ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1994
Seria: ELEKTRYKA z. 137 Nr kol. 1244

Zbigniew GACEK
Wiktor KIŚ
Marek SZADKOWSKI

MODEL IZOLATORA PRZEPUSTOWEGO TRANSFORMATOROWEGO Z IZOLACJĄ MIĘKKĄ

Streszczenie. Artykuł dotyczy modelu przepustu transformatorowego z izolacją papierowo-olejową o napięciu znamionowym 72,5 kV. Przedstawiono algorytmiczne metody obliczeniowe, obejmujące: wymiarowanie izolacji i układu ekranów sterujących oraz sprawdzenie konstrukcji przepustu ze względu na wymagania cieplne. Omówiono wyniki dotychczasowych badań laboratoryjnych modelu. Wykazano celowość dalszych prac konstrukcyjnych nad wysokonapięciowymi przepustami z izolacją miękką.

A MODEL OF THE OIL-IMPREGNATED PAPER TRANSFORMER BUSHING

Summary. The paper deals with a model of the oil-impregnated paper transformer bushing for nominal voltage of 72,5 kV. Algorithmic calculation methods, included dimensioning of insulation and control screens as well as verification of the bushing construction in respect of heat requirements are presented. The hitherto existing laboratory test results for the model are discussed. Advisability of further constructional works upon high voltage oil-impregnated paper transformer bushings is proved.

MODELL EINER TRANSFORMATOR-DURCHFÜHRUNG MIT ÖL- UND PAPIERISOLATION

Zusammenfassung. Der Artikel handelt von dem Modell einer Transformator-Durchführung mit Öl- und Papierisolation mit Nennspannung 72,5 kV. Es wurden algorithmische Berechnungsmethoden vorgestellt und diese umfassen: Dimensionierung der Isolation und der Bildschirmsteuerungssysteme sowie die Prüfung der Konstruktion der Durchführungen hinsichtlich der Wärmeansprüche. Es wurden die bisherigen Ergebnisse der Laborprüfungen des Modells besprochen. Die Zweckmäßigkeit der weiteren Konstruktionsarbeiten für die Hochspannungsdurchführungen mit Weichisolation wurden aufgewiesen.

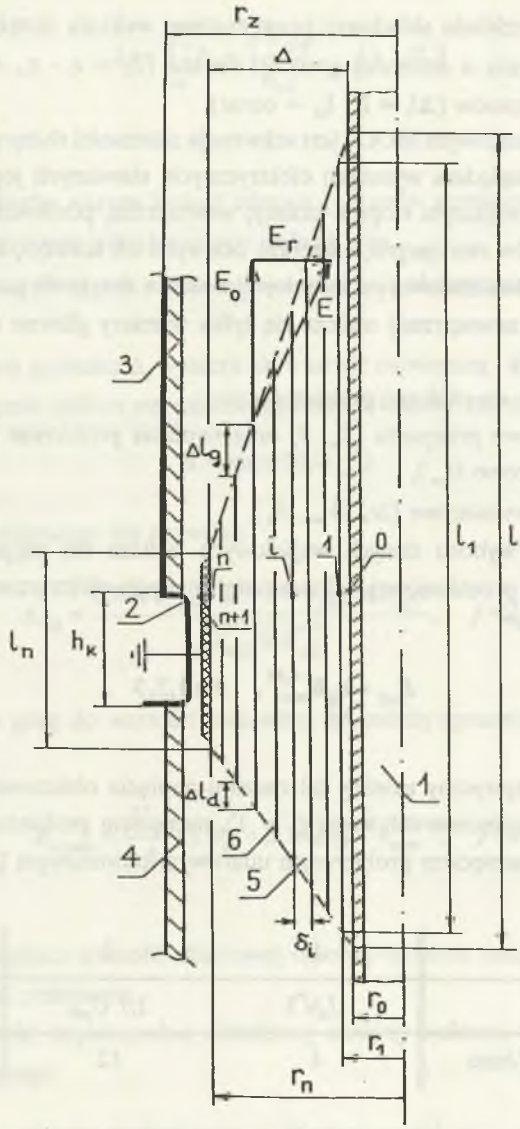
1. WPROWADZENIE

Izolatory przepustowe aparatowe na napięcie znamionowe 72,5 kV i wyższe mają izolację wewnętrzną zwijaną: papierowo-żywiczną (twardą) lub papierowo-olejową (miękką). Rozkład pola elektrycznego w takich przepustach, nazywanych kondensatorowymi, jest sterowany pojemnościowo (za pomocą cienkich ekranów przewodzących). W Polsce wytwarza się obecnie wyłącznie przepusty z izolacją twardą (producent Izo-Erg w Gliwicach), ale trwają prace nad uruchomieniem produkcji wysokonapięciowych przepustów transformatorowych z izolacją miękką. Jedną z istotnych cech takich przepustów jest możliwość spełnienia bardzo ostrych wymagań IEC w zakresie dopuszczalnej intensywności wyładowań niezupełnych (wg [4] i [5]). Opanowanie produkcji przepustów nowej generacji wymaga wykonania wielu prac projektowo-konstrukcyjnych i badań laboratoryjnych. Część z tych prac została już wykonana wspólnie przez Izo-Erg, Politechnikę Śląską i Instytut Elektrotechniki. Najważniejszym zadaniem w początkowym etapie prac było zaprojektowanie, wykonanie i zbadanie modelu przepustu na napięcie znamionowe 72,5 kV. Taki model uznano za dostatecznie zbliżony do prototypu przepustu na napięcie U_n = 123 kV pod względem materiałowym i struktury elementów konstrukcyjnych, a identyczny - pod względem technologicznym. Budowa nieco mniejszego modelu została wymuszona ograniczeniami wynikającymi m.in. z gabarytów kadzi do suszenia próżniowego i impregnacji oraz szerokości posiadanego papieru izolacyjnego.

Artykuł dotyczy wybranych zagadnień związanych z projektowaniem i badaniem modelu przepustu transformatorowego z izolacją miękką. Obliczenia projektowe w zakresie wymiarowania izolacji i sprawdzania własności cieplnych przepustu mogą być wykonywane ze wspomaganiem komputerowym. Do tego celu służą modele obliczeniowe MOD1 (obliczenia elektryczne) i MOD2 (obliczenia cieplne) oraz wynikający stąd program obliczeniowy PPK, przystosowany do realizacji na sprzęcie klasy IBM PC. Algorytmy i programy obliczeniowe są opracowane dla przepustów o napięciach znamionowych U_n = 72,5, 123 i 245 kV oraz prądach znamionowych I_n = 630 ÷ 2000 A.

2. MODEL OBLICZENIOWY MOD1

Model obliczeniowy MOD1 dotyczy wymiarowania izolacji przepustu. Umowną izolację zewnętrzną stanowią dwie hermetyczne osłony: górna (napowietrzna) i dolna (zanurzona w kadzi transformatora). Najważniejszą częścią izolacji wewnętrznej jest rdzeń izolacyjny kondensatorowy (rys. 1). Rozważa się taki wariant sterowania, który daje w efekcie stałą i niewielką składową osiową wektora natężenia pola (E_0) w obszarze ekranów i równy rozkład napięcia na warstwach izolacji rdzenia. Odbywa się to kosztem



Rys. 1. Szkic półprzekroju przepustu transformatorowego kondensatorowego z izolacją miękką:

1 - rura nośna, 2 - kołnierz, 3 - osłona górna, 4 - osłona dolna, 5 - rdzeń izolacyjny, 6 - ekran sterujący, E_r, E_0 - składowa promieniowa i osiowa wektora natężenia pola elektrycznego, h_k - długość osiowa kołnierza, r_0, l_0 - promień i długość obliczeniowa rury nośnej

Fig.1. Outline of half-section of the oil-impregnated paper transformer bushing:

1 - central tube, 2 - flange, 3 - upper hollow, 4 - lower hollow, 5 - insulating core, 6 - control screen, E_r, E_0 - radial and axial components of intensity electric field vector, h_k - axial length of flange, r_0, l_0 - radius and computational length of central tube

nierównomiernego rozkładu składowej promieniowej wektora natężenia pola (E_T) w poprzek izolacji rdzenia o zmiennej grubości warstw ($\delta_i = r_i - r_{i-1}$ = var), ale stałym odstępie krawędzi ekranów ($\Delta l_i = l_i - l_{i-1}$ = const).

Modelem obliczeniowym MOD1 jest sekwencja zależności służących do wymiarowania przepustu pod względem wymagań elektrycznych, stawianych jego izolacji. Zakres obliczeń obejmuje w większym stopniu izolację wewnętrzną, ponieważ dotyczy: grubości rdzenia, liczby ekranów sterujących, odstępów osiowych ich końców, długości i promieni ekranów oraz rozkładu składowej promieniowej wektora netężenia pola elektrycznego w rdzeniu. Dla izolacji zewnętrznej oblicza się tylko wymiary główne osłon (wysokości i średnice wewnętrzne).

Dane wejściowe do obliczeń podzielono na:

a) dane znamionowe przepustu (U_n, I_n oraz napięcia probiercze przemienne U_{pr50} i piorunowe udarowe U_{pru}),

b) wybrane dane wymiarowe ($2r_0$, δ_{max}, h_k).

Po dokonaniu wyboru danych wejściowych oblicza się najpierw wartości dopuszczalne składowej promieniowej wektora natężenia pola elektrycznego (w kV/mm) na krawędziach ekranów[1)]

$$E_{rdj} = k_{dj}\,\delta_{max}^{-0,58}, \quad j = 1,2,3 \tag{1}$$

gdzie:

k_{dj} - parametr empiryczny zależny od rodzaju napięcia obliczeniowego U_{oblj}, skojarzonego z napięciem roboczym (j = 1), napięciem probierczym przemiennym (j = 2) lub napięciem probierczym udarowym piorunowym (j = 3):

j	1	2	3
U_{oblj}	$U_n/\sqrt{3}$	1,1 U_{pr50}	1,1 U_{pru}
k_d, kV/mm	4	12	50

δ_{max} = 0,8 ÷ 1 mm - największa grubość warstwy izolacji rdzenia.

Kolejnym krokiem jest obliczenie trzech wartości całkowitej grubości izolacji czynnej rdzenia

1) Dla napięcia roboczego i probierczego przemiennego wyrażone w wartościach skutecznych, a dla napięcia probierczego udarowego piorunowego - w wartościach szczytowych.

$$\Delta_j = \sum_{i=0}^{n} \delta_i = \frac{\beta U_{oblj}}{E_{rdj}}, \quad j = 1,2,3 \tag{2}$$

gdzie:

n - liczba warstw izolacji rdzenia (ekranów sterujących),

$\delta_i = r_i - r_{i-1}$ - grubość jednej warstwy izolacji, mm,

$\beta \approx 1{,}3$ - współczynnik nierównomierności pola elektrycznego wewnątrz rdzenia.

Spośród obliczonych grubości Δ_j wybiera się wartość największą i zaokrągla ją w górę do wartości Δ. Następnie oblicza się minimalną liczbę ekranów sterujących

$$n = \text{entier}(\Delta/\delta_{max}) \tag{3}$$

i długość odstępu osiowego ich krawędzi

$$\Delta l_{dj} = \frac{0{,}102\,(U_{oblj}/n)^2 - 1 - U_{oblj}/(n E_{rdj})}{\sqrt{U_{oblj}/(n E_{rdj})}}, \quad j = 2\,. \tag{4}$$

Po zaokrągleniu w górę do wartości całkowitej Δl_d należy sprawdzić, czy spełniony jest warunek

$$E_{ojmax} \equiv \frac{U_{oblj}}{n\,\Delta l_d} \le E_{od} = 3{,}16\,\Delta l_d^{-0{,}5}\,\delta_{max}^{-0{,}58}, \quad j = 2 \tag{5}$$

gdzie:

E_{ojmax} - największa wartość składowej osiowej wektora natężenia pola w dolnej części przepustu,

E_{od} - wartość dopuszczalna składowej osiowej wektora natężenia pola elektrycznego.

Gdy warunek (5) nie jest spełniony, trzeba zwiększyć liczbę ekranów sterujących i powtórzyć obliczenia (aż do skutku), począwszy od wzoru (2). Po spełnieniu powyższego warunku oblicza się minimalny odstęp osiowy krawędzi ekranów w górnej części przepustu

$$\Delta l_{gj} = 1{,}8\,\Delta l_{dj}, \quad j = 2, \tag{6}$$

którą zaokrągla się do liczby całkowitej Δl_g.

W dwóch kolejnych krokach oblicza się długości aktywnej części rdzenia:
- w dolnej części przepustu

$$l_d = \sum_{i=1}^{n-1} \Delta l_d = (n-1)\Delta l_d \,, \tag{7a}$$

- w górnej części przepustu

$$l_g = \sum_{i=1}^{n-1} \Delta l_g = (n-1)\Delta l_g \,. \tag{7b}$$

Kilka następnych kroków obliczeniowych dotyczy wymiarowania osłon izolacyjnych przepustu. Minimalne wysokości czynnej części górnej osłony porcelanowej wynikają z następujących warunków wytrzymałościowych, przy obliczeniowych napięciach probierczych:
- przemiennym na sucho

$$h_{gj}^{s} \geq \frac{U_{oblj}}{E_s} \,, \quad j = 2 \,, \tag{8a}$$

- przemiennym pod deszczem

$$h_{gj}^{d} \geq \frac{U_{oblj}}{E_d} \,, \quad j = 2 \,, \tag{8b}$$

- udarowym piorunowym na sucho

$$h_{gj}^{u} \geq \frac{U_{oblj}}{E_u} \,, \quad j = 3 \tag{8c}$$

przy czym średnie natężenia przeskoku (w kV/mm) dla powyższych rodzajów napięć probierczych i warunków próby wynoszą:

E_s	E_d	E_u
0,33	0,22	0,5

Spośród obliczonych wysokości h_{gj} wybiera się wartość największą i zaokrągla ją w górę do wartości h_g. Wartość h_g musi spełniać warunek

$$h_g \geq 1{,}3 l_g \,. \tag{9}$$

Ponieważ wytrzymałość udarowa osłony w oleju jest znacznie większa niż przy napięciu wolnozmiennym, wysokość osłony dolnej wyznacza się z warunku

$$h_d \geq \frac{U_{oblj}}{E_{ol}}, \quad j = 2 \tag{10}$$

gdzie E_{ol} = 0,65 kV/mm - średnie natężenie przebicia w oleju wzdłuż powierzchni osłony przy napięciu przemiennym.
Podobnie jak poprzednio należy sprawdzić warunek

$$h_d \geq 1{,}2 l_d , \tag{11}$$

aby wysokość osłony dolnej nie była zbyt mała.

Można teraz dokończyć obliczenia brakujących elementów układu izolacji wewnętrznej, obejmujących:
- długość ekranu sterującego

$$l_n = h_k + 0{,}15 h_g + 0{,}1 h_d , \tag{12}$$

- długość pozostałych ekranów

$$\begin{aligned} l_{n-1} &= l_n + \Delta l_d + \Delta l_g , \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots \\ l_o &= l_n + n \Delta l_d + n \Delta l_g \end{aligned} \tag{13}$$

gdzie $l_o = l_l + \Delta l_d + \Delta l_g$ - długość obliczeniowa rury nośnej zajętej przez rdzeń (patrz rys. 1),
- promień najkrótszego ekranu sterującego

$$r_n = r_0 + \Delta , \tag{14a}$$

- promienie pozostałych ekranów

$$\begin{aligned} \ln r_1 &= \frac{l_0^2 - l_1^2}{L_0^2 - l_n^2} \ln \frac{r_n}{r_0} + \ln r_0 , \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \ln r_{n-1} &= \frac{l_0^2 - l_{n-1}^2}{l_0^2 - l_n^2} \ln \frac{r_n}{r_0} + \ln r_0 , \end{aligned} \tag{14b}$$

- grubości kolejnych warstw izolacji czynnej rdzenia

$$\delta_1 = r_1 - r_0 ,$$
$$\dots\dots\dots$$
$$\dots\dots\dots$$
$$\delta_n = r_n - r_{n-1} . \tag{15}$$

Spośród obliczonych wartości δ_i (i = 1, 2, ..., n) wybiera się wartość największą δ_{imax} i sprawdza warunek

$$\delta_{imax} \le \delta_{max} . \tag{16}$$

Jeżeli nie jest on spełniony, trzeba zwiększyć liczbę ekranów i powtórzyć cykl obliczeń projektowych, począwszy od wzoru (4).

Ostatnimi obliczanymi parametrami geometrycznymi izolacji są:

- średnica zewnętrzna pasywnej części rdzenia

$$D_r \approx 2(r_o + \delta_{n+1}) \tag{17a}$$

gdzie $\delta_{n+1} \approx 2\delta_n$ - grubość dodatkowej warstwy ochronnej na ostatnim ekranie sterującym,

- średnica wewnętrzna w pobliżu kołnierza

$$D_w \approx D_r + 10 . \tag{17b}$$

Można przystąpić teraz do obliczania rozkładu składowej E_r w rdzeniu. Dla współrzędnych koordynacyjnych ekranów (promieniowej r = var i osiowej l = var) rozkład ten opisuje równanie

$$E_r = f(r) = \frac{U}{2} \cdot \frac{1+b}{r l \ln a} l_n \quad \text{dla} \quad b = \frac{l_0}{l_n} \quad \text{i} \quad a = \frac{r_n}{r_0} \tag{18}$$

gdzie $U = (1 \dots \sqrt{3}) \dfrac{U_n}{\sqrt{3}}$ - obliczeniowe napięcie robocze przepustu.

Przed zakończeniem obliczeń trzeba sprawdzić, czy największa wartość składowej promieniowej $E_{r\,max}$, wyznaczona wg wzoru (18), spełnia warunek

$$E_{rmax} < E_{rd} = 12\delta_{max}^{-0,58} , \quad j = 1(2) . \tag{19}$$

Jeśli nie jest on spełniony, należy przyjąć większą średnicę rury nośnej i powtórzyć część obliczeń, począwszy od wzoru (14).

W celu realizacji obliczeń projektowych opracowano oryginalny komputerowy program obliczeniowy PPK. W wyniku obliczeń uzyskuje się parametry geometryczne przepustu (n, Δl_d, Δl_g, l_d, l_g, l_o, D_r, D_w), współrzędne koordynacyjne ekranów (r_i, l_i) oraz rozkład $E_r = f(r)$. Wszystkie obliczone wymiary elementów konstrukcyjnych przepustu należy traktować jako wartości minimalne. Mogą się one różnić od wymiarów przyjętych przez konstruktora.

3. MODEL OBLICZENIOWY MOD2

W celu wykonania obliczeń cieplnych wygodnie jest posłużyć się modelem obliczeniowym w postaci schematu elektrycznego obwodowego, wykorzystując podobieństwo matematyczne zjawisk cieplnych i elektrycznych. Taki schemat można zbudować bezpośrednio, czyli na podstawie znajomości struktury badanego obiektu i przyjętych założeń (patrz [1] i [2]). Izolatorowi przepustowemu o strukturze pokazanej na rys. 1 odpowiada wtedy model obwodowy z rys. 2. Punkt oznaczony cyfrą 0 odpowiada powierzchni zewnętrznej rury nośnej izolatora, gdzie temperatura jest najwyższa ($\vartheta_{rury} = \vartheta_{max}$). Temperatura ta nie powinna przekroczyć najwyższej wartości dopuszczalnej długotrwale ϑ_{dop}. W normach IEC [4] i [5] wymaga się, aby

$$\vartheta_{rury} \le \vartheta_{dop} = 105^0\mathrm{C} \ . \tag{20}$$

Źródło prądowe P_{sw}, przyłączone w punkcie "0", reprezentuje straty mocy Joule'a (w W/m) wydzielane w torze prądowym przepustu, opisane zależnością

$$P_{sw} = I^2 R_{20} k_d [1 + \alpha_p (\vartheta_{max} - 20)] \ , \tag{21}$$

w której:

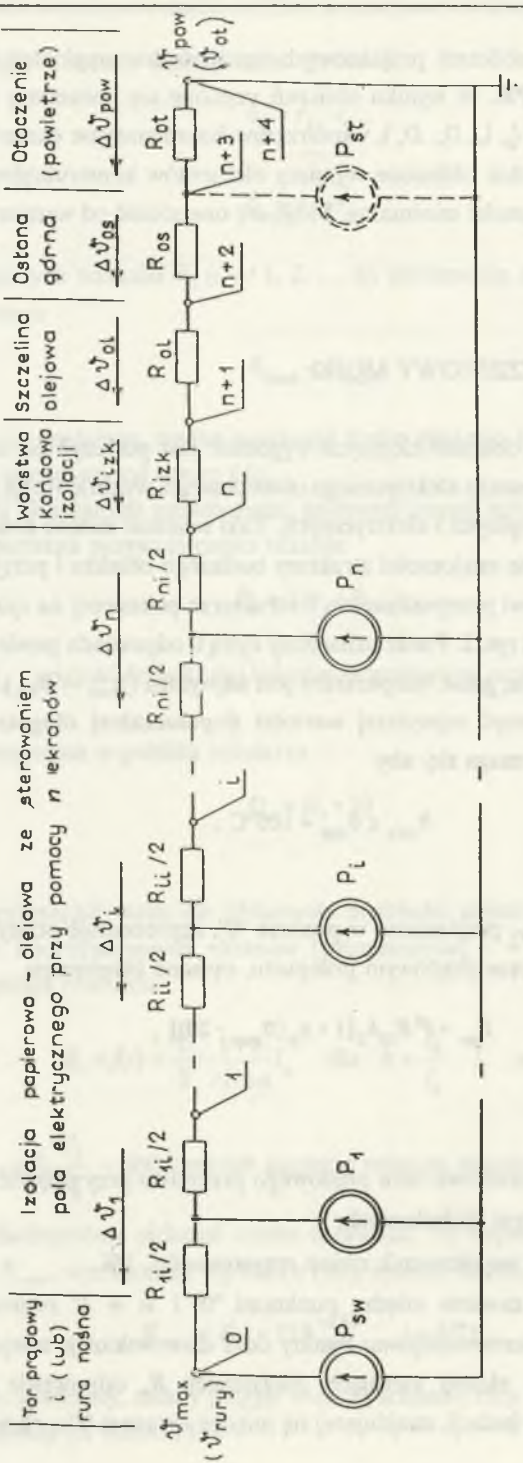
I - prąd, A;

R_{20} - rezystancja jednostkowa toru prądowego przepustu przy prądzie stałym, Ω/m;

k_d - współczynnik strat dodatkowych;

α_p - temperaturowy współczynnik zmian rezystywności, 1/K.

Elementy obwodu zawarte między punktami "0" i "n + 1" reprezentują rdzeń przepustu z izolacją papierowo-olejową. Punkty od 1 do n wskazują miejsca, w których umieszczone są kolejne ekrany sterujące. Rezystancji R_{ii} odpowiada opór cieplny (w K· m/W) i-tej warstwy izolacji, znajdującej się między ekranem "i" a ekranem "i-1". Dla



Rys. 2. Model obwodowy przepustu kondensatorowego z izolacją papierowo-olejową do obliczeń cieplnych

Fig. 2. The circuit scheme of oil-impregnated condenser bushing for heat calculations

warstwy cylindrycznej ograniczonej promieniami r_i i r_{i-1}, wykonanej z materiału o konduktywności cieplnej λ_{ix}, opór ten wynosi

$$R_{ii} = \frac{1}{2\pi\lambda_{ix}} \ln \frac{r_i}{r_{i-1}} . \tag{22}$$

Źródło prądowe P_i odpowiada stratom dielektrycznym występującym w warstwie izolacji "i". Straty te, wyrażone w W/m, można obliczyć ze wzoru

$$P_i = \Delta U_i^2 \omega C_i \operatorname{tg} \delta_i , \tag{23}$$

w którym pojemność (w F/m) wynosi

$$C_i = \frac{55{,}6 \cdot 10^{-12} \varepsilon_r}{\ln \frac{r_i}{r_{i-1}}} , \tag{24}$$

natomiast

$$\operatorname{tg}\delta_i = \operatorname{tg}\delta_{20} e^{\alpha_j(\vartheta_i - 20)} \tag{25}$$

gdzie poszczególne wielkości, odnoszące się do i-tej warstwy izolacji, oznaczają: ΔU_i - spadek napięcia, ε_r - przenikalność elektryczną względną materiału izolacyjnego, ϑ_i - temperaturę warstwy, $\operatorname{tg}\delta_i$ i $\operatorname{tg}\delta_{20}$ - współczynniki strat dielektrycznych materiału izolacji w temperaturze ϑ_i i 20°C, α_j - temperaturowy współczynnik wzrostu strat dielektrycznych.

Opór cieplny R_{ia} warstwy znajdującej się za ostatnim ekranem sterującym oblicza się analogicznie jak opór R_{ii}. Źródła ciepła w tej warstwie jednak nie występują, gdyż znajduje się ona praktycznie poza strefą oddziaływania pola elektrycznego.

W szczelinie olejowej (odwzorowanej w modelu za pomocą oporu cieplnego R_{ol}) przepływ ciepła odbywa się przez konwekcję, a nie przewodzenie. Mimo to do obliczania oporu R_{ol} można również zastosować wzór analogiczny do wzoru (22), pod warunkiem że w miejsce konduktywności cieplnej oleju λ_{ol} wstawi się tzw. konduktywność ekwiwalentną, zależną od iloczynu liczb kryterialnych Grashofa (Gr) i Prandtla (Pr)

$$\lambda_{ekw} = \lambda_{ol} c_1 (\mathrm{Gr} \cdot \mathrm{Pr}) c_2 . \tag{26}$$

Współczynniki liczbowe c_1 i c_2 wyznacza się empirycznie; w literaturze są one traktowane jako wielkości stałe dla określonych przedziałów wartości Gr·Pr.

Z przyjętych założeń konstrukcyjnych wynika, że całe ciepło wydzielone wewnątrz izolatora przepustowego

$$P_{lsum} = P_{sw} l_{sw} + \sum_{i=1}^{n} P_i l_{i-1} \tag{27}$$

powinno być odprowadzone do otoczenia przez napowietrzną osłonę ceramiczną o wysokości h_g. Na jednostkę długości osłony przypada wówczas moc

$$P_{sum} = \frac{P_{lsum}}{h_g} . \tag{28}$$

Opór cieplny osłony ceramicznej można obliczyć ze wzoru analogicznego jak dla R_{ii}. Należy jednak uwzględnić, że średnica zewnętrzna osłony ($2r_z$) nie jest określona jednoznacznie, z uwagi na występowanie kloszy. W obliczeniach przyjęto umownie jej wartość średnią (w m), wynikającą ze średnicy pnia i klosza.

Moc wydzielana na powierzchni osłony wskutek promieniowania słonecznego (P_{sl}) nie jest na ogół uwzględniana w obliczeniach cieplnych przepustów. Wartość tej mocy (w W/m) można oszacować następująco

$$P_{sl} = 600\, \varepsilon_{osl} 2r_z . \tag{29}$$

Współczynnik pochłaniania energii promieniowania słonecznego można traktować w przybliżeniu jako równy współczynnikowi czerni osłony ε_{osl}.

Opór cieplny między powierzchnią osłony a otaczającym ją powietrzem (R_{ot}), określony na jednostkę długości osłony w K·m/W, może być wyrażony w postaci

$$R_{ot} = \frac{1}{\alpha_{osl} F_b} \tag{30}$$

gdzie:

$F_b = 2\pi r_z$ - obwód poprzeczny osłony, m;

α_{osl} - współczynnik przejmowania ciepła z osłony, W/m²·K.

Dla osłony umieszczonej w powietrzu współczynnik osłony α_{osl} jest sumą współczynników oddawania ciepła przez promieniowanie α_r i konwekcję α_k.

Współczynnik α_r oblicza się z zależności uzyskanej na podstawie prawa Stefana-Boltzmanna

$$\alpha_r = \frac{5{,}69 \cdot 10^{-8} \varepsilon_{osl} \left(\Theta_{osl}^4 - \Theta_{ot}^4\right)}{\Theta_{osl} - \Theta_{ot}} , \tag{31}$$

natomiast współczynnik α_k jest funkcją liczby kryterialnej Nusselta (Nu), wysokości osłony (h_g) i konduktywności cieplnej powietrza (λ_{ot}), czyli

$$\alpha_k = \frac{\lambda_{ot} \mathrm{Nu}}{h_g}, \tag{32}$$

przy czym zachodzi związek

$$\mathrm{Nu} = 0{,}15(\mathrm{Gr}\cdot\mathrm{Pr})^{\frac{1}{3}} \quad \text{dla} \quad \mathrm{Gr}\cdot\mathrm{Pr} \geq 10^9 . \tag{33}$$

Ogólna zasada obliczeń cieplnych sprowadza się do poszukiwania takiego rozkładu temperatury, dla którego spełnione są równania bilansu cieplnego w całym obszarze znajdującym się wewnątrz obiektu oraz między obiektem a otoczeniem. Dla rozważanego przepustu odpowiada to rozwiązywaniu modelu obwodowego pokazanego na rys. 2. Większość wielkości fizycznych decydujących o warunkach wymiany ciepła między sąsiednimi fragmentami przepustu oraz między przepustem a otoczeniem ma charakter nieliniowy, zależny od temperatury. W związku z tym obliczenia muszą być wykonywane iteracyjnie.

4. CHARAKTERYSTYKA MODELU FIZYCZNEGO

Model fizyczny przepustu o napięciu znamionowym 72,5 kV wykonano przede wszystkim w celu:

- sprawdzenia możliwości uruchomienia krajowej produkcji typoszeregu wysokonapięciowych izolatorów przepustowych transformatorowych z izolacją miękką,
- weryfikacji modeli obliczeniowych MOD1 i MOD2 oraz podstawowych parametrów technologicznych (szczególnie w zakresie zwijania, impregnacji i zabezpieczenia rdzenia izolacyjnego przepustu przed zawilgoceniem).

Modele obliczeniowe, wynikające stąd algorytmy i programy komputerowe oraz prace projektowo-konstrukcyjne zostały wykonane w Politechnice Śląskiej [1]. Rdzeń modelu fizychnego zwinięto w ZTS Izo-Erg w Gliwicach, gdzie wykonano również elaborację i badanie modelu. Impregnację rdzenia (suszenie, preparację oleju, nasycanie) wykonano w Instytucie Elektrotechniki w Warszawie. Wykonany model jest z założenia konstrukcją uproszczoną, różniącą się w wielu szczegółach od konstrukcji docelowej.

Wykonano cztery egzemplarze modelu różniące się rodzajem zastosowanego papieru (tabl. 1) i stopniem zaawansowania elaboracji przepustu w chwili wykonywania impregnacji. Do impregnacji rdzenia modelu zastosowano typowy olej transformatorowy (tabl. 2). Rurę nośną rdzenia (ø35 mm), kołnierz, osłonę ceramiczną górną oraz system uszczelnień adaptowano z aktualnie produkowanych przepustów z izolacją twardą.

Tablica 1

Wybrane parametry papieru zastosowanego w modelu przepustu

Wyszczególnienie	Papier krajowy*	Papier fiński
grubość (w mm)	0,055	0,12
gęstość pozorna (w g/cm^3)	0,86	0,75
wilgotność (w %) - początkowa - przed impregnacją	 5,8 -	 4,9 0,1
konduktywność elektryczna wyciągu wodnego (w μS/cm)	89	50,5
chłonność oleju transformatorowego	17	22

* producent ZP "Kalety" (z celulozy fińskiej)

Tablica 2

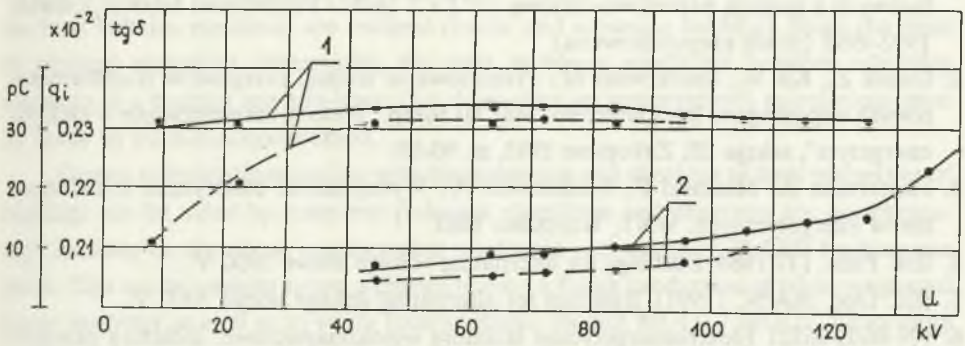
Wybrane parametry oleju transformatorowego zastosowanego do impregnacji rdzenia izolacyjnego przepustu

Typ	Zawartość wilgoci		tgδ			
	początkowa	po filtracji i odgazowaniu	po preparacji		po impregnacji	
			30°C	90°c	30°C	90°C
-	ppm		-			
Technol 2002 (Austria)	10	6	$1\cdot10^{-4}$	$10\cdot10^{-4}$	$5\cdot10^{-4}$	$154\cdot10^{-4}$

Spośród wymagań stawianych przez IEC najtrudniejszymi do spełnienia są wymagania dotyczące intensywności wyładowań niezupełnych i współczynnika strat dielektrycznych. Wyniki pomiarów wykonanych na modelach przepustów w laboratorium KT Izo-Erg (rys. 3) wykazały m.in., że:

- wartość współczynnika strat dielektrycznych jest niska (tgδ ≈ 0,003) w szerokim przedziale napięcia i nie przekracza najwyższej dopuszczalnej wartości 0,007,
- intensywność wyładowań niezupełnych w szerokim przedziale napięć nie przekracza 10 pC, tj. poziomu dopuszczalnego przez normę [4] lub jest od niego nieznacznie większa,

- próby napięciami probierczymi (przemiennym 185 kV i udarowym piorunowym 380 kV obydwu biegunowości) dały wyniki pozytywne.



Rys. 3. Wyniki pomiarów sprawdzających modelu przepustu na napięcie znamionowe 72,5 kV:
1 - współczynnik strat dielektrycznych, 2 - ładunek pozorny (intensywność wyładowań elektrycznych)
- - - - - - - przed próbami napięciowymi, ———— po próbach napięciowych

Fig. 3. Test results for the 72,5 kV bushing model:
1 - dielectric dissipation factor, 2 - apparent charge (partial discharge quantity)
- - - - - - - before voltage tests, ———— after voltage tests

5. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono modele obliczeniowe zjawisk elektrycznych i cieplnych w zakresie wykorzystywanym do projektowania i konstruowania przepustów transformatorowych z izolacją miękką. Modele te umożliwiły opracowanie użytkowych programów komputerowych, a następnie wykonanie odpowiednich obliczeń dla typoszeregu izolatorów.

Na podstawie wyników obliczeń został zbudowany model fizyczny przepustu na napięcie znamionowe 72,5 kV, który poddano badaniom laboratoryjnym. Na podstawie pozytywnych wyników badań została podjęta decyzja o wykonaniu prototypu izolatora na napięcie znamionowe 123 kV przy wykorzystaniu tej samej - aktualnie dostępnej - technologii i aparatury. Obecnie wykonano już kilka egzemplarzy prototypu izolatora i przygotowywane są badania konstruktorskie. Prace są kontynuowane.

LITERATURA

1. Gacek Z., Kiś W., Szadkowski M.: Technologia wytwarzania przepustów kondensatorowych z izolacją papierowo-olejową, cz. 1 i 2. IEiSU Politechniki Śląskiej, Gliwice 1992-1993 (praca niepublikowana).
2. Gacek Z., Kiś W., Szadkowski M.: Projektowanie izolacji przepustów transformatorowych wspomagane komputerowo. Mat. III Symp. "Metody matematyczne w elektroenergetyce", sekcja III, Zakopane 1993, ss. 93-98.
3. Hasterman Z., Mosinski F., Maliszewski A.: Wytrzymałość elektryczna transformatorów energetycznych. WNT, Warszawa 1983.
4. IEC Publ. 137/1984. Bushings for alternating voltage above 1000 V.
5. IEC Doc. 36A/SC (1991). Bushings for alternating voltage above 1000 V.
6. PN-86/E-06321 Elektroenergetyczne izolatory wysokonapięciowe. Izolatory przepustowe (przepusty). Ogólne wymagania i badania.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Pohl

Wpłynęło do Redakcji dnia 24 marca 1994 r.

Abstract

The paper deals with choice problems relevant to designing and testing of a model of the oil-impregnated paper transformer bushing. The scope of calculations includes dimensioning of insulation in respect of electric requirements and verification of heat properties of the bushing. To this end two computational models are used: MOD1 (electric calculations) and MOD2 (heat calculations).

A computational model MOD2 is related to dimensioning of bushing insulation, particularly internal one (insulating core). A variant of electric field control is considered so that a constant and small axial component of electric field intensity vector could be obtained. A computational model MOD1 is the sequence of dependencies used to dimensioning of the bushing with respect to electric requirements. Such a model enables a design of: thickness of a core, number of control screens, axial distances between their ends, lengths and radii of screens as well as distribution of radial component of electric field intensity vector in the core. For external insulation the principal dimensions of insulating sheats are calculated (heigths and internal diameters). Every dimensions should be treated as minimal values.

A computational model MOD2 is the electric circuit scheme (in which mathematical analogies between thermodynamic and electric phenomena are taken into account) as well as the sequence of resultant from that dependencies used to heat calculations. These calculations resolve themselves into looking for such a temperature distribution so that the heat balance equations are realized (inside and around a bushing). Since the most of physical quantities determining the heat exchange conditions between adjoining elements of a bushing are non-linear (i.e. dependent on temperature), calculations must be made by an iterational method.

Design computations dealing with dimensioning and checking of heat properties of bushings can be aided by computer (relevant algorithms and programs are not presented). Bushing on the above consideration results the real model of 72,5 kV bushing was made. This model enables to test a chance to start a Polish production of oil-impregnated paper bushings as well as to verify computational models MOD1 i MOD2. Laboratory tests showed right properties of the bushing model, usefulness of making of a prototype for nominal voltage of 123 kV as well as advisability of further constructional and technological works in the subject.