

Piotr FRĄCZAK\*

## PRĄD UPŁYWNOŚCIOWY POWIERZCHNIOWY IZOLATORA CERAMICZNEGO PODCZAS EKSPLOATACJI W UJĘCIU TEORII PERKOLACJI

W pracy przedstawiono obliczenia symulacyjne wartości natężenia prądu upływnościowego powierzchniowego (*pup*) izolatora ceramicznego podczas eksploatacji za pomocą teorii perkolacji. W tym celu stworzono model perkolacji dla węzłów na sieci, który odzwierciedla powierzchnię izolatora ceramicznego. Model ten jest obwodem elektrycznym, stanowiącym sieć o strukturze kwadratowej jednakowych rezystorów oraz napięcie wymuszające. W modelu uwzględniono losowy sposób tworzenia węzłów „zapełnionych” na sieci za pomocą odpowiednich procedur obliczeniowych programu *PSpice*. Obliczenia symulacyjne *pup* izolatora ceramicznego dokonano za pomocą jego modelu perkolacji w programie *PSpice*.

SŁOWA KLUCZOWE: perkolacja, model perkolacji izolatora, prąd perkolacji izolatora

### 1. WSTĘP

Powierzchnie izolatorów napowietrznych w danych warunkach eksploatacyjnych pokrywają się warstwą zanieczyszczeń w postaci pyłów pochodzenia przemysłowego lub morskiego. Osiadające cząsteczki przewodzące pyłu w sposób losowy na powierzchni izolatora powodują wzrost jego konduktywności powierzchniowej. Należy dodać, że zanieczyszczenia te na powierzchni izolatorów w stanie zawilgocenia stwarzają możliwość wystąpienia przeskoku zabrudzeniowego. Wartość napięcia przeskoku zabrudzeniowego izolatorów wyznacza się szacunkowo ze wzorów empirycznych dla danej konduktancji powierzchniowej, określonych gabarytów i napięcia wymuszającego. Z kolei wartości natężenia prądu upływnościowego powierzchniowego, które występują podczas przeskoku zabrudzeniowego izolatora można wyznaczyć za pomocą jego modelu perkolacji (model perkolacji dla węzłów na sieci). Schemat zastępczy powierzchni izolatora przedstawia się za pomocą obwodu elektrycznego składającego się ze źródła napięcia oraz z sieci o charakterze rezystancyjnym. Losowy sposób tworzenia węzłów „zapełnionych” na sieci można dokonać za pomocą styczników z programowanym czasem zamykania styków. Styki te są

\* Zachodniopomorskie Centrum Edukacji Morskiej i Politechnicznej w Szczecinie.

zestawiane w określonej konfiguracji i zaprogramowane na odpowiednie czasy zwierania stosownych gałęzi na sieci tworzących węzły „zapełnione”. Obliczenia symulacyjne prądu upływnościowego powierzchniowego izolatora cylindrycznego można dokonać na podstawie jego modelu perkolacji.

Celem pracy jest wykonanie obliczeń symulacyjnych wartości natężenia prądu upływnościowego powierzchniowego izolatora porcelanowego podczas eksploatacji za pomocą modelu perkolacji w programie *PSpice*.

## 2. TEORIA PERKOLACJI DLA WĘZŁÓW NA SIECI

Teoria perkolacji [3] uwzględnia element losowości w modelowaniu matematycznym. W wyniku, takich operacji matematycznych, uzyskuje się modele perkolacji, które są naturalnymi modelami układów nieuporządkowanych. Istnieją dwa rodzaje modeli perkolacji na strukturach sieciowych: model perkolacja dla gałęzi i model perkolacja dla węzłów. Rozpatrując model perkolacji dla węzłów na sieci zakłada się, że w sieci występuje komplet gałęzi, a węzły zapełniane są obiektami kulistymi (plamki przewodzące) w sposób losowy. Węzłowi zajętemu obiektem kulistym przypisuje się prawdopodobieństwo  $p$  (gdzie  $0 \leq p \leq 1$ ), a brak obiektu w węzle określa się prawdopodobieństwem  $(1 - p)$ . Obecność plamki przewodzącej w węzle sieci oznacza, że wszystkie połączenia (gałęzie) pomiędzy nim a zapełnionymi węzłami najbliższych sąsiadów (połączone – należą do tego samego klastra) mają rezystancję równą zero. Mimo zwiększania koncentracji  $p$  (gdzie  $0,000 < p < 0,593$ ), wartość prądu ( $I(p) = 0$ ) nie ulega zmianie (wszystkie powstające klastry mają skończony wymiar, tj. nie istnieje ścieżka przewodząca między elektrodami), aż do momentu, gdy osiągnięta zostanie krytyczna koncentracja zapełnionych węzłów (próg perkolacji -  $p_c^1$ ,  $p_c^1 = 0,593$ ), przy której nagle pojawia się prąd  $I(p) > 0$ . Pojawienie się prądu jest związane z powstaniem długozasięgowego połączenia (gigantyczny klaster) w obwodzie między elektrodami.

Próg perkolacji jest definiowany wzorem [ 3 ]:

$$p_c^1 = \frac{\sum_{i=1}^m W I_i}{\sum_{j=1}^n W_j} \quad (2.1)$$

gdzie:  $W I_i$  – liczba zajętych węzłów sieci,  $W_j$  – liczba wszystkich węzłów sieci.

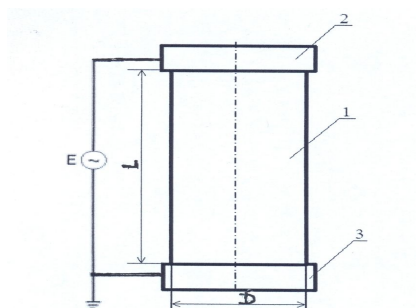
W miarę wzrostu liczby zapełnionych węzłów sieci przy odpowiednim wymuszeniu napięciem pojawia się nagle próg perkolacji (2.1). Jego cechą charakterystyczną jest nagły wzrost wartości natężenia prądu, który zaczyna dążyć do nieskończoności. Należy dodać, że próg  $p_c^1$  w rozpatrywanej teorii perkolacji odpowiada napięciu przeskoku zabrudzeniowego izolatorów.

### 3. OPIS MATEMATYCZNY WYBRANYCH PARAMETRÓW PRACY IZOLATORA CYLINDRYCZNEGO

Wartość prądu upływnościowego powierzchniowego izolatora cylindrycznego (rys. 3.1) wyznacza się z równania [1, 2]

$$I_u = \frac{E \cdot \pi \cdot D \cdot \gamma_s}{L} \quad (3.1)$$

w którym:  $U$  – napięcie źródła [kV];  $D$  – średnica izolatora [cm];  $\gamma_s$  – przewodność powierzchniowa zabrudzeń,  $\mu\text{S}$ ;  $L$  – droga upływu [cm].



Rys. 3.1. Schemat zastępczy modelu izolatora cylindrycznego: 1- powierzchnia izolatora, 2- elektroda górna, 3- elektroda dolna,  $L$  – droga upływu,  $D$  - średnica izolatora

Wartość krytyczną prądu rozpatrywanego izolatora cylindrycznego (rys.3.1) określa się z równania [2]

$$I_k = (A \cdot \pi \cdot D \cdot \gamma_s)^{\frac{1}{1+n}} \quad (3.2)$$

gdzie:  $A$  i  $n$  współczynniki o stałej wartości odpowiednio 100 i 0,7 [2].

Z kolei wartość napięcia przeskoku zabrudzeniowego izolatora ujmuje równanie [2]

$$U_{pZ} = L \cdot A^{\frac{1}{1+n}} \cdot (\pi \cdot D \cdot \gamma_s)^{\frac{1}{1+n}} \quad (3.3)$$

### 4. OBLICZENIA SYMULACYJNE PUP IZOLATORA CYLINDRYCZNEGO ZA POMOCĄ MODELU PERKOLACJI

W celu dokonania obliczeń symulacyjnych *pup* izolatora ceramicznego utworzono model jego powierzchni za pomocą 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 otrzymano jego model perkolacji (perkolacja dla węzłów na sieci).

#### 4.1. Rozmiar sieci modelu powierzchni izolatora cylindrycznego

Do budowy modelu perkolacji przyjęto sieć, która posiada 100 oczek (badania początkowe opracowanego modelu perkolacji). Z kolei rozmieszczenie oczek w sieci odpowiada gabarytom powierzchni izolatora.

Rozwijając powierzchnię zewnętrzną cylindrycznego izolatora o średnicy 20,00 mm i wysokości 18,00 mm otrzymano prostokąt o wymiarze 20,00 mm × 18,85 mm. Dokonując dyskretyzacji (podziału) powierzchni prostokąta 20,00 mm × 18,85 mm) na kwadraty o wymiarze 2,00 mm × 2,00 mm, otrzymano model powierzchni izolatora cylindrycznego (rys. 3.1), stanowiący obwód elektryczny utworzony z sieci o kwadratowej strukturze połączeń rezystorów od  $R_1$  do  $R_{200}$ , zawierającej 100 oczek, rozmieszczonych w 10 wierszach i 10 kolumnach oraz źródła napięcia wymuszającego.

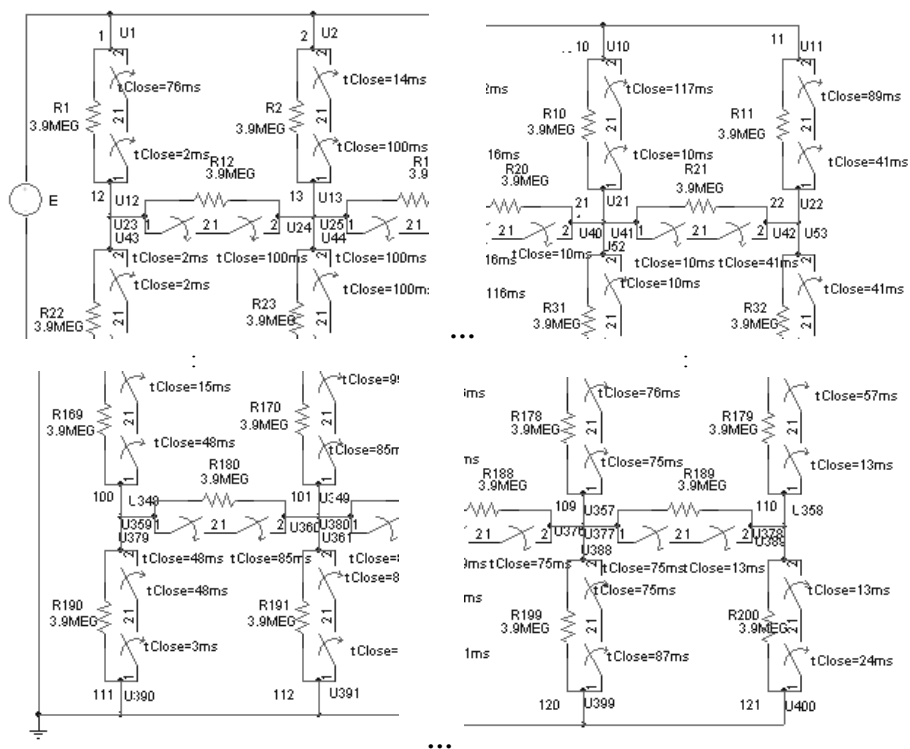
#### 4.2. Dobór parametrów powierzchni izolatora cylindrycznego

Do obliczeń symulacyjnych prądu upływnościowego powierzchniowego izolatora cylindrycznego przyjęto następujące dane:  $E = 20$  kV,  $D = 6$  cm,  $L = 20$  cm,  $\gamma_s = 1$   $\mu$ S. Wykorzystując te dane za pomocą równania (3.1) obliczono wartość natężenia prądu (18,85 mA). Znając wartość natężenia prądu upływnościowego powierzchniowego oraz wartość napięcia wymuszającego za pomocą programu PSpice wyznaczono wartości parametrów modelu powierzchni izolatora. W modelu tym powierzchnię izolatora stanowią gałęzie ( $R_1 = R_2 = \dots R_k = \dots R_{200}$ ,  $R_k = 3,9 \cdot 10^6 \Omega$ ).

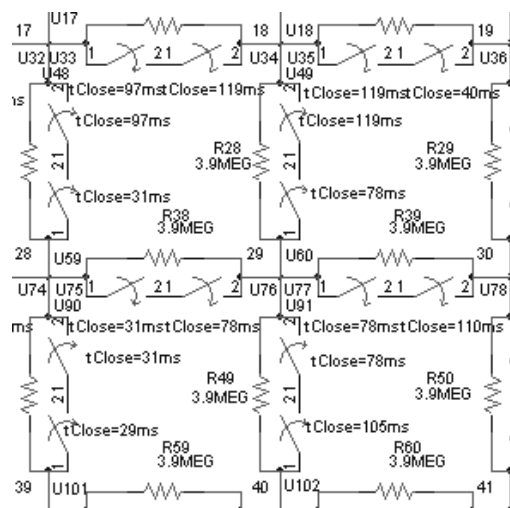
#### 4.3. Losowy sposób tworzenia węzłów „zapełnionych” na sieci w programie PSpice

Procedura tworzenia węzłów zapełnionych na sieci modelu powierzchni izolatora ceramicznego (rys. 4.1) polegała na oznaczeniu węzłów od 1 do 121. W każdym węźle umieszcza się cztery styczniki oprócz skrajnych (węzły znajdujące się na konturach zewnętrznych sieci). Węzłom tym w sposób losowy za pomocą procedury  $rnd(x)$  programu *Mathcad* [5] przyporządkowuje się czasy od 1ms do 121ms.

Te same czasy określone w sposób losowy przypisuje się każdemu stycznikowi programowalnemu należącemu do danego węzła. Styki normalnie otwarte styczników programowalnych zestawia się w określone konfiguracje bocznikujące rezystory, które tworzą węzły „zapełnione” na sieci z chwilą zamknięcia styków. Szczegółowy opis procedury tworzenia węzłów zapełnionych na sieci ujmuje rys. 4.2. Do węzła 29 dołączone są cztery styczniki  $U60$ ,  $U76$ ,  $U77$  i  $U91$ . Tym stycznikom programowalnym przypisuje się jednakowe czasy zamykania styków (zaprogramowane - uzyskane w sposób losowy): ( $t_{Close} = 78$  ms)  $\equiv s_1$ , ( $t_{Close} = 78$  ms)  $\equiv s_2$ , ( $t_{Close} = 78$  ms)  $\equiv s_3$  i ( $t_{Close} = 78$  ms)  $\equiv s_4$ . Węzeł 29 łączy się z najbliższymi węzłami 28, 18, 30 i 40 poprzez rezystory odpowiednio  $R38$ ,  $R28$ ,  $R39$  i  $R49$ .



Rys. 4.1. Schemat zastępczy modelu perkolacji powierzchni izolatora ceramicznego w programie PSpice

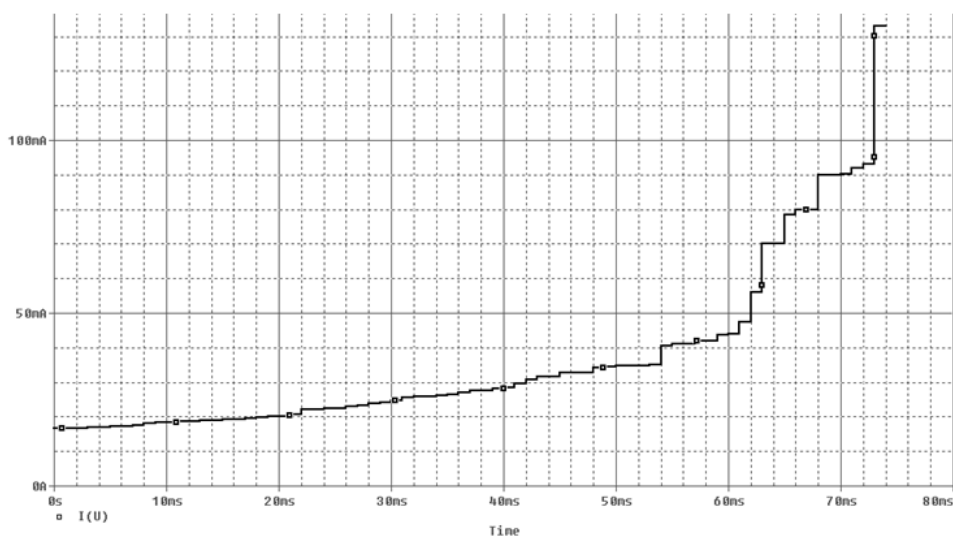


Rys. 4.2. Węzły 29, 28, 18, 30 i 40 sieci modelu perkolacji (rys. 4.1)

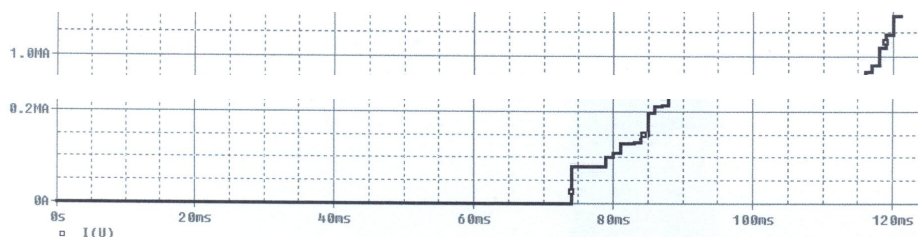
Rezystory te są zbcznikowane dwoma szeregowo połączonymi stykami odpowiednich styczników ( $U76 - U75$ ,  $U60 - U49$ ,  $U77 - U78$ ,  $U91 - U102$ ). Z kolei w toku obliczeń symulacyjnych (*np.*,  $t = 119 \text{ ms}$ ) styczniki  $U18$ ,  $U34$ ,  $U35$  i  $U49$  w węzle 18 zamykają swoje styki normalnie otwartymi ( $t_{Close} = 119 \text{ ms}$ )  $\equiv s_5$ , ( $t_{Close} = 119 \text{ ms}$ )  $\equiv s_6$ , ( $t_{Close} = 119 \text{ ms}$ )  $\equiv s_7$  i ( $t_{Close} = 119 \text{ ms}$ )  $\equiv s_8$ . W wyniku zamknięcia styków  $s_1(t1)$  i  $s_8(t2)$  odpowiednio przełączników  $U60$  i  $U49$ , rezystor  $R28$  zostaje zbcznikowany. Wartość rezystancji zbcznikowanego rezystora jest równa zero. Operację losowego tworzenia węzłów „zapełnionych” na sieci przebiega do czasu  $t = 121 \text{ ms}$ , aż wszystkie węzły zostaną „zapełnione”

#### 4.4. Obliczenia symulacyjne *pup* izolatora cylindrycznego w programie PSpice

Procedura obliczeniowa polegała na stworzeniu schematu zastępczego modelu perkolacji powierzchni izolatora ceramicznego, zadeklarowania odpowiednich nastaw procedury *Transient Analysis* (*Print Step = 0.5 ms*; *Final Time = 121 ms*; *No - Print Deley = 0*; *Step Ceiling = 0.5 ms*; *Skip initial transient solution*). Natomiast wartości nastaw czasowych poszczególnych styczników ( $S_w t_{Close} = \dots \text{ms}$ ) podane na schemacie zastępczym modelu perkolacji powierzchni izolatora ceramicznego (rys. 4.1). Wyniki obliczeń symulacyjnych prądu upływnościowego powierzchniowego izolatora ceramicznego za pomocą modelu perkolacji umieszczono na rys. 4.3 i rys. 4.4.



Rys. 4.3. Obliczenia symulacyjne prądu upływnościowego powierzchniowego izolatora ceramicznego za pomocą modelu perkolacji w programie *PSpice* – przed wystąpienia progu perkolacji



Rys. 4.4. Obliczenia symulacyjne prądu upływnościowego powierzchniowego izolatora ceramicznego za pomocą modelu perkolacji w programie PSpice – wystąpienie progu perkolacji

## 5. WNIOSKI

W wyniku przeprowadzonych obliczeń symulacyjnych *pup* izolatora cylindrycznego za pomocą modelu perkolacji (model perkolacji dla węzłów na sieci) stwierdzono:

- Utworzony model perkolacji zweryfikowano na podstawie wartości progu ( $p_c^1 = 0,5998$ ).
- Podczas tworzenia modeli perkolacji na sieciach izolatorów ceramicznych należy radykalnie zwiększyć liczbę węzłów.
- Teorię perkolacji (perkolacja dla węzłów na sieci) można zastosować do wyznaczenia wartości natężenia prądu upływnościowego powierzchniowego izolatorów ceramicznych.
- Na otrzymanych charakterystykach symulacyjnych prądu upływnościowego w funkcji liczby zapełnionych węzłów widać stopniowe narastanie wartości natężenia prądu i nagły wzrost o kilka rzędów wielkości (próg perkolacji).
- Próg  $p_c^1$  (perkolacja dla węzłów na sieci) w rozpatrywanym modelu perkolacji izolatora odpowiada jego napięciu przeskoku zabrudzeniowego.

## 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] Zallen R.: *Fizyka ciał amorficznych*, Warszawa, WN PWN 1994, ISBN 83-01-11265-4.
- [4] Król A., Moczko J.: PSpice Symulacja i optymalizacja układów elektronicznych, Wydawnictwo Nakom, Poznań 1999, ISBN 83 - 86969-28-8.
- [5] Palczewski W.: Mathcad 12,11, 2001i, 2000 w algorytmach, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2005, ISBN 83-87674-81-8.

### **THE SURFACE LEAKAGE CURRENT OF THE CERAMIC INSULATOR DURING OPERATION IN THE PERCOLATION THEORY**

The paper presents simulation calculations, using percolation theory, of the intensity of surface leakage current ( $pup$ ) of the ceramic insulator during operation. For this purpose a percolation model for network nodes was created. The model reflects the surface of the ceramic insulator. This model is an electric circuit which constitutes a network of square structure equal resistors and a forcing voltage. The model includes a random way to create nodes "filled" on the network using the appropriate calculation procedures of the PSpice software. The developed model of percolation for the nodes on the network reflects the process of deposition of conductive particles of dust on the surface of the insulator, which causes an increase in its surface conductivity. Calculations verifying the  $pup$  of the ceramic insulator were made analytical using appropriate empirical formulas that recognize its size, surface conductance and voltage forcing in the Mathcad software. The verifying calculations include the phenomenon of checking jump of the insulator.