsley GB	Measurement International Canada	ASL Automatic System Laboratories GB	GuildLine Canada	Hart Scientific, Fluke USA +UE
Typ i model mostka	5840E Automatic Precision Resistance Thermometer Bridge	6010T Automatic Precision Direct Current Comparator "DCC"	F-900 AC Bridge	6622T	1595A
Zakres pomiarowy	0-350 Ω	1-10 000 Ω	0-260 Ω $R_v/R_s = 1,2999999$	0,01-1x10 ⁵ Ω	0-400 Ω
Rozdzielczość	1 ppm	0,001 ppm	0,0005 ppm	±0,001 ppm	0,06 ppm
Błąd liniowości	±5 ppm	0,01 ppm w całym zakresie	1 LSB	0,01 ppm	4 ppm
Prąd pomiarowy	(0,1; 0,3; 1,0; 3,0) mA	0,001-150 mA	0,1-50 mA	0,02-150 mA	0,001-20 mA
Częstotliwość pracy układu	AC 75 Hz	DC	AC 25 Hz, 75 Hz (dla zasilania 50 Hz) 30 Hz, 90 Hz (dla zasilania 60 Hz)	DC	
Czas pomiaru	10 s	4-1000 s	20 s	-	
Interfejs	IEEE-488 w pełni programowalny	IEEE-488 w pełni programowalny	IEEE-488 GRIB	IEEE-488 RS-232C	RS-232C

Dokładność pomiaru temperatury wzorcowej istotnie zależy od metod kalibracji precyzyjnych mostków [11, 12]. W tym celu opracowano specjalne układy [13] oraz oferowane są zautomatyzowane kalibratory [14]. Urządzenia te są kosztowne i dość skomplikowane w stosowaniu, a samodzielne ich powielanie jest ograniczone wskutek zastrzeżeń „know-how”. W publikacjach [15, 16] zaprezentowano przyczyny powstawania błędów mostka, dotychczas stosowane i proponowane proste metody i urządzenia do ich kontroli, w tym omawianą tu metodę badania składowej addytywnej błędu mostka, czyli kontroli zera mostka.

2. Zasada działania i błędy mostków AC

Na rys. 1 podano zastępczy schemat układu pomiarowego precyzyjnych mostków AC. Z warunku równowagi tego układu, zachodzącej przy zerowym wskazaniu detektora D, otrzymuje się podstawowe równanie pomiaru:

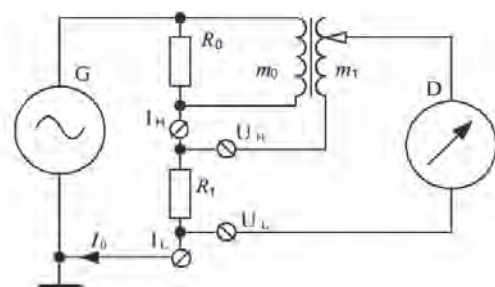
$$R_x = \text{Re} (Z_x = U_D / I_0) \quad (1)$$

Z wyrażenia (1) wynika, że stosunek mierzonej rezystancji R_t termometru platynowego i rezystancji wzorcowej

R_0 mostka jest równa stosunkowi liczb zwojów obu uzwojeń dzielnika T, tj.

$$y_{td} = x \quad (2)$$

gdzie: $x \equiv R_t/R_0$ – stosunek rezystancji, $y_{td} \equiv m_1/m_0$ – stosunek liczb zwojów cewek dzielnika T.



Rys.1. Schemat zastępczy układu pomiarowego mostków prądu przemiennego AC

Fig. 1. Equivalent circuit of the AC measurement bridge

Równanie (2) jest funkcją przetwarzania idealnego mostka i ma postać linii prostej o nachyleniu równym 1. Rzeczywistą charakterystykę opisuje funkcja nieliniowa $y = f(x)$. Wykorzystując wyrazy jej rozwinięcia w szereg, otrzymuje się dla wskazań bieżących

$$y = x(1 + \delta_m)(1 + \delta_l) + \Delta_a \quad (3)$$

gdzie: $\Delta_a = a_0$ – składowa addytywna (błąd zera) i $\delta_m = a_1 - 1$ – składowa multiplikatywna błędów mostka; δ_l – błąd liniowości opisany wyrazami rozwinięcia $y = f(x)$ w szereg jako

$$\delta_l = \frac{1}{a_1} \sum_{i=2}^n a_i x^{i-1}$$

Współczynniki a_i są złożonymi i zwykle nieznanymi funkcjami o składowych deterministycznych i losowych różnych czynników wpływających, takich jak: pola rozproszenia obwodów sygnału, transformatorów sieciowych i pomiarowych we wnętrzu mostka, niedokładna wartość rezystancji wzorcowej R_0 oraz jej bocznikowanie impedancją wejściową transformatora T (rys. 1), nieidealne parametry rdzenia, wpływ impedancji wyjściowej zasilacza i rezystancji obciążenia itp. Dalsze rozważania dotyczą składowych deterministycznych błędów mostka, czyli błędów systematycznych. W mostkach tych błędy przypadkowe są zwykle znacznie od nich mniejsze i nie przekraczają 0,5 najniższej wskazywanej cyfry (1LSB) wyniku pomiaru. Składowe błędów systematycznych pomiarów rezystancji mostkiem mają znaki przeciwne niż Δ_a , δ_m i δ_l dla mostka.

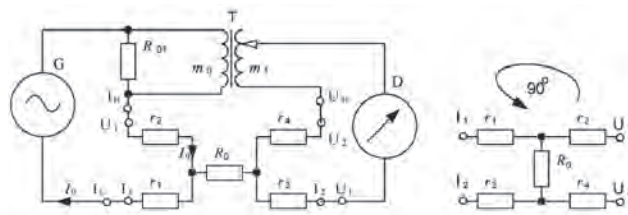
Poniżej zostanie omówiona prosta oryginalna metoda kontroli błędów zera. Natomiast w kolejnej części artykułu zostanie podana metoda badania liniowości mostków temperaturowych. Obie te metody są łatwe w realizacji i powinny zainteresować szeroki krąg metrologów, gdyż mogą okazać się przydatne w bieżącej praktyce laboratoryjnej.

3. Nowa metoda pomiaru błędów zera mostka

W proponowanej metodzie sprawdzenie początku zakresu pomiarowego, czyli zera mostka, uzyskuje się przez dołączenie na jego wejściu rezystora wzorcowego R_0 w sposób niekonwencjonalny [15], podany na rys. 2.

Para ekwipotencjalnych zacisków U_1, I_1 rezystora R_0 jest tu dołączona do zacisków prądowych I_H, I_L , a druga para U_2, I_2 – do zacisków napięciowych U_H, U_L mostka, czyli po obróceniu o 90° względem dołączenia klasycznego (rys. 1). W układzie z rys. 2 prąd roboczy I_0 mostka płynie tylko przez rezystancje doprowadzeń r_2, r_1 , a rezystancja R_0 pełni rolę zwory łączącej obwody prądowy i napięciowy mostka. Przy takim dołączeniu niemal każdy czterozaciskowy rezystor wzorcowy symuluje zerową wartość rezystancji mierzonej. Wskazanie mostka dla pomiaru rezystancji równej zero powinno też wynosić zero, jednakże w rzeczywistym mostku taki idealny stan zwykle nie występuje.

Na rys. 3 przedstawiono schemat układu do wyznaczenia zastępczej rezystancji R_x występującej na zaciskach mostka, gdy rezystor R_0 jest dołączony wg układu z rys. 2. Obok rezystancji R_0 i rezystancji doprowadzeń $r_1 - r_4$ oddziałuje tu też rezystancja wejściowa R_D detektora różnicowego i impedancja Z_L ujmująca wpływ prądu I_2 przez izolację do wspólnej masy.



Rys. 2. Schemat zaproponowanego dołączenia czterozaciskowego rezystora R_0 dla uzyskania wartości rezystancji mierzonej równej zero

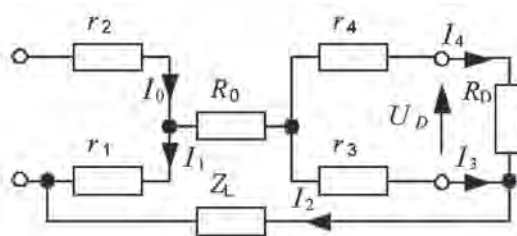
Fig. 2. Connection of the standard resistor R_0 in the case to obtain the equal to zero value of the measured resistance

Mostek temperaturowy AC z definicji mierzy składową rezystancyjną stosunku napięcia na zaciskach napięciowych mostka do prądu płynącego przez jego zaciski prądowe, tj. $R_x = \text{Re} (Z_X = U_D / I_0)$. Wartość wyniku pomiaru R_x , którą powinien wskazać mostek dla układu (rys. 2), można oszacować ze schematu zastępczego (rys. 3). W układzie tym zachodzą następujące zależności

$$I_0 = I_1 + I_2, \quad I_2 = I_3 + I_4, \quad I_3 R_3 = I_4 (R_D + r_4) \quad (4)$$

z których wynika:

$$Z_X = \frac{r_1 r_3}{R_0 + Z_L + r_1 + \frac{r_3(1 + r_4/R_D)}{1 + (r_3 + r_4)/R_D}} \left[1 + \frac{r_3}{R_D + r_4} \right] \quad (5)$$



Rys. 3. Układ do wyznaczenia rezystancji zastępczej dla dołączenia R_0 modelującego wartość rezystancji mierzonej równej zero

Fig. 3. Circuit for calculation the equivalent resistance for connection of R_0 simulated the measured resistance equal to zero

Wzór (5) upraszcza się przy założeniu, że wszystkie rezystancje doprowadzeń r_i są takie same i równe r . Zamiast nieznannej impedancji wpływu izolacji Z_L można użyć parametru, który zwykle występuje w specyfikacji technicznej urządzeń

elektrycznych, tj. rezystancji izolacji R_i . Ze względu na bezpieczeństwo obsługi moduł impedancji upływu izolacji Z_L nie powinien być mniejszy od jej dopuszczalnej rezystancji, tj. $|Z_L| \geq R_p$, zaś natomiast rezystancja R_i nie może być mniejsza niż $100 \text{ M}\Omega$. Jeśli $r/R_D \leq 10^{-5}$, to

$$R_X \leq \frac{r^2}{R_0 + R_i + 2r} \quad (6)$$

Po uwzględnieniu wartości rezystancji występujących w rzeczywistych urządzeniach pomiarowych, z wyrażenia (9) wynika, że dla czterokońcówkowej rezystancji o wartości nominalnej $R_0 < R_x$, zastępcza rezystancja R_X nie przekracza $10^{-10} \Omega$.

4. Doświadczalna weryfikacja proponowanej metody kontroli zera mostka AC

Przydatność przedstawionej metody kontroli zera sprawdzono eksperymentalnie w badaniach dokładności kilku egzemplarzy mostków precyzyjnych. Mierzono składową addytywną błąd mostków na różnych zakresach, czyli ich zero. Obiektem badań były mostki termometryczne CA 300 produkowane jednostkowo w firmie „Specavtomatika” Kijów do 2006 r. Zostały one opracowane pod kierunkiem A. Mikhała i miały różne częstotliwości robocze układu pomiarowego. Mostki CA 300 działają do dziś w laboratoriach metrologicznych Ukrainy, Rosji i innych krajów powstałych po rozpadzie byłego ZSRR.



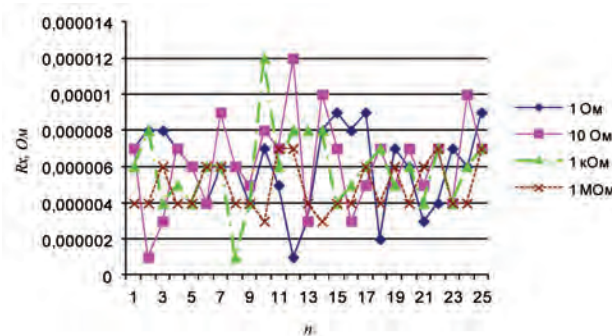
Rys. 4. Automatyczny mostek AC typu CA 300

Fig. 4. Automatic bridge AC type CA 300

Jeden z mostków CA 300 przedstawiono na rys. 4. Przyrząd ten ma zakres pomiarowy $0-125 \Omega$ z LSB $10^{-5} \Omega$ i szerokość pasma szumu dla pojedynczego pomiaru 1 Hz . Inne parametry metrologiczne tego przyrządu były podobne jak w przypadku wcześniejszej wersji precyzyjnego mostka AC firmy ASL o symbolu F18. Dołączano do niego rezystory wzorcowe o wartościach nominalnych od $0,1 \Omega$ do $1 \text{ M}\Omega$ w sposób przedstawiony na rys. 2. Pomiary przeprowadzano z włączoną w mostku funkcją automatycznego uśredniania kolejnych wskazań. Próbkę o minimum 10 pomiarach odpowiadało pasmo szumu o szerokości $0,1 \text{ Hz}$.

Wyniki otrzymane dla kilku rezystorów wzorcowych o różnych wartościach nominalnych podano na rys. 5 [15].

Każdą serię, o około 25 obserwacjach pomiarowych, charakteryzowała prawie taka sama wartość średnia, równa $5,5 \mu\Omega$. Wartość ta odpowiada połowie jednostki dla dekadę o najmniejszej wskazywanej wartości rezystancji (LSB) i jest składową addytywną błęd systematycznego. Wyznaczone wartości są niezależne od wartości rezystancji wzorcowej R_0 w szerokim zakresie od $0,1 \Omega$ do $1 \text{ M}\Omega$.



Rys. 5. Wskazania mostka uzyskane dla czterozaciskowych rezystorów o różnej wartości nominalnej, dołączonych w układzie modelującym rezystancję równą zero

Fig. 5. Experimental results obtained for bridge with different nominal value of four-terminal resistors connected by the mode modeling the resistance equal to zero

Tak więc uzyskano eksperymentalnie potwierdzenie, że po niekonwencjonalnym dołączeniu czterokońcówkowej rezystancji R_0 do mostka, na jego wyświetlaczu pojawi się wskazanie odpowiadające rezystancji mierzonej równej zero. W tak łatwy, szybki i skuteczny sposób można zidentyfikować jeden z głównych parametrów metrologicznych precyzyjnych mostków termometrycznych – składową addytywną błąd systematycznego mostka.

5. Podsumowanie

Wykazano analitycznie i sprawdzono eksperymentalnie, że za pomocą dowolnego czterozaciskowego rezystora wzorcowego o wartości poniżej $100 \text{ M}\Omega$, dołączonego do mostka w sposób niekonwencjonalny, tj. według rys. 2, uzyskuje się rezystancję zastępczą o wartości poniżej $10^{-10} \Omega$. Metoda ta może służyć do sprawdzania zera mostka.

Przedstawioną oryginalną, a przy tym prostą metodę pomiaru składowej addytywnej błęd mostka można z powodzeniem stosować do kontroli jego zera, w każdym laboratorium metrologicznym dysponującym czterozaciskowymi rezystorami wzorcowymi.

W części 2 zostanie zaproponowany sposób wyznaczania nieliniowości całkowitej precyzyjnych mostków AC, nazwana metodą dychotomii. Przeanalizowane zostaną błędy podwójnych rezystorów wzorcowych stosowanych podczas realizacji tej metody oraz przedstawione zostaną uzyskane wyniki sprawdzenia liniowości jednego z precyzyjnych mostków AC własnej konstrukcji.

Bibliografia

1. Rosenthal D., *Elektrotechnische Zeitschrift*, 4, 1883.
2. German Patent No 147359, – 21e, opublikowany –11.01.1904, zgłoszony – 25.02.1903.
3. [www.ietlabs.com/pdf/GenRad_History/A_History_of_Z_Measurement.pdf] Hall H. P., *A history of impedance measurements*.
4. Gibbings D.L.H., *An alternating current analogue of the Kelvin double bridge*, „Proc. IEE”, Vol. 109C, 1962, 307–316.
5. Hill J.J., Miller A.P., *An AC double bridge with inductively coupled ratio arms for precision platinum-resistance thermometry*, „Proc. IEE”, Vol. 110, No 2, 1963, 453–458.
6. Foord T.R., Langlands R.C., Binnie A.J., *Transformer-ratio bridge network with precise lead compensation*, „Proc. IEE”, Vol. 110, No 9, 1963, 1693–1700.
7. Brooks H.B., Holtz F.C., *The two-stage current transformer*, „Transaction of AIEE”, Vol. 41, June, 1922
8. Cutkosky R.D., *An automatic resistance thermometer bridge*, „IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement”, Vol. 29, No 4, 1980, 330–333.
9. Knight R.B., *Precision bridge for resistance thermometry using a single inductive current divider*, Euromas-77; Europe conference on precise electrical measurement, London, 1977, 132–134.
10. [www.aslltd.co.uk] – F900 Primary Thermometry Bridge.
11. Avramov S., Oldham N., Gammon R.,: *Inductive voltage divider calibration for a NASA flight experiment*, NCSL Workshop & Symposium, Session 3C, 1993, 225–232.
12. White D.R. at all, *Uncertainties in the realization of the SPRT subranges of the ITS-90, CCT-WG3 on Uncertainties in Contact Thermometry*. CCT/08-19/rev.
13. White D.R., Jones K., Williams J.M., Ramsey I.E., *A simple resistance network for calibrating resistance bridges*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 46, No 5, 1997, 1068–1074.
14. Walker R., *Automatic linearity calibration in a resistance thermometry bridge*, TEMPMEKO & ISHM 2010 Book of Abstracts.
15. Mikhal A.A., Warsza Z.L., *Metody wykrywania składowej addytywnej błęd w precyzyjnych mostkach termometrycznych*, „Pomiary Automatyka Kontrola”, Vol. 58, Nr 12, 2012, 1033–1036.
16. Mikhal A.A., Warsza Z.L., *Niekonwencjonalna metoda wyznaczania nieliniowości całkowitej precyzyjnych mostków termometrycznych*, „Pomiary Automatyka Kontrola”, Vol. 59, Nr 1, 2013, 19–22. ■

Simple methods to control of the accuracy of precision thermometric bridges (1)

Historical review, parameters and circuit operation of AC bridges, new method of its zero control

Abstract: In this two part paper referred are two new methods for controlling the accuracy of high precision bridges used in

measurements of standard temperatures. In part 1, after short historical review given are parameters of such bridges and operation of the AC bridge scheme with adjustable transformer voltage dividers based on the strongly magnetic coupling coils is described. Model of the error of temperature measurements by standard resistive Pt sensors (SPRT) connected to these bridges is presented. The additive, multiplicative and linearity components of error are considered. A new method developed for determining the zero of the bridge error is described. It is based on the non standard connection mode of the equipotential pairs of current and voltage terminals of standard resistance to the bridge. It is estimated that up to 100 M Ω of this resistance the effective resistance obtained on the bridge input is less than 10⁻¹⁰ Ω . Four-terminal standard resistors of 0.1 Ω up to 1 M Ω , in experiments are used and bridge zero readings for such input resistance are found. Results indicate that the additive error of the tested homemade precision bridge CA 300 is about 0.5 LSB of any bridge range and is independent from the nominal value of the used standard resistance.

Keywords: precision AC thermometric bridge, additive error, modeling of zero resistance

Artykuł recenzowany, nadesłany 04.04.2013, przyjęty do druku 19.07.2013.

doc. dr inż. Zygmunt Lech Warsza

Ukończył specjalność Miernictwo Elektryczne na wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej w 1959 r., doktor od 1967 r., docent od 1970 r. Praca: Instytut Elektrotechniki 1958–63 i 1994–95. Politechnika Warszawska 1960–1970, Politechnika Świętokrzyska 1970–1978 (dziekan – organizator Wydziału Transportu), zorganizował też i kierował Ośrodkiem Aparatury Pomiarowej IMGW 1978–82 oraz Zakładem Automatyki i Pomiarów Instytutu Chemii Przemysłowej 1983–1992. Doradca Ministra Edukacji Narodowej 1992–1994, Politechnika Radomska 1983–2002, obecnie – Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP. Autor lub współautor ok. 160 publikacji, 4 monografii, kilkudziesięciu prac konstrukcyjnych i badawczych, 11 patentów oraz promotor 2 doktorów.

e-mail: zlw@op.pl

doc. dr inż. Aleksander A. Mikhal

W 1981 r. Ukończył Politechnikę Kijowską w dziedzinie radiotechniki. Stopień kandydata nauki uzyskał w 1991 r. W 2000 r. Został powołany na stanowisko docenta. Obecnie kieruje Zakładem Pomiarów Elektrycznych i Magnetycznych w Instytucie Elektrodynamiki Ukraińskiej Akademii Nauk w Kijowie. Główne osiągnięcia: opracował i wdrożył wysoko precyzyjny mostek AC do pomiarów temperatury z niepewnością 0,00001 °C i stanowisko wzorca Ukrainy dla elektrolitycznej przewodności cieczy. Autor ponad 90 publikacji oraz 22 patentów.

e-mail: a_mikhal@ukr.net