

Metody pomiaru małych ładunków i prądów jonizacyjnych w ochronie radiologicznej i radioterapii

Adrian Bożydar Knyziak (Zakład Promieniowania i Drgań, GUM)

Artykuł jest streszczeniem rozprawy doktorskiej o tym samym tytule, która została obroniona przez autora na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej.

W niniejszym artykule przedstawiono metody pomiaru małych prądów DC i ładunków elektrycznych, które są stosowane powszechnie w dozymetrii promieniowania jonizującego. Artykuł prezentuje ich zalety i wady w różnych aplikacjach z naciskiem na zastosowanie w systemach pomiarowych, wykorzystywanych na stanowiskach wzorców pierwotnych i wtórnych kermy w powietrzu i dawki pochłoniętej w wodzie.

Wstęp

Dozymetria promieniowania jonizującego jest bardzo istotnym elementem zastosowań promieniowania w terapii i diagnostyce medycznej, jak również w ochronie radiologicznej. Dawkomierze, wykorzystywane do pomiaru dawki promieniowania jonizującego, są złożone z dwóch zasadniczych części: detektora promieniowania (np. komora jonizacyjna, licznik proporcjonalny, licznik scyntylacyjny, detektor półprzewodnikowy) i układu elektronicznego, mierzącego sygnał elektryczny (np. w postaci: impulsu elektrycznego, ładunku jonizacyjnego, prądu jonizacyjnego) pochodzący z detektora promieniowania. Sygnał ten jest następnie przeliczany na odpowiednie wielkości dozymetryczne. Jednak, aby takie przeliczenie było możliwe musimy dysponować współczynnikiem wzorcowania. Współczynnik wzorcowania otrzymuje się na drodze porównania wskazania przyrządu wzorcowanego z wzorcem w takich samych warunkach radiologicznych.

W zastosowaniach diagnostycznych i terapeutycznych najdokładniejszym detektorem jest prądowa komora jonizacyjna, w której do pomiaru i rejestracji promieniowania wykorzystywane jest zjawisko jonizacji. Komorę jonizacyjną można rozważać jako swego rodzaju kondensator, wypełniony powietrzem, do którego elektrod przyłożone jest wysokie napięcie. W ściankach komory i w wypełniającym ją powietrzu pod wpływem promieniowania powstają jony dodatnie oraz uwolnione elektrony, które w polu elektrycznym wędrują do odpowiednich elektrod tworząc prąd jonizacyjny. Zakres prądów jonizacyjnych rozciąga się od 10^{-6} A, np. w układach sterowania reaktorów jądrowych, do wartości tak małych jak 10^{-16} A, spotykanych w technice

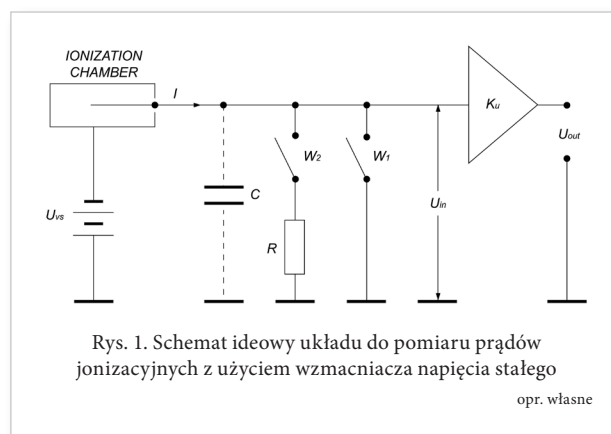
atomów znaczących. Do pomiaru tych prądów stosuje się elektrometry pracujące w trybie pomiaru ładunku lub prądu elektrycznego. Parametry metrologiczne elektrometrów są niewystarczające w przypadku odtwarzania jednostki kermy lub mocy kermy w powietrzu za pomocą wzorca pierwotnego w postaci komory jonizacyjnej. Należy wówczas zastosować elektrometry w trybie pomiaru napięcia i metody pomiaru pośredniego. Do metod tych należą m.in.: metoda prądowa, metoda ładunkowa oraz metoda zerowa.

Metody pomiaru małych ładunków i prądów

Metoda prądowa

W najprostszy sposób pomiaru prądu można dokonywać za pomocą wzmacniacza napięcia stałego, mierząc spadek napięcia na rezystorze wzorcowym. Schemat ideowy takiego rozwiązania pokazano na rys. 1.

W początkowym stanie włączniki W_1 i W_2 są zamknięte. Pomiar rozpoczyna się od otwarcia włącznika W_1 . Prąd



jonizacyjny I przepływa przez znany rezystor R . Na wejściu wzmacniacza napięcia stałego o wzmacnieniu K_u otrzymuje się napięcie U_{in} :

$$U_{in}(t) = I \cdot R \cdot (1 - e^{-\frac{t}{R \cdot C}}) \quad (1)$$

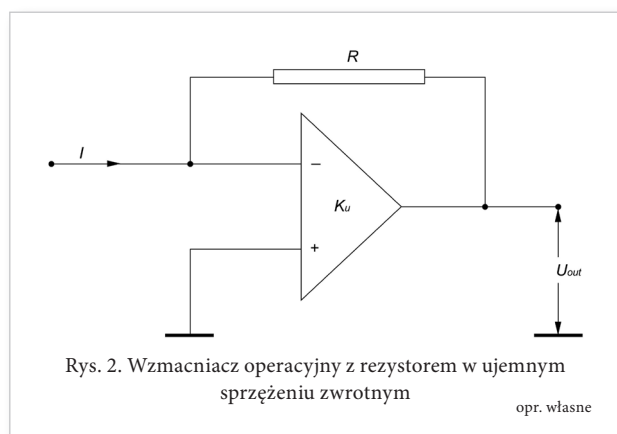
Na wyjściu wzmacniacza otrzymuje się napięcie U_{out} :

$$U_{out}(t) = K_u \cdot I \cdot R \cdot (1 - e^{-\frac{t}{R \cdot C}}) \quad (2)$$

Gdy czas pomiaru t jest dużo większy od stałej czasowej układu $R \cdot C$:

$$U_{out}(t) = K_u \cdot I \cdot R \quad (3)$$

W celu uzyskania proporcjonalności napięcia wyjściowego U_{out} do prądu jonizacyjnego I konieczne jest utrzymanie stałej wartości wzmacnienia K_u i stałej wartości opornika R . Najniższa wartość napięcia wejściowego U_{in} wzmacniacza napięcia stałego zależy od poziomu szumów i na ogół nie jest mniejsza niż 1 mV. Aby zmierzyć prąd jonizacyjny rzędu 10^{-15} A należy włączyć w obwód rezystor R o wartości rzędu $10^{12} \Omega$. W związku z powyższym powszechnie stosuje się wzmacniacze napięcia stałego, np. wzmacniacze operacyjne z wejściem prądowym, które uzyskuje się przez sprzężenie zwrotne. Schemat takiego układu przedstawiono na rys. 2. Pełnią one rolę przetwornika prądu na napięcie (I/U).



Na wyjściu układu otrzymuje się wówczas napięcie wyjściowe U_{out} wyrażone wzorem:

$$U_{out} = R \cdot \frac{K_u}{1 + K_u} \cdot I \quad (4)$$

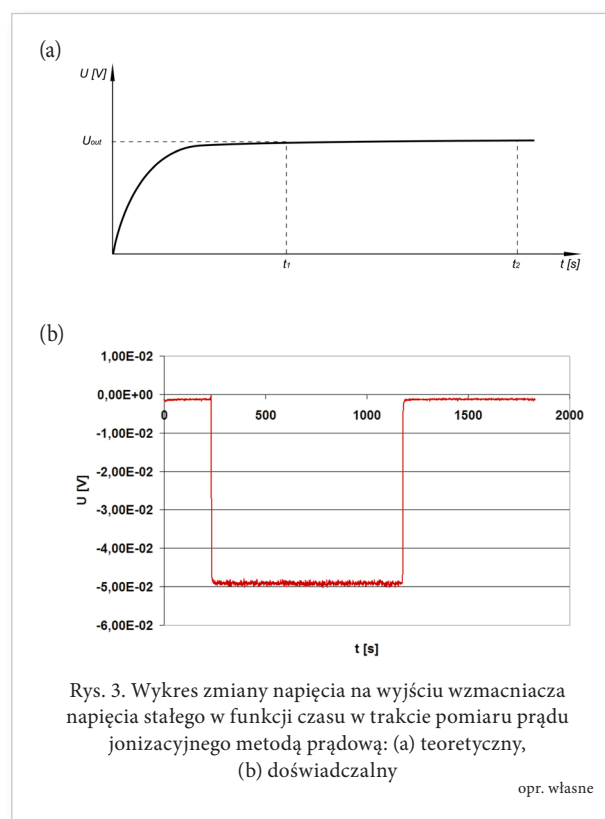
Gdy wzmacnienie K_u jest bardzo duże, wówczas napięcie wyjściowe U_{out} :

$$U_{out} = R \cdot I \quad (5)$$

Przekształcając powyższą zależność do postaci:

$$I = \frac{U_{out}}{R} \quad (6)$$

oraz odczytując wartość napięcia wyjściowego U_{out} i znając wartość rezystancji R oblicza się wartość mierzonego prądu jonizacyjnego I . W praktyce pomiaru napięcia wyjściowego U_{out} , a w konsekwencji pomiaru prądu jonizacyjnego I dokonuje się po czasie t_1 od chwili rozpoczęcia pomiaru (rys. 3), czyli po ustabilizowaniu się wartości tego napięcia.



Przy wykonywaniu pomiarów metodą prądową należy kontrolować stałość rezystancji R w czasie (częste wzorcowanie) i w temperaturze:

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot (\Delta T) + \beta \cdot (\Delta T)^2) \quad (7)$$

gdzie: R_0 – wartość rezystancji R w temperaturze odniesienia ($T = 23^\circ\text{C}$), ΔT – różnica między temperaturą w trakcie pomiaru, a temperaturą odniesienia ($\Delta T = T - 23^\circ\text{C}$), α i β – temperaturowe współczynniki zmian rezystancji. Z prawa Ohma wynika, że dla prądów jonizacyjnych należy zastosować duże rezystancje rzędu od $10^8 \Omega$ do $10^{12} \Omega$, gdyż przyłożone napięcie nie może przekraczać 1 V.

Zaletą metody prądowej jest prawie natychmiastowy wynik pomiaru prądu jonizacyjnego, a w konsekwencji wielkości dozymetrycznej, np. mocy dawki pochłoniętej. Ma to niezwykle istotne znaczenie w ochronie radiologicznej i wojskowości, gdyż pozwala prawie natychmiast uzyskać informację o natężeniu promieniowania jonizującego i o ewentualnym niebezpieczeństwie napromieniowania. Natomiast wadą metody prądowej jest mała czułość związana z ciągłym wpływem ładunku elektrycznego przez rezystor R .

Metoda ładunkowa

W celu uniknięcia dużej stałej czasowej i uzyskania maksymalnej czułości w pomiarach małych ładunków i prądów, można mierzyć szybkość narastania napięcia dU/dt na znanej pojemności elektrometru C_E . W tym celu usuwa się rezystor wejściowy elektrometru R_E i mierzy szybkość zmian napięcia dU/dt na skutek ładowania pojemności elektrometru C_E prądem mierzonym I . Prąd I oblicza się ze wzoru:

$$I = C_E \cdot \frac{dU}{dt} \quad (8)$$

W praktyce, wykorzystując układ przedstawiony na rys. 1, metodę można realizować jak następuje. W początkowym stanie włącznik W_1 jest zamknięty, a włącznik W_2 otwarty. Pomiar rozpoczyna się od otwarcia włącznika W_1 . Wówczas otrzymuje się na wejściu wzmacniacza napięcie U_{in} :

$$U_{in}(t) = \frac{1}{C} \int_0^t I \cdot dt = \frac{I \cdot t}{C} \quad (9)$$

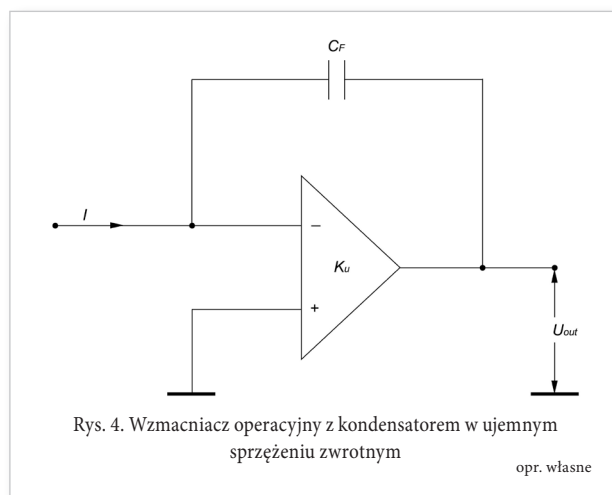
a na jego wyjściu napięcie U_{out} :

$$U_{out}(t) = I \cdot K_u \cdot \frac{t}{C} \quad (10)$$

Do wyznaczenia wartości prądu jonizacyjnego I powinny być znane wzmocnienie K_u , pojemność kondensatora C , stanowiąca sumę pojemności komory jonizacyjnej C_c i pojemności wejściowej elektrometru C_E , oraz czas pomiaru t . Niedogodności te można wyeliminować stosując ujemne sprzężenie zwrotne wraz z dodatkową pojemnością elektryczną kondensatora C_F (rys. 4) rzędu od 5 pF do 10 nF. Wówczas na wyjściu wzmacniacza napięcia stałego otrzymuje się napięcie wyjściowe U_{out} wyrażone wzorem:

$$U_{out} = \frac{Q}{C_F + \frac{C + C_E}{K_u}} \quad (11)$$

Gdy wzmocnienie K_u jest bardzo duże, wówczas napięcie wyjściowe U_{out} :



$$U_{out} = \frac{Q}{C_F} \quad (12)$$

Przekształcając powyższą zależność do postaci:

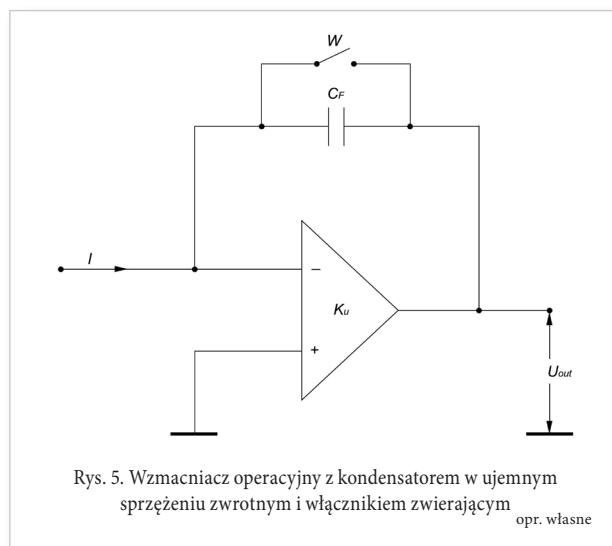
$$Q = C_F \cdot U_{out} \quad (13)$$

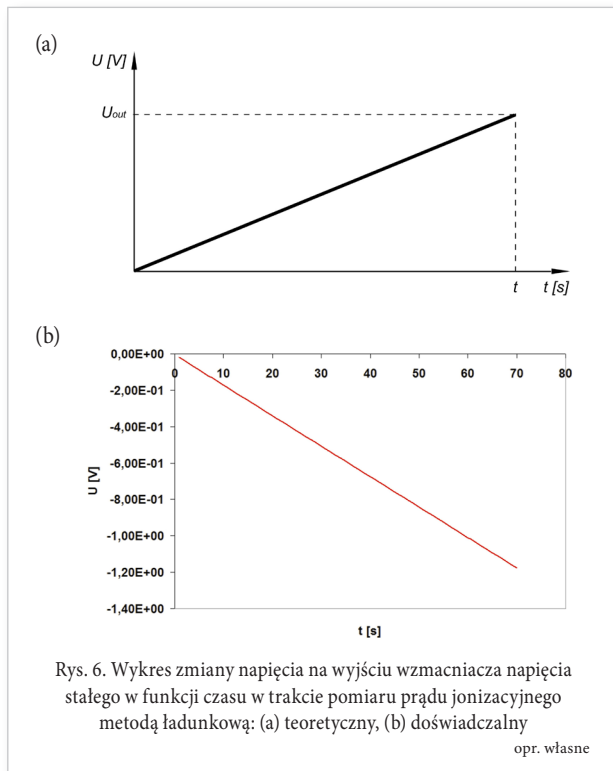
oraz odczytując wartość napięcia wyjściowego U_{out} i znając wartość pojemności kondensatora C_F oblicza się wartość mierzzonego ładunku jonizacyjnego Q .

Zatem mierzony prąd jonizacyjny I oblicza się jako iloczyn pojemności kondensatora C_F i napięcia wyjściowego U_{out} zmierzonego przez wzmacniacz napięcia stałego w czasie t :

$$I = C_F \cdot \frac{U_{out}}{t} = \frac{Q}{t} \quad (14)$$

Przed rozpoczęciem następnego pomiaru naładowany kondensator C_F musi zostać rozładowany. W tym celu zwię-





ra się obie okładki kondensatora C_F włącznikiem W , podłączonego do obu ich wyprowadzeń (rys. 5).

Zmiana napięcia wyjściowego U_{out} w poszczególnych chwilach czasu pomiaru t ma przebieg liniowy (rys. 6). W praktyce dielektryk kondensatora C_F posiada właściwości absorpcji dielektrycznej ładunku elektrycznego Q , która powoduje pogorszenie liniowości i powtarzalności napięcia wyjściowego U_{out} .

Mechanizm absorpcji dielektrycznej ładunku elektrycznego można wyjaśnić w sposób następujący. Podczas ładowania kondensatora na zewnętrznych powłokach atomów dielektryka umieszczonego między jego okładkami w wyniku odkształcenia orbit elektronów powstają dipole elektryczne. Dipole te zmieniają kierunek ustawienia pod wpływem pola elektrycznego. Im więcej dipoli ulega wpływom pola elektrycznego, tym kondensator może zgromadzić większy ładunek elektryczny, a zatem wykazuje większą pojemność elektryczną. Zmiana kierunków dipoli elektrycznych w dielektrykach stałych nie następuje natychmiast z chwilą przyłożenia napięcia do okładek kondensatora. Część dipoli elektrycznych zmienia swój kierunek z opóźnieniem. W efekcie następuje zwiększenie efektywnej pojemności kondensatora. Na kondensatorze naładowanym impulsem ładunku wystąpi napięcie będące wynikiem jego początkowej pojemności elektrycznej, które będzie się obniżać w czasie kilku godzin na skutek zwiększania się pojemności elektrycznej powodowanej opóźnioną zmianą kierunków

dipoli elektrycznych. Zmiana pojemności elektrycznej powoduje nieliniowe narastanie napięcia elektrycznego w trakcie ładowania kondensatora prądem stałym. Analogicznie będzie się zachowywał kondensator w trakcie rozładowywania, z tym tylko, że przedstawione zmiany będą miały kierunek przeciwny. Skutkiem krótkiego rozładowania kondensatora jest pozostanie części dipoli elektrycznych w pozycji wymuszonej przez poprzednio występujące pole elektryczne. Efektem tego jest zachowanie na kondensatorze części ładunku elektrycznego, a w konsekwencji występowanie pewnego napięcia elektrycznego między okładkami kondensatora. Zjawisko absorpcji dielektrycznej ładunku elektrycznego można zminimalizować poprzez zastosowanie rozwiązania przedstawionego w opisie patentowym [54] lub wykorzystując metodę zerową przedstawioną w dalszej części pracy. Jednak najczęściej minimalizuje się je poprzez zastosowanie kondensatorów powietrznych lub próżniowych, w których absorpcja dielektryczna ładunku elektrycznego jest nieznaczna. Dodatkowo w metodzie ładunkowej kontroluje się stałość pojemności kondensatora C_F w czasie (częste wzorcowanie) i w temperaturze:

$$C_F = C_0 \cdot (1 + k_C \cdot (\Delta T)) \quad (15)$$

gdzie: C_0 – pojemność kondensatora C_F w temperaturze odniesienia ($T = 23^\circ\text{C}$), ΔT – różnica między temperaturą w trakcie pomiaru a temperaturą odniesienia ($\Delta T = T - 23^\circ\text{C}$), k_C – temperaturowy współczynnik pojemnościowy.

Zaletą metody ładunkowej jest większa czułość niż metody prądowej, związana z gromadzeniem ładunku elektrycznego na kondensatorze C_F przez cały czas pomiaru. Wykorzystując metodę ładunkową, prąd jonizacyjny rzędu 10^{-12} A, BIPM mierzy ze względną niepewnością standardową 0,01 %. Wadą metody ładunkowej są długie czasy pomiaru rzędu (60 ÷ 100) s lub więcej.

Metoda zerowa

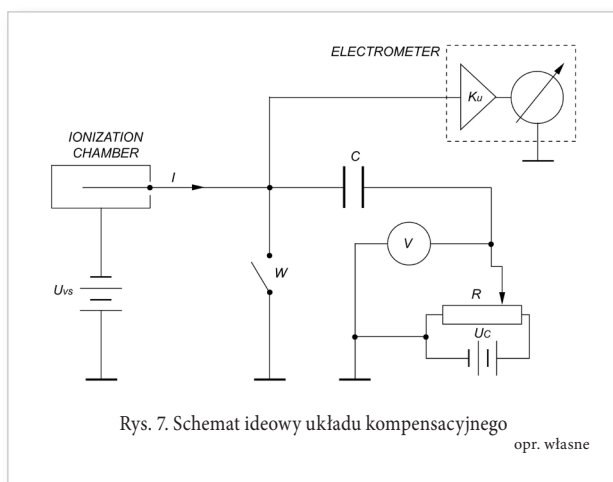
Metoda zerowa (kompensacyjna) polega na wyrównywaniu ubytku lub przyrostu ładunku elektrycznego, wywołanego prądem jonizacyjnym, przez doprowadzenie lub odprowadzenie z układu takiego samego ładunku. Schemat ideowy układu kompensacyjnego przedstawiono na rys. 7.

Elektrometr pracujący w trybie pomiaru napięcia elektrycznego lub wzmacniacz napięcia stałego 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

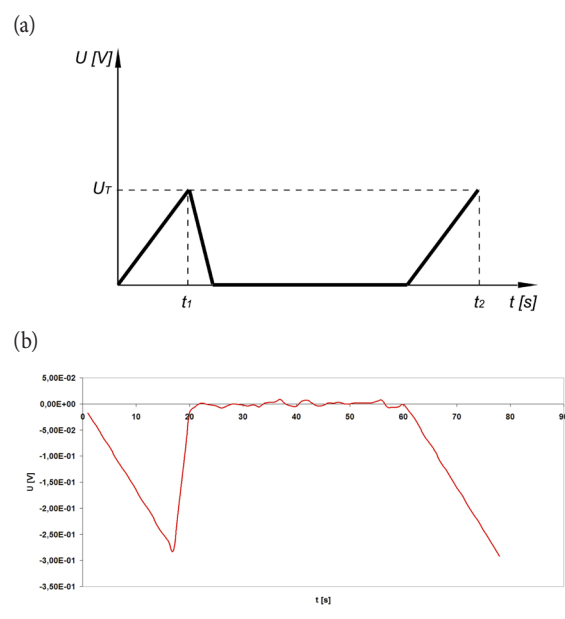
pomiaru operator przesuwą, przy zamkniętym włączniku W , styk ruchomy potencjometru R do położenia odpowiadającego napięciu U_C . Na okładkę kondensatora C , podłączoną do styku ruchomego, doprowadza się w ten sposób ładunek $+q = C \cdot U_C$. Na okładce kondensatora C podłączonej do elektrometru pojawia się ładunek $-q = -C \cdot U_C$. 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. Styk ruchomy potencjometru R przesuwany jest stopniowo przez

$$I = \frac{C \cdot U_C}{t} \quad (16)$$

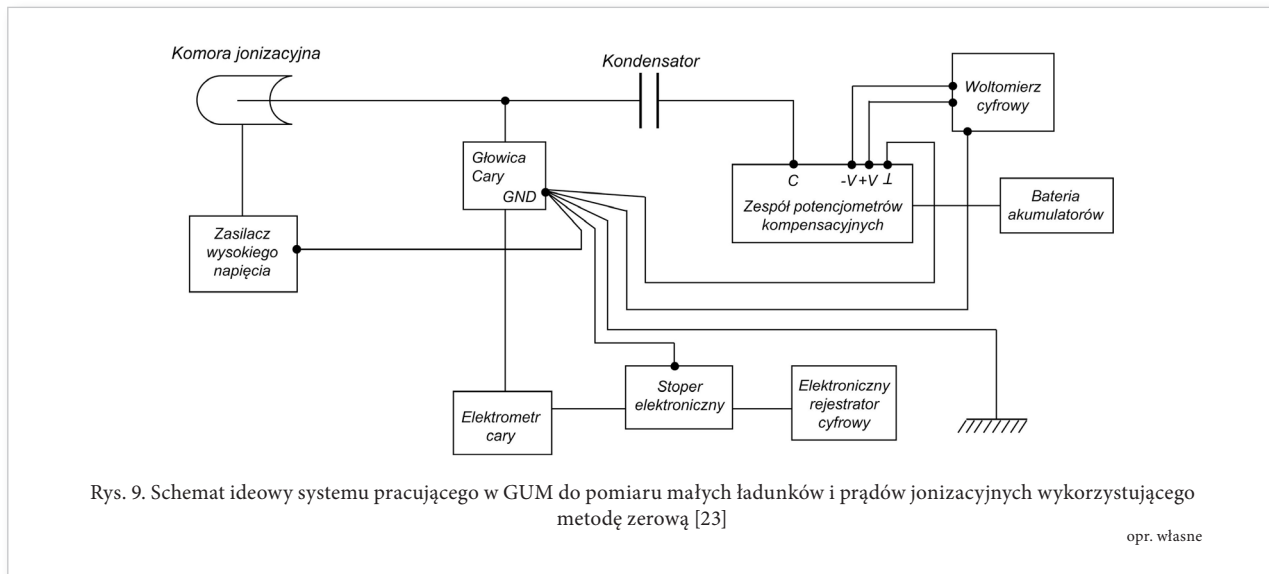
Pomiar prądu jonizacyjnego metodą zerową sprowadza się do pomiaru czasu i różnicy potencjałów, tj. do pomiarów wielkości, które można wyznaczyć z dużą dokładnością, podobnie jak pojemność kondensatora. Zmiana pojemności elektrycznej kondensatora w szerokim zakresie pojemności od 5 pF do 10 nF oraz zmiana 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. Czas kompensacji zapewniający pewny i spokojny odczyt zawiera się w przedziale od 30 s do 100 s, co jest główną wadą omawianej metody. W metodzie zerowej istotną rzeczą jest powtarzalność wartości progowej wyzwalania stopera. Realizuje się to przez przyłączenie do wyjścia analogowego elektrometru lub do wyjścia wzmacniacza napięcia stałego komparatora-wyzwalacza, który ustawia się na zadaną wartość napięcia U_T . W chwili, gdy napięcie wskazywane przez elektrometr lub wzmacniacz napięcia stałego osiąga wartość progową U_T ustawioną na komparatorze-wyzwalaczu następuje wysłanie sygnału prostokątnego TTL do stopera elektronicznego, który rozpoczyna pomiar czasu (rys. 8). Ustawienie wartości napięcia U_T pomija ładunek elektryczny zgromadzony przed rozpoczęciem procesu kompensacji na kondensatorze C i eliminuje zjawisko absorpcji dielek-



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 Δq uwolnionego w przeciągu pewnego czasu τ jest większa, czy mniejsza od ładunku $I \cdot \tau$ doprowadzonego w tym samym czasie przez prąd jonizacyjny I , wskazanie elektrometru oscyluje wokół położenia zajmowanego na początku okresu czasu τ . Szybkość przesuwania styku ruchomego potencjometru R jest dobrana tak, aby można było utrzymywać wskazanie elektrometru w pobliżu zera. 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 $C \cdot U_C$ zgromadzonego na okładce kondensatora C jest równa ilości ładunku $I \cdot t$ doprowadzonego przez prąd jonizacyjny I , zatem:



Rys. 8. Wykres zmiany napięcia na wyjściu wzmacniacza napięcia stałego w funkcji czasu w trakcie pomiaru prądu jonizacyjnego metodą zerową: (a) teoretyczny, (b) doświadczalny opr. własne



trycznej ładunku elektrycznego. Po rozpoczęciu pomiaru czasu operator poprzez potencjometr podaje napięcie na okładkę kondensatora, aż do momentu wskazania przez elektrometr wartości bliskiej zero. 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 wskazywanego przez elektrometr lub wzmacniacz napięcia stałego 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 $\Delta t = t_2 - t_1$. Metoda zerowa nie zawiera również błędów związanych z niedostateczną znajomością pojemności elektrometru, kabli pomiarowych itp., gdyż w zależności (16) występuje tylko pojemność kondensatora C . Istotną wadą metody zerowej jest konieczność stałej, na ogół ręcznej, kompensacji ładunku, co oprócz uciążliwości może uzależniać wynik pomiaru od osoby wykonującej pomiar.

Metoda zerowa wykorzystywana jest w Głównym Urzędzie Miar (GUM) na stanowisku wzorca pierwotnego kerry w powietrzu promieniowania gamma nuklidów ^{137}Cs i ^{60}Co . Wykorzystując metodę zerową prąd jonizacyjny rzędu 10^{-12} A, GUM mierzy ze względną niepewnością standardową 0,03 %.

Metoda zerowa jest jedną z najdokładniejszych metod pomiaru małych ładunków i prądów jonizacyjnych. Była ona szeroko stosowana do końca XX w. przez większość krajowych instytucji metrologicznych. W latach 60. i 70. ubiegłego wieku prowadzono szereg prac nad automatyzacją

procesu kompensacyjnego. 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.

Podsumowanie

Metoda zerowa jest jedyną metodą, która pozwala na pomiar małych prądów i ładunków elektrycznych, bez błędów związanych z upływnością ładunku i zjawiskiem absorpcji dielektrycznej ładunku elektrycznego. W GUM prowadzone są prace nad modernizacją stanowisk pomiarowych, mające na celu automatyzację z wykorzystaniem metody zerowej. Zbudowany w GUM 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 kerry w powietrzu w polu promieniowania gamma nuklidu ^{137}Cs można stwierdzić, że w przypadku wymaganej dużej dokładności pomiaru, jest ona jedyną alternatywą, a wykorzystanie elektrometru Keithley typ 6517A umożliwi jej pełną realizację. Oprócz tych pomiarów, przeprowadzane były pomiary z wykorzystaniem różnych urządzeń w charakterze komparator-wyzwalacz. Pomiary wykazały, że jest on istotnym elementem decydującym o właściwościach układu wykorzystującego metodę zerową, a wyniki tych prac zostaną również opublikowane. Za pomocą układu wykorzystującego elektrometr Keithley typ 6517A zmierzono prąd jonizacyjny rzędu 10^{-12} A ze względną niepewnością standardową 0,003 %. Najlepsze układy, wykorzystujące metodę ładunkową, mierzą prądy

elektryczne rzędu 10^{-12} A ze względną niepewnością standardową 0,01 %.

Bibliografia

- [1] W. J. Price, *Detekcja promieniowania jądrowego*, Państwowe Wydawnictwo Techniczne, Warszawa 1960.
- [2] K. K. Aglincew, *Dozymetria promieniowania jonizującego*, Państwowe Wydawnictwa Naukowe, Warszawa 1961.
- [3] J. M. Massalski, *Detekcja promieniowania jądrowego*, Państwowe Wydawnictwa Naukowe, Warszawa 1959.
- [4] L. Büermann, D. T. Burns, *Air – kerma cavity standards*, *Metrologia*, nr 46, 2009.
- [5] D. T. Burns, L. Büermann, *Free – air ionization chamber*, *Metrologia*, nr 46, 2009.
- [6] P. J. Allisy-Roberts, D. T. Burns, C. Kessler, *Measuring conditions used for the calibration of national ionometric standards at the BIPM*, *Rapport BIPM – 2007/2006*.
- [7] D. T. Burns, P. Roger, A. B. Knyziak, *Key comparison BIPM. RI(1) – K2 of the air – kerma standards of the GUM, Poland and the BIPM in low – energy x-rays*, *Metrologia*, nr 49, 2012.
- [8] *Wzorcowe promieniowanie rentgenowskie i gamma do kalibracji dawkomierzy i mierników mocy dawki oraz do określania ich charakterystyk energetycznych*, PN – EN 4037, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2002.
- [9] *Medyczne zestawy rentgenowskie diagnostyczne – Warunki promieniowania do stosowania przy określaniu charakterystyk*, PN – EN 61267, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2006.
- [10] *Calibration of Dose Meters Used in Radiotherapy*, International Atomic Energy Agency, Technical Report, nr 185, Vienna 1979.
- [11] P. J. Allisy-Roberts, C. Kessler, D. T. Burns, J. Kokociński, M. Derlaciński, *Comparisons of the standards for air kerma of the GUM and the BIPM for ^{60}Co and ^{137}Cs gamma radiation*, *Metrologia*, nr 48, 2011.
- [12] W. Katkiewicz, *Wybrane zagadnienia współczesnej elektroniki dozymetrycznej*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1970.
- [13] K. Korbel, *Układy elektroniki FRONT – END*, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2000.
- [14] *Low level measurements Handbook 6th Edition*, Keithley Instruments Inc., 2006.
- [15] *Model 617 Electrometer Instruction Manual* Keithley Instruments Inc., 1984.
- [16] *Model 619 Electrometer Instruction Manual* Keithley Instruments Inc., 1981.
- [17] *Model 6517A Electrometer User's Manual* Keithley Instruments Inc., 1996.
- [18] *Model 6430 Electrometer User's Manual* Keithley Instruments Inc., 2005.
- [19] A. Chwaleba, M. Poniński, A. Siedlecki, *Metrologia elektryczna*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2007.
- [20] S. Tumański, *Technika pomiarowa*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2007.
- [21] P. Horowitz, W. Hill, *Sztuka elektroniki*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2006.
- [22] P. J. Lamperti, T. P. Loftus, R. Loevinger, *Calibration of x – ray and gamma – ray measuring instruments*, National Bureau of Standards, 1988.
- [23] J. Piotrowski, *Podstawy miernictwa*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2007.
- [24] Z. Rusinowski, *Sposób ładowania lub rozładowania kondensatora*, Opis Patentowy PL 193125 B1, Departament Wydawnictw UP RP, Warszawa 2007.
- [25] G. Douysset, J. Gouriou, F. Delaunay, *Dose metrology for high dose rate brachytherapy: from the definition of the national standard towards transfer to users*, *Revue Francaise de Metrologie*, nr 10, 2007.
- [26] Z. Referowski, *Opracowanie państwowych wzorców pierwotnych dawki ekspozycyjnej promieniowania fotonowego*, Polski Komitet Normalizacji i Miar, Warszawa 1974.
- [27] G. J. Hine, G. L. Brownell, *Radiation dosimetry*, Academic Press Inc., New York 1956.
- [28] *Medyczne urządzenia elektryczne. Dawkomierze z komorami jonizacyjnymi stosowane w radioterapii*, PN – EN 60731, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2006.