

Piotr FRĄCZAK*

PRĄD UPŁYWU I PRZESKOK ZABRUDZENIOWY NA POWIERZCHNI IZOLATORA Z KLOZAMI W UJĘCIU TEORII PERKOLACJI

W pracy przedstawiono obliczenia symulacyjne wartości natężenia prądu upływu i przeskoku zabrudzeniowego na powierzchni porcelanowej izolatora z kloszami za pomocą teorii perkolacji. W celu odwzorowania powierzchni izolatora z kloszami na płaszczyznę użyto jego kształtu zastępczego. W wyniku tej operacji odwzorowana powierzchnia izolatora składa się z odpowiedniej liczby powierzchni bocznych stożków ściętych i prostokątów, które odpowiednio odpowiadają kloszom i części pnia izolatora. Otrzymaną w ten sposób powierzchnię izolatora z kloszami przedstawiono w postaci modelu perkolacji dla węzłów na sieci. Model ten jest obwodem elektrycznym, który składa się z sieci o strukturze kwadratowej jednakowych rezystorów oraz napięcia wymuszającego. W modelu tym uwzględniono losowy sposób tworzenia węzłów „zapełnionych” na sieci. Obliczenia symulacyjne prądu upływu i przeskoku zabrudzeniowego na powierzchni izolatora z kloszami w ujęciu teorii perkolacji przeprowadzono w programie *PSpice*.

SŁOWA KLUCZOWE: model perkolacji izolatora, prąd perkolacji izolatora z kloszami

1. WSTĘP

Na sieciach PKP instalowane są izolatory trakcyjne (LT 40R), które pracują pod napięciem stałym 3 kV. Na powierzchniach izolatorów napięcia stałego osadza się zanieczyszczenie bardziej intensywniej w stosunku do izolatorów napięcia przemiennego. Na powierzchniach izolatorów trakcyjnych może nastąpić przeskok napięcia w wyniku zawilgocenia osiadłych na nich cząsteczek zanieczyszczeń. Wobec tego izolatory napięcia stałego posiadają znacznie dłuższą drogę upływu (8 cm/kV) w stosunku do izolatorów pracujących pod napięciem przemiennym. W celu przeprowadzenia obliczeń symulacyjnych prądu upływu na powierzchni izolatorów trakcyjnych LT 40R z kloszami za pomocą teorii perkolacji należy utworzyć schemat zastępczy modelu powierzchni w postaci obwodu elektrycznego. Obwód elektryczny składa się z sieci o strukturze kwadratowej oraz napięcia zasilającego. Z kolei model perkolacji powierzchni izolatora trakcyjnego LT 40R otrzymuje się wskutek losowego niszczenia struktury sieci, będącej schematem

* Zachodniopomorskie Centrum Edukacji Morskiej i Politechnicznej w Szczecinie.

zastępczym obwodu elektrycznego. Obliczenia symulacyjne prądu upływu na powierzchni izolatora w oparciu o jego model perkolacji w programie *PSPice* omówiono szczegółowo w pracy [4].

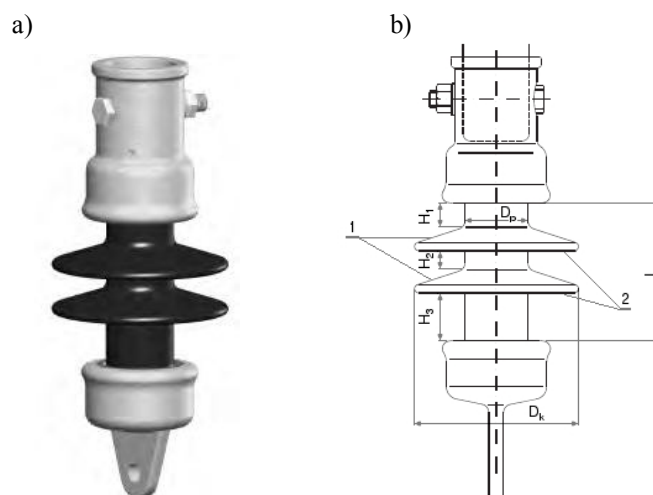
Celem pracy jest przedstawienie obliczeń symulacyjnych wartości natężenia prądu upływu na powierzchni izolatora trakcyjnego LT 40R z kloszami za pomocą teorii perkolacji i porównanie otrzymanych wyników z wartościami prądu wyznaczonymi w oparciu o zmierzone wartości konduktancji powierzchniowej i wymiary geometryczne izolatora

2. WZORY EMPIRYCZNE UJMUJĄCE WARTOŚCI KRYTYCZNE NAPIĘCIA PRZESKOKU ZABRUDZENIOWEGO I PRĄDU UPŁYWU NA POWIERZCHNI IZOLATORA Z KLOSZAMI

Wzory empiryczne wykorzystuje się do wyznaczania napięcia przeskoku oraz prądu krytycznego na powierzchni izolatorów z kloszami w zależności od ich wymiarów geometrycznych, współczynnika kształtu oraz konduktywności powierzchniowej.

2.1. Obliczanie współczynnika kształtu izolatora z kloszami

Współczynnik kształtu izolatora trakcyjnego LT 40R (rys. 2.1) wyznaczono za



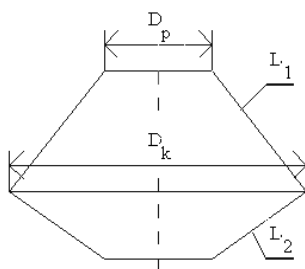
Rys. 2.1. Izolator trakcyjny LT 40R: a) zdjęcie cyfrowe; b) Przekrój poprzeczny izolatora trakcyjnego LT 40R: D_p – średnica pnia ($D_p = 60$), D_k – średnica klosza ($D_k = 135$), L – wysokość izolatora ($L = 130$), H_1 – wysokość części pierwszej pnia izolatora ($H_1 = 17$), H_2 – wysokość części drugiej pnia izolatora ($H_2 = 12$), H_3 – wysokość części trzeciej pnia izolatora ($H_3 = 39$), 1 – powierzchnie górne kloszy izolatora, 2 – powierzchnie górne kloszy izolatora

pomocą metody Jacobus Holtzhauzen [9]. Metoda ta polega na wyodrębnieniu z rozpatrywanego izolator z kłozkami liczby części pnia, kłozki oraz określenia ich wymiarów geometrycznych. Współczynnik kształtu f_p ujmujący odpowiednio część pierwszą, drugą i trzecią pnia izolatora oblicza się ze wzoru:

$$f_p = \frac{H_1}{\pi \cdot D_p} + \frac{H_2}{\pi \cdot D_p} + \frac{H_3}{\pi \cdot D_p} = \frac{H_1 + H_2 + H_3}{\pi \cdot D_p} \quad (2.1)$$

gdzie: H_1, H_2, H_3 – wysokości części pnia izolatora (rys.2.1), D_p – średnica pnia izolatora (rys. 2.1).

Natomiast zgodnie z metodą Holtzhauzena powierzchnia kłozka złożona jest z dwóch ściętych stożków mających wspólną średnicę, która jest równa średnicy kłozka D_k (rys. 2.2). Górny stożek ma długość ściany L_1 . Długość ta jest równa



Rys. 2.2. Model kłozka izolatora trakcyjnego LT 40R w postaci dwóch ściętych stożków:
 D_p – średnica pnia izolatora; D_k – średnica kłozka izolatora; L_1 – długość drogi upływu górnej części kłozka ($L_1 = 47,5$), L_2 – długość drogi upływu dolnej części kłozka ($L_2 = 43,5$)

długości drogi upływu górnej części kłozka. Z kolei dolny stożek ścięty reprezentuje dolną część kłozka posiadającą długość drogi upływu L_2 . Ponadto pozostałe średnie połączonych stożków ściętych odpowiadają średnicy pnia izolatora D_p .

Współczynnik kształtu kłozka izolatora f_k opisuje długości dróg upływu odpowiednio górnej i dolnej części kłozka oblicz się ze wzoru:

$$f_k = \frac{L_1}{\pi \cdot (D_k - D_p)} \cdot \ln \frac{D_k}{D_p} + \frac{L_2}{\pi \cdot (D_k - D_p)} \cdot \ln \frac{D_k}{D_p} = \frac{L_1 + L_2}{\pi \cdot (D_k - D_p)} \cdot \ln \frac{D_k}{D_p} \quad (2.2)$$

gdzie: L_1 – długość drogi upływu górnej części kłozka w mm; L_2 – długość drogi upływu dolnej części kłozka w mm; D_p – średnica pnia izolatora w cm; D_k – średnica kłozka izolatora w mm.

Należy dodać, że izolatora trakcyjnego LT 40R posiada dwa kłozki o takim samym współczynnik kształtu f_k . Wobec tego współczynnik kształtu całego izolatora f wynosi:

$$f = f_p + 2 \cdot f_k = \frac{H_1 + H_2 + H_3}{\pi \cdot D_p} + 2 \cdot \left(\frac{L_1 + L_2}{\pi \cdot (D_k - D_p)} \cdot \ln \frac{D_k}{D_p} \right) \quad (2.3)$$

W oparciu o współczynnik kształtu izolatora z kłozami (2.3) oblicza się średnicę zastępczą D_z z równania

$$D_z = \frac{L}{\pi \cdot f} \quad (2.4)$$

gdzie: L – wysokość izolatora trakcyjnego z kłozami w cm; f – współczynnik kształtu izolatora.

Z kolei wykorzystując średnicę zastępczą izolatora (2.4) można wyznaczyć wartość natężenia prądu upływu na powierzchni izolatora trakcyjnego z kłozami za pomocą równania

$$I_u = \frac{U \cdot \pi \cdot D_z \cdot \kappa_s}{L} \quad (2.5)$$

przy czym: I_u – prąd upływu na powierzchni izolatora w mA; U – napięcie źródła w kV; D_z – średnica zastępcza izolatora w cm; κ_s – przewodność powierzchniowa w μS ; L – wysokość izolatora w cm.

2.2. Wartość krytyczna napięcie przeskoku zabrudzeniowego na powierzchni porcelanowej izolatora z kłozami

Wartość krytyczną napięcia przeskoku U_C na izolatorze z kłozami można obliczyć z równania [3]

$$U_C = L \cdot A^{\frac{1}{n+1}} \left(\frac{f}{\kappa_s} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (2.6)$$

gdzie: U_C – napięcie przeskoku zabrudzeniowego w kV; L – wysokość izolatora z kłozami w cm; f – jednostkowy współczynnik kształtu izolatora; κ_s – przewodność powierzchniowa izolatora w μS ; A , n – stałe.

Z równania (2.6) wyznacza się przewodność powierzchniową. Wzór opisujący przewodność powierzchniową można przedstawić w postaci:

$$\kappa_s = f \cdot \left(\frac{U_C}{L \cdot A^{\frac{1}{n+1}}} \right)^{-(n+1)} \quad (2.7)$$

W izolatorze z kłozami rezystancja jednostkowa r_p jest zależna od konduktywności powierzchniowej oraz średnicy zastępczej. Tą zależność można wyrazić wzorem [3]

$$r_p = \frac{1}{\pi \cdot D_z \cdot \kappa_s} \quad (2.8)$$

w którym: r_p – rezystancja jednostkowa w $\text{k}\Omega$; κ_s – przewodność powierzchniowa zabrudzeń w μS ; D_z – średnica zastępcza izolatora z kłozami w cm.

2.3. Wartość krytyczna prąd upływu na powierzchni porcelanowej izolatora z kloszami

Wartość krytyczną prądu upływu I_C na powierzchni izolatora z kloszami wyznacza się z równania [2]

$$I_c = \left(\frac{D_k}{D_z} \right)^{\frac{1}{n+1}} \cdot \left(\frac{A}{r_p} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (2.9)$$

w którym: I_C – prąd krytyczny upływu na powierzchni izolatora z kloszami w mA; D_z – średnica zastępcza izolatora cm; D_k – średnica kloszy izolatora w cm; r_p – rezystancja jednostkowa w k Ω ; A, n – stałe.

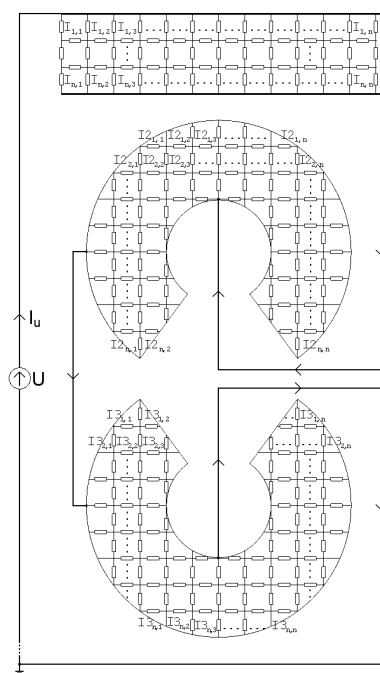
3. OBLICZENIA SYMULACYJNE WARTOŚCI NATEŻENIA PRĄDU UPŁYWU NA POWIERZCHNI PORCELANOWEJ IZOLATORA Z KLOSZAMI ZA POMOCĄ TEORII PERKOLAJI

W celu dokonania obliczeń symulacyjnych prądu upływu na powierzchni izolatora trakcyjnego z kloszami utworzono jego schemat zastępczy modelu powierzchni w postaci obwodu elektrycznego. Obwód elektryczny składa się z sieci stanowiącej sumę trzech prostokątów i czterech powierzchni bocznych stożków ściętych o strukturach kwadratowych jednakowych gałęzi o charakterze rezystancyjnym oraz źródła napięcia. Natomiast model perkolacji powierzchni izolatora trakcyjnego LT 40R otrzymuje się wskutek losowego niszczenia struktury sieci będącej modelem jego powierzchni.

3.1. Model powierzchni izolatora trakcyjnego z kloszami

Izolator trakcyjny LT 40R ma nieregularną powierzchnię roboczą (klosze). Nieregularny kształt powierzchni izolatora trakcyjnego przedstawiony w układzie trójwymiarowym nie można odwzorować geometrycznie w płaszczyznę. W celu odwzorowania powierzchni nieregularnej izolatora w układzie trójwymiarowym na płaszczyznę wykorzystano modele kloszy (połączenie dwóch ściętych stożków) oraz części pnia izolatora (walce). Rozwijając powierzchnię boczną „uproszczonego” izolator trakcyjnego otrzymano jego model powierzchni. Model powierzchni izolatora trakcyjnego LT 40R składa się z trzech prostokątów (trzy części pnia izolatora) oraz czterech powierzchni bocznych stożków ściętych (modele kloszy). Dokonując podziału (dyskretyzacji) poszczególnych części powierzchni izolatora na kwadraty o wymiarach 5,0 mm \times 5,0 mm otrzymano model powierzchni izolatora w postaci sieci o strukturze kwadratowej, zawierającej 372 oczka (komórki). Tak otrzymana sieć z odpowiednio rozmieszczonymi w niej re-

zystorami (od R_1 do R_{629}) oraz źródłem napięcia wymuszającego stanowi modelu powierzchni izolatora trakcyjnego LT 40R (rys. 3.1).



Rys. 3.1. Schemat zastępczy modelu powierzchni izolatora trakcyjnego LT 40R: U – napięcie wymuszające; I_u – prąd upływu na powierzchni izolatora; $I_{1,nn}$, $I_{2,nn}$, $I_{3,nn}$ – prądy oczkowe w komórkach sieci modelu powierzchni izolatora

3.2. Dobór parametrów modelu powierzchni izolatora trakcyjnego

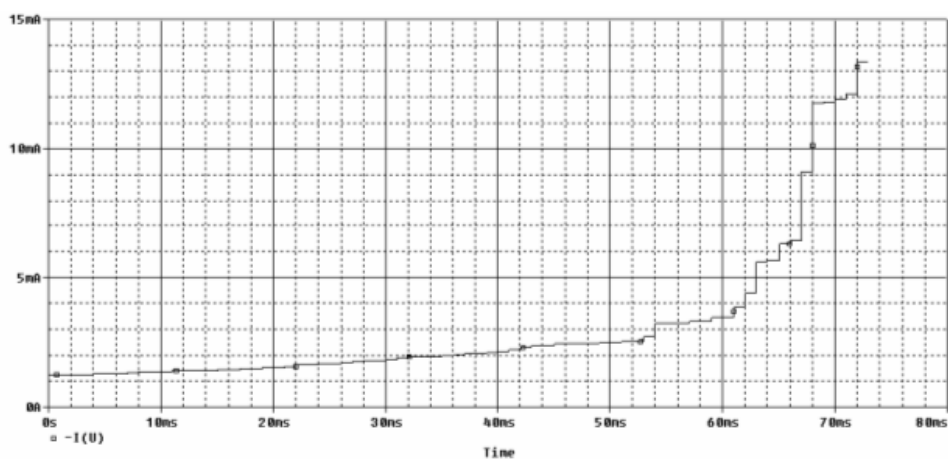
Podczas wyznaczania parametrów modelu powierzchni izolatora trakcyjny LT 40R przyjęto następujące dane: $U = 3$ kV i $I_u = 0,5$ mA. Znając wartość natężenia prądu upływu na powierzchni izolatora trakcyjnego, strukturę gałęzi (rezystorów) modelu powierzchni oraz wartość napięcia wymuszającego w programie *PSpice* wyznaczono wartości parametrów gałęzi. W modelu tym gałęziami są rezystory ($R_1 = R_2 = \dots R_k = \dots R_{629}$, $R_k = 7 \cdot 10^6 \Omega$).

3.3. Obliczenia symulacyjne wartości natężenia prądu upływu na powierzchni izolatora trakcyjnego LT 40

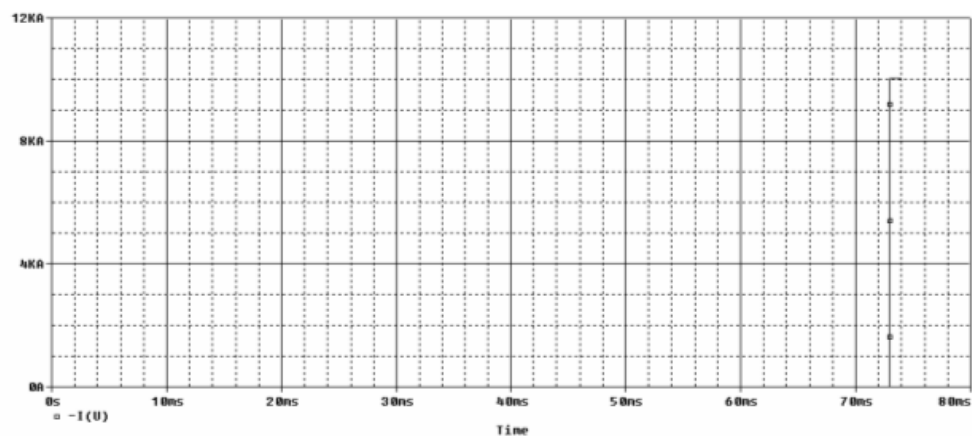
Tok obliczeniowy wartości natężenia prądu upływu na powierzchni izolatora trakcyjnego LT 40 w ujęciu teorii perkolacji sprowadza się do następujących procedur [4, 5] :

- utworzenia schematu zastępczego modelu powierzchni izolatora trakcyjnego w postaci sieci i napięcia wymuszającego w programie *PSpice*,
- opracowania modelu perkolacji (perkolacja dla węzłów na sieci) w oparciu o schemat zastępczy modelu powierzchni izolatora trakcyjnego w programie *PSpice*[4],
- zadeklarowania odpowiednich nastaw procedury *Transient Analysis* [8].

Wyniki obliczeń symulacyjnych prądu upływu na powierzchni izolatora trakcyjnego LT 40 za pomocą modelu perkolacji zamieszczono na rys. 3.2 i rys. 3.3.



Rys. 3.2. Wyniki obliczeń symulacyjnych prądu upływu na powierzchni izolatora trakcyjnego LT 40 za pomocą modelu perkolacji w programie *PSpice* – przed wystąpienia progu perkolacji



Rys. 3.3. Wyniki obliczeń symulacyjnych prądu upływu na powierzchni izolatora trakcyjnego LT 40 za pomocą modelu perkolacji w programie *PSpice* – wystąpienie progu perkolacji

4. WERYFIKACJA OBLICZEŃ SYMULACYJNYCH PRĄDU UPŁYWU NA POWIERZCHNI IZOLATORA TRAKCYJNEGO W UJĘCIU TEORII PERKOLACJI

W rozdziale przedstawiono metodę pomiaru konduktywności powierzchniowej izolatora trakcyjnego LT 40R z kłozkami oraz sposób wyznaczania wartości natężenia prądu upływu na powierzchni izolatora trakcyjnego.

4.1. Pomiar konduktywności powierzchniowej izolatora trakcyjnego

Do celów weryfikacyjnych obliczonych prądów upływu na powierzchni izolatora trakcyjnego w ujęciu teorii perkolacji wykorzystano wyniki pomiarów jego konduktancji powierzchniowej, które zamieszczono w literaturze [2]. Pomiar konduktywności powierzchniowej izolatora trakcyjnego LT 40R dokonano za pomocą konduktometru SLM4 i sondy paskowej [2]. Konduktywność powierzchniowa izolatorów trakcyjnych LT 40R zmierzona po dłuższym okresie bezdeszczowym – wynosiła najczęściej $0,5 \div 2 \mu\text{S}$ [2]. Największą zmierzoną wartością konduktywności powierzchniowej było $5 \mu\text{S}$.

4.2. Obliczenia analityczne wartości natężenia prądu upływu na powierzchni izolatora trakcyjnego z kłozkami

Wartości natężenia prądu upływu na powierzchni porcelanowej izolatorów trakcyjnych z kłozkami wyznaczono w oparciu o wzór (2.5) oraz zmierzone wartości konduktywności powierzchniowej ($0,5 \div 2 \mu\text{S}$). Otrzymano z obliczeń wartości natężenia prądu od 1,52 do 6,08 mA. Dla największej zmierzonej wartości konduktywności powierzchniowej ($5 \mu\text{S}$) otrzymano prąd 15,20 mA.

5. WNIOSKI

W wyniku przeprowadzonych obliczeń symulacyjnych wartości natężenia prądu upływu na powierzchni izolatora trakcyjnego LT 40R za pomocą modelu perkolacji (perkolacja dla węzłów na sieci) oraz obliczeń analitycznych w oparciu o wzór (2.5) i zmierzone wartości konduktywności powierzchniowej stwierdzono:

- utworzony model perkolacji (perkolacja dla węzłów na sieci) zweryfikowano na podstawie wartości progu ($p_c^f = 0,5998$) [7],
- teorię perkolacji (perkolacja dla węzłów na sieci) można zastosować do wyznaczenia wartości natężenia prądu upływu na powierzchni izolatorów porcelanowych z kłozkami (izolator trakcyjnego LT 40R),

- na otrzymanych charakterystykach symulacyjnych prądu upływu w funkcji liczby zapełnionych węzłów widać stopniowe narastanie wartości natężenia prądu i nagły wzrost o kilka rzędów wielkości (próg perkolacji – rys. 3.3),
- próg p_c^l [7]. (perkolacja dla węzłów na sieci) w rozpatrywanym modelu perkolacji izolatora odpowiada jego napięciu przeskoku zabrudzeniowego,
- obliczone analitycznie wartości natężenia prądu upływu na porcelanowej powierzchni izolatora z kloszami w oparciu o wzór (2.5) i zmierzone wartości konduktywności powierzchniowej odpowiadają wartością prądu obliczonym przy pomocy teorii perkolacji (rys. 3.2).

LITERATURA

- [1] Chrzan K. L.: Prąd upływu na naturalnie zabrudzonych izolatorach porcelanowych i silikonowych, *Przegląd Elektrotechniczny* 2008, vol. 84, nr 10, s.117–120.
- [2] Chrzan K. L.: Narażenia zabrudzeniowe i przepięciowe izolatorów trakcyjnych, *Problemy Kolejnictwa 2007, Zeszyt nr 144*, s.117–120.
- [3] Flisowski Z.: *Technika wysokich napięć*, wyd. 5, Warszawa, WNT 2005, ISBN 83-204-3077-1.
- [4] Frączak P.: *Creation and application of electrical percolation models*, Poznań University of Technology Academic Journals, Computer Applications in Electrical Engineering, Volume 12, Publishing House of Poznan University of Technology, Poznań 2014, ISSN 1508-4248, s. 92– 105.
- [5] Frączak P.: *Prąd upływnościowy powierzchniowy izolatora ceramicznego podczas eksploatacji w ujęciu teorii perkolacji*, Poznań University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering Issue 78 Computer Applications in Electrical Engineering 2014, Publishing House of Poznan University of Technology, Poznań, ISSN 1897-0737, s. 149– 156.
- [6] Holtzhausen J. P., Vosloo W. L., *High Voltage Engineering, Practice and Theory*, Stellenbosh University, 2008, Chapter 4
- [7] Król A., Moczko J.: *PSpice Symulacja i optymalizacja układów elektronicznych*, Wydawnictwo Nakom, Poznań 1999, ISBN 83 - 86969-28-8.
- [8] Zallen R.: *Fizyka ciał amorficznych*, Warszawa, WN PWN 1994, ISBN 83-01-11265-4.
- [9] Zhang R., Zhu D., Guan Z., A study on the relation between the flashover voltage and the leakage current of naturally or artificially polluted insulators. 4th Int. Symposium on High Voltage Eng., Athens 1983, paper 46.01

THE LEAKAGE CURRENT AND CONTAMINATION'S TRANSITION ON THE SURFACE OF INSULATOR WITH GLASSES IN TERMS OF THE PERCOLATION THEORY

The paper presents simulations of leakage current amperage and contamination's transitions on the porcelain surface of the insulator with glasses, using percolation theory. In order to map the surface of the insulator with glasses on the plane, its substitute shape

has been used. As a result of this operation, the mapped surface of the insulator is comprised of an appropriate number of lateral surfaces of truncated cones and rectangles, which respectively correspond to glasses and parts of the insulator's stem. The obtained surface of the insulator with glasses has been presented in the form of a percolation model for the nodes of the network. This model is an electric circuit, which consists of a network with a square pattern of identical resistors and a inducement voltage. This model included a random method of creating the knots „filled" on the network. The simulations of leakage current and contamination's transitions on the insulator surface with glasses in terms of percolation theory was carried out in the PSpice software.

(Received: 1. 02. 2016, revised: 7. 03. 2016)