

Michał LISOWSKI, Krystian KRAWCZYK

POLITECHNIKA WROCLAWSKA, INSTYTUT PODSTAW ELEKTROTECHNIKI I ELEKTROTECHNOLOGII

## Przekazywanie jednostki rezystancji od wzorca opartego na kwantowym efekcie Halla do wysokoomowych rezystorów wzorcowych

Dr hab. inż. Michał LISOWSKI

W 1968 r. ukończył Wydział Elektryczny Politechniki Wrocławskiej. Stopień doktora n.t. uzyskał w 1975 r., a doktora habilitowanego w 1990 r. Jest profesorem nadzwyczajnym Politechniki Wrocławskiej. Pracuje w Instytucie Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii. W swoich pracach naukowych zajmuje się problemami wzorcowania przyrządów pomiarowych, systemami pomiarowymi do badania nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego, badaniami materiałów elektroizolacyjnych, a także normalizacją i prawem technicznym.



e-mail: [michal.lisowski@pwr.wroc.pl](mailto:michal.lisowski@pwr.wroc.pl)

Mgr inż. Krystian KRAWCZYK

W 2006 r. ukończył studia na kierunku Inżynieria Materiałowa na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej. W tym samym roku rozpoczął studia doktoranckie na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej. W swojej pracy naukowej zajmuje się zagadnieniami związanymi z wzorcami wysokoomowymi i transferami wysokich rezystancji.



e-mail: [krystian.krawczyk@pwr.wroc.pl](mailto:krystian.krawczyk@pwr.wroc.pl)

### Streszczenie

W referacie przedstawiono wzorzec pierwotny rezystancji, oparty na kwantowym efekcie Halla i system przekazywania jednostki rezystancji oraz problemy z tym przekazywaniem związane. Zaproponowano zastosowanie w systemie transferów rezystancji Hamona, które umożliwią zmniejszenie niepewności przenoszenia jednostki rezystancji, a także dokładniejsze wzorcowanie aparatury pomiarowej stosowanej w systemie.

**Słowa kluczowe:** wzorce wysokich rezystancji, kwantowy efekt Halla, transfer Hamona.

### The resistance unit transfer from the quantum Hall effect standard to high value resistance standards

#### Abstract

This paper concerns primary standard of resistance unit based on Quantum Hall Effect (fig. 3) and measurement system (fig. 5). Problems of resistance measurement system were shown. The alternative resistance scaling path, from QHE to various decade resistance values, based on Hamon transfers were described (fig. 6). This solution increases resistance transfer accuracy and allows to calibrate measurement equipment.

**Keywords:** high value resistance standards, quantum Hall effect, Hamon transfer.

## 1. Wstęp

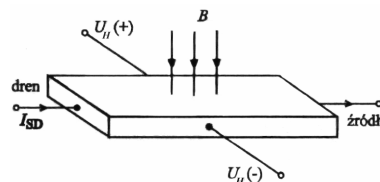
Obecnie najdokładniejszym wzorcem rezystancji jest wzorzec QHR (Quantum Hall Resistance), oparty na kwantowym efekcie Halla QHE (Quantum Hall Effect) [1, 2, 3]. Jednostka ta przekazywana jest do rezystorów wzorcowych o wartościach nominalnych 100  $\Omega$  najczęściej za pomocą kriogenicznego komparatora prądu CCC (Cryogenic Current Comparator) [4, 5]. Kolejne przeniesienie jednostki do wzorców o wartościach większych aż do 10 k $\Omega$  można wykonać przy pomocy tego samego komparatora CCC. Do porównywania rezystorów o rezystancji powyżej 10 k $\Omega$  do 1 T $\Omega$  można zastosować wysoko-precyzyjny mostek, na przykład 6000B firmy Measurement International. Powyżej 1 T $\Omega$  należy zastosować precyzyjny miernik wysokich rezystancji, na przykład 6517A firmy Keithley lub 6500 firmy Guildline.

## 2. Wzorzec rezystancji QHR oparty na kwantowym efekcie Halla

Obecnie do realizacji jednostki rezystancji na najwyższym poziomie dokładności stosuje się wzorzec QHR oparty na kwantowym efekcie Halla [2]. Składa się on z dwóch zasadniczych części:

- elementu Halla, znajdującego się wewnątrz kriostatu wyposażonego w kriomagnes, który wytwarza pole magnetyczne rzędu 10 T,
  - komparatora kriogenicznego CCC, który umożliwi przeniesienie jednostki rezystancji na użytkowe rezystory wzorcowe.
- Kriostat wzorca QHR oferowany jest przez firmę Cryogenic [6], natomiast komparator CCC przez National Measurement Laboratory (NPL) [7].

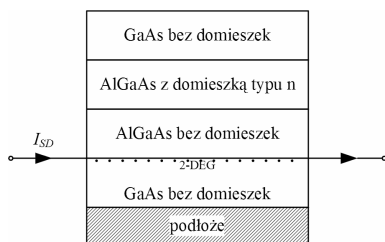
Kwantowy efekt Halla QHE (Quantum Hall Effect) odkrył w 1980 r. von Klitzing i za to odkrycie otrzymał nagrodę Nobla [8]. Efekt ten występuje w bardzo niskich temperaturach, poniżej kilku K, w obecności bardzo silnych pól magnetycznych. Przyłożenie silnego pola magnetycznego, o indukcji  $B$  rzędu kilku do kilkunastu T, prostopadle do powierzchni elementu Halla (rys. 1), powoduje wystąpienie kwantyzacji rezystancji Halla (rys. 3).



Rys. 1. Element Halla w polu magnetycznym  
Fig. 1. Hall sample in magnetic field

Warunkiem wystąpienia kwantowego efektu Halla jest istnienie dwuwymiarowego gazu elektronowego 2-DEG (2 Dimensional Electron Gas) [8]. W elemencie z gazem 2-DEG elektrony wzajemnie oddziałują na siebie oraz podlegają oddziaływaniu pola magnetycznego. Obniżenie temperatury poniżej 0,5 K znacznie redukuje efekty rozpraszania elektronów poprzez drgania cieplne. Bardzo niepożądane są również zanieczyszczenia materiałów elementu Halla, gdyż powodują rozpraszanie elektronów. Gaz elektronowy 2-DEG wytwarza się w elementach elektronicznych typu MOSFET oraz heterostrukturach, które nazywa się tu elementami Halla. W MOSFET-ach gaz 2-DEG występuje na styku powierzchni krzemu z warstwą izolacyjną tlenku krzemu. Lepszymi właściwościami charakteryzują się heterostruktury, które mają wielowarstwową strukturę półprzewodnikową o przewodnictwie jednego typu we wszystkich warstwach. Taką heterostrukturę przedstawiono na rys. 2. Składa się ona z warstwy arsenku galu (GaAs) o grubości 500  $\mu\text{m}$ , naniesionej na podłoże, na której znajduje się warstwa aluminiarsenu galu (AlGaAs), o grubości 0,5  $\mu\text{m}$ , a na niej taka sama warstwa AlGaAs, ale z domieszką typu n. Na tych warstwach naniesiona jest warstwa GaAs bez domieszki. Zasadnicze znaczenie w tej strukturze ma złącze warstwy GaAs z warstwą AlGaAs, w którym powstaje dwuwymiarowy gaz elektronowy 2-DEG, a elektrony mogą poruszać się tylko

w tej jednej płaszczyźnie. Taka heterostruktura, stanowiąca podstawowy element wzorca kwantowego Halla, ma wymiary około  $2,5 \text{ mm} \times 0,5 \text{ mm} \times 0,5 \text{ mm}$ .



Rys. 2. Element Halla w postaci heterostruktury GaAs-AlGaAs  
Fig. 2. Heterostructure GaAs-AlGaAs as Hall compound

W niskiej temperaturze, dla małej gęstości powierzchniowej nośników ładunku  $N_s$ , elektrony swobodne występują jedynie przy powierzchni złącza, a ruch ładunków prostopadły do złącza jest zabroniony. Elektrony w polu magnetycznym, pod wpływem siły Lorentza, poruszają się po okręgach i tylko niektóre torę tego ruchu są dozwolone. Przy małych indukcjach pola magnetycznego  $B$  elektrony zajmują stany energetyczne w sposób ciągły, aż do poziomu Fermiego. Wówczas rezystancja Halla, zdefiniowana jako stosunek napięcia poprzecznego  $U_H$  do prądu dren-źródło  $I_{SD}$  (rys.1), zależy liniowo od indukcji pola magnetycznego  $B$  i określona jest zależnością [7]:

$$R_H = \frac{U_H}{I_{SD}} = \frac{B}{N_s e}, \quad (1)$$

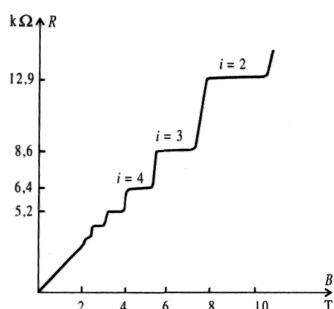
W elemencie z gazem 2-DEG dla bardzo dużej indukcji pola magnetycznego, wynoszącej  $B_1 = hN_s/e$  ( $h$  jest stałą Plancka), wszystkie elektrony obsadzają najniższy poziom energetyczny, a rezystancja Halla osiąga wartość maksymalną  $R_1$ , równą stałej von Klitzinga  $R_K$  [8]:

$$R_1 = \frac{B_1}{N_s e} = R_K = \frac{h}{e^2} = 25812,807 \Omega. \quad (2)$$

Zmniejszanie indukcji pola magnetycznego do wartości  $B_2 < B_1$  powoduje zmniejszanie tzw. degeneracji, czyli dopuszczalnej liczby elektronów obsadzających każdy z poziomów Landaua. Zmniejsza się liczba miejsc do obsadzenia na każdym poziomie energetycznym, również na najniższym, a część elektronów musi zająć sąsiedni wyższy poziom energetyczny. Dla obsadzonych  $i$  poziomów energetycznych rezystancja Halla [8]

$$R_H(i) = \frac{h}{ie^2} = \frac{R_K}{i}. \quad (3)$$

Rezystancja Halla zmniejsza się skokowo (dyskretnie) w funkcji obniżania indukcji pola magnetycznego (rys. 3).

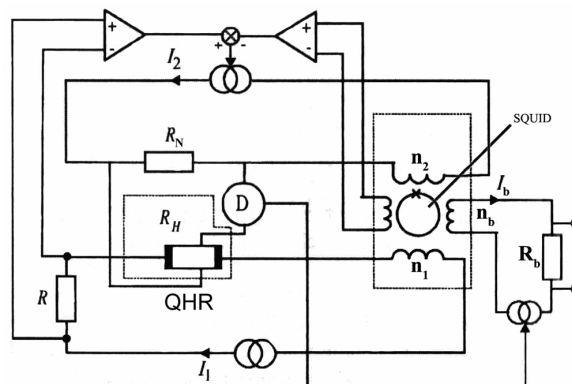


Rys. 3. Zmiana rezystancji Halla w funkcji pola magnetycznego [8]  
Fig. 3. Quantum Hall resistance as function of magnetic field [8]

W praktycznej realizacji wzorca pierwotnego wykorzystuje się rezystancję Halla dla  $i=2$  lub  $i=4$ . Dla  $i=2$  –  $R_H = 12906,404 \Omega$ , a dla  $i=4$  –  $R_H = 6453,202 \Omega$ . Jednostka tych wartości odtwarzana jest z niepewnością rzędu  $10^{-9}$  [1] (brak jest informacji, na jakim poziomie ufności jest ona określona).

### 3. Komparator kriogeniczny CCC

Na rys. 4 przedstawiono schemat układu, do porównywania rezystorów wzorcowych, wykorzystujący kriogeniczny komparator prądów stałych (CCC) [4, 5, 8].



Rys. 4. Komparator kriogeniczny CCC do porównywania rezystora wzorcowego  $R_N$  z wzorcem pierwotnym QHR [4, 5, 8]

Fig. 4. Cryogenic current comparator for comparison of the QHR primary standard against  $R_N$  standards [4, 5, 8]

Strumienie magnetyczne, wytwarzane w komparatorze magnetycznym przez prądy  $I_1$  i  $I_2$  w uzwojeniach  $n_1$  i  $n_2$  są przeciwnie skierowane i prawie równe sobie. Nieznaczna różnica strumieni, wynikająca z różnic od wartości nominalnych porównywanych rezystorów, kompensowana jest strumieniem magnetycznym wytwarzanym przez prąd  $I_b$  przepływający przez uzwojenie  $n_b$ . W stanie równowagi komparatora, gdy detektor SQUID-owy wskaże brak wypadkowego pola magnetycznego, równanie przepływów prądów przyjmuje postać:

$$I_1 n_1 - I_2 n_2 = I_b n_b. \quad (4)$$

Stąd

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1} + \frac{I_b}{I_2} \frac{n_b}{n_1}. \quad (5)$$

W stanie równowagi układu kompensacyjnego spadki napięć na rezystorach  $R_H$  i  $R_N$  są sobie równe, a rezystancja mierzona

$$R_N = R_H \frac{I_1}{I_2}. \quad (6)$$

Podstawiając wyrażenie (5) do wzoru (6) otrzymuje się

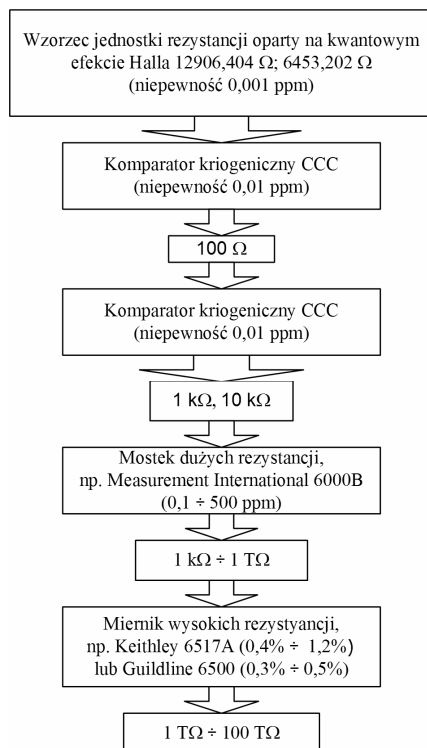
$$R_N = R_H \frac{n_2}{n_1} \left( 1 + \frac{I_b}{I_2} \frac{n_b}{n_2} \right). \quad (7)$$

Wartość prądu  $I_b$  mierzy się poprzez pomiar spadku napięcia na rezystorze  $R_b$  precyzyjnym woltmierzem cyfrowym. W podobny sposób mierzy się wartość prądu  $I_1$ . Liczby zwojów  $n_1$ ,  $n_2$  i  $n_b$  są policzalne i znane, zatem stosunki zewojów  $n_1/n_2$  i  $n_b/n_2$  są określone dokładnie. Zwykle  $I_b \ll I_1$  i  $(I_b/I_1)(n_b/n_2) \ll 1$ , zatem udział niepewności tego członu w wyniku porównania rezystancji wzorcowych może być stosunkowo mały.

Komparator magnetyczny CCC, z bardzo czułym detektorem SQUID-owym, umożliwi porównanie rezystancji wzorca pierwotnego QHR z wzorcem o wartości nominalnej 100  $\Omega$  oraz z wzorcami 1 k $\Omega$  i 10 k $\Omega$  z niedokładnością rzędu  $10^{-8}$  [7].

#### 4. Przekazywania jednostki rezystancji do wzorców wtórnych

Sposób przekazywania jednostki rezystancji z wzorca pierwotnego, opartego na kwantowym efekcie Halla, do wzorców wtórnych o dużych wartościach przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Przekazywanie jednostki rezystancji z wzorca QHR do wzorców wtórnych o dużych wartościach

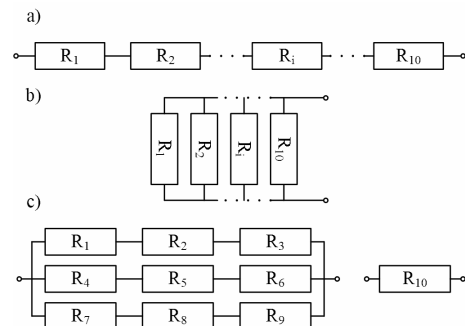
Fig. 5. Resistance scaling from the QHR to high value working standards

Jednostka rezystancji z wzorca pierwotnego przekazywana jest za pośrednictwem komparatora kriogenicznego CCC na wysoko stabilny wzorec wtórny o wartości nominalnej 100  $\Omega$ . Następnie za pomocą tego samego komparatora jednostka rezystancji przenoszona jest z tego rezystora wzorcowego, do wzorców o wartościach nominalnych 1 k $\Omega$  i 10 k $\Omega$ . Przeniesienie jednostki rezystancji dla wyższych wartości niż 10 k $\Omega$  odbywa się przy pomocy wysoko-precyzyjnego mostka, na przykład 6000B firmy Measurements International [9]. Mostek ten umożliwia przeniesienie jednostki rezystancji na rezystory wzorcowe od 1 k $\Omega$  do 1 G $\Omega$  z niepewnością rozszerzoną, na poziomie ufności 0,95, wynoszącą od 0,1 ppm do 5 ppm, a w specjalnej konfiguracji również w zakresie 10 G $\Omega$  ÷ 1 T $\Omega$  z niepewnością – 20 ÷ 500 ppm.

Do przeniesienia jednostki na wzorce o najwyższych wartościach od 1 T $\Omega$  do 100 T $\Omega$  należy stosować precyzyjne mierniki wysokich rezystancji, na przykład 6517 firmy Keithley lub 6500 firmy Guildline. Miernik 6517 firmy Keithley w tym zakresie mierzy z niedokładnością rzędu 0,4 % ÷ 1,2 % [10], a miernik 6500 firmy Guildline – 0,3 % ÷ 5 % [11]. Należy zwrócić uwagę na to, że rezystory o najwyższych wartościach rezystancji mają bardzo długi czas ustalania się wartości (prądu absorpcji) rzędu kilku minut, a dla rezystorów 100 T $\Omega$  nawet kilkudziesięciu minut. Może to powodować trudności w użyciu do tych pomiarów całkującego miernika 6500 firmy Guildline.

#### 5. Propozycja zastosowania transferów rezystancji Hamona

Alternatywnym sposobem przekazywania jednostki rezystancji może być użycie transferów rezystancji Hamona [12]. Transfer Hamona składa się z 10 precyzyjnych rezystorów o jednakowych wartościach nominalnych, które mogą być połączone szeregowo lub równolegle oraz szeregowo-równolegle (rys. 6) [12, 13, 14]. W przypadku połączenia szeregowo-równoległego łączy się równolegle trzy gałęzie trzech szeregowo połączonych rezystorów (rys. 6c). Rezystor dziesiąty pozostaje poza układem połączeń.



Rys. 6. Transfer rezystancji Hamona w konfiguracji: a) szeregowej, b) równoległej, c) szeregowo-równoległej

Fig. 6. Hamon resistance transfer in three configurations: a) series, b) parallel, c) series-parallel

Wartość  $i$ -tego rezystora transferu wynosi

$$R_i = R(1 + d_i). \quad (8)$$

$R$  – nominalna wartość rezystancji rezystorów,  $d_i$  – poprawka względna wartości  $i$ -tego rezystora.

Rezystancja 10-ciu szeregowo połączonych rezystorów

$$R_s = \sum_{i=1}^{10} R_i = 10R \left( 1 + \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} d_i \right) = R_{sn} (1 + \bar{d}), \quad (9)$$

a rezystancja połączenia równoległego tych samych rezystorów

$$R_r = \frac{1}{\sum_{i=1}^{10} \frac{1}{R(1 + d_i)}} = \frac{R}{10} (1 + \bar{d}) = R_{rn} (1 + \bar{d}), \quad (10)$$

gdzie  $R_{sn}$  i  $R_{rn}$  – wartości nominalne rezystancji transferu w połączeniu szeregowym i równoległym,  $\bar{d}$  – wartość średnia względnej poprawki,  $\bar{d} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} d_i$

Po podzieleniu stronami równania (9) przez (10) otrzymuje się:

$$\frac{R_s}{R_r} = 100. \quad (11)$$

Wynika stąd, że stosunek rezystancji połączenia szeregowego do połączenia równoległego transferu wynosi 100, z bardzo małym błędem wynikającym z przybliżenia użytego w równaniu (10).

Natomiast rezystancja połączenia szeregowo-równoległego transferu (rys. 6c)

$$R_{sr} = R \left( 1 + \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 d_i \right) = R(1 + \bar{d}') = R(1 + \bar{d} - 0,1d_{10}), \quad (12)$$

gdzie  $\bar{d}' = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 d_i = \bar{d} - 0,1d_{10}$  jest średnią wartością względną poprawki 9 rezystorów połączonych szeregowo-równoległe, a  $d_{10}$

– wartością względną poprawki odrzuconego 10-tego rezystora. Dzieliąc stronami równania (9) i (12) oraz stosując zależności dla rachunku uproszczonego, przy założeniu że  $\bar{d} \ll 1$  i  $d_{10} \ll 1$ , otrzymuje się:

$$\frac{R_s}{R_{sr}} = 10(1 + 0,1 \cdot d_{10}). \quad (13)$$

Z zależności (13) wynika, że stosunek rezystancji połączenia szeregowego i szeregowo-równoległego rezystorów jest również dokładnie znany i wynosi 10 z uwzględnieniem poprawki 10-tego odrzuconego rezystora. Zatem transfery rezystancji mogą umożliwić bardzo dokładne przeniesienie wartości rezystancji wzorcowych w stosunku 1:10 i 1:100.

Dokładność transferów Hamona dla bardzo dużych rezystancji ograniczona jest upływnością izolacji. W celu ich zminimalizowania należy zastosować tzw. podwójną izolację i podnoszenie potencjału ekranów. Te zagadnienia będą przedmiotem dalszych prac autorów.

## 6. Wnioski

Realizacja systemu do odtwarzania jednostki rezystancji wzorca pierwotnego w oparciu o kwantowy efekt Halla i zastosowanie wysoko-precyzyjnych mostków, na przykład firmy Measurements International, znacznie poprawia dokładność wyznaczania wartości wzorców rezystancji, w zakresie do 1 TΩ. Niepewność przekazywania jednostki rezystancji zależy głównie od dokładności komparatora kriogenicznego CCC i precyzyjnych mostków, na przykład firmy Measurements International. Aby zapewnić spójność pomiarową, aparatura ta wymaga wzorcowania za pomocą specjalnego wyposażenia.

Autorzy proponują rozwiązanie problemu zapewnienia spójności przekazywania jednostki rezystancji w kierunku najwyższych wartości poprzez zastosowanie wysokoomowych transferów Hamona. Zapewnia to wysoką dokładność przekazywania jednostki rezystancji oraz możliwość wzorcowania mostków stosowanych w systemie. Takie transfery, ale tylko do 1 MΩ, są oferowane przez firmę Guildline [15]. Opracowanie i skonstruowanie transferów Hamona o wyższych wartościach pozwoli na przekazywanie jednostki rezystancji do wzorców o najwyższych wartościach rezystancji z najniższą możliwą do uzyskania niepewnością, przy stosowaniu porównań w stosunku 1:1, metodą podstawienia.

Przydatność transferów Hamona w systemie przekazywania jednostki rezystancji potwierdzają najlepsze światowe laboratoria zajmujące się przekazywaniem jednostki rezystancji takie jak National Institute of Standards and Technology (NIST) [12],

National Research Council (NRC) [16], Centro Español de Metrologia (CEM) [16], które wykorzystują je w swoich systemach.

## 7. Literatura

- [1] B. Jeckelmann, B. Jeanneret: The quantum Hall effect as an electrical resistance standard. *Measurement Science and Technology*, vol. 14 (2003), s. 1229-1236.
- [2] A. Hartland: The quantum Hall effect and resistance standard. *Metrologia*, vol. 29 (1992), s. 175-190.
- [3] E. Dudek: Kwantowy efekt Halla i jego zastosowanie do odtwarzania jednostki miary oporu elektrycznego. Materiały konferencji: Podstawowe Problemy Metrologii PPM'05, Ustroń 2005. Wyd. PAN, Oddział w Katowicach, s. 409-416.
- [4] M. J. Williams, P. Kleinschmidt: A cryogenic current comparator bridge for resistance measurements at currents of up to 100A. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* vol. 48, no. 2, April 1999, s. 375-378.
- [5] R. F. Dziuba, R. E. Elmquist: Improvements in resistance scaling at NIST using cryogenic current comparator. *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*. vol. 42, no. 2, April 1993, s. 126-130.
- [6] Cryogenic, Liquid Helium Cooled Research Systems. <http://www.cryogenic.co.uk>.
- [7] National Physical Laboratory: Cryogenic Current Comparator Bridge. <http://www.npl.co.uk>.
- [8] W. Nawrocki, M. Wawrzyniak: Zjawiska kwantowe w metrologii elektrycznej. Wyd. Politechniki Poznańskiej 2003.
- [9] Measurement International: Model 6000B Automated 100 Volt High Resistance Bridge. <http://www.mintl.com>.
- [10] Keithley: 65517A Electrometer/high resistance meter datasheet. [www.keithley.com](http://www.keithley.com).
- [11] Guildline: Model 6500A Programmable Digital Teraohmmeter. <http://www.bandp.co.kr/electronic/pdf/Guildline6500ADatasheet.pdf>.
- [12] National Institute of Standards and Technology: NIST Measurement Service for DC Standard Resistors. NIST Technical Note 1458, December 2003.
- [13] J. Skurzak: Metody porównywania oporników wzorcowych przy dużym stosunku ich oporów. Praca Doktorska, Instytut Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1973. Promotor: Prof. Jarosław Kuryłowicz.
- [14] J. Dudziewicz i inni: Etalony i precyzyjne pomiary wielkości elektrycznych. W. K. i Ł., Warszawa 1982.
- [15] Guildline: Hamon type resistance transfer standard 9350 datasheet. [www.guildline.com](http://www.guildline.com).
- [16] The BIPM key comparison database, <http://kcdb.bipm.org>.

Artykuł recenzowany

## INFORMACJE

# Zapowiedź kolejnej książki Wydawnictwa PAK

Na przełomie sierpnia i września ukaże się kolejna książka Wydawnictwa PAK autorstwa Tomasza Boczara pt.: *Energia wiatrowa. Aktualne możliwości wykorzystania*.

W niniejszej książce przedstawiono aktualne możliwości wykorzystania energii wiatru do produkcji energii elektrycznej na obszarze Europy, ze szczególnym uwzględnieniem potencjalnych zasobów i stopnia ich wykorzystania na terenie Polski, a także województwa opolskiego. Ponadto scharakteryzowano podstawowe założenia polityki krajów UE oraz strategii energetycznej Polski wobec OZE.

Książka skierowana jest przede wszystkim do studentów oraz wykładowców prowadzących zajęcia dydaktyczne na kierunkach elektrycznych, jak również związanych z inżynierią i ochroną środowiska. Opisane zagadnienia mogą stanowić materiał dydaktyczny

związany z aktualnymi możliwościami oraz przyszłymi kierunkami w pozyskiwaniu energii wiatru do produkcji energii elektrycznej.

### Zamówienia prosimy składać na adresy PAK:

Wydawnictwo PAK  
00-050 Warszawa, ul. Świętokrzyska 14A,  
tel./fax: 022 827 25 40

Redakcja PAK  
44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10, p. 30b,  
tel./fax: 032 237 19 45, e-mail: [wydawnictwo@pak.info.pl](mailto:wydawnictwo@pak.info.pl)