

Piotr FRĄCZAK*

WERYFIKACJA WARTOŚCI NATĘŻENIA PRĄDU UPŁYWU NA POWIERZCHNI IZOLATORA PRĘTOWEGO OBLICZONEGO ZA POMOCĄ TEORII PERKOLACJI

W pracy przedstawiono obliczenia symulacyjne wartości natężenia prądu upływu na powierzchni porcelanowej izolatora prętowego za pomocą teorii perkolacji. Powierzchnię izolatora prętowego przedstawiono w postaci modelu perkolacji dla węzłów na sieci. Model ten jest obwodem elektrycznym, który składa się z sieci o charakterze rezystancyjnym oraz źródła napięcia. W modelu uwzględniono losowy sposób tworzenia węzłów „zapełnionych” na sieci. Procedura obliczeń symulacyjnych prądu upływu za pomocą modelu perkolacji polegała na stworzeniu jego schematu zastępczego oraz zadeklarowania stosownych analiz prądowych w programie PSpice. Uzyskane w ten sposób wartości natężenia prądu upływu na powierzchni izolatora prętowego porównano z wartościami zmierzonymi na badanych izolatorach na stacji prób. Otrzymano podobne wartości natężenia prądu upływu na powierzchni izolatorów w wyniku obliczeń symulacyjnych (teoria perkolacji) oraz rzeczywistych pomiarów na stacji prób.

SŁOWA KLUCZOWE: prąd perkolacji izolatora, weryfikacja prąd perkolacji izolatora

1. WSTĘP

Na czystych i suchych izolatorach elektroenergetycznych linii średnich napięć prąd upływu podczas eksploatacji jest bardzo mały, rzędu mikroamperów. Takim wartością prądu odpowiada jednostkowa droga upływu rzędu około 2 cm/kV. Natomiast na powierzchniach izolatorów intensywnie zabrudzonych i zawilgoconych prąd krytyczny ma charakter rezystancyjny i osiąga bezpośrednio przed przeskokiem wartość rzędu 1 A. Należy dodać, że przekroczenie tzw. wartości progowej prądu oznacza wzrost prawdopodobieństwa przeskoku zabrudzeniowego. Wartość progowa prądu jest znacznie mniejsza od wartości krytycznej, z reguły przyjmuje się ją na poziomie 100 mA. Wartość natężenia prądu upływu na powierzchni izolatorów zabrudzonych można obliczyć za pomocą modeli perkolacji (perkolacja dla węzłów na sieci) [3]. Modele perkolacji otrzymuje się w wyniku losowego niszczenia struktury sieci będący ze źródłem napięcia schematem zastępczym powierzchni izolatora. Losowy sposób niszcze-

* Zachodniopomorskie Centrum Edukacji Morskiej i Politechnicznej w Szczecinie.

nia struktury sieci dokonuje się za pomocą odpowiednich procedur obliczeniowych programu *PSpice* [5]. Z kolei przeskok zabrudzeniowy na powierzchni izolatora prętowego kompozytowego można porównać z progiem perkolacji rozpatrywanego modelu (nagły skok wartości natężenia prądu o kilka rzędów wielkości) [3, 4].

Celem pracy jest porównanie uzyskanych wartości natężenia prądu upływu na powierzchni izolatora prętowego kompozytowego, które otrzymano za pomocą teorii perkolacji z wartościami natężenia prądu uzyskanymi z pomiarów

2. ZALEŻNOŚCI EMPIRYCZNE UJMUJĄCE WARTOŚCI KRYTYCZNE NAPIĘCIA PRZESKOKU ZABRUDZENIOWEGO I PRĄDU UPŁYWU NA POWIERZCHNI IZOLATORA PRĘTOWEGO

Za pomocą wzorów empirycznych wyznacza się wartości przeskoku napięcia oraz prądu krytycznego upływu na powierzchni izolatorów prętowych w zależności od ich wymiarów geometrycznych oraz konduktywności powierzchniowej.

2.1. Wartość krytyczna napięcia przeskoku zabrudzeniowego na powierzchni izolatora prętowego

Wartość krytyczną napięcia przeskoku U_C na powierzchni izolatora prętowego można obliczyć z równania [6]:

$$U_C = 2,1 \cdot L \cdot D^{-0,25} \cdot \kappa_S^{-0,25} \quad (2.1)$$

gdzie: U_C – napięcie przeskoku zabrudzeniowego w kV; D – średnica izolatora prętowego w cm; L – wysokość izolatora prętowego w cm; κ_S – przewodność powierzchniowa izolatora w μS .

Z równania (2.1) wyznacza się przewodność powierzchniową izolatorów. Równanie ujmujące przewodność powierzchniową rozpatrywanego izolatora przybiera następującą postać:

$$\kappa_S = \left(\frac{2,1 \cdot L \cdot D^{-0,25}}{U} \right)^4 \quad (2.2)$$

W izolatorze prętowym rezystancja jednostkowa r_p jest zależna od konduktywności powierzchniowej. Tą zależność można wyrazić wzorem [6]:

$$r_p = \frac{1}{\pi \cdot D \cdot \kappa_S} \quad (2.3)$$

w którym: r_p – rezystancja jednostkowa izolatora w $\text{k}\Omega$.

2.2. Wartość krytyczna prąd upływu na powierzchni izolatora prętowego

Wartość krytyczną prądu upływu I_C na powierzchni izolatora prętowego wyznacza się z równania [6]:

$$I_c = \left(\frac{A}{r_p} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (2.4)$$

w którym: I_C – prąd krytyczny upływu w mA; r_p – rezystancja jednostkowa w $k\Omega$; A , n – stałe.

3. OBLICZENIA SYMULACYJNE PRĄDU UPŁYWU NA POWIERZCHNI IZOLATORA PRĘTOWEGO ZA POMOCĄ MODELU PERKOLACJI

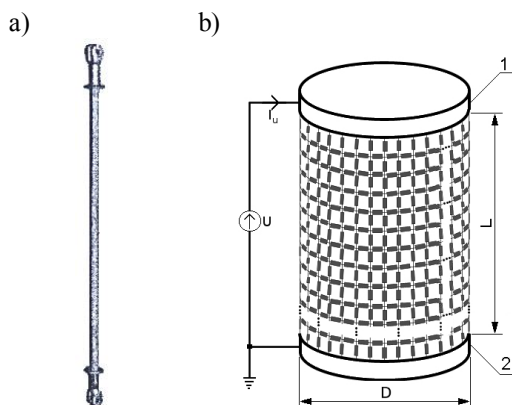
W celu przeprowadzenia obliczeń symulacyjnych prądu upływu na powierzchni izolatora prętowego kompozytowego (rys. 3.1a) za pomocą teorii perkolacji utworzono jego model powierzchni (rys. 3.1b) w postaci obwodu elektrycznego. Obwód elektryczny składa się ze źródła napięcia oraz z sieci o strukturze kwadratowej jednakowych gałęzi o charakterze rezystancyjnym. Niszcząc w sposób losowy strukturę sieci modelu powierzchni izolatora prętowego otrzymuje się jego model perkolacji (perkolacja dla węzłów na sieci) [3].

3.1. Opracowanie modelu powierzchni izolatora prętowego kompozytowego

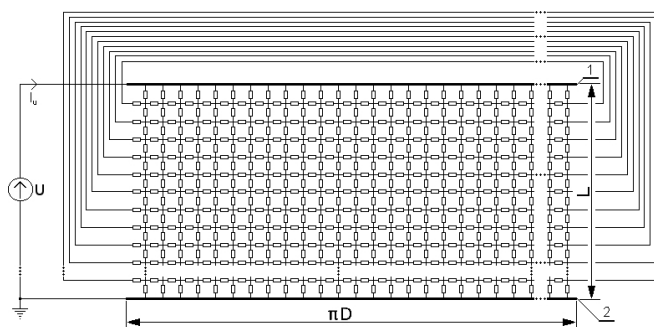
W celu dokonania obliczeń symulacyjnych prądu upływu na powierzchni izolatora prętowego kompozytowego utworzono model jego powierzchni za pomocą obwodu elektrycznego. Na rysunku 3.1 pokazano schemat zastępczy takiego modelu powierzchni izolatora z okuciami oraz źródłem napięcia przeniennego.

Dokonując rozwinięcia wiązań przestrzennych „pierścienia”, otrzymuje się model płaski izolatora kompozytowego w układzie dwuwymiarowym (rys. 3.2). Taki model odpowiada modelowi przestrzennemu (rys. 3.1) izolatora prętowego kompozytowego. Na rysunku 3.3 zamieszczono model izolatora nieuwzględniający wiązań przestrzennych. Model taki jest prostszy niż model biorący pod uwagę wiązania przestrzenne i dlatego w dalszej części pracy będzie wykorzystywany do wyznaczania prądu za pomocą teorii perkolacji.

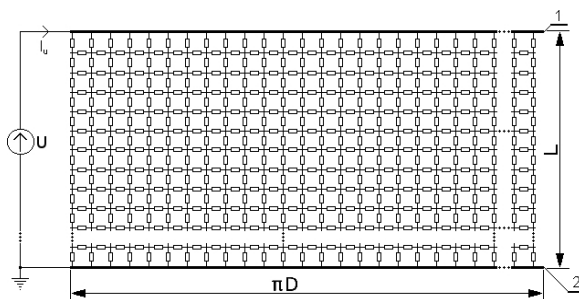
Należy zaznaczyć, że model ten dotyczy układu, w którym wartość natężenia prądu I_u jest taki sam jak w przypadku układu opisanego modelem uwzględniającym wiązania przestrzenne. Wartości prądu I_u w obwodzie elektrycznym (rys. 3.1) są zależne od jego wymiarów geometrycznych (powierzchni), struktury połączeń, liczby oczek (komórek) oraz napięcia wymuszającego.



Rys. 3.1. Izolator prętowy kompozytowy: a) zdjęcie; b) model powierzchni izolatora prętowego (sieć o charakterze rezystancyjnym), U – napięcie źródła, I_u – prąd upływu na powierzchni izolatora, D – średnica izolatora, L – wysokość izolatora, 1 – okucie górne izolatora, 2 – okucie dolne izolatora



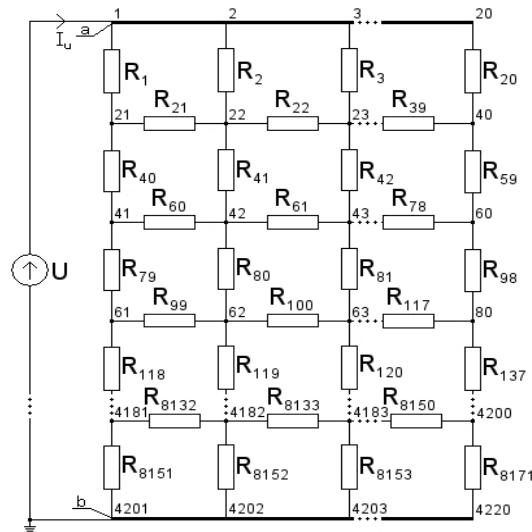
Rys. 3.2. Schemat zastępczy izolatora prętowego z powierzchnią roboczą w postaci sieci elektrycznej o charakterze rezystancyjnym: 1 – okucie górne, 2 – okucie dolne, U – napięcie, I_u – prąd upływu na powierzchni izolatora, D – średnica izolatora, L – wysokość izolatora



Rys. 3.3. Schemat zastępczy izolatora prętowego z powierzchnią roboczą w postaci sieci elektrycznej o charakterze rezystancyjnym: 1 – okucie górne, 2 – okucie dolne, U – napięcie wymuszające, I_u – prąd upływu na powierzchni izolatora, D – średnica izolatora, L – wysokość izolatora

3.2. Rozmiar sieci modelu powierzchni izolatora prętowego

Do budowy modelu perkolacji przyjęto sieć, która odpowiada wymiarom geometrycznym izolatora prętowego kompozytowego. Rozwijając powierzchnię zewnętrzną prętowego izolatora o średnicy 30,00 mm i wysokości 1050,00 mm otrzymano prostokąt o wymiarze 94,25 mm × 1050,00 mm.



Rys. 3.4. Schemat zastępczy modelu powierzchni izolatora prętowego kompozytowego: 1 – okucie górne; 2 – okucie dolne; U – napięcie wymuszające; I_u – prąd upływu na powierzchni izolatora; a – okucie górne; b – okucie dolne

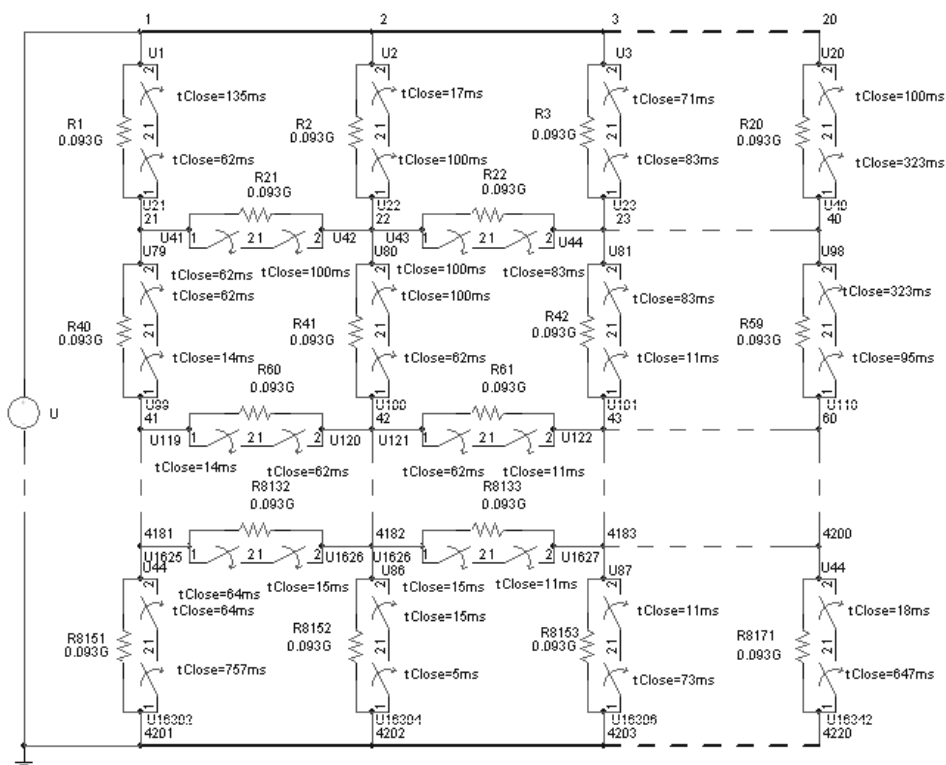
Dokonując dyskretyzacji (podziału) powierzchni prostokąta $98,96 \times 10^3 \text{ mm}^2$ na kwadraty o wymiarze $25,00 \text{ mm}^2$, otrzymano model powierzchni izolatora prętowego w postaci sieci zawierającej $3,958 \times 10^3$ komórek (oczek). Komórki w sieci usytuowane są 210 wierszach i 19 (18,85) kolumnach. Tak otrzymana sieć z odpowiednio rozmieszczonymi rezystorami (od R_1 do R_{8171}) oraz źródłem napięcia wymuszającego stanowi model powierzchni izolatora prętowego. Na rys. 3.4 zamieszczono model powierzchni izolatora prętowego kompozytowego

Z kolei na rys. 3.5 zamieszczono schemat zastępczy modelu perkolacji powierzchni izolatora prętowego kompozytowego w programie *PSpice*.

3.3. Dobór parametrów modelu powierzchni izolatora prętowego kompozytowego

Podczas doboru parametrów modelu powierzchni izolatora prętowego kompozytowego przyjęto następujące dane: $U = 75 \text{ kV}$ i $I_u = 1 \text{ mA}$. Znając wartość natężenia prądu upływu na powierzchni izolatora prętowego, strukturę gałęzi

(rezystorów) modelu powierzchni oraz wartość napięcia wymuszającego za pomocą programu *PSpice* wyznaczono wartości parametrów gałęzi. W modelu tym gałęziami są rezystory ($R_1 = R_2 = \dots R_k = \dots R_{8171}$, $R_k = 0,093 \cdot 10^9 \Omega$).



Rys. 3.5. Schemat zastępczy modelu perkolacji powierzchni izolatora prętowego kompozytowego w programie *PSpice*

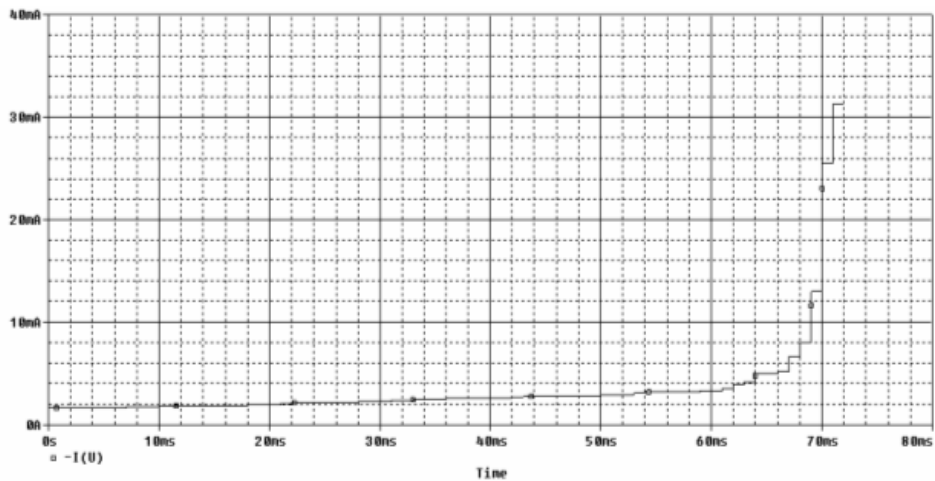
3.4. Obliczenia symulacyjne wartości natężenia prądu upływu na powierzchni izolatora prętowego kompozytowego w programie *PSpice*

Obliczenia symulacyjne wartości natężenia prądu upływu na powierzchni izolatora prętowego kompozytowego w ujęciu teorii perkolacji sprowadza się do następujących procedur obliczeniowych:

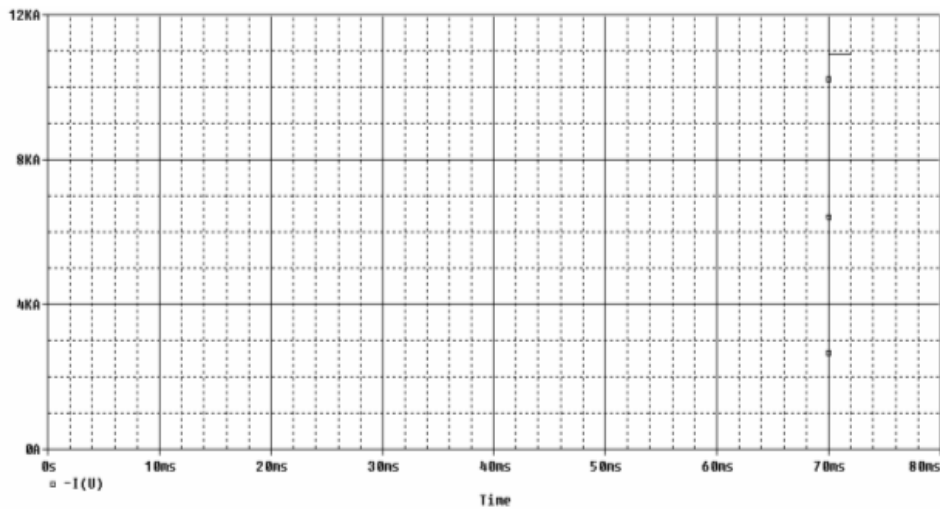
- utworzenia schematu zastępczego modelu powierzchni izolatora prętowego kompozytowego w programie *PSpice*,
- opracowania modelu perkolacji (perkolicja dla węzłów na sieci) w oparciu o schemat zastępczy modelu powierzchni izolatora prętowego kompozytowego w programie *PSpice*[4],

– zadeklarowania odpowiednich nastaw procedury *Transient Analysis* [5].

Wyniki obliczeń symulacyjnych prądu upływu na powierzchni izolatora prętowego kompozytowego za pomocą modelu perkolacji zamieszczono na rys. 3.6 i rys. 3.7.



Rys. 3.6. Obliczenia symulacyjne prądu upływu na powierzchni izolatora prętowego za pomocą modelu perkolacji w programie *PSpice* – przed wystąpienia progu perkolacji



Rys. 3.7. Obliczenia symulacyjne prądu upływu na powierzchni izolatora prętowego za pomocą modelu perkolacji w programie *PSpice* – wystąpienie progu perkolacji

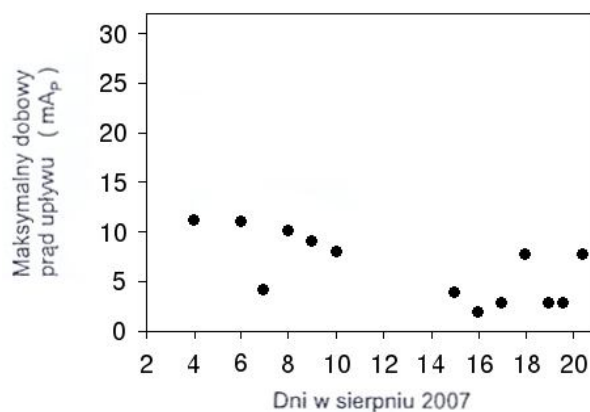
4. WERYFIKACJA DOŚWIADCZALNA OBLICZEŃ SYMULACYJNYCH PRĄDU UPŁYWU NA POWIERZCHNI IZOLATORA PRĘTOWEGO ZA POMOCĄ TEORII PERKOLACJI

W celu dokonania obliczeń symulacyjnych prądu upływu na powierzchni izolatora prętowego kompozytowego w ujęciu teorii perkolacji utworzono model powierzchni za pomocą obwodu elektrycznego. Obwód elektryczny składa się ze źródła napięcia oraz z sieci o charakterze rezystancyjnym. Niszcząc w sposób losowy strukturę sieci modelu powierzchni izolatora otrzymuje się jego model perkolacji (perkolacja dla węzłów na sieci).

4.1. Pomiar wartości natężenia prądu upływu na powierzchni izolatora prętowego kompozytowego podczas eksploatacji

Do celów weryfikacyjnych obliczonych prądów upływu na powierzchni izolatora prętowego kompozytowego w ujęciu teorii perkolacji wykorzystano wyniki pomiarów prądu upływu, które zamieszczono w literaturze [1].

Do pomiarów wartości natężenia prądu upływu na powierzchni izolatorów prętowych kompozytowych zastosowano trójkanałowy rejestrator LCM-1 firmy FGH Mannheim. W czasie pomiarów rejestrator mierzy wartości prądu i wybiera do druku kolejno maksymalne wartości. Miernik wyposażony jest w interfejs do przesyłu danych do komputera. Zakres pomiarowy rejestratora wynosi od 2 do 400 mA_{max}. Na rys. 4.1 zamieszczono otrzymane podczas pomiarów wartości natężenia prądu upływu na powierzchni izolatora prętowego kompozytowego [1].



Rys. 4.1. Maksymalne dobowe wartości prądu upływu na izolatorze prętowym kompozytowym [1]

4.2. Obliczenia analityczne wartości krytycznych prądu upływu na powierzchni izolatora kompozytowego

Krytyczna wartość konduktywności powierzchniowej obliczona ze wzoru (2.2) dla izolatora cylindrycznego wynosi $6,2 \mu\text{S}$. Tej wartości krytycznej konduktywności powierzchniowej odpowiada jej wartość krytyczna rezystancji jednostkowej $17,1 \text{ k}\Omega$ (2.3). Wstawiając do wzoru (2.4) wyznaczoną wartość krytyczną rezystancji jednostkowej oraz parametry A i n ($A = 140$, $n = 0,56$) oblicza się wartość krytyczną prądu. Obliczony prąd krytyczny wynosi 46 mA .

5. WNIOSKI

W wyniku przeprowadzonych obliczeń symulacyjnych wartości natężenia prądu upływu na powierzchni izolatora prętowego kompozytowego za pomocą modelu perkolacji (perkolacja dla węzłów na sieci), pomiarów rzeczywistych prądu upływu oraz obliczeń analitycznych (wzory empiryczne) stwierdzono:

- utworzony model perkolacji (perkolacja dla węzłów na sieci) zweryfikowano na podstawie wartości progu ($p_c^l = 0,5998$) [7].
- teorię perkolacji (perkolacja dla węzłów na sieci) można zastosować do wyznaczenia wartości natężenia prądu upływu na powierzchni izolatorów prętowych kompozytowych.
- na otrzymanych charakterystykach symulacyjnych prądu upływu w funkcji liczby zajętych węzłów widać stopniowe narastanie wartości natężenia prądu i nagły wzrost o kilka rzędów wielkości (próg perkolacji – rys. 3.4).
- próg p_c^l [7]. (perkolacja dla węzłów na sieci) w rozpatrywanym modelu perkolacji izolatora odpowiada jego napięciu przeskoku zabrudzeniowego.
- obliczone analitycznie (2.4) wartości krytyczne natężenia prądu upływu na powierzchni izolatora odpowiadają wartościom obliczonym za pomocą teorii perkolacji (rys. 3.3).

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] Flisowski Z.: *Technika wysokich napięć*, wyd. 5, Warszawa, WNT 2005, ISBN 83-204-3077-1.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Król A., Moczko J.: PSpice Symulacja i optymalizacja układów elektronicznych, Wydawnictwo Nakom, Poznań 1999, ISBN 83 - 86969-28-8.
- [6] Pilling J., Berndt L., Katib M., Seeling T., Der Fremdschichtueberschlag von Isolatoren mit gleichmaessinger Verschmutzung bei Wechselspannung. Wissenschaftliche Berichte, Sonderheft der Sektion Elektroenergieversorgung und Automatisierung. Technische Hochschule Zittau, Heft 23, Juli 1990, S. 38-41
- [7] Zallen R.: *Fizyka ciał amorficznych*, Warszawa, WN PWN 1994, ISBN 83-01-11265-4.

**THE VALUE OF LEAKAGE CURRENT AMPERAGE VERIFICATION
ON THE SURFACE OF THE ROD INSULATOR CALCULATE USING
THE PERCOLATION THEORY**

The paper presents the simulations of leakage current amperage on the porcelain surface of the rod insulator, using percolation theory. The surface of the rod insulator is shown in the form of a percolation model for nodes on the network. This model is an electric circuit, which consists of a resistive network and the voltage source. The model included a random method of creating the knots „filled " on the network. Procedure of the simulation of leakage current using a percolation model was to create the equivalent circuit and to declare relevant current analyzes in the PSpice software. The obtained values of leakage current amperage on the surface of the rod insulator were compared with values measured on the test insulators at a testing station. The similar values of leakage current amperage on the surface of insulators were received, both: as a result of simulation (percolation theory) and the actual measurements at a testing station.

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