

Arkadiusz DOBRZYCKI\*, Władysław OPYDO\*\*, Kazimierz BIELIŃSKI\*\*  
Grzegorz TWARDOSZ\*

## **ROLA MIKROCZĄSTEK METALICZNYCH W WYTWARZANIU MIKROOSTRZY NA POWIERZCHNIACH ELEKTROD WYSOKONAPIĘCIOWYCH PRÓŻNIOWYCH UKŁADÓW IZOLACYJNYCH**

W pracy przeanalizowano możliwości wytwarzania mikronierówności na powierzchni elektrod wysokonapięciowych próżniowych układów izolacyjnych przez uderzające w powierzchnie elektrod małe bryłki materiału – mikrocząstki. Mikrocząstki są odrywane od powierzchni elektrod i przemieszczają się w przestrzeni międzyelektrodowej pod wpływem sił elektrostatycznych. W obliczeniach przyjęto, że mikrocząstki uderzające w powierzchnię elektrody mają kształt kuli i są wykonane z tego samego metalu co elektroda, w którą uderzają. Analizowano układy izolacyjne z elektrodami wykonanymi z miedzi, aluminium oraz tytanu. Wyznaczono zależności, od odległości międzyelektrodowej, minimalnej wartości napięcia na zaciskach układu izolacyjnego, pod wpływem którego przyspieszone mikrocząstki, o różnych promieniach, powodują odkształcenia powierzchni elektrod.

Do obliczeń wykorzystano program komputerowy napisany w środowisku Visual Studio 2013 w języku programowania C#.

**SŁOWA KLUCZOWE:** wysokonapięciowy próżniowy układ izolacyjny, mikrocząstka, emisja polowa elektronów, wiązka elektronów, wytrzymałość elektryczna.

### **1. WPROWADZENIE**

Przy bardzo powolnym zwiększaniu wartości napięcia przemiennego na zaciskach próżniowego układu izolacyjnego, z elektrodami płaskimi oddalonymi od siebie na odległość 1...2 mm lub większą, pierwsze oznaki przewodnictwa elektrycznego, przy czułości układu pomiarowego rzędu 0,1  $\mu\text{A}$  to mikrowyładowania [6]. W przeprowadzonych badaniach [6] zaobserwowano, że jeśli wartość napięcia utrzymywano na stałym poziomie, częstość występowania mikrowyław-

---

\* Politechnika Poznańska

\*\* Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy

dowań oraz ich wartości szczytowe malały z czasem. Natomiast, jeśli wartość napięcia zwiększano, mikrowyładowania występowały znowu przez pewien czas.

Przepływ prądu elektronowego emisji polowej w układzie pojawia się najczęściej nagle [6]. Gdy napięcie podnosić wolno do pewnego poziomu i na tym poziomie utrzymywać przez pewien czas – kilka minut, to w tym czasie, jeśli tylko wartość napięcia jest wystarczająco duża, nagle zaczyna płynąć prąd elektronowy emisji polowej o wartości znacznie przekraczającej czułość układu pomiarowego. Czasami pojawienie się mierzalnej wartości prądu elektronowego emisji polowej występuje podczas procesu zwiększania wartości napięcia. Zwykle prąd elektronowej emisji polowej zaczyna płynąć tylko w jednej połowie okresu napięcia, a następnie w drugiej połowie okresu lub nie pojawia się wcale, aż do przeskoku.

Jeśli, po stwierdzeniu przepływu prądu elektronowego emisji polowej, wartość napięcia obniżyć, amplituda tego prądu zmaleje stopniowo do poziomu czułości układu pomiarowego. Przy ponownym podnoszeniu napięcia wzrost wartości amplitudy prądu jest stopniowy, związany ze wzrostem napięcia [6].

Obserwacje te wskazują na to, że jeśli wartość napięcia przekracza pewien poziom, w próżniowym układzie izolacyjnym zachodzą pewne zmiany i że zmiany te są przynajmniej częściowo nieodwracalne. Ponieważ ich skutkiem jest gwałtowny wzrost wartości prądu elektronowego emisji polowej, to zmiany te polegają na powstawaniu na powierzchni elektrod emiterów wiązek elektronów, czyli mikroostrzy o dużym współczynniku wzmocnienia natężenia pola elektrycznego. Ze zjawisk fizycznych występujących w próżniowych układach izolacyjnych takie nagłe powstanie mikroostrza emitującego elektrony polowo może spowodować uderzenie w powierzchnię elektrody (katody) mikrocząstki metalicznej i wytworzenie na jej powierzchni mikronierówności, np. krateru.

Występujące w próżniowych układach izolacyjnych mikrocząstki, wg Menona i Srivastavy [5], można podzielić w zależności od ich prędkości końcowej w chwili uderzenia w elektrodę przeciwległą, na trzy grupy:

- mikrocząstki o małych prędkościach, do około 100 m/s,
- mikrocząstki o średnich prędkościach, od około 100 m/s do prędkości rozchodzenia się dźwięku w materiale elektrody, tj. do około 4 km/s,
- mikrocząstki o bardzo dużych prędkościach.

Mikrocząstki o małych prędkościach nie mają wystarczającej energii kinetycznej do zderzenia niesprężystego z powierzchnią elektrody – prędkości potrzebne do zderzenia niesprężystego z powierzchnią elektrody, dla najczęściej stosowanych materiałów elektrodowych są większe od 100 m/s. Zainicjowanie przeskoku przez te wolne mikrocząstki jest możliwe w wyniku rozbudowy na całą przerwę międzyelektrową wyładowania między elektrodą a mikrocząstką, które wystąpi po zbliżeniu się mikrocząstki na odległość kilku mikrometrów od elektrody.

Mikrocząstki o średnich prędkościach mają prędkość większą od prędkości potrzebnej do spowodowania odkształceń plastycznych powierzchni elektrody.

Mogą one doprowadzić do przeskoków w wyniku uderzenia w tę powierzchnię przez :

- wytwarzanie kraterów, któremu towarzyszy wyrzucenie metalu w postaci stałej, płynnej lub gazowej,
- bezpośrednio wytworzenie plazmy.

Krawędzie krateru wskutek ich ostrości są dobrymi emiterami elektronów, mogącymi emitować elektrony w wyniku emisji polowej. Plazma powstająca w wyniku uderzenia mikrocząstki jest rezultatem działania energii kinetycznej mikrocząstki, wyzwolonej w małym obszarze zderzenia.

Mikrocząstki o bardzo dużych prędkościach to mikrocząstki, które przy praktycznie występujących w próżniowych układach izolacyjnych wartościach natężenia pola elektrycznego mają promień mniejszy od 0,01  $\mu\text{m}$ . W wyniku uderzenia w powierzchnię elektrody parują i przyczyniają się do pewnego zwiększenia ilości par metalu w pobliżu tej powierzchni, co nie wywiera jednak wpływu na wytrzymałość elektryczną układu izolacyjnego.

W niniejszej pracy przedstawiono analizę możliwości wytwarzania kraterów na powierzchniach elektrod próżniowych układów izolacyjnych przez uderzającą mikrocząstki. W analizie przyjęto, że uderzająca mikrocząstka ma kształt kuli i jest wykonana z tego samego metalu co elektroda, w którą uderza. Przeanalizowano układy z elektrodami wykonanymi z miedzi, aluminium i tytanu (pierwiastka, który wykorzystany jako materiał elektrodowy pozwala otrzymać próżniowy układ izolacyjny mający relatywnie bardzo dużą wytrzymałość elektryczną [2]).

Do obliczeń wykorzystano program komputerowy napisany w środowisku Visual Studio 2013 w języku programowania c#.

Jednostki wszystkich wielkości występujących w tej pracy należą do SI.

## 2. PODSTAWOWE ZALEŻNOŚCI

Mikrocząstka o kształcie kuli znajdująca się na powierzchni płaskiej elektrody układu izolacyjnego ma ładunek elektryczny [4]

$$Q = \frac{2}{3} \pi^3 \varepsilon_0 r_m^2 E_0, \quad (1)$$

gdzie:  $\varepsilon_0$  – przenikalność elektryczna próżni,  $r_m$  – promień mikrocząstki,  $E_0$  – wartość średnia natężenia pola elektrycznego makroskopowego przy powierzchni elektrody.

Działa zatem na nią siła elektrostatyczna odrywająca ją od powierzchni elektrody. Jeśli ta siła jest większa od siły adhezji do podłoża, mikrocząstka zostaje oderwana i zaczyna przemieszczać się ruchem przyspieszonym w kierunku elektrody o przeciwnej biegunowości. Z bilansu energetycznego (energia dostarczona mikrocząstce przez pole elektryczne zamienia się w energię kinetyczną mikrocząstki) wynika, że w chwili uderzenia w elektrodę przeciwną mikrocząstka będzie miała prędkość

$$v = \left( \frac{2QU}{m} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

gdzie:  $Q$  – ładunek mikrocząstki,  $U$  – napięcie na zaciskach układu izolacyjnego,  $m$  – masa mikrocząstki.

Po podstawieniu wzoru (1) do (2), wprowadzeniu  $m = (4/3)\pi r_m^3 \delta_m$  (gdzie  $\delta_m$  jest gęstością materiału mikrocząstki), dla układu izolacyjnego z polem makroskopowo jednostajnym  $E_0 = U/d$  (gdzie  $d$  jest odstępem między elektrodami) otrzymano następujący wzór, pozwalający obliczyć prędkość mikrocząstki kuliastej w chwili uderzenia w powierzchnię elektrody przeciwległej:

$$v = \pi U \left( \frac{\epsilon_0}{r_m \delta_m d} \right)^{1/2}. \quad (3)$$

By uderzająca mikrocząstka spowodowała odkształcenie plastyczne materiału elektrody, musi mieć prędkość większą od prędkości krytycznej odkształcenia plastycznego materiału elektrody  $v_p$ , zdefiniowaną jako najmniejsza wartość prędkości, którą należy nadać części materiału, by spowodować jego odkształcenie plastyczne. Zatem:

$$v \geq v_p. \quad (4)$$

Prędkość krytyczną odkształcenia plastycznego wyraża wzór [1]:

$$v_p = \left( \frac{8R_e}{\delta_e} \right)^{1/2}, \quad (5)$$

gdzie:  $R_e$  – granica plastyczności materiału elektrody,  $\delta_e$  – gęstość materiału elektrody.

Po podstawieniu do nierówności (3) wzorów (3) i (5), przy założeniu, że kulista mikrocząstka jest wykonana z tego samego materiału co elektroda, w którą uderza, czyli  $\delta_m = \delta_e$ , otrzymano następujący wzór, pozwalający obliczyć minimalną wartość napięcia przyłożonego do zacisków układu izolacyjnego, która spowoduje, że mikrocząstka przy uderzeniu spowoduje odkształcenie powierzchni elektrody

$$U = \left( \frac{8R_e r_m d}{\pi^2 \epsilon_0} \right)^{1/2}. \quad (6)$$

### 3. WYNIKI OBLICZEŃ I ICH OMÓWIENIE

Wykorzystywane w obliczeniach wartości granicy plastyczności miedzi, aluminium i tytanu zestawiono w tabeli 1.

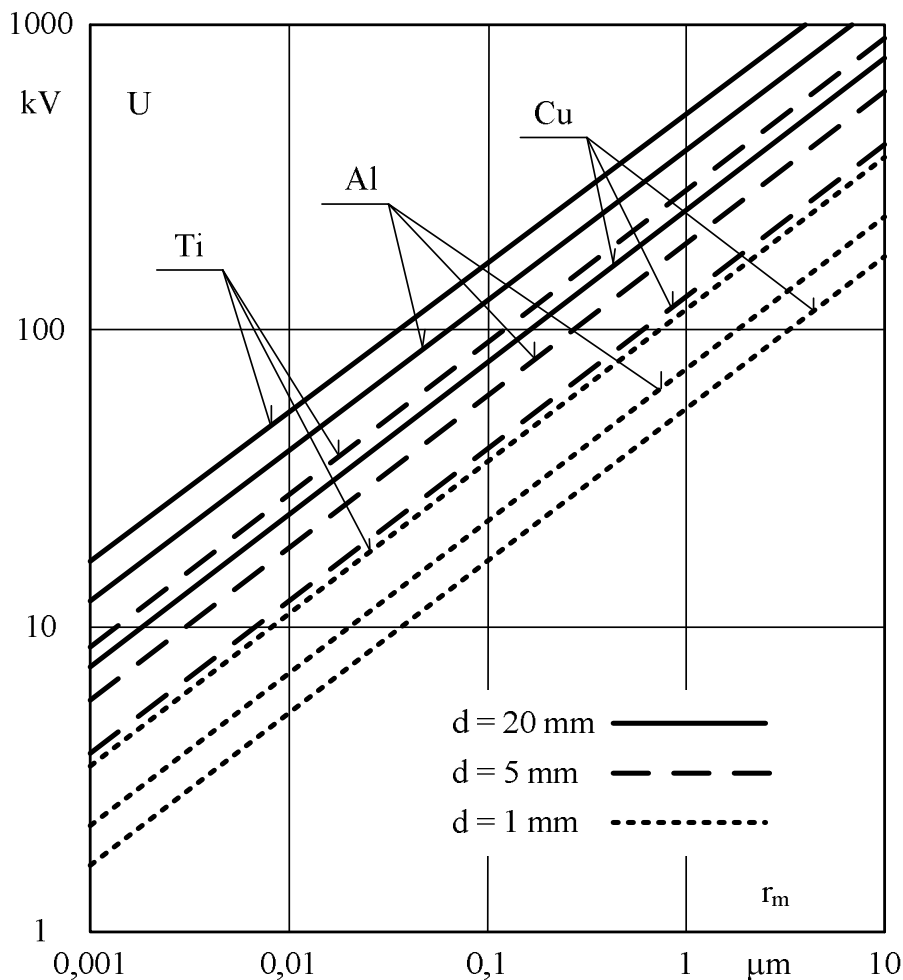
Tabela 1. Zestawienie wykorzystanych w obliczeniach wartości granic plastyczności miedzi, aluminium i tytanu.

Rodzaj materiału	Granica plastyczności materiału ( $R_e$ )
Miedź	35 MPa
Aluminium	60 MPa
Tytan	170 MPa

Ze wzoru (6) wyznaczono zależności minimalnej wartości napięcia przyłożonego do próżniowego układu izolacyjnego, powodującego przyspieszenie w przestrzeni międzyelektrodowej kulistej mikrocząstki do prędkości potrzebnej do odkształcenie plastycznego powierzchni elektrody, w którą uderza, od promienia mikrocząstki. Zależności wyznaczono dla układów izolacyjnych z elektrodami wykonanymi z miedzi, aluminium i tytanu, z odstępami międzyelektrodowych równymi 1, 5 i 10 mm. Przyjęto, że elektroda i uderzająca w nią mikrocząstka są wykonane z tego samego metalu. Zależności te przedstawiono na rys. 1.

Natomiast na rys. 2 przedstawiono wyznaczone ze wzoru (6) zależności minimalnej wartości napięcia, przyłożonego do próżniowego układu izolacyjnego, powodującego przyspieszenie kulistej mikrocząstki do prędkości powodującej odkształcenie plastyczne powierzchni elektrody, w którą uderza, od długości odstepu międzyelektrodowego układów izolacyjnych z elektrodami wykonanymi z miedzi, aluminium i tytanu. Założono przy tym, że elektrody i uderzające w nie mikrocząstki są wykonane z tego samego materiału i mają promienie równe 0,001, 0,01, 0,1, 1 i 10  $\mu\text{m}$ .

Wytrzymałość elektryczna próżniowych układów izolacyjnych zależy od wielu czynników: ciśnienia, odstepu między elektrodami, rodzaju materiału i stanu powierzchni elektrod, ich krzywizny, pola powierzchni oraz sposobu kondycjonowania układu. Wysoka wytrzymałość elektryczna próżniowych układów izolacyjnych występuje przy ciśnieniach niższych od  $10^{-1}$  Pa, czyli w zakresie próżni wysokiej [3]. Dlatego ciśnienie o takiej wartości lub niższej powinno być utrzymywane w praktycznych wysokonapięciowych próżniowych układach izolacyjnych: dla takich właśnie warunków zostały sformułowane hipotezy mechanizmów inicjowania przeskoku elektrycznego w próżni.

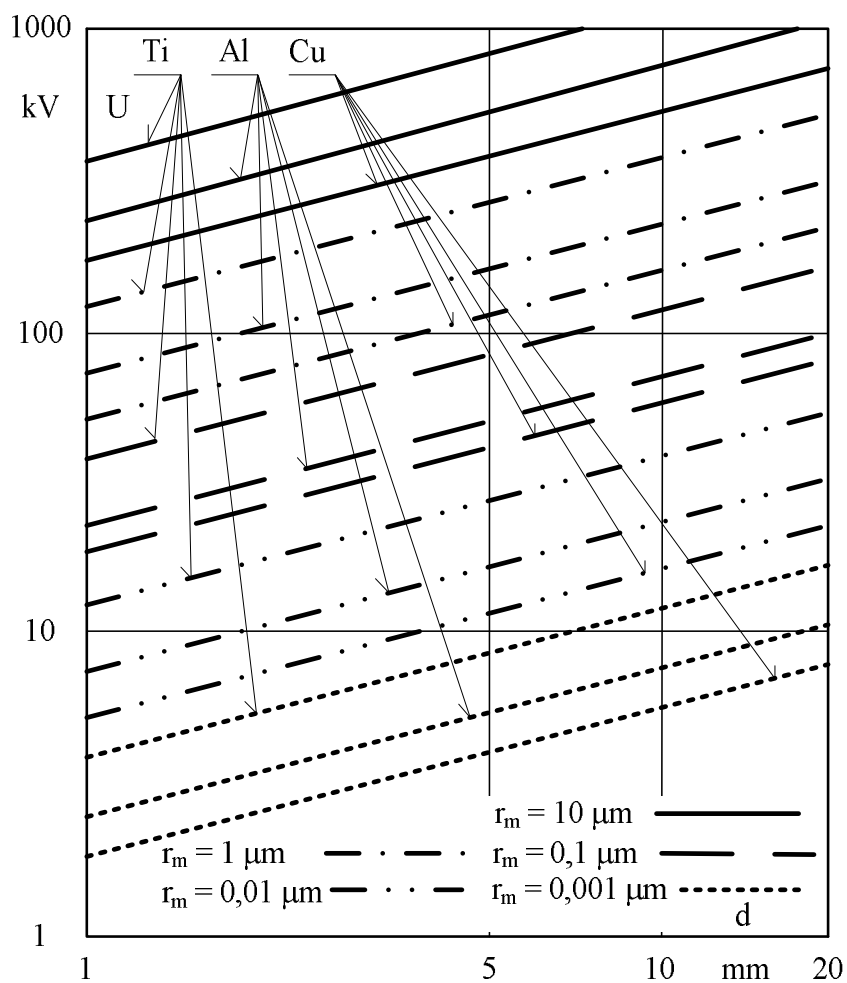


Rys. 1. Zależności minimalnej wartości napięcia, przyłożonego do próżniowych układów izolacyjnych, powodującego przyspieszenie kulistej mikrocząstki do prędkości powodującej odkształcenie plastyczne powierzchni elektrody, w którą uderza, od promienia mikrocząstki; odstęp międzyelektrodowy w układach wynosił 1, 5 oraz 20 mm, a elektrody i uderzające w nie mikrocząstki były wykonane z tego samego metalu – miedzi, aluminium lub tytanu

Wraz ze zwiększaniem odstępów między elektrodami rośnie wytrzymałość elektryczna próżniowych układów izolacyjnych, ale słabiej niż proporcjonalnie. Czyli kolejne, takie same przyrosty odstępów między elektrodami powodują coraz mniejsze przyrosty napięcia przeskoku.

Np. próżniowy układ izolacyjny z 5 mm odstępem elektrod płaskich ma wytrzymałość elektryczną (zależną także w pewnym stopniu od wpływu innych czynników) około 120 kV w przypadku zastosowania elektrod miedzianych, około 130 kV w przypadku elektrod aluminiowych i około 200 kV w przypadku

elektrod tytanowych. Analogiczne wartości dla układów izolacyjnych z 1 mm odstępem międzyelektrowym wynoszą: około 40 kV w przypadku układu z elektrodami miedzianymi i około 45 kV w przypadku układu z elektrodami aluminium, tytan, wg rosnącej wytrzymałości układu, jest takie same jak uszeregowanie zgodne z rosnącą wartością granicy plastyczności tych metali.



Rys. 2. Zależności minimalnej wartości napięcia przyłożonego do próżniowego układów izolacyjnych z elektrodami wykonanymi z miedzi, aluminium lub tytanu, powodującego przyspieszenie kulistych mikrocząstek, o promieniu równym 0,001, 0,01, 0,1, 1 i 10  $\mu\text{m}$ , do prędkości powodującej odkształcenie plastyczne powierzchni elektrody, w którą uderzają, od długości odstępu międzyelektrowego

Różne wartości granic plastyczności materiałów elektrodowych powodują, że w zależnościach przedstawionych na rys. 1 i rys. 2 minimalna wartość napięcia powodującego przyspieszenie mikrocząstki, do prędkości powodującej odkształcenie plastyczne powierzchni elektrody, jest najmniejsza w przypadku układów z elektrodami miedzianymi, nieco większa w przypadku układów z elektrodami aluminium i największa dla układów z elektrodami tytanowymi.

#### 4. PODSUMOWANIE

Z analiz wyników obliczeń przedstawionych w formie wykresów na rys. 1 i rys. 2 wynika, że w przypadku próżniowych układów izolacyjnych, zarówno z 1 mm jak z 5 mm odstępem międzyelektrowym, przy napięciach o wartościach nieco mniejszych od wartości wytrzymałości elektrycznej, mikrocząstki o promieniach do kilku dziesiątych części mikrometra mogą powodować odkształcenia powierzchni elektrod, w które uderzają. Powstająca w ten sposób mikronierówność, np. krater, może powodować znaczny miejscowy, wzrost natężenia pola elektrycznego i stać się dobrym emiterym wiązki elektronów emitowanych polowo. Powoduje to nagły wzrost wartości prądu elektronowego emisji polowej płynącego w próżniowym układzie izolacyjnym, jeśli znajduje się on pod napięciem. Aby powstała mikronierówność była dobrym emiterym elektronów emitowanych polowo musi charakteryzować się bardzo dużą wartością współczynnika wzmocnienia natężenia pola elektrycznego przy swoim wierzchołku. Zatem powinna mieć ostro zakończony wierzchołek lub krawędzie i stosunkowo dużą wysokość.

Wydaje się, że wysokość krateru wytworzonego przez uderzającą niesprężyste w powierzchnię elektrody mikrocząstkę jest porównywalna, tego samego rzędu, co promień uderzającej mikrocząstki. Przy tym założeniu z rys. 1 i rys. 2 wynika, że przy wartościach napięć równych lub nieco niższych od wartości wytrzymałości elektrycznej układów (podanych powyżej), uderzające niesprężyste w powierzchnię elektrod mikrocząstki miały promień rzędu dziesiątych części mikrometra. Można więc przypuszczać, że wytworzone w tych warunkach kraterki będą miały wysokość tego samego rzędu.

#### LITERATURA

- [1] Cook M. .A., The science of high explosives, Reinhold Publications, New York 1958.
- [2] Erven C. C., Wavre J. J., van Heeswijk R. G., 60 Hz vacuum breakdown studies in a dynamically pumped system, Proc. IV International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Waterloo (Kanada), 1970, p. 219.
- [3] Hałas A., Technika próżni, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2017.



- [4] Lebedev N.N., Skal'skaâ I.P., Sila dejstvuûščaâ na provodâščij šarik, pomeščennyj v pole plaskogo kondensatora, Žurnal tehničeskoj fiziki, 1962, t. 32, p. 375.
- [5] Menon M. M., Srivastava K. D., The nature of microparticles and their role in vacuum breakdown, Proc. VI International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Swansea (Wielka Brytania), 1974, p. 3.
- [6] Opydo W., Analiza i badanie wpływu niektórych czynników stanu układu izolacyjnego próżniowego na jego wytrzymałość elektryczną przy napięciu przemiennym o częstotliwości elektroenergetycznej, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Seria Rozprawy Nr 150, Poznań 1984.
- [7] Opydo W., Ranachowski J., Właściwości elektryczne próżniowych układów izolacyjnych przy napięciu przemiennym, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa – Poznań 1993.

**THE ROLE OF METALLIC MICROPARTICLES IN FORMATION  
OF MICROPROTRUSIONS ON THE SURFACES OF ELECTRODES  
IN HIGH-VOLTAGE VACUUM INSULATION SYSTEMS**

The possibility of formation of microprotrusions of the surface of electrodes in high-voltage vacuum insulation systems by small metallic bumping microparticles was analyzed. The microparticles are separated from the surface of electrodes and they move in the interelectrode space under electrostatic forces. The assumption in the calculations was that the microparticles bumping the electrode surface are spherical in shape and are made of the same material as the electrode. Insulation systems with electrodes made of copper, aluminium and titanium were analyzed. Correlations between the length of vacuum gap and minimal values of voltage under which accelerated microparticles of various sizes cause deformations of the electrode surface were determined.

Calculations were performed with the use of computer program developed in C# language in the Visual Studio 2013 environment.

*(Received: 25.01.2019, revised: 08.03.2019)*

