

DOI 10.21008/j.1897-0737.2020.103.0010

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

NIESTABILNOŚĆ MIKROOSTRZY NA POWIERZCHNIACH KATOD WYSOKONAPIĘCIOWYCH PRÓŻNIOWYCH UKŁADÓW IZOLACYJNYCH

W pracy przeanalizowano możliwości inicjowania przeskoku elektrycznego w próżniowych układach izolacyjnych przez topnienie mikroostrzy powierzchni katody układu izolacyjnego. Mikroostrza te są nagrzewane głównie rezystancyjnie przewodzoną wiązką elektronów emitowanych. Analizowano układy izolacyjne z elektrodami wykonanymi z miedzi, aluminium oraz żelaza. Wyznaczono zależności minimalnej wysokości mikroostrzy, których topnienie wierzchołków powoduje ich wzrost, od wartości średniej natężenia pola elektrycznego w układzie oraz wartości współczynnika wzmocnienia natężenia pola elektrycznego przy wierzchołku mikroostrza.

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

SŁOWA KLUCZOWE: wysokonapięciowy próżniowy układ izolacyjny, mikroostrze, emisja połowa elektronów, wiązka elektronów, topnienie mikroostrza, wytrzymałość elektryczna.

1. WPROWADZENIE

Wytrzymałość elektryczna próżniowych układów izolacyjnych jest relatywnie duża. Zależy od wielu czynników: ciśnienia, odstępów 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 o wartościach niższych od 10^{-1} Pa, czyli w zakresie próżni wysokiej [2, 3].

Zgodnie z powszechnie panującą opinią za najlepiej udokumentowanymi i najbardziej przekonującymi hipotezami mechanizmów inicjowania przeskoku elektrycznego w wysokonapięciowych próżniowych układach izolacyjnych uznaje się hipotezy, w których inicjującą rolę odgrywa emisja połowa elektronów z mikroostrzy na powierzchni katody układu izolacyjnego. Mikroostrze na powierzchni

* Politechnika Poznańska

** Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy

katody przy napięciu na zaciskach układu izolacyjnego próżniowego emituje połowę wiązkę elektronów, która bombarduje pewien obszar anody. Nagrzewanie emitera wiązki elektronów – mikroostrza lub obszaru anody bombardowanego tą wiązką jest przyczyną lokalnego wzrostu temperatury, wystarczającego do uwolnienia gazów lub/i par i rozwoju w nich wyładowania.

Hipotezy tych mechanizmów można podzielić na dwie grupy. W pierwszej grupie za decydujące o inicjowaniu przeskoku uważa się nagrzewanie mikroostrza katody emitującego wiązkę elektronów – mechanizm katodowy, w drugiej – nagrzewanie obszaru anody bombardowanego wiązką elektronów – mechanizm anodowy.

Mikroostrze powierzchni katody emitujące połowę w próżniowym układzie izolacyjnym wiązkę elektronów jest nagrzewane rezystancyjnie, w wyniku przepływu przez niego prądu emitowanej wiązki, nagrzewane lub chłodzone działaniem efektu Nottinghama oraz chłodzone w wyniku przewodzenia ciepła do wnętrza katody. Wartości mocy traconych wskutek: promieniowania, parowania oraz efektu Thomsona są stosunkowo małe i moce te można zaniedbać.

Efekt Nottinghama polega na wydzielaniu się ciepła lub jego pochłanianiu bezpośrednio na powierzchni emitującej; jest wynikiem różnicy między energią elektronu emitowanego z powierzchni a energią elektronu przychodzącego na jego miejsce z obwodu elektrycznego. Elektrony emitowane wskutek emisji połowej pokonują barierę potencjału na granicy metal-próżnia przy energii zarówno wyższej, jak i niższej pod poziomem Fermiego. Jeśli temperatura emitera jest niewysoka, to praktycznie nie ma on elektronów o energii wyższej od poziomu Fermiego. Zatem średnia energia elektronów emitowanych jest niższa od poziomu Fermiego. Na uwolnione miejsca po wyemitowanych elektronach przychodzą elektrony z poziomu Fermiego, co doprowadza do wydzielania się nadwyżki energii w miejscu emisji elektronu. O tym czy mikroostrze emitujące wiązkę elektronów jest nagrzewane czy chłodzone działaniem efektu Nottinghama zależy od temperatury inwersji. Przy tym nagrzewanie mikroostrza występuje wtedy, gdy temperatura jego wierzchołka jest mniejsza, a chłodzenie – gdy jest większa od temperatury inwersji. Wartość temperatury inwersji można wyznaczyć ze wzoru [3]

$$T_i = 5,4 \cdot 10^{-7} \frac{\beta E_0}{\sqrt{\Phi}} \quad [\text{K}] \quad , \quad (1)$$

gdzie: β – współczynnik wzmocnienia natężenia pola elektrycznego przy wierzchołku mikroostrza, E_0 – natężenie średnie pola elektrycznego w przestrzeni międzyelektrodowej,

$$E_0 = \frac{U}{d} \quad , \quad (2)$$

U – napięcie na zaciskach układu izolacyjnego, d – odstęp międzyelektrodowy, Φ – praca wyjścia elektronu z materiału mikroostrza, w eV; jednostki pozostałych wielkości z SI.

Wyznaczone ze wzoru (1) zależności temperatury inwersji od współczynnika wzmocnienia natężenia pola elektrycznego przy wierzchołku mikroostrza wykonanego z materiału mającego pracę wyjścia $\Phi = 5,0$ eV, dla kilku wartości średnich natężenia pola elektrycznego w układzie izolacyjnym, przedstawia rys. 1.

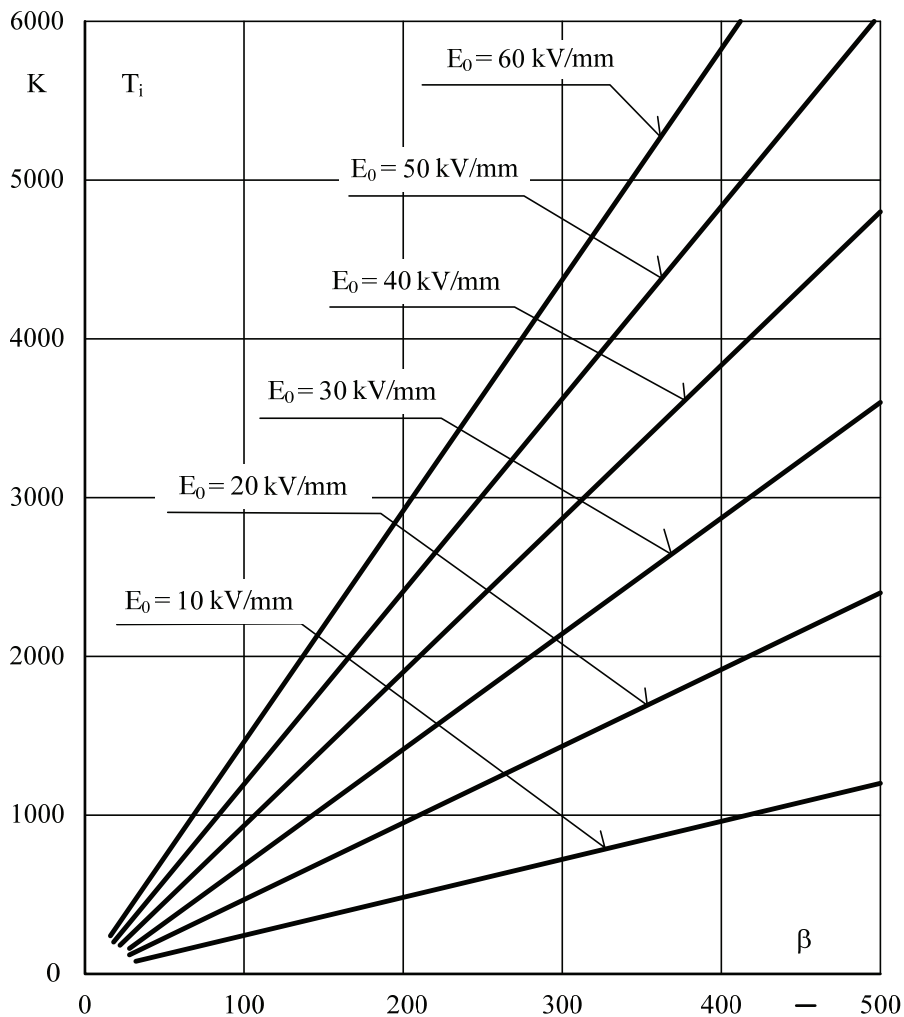
2. PODSTAWOWE ZALEŻNOŚCI

Przy dużym natężeniu pola elektrycznego w układzie, które powoduje intensywną emisję połową elektronów z mikroostrza katody, może dojść do osiągnięcia przez wierzchołek tego mikroostrza temperatury równej temperaturze topnienia materiału, z którego mikroostrze jest wykonane. Napięcie powierzchniowe stopionego materiału mikroostrza dąży do jego niwelacji, podczas gdy siła elektrostatyczna działa w kierunku przeciwnym – jego wydłużenia. Siła grawitacji jest niewspółmiernie mała w porównaniu z siłą elektrostatyczną więc jej działanie można pominąć.

W przypadku gdy wartość siły elektrostatycznej jest większa od wartości siły napięcia powierzchniowego powłoki stopionego materiału, mikroostrze wydłuża się. Prowadzi to do wzrostu natężenia pola elektrycznego przy jego wierzchołku, a to z kolei prowadzi do wzrostu wartości prądu wiązki elektronowej emitowanej przez mikroostrze i powoduje silniejsze nagrzewanie mikroostrza. Taka niestabilność w różny sposób może prowadzić do przeskoku elektrycznego w układzie izolacyjnym. Zatem warunkiem stabilności stopionej powłoki na wierzchołku mikroostrza jest równość wartości ciśnienia elektrostatycznego i napięcia powierzchniowego stopionego materiału. Z tego warunku, przy założeniu, że mikroostrze ma kształt stożka ściętego zakończonego czaszą kulistą (rys. 2), wyznaczono następujący wzór na wysokość stabilną mikroostrza, którego wierzchołek jest topiony [1]:

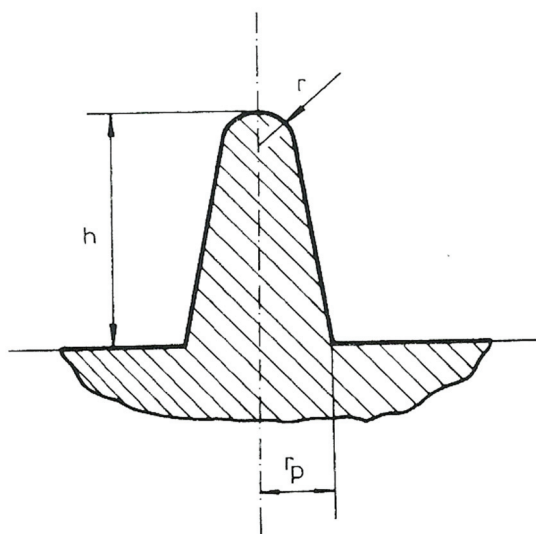
$$h = \frac{16\alpha}{\epsilon_0 \beta E_0^2} \quad , \quad (3)$$

gdzie: α – napięcie powierzchniowe stopionego materiału mikroostrza,
 ϵ_0 – przenikalność elektryczna próżni.



Rys. 1. Zależności temperatury inwersji od współczynnika wzmocnienia natężenia pola elektrycznego przy wierzchołku mikroostrza, wykonanego z materiału mającego pracę wyjścia $\Phi = 5,0$ eV, dla kilku wartości średnich natężenia pola elektrycznego E_0 w próżniowym układzie izolacyjnym

Mikroostrza o wysokości większej od wyznaczonej ze wzoru (3), przy topnieniu ich wierzchołków, będą się wydłużały, a o wysokości mniejszej będą się zmniejszały.

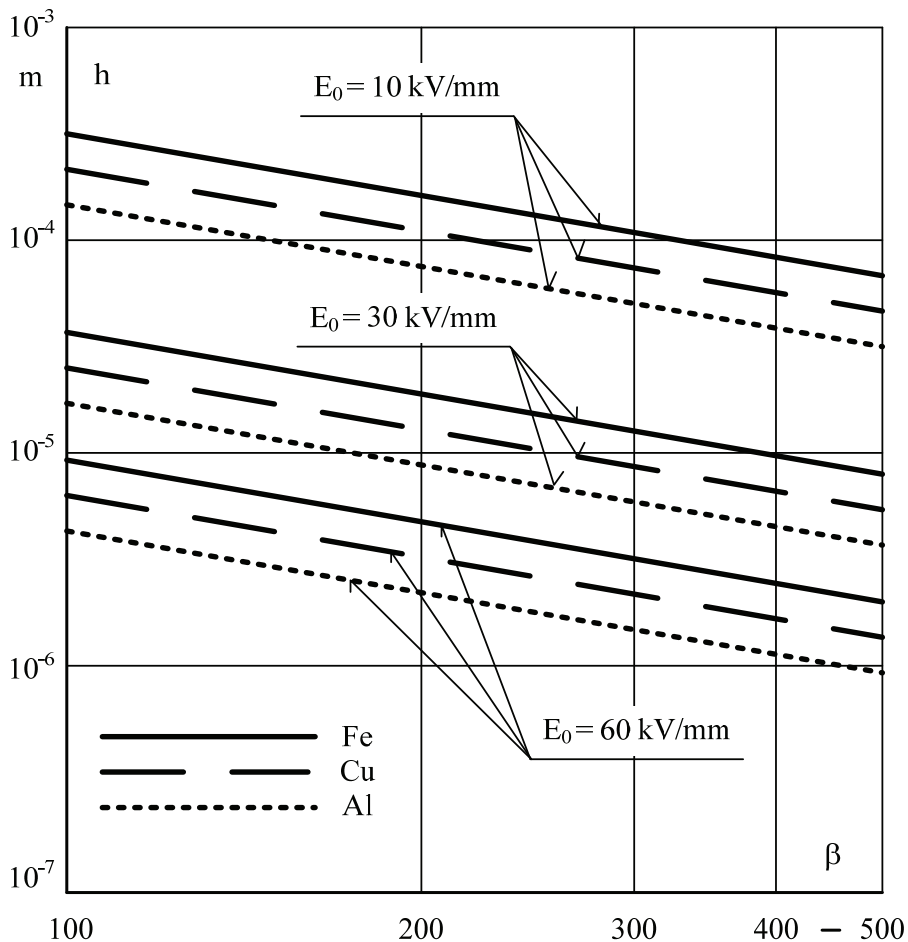


Rys. 2. Model mikroostrzy o kształcie stożka ściętego zakończonego czaszą kulistą;
 h – wysokość mikroostrzy, r – promień czaszy kulistej stanowiącej zakończenie mikroostrzy,
 r_p – promień podstawy mikroostrzy

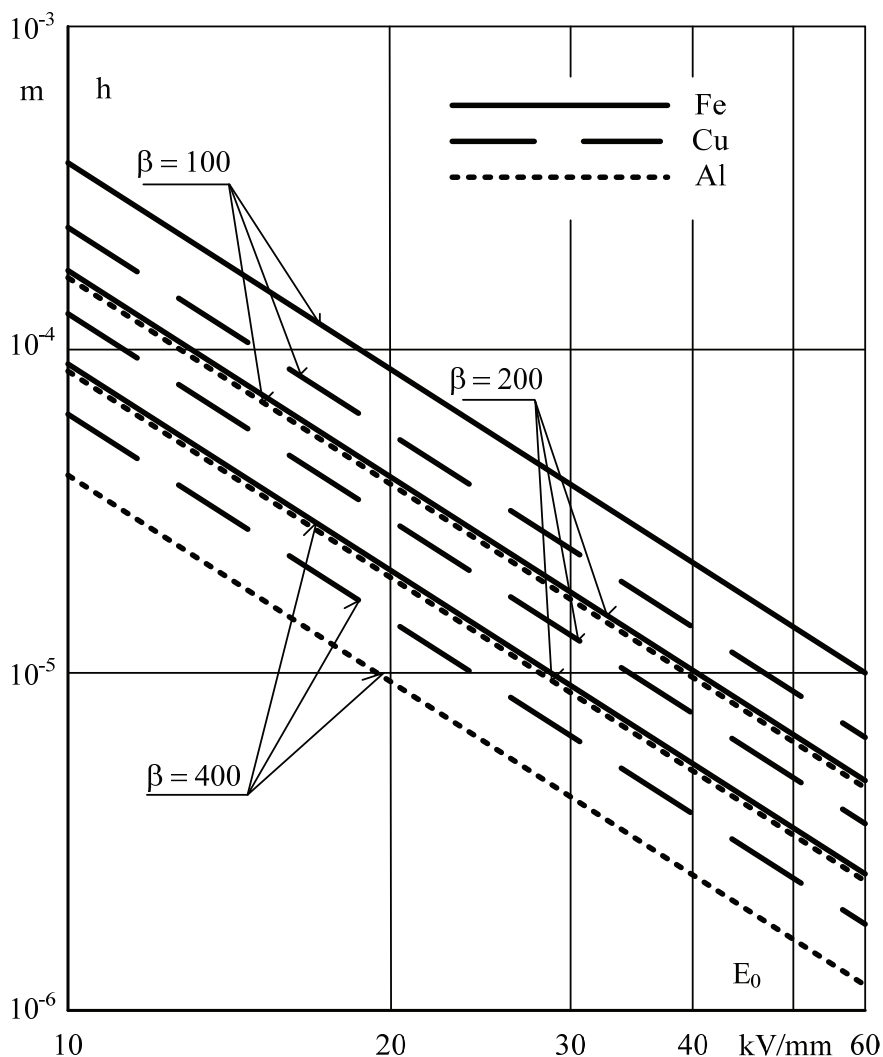
Wykorzystując wzór (3) wyznaczono dwie zależności:

Pierwsza, przedstawiona na rys. 3, jest zależnością wysokości stabilnej mikroostrzy, wykonanych z żelaza, miedzi lub aluminium, od wartości współczynnika wzmocnienia natężenia pola elektrycznego przy ich wierzchołkach, dla trzech wartości średnich natężenia pola elektrycznego E_0 w układach izolacyjnych.

Druga, rys. 4, przedstawia zależność wysokości stabilnej mikroostrzy, wykonanych z żelaza, miedzi lub aluminium, od wartości średniej natężenia pola elektrycznego w układzie izolacyjnym, dla trzech wartości współczynnika wzmocnienia natężenia pola elektrycznego β przy wierzchołkach mikroostrzy.



Rys. 3. Zależność wysokości stabilnej mikroostrzy, wykonanych z żelaza, miedzi lub aluminium, od wartości współczynnika wzmocnienia natężenia pola elektrycznego przy ich wierzchołkach, dla trzech wartości średnich natężenia pola elektrycznego E_0 w układach izolacyjnych



Rys. 4. Zależność wysokości stabilnej mikrostrzy, wykonanych z żelaza, miedzi lub aluminium, od wartości średniej natężenia pola elektrycznego w układzie izolacyjnym, dla trzech wartości współczynnika wzmocnienia natężenia pola elektrycznego β przy ich wierzchołkach

3. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Z przedstawionych zależności można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Ponieważ temperatury topnienia żelaza, miedzi i aluminium są niższe od 2000 K, wartości pracy wyjścia elektronu z tych metali są mniejsze od 5 eV, war-

tości współczynnika wzmocnienia natężenia pola elektrycznego na mikronierównościach powierzchni katod próżniowych układów izolacyjnych są zwykle mniejsza od 500 [5], a wytrzymałości elektryczne tych próżniowych układów izolacyjnych są większe od kilkunastu kV/mm [4, 5], więc z rys. 1 wynika, że podczas emisji polowej wiązek elektronowych z mikroostrzy katod układów izolacyjnych są one nagrzewane w wyniku działania efektu Nottinghama.

2. Ponieważ wytrzymałości elektryczne próżniowych układów izolacyjnych nie przekraczają 60 kV/mm, a wartości współczynnika wzmocnienia natężenia pola elektrycznego na mikronierównościach powierzchni katod próżniowych układów izolacyjnych są zwykle mniejsze od 500 [4, 5], więc z rys. 3 i 4 wynika, że mikroostrza, które przy topnieniu ich wierzchołków będą ulegać wydłużeniu, muszą mieć wysokość większą od jednego mikrometra.

3. Podczas budowy próżniowego układu izolacyjnego standardowo poleruje się dokładnie powierzchnie jego elektrod, aby zmniejszyć wysokość występujących na nich mikronierówności. Wskutek tego na tych powierzchniach nie powinny występować mikronierówności o wysokości większej od jednego mikrometra. Zatem z rys. 3 i 4 wynika, że w tych warunkach, występujących w stadium poprzedzającym przeskok, nie może dojść wzrostu tak małych mikroostrzy, nawet w przypadku, gdy ich wierzchołki ulegają topnieniu. Jednak próżniowy układ izolacyjny, po jego zbudowaniu i odpompowaniu do warunków próżniowych, dla uzyskania jego „pełnej” wytrzymałości elektrycznej musi zostać poddany procesowi kondycjonowania. Proces ten usuwa z powierzchni elektrod warstwy zaadsorbowanych gazów, zanieczyszczeń oraz luźno związanych mikrocząstek. Przy tym można wyróżnić dwa najczęściej stosowane sposoby kondycjonowania. Kondycjonowanie bezprzeskokowe, prądem emisji polowej i mikrowyładowaniami, oraz kondycjonowanie wielokrotnymi przeskokami. W przypadku kondycjonowania przeskokami, wielokrotne przeskoki powodują powstawanie na powierzchniach elektrod o stosunkowo dużych wymiarach mikronierówności, mających formę ostrzy bądź kraterów. Mają one najczęściej wysokość większą od wysokości stabilnej mikroostrzy (rys. 3 i 4) i w przypadku topnienia ich wierzchołków następuje ich wzrost i zainicjowanie przeskoku elektrycznego w próżniowym układzie izolacyjnym.

LITERATURA

- [1] Grzybowski S., Opydo W., Ranachowski J., The increase of melting micrprotrusion as the initiating factor of vacuum gap breakdown, Proc. of the Sixth Inter. Sym. on High Voltage Engineering, New Orleans, USA, 1989, nr art. 48.05.
- [2] Hałas A., Technika próżni, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2017.
- [3] Latham R. L., High voltage vacuum insulation: the physical basis, Academic Press, London 1981.
- [4] Opydo W., Właściwości gazowych próżniowych wysokonapięciowych układów izolacyjnych, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 2008.

- [5] Opydo W., Ranachowski J., Właściwości elektryczne próżniowych układów izolacyjnych przy napięciu przemiennym, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa – Poznań 1993.

MICROPROTRUSION INSTABILITY ON CATHODE SURFACES HIGH-VOLTAGE VACUUM INSULATION SYSTEMS

The paper examines the possibilities of initiating electrical breakdown in vacuum insulation systems by melting the microprotrusions of the cathode of the insulation system. These microprotrusions are heated mainly by resistively conducting current of an electron beam emitted by the microprotrusion. Insulation systems with copper, aluminum and iron electrodes were analyzed. The minimum dependencies of the microprotrusion were determined, whose melting of the vertices, under given conditions – the value of the macroscopic electric field strength and the coefficient of electric field intensification at the vertex – causes their increase. It can cause an electrical breakdown in the insulation system.

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

(Received: 06.02.2020, revised: 09.03.2020)