ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2004
Seria: ELEKTRYKA z. 189 Nr kol. 1629

Wiktor KIŚ
Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów
Politechnika Śląska, Gliwice

MODEL OBWODOWY CZĄSTKOWY DO OBLICZEŃ CIEPLNYCH WYSOKONAPIĘCIOWEGO IZOLATORA PRZEPUSTOWEGO

Streszczenie. Zagadnienie dotyczy modelowania zjawisk cieplnych stacjonarnych do obliczeń konstruktorskich. Przedstawiony model obwodowy izolatora przepustowego odnosi się do długości jednostkowej. W części odpowiadającej izolacji głównej uwzględnia rozkład przestrzenny źródeł ciepła i oporów cieplnych. Końcowa postać modelu zawiera wyłącznie elementy skupione.

A PARTIAL CIRCUIT MODEL FOR THERMAL CALCULATIONS OF THE HIGH VOLTAGE BUSHING

Summary. Modeling of stationary thermal phenomena worked out for constructional calculations is considered. The bushing circuit model is related to a unitary length. Spatial distribution of neat sources and thermal resistances are taken into account within main insulation. Final form of the model contains only limped elements.

1. WPROWADZENIE

Obliczenia cieplne urządzeń elektrycznych wykonywane są zwykle przez konstruktorów i projektantów tych urządzeń na etapie opracowywania nowych rozwiązań konstrukcyjnych lub materiałowych. Mogą być również przydatne do wstępnej oceny możliwości zastosowania rozważanego urządzenia w warunkach znacząco odbiegających od pierwotnych założeń dotyczących warunków środowiskowych lub eksploatacyjnych. Najczęściej obliczenia takie zmierzają do określenia lub zweryfikowania obciążalności prądowej albo np. stanowią podstawę analizy zagrożeń związanych z dylatacją termiczną [1], [3], [5]. Konstruktora interesuje wówczas rozkład temperatury w obrębie urządzenia lub przynajmniej określenie wartości i miejsca występowania jej przekroczeń w stosunku do wymagań kryterialnych.

Dziedziny termokinetyki i elektrotechniki są od siebie stosunkowo odległe, ale związki pomiędzy wielkościami każdej z nich wykazują podobieństwo matematyczne. Umożliwia to, a w przypadku elektryków również zachęca do wykorzystywania odpowiednich analogii i posługiwania się w obliczeniach cieplnych modelami obwodowymi [6]. Topografia i parametry modelu pierwotnego wynikają przy tym ze struktury geometrycznej i fizycznej obiektu badań.

2. OPIS OBIEKTU MODELOWANEGO

Rozważane izolatory przepustowe są obiektami o symetrii obrotowej (rys.1a) i przeważnie o budowie wewnętrznej warstwowej (rys.1b). Występują w nich źródła ciepła

wydzielającego się w torze prądowym izolatora w związku z przepływającym prądem oraz źródła rozłożone w izolacji, związane ze stratami dielektrycznymi. Niekiedy uwzględnia się również straty pochodzące od prądów wirowych w metalowym kołnierzu izolatora oraz (lub) nagrzewanie się osłony zewnętrznej izolatora pod wpływem promieniowania słonecznego.

Ciepło wydzielane w izolatorze jest odprowadzane do otoczenia głównie w kierunku promieniowym poprzez opory cieplne kolejnych warstw o zróżnicowanym charakterze funkcjonalnym i materiałowym (rys.1b). Ilustruje to w uproszczeniu łańcuchowy układ połączeń utworzony arbitralnie na rys.1c.

3. MODEL OBWODOWY IZOLATORA

W latach 90. w IEiSU prowadzono badania konstruktorskie związane z opracowaniem prototypowego izolatora przepustowego z izolacją miękką i pojemnościowym sterowaniem pola elektrycznego. Obliczenia cieplne wykonywano wówczas w oparciu o model obwodowy pierwotny, zawierający znaczną ilość elementów i węzłów cieplnych, zależną od liczby ekranów sterujących [1].

Uciążliwość tę można wyeliminować i jednocześnie zwiększyć ścisłość odwzorowania, jeżeli izolacja zostanie zamodelowana za pomocą układu o parametrach rozłożonych (rys.2a). Struktura modelu odpowiada bezpiecznemu założeniu, że nie zachodzi przepływ ciepła w kierunku osiowym. Wartości elementów modelu odnoszą się do jednostki długości części prądowej izolatora.

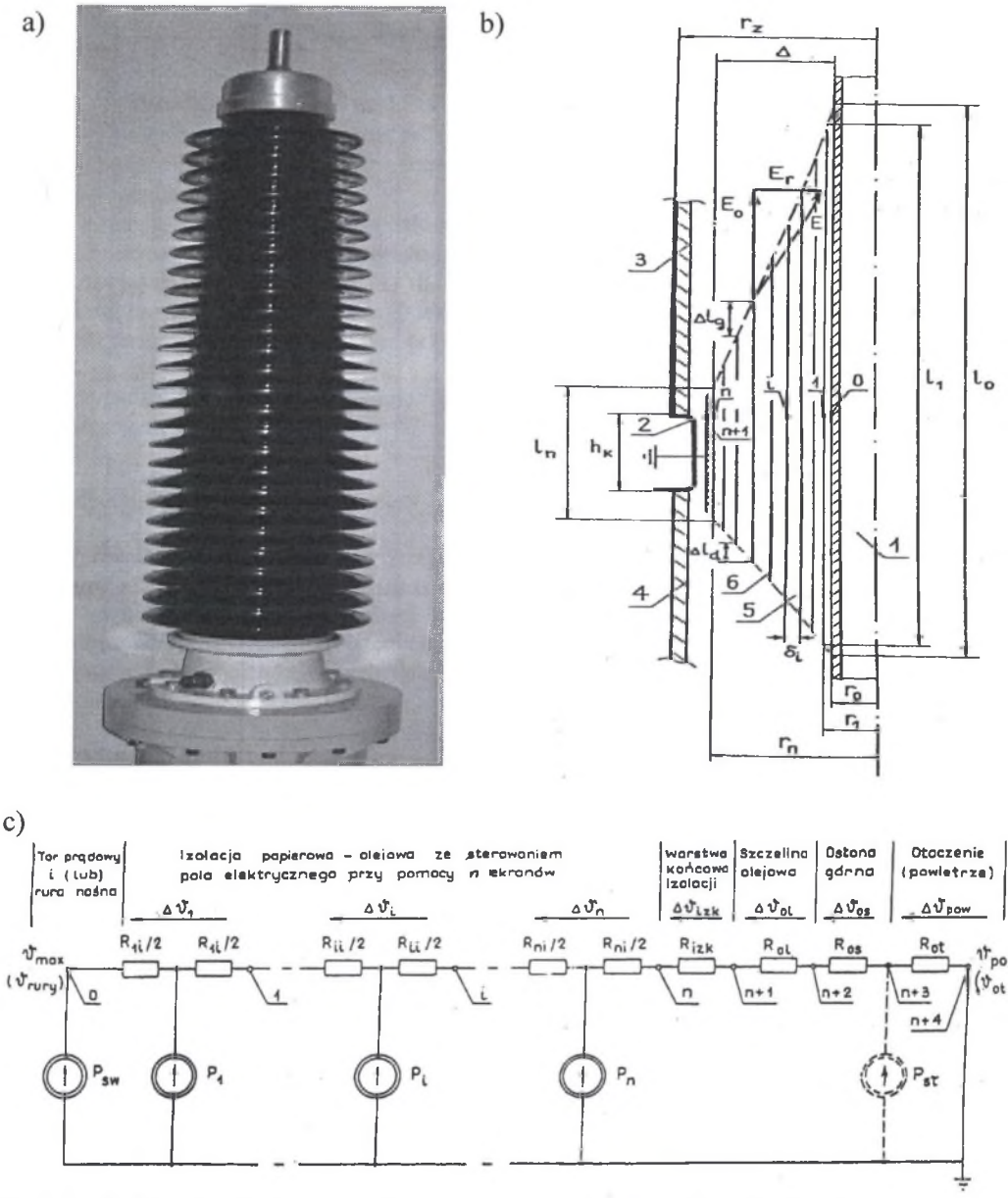
W obrębie fragmentu modelu reprezentującego izolację na rys.2a obowiązują: układ równań:

$$\begin{cases} \dfrac{d\vartheta_r}{dr} = -R_{ri} P_r = -\dfrac{1}{\lambda 2\pi r} P_r \\ \dfrac{dP_r}{dr} = p_{ri} \end{cases} \tag{1}$$

i warunki brzegowe (ϑ_1, P_1 : ϑ_2, P_2) zaznaczone na rys.2a.

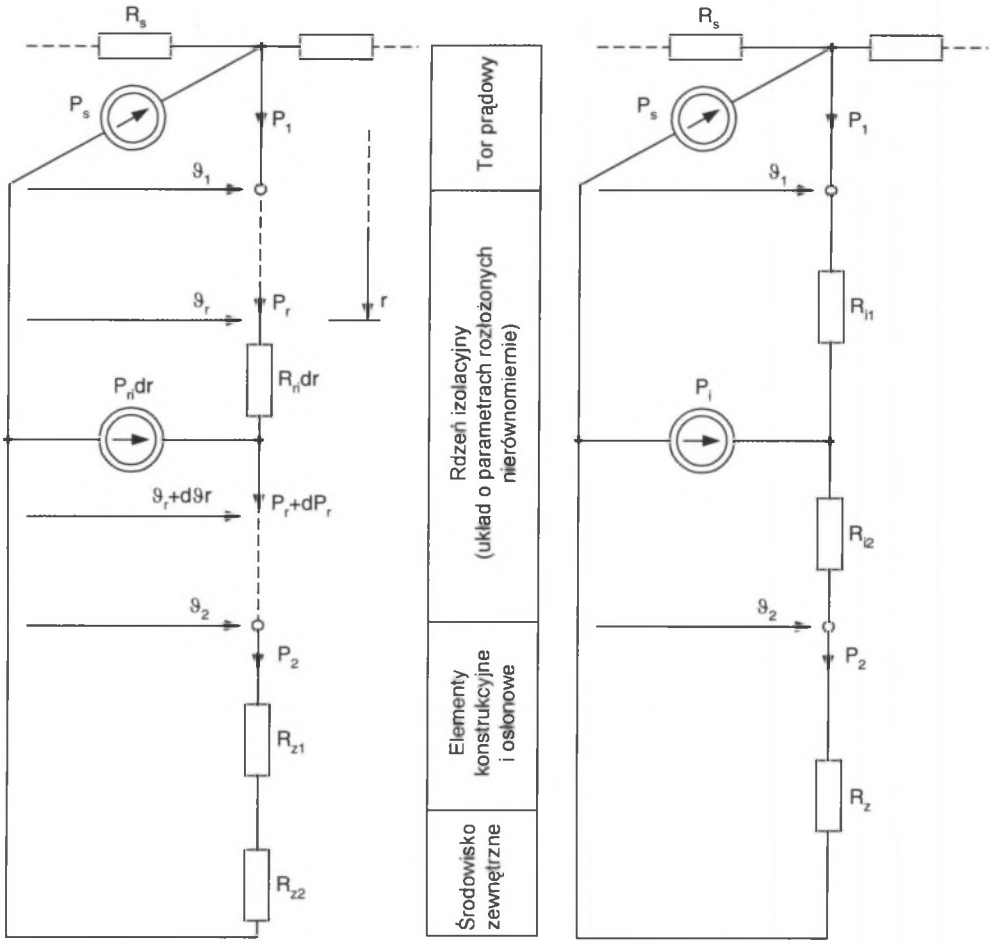
W celu określenia sposobu rozłożenia źródeł prądowych p_{ri} konieczna jest znajomość rozkładu pola elektrycznego w obrębie izolacji głównej układu. Wynika to z zależności stratności dielektryka p_i od wartości natężenia pola elektrycznego E:

$$p_i = \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r E^2 \operatorname{tg}\delta \,. \tag{2}$$



Rys.1. Przykład wysokonapięciowego izolatora przepustowego: a) widok izolatora, b) szkic półprzekroju, c) model obwodowy pierwotny (łańcuchowy) do obliczeń cieplnych;
1 – rura nośna, 2 – kołnierz, 3 – osłona górna, 4 – osłona dolna, 5 – rdzeń izolacyjny, 6 – ekran sterujący, r – promień, l – długość

Fig.1. Example of the high voltage bushing: a) view of the insulator, b) sketch of half section, c) primary (catenary) circuit model for thermal calculations
1 – carrier pipe, 2 – flange, 3 – upper hollow, 4 – lower hollow, 5 – insulating core, 6 – control screen, r – radius, l – length



Rys.2. Model obwodowy cząstkowy wysokonapięciowego izolatora przepustowego: a) układ zawierający parametry rozłożone, b) układ zastępczy o parametrach skupionych; ϑ, p, R – odpowiednio: temperatury oraz jednostkowe źródła i opory cieplne przynależne do wskazanych miejsc (indeksy, współrzędna r) układu izolatora

Fig.2. Partial circuit model of the high voltage bushing: a) system containing distributed parameters , b) equivalent system with lumped parameters. ϑ, p, R – temperatures, unitary sources and thermal resistances respectively affiliated to given points of the insulator (indexes, r-coordinate)

Postać rozwiązania równań (1) zależy więc od funkcji opisującej rozkład pola w izolacji. Zależnie od typu i parametrów izolatora stosuje się konstrukcje, w których rozkład pola ma przebieg naturalny albo jest przybliżany zabiegami konstrukcyjnymi do postaci akceptowanej przez konstruktora (kryteria napięciowe).

Jeżeli dielektryk jest jednorodny i nie zastosowano sterowania pola, to rozkład naprężeń elektrycznych w izolacji jest opisany zależnością:

$$E_r = \frac{U_f}{r \ln \frac{r_2}{r_1}}, \tag{3}$$

natomiast źródła prądowe na rys.2b są rozłożone hiperbolicznie:

$$p_{ri} = p_i \, 2\pi r = \frac{k_0 \, 2\pi}{r}, \tag{4}$$

gdzie:

k_0 – parametr niezależny od napięcia roboczego i współrzędnej r,
ε_0 – przenikalność dielektryczna próżni (8,854 10^{-12} F/m),
ε_r – przenikalność dielektryczna względna materiału izolacji,
tgδ – współczynnik stratności,
U_f – napięcie robocze przyłożone do rozważanej izolacji,
λ – rezystywność cieplna materiału izolacji [W/(K·m)].

Rozwiązanie układu równań (1) dla założeń (3) i (4) prowadzi do związku (między warunkami brzegowymi) analogicznego względem postaci łańcuchowej równań czwórnika [5]. Czwórnik zastępczy izolacji ma w tym przypadku ramiona symetryczne i parametry określone w tab.1.

Przypadkiem praktycznym skrajnie różnym od odpowiadającego założeniu (3) jest układ z wymuszonym rozkładem:

$$E_r \approx \text{const} \tag{5}$$

Odpowiada mu czwórnik zastępczy o budowie niesymetrycznej i gałęziach określonych w tab. 1.

Wprowadzenie czwórnika zastępczego pozwala zastąpić model obwodowy zawierający parametry rozłożone (rys.2a) modelem o elementach skupionych (rys.2b). W razie potrzeby można go następnie zwinąć do postaci jednooczkowej. Model wg rys.2b jest uzasadniony szczególnie przy analizach przybliżonych. Ewentualne uwzględnienie osiowych przepływów ciepła (warunki łagodniejsze) wymagałoby zestawienia odpowiedniego układu połączeń kilku tego typu modeli.

4. PODSUMOWANIE

Przedstawiony model dotyczy bezpośrednio odcinka izolatora o długości jednostkowej i nie przewiduje przepływu ciepła w kierunku osiowym. Przy syntezie modelu uwzględniono: opory cieplne podłużne części czynnej urządzenia, opory cieplne poprzeczne izolacji elektrycznej, elementów konstrukcyjnych i osłonowych izolatora, jego środowiska oraz źródła ciepła związane ze stratami dielektrycznymi w izolacji i stratami Joule'a w części czynnej. Budowa modelu uwzględniającego osiowy przepływ ciepła wymagałaby odpowiedniego połączenia kilku modeli cząstkowych opisanego rodzaju, odnoszących się do kolejnych odcinków Δl długości izolatora.

Tabela 1

Parametry modelu obwodowego skupionego (rys.2b) izolacji głównej wysokonapięciowego izolatora przepustowego

Element modelu	**Cecha układu**	
	bez sterowania pola (rozkład $E_r \sim 1/r$)	**pole sterowane ; rozkład $E_r \approx$ const**
R_{i1}	$\frac{R_i}{2} = \frac{1}{4\pi\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1}$	$R_i - R_{i2}$
R_{i2}		$\frac{1}{4\pi\lambda}\left[1 - \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2\right]$
P_i	$\omega \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}{\ln\frac{r_2}{r_1}} U_i^2 \operatorname{tg}\delta$	$p_i \pi \left(r_2^2 - r_1^2\right)$

LITERATURA

1. Baron B., Gacek Z., Kiś W.: Obliczanie rozkładu pola elektrycznego, wymiarowanie układów izolacyjnych i wyznaczanie temperatur w przewodach szynowych izolowanych sprężonym SF_6. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Elektryka, z. 131, Gliwice 1993, ss. 1-158.
2. Cholewicki T.: Elektryczne linie długie i układy drabinkowe niejednorodne. PWN, Warszawa 1974.
3. Gacek Z., Szadkowski M., Kiś W.: Model izolatora przepustowego transformatorowego z izolacją miękką. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Elektryka, z.137, Gliwice 1994, ss. 17-35.
4. Gacek Z.: Kształtowanie wysokonapięciowych układów izolacyjnych stosowanych w elektroenergetyce. Wydaw. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
5. Kiś W.: Model obwodowy dla obliczeń cieplnych niektórych elementów urządzeń wysokonapięciowych. Problemy konstrukcji i diagnostyki układów izolacyjnych. Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej, s. Elektryka, z. 44, Opole 1996, ss. 47-56.
6. Różański L.: Obwody elektryczne jako modele niektórych zagadnień brzegowych dla fizycznych układów jednowymiarowych. Rozprawy, nr 62, Politechnika Poznańska, Poznań 1974.

Wpłynęło do Redakcji dnia 14 kwietnia 2004 r. Recenzent: Prof. dr hab. inż. Gerhard Bartodziej