

Grzegorz TWARDOSZ*
Władysław OPYDO**
Jerzy STAWICKI**

PRĄDY SPOWODOWANE PRZEMIESZCZANIEM SIĘ MIKROCZĄSTEK W WYSOKONAPIĘCIOWYCH PRÓŻNIOWYCH UKŁADACH IZOLACYJNYCH

W pracy przedstawiono wyniki obliczeń wartości szczytowych i czasów trwania impulsów prądowych spowodowanych przelotem mikrocząstek metalicznych między elektrodami wysokonapięciowego próżniowego układu izolacyjnego. Obliczenia przeprowadzono przy założeniu, że przemieszczające się mikrocząstki są wykonane z miedzi lub aluminium i mają kształt kuli o promieniu od $0,1 \mu\text{m}$ do $100 \mu\text{m}$, długość przerwy międzyelektrodowej układów wynosi 10 mm , a napięcie na zaciskach ma wartość 100 kV lub 200 kV . Dla tych warunków największy obliczony impuls prądowy, spowodowany przelotem największej mikrocząstki (o promieniu równym $100 \mu\text{m}$) miał wartość szczytową $2 \cdot 10^{-7} \text{ A}$ i trwał 2 ms .

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

SŁOWA KLUCZOWE: wysokonapięciowe próżniowe układy izolacyjne, mikrocząstki metaliczne, przeskoc elektryczny

1. WPROWADZENIE

Mikronierówność powierzchni elektrody wysokonapięciowego układu izolacyjnego lub mała bryłka materiału, mikrocząstka, na tej powierzchni, przy napięciu na zaciskach układu, ma pewien ładunek elektryczny. Zatem działa na nią siła elektrostatyczna odrywająca ją od elektrody. Jeśli ta siła jest większa od siły adhezji do podłoża to bryłka, mikronierówność, zostaje od powierzchni elektrody próżniowego układu izolacyjnego oderwana i rozpoczyna przelot w stronę elektrody przeciwległej. Podczas tego przelotu rośnie jej energia kinetyczna.

Skutki przemieszczania się mikrocząstek między elektrodami próżniowego układu izolacyjnego oraz ich uderzeń w powierzchnię elektrody przeciwległej stały się podstawowymi zjawiskami kilku hipotez inicjowania przeskoku elektrycznego w tych układach [1, 3, 8]. Historycznie pierwszą hipotezą z tej grupy

* Politechnika Poznańska.

** Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy.

była hipoteza Cranberga [1]. Wg tej hipotezy mikrocząstka uderzając w powierzchnię elektrody powoduje miejscowe odparowanie materiału elektrody i wskutek jonizacji powstałych par, przy dostatecznej ich gęstości, dochodzi do przeskoku. Sliwko [8] zmodyfikował ten mechanizm przez sugestię, że mikrocząstka także wyparowuje przy zderzeniu. Mechanizm Sliwkowa umożliwia obliczenie górnej i dolnej granicy wartości promienia mikrocząstki, która może spowodować przeskok. Jeśli mikrocząstka jest za mała, nie ma wystarczającej liczby atomów, które wyparowując przy zderzeniu mogłyby zainicjować przeskok. Jeśli natomiast jest zbyt duża, jej energia kinetyczna jest za mała do spowodowania odparowania. Wyznaczone w ten sposób wartości promieni mikrocząstek mogących inicjować przeskok są rzędu dziesiątej części mikrometra.

Mikrocząstki o wymiarach nieco większych nie mogą inicjować przeskoku bezpośrednio. Mogą one natomiast uszkodzić elektrodę i wytwarzać kratery, których krawędzie są dobrym emitorem elektronów emitowanych przez emisję polową. Może to prowadzić do zainicjowania przeskoku wg jednego z mechanizmów prądowo-emisyjnych [4–7].

Mikrocząstki o jeszcze większych wymiarach nie mogą zgromadzić podczas przelotu odpowiedniej wartości energii kinetycznej i w ich przypadku tylko zderzenie sprężyste z elektrodą jest możliwe. Jednak taka odbita od elektrody mikrocząstka przy uderzeniu w elektrodę zmienia biegunowość swojego ładunku i podczas powtórnego przelotu, lub powtórnym przelotów i odbić, może zgromadzić energię większą od potrzebnej do zderzenia niesprężystego z elektrodą.

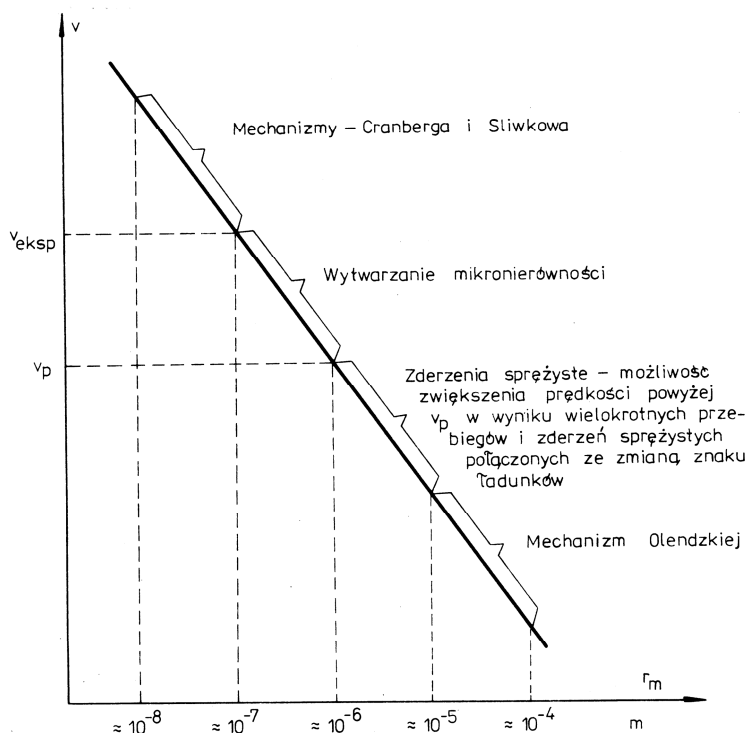
Z dalszym wzrostem promienia mikrocząstek (powyżej 20 μm) pojawia się, wg Olendzkiej [3], możliwość wystąpienia wyładowania lokalnego między mikrocząstką, a elektrodą do której się zbliża i zainicjowania przeskoku przez to wyładowanie.

Z powyższego, krótkiego przeglądu wynika, że rodzaj mechanizmu inicjowania przeskoku przez mikrocząstkę naładowaną zależy od jej prędkości w chwili uderzenia w elektrodę oraz od jej masy (promienia). Na rys. 1 przedstawiono schematycznie przedziały prędkości mikrocząstek i orientacyjny rząd ich promieni, w zakresie których działają powyższe mechanizmy inicjowania przeskoku.

Przebieg mikrocząstki naładowanej między elektrodami próżniowego układu izolacyjnego powoduje w obwodzie zasilającym przepływ prądu elektrycznego. Niniejsza praca jest próbą odpowiedzi na następujące pytania: jaka jest wartość szczytowa impulsu tego prądu, jego czas trwania oraz czy pomiary tego prądu mogą zostać wykorzystane do stwierdzenia przemieszczania się mikrocząstek w układzie i oszacowania ich rozmiarów.

Ponieważ wysokonapięciowe układy izolacyjne powinny być konstruowane tak, by rozkład pola elektrycznego w przestrzeni międzyelektrodowej był jednostajny, lub zbliżony do jednostajnego, więc rozważania przedstawione w niniejszej pracy dotyczą układów izolacyjnych z polem elektrycznym makroskopowo jednostajnym. Założono ponadto, że przemieszczające się w próżniowym ukła-

dzie izolacyjny mikrocząstki mają kształt kuli i są zbudowane z miedzi lub aluminium, tj. pierwiastków, z których najczęściej wykonywane są elementy wysokonapięciowych układów izolacyjnych.



Rys. 1. Schematyczne zestawienie przedziałów prędkości mikrocząstek i rzędu wartości ich promieni, którym odpowiadają różne mechanizmy inicjowania przeskoku w próżni przez mikrocząstki naładowane; v – prędkość mikrocząstki, r_m – promień mikrocząstki, v_{eksp} – minimalna prędkość konieczna do wyparowania eksplozyjnego, v_p – prędkość krytyczna konieczna do odkształcenia plastycznego powierzchni elektrody [4]

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 leżąca na powierzchni elektrody naprężonego elektrycznie układu izolacyjnego ma ładunek elektryczny [2]

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

gdzie: ε_0 – przenikalność elektryczna próżni, r_m – promień mikrocząstki, E_0 – średnie natężenie pola elektrycznego makroskopowego przy powierzchni elektrody, na której znajduje się mikrocząstka.

Zatem na mikrocząstkę działa 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 przeciwległej. Z bilansu energetycznego (energia dostarczona mikrocząstce przez pole elektryczne zamienia się w energię kinetyczną mikrocząstki) wynika, że w chwili uderzenia w elektrodę przeciwległą 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.

Jeśli pole elektryczne w układzie jest makroskopowo jednostajne, w odległości x od elektrody macierzystej, mikrocząstka będzie miała prędkość

$$v_x = \left(\frac{2QUx}{md} \right)^{1/2} \quad (3)$$

gdzie d – długość przerwy międzyelektrodowej.

Ruch mikrocząstki naładowanej w przestrzeni międzyelektrodowej związany jest z przepływem prądu i w obwodzie zewnętrznym. Wartość tego prądu można wyznaczyć z bilansu energetycznego – energia dostarczona mikrocząstce przez pole elektryczne jest równa energii dostarczonej przez obwód zewnętrzny. Zatem

$$E_x Q dx = U i dt \quad (4)$$

gdzie: E_x – natężenie pola elektrycznego w odległości x od elektrody macierzystej mikrocząstki, U – napięcie na zaciskach układu.

Z równania (4) wynika, że

$$i = \frac{E_x}{U} Q \frac{dx}{dt} \quad (5)$$

Jeśli pole elektryczne w układzie jest jednostajne, $E_x = U/d$, a prędkość mikrocząstki $v_x = dx/dt$, ze wzoru (5), po podstawieniu w nim zależności (3) otrzymuje się

$$i = \frac{Q}{d} \left(\frac{2QUx}{md} \right)^{1/2} \quad (6)$$

Mikrocząstka porusza się ruchem jednostajnie przyspieszonym bez prędkości początkowej. Korzystając ze wzoru na drogę w tego rodzaju ruchu: $x = at^2/2$, gdzie t jest czasem lotu mikrocząstki, a jej przyspieszeniem ($a = F/m$), a F siłą działającą na mikrocząstkę ($F = QU/d$), otrzymano

$$x = \frac{UQt^2}{2md} \quad (7)$$

Po podstawieniu wzoru (7) do zależności (6) otrzymano następujący wzór określający zależność prądu, spowodowanego przemieszczaniem się mikrocząstki w układzie izolacyjnym z polem elektrycznym w przestrzeni międzyelektrodowej makroskopowo jednostajnym, od czasu mierzonego od chwili oderwania się mikrocząstki od elektrody

$$i = \frac{Q^2U}{md^2} t \quad (8)$$

Podstawiając we wzorze (8) wartość ładunku zgromadzonego na mikrocząstce, określonej wzorem (1), w którym $E_0 = U/d$, otrzymano

$$i = \frac{4}{9} \pi^6 \varepsilon_0^2 r_m^4 \frac{U^3 t}{md^4} \quad (9)$$

a wprowadzając $m = (4/3)\pi r_m^3 \delta_m$ (gdzie δ_m jest gęstością materiału mikrocząstki) uzyskano

$$i = \frac{\pi^5}{3} \varepsilon_0^2 r_m \frac{U^3 t}{\delta_m d^4} \quad (10)$$

Zatem prąd spowodowany przemieszczaniem się naładowanej mikrocząstki w układzie izolacyjnym z polem makroskopowo jednostajnym jest liniowo zależny od czasu przemieszczania się mikrocząstki – czasu jej lotu. Czas przelotu t_p mikrocząstki, przez przerwę międzyelektrodową o długości d , można wyznaczyć ze wzoru (7) po wprowadzeniu w nim zależności (1), w której $E_0 = U/d$. W ten sposób otrzymano

$$t_p = \frac{2(d^3 r_m \delta_m)^{1/2}}{\pi \varepsilon_0^{1/2} U} \quad (11)$$

Po podstawieniu zależności (11) do wzoru (9) otrzymano następujący wzór, umożliwiający obliczenie wartości szczytowej prądu, którego przepływ spowodował przelot mikrocząstki, tj. wartości chwilowej prądu w chwili uderzenia mikrocząstki w elektrodę:

$$i_{\max} = \frac{2}{3} \pi^4 \varepsilon_0^{\frac{3}{2}} U^2 \left(\frac{r_m^3}{\delta_m d^5} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

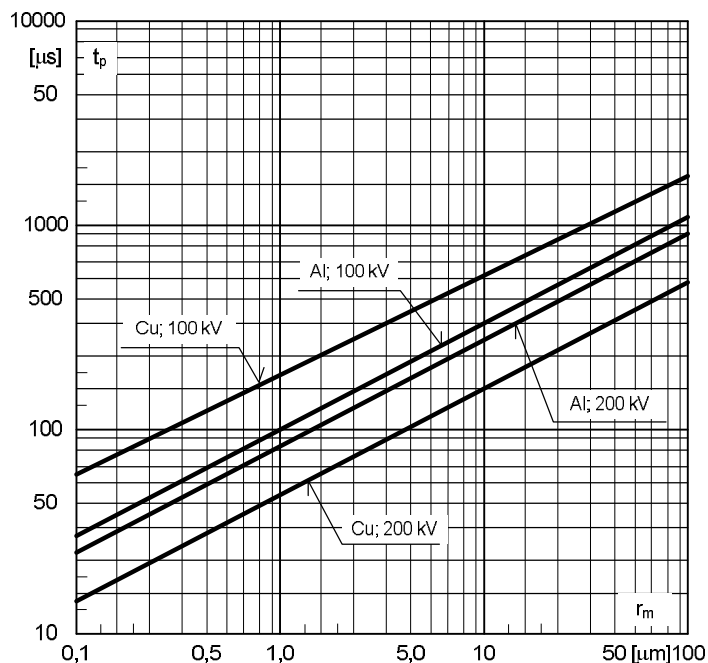
3. WYNIKI OBLICZEŃ

Wykorzystując wzory (11) i (12) wyznaczono zależność czasu przelotu kulistych mikrocząstek między elektrodami próżniowych układów izolacyjnych z polem elektrycznym jednostajnym od wartości ich promieni oraz zależność

wartości szczytowej prądu, tj. w chwili uderzenia mikrocząstki w elektrodę, od wartości promienia mikrocząstki.

Obliczenia przeprowadzono dla układów izolacyjnych próżniowych, których długość przerwy międzyelektrodowej wynosiła 10 mm, mikrocząstki miały kształt kuli i były wykonane z miedzi lub aluminium, a wartość napięcia na zaciskach układu wynosiła 100 kV oraz 200 kV. W obliczeniach przyjęto gęstość miedzi 8933 kg/m^3 i aluminium 2720 kg/m^3 .

Zależność czasu przelotu, przez 10 mm przerwę międzyelektrodową próżniowego układu izolacyjnego, kulistej mikrocząstki wykonanej z miedzi lub aluminium, przy napięciu na zaciskach układu wynoszącym 100 kV i 200 kV, od promienia tej mikrocząstki przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Zależność czasu przelotu, przez 10 mm przerwę międzyelektrodową próżniowego układu izolacyjnego, kulistej mikrocząstki wykonanej z miedzi lub aluminium, przy napięciu na zaciskach układu wynoszącym 100 kV i 200 kV, od promienia mikrocząstki

Czas trwania impulsu prądu, którego przepływ powoduje przemieszczająca się między elektrodami naładowana mikrocząstka jest równy czasowi przelotu tej mikrocząstki przez przerwę międzyelektrodową. Zatem z rys. 2 wynika, że czasy trwania impulsów prądu, które powodują przeloty mikrocząstek w analizowanych układach, w przypadku mikrocząstek o promieniu $0,1 \mu\text{m}$ są rzędu kilku setnych ms; rzędu $0,1 \text{ ms}$, w przypadku mikrocząstek o promieniu $1 \mu\text{m}$; rzędu kilku dzie-

siątych ms, w przypadku mikrocząstek o promieniu $10\ \mu\text{m}$ i rzędu 1 ms, w przypadku mikrocząstek o promieniu $100\ \mu\text{m}$. Czasy te są bardzo krótkie i dlatego przy pomiarach impulsy prądu spowodowane przelotem mikrocząstek mogą być maskowane przez przepływ prądu spowodowanego emisją połową elektronów z katody, czy też mikrowyładowaniami innego rodzaju.

Na rys. 3 przedstawiono zależności wartości szczytowej prądu, którego przepływ w próżniowym układzie izolacyjnym z 10 mm przerwą międzyelektrodową, przy napięciu na zaciskach układu wynoszącym 100 kV i 200 kV, spowodowała przemieszczająca się między elektrodami miedziana lub aluminiowa kulista mikrocząstka, od wartości promienia mikrocząstki.

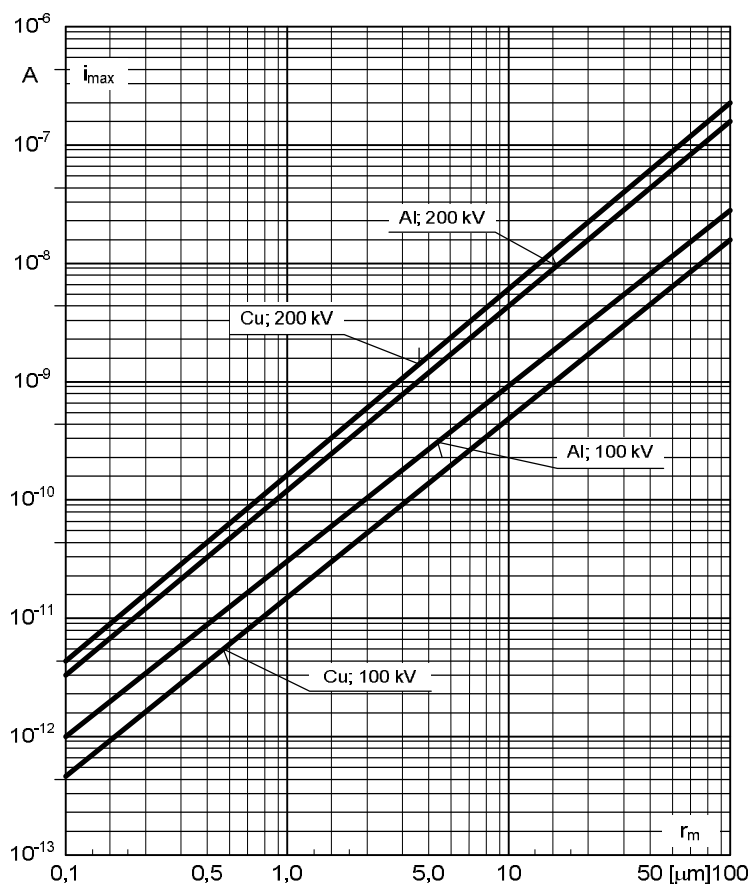
Z rys. 3 wynika, że wartości prądów, których przepływy powodują przemieszczające się mikrocząstki są bardzo małe. Np. przy napięciu 200 kV przelot miedzianej lub aluminiowej kulistej mikrocząstki o promieniu $0,1\ \mu\text{m}$ powoduje przepływ prądu o wartości szczytowej wynoszącej około $5 \cdot 10^{-12}\ \text{A}$; około $10^{-10}\ \text{A}$, w przypadku przelotu mikrocząstki o promieniu $1\ \mu\text{m}$, około $5 \cdot 10^{-9}\ \text{A}$, w przypadku przelotu mikrocząstki o promieniu $10\ \mu\text{m}$ i około $10^{-7}\ \text{A}$, w przypadku przelotu mikrocząstki o promieniu $100\ \mu\text{m}$.

Niewielkie wartości tych prądów, sporadyczność występowania na powierzchni elektrod mikrocząstek w starannie przygotowanym próżniowym układzie izolacyjnym, odrywania ich od powierzchni elektrod i przemieszczania się w przestrzeni międzyelektrodowej pod wpływem napięcia oraz maskowanie prądów spowodowanych przemieszczaniem się mikrocząstek przez mikrowyładowania innego typu sprawiają, że próby detekcji zjawiska przemieszczania się mikrocząstek w układach izolacyjnych, za pomocą pomiaru płynącego przez układ prądu, są bardzo trudne.

4. WNIOSKI

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

1. Prąd spowodowany przemieszczaniem się naładowanej mikrocząstki w próżniowym układzie izolacyjnym z polem makroskopowo jednostajnym jest liniowo zależny od czasu jej przemieszczania się – czasu lotu.
2. Czasy trwania impulsów prądu, które powodują przeloty mikrocząstek w próżniowych układach izolacyjnych z 10 mm przerwą międzyelektrodową, przy napięciu 100 kV i 200 kV, w przypadku mikrocząstek o promieniu $0,1\ \mu\text{m}$ są rzędu kilku setnych ms; rzędu 0,1 ms, w przypadku mikrocząstek o promieniu $1\ \mu\text{m}$; rzędu kilku dziesiątych ms, w przypadku mikrocząstek o promieniu $10\ \mu\text{m}$ i rzędu 1 ms, w przypadku mikrocząstek o promieniu $100\ \mu\text{m}$.



Rys. 3. Zależności wartości szczytowej prądu, którego przepływ w próżniowym układzie izolacyjnym z 10 mm przerwą międzyelektrodową, przy napięciu na zaciskach układu wynoszącym 100 kV i 200 kV, spowodowała przemieszczająca się między elektrodami miedziana lub aluminiowa kulista mikrocząstka, od wartości promienia mikrocząstki

3. Wartości prądów, których przepływ powodują przemieszczające się mikrocząstki są bardzo małe. Np. przy napięciu 200 kV przelot miedzianej lub aluminiowej kulistej mikrocząstki o promieniu 0,1 μm powoduje przepływ prądu o wartości szczytowej wynoszącej około $5 \cdot 10^{-12}$ A; około 10^{-10} A, w przypadku przelotu mikrocząstki o promieniu 1 μm ; około $5 \cdot 10^{-9}$ A, w przypadku mikrocząstki o promieniu 10 μm i około 10^{-7} A, w przypadku mikrocząstki o promieniu 100 μm .
4. Zarówno wartości szczytowe prądów spowodowanych przelotem mikrocząstek w próżniowych układach izolacyjnych oraz czasy trwania tych impulsów prądu są bardzo małe. Zatem mogą być maskowane przez impulsy prądu związanego z emisją polową elektronów z katody czy też przez prądy spowodowane

mikrowyładowaniami innego rodzaju. Ponieważ w dobrze przygotowanym układzie izolacyjnym zjawisko przemieszczania się mikrocząstek jest zjawiskiem sporadycznym więc próby detekcji przemieszczania mikrocząstek w próżniowym układzie izolacyjnym, na podstawie przebiegów czasowych przewodzonego przez układ prądu, są trudne.

LITERATURA

- [1] Cranberg L., The initiation of electrical breakdown in vacuum, J. Appl. Phys., 1952, vol. 23, s. 518.
- [2] Lebedev N.N., Skal'skaâ I.P., Sila dejstvuûšcaâ na provodašcij šarik, pomeščennoj v pole plaskogo kondensatora, Žurnal tehničeskoj fiziki, 1962, t. 32, s. 375.
- [3] Olendzkaja N.F., Proboj vakuumnogo promežutka pri perenose meždû elektrodami provodašcij častic, Radiotekhnika i elektronika, 1963, t. 8, s. 479.
- [4] 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.
- [5] Opydo W., Właściwości gazowych i próżniowych wysokonapięciowych układów izolacyjnych, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2008.
- [6] Opydo W., Bieliński W., Opydo D., Prędkości mikrocząstek w próżniowych i gazowych wysokonapięciowych układach izolacyjnych, Poznan University of Technology Academic Journals Electrical Engineering, 2016, nr 86, ss. 405–413.
- [7] Opydo W., Ranachowski J., Właściwości elektryczne próżniowych układów izolacyjnych przy napięciu przemiennym, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa – Poznań 1993.
- [8] Slivkov I.N., O mehanizme električeskogo proboâ v vakuume, Žurnal tehničeskoj fiziki, 1957, t. 27, s. 2081.

ELECTRIC CURRENTS CAUSED BY THE MOTION OF MICROPARTICLES IN HIGH-VOLTAGE VACUUM INSULATED SYSTEMS

The paper presents results of the calculations of the maximum values and duration of electric impulses caused by motion of metallic microparticles between electrodes in high-voltage vacuum insulated systems. Calculations were based on the assumption that microparticles are made of copper or aluminum and are spherical in shape with radii ranging from 0.1 to 100 μm , 10 mm length of system vacuum gap and 100 kV or 200 kV voltage at the terminals of a vacuum insulation system. For these conditions the highest calculated electric impulse, caused by the motion of the biggest microparticle (with radius of 100 μm) reached maximum values of $2 \cdot 10^{-7}$ A and lasted 2 ms.

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

(Received: 05. 02. 2017, revised: 27. 02. 2017)