

Władysław OPYDO*
Włodzimierz BIELIŃSKI**
Dawid OPYDO*

PRĘDKOŚCI MIKROCZĄSTEK W PRÓŻNIOWYCH I GAZOWYCH WYSOKONAPIĘCIOWYCH UKŁADACH IZOLACYJNYCH

W pracy przedstawiono wyniki obliczeń prędkości mikrocząstek oderwanych od elektrody i przemieszczających się w przestrzeni międzyelektrodowej pod wpływem pola elektrycznego, w próżniowych oraz gazowych wysokonapięciowych układach izolacyjnych. Założono, że przemieszczające się mikrocząstki mają kształt kuli i są wykonane z miedzi, aluminium lub żelaza, a pole elektryczne w układzie izolacyjnym jest jednostajne. Obliczono prędkości mikrocząstek w chwili uderzenia w elektrodę przeciwległą. Wyznaczono minimalne prędkości mikrocząstek, które są konieczne do odkształcenia plastycznego powierzchni elektrody spowodowanego uderzeniem.

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

SŁOWA KLUCZOWE: próżniowe i gazowe wysokonapięciowe układy izolacyjne, mikrocząstki metaliczne, przeskok elektryczny

1. WPROWADZENIE

Bryłka materiału znajdująca się na powierzchni elektrody wysokonapięciowego układu izolacyjnego, lub mikronierówność tej powierzchni, przy napięciu na zaciskach układu, ma pewien ładunek elektryczny. Zatem działają na nią siły elektrostatyczne odrywające ją od elektrody macierzystej, a przyciągające do elektrody przeciwległej. Jeśli te siły są większe od sił adhezji do podłoża to bryłka, mikronierówność, zostanie od powierzchni elektrody próżniowego lub gazowego układu izolacyjnego oderwana i rozpocznie przelot w kierunku elektrody przeciwległej.

W zasadzie, na powierzchniach elektrod starannie przygotowanych próżniowych lub gazowych układów izolacyjnych, nie powinny znajdować się duże

* Politechnika Poznańska.

** Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy.

bryłki i mikronierówności, więc zjawisko to dotyczy bardzo małych mikrocząstek o wymiarach mikrometrowych.

Skutki przemieszczania się w przestrzeni międzyelektrodowej mikrocząstek oraz ich uderzeń w powierzchnię elektrody przeciwległej stały się podstawowymi zjawiskami kilku hipotez inicjowania przeskoku w próżniowych układach izolacyjnych [6, 7, 8]. Są także jedną z przyczyną odchyłeń wytrzymałości elektrycznej gazowych układów izolacyjnych od prawa Paschena [7]. Te skutki zależą w znacznym stopniu od energii kinetycznej mikrocząstki w chwili uderzenia w powierzchnię elektrody przeciwległej. A zatem zależą od: wartości natężenia pola elektrycznego w układzie oraz jego rozkładu w przestrzeni międzyelektrodowej, rozmiarów mikrocząstki (jej masy) i prędkości w chwili uderzenia w elektrodę.

Występujące w próżniowych układach izolacyjnych mikrocząstki wg Menona i Srivastavy [5] można podzielić, w zależności od ich prędkości w chwili uderzenia, 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 elektrodowym, tj. do około 4 km/s,
- mikrocząstki o bardzo dużych prędkościach.

Mikrocząstki o małych prędkościach w układach izolacyjnych nie mają wystarczającej energii kinetycznej do zderzenia niesprężystego z powierzchnią elektrody. Zainicjowanie wyładowania w układzie izolacyjnym przez te wolne mikrocząstki jest możliwe w wyniku rozwoju w całej przestrzeni międzyelektrodowej wyładowania między elektrodą (najczęściej katodą) a mikrocząstką, które wystąpi po zbliżeniu się mikrocząstki na odległość kilku mikrometrów od elektrody.

Ponadto, przy uderzeniu w elektrodę następuje przeładowanie mikrocząstki – zmiana biegunowości jej ładunku elektrycznego na przeciwny. W ten sposób, po sprężystym odbiciu od elektrody, podczas powtórnego przelotu, lub powtórnych przelotów i odbić, mikrocząstka może zgromadzić energię większą, wystarczającą do zderzenia niesprężystego z powierzchnią elektrody.

Mikrocząstki o średnich prędkościach mają prędkości większe od potrzebnej do spowodowania odkształceń plastycznych powierzchni elektrody. Mogą one doprowadzić do przeskoku w wyniku uderzenia w elektrodę, które spowoduje:

- wytworzenie krateru, czemu towarzyszy wyrzucenie metalu w postaci stałej, płynnej bądź gazowej,
- bezpośrednie wytworzenie plazmy.

Krawędzie kraterów na powierzchni katody wskutek ich ostrości są dobrymi emiterami elektronów w emisji polowej.

Plazma powstająca w wyniku uderzenia mikrocząstki jest rezultatem jonizacji termicznej spowodowanej działaniem energii kinetycznej mikrocząstki wywołanej w obszarze uderzenia.

Mikrocząstki o bardzo dużych prędkościach, występujące w praktycznych próżniowych i gazowych układach izolacyjnych, mają promień mniejszy od 0,01 μm . W wyniku uderzenia w powierzchnię elektrody mikrocząstki te parują i przyczyniają się do pewnego zwiększenia ilości par metalu w pobliżu tej powierzchni, co nie wywiera jednak znaczącego wpływu na wytrzymałość elektryczną układu izolacyjnego.

W przypadku próżniowych układów izolacyjnych pierwszą hipotezą inicjowania przeskoku przez mikrocząstki była hipoteza Cranberga [2], który założył, że oderwana od elektrody bryłka materiału może zainicjować przeskoczenie, jeżeli gęstość energii w obszarze uderzenia w elektrodę przeciwną przekracza pewną wartość krytyczną. Cranberg nie rozważał [2] szczegółowo całego mechanizmu rozwoju jonizacji prowadzącego do przeskoku. Takiego uzupełnienia jego oryginalnej hipotezy dokonali Sliwko [9] oraz Germain i Rohrbach [3]. Autorzy ci analizowali ten mechanizm pod względem ilościowym oraz zweryfikowali go eksperymentalnie w warunkach kontrolowanych. W obu pracach założono, że naładowana mikrocząstka z materiału elektrody, mająca bardzo małą średnicę (około 10^{-7} m) i kształt kuli bądź półelipsoidy, przyspieszona w polu elektrycznym uderza w elektrodę o przeciwnej biegunowości i ulega odparowaniu. W powstałych w ten sposób parach rozprzestrzeniających się z obszaru zderzenia rozwija się mikrowyładowanie zdefiniowane za pomocą prawa Paschena. Chociaż mikrowyładowanie to może być tłumione w miarę obniżania się ciśnienia par wskutek ich rozprzestrzeniania się, to zakłada się, że liczba wytworzonych jonów wystarcza do miejscowego nagrzania powierzchni elektrod, spowodowania emisji wtórnej, uwolnienia zaadsorbowanych gazów, a nawet parowania materiału elektrod – procesy te są skutkiem oddziaływania jonów, przyspieszonych w polu elektrycznym, na powierzchnie elektrod. W uwolnionych w ten sposób gazach lub parach materiału elektrod rozwija się wyładowanie i przeskoczenie.

W niniejszej pracy zostaną przedstawione wyniki obliczeń prędkości mikrocząstek dla warunków występujących w naprężonych elektrycznie próżniowych i gazowych układach izolacyjnych. Założono przy tym, że obliczenia będą przeprowadzone dla układów izolacyjnych z polem elektrycznym makroskopowo jednostajnym, a mikrocząstki o kształcie kuli będą zbudowane z miedzi, aluminium lub żelaza, tj. pierwiastków metalicznych, z których najczęściej wykonywane są elementy wysokonapięciowych układów izolacyjnych, lub, które stanowią główny składnik materiałów tych elementów.

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

2. PODSTAWOWE ZALEŻNOŚCI

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

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

gdzie: ε_0 – przenikalność elektryczna próżni, r_m – promień mikrocząstki, E_0 – średnie natężenie 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, 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, m – masa mikrocząstki.

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

$$v = \pi U \left(\frac{\varepsilon_0}{r_m \delta_m d} \right)^{1/2} \quad (3)$$

By uderzająca mikrocząstka spowodowała odkształcenie plastyczne materiału elektrody, musi mieć prędkość większą od prędkości krytycznej odkształcenia plastycznego materiału elektrody, zdefiniowaną jako najmniejsza wartość prędkości, którą należy nadać części materiału, by spowodować jego odkształcenie plastyczne. Prędkość krytyczną odkształcenia plastycznego wyraża wzór [1]:

$$v_p = \left(\frac{\delta R_e}{\delta_e} \right)^{1/2} \quad (4)$$

gdzie: R_e – granica plastyczności materiału elektrody, δ_e – gęstość materiału elektrody.

Ze wzorów (3) i (4) wyznaczono zależność, pozwalającą wyznaczyć maksymalną wartość promienia mikrocząstki kulistej powodującej odkształcenie plastyczne powierzchni elektrody:

$$r_{mk} = \frac{\pi^2 \varepsilon_0 \delta_e U^2}{8 R_e \delta_m d} \quad (5)$$

Przy założeniu, że mikrocząstka jest wykonana z tego samego materiału jak elektroda, w którą uderza ($\delta_e = \delta_m$), wzór (5) upraszcza się do postaci:

$$r_{mk} = \frac{\pi^2 \varepsilon_0 U^2}{8 R_e d} \quad (6)$$

3. WYNIKI OBLICZEŃ

Wykorzystane w obliczeniach wartości stałych materiałowych: miedzi, aluminium i żelaza (gęstości oraz granicy plastyczności) zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie stałych materiałowych – gęstości oraz granicy plastyczności – miedzi, aluminium i żelaza

Rodzaj materiału	Gęstość materiału (δ)	Granica plastyczności materiału (R_e)
Miedź	8933 kg/m ³	35 MPa
Aluminium	2720 kg/m ³	60 MPa
Żelazo	7875 kg/m ³	185 MPa

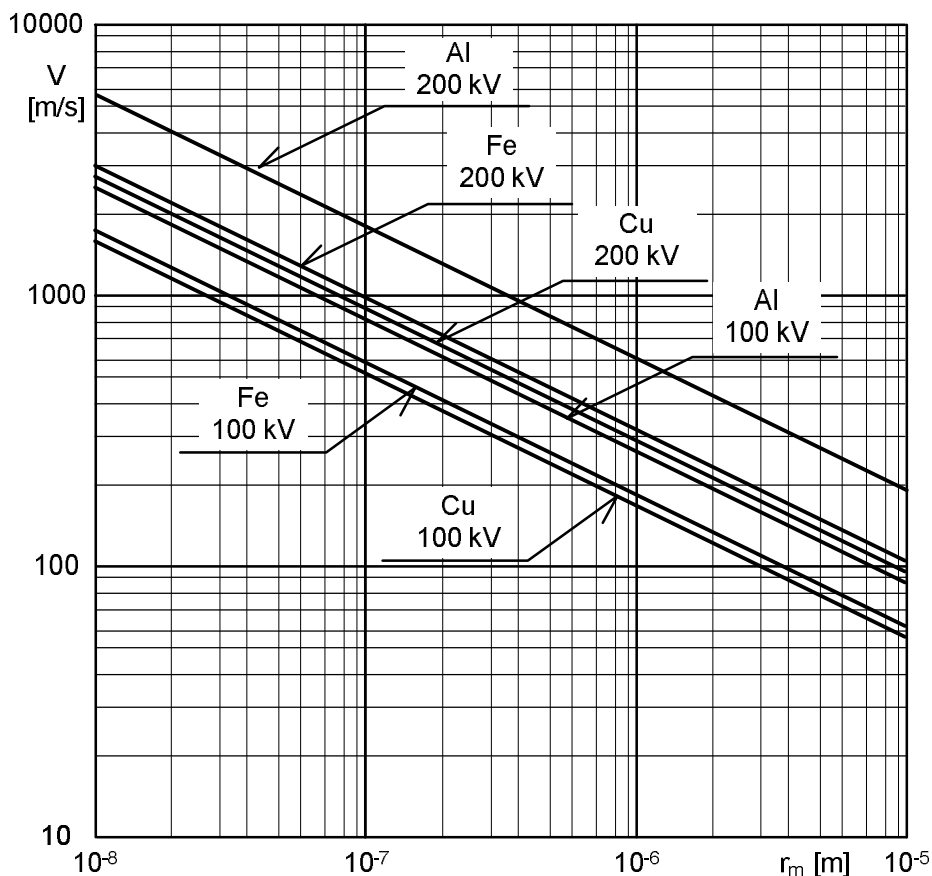
Po podstawieniu do wzoru (4) wartości stałych materiałowych z tabeli 1 obliczono prędkości krytyczne odkształcenia plastycznego miedzi, aluminium i żelaza. Mają one następujące wartości: $V_{pCu} = 177,0$ m/s; $V_{pAl} = 420,1$ m/s; $V_{pFe} = 433,5$ m/s.

Korzystając ze wzoru (3) wyznaczono zależności prędkości kulistych mikrocząstek, w chwili uderzenia w powierzchnię elektrody przeciwległej, od ich promieni. Zależności te przedstawiono na rys. 1. Wyznaczone je dla układów izolacyjnych, których zarówno elektrody i mikrocząstki wykonane były z tego samego materiału (miedzi, aluminium lub żelaza), odstęp elektrod wynosił 5 mm, a napięcie na zaciskach układu miało wartość 100 kV i 200 kV.

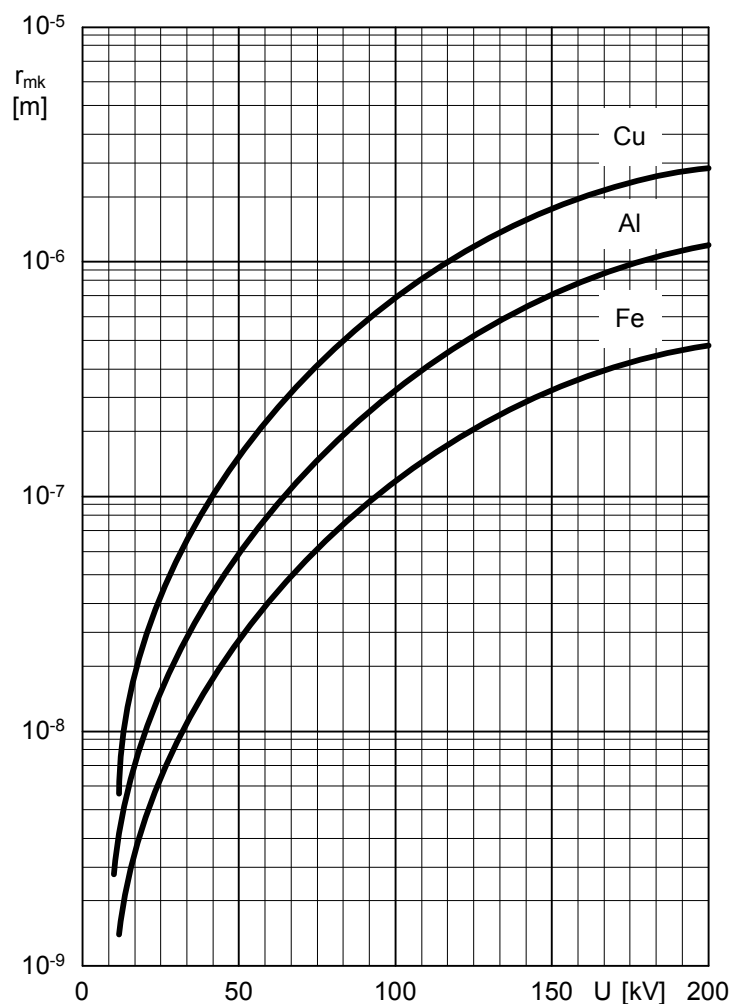
Przy analizowaniu hipotez mechanizmów inicjowania przeskoku w próżniowych lub gazowych wysokonapięciowych układach izolacyjnych bardzo przydatna jest zależność maksymalnego promienia mikrocząstki, mogącej odkształcić plastycznie powierzchnię elektrody, od wartości napięcia na zaciskach ukła-

du izolacyjnego. Zależność taką wyznaczono korzystając ze wzoru (6). Przedstawiono ją na rys 2. Przy obliczeniach założono, że odstęp elektrod układu jest równy 5 mm, a zarówno mikrocząstka jak i elektroda układu, w którą mikrocząstka uderza są wykonane z tego samego materiału (miedzi, aluminium lub żelaza).

Z porównania charakterystyk z rys. 1 z obliczonymi wartościami prędkości krytycznych odkształcenia plastycznego materiałów elektrodowych oraz z rys. 2 wynika, przy napięciu 100 kV największa kulista mikrocząstka miedziana, mogąca w wyniku uderzenia odkształcić powierzchnię elektrody miedzianej ma promień około $0,6 \mu\text{m}$. Promień analogicznej mikrocząstki aluminiowej w układzie z elektrodami aluminiowymi wynosi około $0,3 \mu\text{m}$ i około $0,1 \mu\text{m}$ promień mikrocząstki żelaznej w układzie z elektrodami żelaznymi.

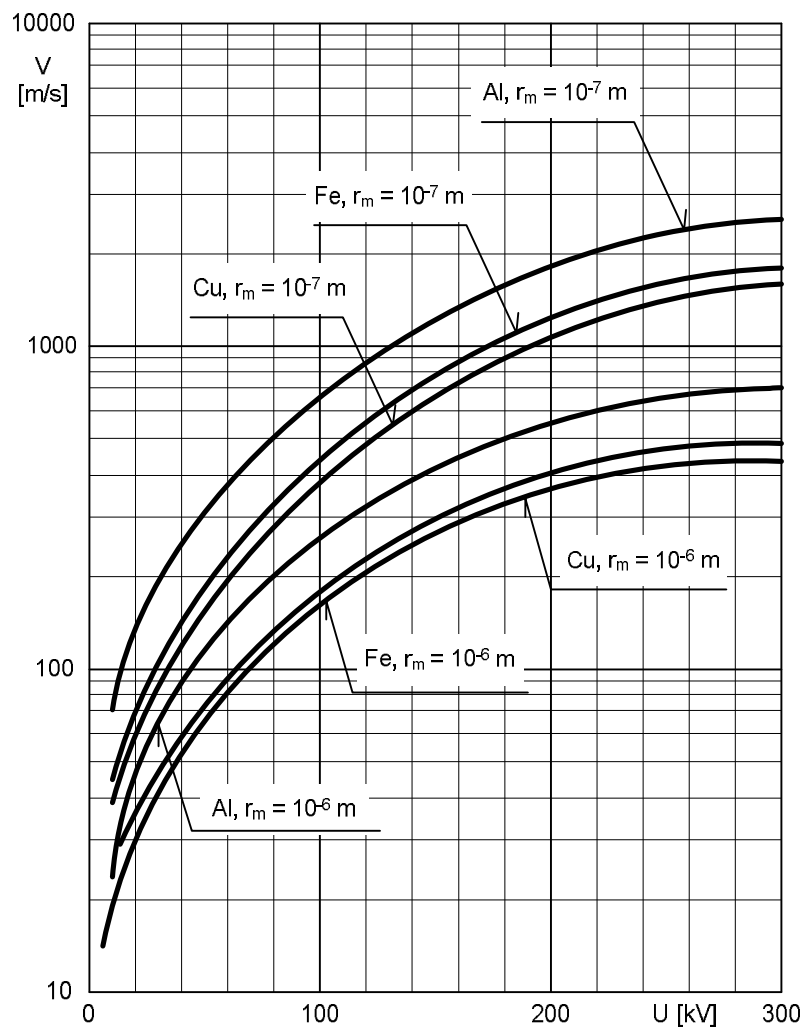


Rys. 1. Zależności prędkości kulistych mikrocząstek miedzianych, aluminiowych oraz żelaznych, w chwili uderzenia w powierzchnię elektrody przeciwległej, od ich promieni, w układzie izolacyjnym z odstępem elektrod równym 5 mm przy napięciu 100 kV i 200 kV



Rys. 2. Zależność maksymalnej wartości promienia kulistej mikrocząstki, powodującej odkształcenie plastyczne powierzchni elektrody próżniowego lub gazowego wysokonapięciowego układu izolacyjnego, od wartości napięcia na zaciskach układu; zarówno mikrocząstka jak i elektrody układu były wykonane z tego samego materiału (miedzi, aluminium lub żelaza), a odstęp elektrod był równy 5 mm

Przy napięciu 200 kV natomiast, największa kulista mikrocząstka miedziana, mogąca w wyniku uderzenia odkształcić powierzchnię elektrody miedzianej ma promień około 3 μm . Promień analogicznej mikrocząstki aluminiowej w układzie z elektrodami aluminiowymi wynosi około 1 μm i około 0,5 μm promień mikrocząstki żelaznej w układzie z elektrodami żelaznymi.



Rys. 3. Zależność prędkości kulistych mikrocząstek; miedzianych, aluminiowych i żelaznych, o promieniu 10^{-6} m oraz 10^{-7} m, w chwili uderzenia w powierzchnię elektrody przeciwległej, od wartości napięcia na zaciskach próżniowego lub gazowego układu izolacyjnego z 5 mm odstępem elektrod

Na kolejnym rys. 3 przedstawiono zależności prędkości kulistych mikrocząstek, w chwili uderzenia w powierzchnię elektrody przeciwległej, od wartości napięcia na zaciskach układu. Zależności te zostały wyznaczone ze wzoru (3) przy założeniu, że zarówno elektrody jak i kuliste mikrocząstki (o promieniu 10^{-6} m i 10^{-7} m) były wykonane z tego samego materiału (miedzi, aluminium lub żelaza), a odstęp elektrod w układzie wynosił 5 mm.

Z rys. 3 wynika, że przy napięciu około 70 kV, czyli przy wartości średniej natężeniu pola elektrycznego w przestrzeni międzyelektrodowej wynoszącej $E_0 = U/d = 14$ kV/mm, mikrocząstki kuliste o promieniu 10^{-6} m lub mniejszym, wykonane z miedzi, aluminium i żelaza, uderzają w elektrodę przeciwną z prędkością większą od 100 m/s, tj. z prędkością większą od uznanej przez Menona i Srivastavy [98] za dolną granicę prędkości średnich mikrocząstek w układach izolacyjnych.

4. WNIOSKI

Z pracy wynikają następujące wnioski, istotne przy analizie właściwości próżniowych i gazowych wysokonapięciowych układów izolacyjnych:

1. Prędkość krytyczna odkształcenia plastycznego miedzi, aluminium oraz żelaza, zdefiniowana jako najmniejsza wartość prędkości, którą należy nadać części materiału, by spowodować jego odkształcenie plastyczne wynosi: 177,0 m/s dla miedzi, 420,1 m/s dla aluminium i 433,5 m/s dla żelaza.
2. Przy napięciu 100 kV na zaciskach próżniowego lub gazowego układu izolacyjnego z 5 mm odstępem elektrod, największa kulista mikrocząstka miedziana, mogąca w wyniku uderzenia odkształcić powierzchnię elektrody miedzianej ma promień około 0,6 μm . Promień analogicznej mikrocząstki aluminiowej, w tych samych warunkach, w układzie z elektrodami aluminiowymi wynosi około 0,3 μm , natomiast promień mikrocząstki żelaznej w układzie z elektrodami żelaznymi około 0,1 μm .
3. Przy napięciu 200 kV na zaciskach próżniowego lub gazowego układu izolacyjnego z 5 mm odstępem elektrod, największa kulista mikrocząstka miedziana, mogąca w wyniku uderzenia odkształcić powierzchnię elektrody miedzianej ma promień około 3 μm . Promień analogicznej mikrocząstki aluminiowej, w tych samych warunkach, w układzie z elektrodami aluminiowymi wynosi około 1 μm , natomiast promień mikrocząstki żelaznej w układzie z elektrodami żelaznymi około 0,5 μm .
4. W próżniowym lub gazowym układzie izolacyjnym, z 5 mm odstępem elektrod, przy napięciu wynoszącym 70 kV, czyli przy wartości średniej natężenia pola elektrycznego w przestrzeni międzyelektrodowej wynoszącej $E_0 = U/d = 14$ kV/mm, mikrocząstki kuliste o promieniu 10^{-6} m lub mniejszym, wykonane z miedzi, aluminium lub żelaza, po oderwaniu od elektrody macierzystej i przelocie przez przestrzeń międzyelektrodową uderzają w elektrodę przeciwną z prędkością większą od 100 m/s.

LITERATURA

- [1] Cook M.A., The science of high explosives, New York, Reinhold Publication 1958.

- [2] Cranberg L., The initiation of electrical breakdown in vacuum, *J. Appl. Phys.*, 1952, Vol. 23, s. 518.
- [3] Germain C., Rohrbach F., Mécánisme des decharges dans le vide, *Proc. of VI Int. Conf. on Ionisation Phenomena in Gases*, Paris 1963, Vol. 2, s. 111.
- [4] Lebedev N.N., Skal'skaâ I.P., Sila dejstvuûščaâ na provodâščij šarik, pomeščennoj v pole plaskogo kondensatora, *Žurnal tehničeskoj fiziki*, 1962, t. 32, s. 375.
- [5] Menon M.M., Srivastava K.D., The nature of microparticles and their role in vacuum breakdown, *Proc. of VI International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*, Swansea, UK, 1974, s. 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., Właściwości gazowych i próżniowych wysokonapięciowych układów izolacyjnych, *Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej*, Poznań 2008.
- [8] Opydo W., Ranachowski J., Właściwości elektryczne próżniowych układów izolacyjnych przy napięciu przemiennym, *Wydawnictwo Naukowe PWN*, Warszawa – Poznań 1993.
- [9] Slivkov I.N., O mehanizme èlektričeskoego proboâ v vakuume, *Žurnal tehničeskoj fiziki*, 1957, t. 27, s. 2081.

THE VELOCITY OF MICROPARTICLES IN HIGH-VOLTAGE VACUUM AND GAS INSULATED SYSTEMS

Results of the calculations of the velocities of microparticles detached from the electrode and moving in the electrode gap under the influence of the electric field, in high-voltage vacuum or gas insulated systems, have been presented in the paper. It was assumed that microparticles are spherical in shape and are made of copper, aluminum or iron and electric field in the system is uniform. Velocities of microparticles at the time of their impact on the opposing electrode were calculated. Minimal velocities of microparticles, which are necessary to cause plastic deformation of the electrode surface were determined.

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

(Received: 3. 02. 2016, revised: 3. 03. 2016)