

Aleksander A. MIKHAL¹, Dmitro V. MELESHCHUK¹, Zygmunt L. WARSZA²

¹INSTYTUT ELEKTRODYNAMIKI, NARODOWA AKADEMIA NAUK UKRAINY (NANU), Prospekt Peremohy 56, 03-680 Kiev - 57

²PRZEMYSŁOWY INSTYTUT AUTOMATYKI I POMIARÓW, Al. Jerozolimskie 202, 02-486 Warszawa

Zastosowanie podwójnego ekranowania w termometrycznych mostkach AC

Doc dr inż. Aleksandr A. MIKHAL

W 1981 r. ukończył Politechnikę Kijowską jako inżynier radiotechniki, doktorat (pracę na kandydata nauki) obronił w 1991 r. Pracuje w Instytucie Elektrodynamiki Ukrainkiej Akademii Nauk w Kijowie. W 2000 r. został powołany na stanowisko badawcze równoważne docenturze. Główne osiągnięcia: opracował i wdrożył zestaw aparatury państwowego wzorca elektrolitycznej przewodności cieczy Ukrainy. Autor ponad 90 publikacji naukowych oraz 19 patentów byłego ZSRR i 3 ukraińskich.

e-mail: a_mikhal@ukr.net



Doc. dr inż. Zygmunt Lech WARSZA

Studia 1959, doktorat 1967 i praca 1960-70 na Wydz. Elektrycznym Politechniki Warszawskiej oraz w Instytucie Elektrotechniki 1958-63. Docent od 1970. Zorganizował i prowadził: Wydział Transportu Pol. Świętokrzyskiej 1970-76, Ośrodek Aparatury Pomiarowej IMGW 1978-81, Zakład Techniki Pomiarowej Instytutu Chemii Przemysłowej 1983-91. Obecnie: główny specjalista w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów PIAP Warszawa. Autor około 160 publikacji, 4 monografii, kilku-dziesięciu prac badawczych.

e-mail: zlw@op.pl



Dr inż. Dymitrij V. MELESHCHUK

Ukończył w 1998 r. wydz. Elektryczny Politechniki Kijowskiej i podjął pracę w Instytucie Elektrodynamiki Akademii Nauk Ukrainy. W 2005 r. uzyskał stopień kandydata nauk technicznych. Pracuje w dziedzinie rozwoju pomiarów wielkości elektrycznych i termometrii o dużej dokładności. Uczestniczył też w opracowaniu wtórnego wzorca - transferu przetwarzania wartości wzorcowej prądu zmiennego w zakresie 1-10000 A.

e-mail: mdim@meta.ua



Streszczenie

Omówiono schemat zastępczy standardowego termometru platynowego SPRT przy prądzie przemiennym i błędy automatycznie równoważonych mostków termometrycznych AC o bardzo dużej dokładności pochodzące od pasożytniczych pojemności i indukcyjności w obwodzie czujnika. Z analizy wynika, że po zastosowaniu bifilarnych połączeń przewodami koncentrycznymi o dwu ekranach i ochrony ekwipotencjalnej układ ma wysoką odporność na zakłócenia i około 100-krotnie mniejszy wpływ pojemnościowego prądu upływu. Rozwiązanie to zastosowano w kilku termometrycznych mostkach AC o najwyższej dokładności (10^{-7} - 10^{-8}) i eksperymentalnie zweryfikowano jego skuteczność.

Słowa kluczowe: mostek termometryczny, schemat zastępczy czujnika SPRT przy prądzie AC, podwójne ekranowanie.

Application of double-shielded technique in thermometric AC bridges

Abstract

The question of providing protection to measuring circuit thermometers AC bridges against electromagnetic disturbances is discussed. It is to reduce the mutual influences circuits and reduce leakage currents. A new, automatically balanced circuit of the thermometric very high precision AC bridge is discussed. Bifilar connections by two-axial concentric cables with two screens and equipotential protection are used. The detail analysis of this circuit resulted in its high immunity to interferences and more than 100 times less impact of the capacitive leakage current. The efficiency of solutions are experimentally verified at a few AC bridges of very high accuracy (10^{-7} - 10^{-8}).

Keywords: thermometric bridge, equivalent AC circuit of SPRT sensor, double shielding technique.

1. Wprowadzenie

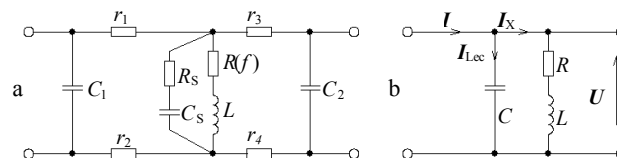
W najbardziej dokładnych pomiarach temperatur T jako czujniki stosuje się wzorcowe platynowe termometry rezystancyjne o angielskim akronimie SPRT. Ich rezystancję mierzy się specjalnymi termometrycznymi mostkami AC z błędem względnym

rzędu 10^{-7} - 10^{-8} . Podstawy działania i parametry metrologiczne takich mostków oraz ich sprawdzanie omówiono w [1, 2, 3].

Pomiary takim przyrządem powinny być odporne na zakłócenia i niezależne od sygnałów pasożytniczych oraz od prądów upływu przez izolację. Niepożądane sprzężenia indukcyjne w obwodach mostka AC eliminuje się przez bifilarne ułożenie wszystkich przewodów prądowych łączących węzły układu pomiarowego. Wówczas pole magnetyczne od przepływu prądu w obu kierunkach kompensuje się. Wzrasta natomiast pojemność pomiędzy tymi przewodami, przez którą mogą płynąć prądy upływu. Wpływ sprzężeń obwodów poprzez te prądy można eliminować wyrównując potencjały między nimi, czyli poprzez ochronę ekwipotencjalną. W monografii [2, 3] omówiono teorię mostków AC o obwodach ze specjalnymi przewodami koncentrycznymi (ang. *coaxial bridges*), w tym zasadę realizacji ochrony ekwipotencjalnej z przewodem koncentrycznym o trzech odizolowanych warstwach przewodzących (przewód środkowy i dwa ekrany). Ekran wewnętrzny dołącza się do dodatkowego źródła napięcia ustalającego jego potencjał. W [3] nie sprecyzowano jednak ani sposobu tworzenia napięcia ochronnego, ani szczegółów działania układu. Przykład realizacji takiej ochrony ekwipotencjalnej podano poniżej.

2. Schemat zastępczy termometru SPRT przy prądzie przemiennym (AC)

Rysunek 1a przedstawia schemat zastępczy czujnika SPRT przy prądzie przemiennym dla cztero-końcówkowego podłączenia do układu pomiarowego, a rysunek 1b - schemat uproszczony.



Rys. 1. Schematy zastępcze współpracy termometru z układem mostka AC (a - układ pełny, b - uproszczony): $R(f)$ i L - rezystancja i indukcyjność elementu termoczułego; R_s i C_s - rezystancja i pojemność upływu przez kwarcowe elementy karkasu (*lumped shunt resistance*); r_1, r_2, r_3, r_4 - rezystancje wyprowadzeń czujnika SPRT i jego kabla; C_1, C_2 - pojemności podłączeń i uzwojeń transformatora, odpowiednio dla strony zacisków prądowych i napięciowych czujnika; $C = C_1 + C_2$ - zastępcza sumaryczna pojemność pasożytnicza od strony zacisków prądowych i napięciowych

Fig. 1. Equivalent AC circuits of thermometer and its connections to the bridge (a - full circuit, b - simplified circuit)

Wszystkie parametry układu z rys. 1a mogą wpływać na wynik pomiaru. Rezystancja czujnika zależy od częstotliwości, tj. $R(f)$, wskutek skończonej głębokości penetracji pola elektromagnetycznego i zmniejszania się zastępczej, tzw. efektywnej powierzchni przekroju poprzecznego drutu platynowego. Na przykład w zakresie temperatur kriogenicznych (13-24 K) już przy częstotliwości 75 Hz błąd może przekraczać 0,1 mK [4]. Natomiast przy wysokich temperaturach zmniejsza się rezystywność elementów konstrukcyjnych czujnika i następuje bocznikowanie jego rezystancji. Przeprowadzono analizę wpływu parametrów R_S i C_S na błąd pomiaru rezystancji czujnika SPRT. Dla rezystancji znamionowych SPRT 0,6 Ω , 10 Ω i 25 Ω z obliczeń wynika, że największy błąd, tj. ponad 0,1 ppm, wystąpi dla termometru 25 Ω [7]. Wyniki badań eksperymentalnych parametrów czujnika podano w [5, 6].

Z analizy układu na rysunku 1a wynika, że po dołączeniu pojemności C_2 bezpośrednio do $Z_X=R+j\omega L$ popełnia się zespolony błąd proporcjonalny do $(r_3+r_4)/(1/j\omega C_2+r_3+r_4) \approx j\omega C_2(r_3+r_4)$. Natomiast nieuwzględnienie rezystancji doprowadzeń r_1 , r_2 spowoduje podobny błąd zależny od $j\omega C_1(r_1+r_2)$. Są to błędy drugiego rzędu wielkości (błąd od błędu wskutek upływu) o tak małych wartościach (0,1-0,01 ppm), że są pomijalne. Wystarczy więc wyznaczyć wpływ samej pasożytniczej pojemności C na wynik pomiaru. Rysunek 1b przedstawia uproszczony schemat zastępczy o trzech elementach. Po przekształceniach otrzymuje się

$$Z_X = \frac{R}{(1-\omega^2 LC)^2 + \omega^2 R^2 C^2} + j\omega \frac{L - R^2 C - \omega^2 L^2 C}{(1-\omega^2 LC)^2 + \omega^2 R^2 C^2} = \quad (1)$$

$$= R(1+\delta_{Re}) + j\omega L(1-\delta_{Im})$$

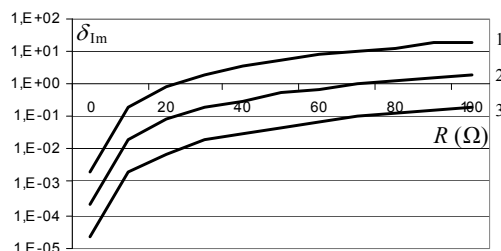
Parametrem informacyjnym temperatury jest rezystancja R czujnika, a mostki termometryczne AC mierzą rzeczywistą składową $Re(Z)$ impedancji Z . Wskutek tego powstają błędy systematyczne metody

$$\delta_{Re} = \frac{\omega^2(2LC - \omega^2 L^2 C^2 - R^2 C^2)}{(1-\omega^2 LC)^2 + \omega^2 R^2 C^2} \quad (2a)$$

$$\delta_{Im} = \frac{R^2 C/L - \omega^2 C(L - \omega^2 L^2 C - R^2 C)}{(1-\omega^2 LC)^2 + \omega^2 R^2 C^2} \quad (2b)$$

gdzie: δ_{Re} , δ_{Im} – błędy względne pomiaru rezystancji R i reaktancji ωL czujnika SPRT.

Obliczono, że błąd δ_{Re} jest pomijany w całym zakresie zmian rezystancji $R(T)$. Na przykład dla $C = 1000$ pF, $L = 0,5$ μ H, $R = 100$ Ω i $f = 100$ Hz wynosi on zaledwie 10^{-9} [8]. We wzorach (1) i (2a,b) uwzględniono $Im(Z)$ i δ_{Im} . Analizę tych parametrów wykorzystuje się do opracowania kompensacji kwadraturowej składowej napięcia mostka.



Rys. 2. Zależność błędu $\delta_{Im} \approx f(R)$ składowej reaktywnej ωL impedancji czujnika SPRT: krzywe 1, 2 i 3 odpowiednio dla pojemności C : 1000 pF, 100 pF i 10 pF
Fig. 2. Dependence of the $\delta_{Im} \approx f(R)$ of the reactive component ωL of the impedance of sensor SPRT: functions 1, 2 and 3 for capacitance C : 1000 pF, 100 pF and 10 pF respectively

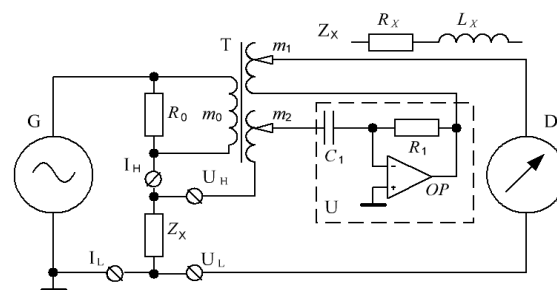
Rysunek 2 przedstawia zależność błędów δ_{Im} od rezystancji R czujnika dla $L = 0,5$ μ H, $f = 100$ Hz i trzech zastępczych pojemności C : 1000 pF, 100 pF, 10 pF.

Ze wzoru (2b) i rysunku 2 wynika, że wartość błędu δ_{Im} może być znaczna. Gdy δ_{Im} przekroczy 1, to według (1) zmieni się znak składowej reaktancyjnej impedancji Z . Jej schemat zastępczy, zamiast dwójnika szeregowego R i L , można wtedy przedstawić jako równoległe połączenie R i C . Wymaga to zmian strukturalnych w układzie kompensacji składowej kwadraturowej w mostku.

Niedostateczna korekcja reaktancji w torze składowej kwadraturowej $Im(Z)$ mostka prowadzi do błędów pomiaru rezystancji R czujnika SPRT w jego kanale $Re(Z)$. Przy określonej wartości pojemności C oddziaływanie prądu upływu można zmniejszyć jedynie na drodze układowej. Błędy (3) są spowodowane występowaniem pojemności i płynącego przez nią prądu. Rysunki 3a,b wyjaśniają działanie ochronnego elektrostatycznego ekranowania.

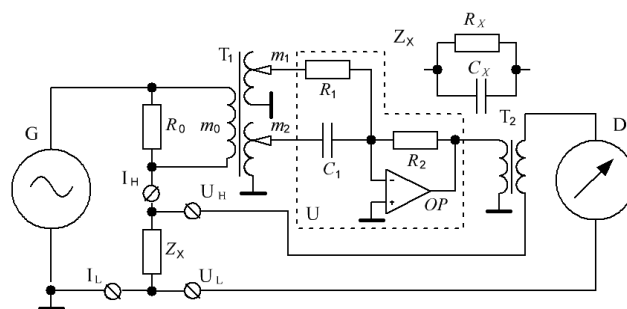
3. Istota i metoda rozwiązania zagadnienia

Ze wzoru (2) i przebiegu krzywych z rys 2 wynika, że istotna jest nie tyle duża wartość błędu względnego δ_{Im} , a to, że może on osiągnąć nawet wartość równą 1. Odpowiada temu zmiana znaku składowej reaktywnej impedancji Z_X i inny schemat zastępczy mierzonej impedancji czujnika. Zamiast dwójnika szeregowego RL trzeba zastosować układ równoległy RC. Pociąga to za sobą konieczność zmiany struktury układu pomiarowego mostka AC z przedstawionej schematycznie na rys 3a na podaną na rys 3b.



Rys. 3a. Układ pomiarowy mostka dla szeregowego indukcyjnościowego schematu zastępczego RL czujnika SPRT

Fig. 3a. Bridge measuring circuit for the serial inductive equivalent circuit SPRT



Rys. 3b. Układ pomiarowy mostka dla równoległego pojemnościowego schematu zastępczego RC czujnika SPRT

Fig. 3b. Bridge measuring circuit for parallel capacitive equivalent circuit SPRT

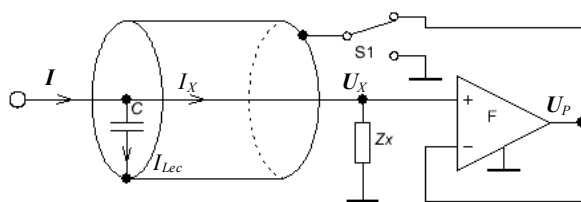
Oba układy pomiarowe są podobne tylko na pierwszy rzut oka. W rzeczywistości układ z rys 3b ma dodatkowe cechy:

- uzwojenie m_1 jest obciążone rezystancją R_1 . Trzeba spełnić warunki, by pracowało bezprądowo.

- przetwornik pomiarowy U spełnia więc dwie funkcje. Układ ten przesuwa fazę o 90° (tak, jak układ z rys 3a) oraz sumuje rzeczywistą i urojoną składowe sygnału niezrównoważenia. Metody precyzyjnej kalibracji kwadraturowego przesuwnika fazy są znane, a brakuje ich w literaturze dla przetwornika U z rys 3b;
- współczynnik przetwarzania głównego toru pomiarowego obejmuje stosunek rezystancji R_2/R_1 , który powinien być tak samo dokładny jak dzielnik T_1 ;
- w celu uzyskania równości porównywanych napięć i skutecznego zmniejszenia wpływu rezystancji doprowadzających przewodów zastosowano dodatkowy transformator T_2 . Błąd jego współczynnika transformacji wpływa jednak na wynik pomiaru.

Uzyskanie takich właściwości w mostkach o klasie dokładności 0,1–0,01 ppm okazało się trudnym do wykonania zadaniem technicznym. Dlatego też szybkie ręczne, lub automatyczne przełączanie układów z rys 3a i 3b jest w praktyce niemożliwe. Aby uniknąć tej trudności należy niedopuszczać do przejścia schematu zastępczego czujnika SPRT ze struktury szeregowej RL na równoległą RC. Zakłócającym parametrem jest pojemność upływu. Nie zmniejsza się jej wartości, ale można zredukować jej wpływ. Błędy (2a, b) powstają wskutek wpływów pojemności i przepływającego przez nią prądu.

Rysunek 4 wyjaśnia ochronne działanie ekranowania.



Rys. 4. Schemat ekwipotencjalnego ekranowania ochronnego
Fig. 4. Scheme of the equipotential protection

Przewód łączący z obiektem pomiaru Z_X znajduje się wewnątrz cylindrycznego ekranu, zwykle połączony z głównym (common) przewodem układu (zwanego też w Polsce masą). Przy zastosowaniu ochronnego ekranowania ekran łączy się z wyjściem wtórnika napięcia (F). Rozpatrzmy oba warianty dołączenia ekranu. Prądy ucieczki I_{Lec} przez pojemność upływu C opisuje się odpowiednimi wyrażeniami

$$I_{Lec1} = U_X j\omega C \quad (3a)$$

$$I_{Lec2} = (U_X - U_P) j\omega C = U_X j\omega C_E \quad (3b)$$

gdzie: C_E – wirtualna pojemność zastępcza.

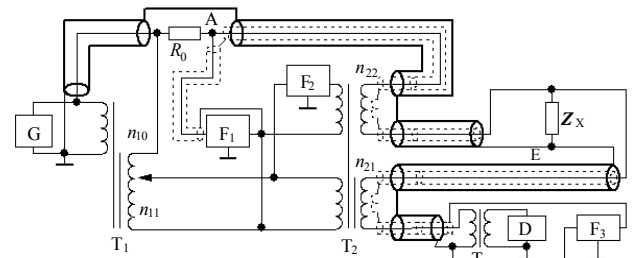
Z (3b) wynika, że błąd pomiaru impedancji Z_X przy ekranowaniu zmniejszy się w stosunku $I_{Lec1}/I_{Lec2} = U_X/(U_X - U_P)$, gdyż tyle razy zastępcza pojemność C_E będzie mniejsza od pojemności C . W rzeczywistym przyrządzie istotne jest, by zastępcza pojemność C_E nie spowodowała błędów δ_{im} według (2a), większego od 1. Wówczas nie nastąpi konieczność zmiany układu zastępczego czujnika SPRT z szeregowego RL na równoległy RC.

Z analizy układu pomiarowego wynika, że teoretycznie istnieje możliwość sterowania pojemnością zastępczą poprzez zmianę potencjału na ekranie ochronnym. W taki sposób, można by doprowadzić do zera bierną składową sygnału nierównowagi mostka. Dzięki temu rozwiązaniu zmniejszą się wymagania dla synchronicznych detektorów kwadraturowych i układów kompensacji składowej biernej. Jednakże, ze względu na ryzyko zaistnienia zmiany schematu zastępczego w obwodzie czujnika SPRT z szeregowego RL na równoległy RC, co spowodowało by konieczność skomplikowania układu mostka, zrezygnowano z doświadczalnej weryfikacji tych właściwości układu.

4. Działanie układu pomiarowego mostka AC

Rysunek 5 przedstawia schemat układu pomiarowego mostka termometrycznego [8]. Układ ten zawiera następujące elementy: G - generator napięcia o roboczej częstotliwości; T_1 - dwustopniowy transformator napięcia z silnym sprzężeniem indukcyjnym (dzielnik napięcia); T_2 , T_3 - transformator pośredni dwustopniowy i dopasowujący; F_1 , F_2 , F_3 - wtórniki napięcia; D - detektor równowagi układu mostka; R_0 - rezystancja wzorcowa; $Z_X = R + j\omega L$ - impedancja czujnika SPRT.

W budowie mostka zastosowano bifilarność i dzięki stosowaniu ekwipotencjalnego ekranowania ochronnego zmniejszono znacznie wpływ pojemności upływu C . W tym celu czujnik i uzwojenie wtórne transformatora T_2 podłączone są przewodem koncentrycznym z podwójnym ekranem. Ekran wewnętrzny służy do ekwipotencjalnej ochrony przewodu centralnego, a prąd I powraca ekranem zewnętrznym.



Rys. 5. Schemat układu pomiarowego mostka termometrycznego
Fig. 5. Diagram of the measuring circuit of thermometric bridge

Na rysunku 4 wewnętrzne ekrany narysowano linią przerywaną, a zewnętrzne - linią ciągłą. Uzwojenia wtórne transformatora T_2 wykonano przewodem koncentrycznym. Ich ekrany są połączone z wewnętrznymi ekranami przewodów doprowadzających. W obwodzie napięciowym przewód centralny (o wysokim potencjale) ma ekran ochronny. Zasila się go z wtórnika F_3 . Gdy prąd w tym obwodzie nie płynie, to potencjały wewnętrznego ekranu i wyprowadzenia czujnika o niskim potencjale (punkt E) są jednakowe. Uzwojenie wtórne transformatora n_{21} zostało wykonane przewodem koncentrycznym. Napięcie transformowane do centralnego przewodu uzwojenia jest też doprowadzone do wewnętrznego ekranu ochronnego. Ich potencjały będą jednakowe w równowadze mostka. Wówczas przez pojemności pasytywne przewodu centralnego (*high-grade*) do ekranu ochronnego nie popłynie prąd upływu.

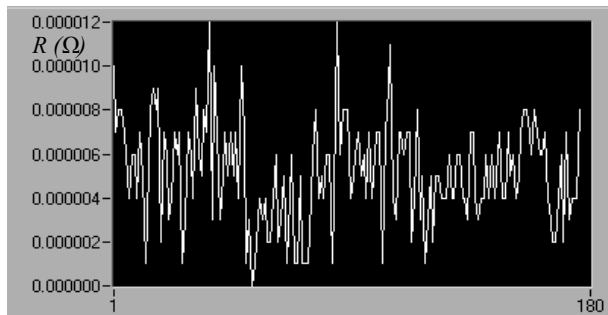
Przewód centralny (o wysokim potencjale) w obwodzie prądowym jest także ekranowany. Zasila się go napięciem z wtórnika F_1 , równym napięciu na niskopotencjałowym zacisku rezystancji wzorcowej (punkt A na rys. 3). Przy przepływie prądu roboczego, na rezystancjach pasywnych pojawi się napięcie. Dlatego też, trudno jest uzyskać pełną ochronę ekwipotencjalną. Wartość prądu upływu I_{Lec} zależy od pojemności zastępczej i od napięcia pomiędzy przewodem centralnym i przewodem go otaczającym (rys. 4). Napięcie w punkcie A będzie znacznie mniejsze przy istnieniu uzwojenia n_{22} . Przy zastosowaniu omawianej tu ochrony ekwipotencjalnej, prąd upływu zmniejsza się w przybliżeniu $K \approx R_X/2r$ razy. Odpowiednio, też K razy, zmniejsza się błąd składowej biernej impedancji Z_X . Według (1) zmniejsza się też pojemność zastępcza. Dla czujnika SPRT o rezystancji nominalnej 100 Ω pojemność zastępczą (i prąd upływu) zredukowano 100 -1000 razy, zależnie od długości i rodzaju kabla.

Należy tu zauważyć, że posobne połączenie dwu transformatorów T_1 i T_2 w układzie z rysunku 5 może być powodem nieliniowości mostka. Przyczyny powstania i oryginalną metodę kontroli tej składowej błędów całkowitego mostka termometrycznego rozpatrzono w publikacjach [9 -11].

5. Wyniki badań kontrolnych układu

Omówione metody przeciwdziałania zjawiskom zakłócającym zastosowano w cyfrowym automatycznym mostku termometrycznym SA 300. Badania kontrolne tego przyrządu potwierdziły ich skuteczność. Obiektem pomiaru był układ realizujący wartość rezystancji równej zero przez niekonwencjonalnie dołączenie rezystora wzorcowego. Zakres pomiarowy mostka wynosił 0–125 Ω , rozdzielczość (LSB) 10 $\mu\Omega$ a pasmo szumów 0,1 Hz.

Na rysunku 6 przedstawiono wykres wyników pomiaru składowej addytywnej błędności mostka przed wprowadzeniem korekcji.



Rys. 6. Wyniki pomiaru mostkiem CA300 rezystancji równej zero przy próbkowaniu $n=180$ razy

Fig. 6. The results of measuring bridge SA300 zero resistance for sampling $n=180$

Początkowe wskazanie rezystancji (błąd addytywny) wynosiło 0,5 LSB, a rozrzut wskazań: 1,2 LSB. Dla szumu o rozkładzie normalnym, odchylenie standardowe wskazań jest 6 razy mniejsze (0,2 LSB). W wartościach względnych wynosi ono 0,016 ppm.

W rzeczywistości (głównie ze względu na zakłócenia z sieci) wskazanie mostka RMS było 2-3 razy większe.

Analizę dotychczasowych i propozycje nowych metod kontroli składowej addytywnej błędności mostka opisano w [12].

6. Wnioski

W powyżej rozpatrywanym mostku termometrycznym, dzięki zastosowaniu odpowiedniej struktury układu pomiarowego zmniejszono znacznie wpływ pól elektrycznych i magnetycznych. Zrealizowany w praktyce układ łączy w sobie zalety koncentrycznych zrównoważonych układów mostkowych i ochronnego ekwipotencjalnego ekranowania. Skuteczność zaproponowanych rozwiązań potwierdzono w badaniach doświadczalnych.

Z omówionych cech konstrukcyjnych przedstawionego powyżej układu mostka można wyciągnąć kilka wniosków.

1. Centralny, tj wewnętrzny przewód kabla łączącego rezystancję wzorcową R_0 z uzwojeniem n_{22} transformatora T_2 , centralny tj. ekranowany przewód uzwojenia n_{22} oraz centralny przewód linii łączącej to uzwojenie z impedancją mierzoną Z_X tworzą drogę przepływu prądu w jednym kierunku. Prąd ten powraca poprzez ekrany zewnętrzne kabli między obiektem pomiaru Z_X , uzwojeniem n_{22} i rezystancją wzorcową. Rozwiązanie konstrukcyjne mostka AC o takiej realizacji przepływu prądu w obu kierunkach nazwano w literaturze angielskiej [2, 3] mostkiem koncentrycznym (*coaxial bridge*).

2. Wewnętrzny ekran linii łączącej rezystancję wzorcową R_0 z uzwojeniem wtórnym n_{22} transformatora T_2 , ekran uzwojenia n_{22} i wewnętrzny ekran linii pomiędzy uzwojeniem n_{22} i obiektem pomiarowym Z_X tworzą obwód ochronnego ekranowania.

Stosuje się go, aby zmniejszyć wpływ pojemnościowych prądów upływu. Na rysunku 5 można zauważyć, że obwód ochronny znajduje się pomiędzy drogami przepływu prądu w obu kierunkach. Jest to oryginalna konfiguracja układu pomiarowego mostków AC. Przez analogię do angielskiego terminu "*tri-coaxial cable*" dla kabla koncentrycznego o dwu ekranach [3], taki układ pomiarowy można by nazywać w skrócie "mostkiem trój-współosiowym" (*tri-coaxial bridge*).

3. Dzięki rozwiązaniu ekranowania wewnętrznego uzyskano istotną poprawę parametrów metrologicznych mostków termometrycznych stosowanych w pomiarach temperatur o dużej precyzji, pomiędzy realizowanymi fizycznie temperaturami wzorcowymi.

7. Literatura

- [1] Quinn T. J.: Temperature. Academic Press Inc. London. 1983.
- [2] Kibble B. R., Rainer G. H.: Coaxial alternative current bridges. Adam Hilder. Bristol. 1984, p. 203.
- [3] Awan S., Kibble B. R., Schurr J.: Coaxial electrical circuits for interference-free measurements. London: The Institution of Engineering and Technology, 2011, p. 504.
- [4] Meleschuk D. V., Mykhal A. A.: Error of platinum resistance thermometers, caused by surface effect in a wire of sensitive element. *Tekhnichna elektrodinamika*. 2004, n.2. p.69–71 (in Rus.).
- [5] Moiseeva N.P.: Improved design for 0.6-ohm HTSPRTS: reducing the leakage error and increasing the stability. *Proc. TEMPMEKO 2004*, Cavtat, Ed. Davor Zvizdic, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Zagreb. –2005, pp. 433 – 438.
- [6] Yamazawa K. and Arai M.: Measurement of the insulation resistance for the development of high temperature platinum resistance thermometers with a guard electrode. *Measurement and Control in Science and Industry*, vol. 7, ed. D. C. Ripple, AIP, New York. 2003, pp. 363 – 368.
- [7] Mykhal A. A., Meleschuk D. V.: Impedance model of precision platinum resistance thermometers in the field of high temperatures. *Tekhnichna elektrodinamika*. 2012 no. 4, pp. 73 – 79 (in Rus.).
- [8] Nicholas J. V., White D. R.: Traceable temperatures. John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, England. 2001, p. 421.
- [9] Mikhal A. A., Warsza Z. L.: Proste metody sprawdzania dokładności precyzyjnych mostków termometrycznych (2). *Pomiary Automatyka Robotyka (PAR)* 2013, nr 10, s. 130 -137.
- [10] Mikhal A. A., Warsza Z. L.: Determination of the additive component and nonlinearity of precision thermometric bridges. *Abstract book of Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science TEMPMEKO 2013*, 14-18. 2013 Funchal Madera Portugal, p. 351.
- [11] Mikhal A. A., Warsza Z. L.: Niekonwencjonalna metoda wyznaczenia nieliniowości całkowitej precyzyjnych mostków termometrycznych. *Pomiary Automatyka Kontrola (PAK)* 2013, Vol. 59, nr 1, s. 19-22.
- [12] Mikhal A. A., Warsza Z. L.: Metody wykrywania składowej addytywnej błędności w precyzyjnych mostkach termometrycznych. *Pomiary Automatyka Kontrola* 2012, Vol. 58, nr 12, pp. 1033–1036.

otrzymano / received: 01.08.2014

przyjęto do druku / accepted: 01.10.2014

artykuł recenzowany / revised paper