

Zygmunt J. Grabarczyk

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy w Warszawie

Pomiar ładunku elektrycznego przenoszonego w czasie wyładowania elektrostatycznego dla potrzeb oceny ryzyka zapłonu atmosfer wybuchowych i rażeń elektrostatycznych

Measurement of electric charge transferred by electrostatic discharge, for the risk of explosive atmospheres ignition and electrostatic shock assessment

Streszczenie

Autor ocenia możliwość zastosowania ładunku elektrycznego przenoszonego przez wyładowania elektrostatyczne, jako narzędzia do oceny zagrożeń elektrostatycznych. Analizę skoncentrowano na zagrożeniu zapłonem atmosfer wybuchowych oraz na rażeniach elektrostatycznych doznawanych przez pracowników. Dyskutowane są cyfrowe i analogowe metody pomiaru ładunku, z naciskiem położonym na zalety analogowego całkowania ładunku przez pojemność elektryczną. Stosując metodę transformacji Laplace'a, wyprowadzono równanie do obliczania błędu pomiaru ładunku, wykonywanego za pomocą sondy pojemnościowej.

Słowa kluczowe: *błąd pomiaru ładunku elektrostatycznego, kulombomierz, wyładowania elektrostatyczne, zagrożenia elektrostatyczne.*

Abstract

The author evaluates the possibility of the usage of electric charge transferred by electrostatic discharges (ESD), as a tool for the assessment of electrostatic hazards. Analysis was focused on the risk of explosive atmospheres ignition and electrostatic shocks experienced by the workers. The digital and analogue methods of the charge measurement were discussed, with the stress put on the advantages of charge integration by electric capacitance. The equation for calculation of the error of

transferred charge measurement with the capacitive probes was derived by applying the Laplace transformation.

Keywords: *electrostatic charge measurement error, coulombmeter, electrostatic discharges, electrostatic hazards.*

1. Wprowadzenie

Wyładowania elektrostatyczne (ang. ESD) są obecnie zjawiskiem powszechnym. Ich energie zawierają się w zakresie od mikrodżuli do pojedynczych dżuli. Wytwarzając lokalnie krótkotrwałe kanały plazmowe o temperaturze od ok. tysiąca do kilkunastu tysięcy Kelwinów, mogą zapalać atmosfery wybuchowe, wytwarzać fale elektromagnetyczne zakłócające pracę układów elektronicznych, mogą uszkadzać urządzenia półprzewodnikowe, a także są odczuwalne przez ludzi, jako nieoczekiwane, przykre lub bolesne rażenia. Większość tych zjawisk jest szkodliwa lub niebezpieczna i przynosząca straty materialne, dlatego muszą być brane pod uwagę przy zarządzaniu bezpieczeństwem pracy. Ochrona antyelektrostatyczna jest obowiązkowa w przestrzeniach zagrożonych wybuchem, na terenie całej Unii Europejskiej [3]. Zakres ochrony uzależniony jest od zasięgu i rodzaju stref zagrożenia wybuchem oraz własności atmosfer wybuchowych.

Najpoważniejszym zagrożeniem, które stwarzają wyładowania elektrostatyczne, jest możliwość zapłonu atmosfer wybuchowych występujących w wielu zakładach przemysłowych oraz magazynach i środkach transportu. Wyładowania te są przyczyną ok. 8,5% wszystkich zapłonów pyłowych atmosfer wybuchowych [1,7].

Innym, istotnym problemem, są odczuwalne wyładowania elektrostatyczne poprzez ciało człowieka, zwane rażeniami elektrostatycznymi [4]. Zazwyczaj nie powodują one skutków patofizjologicznych, natomiast często wywołują lękowe odruchy, które bywają przyczyną urazów mechanicznych, a niekiedy ciężkich obrażeń. Nie jest obecnie znana statystyka tych wypadków.

Warunkiem zaistnienia zdarzenia wypadkowego z jednego z wymienionych obszarów, jest przekroczenie wartości krytycznych przez określone, kryterialne parametry wyładowania. W przypadku zagrożenia wybuchowego, takim kryterium najczęściej jest energia wyładowania, a poprawniej energia pola elektrostatycznego, którą utracił układ naelektryzowany w trakcie wyładowania. Jeżeli energia ta jest równa lub większa od energii zapłonu danej atmosfery wybuchowej, to prawdopodobieństwo zapłonu jest bardzo duże. Zazwyczaj wartość energii zapłonu określonej atmosfery wybuchowej nie może być z góry

przewidziana, dlatego jako kryterium, stosuje się tzw. minimalną energię zapłonu (MEZ, ang. MIE), czyli najmniejszą z możliwych wartości energii zapłonu przy optymalnym stężeniu czynnika palnego w powietrzu atmosferycznym. Jednym z najistotniejszych środków przeciwybuchowej ochrony antyelektrostatycznej jest uniemożliwienie zgromadzenia w polu elektrostatycznym obiektu naelektryzowanego energii o wartości równej lub większej od MEZ, czyli w praktyce uniemożliwienie kumulowania nadmiernego ładunku elektrostatycznego na powierzchni odizolowanych przewodników (w tym także ciała człowieka) oraz dielektryków stałych, ciekłych, sypkich i rozproszonych w powietrzu. Z powodu dużej niepewności pomiarów elektrostatycznych, zwłaszcza w warunkach przemysłowych, w ochronie antystatycznej w kraju dominuje podejście zachowawcze, polegające na stosowaniu bardzo dużego marginesu bezpieczeństwa (dziesięciokrotnego), co jednak może podrażać procesy technologiczne.

2. Przydatność wartości ładunku przenoszonego przy wyładowaniu do oceny ryzyka zapłonu lub rażenia

Bezpośredni pomiar energii wyładowania ani energii W , zgromadzonej w polu elektrostatycznym obiektu naelektryzowanego, nie jest możliwy, można ją wyznaczyć w niektórych przypadkach metodą pośrednią. W przypadku odizolowanych obiektów przewodzących, można ją wyznaczyć na podstawie pomiaru pojemności elektrycznej C obiektu w stosunku do ziemi oraz potencjału elektrycznego U ładunku elektrostatycznego Q zgromadzonego na powierzchni tego obiektu, wg zależności:

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{QU}{2} = \frac{Q^2}{2C} \quad (1)$$

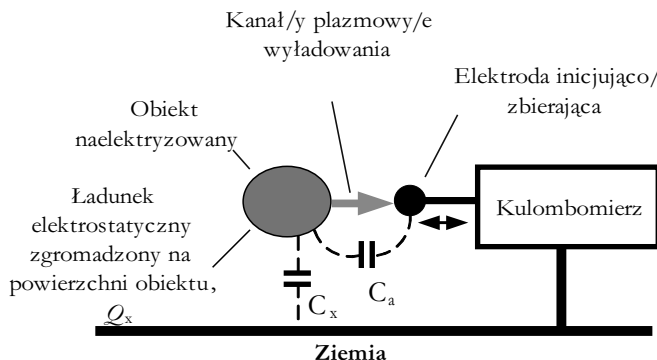
Zależność ta nie jest przydatna w przypadku naelektryzowanych dielektryków. W odróżnieniu od obiektu przewodzącego, potencjał ładunku nie musi być i zazwyczaj nie jest jednakowy na całej powierzchni dielektryka. Z tego powodu także nie można zdefiniować tutaj pojęcia pojemności elektrycznej. Można skorzystać z przybliżonej, pół empirycznej zależności [11]:

$$W = K \left(V_1 q - \frac{q^2}{2C_d} \right) \quad (2)$$

gdzie: K – stała doświadczalna, V_1 – średni potencjał powierzchni dielektryka, q – ładunek przeniesiony w czasie wyładowania, C_d – pojemność różnicowa, tzn. stosunek ładunku przeniesionego w czasie wyładowania i różnicy potencjału powierzchni przed wyładowaniem i po wyładowaniu

Ponadto, o ile w przypadku naelektryzowanych obiektów przewodzących wyładowanie ma charakter iskrowy i jest wyładowaniem zupełnym (praktycznie prawie cały ładunek zostaje zneutralizowany), to przy wyładowaniach z dielektryków wyładowania są niezupełne (istotna część ładunku po wyładowaniu nadal pozostaje na powierzchni dielektryka), co uwzględniono w zależności (2). Również wartość samej energii wyładowania nie jest wystarczająco precyzyjną miarą ryzyka. O możliwości zapłonu decydują oprócz wartości energii, także moc wydzielana w kanale plazmowym i czas trwania wyładowania. Dlatego poszukuje się innego, bardziej uniwersalnego parametru, pozwalającego na dokładniejsze szacowanie ryzyka zapłonu. W ciągu kilkunastu ostatnich lat znacznie wzrosło zainteresowanie ładunkiem elektrycznym przenoszonym w czasie wyładowania przez kanał plazmowy. Idea pomiaru ładunku przeniesionego w czasie wyładowania przez kanał plazmowy pokazana jest na rys. 1.

Z zależności (2) wynika, że co najmniej w 1984 roku uwzględniano ten ładunek. Jednak wtedy jego wartość stosowano do wyznaczenia energii wyładowania. Natomiast Von Pidoll [13] zaproponował wykorzystanie go bezpośrednio do oceny zapalności atmosfer wybuchowych, zamiast energii wyładowania. Z jego badań wynika, że zastąpienie MEZ minimalnym ładunkiem zapalającym (MŁZ, ang. MIQ) jest korzystne, ponieważ wartość ładunku zapalającego jest znacznie mniej zależna od wzajemnej odległości elektrod oraz od różnicy potencjału między nimi, niż w przypadku MEZ. Parametr ten wyznacza się w układzie pomiarowym identycznym jak dla MEZ (wyładowanie iskrowe z wzorcowego kondensatora, w komorze zawierającej badaną atmosferę wybuchową). Ponadto jest on bardziej jednoznaczny, niezależnie od rodzaju wyładowania, tzn. ma zbliżoną wartość dla wyładowań iskrowych między przewodnikami, jak i dla wyładowań snopiastych między dielektrykiem i przewodnikiem.



Rys. 1. Schemat idealny metody pomiaru ładunku elektrostatycznego przeniesionego przez kanał/y plazmowy/e w czasie wyładowania elektrostatycznego między przewodzącym obiektem naelektryzowanym i elektrodą zbierającą ładunek, inicjującą wyładowanie. Q_x – ładunek skumulowany na powierzchni obiektu naelektryzowanego, C_x – pojemność elektryczna obiektu naelektryzowanego, względem ziemi, C_a – pojemność elektryczna między obiektem naelektryzowanym a elektrodą inicjującą sondy pomiarowej

W przypadku zagrożenia rażeniem elektrostatycznym, brak jest jednoznacznego kryterium oceny z powodu dużej osobniczej zmienności wrażliwości (percepcji wyładowań) u ludzi. Ponadto występuje tu szeroki wachlarz wrażeń, poczynając od odczucia dotyku, lekkiego ukłucia, silnego ukłucia, bólu, lokalnego skurczu mięśni, a w bardzo rzadkich przypadkach po utracie przytomności i zaburzenia lub wstrzymanie akcji serca. Badania prowadzone nad percepcją wyładowań pojemnościowych przez Guderską [10], wykazały średnie wartości napięcia progowego percepcji wyładowania, na poziomie 2,3 kV dla kobiet i 2,4 kV dla mężczyzn, co odpowiada wartościom energii odpowiednio 0,05 – 0,6 mJ dla kobiet i 0,05 – 0,8 mJ dla mężczyzn. Wg Guderskiej wyładowania są odczuwalne, jako ukłucie od ok. 5 kV (0,8 – 1,2 mJ) zarówno przez mężczyzn, jak i kobiety. Z kolei wg Brittona [2] próg percepcji leży w zakresie 0,5 – 2 mJ, czyli pokrywa się częściowo z progiem odczuwania ukłucia wg Guderskiej. Przyjmowanie jako kryterium wartości energii wyładowania ma takie same wady jak omówione powyżej dla zagrożenia wybuchowego, natomiast wartość progowa napięcia zależy od rezystancji naskórka i skóry (a w praktyce od ich grubości i wilgotności). Dlatego zdaniem autora, odpowiednim parametrem, który jednocześnie można bezpośrednio mierzyć, wydaje się wartość ładunku transferowanego przez pojedyncze wyładowanie przez ciało człowieka.

Jednym z istotnych mechanizmów elektryzacji obiektów przewodzących odizolowanych od ziemi jest elektryzacja przez indukcję. Po umieszczeniu obiektu przewodzącego (np. ciała człowieka) w polu elektrycznym, dochodzi do polaryzacji (rozsunięcia ładunków dodatnich i ujemnych na powierzchni obiektu). W takiej sytuacji możliwe jest wyładowanie elektrostatyczne przy zbliżeniu do innego obiektu przewodzącego, zwłaszcza uziemionego. Takie wyładowanie de facto powoduje naładowanie rozpatrywanego obiektu, tak że po usunięciu go z pierwotnego pola elektrycznego, obiekt ten pozostaje naelektryzowany i może dojść do drugiego wyładowania z jego powierzchni po kolejnym zbliżeniu do innego przewodnika. W tym przypadku najodpowiedniejszym parametrem oceny zagrożenia rażeniem lub zainicjowania wybuchu jest wartość ładunku elektrycznego zaindukowanego na powierzchni odizolowanego przewodnika przez zewnętrzne pole elektryczne. Ładunek ten można wyznaczyć z zależności:

$$Q_i = \epsilon_0 \iint_S E \cdot ds \quad (3)$$

gdzie: Q_i – ładunek zaindukowany na powierzchni obiektu przewodzącego przez zewnętrzne pole elektryczne, E – wektor natężenia pola elektrycznego przy powierzchni obiektu przewodzącego, ds – wektor powierzchni przewodzącej, S – ta część powierzchni obiektu przewodzącego ekspozycyjnej na pole elektryczne, na której iloczyn skalarny wektora powierzchni i wektora natężenia pola ma ten znak tylko dodatni albo tylko ujemny

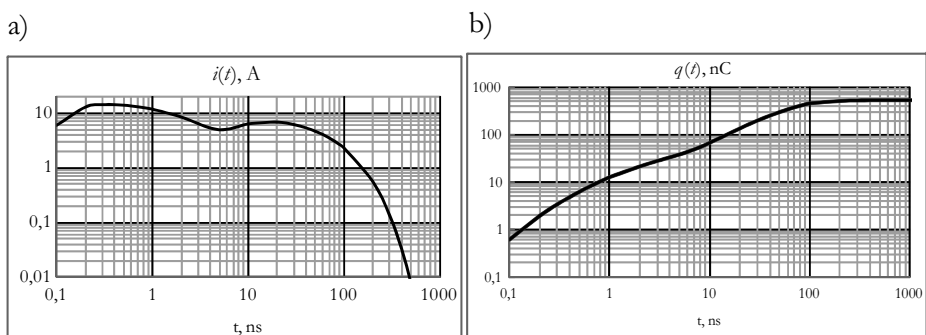
Ładunek ten można zmierzyć kulombomierzem, przez sprowokowanie wyładowania lub bezpośredni kontakt elektrody probierczej kulombomierza z obiektem naelektryzowanym przez indukcję.

3. Pomiar ładunku przenoszonego przez kanał plazmowy w czasie wyładowania elektrostatycznego

W omówionych obszarach podstawą do oceny zagrożenia może być wykonanie pomiaru ładunku przenoszonego przez wyładowania. Należy podkreślić na początku, że badań z prowokowaniem wyładowania nie wolno wykonywać w obecności atmosfer wybuchowych. Niezależnie od zastosowanego urządzenia pomiarowego, każda z metod pomiaru ładunku polega na scałkowaniu natężenia prądu po czasie. Całkowanie może być wykonane metodą numeryczną lub metodą analogową (w pojemności elektrycznej).

Całkowanie numeryczne polega na cyfrowym pomiarze natężenia prądu wyładowania i sumowaniu odczytów na bieżąco (całkowanie typu „on-line”) lub po zarejestrowaniu całego przebiegu (całkowanie „off-line”). Każda z wartości natężenia prądu musi być tu przemnożona przez interwał czasowy między odczytami. Całkowanie analogowe jest zawsze całkowaniem w czasie rzeczywistym, czyli jest typu „on-line”. Ponieważ czasy trwania pojedynczych wyładowań elektrostatycznych są stosunkowo małe, od kilkudziesięciu nanosekund do dziesiątek lub setek mikrosekund (w zależności od impedancji obwodu rozładowania), to całkowanie numeryczne natężenia prądu wymaga bardzo szybkich przetworników analogowo/cyfrowych (A/C) lub bardzo szybkich rejestratorów. W tym celu często wykorzystuje się szerokopasmowe oscyloskopy cyfrowe. Muszą one charakteryzować się pasmem przenoszonym nie mniejszym od 500 MHz i szybkością próbkowania nie mniejszą od 1 GS/s. Zaletą ich stosowania jest możliwość obserwacji kształtu impulsu prądowego wyładowania i ewentualne wykrycie wyładowań wielokrotnych. Wyładowania dla potrzeb tej metody prowokuje się odpowiednią sondą zakończoną metalową elektrodą sferyczną (lub półsferyczną), połączoną z uziemieniem przez odpowiedni rezystor pomiarowy o małej rezystancji, poniżej 1Ω (ang. „target”). W dalszej części artykułu taki układ będzie nazywany „sondą rezystancyjną”.

Typowy kształt przebiegu wyładowania iskrowego pokazano na rys. 2. Obliczono go na podstawie teoretycznego modelu wyładowania iskrowego [8].



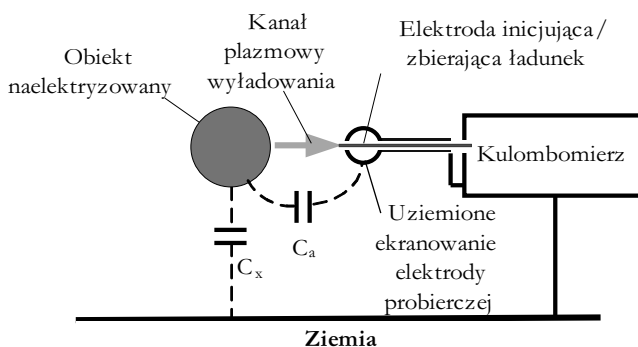
Rys. 2. Przykładowy przebieg wyładowania elektrostatycznego iskrowego pojemnościowego, na podstawie modelu J. Sroki. a) impuls prądu, b) ładunek transferowanego w czasie wyładowania, w funkcji czasu trwania wyładowania

Z rys. 2. wynika, że poprawna rejestracja natężenia prądu wyładowania wymaga dynamiki miernika lub rejestratora, co najmniej 1:1000. Większość współczesnych szybkich oscyloskopów charakteryzuje nieco mniejsza dynamika (8 lub 9 bitów, czyli 1:156 lub 1: 512), co ogranicza dokładność pomiaru natężenia prądu impulsu. Z rys. 1. wynika jednak, że główny transfer ładunku zachodzi w przedziale czasowym od ok. 1 do 100 ns. W tym przedziale dynamika natężenia prądu jest rzędu 1:20, zatem powyżej podana rozdzielczość oscyloskopów jest wystarczająca do wyznaczania ładunku przenieszonego przez wyładowanie elektrostatyczne. Wadą oscyloskopów jest ich znaczny koszt, wielkość i ciężar, które predestynują je bardziej do badań laboratoryjnych niż w zakładach pracy.

Znacznie tańsze i prostsze w konstrukcji są kulombomierze analogowe, oparte na kumulacji ładunku w pojemnościach rzeczywistych (kondensatorach) lub wirtualnych (wzmacniaczach operacyjnych z kondensatorem w pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego). Analizę modelu układu pomiarowego realizującego tę metodę przeprowadzono w następnym rozdziale tego artykułu.

Niezależnie od zastosowanej metody, najistotniejsza jest konstrukcja elektrod do prowokowania wyładowania i zbierania ładunku. Zazwyczaj stosowane są elektrody metalowe o kształcie sfery lub połowy sfery. Od średnicy sfery zależy wartość natężenia pola elektrycznego przy jej powierzchni, w trakcie zbliżania do obiektu naelektryzowanego, a stąd także rodzaj wyładowania. W celu sprowokowania wyładowań iskrowych z powierzchni obiektu przewodzącego, średnica sfery powinna być nie mniejsza niż 50 mm [6], natomiast wyładowań snopiastych z powierzchni dielektryka (także z obiektu przewodzącego), średnica sfery powinna leżeć w zakresie od 5 mm do 50 mm [6], przy czym w praktyce stosuje się średnice z zakresu 15 do 25 mm. Wyładowania snopiaste wymagają różnicy potencjału między obiektem naelektryzowanym i elektrodą rzędu kilkunastu do kilkudziesięciu kV, przy czym im średnica kuli jest mniejsza, tym wartość wymaganego napięcia jest także mniejsza. Zastosowanie mniejszych średnic, do elektrod ostrzowych włącznie, powodować może wyładowania ulotowe. Ponieważ wyładowania te nie powodują zapłonu atmosfer palnych (za wyjątkiem atmosfer o zwiększonym stężeniu tlenu, a być może także atmosfer najczulszych – di-siarczku węgla, wodoru, acetylenu, etylenu), to obecnie nie są przedmiotem analizy dla potrzeb oceny ryzyka zapłonu. Uwaga! Wyładowania ulotowe, w przypadku zasilania elektrod ze źródła napięcia stałego, mogą przechodzić w wyładowania iskrowe.

Stosowanie elektrody sferycznej połączonej z układem do pomiaru ładunku jest stosowane od kilkudziesięciu lat. Jednak już Taylor i Secker [12] w 1994 roku zwrócili uwagę, że przepływ ładunku w układzie pomiarowym zaczyna się przed rozpoczęciem wyładowania, w trakcie zbliżania elektrody do obiektu naelektryzowanego. Jest to prąd przesunięcia, towarzyszący przemieszczaniu się ładunku w układzie, w trakcie przysuwania elektrody pomiarowej do źródła pola elektrostatycznego. W czasie trwania wyładowania, napięcie elektryczne obiektu naelektryzowanego zmniejsza się, powodując przepływ dodatkowego prądu przesunięcia przez obwód pomiarowy, o kierunku przeciwnym do kierunku prądu przewodzenia. Ponieważ o zapłonie decyduje wyłącznie prąd przewodzenia płynący przez kanał plazmowy w czasie wyładowania, to celem pomiaru dla potrzeb oceny ryzyka wybuchu, jest zmierzenie jedynie ładunku przeniesionego przez kanał plazmowy. Ten problem dla przypadku sondy rezystancyjnej, był intensywnie dyskutowany w literaturze przedmiotu [14,15] i wykazano, że nie uwzględnienie zjawiska prądów przesunięcia prowadzi do znacznych błędów ujemnych pomiaru ładunku. Problem ten rozwiązuje się obecnie ekranując elektrodę zbierającą ładunek (rys. 3).

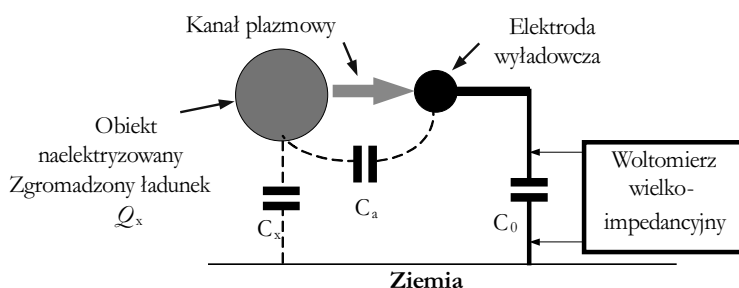


Rys. 3. Schemat ideowy metody ekranowania elektrody zbierającej ładunek

Liczba atmosfer, dla których określono minimalny ładunek zapalający (MŁZ) jest jeszcze istotnie mniejsza niż tych, dla których wyznaczono MEZ, jednak stale wzrasta [5]. Zaletą metody MŁZ jest możliwość bezpośredniego zmierzenia ładunku transferowanego w czasie wyładowania. Istotnym ograniczeniem jest konieczność wykonywania pomiaru ładunku transferowanego, poza strefami zagrożenia wybuchem, w celu uniknięcia zapłonu atmosfery wybuchowej. Obecnie w CIOP-PIB prowadzi się prace nad eliminacją zagrożenia wybuchowego przy stosowaniu tej metody.

4. Analiza dokładności pomiaru ładunku przenieszonego w czasie wyładowania przy zastosowaniu sondy pojemnościowej

Jak wspomniano, zastosowanie analogowej metody pomiaru ładunku przenieszonego przez kanał plazmowy, może być prostsze i tańsze niż metody cyfrowej. Poniżej przeanalizowano metodę pojemnościową z elektrodą sferyczną nieekranowaną, a następnie sprawdzono wpływ dodatkowego ekranowania elektrody na dokładność pomiaru. Do analizy zastosowano model pokazany na rys. 4.



Rys. 4. Model układu z sondą pojemnościową, do pomiaru ładunku przenieszonego w czasie wyładowania elektrostatycznego. C_0 – pojemność kondensatora pomiarowego, zbierającego ładunek przenieszony w czasie wyładowania.

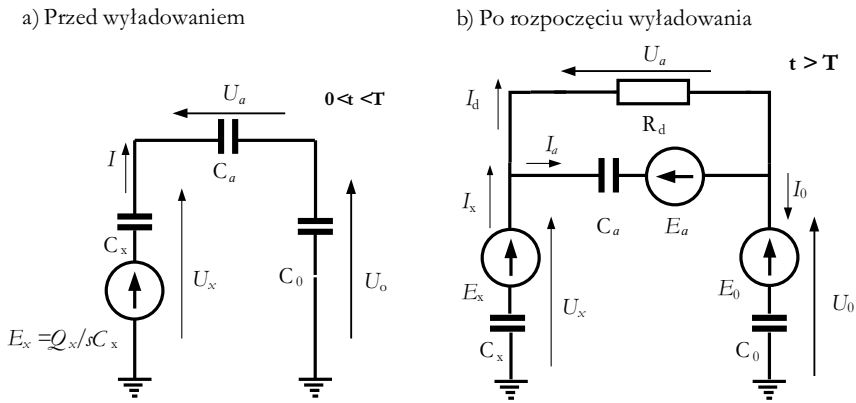
W celu uzyskania analitycznego rozwiązania, zastosowano następujące założenia upraszczające:

- rezystancja układu, za wyjątkiem kanału plazmowego, jest równa zero,
- indukcyjność układu jest pomijalna,
- rezystancja kanału plazmowego jest stała w czasie,
- rezystancja wejściowa woltomierza jest nieskończenie duża a natężenie jego wejściowego prądu polaryzacji jest równe zero.

Przyjmując, że wyładowanie rozpoczyna się w momencie $t = 0$, czas $t < 0$ obejmuje okres zbliżania sondy pomiarowej (a w zasadzie elektrody wyładowczej) do obiektu naelektryzowanego, natomiast $t > 0$ obejmuje okres trwania wyładowania. Do dalszych rozważań przyjęto, że czas trwania wyładowania jest równy ΔT .

Do analizy zachowania modelu zastosowano powszechnie stosowaną w elektrotechnice do badania stanów nieustalonych, analizę opartą na transformacji Laplace'a [8]. Elektryczny schemat zastępczy, modelu z rys. 4. pokazano na rys. 5., przy czym rys. 5a. ilustruje okres przed nastąpieniem wyładowania, a rys. 5b. okres trwania wyładowania.

W czasie zbliżania sondy do obiektu naelektryzowanego rozpoczyna się w obwodzie z rys. 5a. przepływ prądu przesunięcia, $I(s)$. Ponieważ założono, że obwód nie zawiera elementów dysypatywnych, to przesunięcia ładunków można uważać za natychmiastowe.



Rys. 5. Schemat zastępczy układu z sondą pojemnościową, do pomiaru ładunku przenoszonego w czasie wyładowania elektrostatycznego. a) przed nastąpieniem wyładowania, w trakcie zbliżania sondy do obiektu naelektryzowanego, b) po rozpoczęciu wyładowania

Podstawowym parametrem układu, podlegającym zmianom, jest pojemność elektryczna C_a między obiektem uziemionym i elektrodą wyładowczą. W momencie $t = 0$, czyli w momencie rozpoczynania się wyładowania, spadki napięć w układzie z rys. 5a, wyrażone w przez transformaty Laplace'a, wynoszą odpowiednio:

$$U_0 = L[u(t)] = \frac{Q_x}{s} \frac{C}{C_x C_0}, \quad U_a = L[u(t)] = \frac{Q_x}{s} \frac{C}{C_x C_a}, \quad U_x = L[u(t)] = \frac{Q_x}{s C_x} \left(1 - \frac{C}{C_x} \right), \quad (4)$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_a} + \frac{1}{C_0} + \frac{1}{C_x} \quad L[u(t)] = \int_0^{\infty} u(t) e^{-st} dt$$

gdzie: s – operator Laplace'a, $L[u(t)]$ – transformata Laplace'a funkcji $u(t)$, Q_x = ładunek zgromadzony na powierzchni odizolowanego obiektu naelektryzowanego

W momencie $t = 0$, schemat zastępczy układu zmienia się do postaci z rys. 5b., na skutek powstania przewodzącego kanału plazmowego, reprezentowanego przez rezystancję R_d . Ponieważ wszystkie z pojemności zostały do czasu $t = 0$ naładowane, to w nowym układzie muszą być rozpatrywane jako szeregowe połączenie pojemności ze źródłem napięciowym E reprezentującym ładunek w danej pojemności. Łatwo zauważyć, że zachodzą równości:

$$E_o = \frac{Q_x}{s} \frac{C}{C_x C_o}, \quad E_a = \frac{Q_x}{s} \frac{C}{C_x C_a}, \quad E_x = \frac{Q_x}{s C_x} \left(1 - \frac{C}{C_x}\right) \quad (5)$$

Schemat z rys. 5b. można opisać układem równań Kirchhoffa, w dziedzinie Laplace'a:

$$\begin{aligned} I_x &= I_o = I_a + I_d \\ I_d R_d &= E_a + \frac{1}{s C_a} I_a \\ E_x - \frac{1}{s C_x} I_x - E_a - \frac{1}{s C_a} I_a - E_o - \frac{1}{s C_o} I_o &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

Z układu równań (5) wynika, że $E_x - E_a - E_o = 0$.

Względny błąd traktowania ładunku Q_o zgromadzonego w pojemności pomiarowej C_o , jako ładunku Q_d przeniesionego w czasie wyładowania przez rezystancję R_d , wynosi:

$$\delta_d = \frac{Q_o - Q_d}{Q_d} = \frac{u_o(t > \Delta T) C_o - \int_0^{t > \Delta T} i_d(t) dt}{\int_0^{t > \Delta T} i_d(t) dt}, \quad u_o(t) = L^{-1}(U_o(s)), \quad i_d(t) = L^{-1}(I_d(s)) \quad (7)$$

gdzie $L^{-1}()$ – odwrotna transformata Laplace'a

Do obliczenia błędu pomiaru ładunku, konieczne jest wyprowadzenie wzoru na spadek napięcia $u_o(t)$ na kondensatorze pomiarowym C_o oraz na prąd wyładowania w kanale plazmowym $i_d(t)$. Zależności te wyprowadzono z układu równań Kirchhoffa (6).

$$I_d = Q_x \frac{C}{C_x C_a R_d} \left[\frac{1}{s} - \frac{\alpha}{s(s+\alpha)} \right] \quad \alpha = \frac{1}{R_d \left(\frac{C_0 C_x}{C_0 + C_x} + C_a \right)} \quad (8)$$

$$i_d(t) = Q_x \frac{C}{C_x C_a R_d} e^{-\alpha t}$$

Całkując prąd wyładowania po czasie, w przedziale od $t = 0$ do $t = \Delta T$, wyznaczono wartość ładunku Q_d , przenoszoną przez prąd przewodzenia przez kanał plazmowy:

$$Q_d = Q_x \frac{C_0}{C_0 + C_x} [1 - e^{-\alpha \Delta T}] \quad (9)$$

Ładunek zgromadzony w pojemności pomiarowej jest równy $Q_0 = C_0 u_0(t \geq \Delta T)$ i wynosi:

$$\begin{aligned} U_0 &= Q_x \frac{C}{C_0 C_x} \left[\frac{1}{s} + \frac{C_0 C_x}{(C_0 + C_x) C_a} \frac{\alpha}{s(s+\alpha)} \right] \\ u_0(t) &= Q_x \frac{C_x}{(C_0 + C_x)} \left[\frac{1}{C} - \frac{1}{C_a} e^{-\alpha \Delta t} \right] \\ Q_0 &= Q_x \frac{C_0 C_x}{(C_0 + C_x)} \left[\frac{1}{C} - \frac{1}{C_a} e^{-\alpha \Delta t} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

Podstawiając zależności (9) i (10) do (7), otrzymano zależność błędu pomiaru ładunku Q_d od parametrów układu:

$$\delta_d = \frac{Q_0 - Q_d}{Q_d} = \frac{C(C_0 + C_x)}{C_0 C_x} \frac{1}{e^{\alpha \Delta T} - 1} = \frac{C_a (C_0 + C_x)}{C_a C_0 + C_a C_x + C_0 C_x} \frac{1}{e^{\alpha \Delta T} - 1} \quad (11)$$

Z zależności (11) wynika, że błąd pomiaru można dowolnie zredukować, przez zmniejszenie pojemności C_a . W praktyce można to osiągnąć przez ekranowanie elektrody wyładowczej, tak jak to osiąga się dla omówionej powyżej sondy rezystancyjnej. Układ z sondą pojemnościową pozwala także na redukcję tego błędu poprzez stosowanie odpowiednio dużej pojemności pomiarowej C_0 . W przypadku granicznym, gdy $C_0 \gg C_x, C_a$, zależność (11) redukuje się do postaci:

$$\delta_d = \frac{1}{1 + \frac{C_x}{C_a}} \frac{1}{e^{a\Delta T} - 1} \quad (12)$$

Stała α jest odwrotnością stałej czasowej rozładowania układu poprzez rezystancję kanału plazmowego – por. (7).

Relacja między czasem wyładowania i stałą czasu wyładowania, czyli wartość iloczynu $\alpha\Delta T$ zależy od rodzaju wyładowania. W przypadku wyładowania pełnego, przepływ prądu może trwać przez czas równy kilku do kilkunastu stałym czasowym $1/\alpha$. Wtedy błąd metody pomiaru może być wystarczająco mały w porównaniu z błędami wnoszonymi przez elementy układu pomiarowego. Np. dla $\alpha\Delta T = 5$, $\delta_d < 0,0068$, ale dla $\alpha\Delta T = 3$, $\delta_d < 0,052$ oraz dla $\alpha\Delta T = 1$ $\delta_d < 0,52$. Ponieważ czas trwania wyładowania jest limitowany od dołu stałą czasu $1/\alpha$, nie może być mniejszy od tej stałej czasowej, zatem dla rozważanego układu względny błąd nie może być większy od 52%. Błąd ten może być większy w przypadku wyładowań niepełnych z dielektryków (wyładowania snopiaste), gdzie czas trwania wyładowania może być krótszy od stałej czasu $1/\alpha$.

Ważnym parametrem jest także skuteczność wyładowania sprowokowanego przez sondę pojemnościową. W przypadku sondy rezystancyjnej, przy wyładowaniu zupełnym, sprawność ta jest praktycznie bliska 100%. Natomiast w przypadku sondy pojemnościowej, na skutek braku bezpośredniego połączenia obiektu naelektryzowanego z ziemią, nie może on osiągnąć potencjału zerowego, zatem część ładunku musi na nim pozostać. Sprawność ta wynosi:

$$\eta_x = \frac{Q_d}{Q_x} = \frac{1}{1 + \frac{C_x}{C_0}} (1 - e^{-a\Delta T}), \quad \eta_x \xrightarrow{C_0 \gg C_x} 1 - e^{-a\Delta T} \quad (13)$$

Z przeprowadzonej analizy wynika, że sonda pojemnościowa może być stosowana do badania ładunków transferowanych w czasie wyładowań zupełnych, natomiast stosowanie jej do badania wyładowań snopiastych z powierzchni dielektryków, może być obarczone znacznym błędem, w przypadku obiektów małych lub słabo naelektryzowanych, gdzie nie można zapewnić czasu wyładowania istotnie dłuższego od stałej czasowej obwodu wyładowania.

W przypadku użycia sondy pojemnościowej z ekranowaną elektrodą (por. rys. 3), powyższe zależności mają taką samą postać jak dla elektrody

nieekranowanej, z tą różnicą, że można przyjąć, że pojemność C_a dąży do zera, natomiast pojemność obiektu naelektryzowanego jest powiększona o pojemność między obiektem i sferą ekranującą. Stąd wynika, że:

$$\delta_d = \frac{Q_0 - Q_d}{Q_d} = \frac{C_a(C_0 + C_x)}{C_a C_0 + C_a C_x + C_0 C_x} \frac{1}{e^{a\Delta T} - 1} \xrightarrow{C_x \gg C_a} 0 \quad (14)$$

Z (14) wynika, że w przypadku elektrody zaekranowanej, można by istotnie ograniczyć błąd pomiaru bez konieczności stosowania kondensatora pomiarowego o bardzo dużej pojemności.

Jednak, jak wynika z (13), duża pojemność (w praktyce rzędu 100 nF) jest konieczna dla uniknięcia jej wpływu na sprawność wyładowania.

5. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza wskazuje, że poprawny pomiar wartości ładunku elektrycznego przenoszonego w czasie wyładowania elektrostatycznego przez kanał plazmowy drogą przewodzenia elektrycznego plazmy (składowa rzeczywista prądu wyładowania), wymaga zastosowania sondy z ekranowaną elektrodą zbierającą ładunek, czyli układu pokazanego na rys. 3. Zastosowanie elektrometru z sondą pojemnościową pozwala na zbudowanie znacznie prostszego i tańszego miernika ładunku, niż w przypadku sondy rezystancyjnej, gdyż mierzony ładunek zostaje tu przechwycony i zgromadzony w kondensatorze pomiarowym. Jeżeli rezystancja woltomierza jest wystarczająco duża (rzędu 100 GΩ lub większa, a wejściowy prąd polaryzujący jest rzędu 1 pA lub mniejszy), to woltomierz taki nie musi być szybki (a zatem drogi), gdyż wynik pomiaru można odczytać w ciągu kilku sekund od momentu wyładowania. Natomiast pojemność pomiarowa powinna być o co najmniej dwa rzędy wielkości większa od pojemności obiektu naelektryzowanego, by ilość ładunku przechwyconego była większa niż 99% ładunku dostępnego w czasie wyładowania.

Publikację opracowano na podstawie wyników II etapu programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2011-2013 w zakresie zadań służb państwowych przez Ministerstwo Pracy i Polityki Społecznej.

Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

LITERATURA

- [1] BIA-Report: „*Dokumentation Staubexplosionen. Analyse und Einzelfalldarstellung*”, HVVBG, Sankt Augustin, 11/97, 1997.
- [2] Britton L.G.: *Avoiding static hazards in chemical operations*, Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, New York, 1999.
- [3] Dyrektywa 1999/92/WE (ATEX USERS) w sprawie minimalnych wymagań dotyczących bezpieczeństwa i ochrony zdrowia pracowników zatrudnionych na stanowiskach pracy, na których może wystąpić atmosfera wybuchowa, przyjęta 16 grudnia 1999.
- [4] Grabarczyk Z.J., Kurczewska A.: *Zagrożenia elektrostatyczne w strefach zagrożonych wybuchem*, CIOP-PIB, Warszawa 2008.
- [5] IEC TR 600079-32: *Explosive atmospheres – Part 32: Electrostatics (2010)* (project).
- [6] Jones T.B., King J.K.: *Powder handling and Electrostatics. Understanding and preventing hazards*, Lewis Publishers, Inc., USA, 1991.
- [7] Kondej D., Gawęda E.: *Wybuchowość pyłów metali na przykładzie pyłów aluminium*, „Bezpieczeństwo pracy. Teoria Praktyka”, 2006, nr 10 (421), s. 12-15.
- [8] Osiewski J.: *Zarys rachunku operatorowego*, WNT, Warszawa 1965.
- [9] Sroka J.: *Oscilloscope influence on the calibration uncertainty of pulse rise time of ESD simulator*. „Electromagnetic Compatibility”, EMC’03. tom 1, nr 16-16 May, s. 378-381.
- [10] Strojny J.: *Bezpieczeństwo przy obsłudze kondensatorów*, „Atest”, 2007, nr 3, s. 13-15.
- [11] Tabata Y., Masuda S.: *Minimum potential of charged insulator to cause incendiary discharges*, „IEEE Trans. Ind. Appl.”, 1984, tom IA-20, s. 1206-1211.
- [12] Taylor D.M., Secker P.E.: *Industrial electrostatics. Fundamentals and measurements*, Research Studies Press LTD., John Wiley and Sons Inc., New York, 1994.
- [13] Von Pidoll U., Brzostek E., Froechtenigt H. R.: *Determining the incendiarity of electrostatic discharges without explosive gas mixtures*, „IEEE Trans. Ind. Appl.”, 2004, tom 40, nr 6, s. 1467- 1475.
- [14] Walmsley H.L.: *Induced-charge errors in charge-transfer measurement*, „J. Electrostat.”, 2009, tom 67, s. 320 – 325.
- [15] Walmsley H.L.: *Induced-charge errors in charge-transfer measurement: Brush discharges between charged, insulating discs and earthed, conductive spheres*. „J. Electrostat.”, 2010, tom 68, s. 5-20.