

Problemy pomiaru rozkładu potencjału na obiektach ze stałym ładunkiem

Streszczenie. Omówiono bezkontaktowe metody pomiaru rozkładu potencjału obiektów ze stałym ładunkiem. Zastosowanie metody kompensacyjnej prowadzi do podwyższenia lokalnej wartości mierzonego potencjału zaś bezpośredniej – do jego obniżenia. Pokazano, że zastosowanie metod bezkontaktowych prowadzi do zmian w wartościach i rozkładach potencjału w stosunku do tychże w stanie niezaburzonym.

Abstract. In paper non-contact methods for measuring the potential distribution of objects with a constant charge are discussed. The use of the compensation method leads to an increase in the local value of the measured potential, and use of the direct method - to its reduction. It has been shown that the use of non-contact methods leads to changes in values and shape of potential distributions in relation to those in the undisturbed state. (Problems of potential distribution measurements on objects with a constant charge).

Słowa kluczowe: elektrostatyka, pomiary rozkładu potencjału, bezkontaktowe metody pomiaru napięcia

Keywords: electrostatics, potential distribution measurements, non-contact voltage measurements

Wstęp.

Rozwój w zakresie elektroenergetyki, a w szczególności energoelektroniki, umożliwił zastosowanie sieci pracujących przy napięciu stałym do przesyłu energii elektrycznej. Uwaga ta dotyczy zwłaszcza przesyłu na większe odległości i znacznych mocy [1-3]. Inną przyczyną wzrostu zainteresowania sieciami pracującymi przy napięciu stałym jest rozwój energetyki odnawialnej [4,5]. Diagnostyka izolacji wysokonapięciowej pracującej przy napięciu stałym wymaga między innymi pomiarów rozkładu potencjału [5-9].

O ile pomiary rozkładów napięć wykonywane przy napięciu przemiennym (np. pomiar rozkładu napięcia na łańcuchu izolatorów) są rutynowymi i nie nastrożają większych problemów (zwłaszcza wykonywane w skali laboratoryjnej), o tyle pomiary przy napięciu stałym stwarzają istotne problemy, które są stosunkowo słabo zaznaczone w specjalistycznej literaturze [10].

Problemy metrologiczne występujące przy napięciu stałym wynikają z faktu bardzo dużej wartości rezystancji wewnętrznej źródeł badanych napięć (zwykle przewyższające poziom $10^{13} \Omega$), które w znakomitej większości wypadków można traktować jako tzw. obiekty ze stałym ładunkiem [11,12]. Problematyka pomiaru potencjału obiektów ze stałym ładunkiem (obiektów przewodzących) oraz rozkładów potencjału (na obiektach nieprzewodzących) jest znana w obszarze elektrostatyki stosowanej. Ze względu na ekstremalnie wysokie wartości rezystancji wewnętrznej badanych obiektów do pomiarów stosuje się woltomierze bezkontaktowe [11-14].

Istotnym problemem jest przeliczenie zmierzonego rozkładu potencjału $U(x,y)$ na rozkład gęstości powierzchniowej ładunku $q_s(x,y)$. W wielu przypadkach (szczególnie obiektów innych niż próbki płaskorównoległe, których jedna strona jest uziemiona) wymaga to użycia metod numerycznych [15-17].

Bezkontaktowe woltomierze i/lub metody pomiaru potencjału można podzielić na dwie podstawowe grupy, tj. metody pomiaru bezpośredniego oraz metody kompensacyjne.

W przypadku metod bezpośrednich, wielkość mierzona – potencjał (natężenie pola) – jest określana w oparciu o znajomość wartości „innych wielkości”, jednoznacznie związanych z natężeniem pola w otoczeniu badanego obiektu. Jako tzw. „inne” można wykorzystać: siłę działającą na ładunek (klasyczne woltomierze elektrostatyczne, metody balistyczne), prąd jonów (radioizotopowe mierniki pola, mierniki „ze ścieżką jonową”), ładunek indukowany

przez pole na elektrodzie pomiarowej (metoda indukcji elektrycznej – najczęściej stosowana) i inne [11,13,14]. W tej grupie mierników cały przyrząd lub jego sonda zbliżana do punktu pomiaru jest zwykle na potencjale bardzo bliskim albo równym potencjałowi ziemi. W skrócie, tę grupę metod można oznaczyć symbolem „ $U_s=0$ ”.

Każdy z wymienionych wyżej wariantów metody bezpośredniej może być wykorzystany w układzie kompensacyjnym. W przypadku metody kompensacyjnej wymienione wyżej wielkości mierzone bezpośrednio (siła, prąd, ładunek etc.) tworzą sygnał błędu, przetwarzany ostatecznie (w układach z autokompensacją) w elektryczne pole kompensujące, wytwarzane przez badany obiekt w punkcie pomiaru. Tę grupę metod można opatrzeć symbolem „ $E=0$ ”.

Ogólnie przyjmuje się, że zbliżenie do badanego obiektu przyrządu pomiarowego (wykonującego pomiar bezpośredni) prowadzi do zmiany potencjału obiektu na skutek dodatkowego obciążenia pojemnościowego [13,14,18]. Zjawisko prowadzi w konsekwencji do obniżenia potencjału badanego obiektu (jeśli jest przewodzący) lub do lokalnego obniżenia potencjału (w przypadku obiektów słabo przewodzących), w stosunku do potencjału jaki występuje w stanie niezaburzonym [11].

Mierniki kompensacyjne również zmieniają rozkład natężenia pola w otoczeniu obiektu (wymuszając w punkcie pomiaru stan $E=0$), co w efekcie prowadzi do zmiany jego wypadkowej pojemności jak i potencjału [18].

Oba wymienione efekty obserwuje się zwłaszcza w przypadku obiektów trójwymiarowych (3D) o małej pojemności własnej [18]. Analiza zmian potencjału wywołanych zbliżeniem woltomierza lub sondy pomiarowej wymaga zdefiniowania pojęcia obiektu ze stałym ładunkiem. W artykule przedstawiono główne problemy towarzyszące interpretacji zmierzonych rozkładów potencjału.

Obiekty ze stałym ładunkiem

Obiekt ze stałym ładunkiem może być przewodzący (co zapewnia jego ekwipotencjalność) lub nieprzewodzący. W najprostszym przypadku potencjał U obiektu przewodzącego, odizolowanego od ziemi (posiadającego nieskończenie wysoką rezystancję upływu), posiadającego pojemność własną (rozumianą jako pojemność do uziemionego otoczenia) równą C_w i zgromadzony na niej ładunek Q , określa zależność:

$$(1) \quad U = \frac{Q}{C_w}$$

Zależność (1) jednoznacznie wskazuje, że w przypadku obiektu ze stałym ładunkiem zmianie jego potencjału towarzyszy zmiana jego pojemności własnej.

W obiektach rzeczywistych, wykazujących skończoną rezystancję upływu R_u (do ziemi), zgromadzony ładunek Q zanika w funkcji czasu. Szybkość zaniku ładunku można w pierwszym przybliżeniu opisać stałą czasu τ , którą określa zależność [11]:

$$(2) \quad \tau = R_u C_w.$$

Jeżeli czas obserwacji ładunku zgromadzonego na obiekcie (czas pomiaru) t spełnia warunek:

$$(3) \quad t \ll \tau,$$

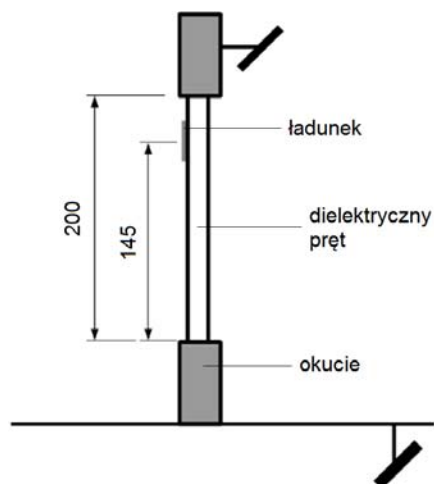
wówczas wartość ładunku zgromadzonego na badanym obiekcie praktycznie nie ulega zmianie w funkcji czasu pomiaru i można go uważać za obiekt ze stałym ładunkiem.

Wpływ układu pomiarowego na wartość potencjału obiektów ze stałym ładunkiem

Problematyka pomiaru potencjału obiektów ze stałym ładunkiem została wyczerpująco podana w literaturze [18-20]. Istotnym jest wykazanie, że wartości potencjału otrzymane z pomiarów wykonanych przy użyciu woltomierzy wykorzystujących metodę pomiaru bezpośredniego (należących do grupy $U_s=0$) są zawsze niższe od wartości występujących w stanie niezaburzonem. Pomiar przy użyciu przyrządów wykorzystujących metodę kompensacyjną (należące do grupy $E=0$) dają z kolei wartości wyższe niż występujące w stanie niezaburzonem. Błąd wynikający ze stanu zaburzenia jest tym większy im niższa jest pojemność własna badanego obiektu. Istotnego wpływu metody pomiarowej na wynik pomiaru należy się zatem spodziewać zwłaszcza w przypadku obiektów nieprzewodzących typu 3D.

Wpływ układu pomiarowego na rozkład potencjału

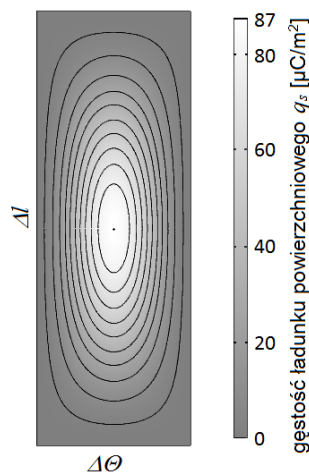
Wpływ metody pomiarowej na kształt uzyskanych rozkładów potencjału zilustrowano za pomocą symulacji wykonanej dla przypadku obiektu ze stałym ładunkiem. Jako obiekt przyjęto uproszczony model izolatora pniowego, przedstawiony na rysunku 1.



Rys.1. Model izolatora pniowego z wprowadzonym ładunkiem powierzchniowym

Symulacje przeprowadzono korzystając z programu Comsol Multiphysics. Poczyniono następujące założenia:

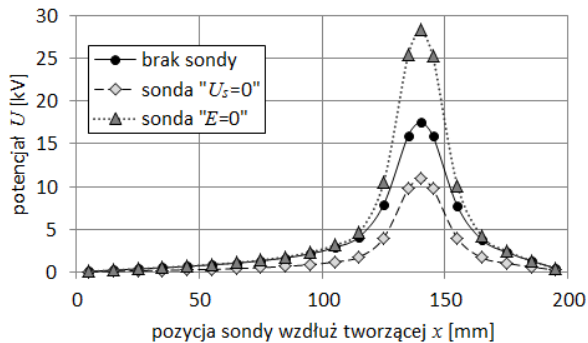
- izolator miał kształt pręta dielektrycznego o średnicy $d = 20$ mm, długości $l = 200$ mm, wykonanego z dielektryka o względnej przenikalności elektrycznej $\epsilon_r = 3$;
 - okucia miały kształt walców o zaokrąglonych krawędziach; długość okuc wynosiła $l_o = 50$ mm, a ich średnica $d_o = 40$ mm; zaokrąglenie krawędzi miało promień $r_o = 2$ mm; oba okucia znajdowały się na potencjale ziemi;
 - izolator znajdował się w przestrzeni roboczej (obszarze, w którym wykonywano obliczenia numeryczne) o kształcie walca o średnicy i wysokości równej 2 m; podstawa walca (na której stał izolator) była na potencjale ziemi; na pozostałych ścianach przestrzeni roboczej mogła znajdować się tylko składowa styczna natężenia pola elektrycznego;
 - naniesiony na powierzchnię izolatora ładunek elektryczny posiadał rozkład w kierunku poosiowym (Δl) oraz po obwodzie (kącie $\Delta \theta$) typu $\sin^2(x) \cdot \sin^2(y)$ i rozciągał się na obszar odpowiednio $\Delta l = 40$ mm, $\Delta \theta = 90^\circ$ ($1/4$ obwodu); maksymalną wartość ładunku przyjęto równą $q_{max} = 87 \mu\text{C}/\text{m}^2$ – patrz rysunek 2; maksimum ładunku oraz centroid rozkładu (środek ciężkości rozkładu) umieszczono 55 mm poniżej dolnej krawędzi górnego okucia – rysunek 1; przyjęty rozkład ładunku skutkuje maksymalną wartością natężenia pola na granicy izolator-powietrze równej wytrzymałości powietrza – 3 MV/m (dla odległości obiekt-uziemione otoczenie ~ 10 mm) [21];
 - wartość ładunku była stała w funkcji czasu;
 - sonda pomiarowa (sonda woltomierza) ma kształt walca o długości $l_s = 30$ mm i średnicy $d_s = 8$ mm; jej krawędzie również zaokrąglono ($r_s = 0,5$ mm);
 - sonda była obiektem ekwipotencjalnym;
 - odległość pomiędzy powierzchnią czułą sondy a powierzchnią izolatora wynosiła $h = 2$ mm (odległość pomiędzy linią pomiaru a powierzchnią izolatora).
- Modelowanie dotyczyło rozkładu potencjału (hipotetycznego pomiaru) wzdłuż linii przechodzącej przez maksimum rozkładu ładunku i równoległej do osi izolatora.



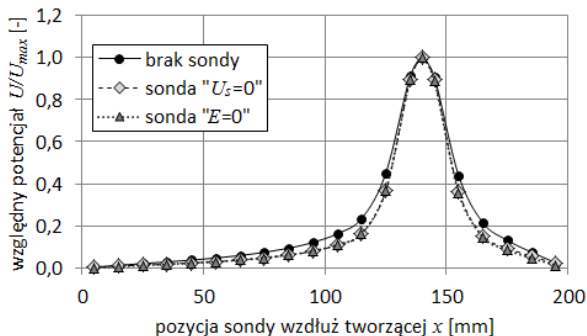
Rys.2. Gęstość ładunku powierzchniowego przyjęta w symulacji. Odległość między izoliniami wynosi $8,7 \mu\text{C}/\text{m}^2$

Wyniki symulacji rozkładu potencjału uzyskane dla wyżej wymienionych założeń dla obu metod, tj. dla warunku $U_s=0$ oraz $E=0$ przedstawiono na rysunku 2 (wartości obliczone) oraz rysunku 3 (wartości względne odniesione do wartości maksymalnej). Przyjęto następujące oznaczenia:

- $U_0(x)$ – rozkład potencjału niezaburzony, obliczony dla przypadku braku sondy;
- $U_D(x)$ – rozkład potencjału obliczony dla metody bezpośredniej, tj. przypadku gdy sonda znajduje się na potencjale ziemi ($U_s=0$);
- $U_C(x)$ – rozkład potencjału obliczony dla metody kompensacyjnej, tj. przypadku gdy pole elektryczne pomiędzy sondą a obiektem badanym jest skompensowane ($E=0$).

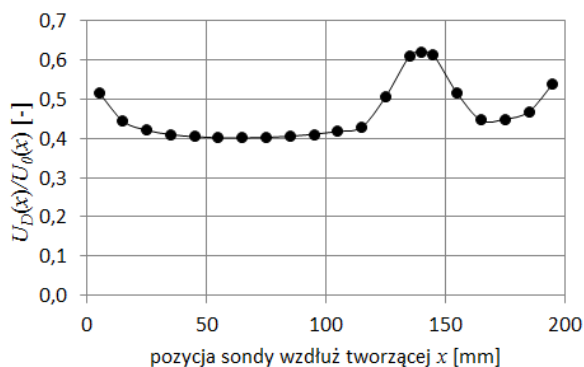


Rys.3. Rozkłady potencjału wzdłuż linii pomiaru równoległej do osi izolatora

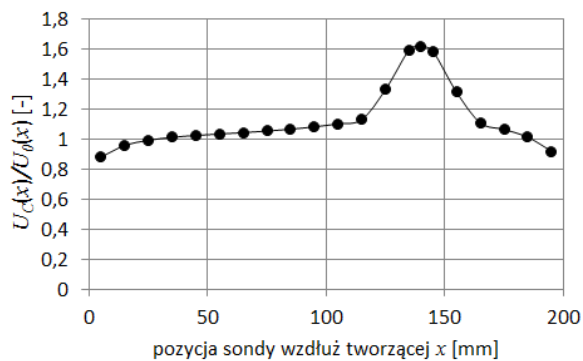


Rys.4. Rozkłady potencjału wzdłuż linii pomiaru równoległej do osi izolatora – wartości względne odniesione do wartości maksymalnej

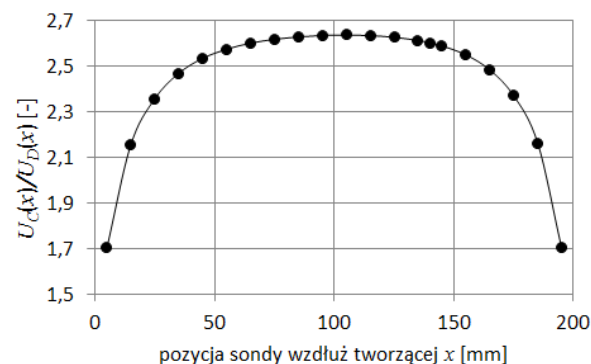
Wyniki przedstawione na rysunku 4 wskazują, iż w pierwszym przybliżeniu rozkłady potencjału $U_D(x)$ oraz $U_C(x)$ (uzyskane obiema metodami – odpowiednio $U_s=0$ oraz $E=0$) są podobne, przy czym wartości potencjału $U_D(x)$ są różne od wartości $U_C(x)$ i wartości występujących w stanie niezaburzonym $U_0(x)$, ze względów omówionych w rozdziale 3. W celu dokładnej analizy na rysunkach 5-7 przedstawiono stosunki uzyskanych rozkładów – odpowiednio $U_D(x)/U_0(x)$, $U_C(x)/U_0(x)$ oraz $U_C(x)/U_D(x)$.



Rys.5. Zależność stosunku napięć $U_D(x)/U_0(x)$ od pozycji sondy, dla rozkładów uzyskanych metodą pomiaru bezpośredniego ($U_s=0$) oraz niezaburzonego („brak sondy”)



Rys.6. Zależność stosunku napięć $U_C(x)/U_0(x)$ od pozycji sondy, dla rozkładów uzyskanych metodą pomiaru bezpośredniego ($E=0$) oraz niezaburzonego („brak sondy”)



Rys.7. Zależność stosunku napięć $U_C(x)/U_D(x)$ od pozycji sondy, dla rozkładów uzyskanych metodą pomiaru bezpośredniego ($U_s=0$) oraz kompensacyjnego ($E=0$)

Rozkłady przedstawione na rysunkach 5 i 6 wskazują, że zależność łącząca niezaburzony rozkład potencjału $U_0(x)$ z rozkładem mierzonym za pomocą sondy $U_C(x)$ lub $U_D(x)$ ma skomplikowany charakter. Zależność ta zależy od geometrii badanego obiektu i warunków pomiaru, a jej wyznaczenie wymaga metod symulacji numerycznej.

Widoczne wzniesienie dla $x = 145$ mm (rys. 5 i 6) związane jest z obecnością w tym miejscu ładunku. Należy zwrócić uwagę, że tuż przy okuciu wartość wyznaczonego potencjału jest relatywnie mała, a zatem wrażliwa na błędy numeryczne.

Do szczególnie istotnego wniosku prowadzi zależność stosunku potencjałów $U_C(x)/U_D(x)$, dla rozkładów uzyskanych różnymi metodami pomiarowymi, przedstawiona na rysunku 7.

Jeżeli rozkłady $U_C(x)$ i $U_D(x)$ przedstawione na rysunku 4 byłyby identyczne co do kształtu, zależność przedstawiona na rysunku 7 winna mieć kształt linii prostej. Wyniki symulacji przedstawione na rysunku 7 wskazują jednoznacznie, że rozkłady potencjału uzyskane różnymi metodami są różne, zarówno jeśli chodzi o ich wartość jak i kształt. Powyższa obserwacja ma istotne znaczenie zwłaszcza w przypadku analizy wpływu ładunku na wytrzymałość układów elektroizolacyjnych prowadzonej w oparciu o doświadczalnie zmierzone rozkłady potencjału.

Uwzględnienie specyfiki metody pomiarowej i jej wpływu na mierzone rozkłady wydaje się być konieczne, zwłaszcza w przypadku wyznaczania rozkładów ładunku czy natężenia pola na podstawie wyznaczonych rozkładów potencjału.

Podsumowanie i wnioski

Przedstawione wyżej rozważania pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

1. potencjał obiektu ze stałym ładunkiem ulega zmianie

- podczas pomiaru zarówno metodą bezpośrednią jak i kompensacyjną;
- wartość bezwzględna potencjału zmierzona metodą kompensacyjną $U_C(x)$ jest wyższa, zaś mierzoną metodą bezpośrednią $U_D(x)$ – niższa – w porównaniu do wartości w stanie niezaburzonym;
 - pojemność wypadkowa obiektu C_w , przy zbliżeniu sondy miernika mierzącego metodą bezpośrednią, wzrasta, zaś mierzącego metodą kompensacyjną – maleje, w stosunku do pojemności obiektu w stanie niezaburzonym;
 - w przypadku obiektów nieprzewodzących rozkłady potencjału mierzone różnymi metodami mogą się znacznie różnić, zarówno jeśli chodzi o ich kształt jak i wartości, co w przypadku nieuwzględnienia specyfiki metody pomiarowej może prowadzić do istotnych błędów interpretacyjnych.

Praca została wykonana w ramach badań statutowych, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Warszawa, Polska

Autorzy: prof. dr hab. inż. Ryszard Kacprzyk, Politechnika Wroclawska, Katedra Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370, Wrocław, E-mail: ryszard.kacprzyk@pwr.edu.pl;
dr inż. Adam Pelesz, Politechnika Wroclawska, Katedra Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370, Wrocław, E-mail: adam.pelesz@pwr.edu.pl.

LITERATURA

- Bahrman M.P., Johnson B.K., The ABCs of HVDC transmission technologies, *IEEE Power Energy Mag.*, 2007, Vol. 5 (2007), No. 2, Mar./Apr., s. 32 – 44
- Larruskain D.M., Zamora I., Mazón A.J., Abarrategui O., Monasterio J., Transmission and distribution networks: AC versus DC, *Egyptian Solar Research Center, 9th Spanish-Portuguese Congress on Electrical Engineering*. Marbella, 2005
- Meah K., Ula S. Comparative evaluation of HVDC and HVAC transmission systems, Power Engineering Society General Meeting, IEEE, (2007), s. 1 – 5
- Cotts B.R.T., Prigmore J.R., Graf K.L., HVDC Transmission for Renewable Energy Integration, In: *The Power Grid*, (2017), s. 171-196
- Sun J., Li, M., Zhang Z., Xu T., He J., Wang H., Li G., Renewable energy transmission by HVDC across the continent: system challenges and opportunities, *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 3.4 (2017), s. 353-364
- Sarath Kumara et al., DC flashover characteristics of a polymeric insulator in presence of surface charges, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 19 (2012) no. 3, s. 1084-1090
- Deng J., Matsuoka S, Kumada A., Hidaka K, Residual Charge Density Distribution Measurement of Surface Discharge on Cylindrical Insulator, *Proceedings of International Conference on Electrical Engineering*, Shenyan (2009), China, s. 1-5
- Tenbohlen S., Schroder G., The influence of surface charge on lightning impulse breakdown of spacers in SF 6, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 7 (2000), no. 2, s. 241 – 246
- Pelesz A. Surface charge influence on the flashover voltage of composite insulator model working at HVDC, *Przeglad Elektrotechniczny* 92 (2016) nr 10, s. 130-133
- Fatihou A., Dascalescu L., Zouzou N., Neagoe M. B., Reguig A., Dumitran L. M., Measurement of surface potential of non-uniformly charged insulating materials using a non-contact electrostatic voltmeter. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 23.4 (2016), s 2377-2384
- Kacprzyk R., Metody pomiarów w elektrostatyce, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, (2013)
- Llovera P., Molinié P., Soria A., & Quijano A., Measurements of electrostatic potentials and electric fields in some industrial applications: Basic principles. *Journal of Electrostatics*, 67.2-3, (2009), s. 457-461.
- Taylor D.M., Secker P.A., Industrial Electrostatics, Fundamentals and measurements, J. Wiley & Sons Inc., New York, Research Studies Press Ltd., Taunton, Somerset, England, (1994)
- Cross J., Electrostatics: Principles, Problems and Applications. Adam Hilger, IOP Publ. Ltd. Bristol, England, (1987)
- Faircloth D.C., Allen N.L., High resolution measurements of surface charge densities on insulator surfaces, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 10,(2003) no.2, s. 285-290
- Neagoea M.B., Prawatyaab Y.E., Zeghloula T., Dascalescu L. Electric-potential-measurement-based methodology for estimation of electric charge density at the surface of tribocharged insulating slabs, *Journal of Electrostatics*, vol. 90, (2017), s123-130
- Zhang B., Gao W., Qi Z., Wang Q., Zhang G., Inversion Algorithm to Calculate Charge Density on Solid Dielectric Surface Based on Surface Potential Measurement. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 66.12 (2017), 3316-3326
- Kacprzyk R., Measurements of Electrical Potential of Constant Charge Objects. *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 19, No 1 (2012) str. 134-139
- Kacprzyk R., Pomiar potencjału obiektów ze stałym ładunkiem. W: Podstawowe problemy metrologii, PPM '12, Krynica-Zdrój, 03-06 czerwca 2012. Katowice: Komisja Metrologii Oddziału PAN, (2012), s. 38-41.
- Kacprzyk R., Uncertainty of potential measurements of Q-constant objects, *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, Vol. 646, No. 1, (2015) s. 1-4
- Florkowska B., Wytrzymałość elektryczna gazowych układów izolacyjnych wysokiego napięcia, AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne (2003)