

## Adrian Bożydar KNYZIAK

GŁÓWNY URZĄD MIAR, ZAKŁAD PROMIENIOWANIA I DRGAŃ,  
Elektoralna 2, 00-139 Warszawa

# Wykorzystanie elektrometru Keithley 6517A w układzie kompensacji Townsend'a

Dr Adrian Bożydar KNYZIAK

Główny metrolog w Laboratorium Promieniowania Jonizującego i Wzorców Barwy w Zakładzie Promieniowania i Drgań Głównego Urzędu Miar. Zajmuje się dozymetrią, komputerowymi systemami pomiarowymi i metrologią.



e-mail: a.knyziak@gum.gov.pl

### Streszczenie

W niniejszym artykule przedstawiono możliwość wykorzystania elektrometru firmy Keithley typ 6517A w metodzie zerowej, która jest dokładniejszą z metod pomiaru małych prądów DC i ładunków elektrycznych. Metoda ta eliminuje główne źródła błędów jak prąd upływowy i zjawisko absorpcji dielektrycznej ładunku elektrycznego. W artykule przedstawiono i omówiono dokładnie metodę zerową. Metoda ta została porównana z innymi znanymi metodami pomiaru małych prądów DC i ładunków elektrycznych. Wyniki tych porównań zostały przedstawione i omówione w artykule. Dzięki zerowej metodzie można otrzymać względną niepewność standardową około 0,003% dla prądu o wartości 3 pA i stabilność długoterminową około 0,01%. Na podstawie uzyskanych wyników i doświadczeń budowane są obecnie systemy pomiarowe w Głównym Urzędzie Miar, np. systemy pomiarowe dla stanowisk wzorca pierwotnego dawki pochłoniętej w wodzie i kermie w powietrzu.

**Słowa kluczowe:** metoda zerowa, prąd jonizacyjny.

## Use of a Keithley 6517A electrometer in the Townsend compensation circuit

### Abstract

An ionization chamber is the most widely used type of dosimeter for precise measurements. The typical values of charge or current to be measured by ionization chambers can be estimated from the fact that an exposure of 1 R (Roentgen is now a historical unit of the exposure dose) generates a charge of  $2.58 \cdot 10^{-10}$  C in  $1 \text{ cm}^3$  of room temperature air at pressure 1 atm. In most practical cases, ionization currents are very small, in the range from 1  $\mu\text{A}$  to 0.1 fA, so their measurement requires careful technique and appropriate instrumentation. Making a measurement with an ionization chamber requires a high-voltage power supply and an electrometer. The electrometer measures current or charge in the range 200 fA to 1  $\mu\text{A}$  (current mode) and 2 pC to 10 mC (charge mode) with the maximum resolution of 1 fA or 10 fC and the accuracy better than 0.5%. Its long term stability is 0.1% per year. These parameters are insufficient for measurements in which there are used ionization chambers as the primary standard. There are also problems with the calibration of these electrometers on a satisfactory level. This paper presents the possibility of using a digital Keithley 6517A electrometer in the null method which is the most accurate method measuring very low DC currents and electrical charges. This method eliminates the leakage current and the capacitor dielectric absorption phenomenon. The null method is presented and discussed. This method is compared with the known measuring methods and the results of comparison are summarized and discussed. Thanks to the null method there can be achieved the relative standard uncertainty of 0.003% for the current about 3 pA and the long term stability about 0.01%. The results of the research are used at the Central Office of Measures in the Laboratory of Ionizing Radiation and Color Standards. Based on these studies new measuring systems are being built at the Central Office of Measures, e.g. a measuring system for the primary standards of absorbed dose to water and air kerma.

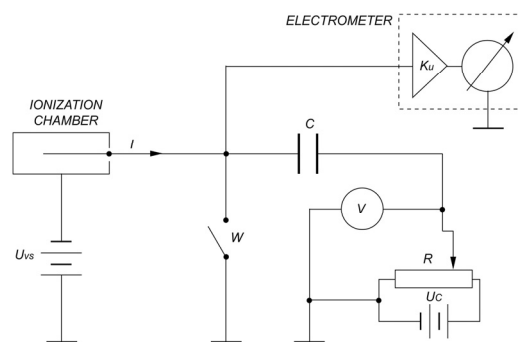
**Keywords:** null method, ionization current.

## 1. Wstęp

Metoda zerowa (kompensacyjna) zaproponowana została przez J. Townsenda w 1903 roku, zaś do praktyki pomiarów wprowadził ją L.S. Taylor w 1931 roku. Metoda zerowa jest jedną z najdokładniejszych metod pomiaru małych ładunków i prądów jonizacyjnych. Była ona szeroko stosowana do końca XX wieku przez większość krajowych instytutów metrologicznych. W latach 60– i 70– tych ubiegłego wieku prowadzono szereg prac nad automatyzacją procesu kompensacyjnego [1]. Jednak rozwój współczesnej elektroniki oraz związany z nim rozwój elektrometrów cyfrowych spowodowały zaniechanie stosowania metody zerowej na rzecz prostszej i łatwej do automatyzacji metody ładunkowej. W niniejszej pracy przedstawiam układ kompensacji Townsend'a wykorzystujący cyfrowy elektrometr firmy Keithley typ 6517A, na którym możliwe są bardzo dokładne pomiary małych ładunków i prądów jonizacyjnych na stanowisku wzorca pierwotnego kermie w powietrzu i wzorca wtórnego dawki pochłoniętej w wodzie w polu promieniowania gamma nuklidu  $^{60}\text{Co}$ . Dokładność pomiarów dokonywanych przedstawionym układem znacznie przewyższa metodę ładunkową powszechnie stosowaną w dozymetrii.

## 2. Metoda zerowa

Metoda zerowa (kompensacyjna) polega na wyrównywaniu ubytku lub przyrostu ładunku elektrycznego, wywołanego prądem jonizacyjnym, przez doprowadzenie lub odprowadzenie z układu takiego samego ładunku. Schemat ideowy układu kompensacyjnego przedstawiono na (rys. 1) [1-3].



Rys. 1. Schemat ideowy układu kompensacyjnego Townsend'a  
Fig. 1. Schematic diagram of the Townsend compensation circuit

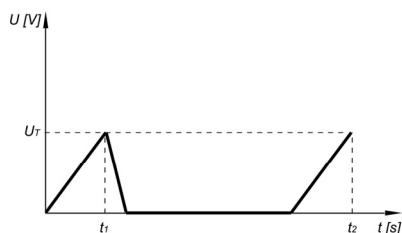
Elektrometr pracujący w trybie pomiaru napięcia elektrycznego jest włączony w tym przypadku jako przyrząd zerowy. Bateria akumulatorów  $U_C$  podłączona jest do potencjometru  $R$ , służącego do regulacji napięcia na kondensatorze  $C$  o znanej pojemności elektrycznej. Woltomierz  $V$  służy do pomiaru napięcia (względem ziemi) styku ruchomego potencjometru  $R$  i połączonej z nim okładki kondensatora  $C$ . Przed wykonaniem pomiaru operator przesuwając, przy zamkniętym włączniku  $W$ , styk ruchomy potencjometru  $R$  do położenia odpowiadającego napięciu  $U_C$ . Na okładkę kondensatora  $C$  podłączoną do styku ruchomego doprowadza się w ten sposób ładunek  $+q = CU_C$ . Na okładce kondensatora  $C$  podłączonej do elektrometru pojawia się ładunek  $-q = -CU_C$ . Prąd jonizacyjny  $I$ , płynący przez komorę jonizacyjną, spływa przez zamknięty włącznik  $W$  do ziemi. Po otwarciu włącznika  $W$  prąd jonizacyjny  $I$  nie mogąc już płynąć do ziemi ładuje kondensator  $C$ . W efekcie wskazanie elektrometru narasta aż dochodzi do ustalonej wartości napięcia  $U_T$ . W tym momencie rozpoczyna się

kompensacja realizowana przez operatora oraz pomiar czasu kompensacji [1-3].

Styk ruchomy potencjometru  $R$  przesuwany jest stopniowo przez operatora do położenia początkowego. Potencjał połączonej ze stykiem okładki kondensatora  $C$  maleje przy tym do zera, a z drugiej okładki kondensatora połączonej z elektrometrem uwalnia się ładunek ujemny. W zależności od tego czy wartość bezwzględna ładunku  $\Delta q$  uwolnionego w przeciągu pewnego czasu  $\tau$  jest większa, czy mniejsza od ładunku  $I\tau$  doprowadzonego w tym samym czasie przez prąd jonizacyjny  $I$ , wskazanie elektrometru oscyluje wokół położenia zajmowanego na początku okresu czasu  $\tau$ . Prędkość przesuwania styku ruchomego potencjometru  $R$  jest dobrana tak, aby można było utrzymywać wskazanie elektrometru w pobliżu zera [1-3]. Po obniżeniu potencjału styku ruchomego potencjometru  $R$  do zera wskazanie elektrometru zaczyna znów narastać i ponownie dochodzi do ustalonej wartości napięcia  $U_T$ . W tym momencie kończy się pomiar czasu kompensacji. Operator odczytuje czas kompensacji  $t$ . Ponieważ w czasie kompensacji ilość ładunku  $CU_C$  zgromadzonego na okładce kondensatora  $C$  jest równa ilości ładunku  $It$  doprowadzonego przez prąd jonizacyjny  $I$ , zatem [1, 2]:

$$I = \frac{C \cdot U_C}{t}, \quad (1)$$

Pomiar prądu jonizacyjnego metodą zerową sprowadza się do pomiaru czasu i różnicy potencjałów (napięcia), tj. do pomiarów wielkości, które można wyznaczyć z dużą dokładnością podobnie jak pojemność kondensatora. Zmiana pojemności elektrycznej kondensatora w szerokim zakresie pojemności od 5 pF do 10 nF oraz zmiana potencjałów między okładkami tego kondensatora od 0,02 V do 100 V pozwalają, przy utrzymaniu dogodnej wartości czasu kompensacji, na pomiar prądów jonizacyjnych od  $10^{-8}$  A do  $10^{-15}$  A [1-3]. Czas kompensacji zapewniający pewny i spokojny odczyt zawiera się w przedziale od 30 s do 100 s [1-3] co jest główną wadą omawianej metody. W metodzie zerowej istotną rzeczą jest powtarzalność wartości progu wyzwalania stopera. Realizuje się to przez przyłączenie do wyjścia analogowego komparatora – wyzwalacza, który ustawia się na zadaną wartość napięcia  $U_T$ . W chwili, gdy napięcie wskazywane przez elektrometr osiąga wartość progową  $U_T$  ustawioną na komparatorze-wyzwalaczu następuje wysłanie sygnału prostokątnego TTL do stopera elektronicznego, który rozpoczyna pomiar czasu (patrz rys. 2).



Rys. 2. Wykres zmiany napięcia na wejściu wzmacniacza napięcia stałego w funkcji czasu w trakcie pomiaru prądu jonizacyjnego metodą zerową  
Fig. 2. Change in the voltage at the amplifier input as a function of time during measuring the ionization current by the null method

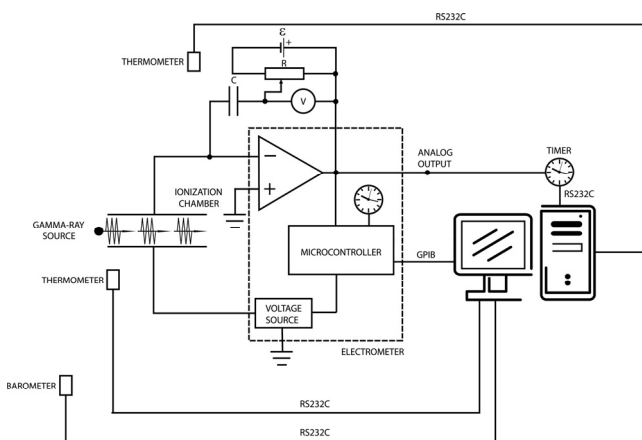
Ustawienie wartości napięcia  $U_T$  pomija ładunek elektryczny zgromadzony przed rozpoczęciem procesu kompensacji na kondensatorze  $C$  i eliminuje zjawisko absorpcji dielektrycznej ładunku elektrycznego. Po rozpoczęciu pomiaru czasu operator poprzez potencjometr podaje napięcie na okładkę kondensatora, aż do momentu wskazania przez elektrometr wartości bliskiej zera. Dzięki temu następuje zminimalizowanie upływności ładunku elektrycznego przez izolację kondensatora i elektrometru. Operator utrzymuje potencjometrem takie wskazanie, aż do momentu kiedy na okładkę kondensatora zostanie podane pełne napięcie kompensacji. Po ustaniu kompensacji wartość napięcia wskazy-

wanego przez elektrometr narasta i osiąga ponownie wartość progową  $U_T$ . Komparator-wyzwalacz wysyła sygnał prostokątny TTL do stopera elektronicznego kończący pomiar czasu. Otrzymuje się w ten sposób czas kompensacji  $t=t_2 - t_1$  [1-3]. Metoda zerowa nie zawiera błędów związanych z niedostateczną znajomością pojemności elektrometru, kabli pomiarowych itp., gdyż w zależności (1) występuje tylko pojemność kondensatora  $C$  [1-3]. Istotną wadą metody zerowej jest konieczność stałej, na ogół ręcznej, kompensacji [1-3].

Metoda zerowa wykorzystywana jest w Głównym Urzędzie Miar (GUM) na stanowisku wzorca pierwotnego kermy w powietrzu promieniowania gamma nuklidów  $^{137}\text{Cs}$  i  $^{60}\text{Co}$ . Wykorzystując metodę zerową z elektrometrem lampowym Carry 41 prąd jonizacyjny rzędu  $10^{-12}$  A GUM mierzy ze względną niepewnością standardową 0,03% [4].

### 3. Metoda zerowa z wykorzystaniem elektrometru Keithley 6517A

Uniwersalny elektrometr służy do pomiaru wielkości elektrycznych np. napięcia stałego, prądu, ładunku oraz rezystancji. Można go więc wykorzystać do budowy dawkomierza ochrony radiologicznej lub dawkomierza radioterapeutycznego. W tym celu podłącza się do jego wejścia komorę jonizacyjną a elektrometr ustawia się w tryb pomiaru prądu elektrycznego lub ładunku elektrycznego. Przykładem takiego urządzenia jest cyfrowy elektrometr firmy Keithley typ 6514. Często uniwersalne elektrometry mają wbudowane stabilizowane zasilacze wysokiego napięcia stałego, które można wykorzystać do polaryzacji pola elektrycznego oraz osiągnięcia stanu nasycenia w komorze jonizacyjnej. Przykładem takiego urządzenia jest cyfrowy elektrometr firmy Keithley typ 6517A. Elektrometr ten oprócz trybów pomiaru prądu elektrycznego i ładunku elektrycznego posiada tryb pomiaru napięcia stałego z opcją pracy w sprzężeniu zwrotnym. Dostępne są trzy zakresy pomiaru napięcia: 2 V, 20 V i 200 V. W trybie pomiaru napięcia stałego możliwa jest realizacja sprzężenia zwrotnego.



Rys. 3. Elektrometr firmy Keithley typ 6517A w układzie kompensacji Townsenda  
Fig. 3. Keithley 6517A electrometer in the Townsend compensation circuit

Elektrometr Keithley 6517A wyposażony jest w stabilizowany elektronicznie zasilacz wysokiego napięcia pracujący w zakresie napięcia stałego od -1000 V do +1000 V z rozdzielczością 50 mV i dokładnością  $0,15\% + 100$  mV [5, 6]. Zasilacz wykorzystano do wytwarzania potencjału polaryzacji w komorach jonizacyjnych. Elektrometr firmy Keithley typ 6517A został zastosowany jako przyrząd zerowy i podłączony do układu przedstawionego na (rys. 3). Najmniejszym zakresem pomiaru napięcia tego elektrometru jest zakres 2 V. Układ kompensacji (źródło napięcia kompensacji  $\varepsilon$ , potencjometr  $R$ , kondensator  $C$ , multimetr  $V$ ) został podłączony w sprzężeniu zwrotnym.

W odległości 1 cm od elementu realizującego sprzężenie zwrotne (kondensator wzorcowy) umieszczono termometr firmy Elmetron typ PT401, którego zadaniem była kontrola temperatury i związane z nią zmiany wartości pojemności elektrycznej. Do pomiaru czasu wykorzystano w metodzie zerowej częstotściomierz firmy Hamag typ HM8123, pracujący w trybie czasomierza, z przystawką komparator-wyzwalacz firmy Voltronix. Wejście przystawki komparator-wyzwalacz podłączyłem do wyjścia ANALOG OUTPUT elektrometru Keithley 6517A. Poziom napięcia stałego, przy którym komparator-wyzwalacz rozpoczynał pomiar czasu ustawiono na wartość  $-0,3$  V. Do dwóch wejść częstotściomierza HM8123 (kanały A i B) podłączono odpowiednio wyjście START i STOP komparatora-wyzwalacza. Na wejścia A i B częstotściomierza podawany był sygnał TTL z komparatora-wyzwalacza. Poziom napięcia wyzwalania pomiaru czasu w częstotściomierzu ustawiono na wartość 1 V. Elektrometr cyfrowy firmy Keithley typ 6517A posiada funkcję LIMIT wyzwalającą sygnały TTL na pinach gniazda TRIG LINK [5, 6]. Umożliwia to wykorzystanie omawianej opcji jako urządzenia komparator-wyzwalacz w metodzie zerowej poprzez podłączone do gniazda TRIG LINK elektrometru wejść A i B częstotściomierza. Zasada pomiaru w obu przypadkach jest identyczna do przedstawionej w punkcie (2) niniejszej pracy.

#### 4. Porównanie metod

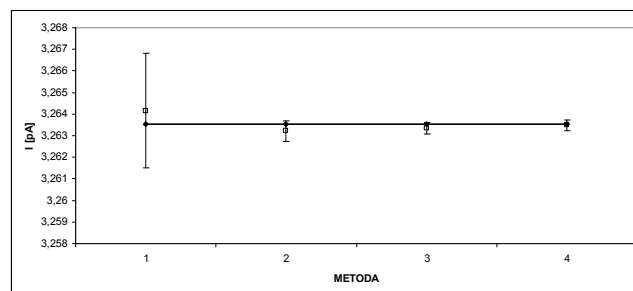
Przeprowadzono pomiary porównawcze dla trzech znanych metod: prądowej, ładunkowej, zerowej oraz metody zmodyfikowanej (opis metody [3]) na stanowisku wzorca pierwotnego kermy w powietrzu w polu promieniowania gamma nuklidu  $^{137}\text{Cs}$  z komorą jonizacyjną produkcji OMH typ ND1005.

Tab. 1. Wynik porównania metod pomiaru:  $I$  – wartość średnia prądu,  $S_I$  – odchylenie standardowe,  $S_I/I$  – względna niepewność standardowa  
Tab. 1. The result of comparison of the measuring methods:  $I$  – average value of current,  $S_I$  – standard deviation,  $S_I/I$  – relative standard uncertainty

Nr	METODA			
	prądowa	ładunkowa	zerowa	modyfikacja
	$I$ [pA]			
1	3,26189	3,26382	3,26334	3,26312
2	3,26707	3,26260	3,26311	3,26355
3	3,26095	3,26330	3,26322	3,26362
4	3,26053	3,26324	3,26314	3,26345
5	3,26624	3,26324	3,26327	3,26373
6	3,26573	3,26260	3,26312	3,26312
7	3,26562	3,26371	3,26321	3,26364
8	3,26773	3,26264	3,26361	3,26371
9	3,26388	3,26384	3,26390	3,26376
10	3,26191	3,26315	3,26362	3,26322
<I>	<b>3,26416</b>	<b>3,26321</b>	<b>3,26335</b>	<b>3,26349</b>
$S_I$	<b>0,00266</b>	<b>0,00048</b>	<b>0,00027</b>	<b>0,00025</b>
$S_I/I$	<b>0,082%</b>	<b>0,015%</b>	<b>0,008%</b>	<b>0,008%</b>

Odległość źródła promieniowania-komorą jonizacyjną wynosiła 1 m. Moc kermy w powietrzu wynosiła około  $1 \mu\text{Gy/s}$ . Właściwe pomiary rozpoczęto po 3 godzinach od włączenia poszczególnych elementów zespołu pomiarowego i poddania komory jonizacyjnej działaniu promieniowania gamma. Wszystkie metody były zrealizowane przy wykorzystaniu tych samych urządzeń pomiarowych, np. elektrometru. Wyniki pojedynczych najlepszych serii pomiarów porównawczych poszczególnych metod pomiaru małych ładunków i prądów jonizacyjnych na stanowisku wzorca pierwotnego kermy w powietrzu w polu promieniowania gamma nuklidu  $^{137}\text{Cs}$  przedstawiono w (tab. 1) i na (rys. 4). Wartość odniesienia, oznaczona linią ciągłą na wykresie, wynosiła  $3,26354$  pA i została

wyznaczona na podstawie wieloletnich pomiarów w ramach kontroli wzorca prowadzonych w Głównym Urzędzie Miar z względną niepewnością standardową  $\pm 0,15\%$ .



Rys. 4. Graficzna prezentacja wyniku porównania metod pomiaru: 1 – metoda prądowa, 2 – metoda ładunkowa, 3 – metoda zerowa, 4 – metoda zerowa z modyfikacją

Fig. 4. Graphical presentation of the result of comparing the measuring methods: 1 – current method, 2 – charges method, 3 – null method, 4 – null method with modification

Za pomocą przedstawionego układu zmierzono prąd jonizacyjny rzędu  $10^{-12}$  A ze względną niepewnością standardową  $0,003\%$ . Najlepsze układu wykorzystujące metodę ładunkową mierzą prądy elektryczne rzędu  $10^{-12}$  A ze względną niepewnością standardową  $0,01\%$  [3, 4].

#### 5. Podsumowanie

Metoda zerowa jest jedyną metodą pozwalającą na pomiar małych prądów i ładunków elektrycznych pozbawioną błędów związanych z upływnością ładunku i zjawiskiem absorpcji dielektrycznej ładunku elektrycznego. Zbudowany przeze mnie układ pokazuje, że możliwe jest stosowanie tej metody pomiarowej w połączeniu z cyfrowymi elektrometrami. Na podstawie uzyskanych wyników z pomiarów przeprowadzonych na stanowisku wzorca pierwotnego kermy w powietrzu w polu promieniowania gamma nuklidu  $^{137}\text{Cs}$  można stwierdzić, że w przypadku wymaganej dużej dokładności pomiaru jest ona jedyną alternatywą a wykorzystanie elektrometru Keithley typ 6517A umożliwia jej pełną realizację. Oprócz tych pomiarów były przeprowadzane pomiary z wykorzystaniem różnych urządzeń w charakterze komparator-wyzwalacz. Pomiary wykazały, że jest on istotnym elementem decydującym o właściwościach układu wykorzystującego metodę zerową. Wyniki tych prac zostaną również opublikowane.

#### 6. Literatura

- [1] Referowski Z.: Opracowanie państwowych wzorców pierwotnych dawki ekspozycyjnej promieniowania fotonowego, Polski Komitet Normalizacji i Miar, Warszawa 1974.
- [2] Aglincew K. K.: Dozymetria promieniowania jonizującego, Państwowe Wydawnictwa Naukowe, Warszawa 1961.
- [3] Knyziak A. B.: Porównanie metod pomiarów małych prądów jonizacyjnych, Przegląd Elektrotechniczny, Nr 10/2009.
- [4] Allisy-Roberts P. J., Kessler C., Burns D.T., Kokociński J., Derlaciński M.: Comparisons of the standards for air kerma of the GUM and the BIPM for  $^{60}\text{Co}$  and  $^{137}\text{Cs}$  gamma radiation, Metrologia, nr 48, 2011.
- [5] Low level measurements Handbook 6th Edition, Keithley Instruments Inc., 2006.
- [6] Model 6517A Electrometer User's Manual, Keithley Instruments Inc., 1996.

otrzymano / received: 17.12.2013

przyjęto do druku / accepted: 03.02.2014

artykuł recenzowany / revised paper