

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

## **CZAS ROZWOJU PODSTAWOWYCH ZJAWISK FIZYCZNYCH W MECHANIZMACH INICJOWANIA PRZESKOKU ELEKTRYCZNEGO W PRÓŻNI**

W pracy przedstawiono analizę czasu rozwoju najwolniej przebiegających zjawisk fizycznych występujących w mechanizmach inicjowania przeskoku elektrycznego w próżni. Te zjawiska decydują w głównej mierze o opóźnieniu inicjowania przeskoku i powodują, że wytrzymałości elektryczne próżniowego układu izolacyjnego przy napięciu stałym, udarowym lub przemiennym będą się różnić.

Wyznaczono zależności stałej czasowej nagrzewnia mikrostrzy, wykonanych ze stali, miedzi bądź aluminium, od ich wysokości i porównano z zależnościami stałej czasowej nagrzewnia obszaru anody, wykonanej z tych samych materiałów, bombardowanego wiązką elektronów, od wartości napięcia. Ponadto wyznaczono 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. W mechanizmie desorpcyjnym inicjowania przeskoku wyznaczono zależność czasu całkowitego pokrycia powierzchni próżniowo czystej, o temperaturze 300 K, 600 K i 900 K, monomolekularną warstwą głównymi składnikami powietrza, azotem i tlenem, od ciśnienia.

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

**SŁOWA KLUCZOWE:** próżniowy wysokonapięciowy układ izolacyjny, przeskoc elektryczny, emisja połowa elektronów, mikrocząstki metaliczne, desorpcja, wytrzymałość elektryczna.

### **1. WSTĘP**

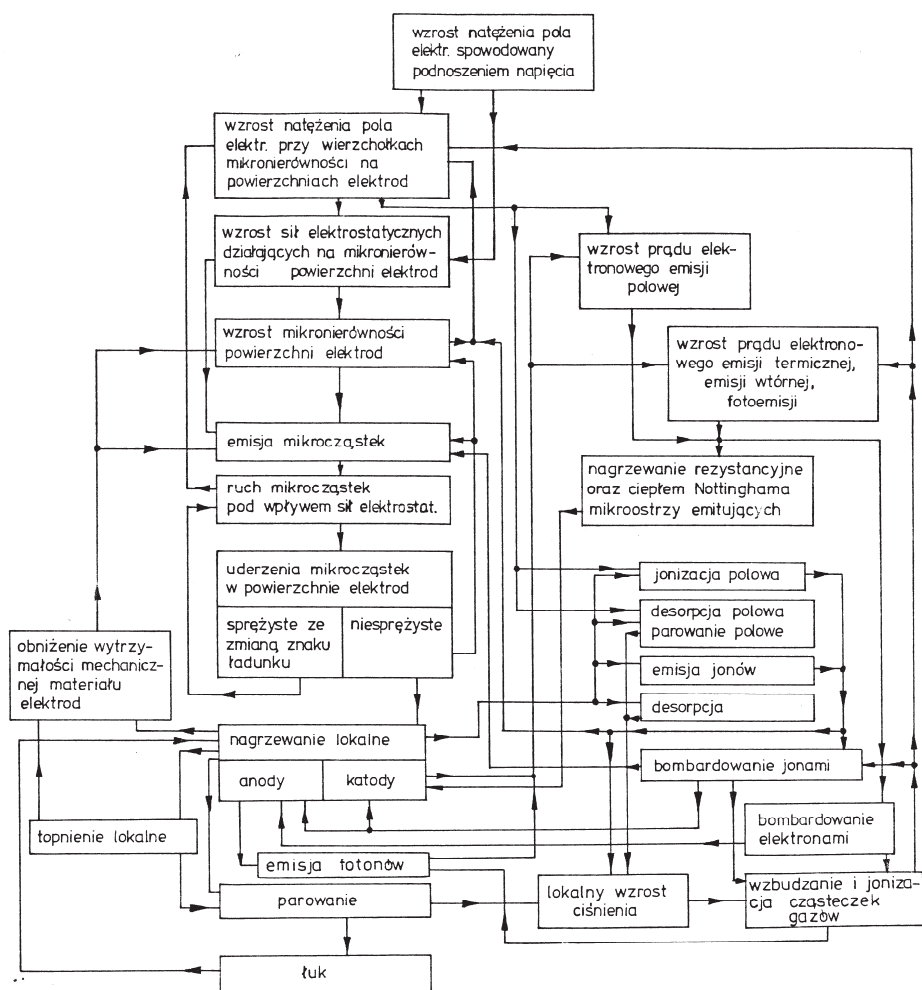
Do zainicjowania i rozwoju przeskoku elektrycznego w próżniowym wysokonapięciowym układzie izolacyjnym, muszą zaistnieć następujące warunki [6]: elektrony albo inne nośniki ładunku elektrycznego muszą zostać wprowadzone w przestrzeń międzyelektrodową oraz w przestrzeni tej musi pojawić się wystarczająca ilość cząsteczek gazów lub par, które po zjonizowaniu spowodują wzrost

---

\* Politechnika Poznańska

\*\* Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy

wartości prądu aż do warunków zwarciovych. Istotną rolę odgrywa tu kilkanaście zjawisk fizycznych, które współdziałając ze sobą inicjują przeskok. Intensywność poszczególnych zjawisk w procesie inicjowania zależy od warunków fizycznych w miejscu oddziaływania. Natomiast możliwości ich współdziałania mogą być bardzo różnorodne – rys. 1 [6].



Rys. 1. Schemat blokowy głównych możliwości współdziałania podstawowych zjawisk fizycznych w inicjowaniu i rozwoju przeskoku elektrycznego w próżni [6]

Niektóre z tych zjawisk przebiegają stosunkowo wolno; mają znacznie dłuższy czas trwania od czasu trwania zjawisk fizycznych, z którymi współdziałając inicjują przeskok. Zatem decydują one o opóźnieniu przeskoku. To opóźnienie po-

woduje, że wytrzymałości elektryczne próżniowego układu izolacyjnego przy napięciu stałym, udarowym lub przemiennym będą się różnić. Istotną rolę mają tu także parametry napięcia probierczego, takie jak kształt udaru napięcia probierczego, jego czas trwania, a w przypadku napięcia przemiennego – częstotliwość. Porównując więc wartości wytrzymałości elektrycznej układu, pomierzone przy różnych rodzajach napięć probierczych, z czasem trwania najwolniej przebiegających zjawisk w mechanizmach inicjowania przeskoku w próżni można podjąć próbę weryfikacji rodzaju mechanizmu inicjującego przeskoczek w badanym układzie.

Jednostki wszystkich wielkości występujących we wzorach tej pracy należą do SI.

## 2. PRZEGLĄD MECHANIZMÓW INICJOWANIA PRZESKOKU ELEKTRYCZNEGO W PRÓŻNI

W ubiegłych kilkudziesięciu latach powstało wiele hipotez mechanizmu inicjowania i rozwoju przeskoku elektrycznego w próżni. Przyjmując jako kryterium podziału rodzaj podstawowego zjawiska fizycznego koniecznego do wystąpienia procesów wtórnych i rozwoju wyładowania w wyniku działania tych procesów każdą z hipotez można zaszeregować do jednej z następujących grup [6]:

1. Hipotezy zakładające występowanie międzyelektrodowej wymiany cząstek naładowanych powstających w wyniku emisji wtórnych; przeskoczek występuje, jeśli ta wymiana staje się kumulatywna.

2. Hipotezy zakładające, że mikroostrze katody lub małe wtrącenie w powierzchni katody emituje polowo wiązkę elektronów, która bombarduje pewien obszar anody; nagrzewanie rezystancyjne emitera wiązki lub bombardowanie anody jest przyczyną lokalnego wzrostu temperatury, wystarczającego do uwolnienia gazów lub par i rozwoju w nich wyładowania.

3. Hipotezy zakładające przemieszczanie się przez przerwę międzyelektrodową, pod wpływem pola elektrycznego, małych naładowanych bryłek materiału – mikrocząstek; wyładowanie rozwija się w parach materiału mikrocząstki i elektrody wyzwolonych z obszaru, w który mikrocząstka uderzyła, bądź w parach wytworzonych w wyniku wzrostu temperatury spowodowanego wzrostem intensywności emisji polowej elektronów, gdyż przemieszczanie się mikrocząstki naładowanej powoduje wzrost natężenia pola elektrycznego między mikrocząstką a elektrodą.

4. Hipotezy zakładające występowanie na powierzchniach wewnętrznych próżniowego układu izolacyjnego próżniowej warstwy zaadsorbowanych gazów; wyładowanie rozwija się w gazach desorbowanych z tych powierzchni – w początkowym stadium desorpcja występuje głównie pod wpływem pola elektrycznego.

Mechanizmy międzyelektrodowej wymiany cząstek naładowanych zostały zaproponowane i częściowo zweryfikowane w odniesieniu do inicjowania przeskoku w próżniowych układach izolacyjnych z elektrodami pokrytymi warstwą zaadsorbowanych gazów. Jednak mechanizmy te budzą wątpliwości związane przede wszystkim z przyjmowanymi w nich znacznymi wartościami prądu emisji termicznej, współczynników emisji wtórnej oraz współczynników ich wzajemnej relacji. Niezależnie przeprowadzone pomiary poszczególnych współczynników wykazały, że są one za małe, by procesy mogły narastać kumulatywnie i prowadzić do przeskoku.

### 3. PODSTAWOWE ZALEŻNOŚCI

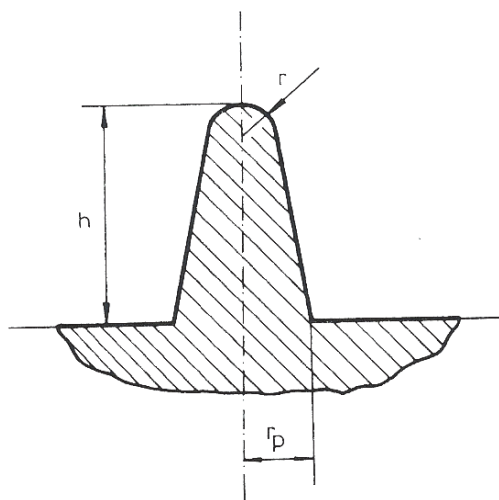
Hipotezy mechanizmów inicjowania przeskoku przez emisję połowę elektronów, zakładają występowanie na powierzchni katody mikroostrzy, przy których następuje lokalnie zwiększenie natężenie pola elektrycznego. Warunki te są konieczne do wystąpienia emisji połowej elektronów o intensywności niezbędnej do zainicjowania kolejnych zjawisk fizycznych umożliwiających rozwój wyładowania. Zgodnie z powszechnie panującą opinią, inicjującą rolę emisji połowej elektronów w rozwoju wyładowania w próżni uznaje się za najlepiej udokumentowaną i przekonującą.

Hipotezy mechanizmów inicjowania przeskoku przez emisję połowę elektronów można podzielić na dwie grupy. W pierwszej grupie za decydujące dla inicjowania przeskoku uważa się nagrzewanie mikroostrza na katodzie emitującego wiązkę elektronów (mechanizm katodowy), a w drugiej nagrzewanie obszaru anody bombardowanego wiązką elektronów emitowanych z mikroostrza na katodzie (mechanizm anodowy).

Z procesów fizycznych, w tej grupie mechanizmów, których współdziałanie inicjuje przeskoku, najdłuższy czas trwania mają procesy nagrzewania mikroostrza emitującego wiązkę elektronów (w mechanizmie katodowym) oraz nagrzewania obszaru anody bombardowanego wiązką elektronów (w mechanizmie anodowym).

W zależności od istniejących warunków oraz od rodzaju i parametrów napięcia probierczego może tu zachodzić nieustalone bądź ustalone przewodzenie ciepła. Jeśli warunki nagrzewania i odprowadzania ciepła nie ulegają zmianie to przebieg czasowy nagrzewania przyjmuje się za ustalony po czasie równym około pięciu stałych czasowych nagrzewania.

Analiza procesu nagrzewania mikroostrza emitującego połowę wiązkę elektronów wymaga przyjęcia pewnego określonego jego kształtu. Wydaje się, że stosunkowo dobrym do takiej analizy modelem kształtu jest mikroostrze mające kształt stożka ściętego zakończonego czaszą kulistą (rys. 2).



Rys. 2. Mikrostrze o kształcie stożka ściętego zakończonego czaszą kulistą;  $h$  – wysokość mikroostrza,  $r$  – promień czaszy kulistej stanowiącej zakończenie mikroostrza,  $r_p$  – promień podstawy mikroostrza

Wartość stałej czasowej nagrzewania mikroostrza o kształcie stożka ściętego zakończonego czaszą kulistą można obliczyć ze wzoru [3]

$$\tau_K = \frac{\delta_K c_K}{2\lambda_K} \left( \frac{9hr}{9r + r_p} \right)^2 \quad (1)$$

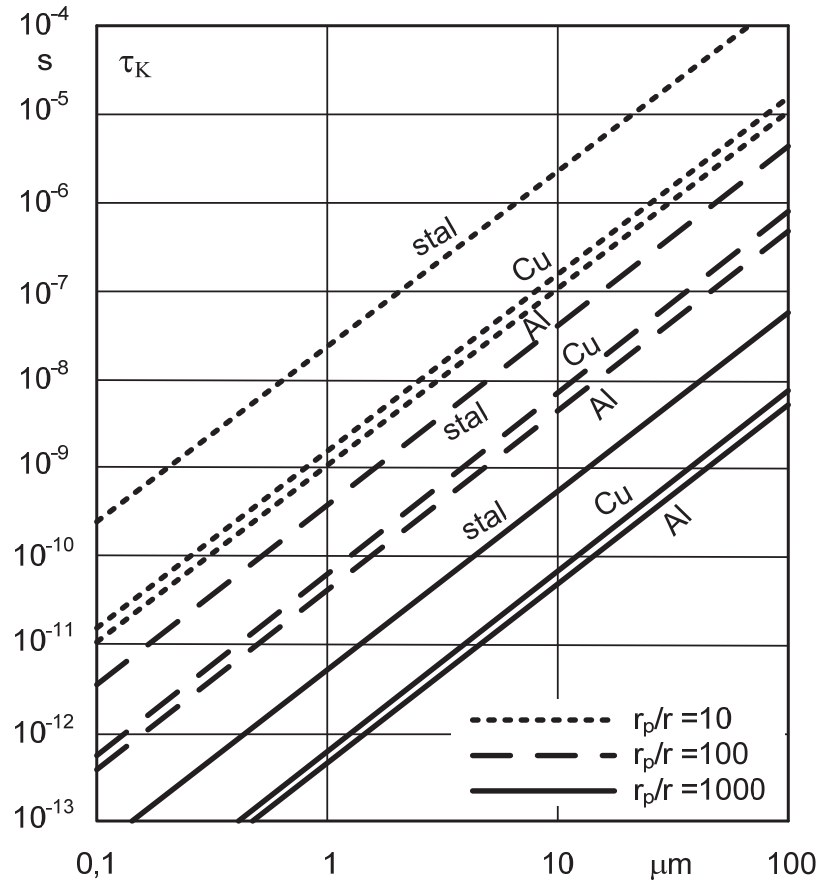
gdzie:  $\delta_K$  – gęstość materiału mikroostrza,  $c_K$  – ciepło właściwe materiału mikroostrza,  $\lambda_K$  – współczynnik przewodzenia ciepła materiału mikroostrza.

Wyznaczone z powyższego wzoru zależności stałych czasowych nagrzewania mikroostrzy, wykonanych ze stali, miedzi bądź aluminium, o kształcie stożka ściętego zakończonego czaszą kulistą, mających trzy różne wartości współczynnika kształtu, zdefiniowanego jako iloraz wartości promienia podstawy mikroostrza i promienia czaszy kulistej stanowiącej jego zakończenie, czyli  $g = r_p / r$ , przedstawiono na rys. 3.

Wiązka elektronów emitowanych przez wierzchołek mikroostrza rozchodzi się z niego w przestrzeni międzyelektrodowej paraboloidalnie. Wskutek działanie pola elektrycznego rośnie energia kinetyczna elektronów, która po uderzeniu w anodę zamienia się w ciepło i powoduje jej nagrzewanie. Obszar anody bombardowany przez wiązkę elektronów traci ciepło głównie w wyniku przewodzenia do wnętrza anody. Wartość stałej czasowej nagrzewania tego obszaru można wyznaczyć ze wzoru [3]

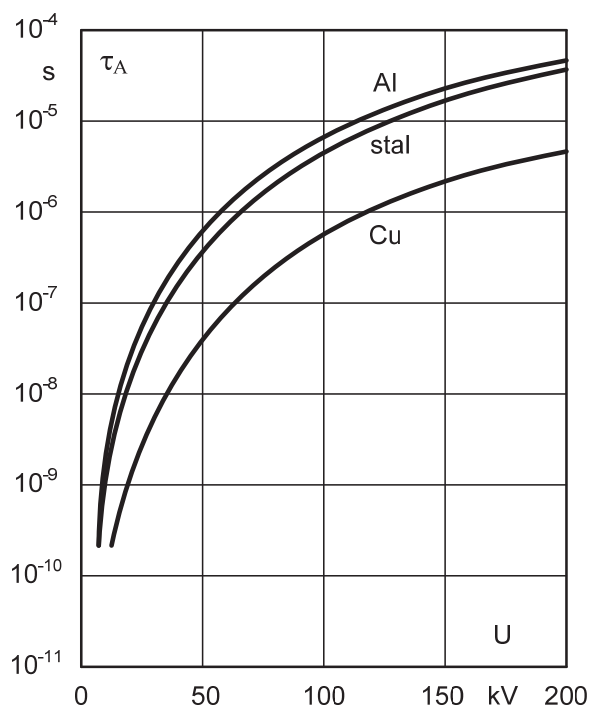
$$\tau_A = \frac{\delta_A c_A}{\lambda_A} \left( \frac{2l_{dA}}{\pi} \right)^2 \quad (2)$$

gdzie:  $\delta_A$  – gęstość materiału anody,  $c_A$  – ciepło właściwe materiału anody,  $\lambda_A$  – współczynnik przewodzenia ciepła materiału anody,  $l_{dA}$  – głębokość wnikania elektronów pod powierzchnię anody [6].



Rys. 3. Zależność stałych czasowych nagrzewania mikrostrzy wykonanych ze stali, miedzi bądź aluminium od wysokości mikrostrzy mających różne wartości współczynnika kształtu  $g = r_p/r$  wynoszące 10, 100 oraz 1000

Wyznaczone ze wzoru (2) zależność stałych czasowych nagrzewania, bombardowanego wiązką elektronów obszaru anody (wykonanej z aluminium, stali i miedzi), od wartości napięcia na zaciskach próżniowego układu izolacyjnego przedstawia rys. 4.



Rys. 4. Zależność stałych czasowych nagrzewania bombardowanego wiązką elektronów obszaru anody (wykonanej z aluminium, stali lub miedzi) od wartości napięcia na zaciskach próżniowego układu izolacyjnego [6]

Inicjowanie przeskoku elektrycznego przez emisję połową elektronów jest skutkiem rozwoju procesów wtórnych spowodowanych miejscowym wzrostem temperatury elektrod. Zatem do zainicjowania przeskoku konieczne jest miejscowe podgrzanie elektrody do pewnej temperatury krytycznej.

Jeśli np. elektrody próżniowego układu izolacyjnego zostały starannie przygotowane i nie mają na swojej powierzchni mikroostrzy o wysokości większej od jednego mikrometra to z rys. 3 wynika, że stałe czasowe nagrzewania tych mikroostrzy są mniejsze od  $0,02 \mu\text{s}$ . Od tej wartości stałe czasowe nagrzewania bombardowanego wiązką elektronów obszaru anody, przy napięciu na zaciskach układu izolacyjnego przekraczającym 70 kV mają wartości co najmniej rząd większe – rys. 4.

Istniejące różnice między wartością stałej czasowej nagrzewania mikroostrza emitującego elektrony, a stałą czasową nagrzewania obszaru anody bombardowanego wiązką elektronów emitowanych z mikroostrza jest szczególnie istotna przy napięciach udarowych i przemiennych. Bowiem w przypadku udarów o krótkim czasie trwania, mikroostrze mające stałą czasową nagrzewania mniejszą od stałej

czasowej nagrzewania obszaru anody bombardowanego wiązką elektronów, może osiągnąć wyższą temperaturę od temperatury środka bombardowanego obszaru anody, mimo, że przy uderzeniach o dłuższym czasie trwania byłoby odwrotnie.

Zatem w tym przypadku, przy napięciu udarowym, ze zwiększaniem czasu trwania udaru może zachodzić zmiana mechanizmu inicjowania przeskoku – z mechanizmu katodowego na mechanizm anodowy. Podobna sytuacja może wystąpić przy zmniejszaniu częstotliwości przemiennego napięcia probierczego.

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. 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, 4, 6]. Podczas przelotu mikrocząstki, który w tej grupie hipotez jest najwolniej przebiegającym zjawiskiem, rośnie jej energia kinetyczna [5]. Czas przelotu kulistej mikrocząstki, przez przerwę międzyelektrodową o długości  $d$ , można wyznaczyć z następującego wzoru [6]

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

gdzie:  $\varepsilon_0$  – przenikalność elektryczna próżni,  $r_m$  – promień mikrocząstki,  $\delta_m$  – gęstość materiału mikrocząstki,  $U$  – napięcie na zaciskach układu izolacyjnego.

Wyznaczone ze wzoru (3) zależności 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 przedstawiono na rys. 5.

W 1966 r. Tarasowa [8] sformułowała hipotezę desorpcyjnego inicjowania przeskoku w próżni. W hipotezie tej stwierdza ona, że przy ciśnieniu  $10^{-2} \dots 10^{-5}$  Pa powierzchnie elektrod oraz powierzchnie wewnętrzne ścian układu izolacyjnego są pokryte warstwą zaadsorbowanych gazów. Pod wpływem wysokiego napięcia z tych powierzchni występuje desorpcja cząsteczek neutralnych i jonów. Głównymi przyczynami tej desorpcji to działanie pola elektrycznego, bombardowanie jonami i elektronami oraz wzrost temperatury powierzchni. Przy pewnej liczbie cząsteczek gazów w przestrzeni międzyelektrodowej dochodzi do ich jonizacji i rozwoju wyładowania.

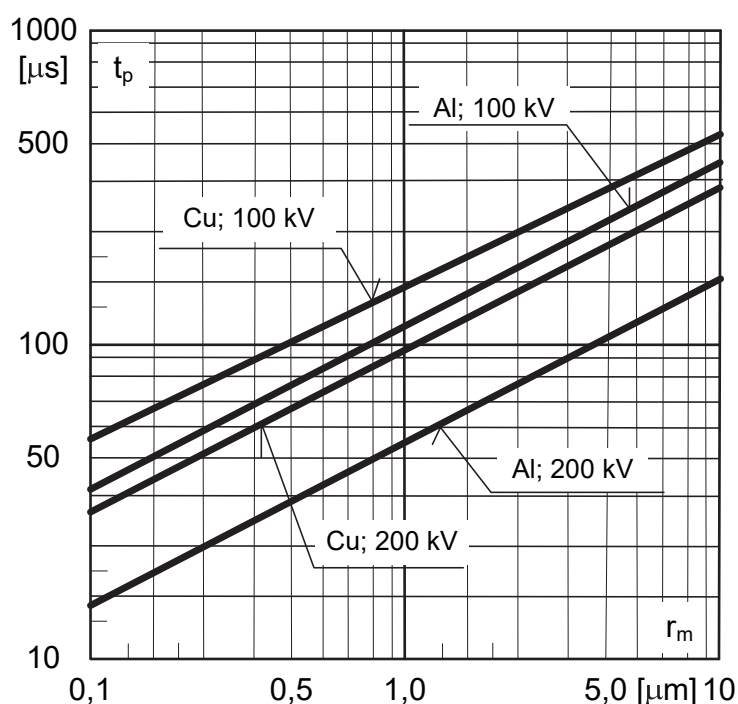
Mechanizm desorpcyjny odgrywa istotną rolę w inicjowaniu przeskoku przy pierwszych, pierwotnych próbach napięciowych „nowego” próżniowego układu izolacyjnego – po jego zmontowaniu i odpompowaniu. Prawdopodobieństwo



występowania tego mechanizmu maleje wraz z usuwaniem zaadsorbowanych gazów i zanieczyszczeń powierzchniowych z elektrod układu w procesie kondycjonowania. Czas ponownego, całkowitego pokrycia powierzchni próżniowo czystej monomolekularną warstwą głównymi składnikami powietrza, azotem i tlenem, można wyznaczyć ze wzoru [2]

$$\tau_c \approx 4 \cdot 10^{-5} \frac{\sqrt{T_p}}{p} \quad [\text{s}] \quad (4)$$

gdzie:  $T_p$  – temperatura powierzchni w K,  $p$  – ciśnienie w Pa.

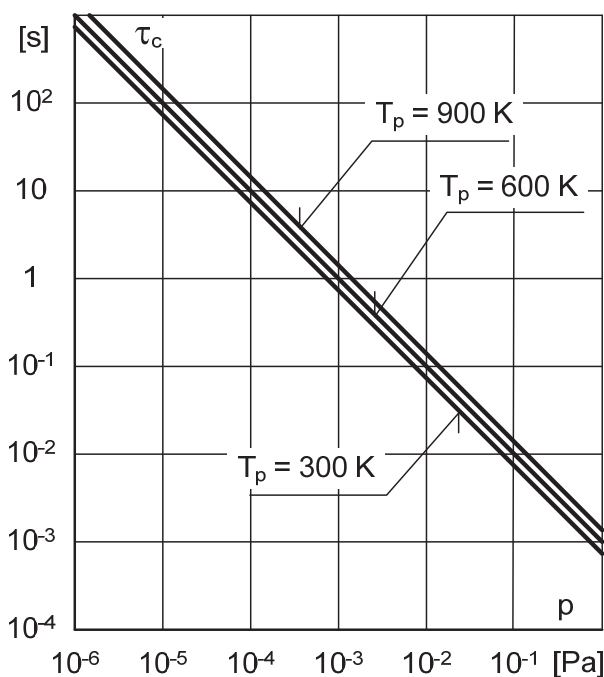


Rys. 5. Zależność czasu przelotu, przez 10 mm przerwę międzyelektrodową próżniowego układu izolacyjnego, kulistej mikrocząstki wykonanej z miedzi lub aluminium, od promienia mikrocząstki, przy napięciu na zaciskach układu wynoszącym 100 kV i 200 kV

Wykorzystując wzór (4) wyznaczono zależność czasu całkowitego pokrycia powierzchni próżniowo czystej, o temperaturze 300 K, 600 K i 900 K, monomolekularną warstwą głównymi składnikami powietrza – azotem i tlenem, od ciśnienia – rys. 6.

Z rys. 6 wynika, że czas całkowitego pokrycia powierzchni próżniowo czystej monomolekularną warstwą azotu i tlenu przy ciśnieniu  $10^{-2}$  Pa wynosi około 0,1 s. Wraz z obniżaniem ciśnienia ten czas gwałtownie rośnie i przy ciśnieniu  $10^{-4}$  Pa

wynosi około 10 s. Można zauważyć ponadto, że zmiana temperatury powierzchni elektrod w zakresie od 300 K do 900 K tylko w niewielkim stopniu wpływa na czas całkowitego pokrycia powierzchni warstwą azotu i tlenu.



Rys. 6. Zależność czasu całkowitego pokrycia powierzchni próżniowo czystej, o temperaturze 300 K, 600 K i 900 K, monomolekularną warstwą głównymi składnikami powietrza, azotem i tlenem, od ciśnienia

Zatem przy badaniu wytrzymałości elektrycznej układów izolacyjnych z próżnią o ciśnieniu  $10^{-2} \dots 10^{-4}$  Pa napięciem udarowym, wskutek kilkusekundowego odstępu czasu między kolejnymi udarami monomolekularna warstwa azotu i tlenu na powierzchniach elektrod, nawet w przypadku jej wcześniejszego usunięcia przez zjawiska przedwyładowcze bądź wyładowania, np. w procesie kondycjonowania, zostaje prawie całkowicie odbudowana.

#### 4. PODSUMOWANIE

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

1. W układach izolacyjnych z próżnią  $10^{-2} \dots 10^{-4}$  Pa, badanych napięciem udarowym o średnim lub długim czasie trwania udar, rola mechanizmu desorpcyj-

nego w inicjowaniu przeskoku, także w przypadku układów poddanych uprzednio kondycjonowaniu, wydaje się decydująca. Wynika to z faktu, że czas między kolejnymi udarami napięcia probierczego jest wystarczająco długi by nastąpiła całkowita odbudowa warstwy zaadsorbowanych na powierzchniach elektrod gazów, nawet w przypadku gdyby uprzednio w procesie kondycjonowania warstwa ta została usunięta.

2. W przypadku analizowania możliwości inicjowania przeskoku przy napięciu udarowym lub przemiennym przez emisję połową elektronów można podjąć próbę wskazania czy w danych warunkach przeskoc inicjuje mechanizm katodowy (nagrzewanie mikroostrza emitującego wiązkę elektronów), czy anodowy (nagrzewanie obszaru anody bombardowanego wiązką elektronów). W tym celu należy porównać stałą czasową nagrzewania ewentualnego mikroostrza emitującego wiązkę elektronów oraz stałą czasową nagrzewania obszaru anody bombardowanego wiązką elektronów z czasem trwania udaru napięcia probierczego lub z połową okresu napięcia przemiennego – w przypadku badań napięciem przemiennym.

Wraz ze zmniejszaniem czasu trwania udaru lub okresu napięcia przemiennego (spowodowanego zwiększeniem częstotliwości przemiennego napięcia probierczego), poniżej pięciu stałych czasowych nagrzewania mikroostrza emitującego wiązkę elektronów lub/i nagrzewania obszaru anody bombardowanego wiązką elektronów może zachodzić zmiana rodzaju mechanizmu inicjowania przeskoku. Wynika to z faktu, że zmniejszanie czasu trwania udaru lub wzrost częstotliwości napięcia przemiennego powoduje, że nagrzewana część elektrody (mikroostrze lub bombardowany elektronami obszar anody) mająca mniejszą stałą czasową może w danych warunkach osiągnąć temperaturę wyższą, aniżeli w przypadku gdyby czas oddziaływania udaru napięcia lub połowy sinusoidy napięcia na układ był dłuższy.

3. Czas opóźnienia wystąpienia przeskoku w próżniowym układzie izolacyjnym, inicjowanym przez mikrocząstkę, jest spowodowany głównie czasem przelotu mikrocząstki między elektrodami układ (rys. 5). Potwierdzenie przelotów naładowanych mikrocząstek między elektrodami próżniowego układu izolacyjnego jest trudne. Przelot naładowanej mikrocząstki w przestrzeni międzyelektrodowej układu izolacyjnego próżniowego powoduje w obwodzie zewnętrznym przepływ prądu. W układzie o polu makroskopowo jednostajnym przy napięciu probierczym stałą wartość chwilowa tego prądu narasta liniowo od zera. Jednak impulsy tego prądu są trudne do zaobserwowania bo ich wartości, nawet maksymalne, są małe, a czas trwania pojedynczego impulsu, równy czasowi przelotu mikrocząstki (rys. 5) jest stosunkowo krótki. Przy tym impulsy te mogą być maskowane przez zmiany wartości prądu emisji połowej lub mikrowyładowania. Ponadto samo zjawisko odrywania mikrocząstek od elektrod i ich przelotów między elektrodami próżniowego układu izolacyjnego jest zjawiskiem występującym sporadycznie, co utrudnia obserwację.

## LITERATURA

- [1] Cranberg L., The initiation of electrical breakdown in vacuum, *J. Appl. Phys.*, 1952, vol. 23, s. 518.
- [2] Groszkowski J., *Technika wysokiej próżni*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1978.
- [3] Kustom R. L., The behavior of vacuum electrodes under the influence of radio frequency electric fields, w *Proc. of the IIIrd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*, Paryż 1968, s. 223.
- [4] Olendzkaja N. F., Proboj vakuumnogo promeżutka pri perenose meżdu elektrodami provodâšćih častic, *Radiotekhnika i elektronika*, 1963, t. 8, s. 479.
- [5] 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, s. 405.
- [6] Opydo W., Ranachowski J., Właściwości elektryczne próżniowych układów izolacyjnych przy napięciu przemiennym, *Wydawnictwo Naukowe PWN*, Warszawa – Poznań 1993.
- [7] Slivkov I. N., O mehanizme električeskogo proboâ v vakuume, *Žurnal tehničeskoj fiziki*, 1957, t. 27, s. 2081.
- [8] Tarasova L. V., Desorbcionnyj mehanizm električeskogo proboâ v vakuume, *Doklady AN SSSR*, 1966, t. 167, s. 330.

### **BASIC PHYSICAL PHENOMENA DEVELOPMENT TIME IN THE MECHANISMS INITIATING ELECTRIC BREAKDOWNS IN VACUUM**

The paper presents the analysis of development time of the slowest basic physical phenomena occurring in the mechanisms of initiating the electrical breakdowns in a vacuum. These slow-moving phenomena are primarily decisive for the delay in initiating the breakdown and are responsible for the differences between the electrical strength of the vacuum insulation system under direct, alternating and surge voltage.

The dependence of the time constant of the heating of microprotrusions made of steel, copper or aluminum, on their height was determined and compared with the dependencies of the time constant of the heating of the anode area, made of the same materials, bombarded with electron beam, on the voltage value. In addition, the dependence of the passage time of a spherical microparticle made of copper or aluminum through a 10 mm inter-electrode gap of the vacuum insulation system with a voltage of 100 kV and 200 kV, on the radius of the microparticle was determined. The desorption mechanism of the hopping initiation determined the dependence of the total time of covering the vacuum-clean surface at temperature of 300 K, 600 K and 900 K, with the monomolecular layer of the main air components, nitrogen and oxygen, on pressure.

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

*(Received: 27.02.2018, revised: 10.03.2018)*