ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1974

Seria: Elektryka z. 46 Nr kol. 427

Alfred Kałużny

Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów

Jan Chojcan

Instytut Elektroniki

ANALIZA ROZKŁADU NAPIĘCIA NA POWIERZCHNI IZOLATORÓW DŁUGOPNIOWYCH Z KLOSZAMI ŚRUBOWYMI

Streszczenie. W pracy przedstawiono analizę matematyczną rozkładu napięcia na powierzchni izolatorów z kloszami śrubowymi, które pracowały w naturalnych warunkach eksploatacyjnych. Rozważono możliwość zastosowania warstwy sterującej i jej wpływu na rozkład napięcia wzdłuż osi izolatora.

Wstęp

Izolatory napowietrzne wysokiego napięcia, które pracują w rejonach przemysłowych i nadmorskich, pokrywają się warstwą zabrudzeniową. Warstwa zabrudzeniowa w niekorzystnych warunkach atmosferycznych (mgła, mżawka, deszcz) powoduje znaczne obniżenie wytrzymałości powierzchniowej. Obniżenie wytrzymałości powierzchniowej może być tak duże, że przy napięciu roboczym wystąpią wyładowania zupełne w układzie izolacyjnym.

Istotną rolę w mechanizmie rozwoju przeskoku zabrudzeniowego odgrywa rozkład napięcia na powierzchni izolatora wzdłuż jego osi [2, 3].

Rozkład napięcia w warunkach statycznego pola elektrycznego wzdłuż powierzchni izolatorów czystych jest rozkładem pojemnościowym. W warunkach zabrudzeniowych, kiedy rezystancja powierzchni pokrytej warstwą zabrudzeń obniża się do rzędu $10^6 \Omega$, rozkład napięcia jest praktycznie uzależniony od rozkładu rezystancji powierzchniowej, a wpływy pojemnościowe można pominąć.

Nierównomierny rozkład napięcia ułatwia zapłon łuków cząstkowych, które w pierwszej fazie rozwoju wymagają dużego gradientu napięcia, koniecznego do ich podtrzymania. Wyrównanie rozkładu napięcia na powierzchni izolatora zabrudzonego jest celem,do którego zmierzają prace nad izolacją przeciwzabrudzeniową.

Próby wyrównania rozkładu napięcia prowadzone są na drodze technologicznej i konstrukcyjnej. Jedną z nich stanowiło zastosowanie szkliw półprzewodzących. Zastosowanie szkliwa półprzewodzącego ze względu na trud-

ności technologiczne i eksploatacyjne (zmienność własności w czasie) nie wyszło poza etap doświadczeń.

Konstrukcję, która może zapewnić liniowy rozkład napięcia na powierzchni izolatora z warstwą zabrudzeniową, jest izolator z kloszem śrubowym.

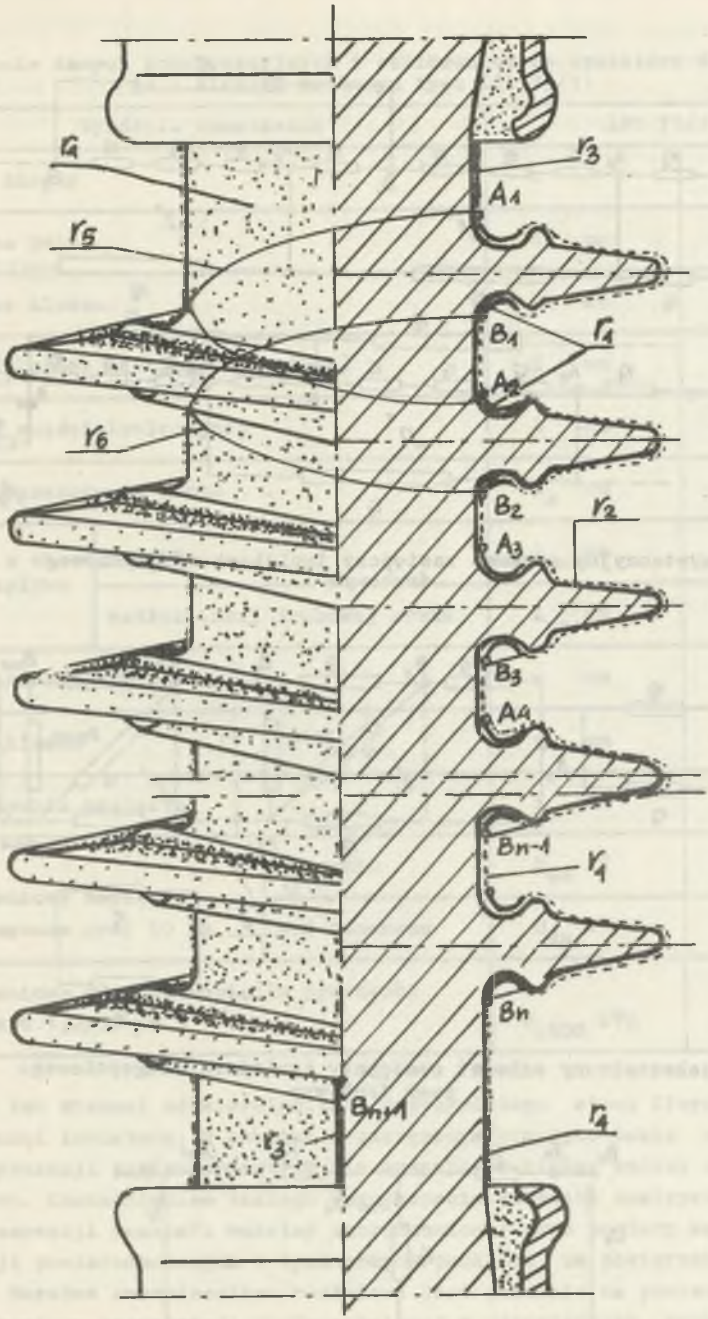
Dla wykazania postawionej tezy przeprowadzono obliczenia rozkładu napięcia na izolatorach, które pracowały w naturalnych warunkach eksploatacyjnych na terenowej stacji zabrudzeniowej ZE - Gliwice.

Analiza matematyczna

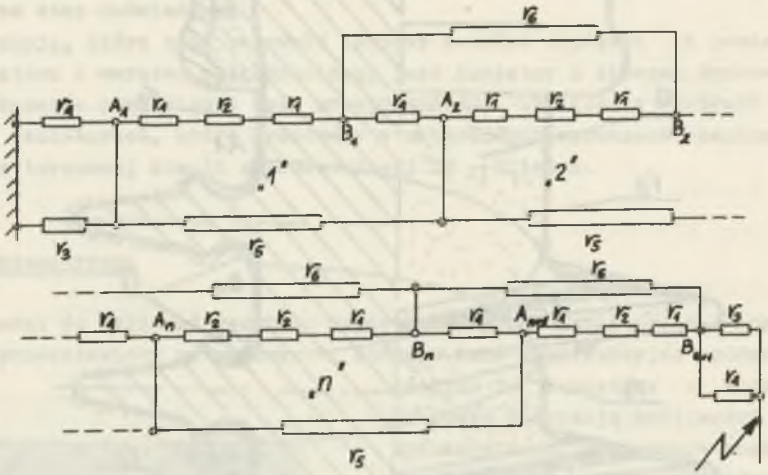
Jako model do obliczeń rozkładu napięcia przyjęto izolator z kloszem śrubowym przedstawiony na rysunku 1, którego dane konstrukcyjne podano w tablicy 1. Izolatory z kloszem śrubowym stwarzają możliwości rezystancyjnego sterowania rozkładem napięcia, co uwzględniono przez naniesienie do rowka na powierzchni górnej i dolnej klosza pasma sterującego, jak pokazano na rysunku 2. Rezystancję pasma sterującego jak i pozostałych części powierzchni klosza i pnia określono na podstawie pomiarów na izolatorach poddanych próbom terenowym.

Rys. 1. Widok izolatora LPS 75/11 z pasem sterującym w rowku górnym na kloszu, zabrudzonego w naturalnych warunkach eksploatacyjnych

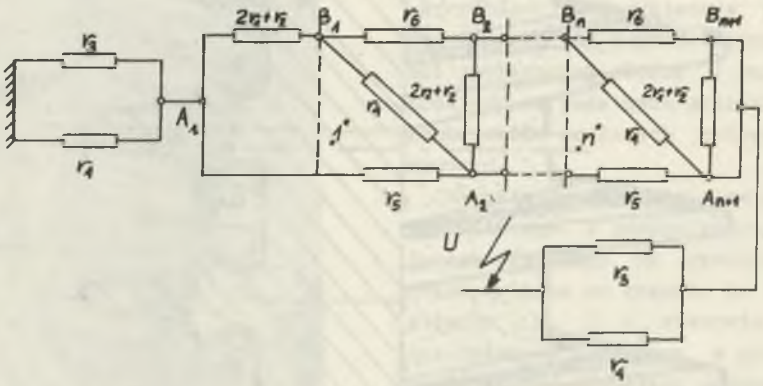
Rezystancyjny model izolatora zabrudzonego z pasmem sterującym (przedstawionego na rysunku 2) przedstawiono na rysunku 3. Rezystancje r_3 i r_4 stanowią części brzegowe izolatora w pobliżu okuć. Między okuciami przyłożono napięcie przemienne 50 Hz o wartości obniżonej ze względów bezpieczeństwa [4]. Część izolatora objętą przez linię klosza śrubowego wzdłuż osiowej drogi upływu opisują rezystancje r_1, r_2 i r_4 (między punktami A_1-A_2,..., A_n), które bocznikowane są przez rezystancję r_5, wzdłuż rowka górnego klosza śrubowego (między punktami A_1-A_2 ... A_n) oraz rezystancję r_6 wzdłuż rowka dolnego klosza śrubowego (między punktami B_1 - B_2 ... B_n).



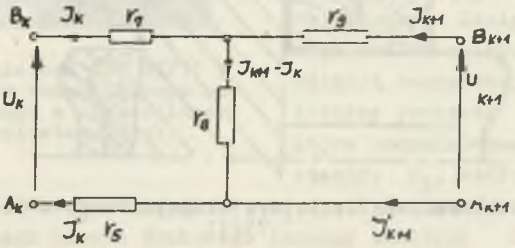
Rys. 2. Model obliczeniowy izolatora długopniowego z kloszem śrubowym LPS



Rys. 3. Rezystancyjny schemat zastępczy izolatora długopniowego z kloszem śrubowym



Rys. 4. Przekształcony schemat zastępczy izolatora długopniowego z kloszem śrubowym



Rys. 5. Schemat zastępczy jednego klosza śrubowego

Tablica 1

Zestawienie danych konstrukcyjnych i obliczeniowych izolatora długopniowego z kloszem śrubowym typu LPS 75/11

Wyróżnik oznaczenia		LPS 75/11	
Liczba kloszy		n	11
Średnica pnia		d mm	75
Średnica klosza		D mm	175
Skok izolatora (długość montażowa)		H mm	775
Długość części izolacyjnej		L mm	550
Droga przeskoku na sucho		a_s cm	57
Droga upływu	osiowa	L_{uo} cm	128
	wzdłuż linii śrubowej rowka	L_{us} cm	285
Podziałka kloszowa		p mm	45
Wysięg klosza		w mm	50
Współczynnik kształtu		f -	3,25
Obliczeniowe napięcie wytrzymywane przy 50 Hz	na sucho	U_{ws} kV	200
	pod deszczem	U_{dw} kV	150
Obliczeniowe udarowe napięcie przeskoku dla udaru 1,2/50 μs		$U_{u50\%}$ kVm	390

Schemat ten stanowi odzwierciedlenie rzeczywistego stanu fizycznego na powierzchni izolatora. W schemacie zastępczym przyjęto takie same wartości rezystancji powierzchniowych dla wszystkich kloszy wzdłuż osiowej drogi upływu. Uzasadnieniem takiego uproszczenia schematu zastępczego są wyniki obserwacji rozkładu warstwy zabrudzeniowej oraz pomiary wartości rezystancji powierzchniowych w tych samych punktach na powierzchni różnych kloszy. Warstwa zabrudzeniowa rozłożona jest podobnie na powierzchni kloszy, a pomiary rezystancji powierzchniowej w odpowiednich punktach kloszy wykazały dużą zbieżność wyników [4]. Schemat ten dla ułatwienia obliczeń poddano kolejnym przekształceniom, które przedstawiono na rys. 4.

Schemat zastępczy modelu izolatora posiadającego n kloszy śrubowych, stanowi szeregowe połączenie n elementów czterozaciskowych.

Pojedynczy k-ty klosz izolatora można zastąpić schematem zastępczym przedstawionym na rysunku 5, jest to element czterozaciskowy. Równania opisujące k-ty element izolatora wg rys. 3 mają postać:

$$U_k = U_{k+1}\left[\frac{r_5+r_7+r_8}{r_8}\right] + J_{k+1}\left[-r_7-r_9-\frac{r_5r_9+r_7r_9}{r_8}\right] + J'_{k+1}r_5 \ldots \tag{1}$$

$$J_k = U_{k+1}\left[-\frac{1}{r_8}\right] + J_{k+1}\left[\frac{r_8+r_9}{r_8}\right] + J'_{k+1}\cdot 0 \tag{2}$$

$$J'_k = U_{k+1}\left[\frac{1}{r_8}\right] + J_{k+1}\left[-\frac{r_9}{r_8}\right] + J'_{k+1}\cdot 1 \tag{3}$$

$$U'_k = J'_k r_5 \tag{4}$$

lub w postaci macierzowej

$$\begin{bmatrix} U_k \\ J_k \\ J'_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ a_4 & a_5 & a_6 \\ a_7 & a_8 & a_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{k+1} \\ U_{k+1} \\ J'_{k+1} \end{bmatrix} = \Delta_K \begin{bmatrix} U_{k+1} \\ J_{k+1} \\ J'_{k+1} \end{bmatrix} \tag{5}$$

gdzie

$$a_1 = \frac{r_5 + r_7 + r_8}{r_8}$$

$$a_2 = -r_7 - r_9 - \frac{r_5 \cdot r_9 + r_7 \cdot r_9}{r_8}$$

$$a_3 = r_5$$

$$a_4 = -\frac{1}{r_8}$$

$$a_5 = \frac{r_8 + r_9}{r_8}$$

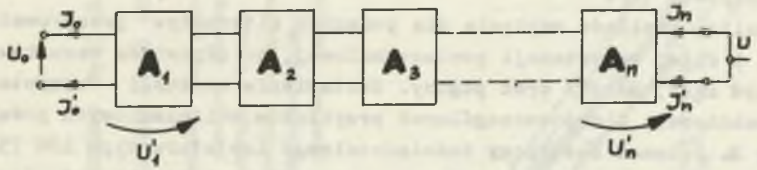
$$a_6 = 0$$

$$a_7 = \frac{1}{r_8}$$

$$a_8 = -\frac{r_9}{r_8}$$

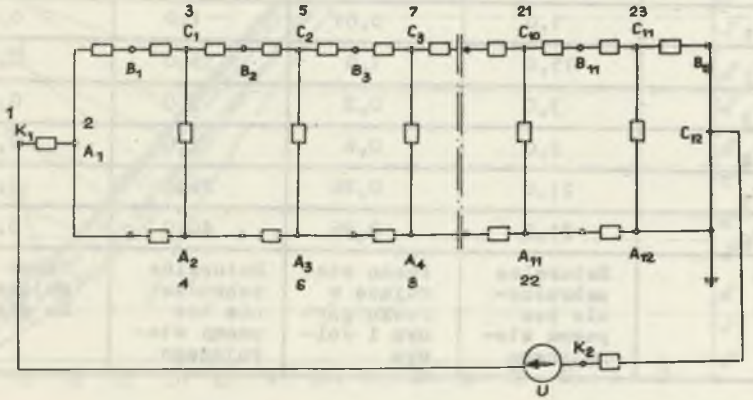
$$a_9 = 1$$

Na podstawie równania (5), które opisuje element czterozaciskowy (jeden klosz izolatora), można narysować schemat blokowy izolatora z kloszem śrubowym, który przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Schemat zastępczy uproszczony o elementy brzegowe izolatora z kloszem śrubowym

Wyznaczenie rozkładu napięcia na powierzchni izolatora, wzdłuż osiowej drogi upływu oraz gradientu napięcia pomiędzy punktami charakterystycznymi klosza i pnia, uzyskano przez obliczenie wartości potencjałów węzłowych i rozpływu prądów gałęziowych w obwodzie przedstawionym na rysunku 7, otrzymanego z rozrysowania schematu zastępczego, przedstawionego na rysunku 4.



Rys. 7. Schemat zastępczy izolatora długopniowego z kloszem śrubowym typu LPS 75/11, do obliczeń rozkładu napięcia na powierzchni wzdłuż jego osi w warunkach zabrudzeniowych

Obliczenia te przeprowadzono na maszynie matematycznej ODRA 1204, wg programu podanego w [1].

Przykłady obliczeniowe

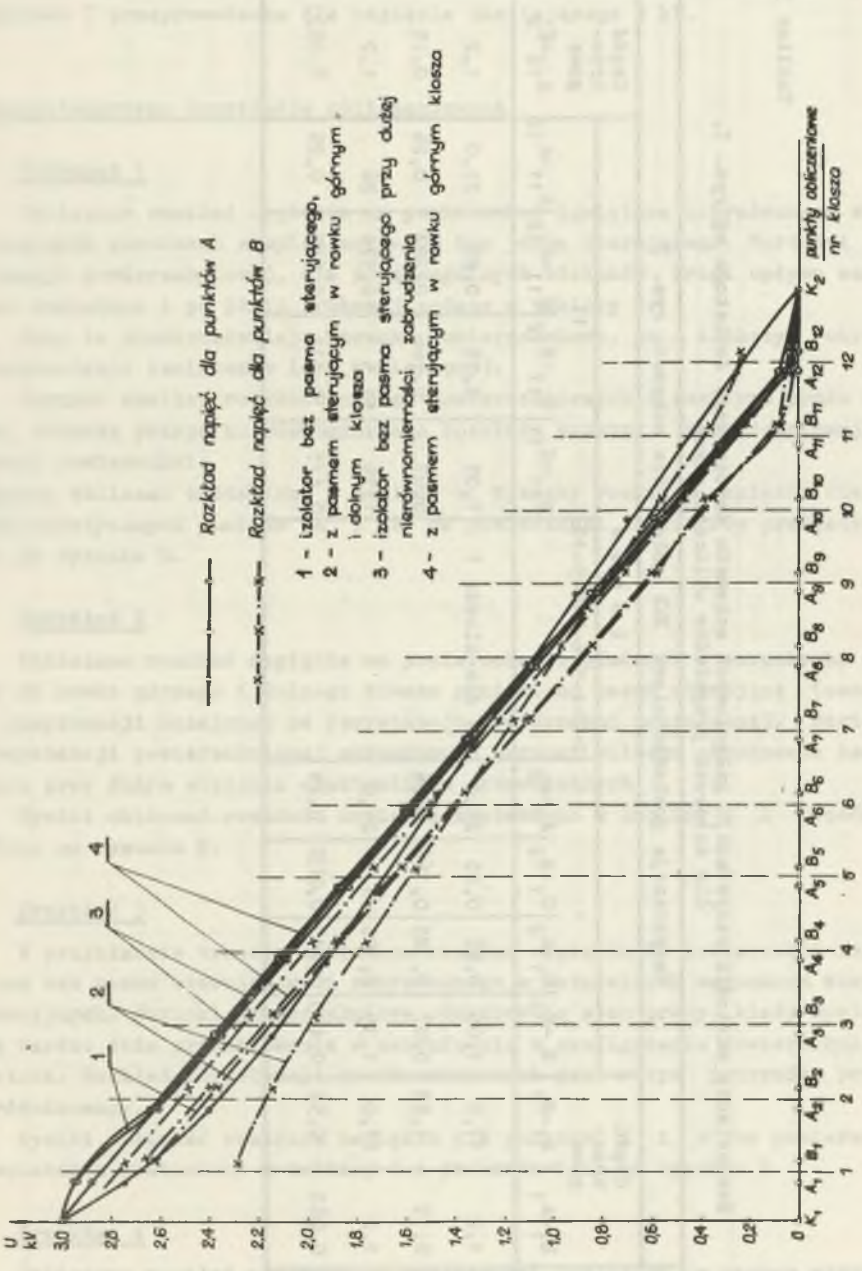
Obliczenia rozkładu napięcia na powierzchni izolatorów przeprowadzono dla alternatywy ze sterowaniem i bez sterowania rezystancyjnego. Zmiany własności warstwy zabrudzeniowej wraz ze zmianą warunków atmosferycznych uwzględniono w modelu obliczeniowym przez zmianę rezystancji powierzchniowych. Wartości rezystancji powierzchniowych zostały określone pomiarowo w naturalnych warunkach eksploatacyjnych, metodą techniczną przy pomocy sondy punktowej [6].

Analizę rozkładu napięcia dla podanych alternatyw przeprowadzono dla małej i dużej rezystancji powierzchniowej, co odpowiada warunkom atmosferycznym mgły, mżawki oraz pogody. Zestawienie wartości rezystancji powierzchniowej, dla poszczególnych przykładów obliczeniowych podano w tablicy 2. Schemat zastępczy doświadczalnego izolatora typu LPS 75/11 przedstawiono na rysunku 7. Wartości rezystancji powierzchniowej izolatora wg rysunku 2 dla poszczególnych przypadków pracy zestawiono w tablicy 2, natomiast wartości rezystancji gałęziowych schematu zastępczego izolatora wg rysunku 7 podano w tablicy 3.

Tablica 2

Wartości rezystancji powierzchniowych izolatora z kloszem śrubowym typu LPS 75/11, dla czterech przykładów obliczeniowych, dla układu wg rys. 2

Rezystancja w MΩ	Przykład			
	1	2	3	4
r_1	1,0	0,01	1,0	0,01
r_2	15,0	1,5	15,0	0,5
r_3	3,0	0,2	3,0	0,1
r_4	2,0	0,6	2,0	0,5
r_5	21,0	0,26	26,0	0,26
r_6	21,0	0,26	40,0	5,0
Uwagi	Naturalne zabrudzenie bez pasma sterującego	Pasmo sterujące w rowku górnym i dolnym	Naturalne zabrudzenie bez pasma sterującego	Pasmo sterujące w rowku górnym



Rys. 8. Obliczeniowy rozkład napięcia na powierzchni izolatorów z kloszem śrubowym LPS 75/11, zabrudzonych w naturalnych warunkach eksploatacyjnych

Tablica 3

Zestawienie wartości rezystancji gałęziowych schematu zastępczego izolatora wg rys. 7, dla czterech przykładów obliczeniowych

Przykład	Rezystancja powierzchniowa MΩ gałęzi dla schematu rys. 7											
	Część brzegowa		Klosze									Część brzegowa
			1				2-3-4-5-6-7-8-9-10	11				
	K_1-A_1	A_1-B_1	B_1-C_1	C_1-A_2	C_1-B_2	A_1-A_2		$B_{11}-C_{11}$	$C_{11}-B_{12}$	$C_{11}-A_{12}$	$A_{11}-A_{12}$	$A_{12}-K_2$
1	1,2	17,0	1,05	0,85	0,95	21,0	jak dla klosza 1	1,05	8,95	0,85	21,0	1,2
2	0,15	1,52	0,07	0,385	0,166	0,26		0,07	0,166	0,383	0,26	0,15
3	1,2	17,0	1,35	0,576	11,5	26,0		1,35	11,5	0,576	26	1,2
4	0,083	0,52	0,415	0,043	0,0432	0,26		0,415	0,432	0,043	0,26	0,083

Obliczenia rozkładu napięcia i rozpływy prądu w schemacie zastępczym wg rysunku 7 przeprowadzono dla napięcia zasilającego 3 kV.

Charakterystyka przykładów obliczeniowych

Przykład 1

Obliczono rozkład napięcia na powierzchni izolatora zabrudzonego w naturalnych warunkach eksploatacyjnych bez pasma sterującego. Wartości rezystancji powierzchniowej, dla poszczególnych odcinków drogi upływu wzdłuż osi izolatora i po linii śrubowej podano w tablicy 2.

Dane te odzwierciedlają warunki powierzchniowe, po dłuższym okresie eksploatacji izolatorów (ok. 6 miesięcy).

Warunki analizy rozkładu napięć powierzchniowych i rozpływu prądu upływu, dotyczą przypadku równomiernego rozkładu warstwy zabrudzeniowej na całej powierzchni.

Wyniki obliczeń zestawiono w tablicy 4. Wykresy rozkładu napięcia dla charakterystycznych punktów A i B na powierzchni izolatorów przedstawiono na rysunku 8.

Przykład 2

Obliczono rozkład napięcia na powierzchni izolatorów w warunkach, kiedy do rowka górnego i dolnego klosza naniesiono pasmo sterujące (cement) o rezystancji mniejszej od rezystancji powierzchni zabrudzonej. Wartości rezystancji powierzchniowej odwzorowują warunki silnego zbrudzenia izolatora przy dużym stężeniu elektrolitów przewodzących.

Wyniki obliczeń rozkładu napięcia zestawiono w tablicy 4 i przedstawiono na rysunku 8.

Przykład 3

W przykładzie trzecim obliczono rozkład napięcia na powierzchni izolatora bez pasma sterującego i zabrudzonego w naturalnych warunkach eksploatacyjnych. Warunki powierzchniowe odwzorowują stan pracy, kiedy występują bardzo duże zróżnicowania w zabrudzeniu i zawilgoceniu powierzchni izolatora. Rozkład rezystancji powierzchniowych jest w tym przypadku bardzo zróżnicowany.

Wyniki obliczeń rozkładu napięcia dla punktów A i B na powierzchni izolatorów zestawiono w tablicy 4 i przedstawiono na rysunku 8.

Przykład 4

Obliczono rozkład napięcia na powierzchni izolatora z pasmem sterującym naniesionym do rowka górnego klosza. Wartości rezystancji powierzch-

Tablica 4

Zestawienie wyników obliczeń rozkładu napięcia na powierzchni izolatora dla czterech przykładów obliczeniowych. Napięcie zasilania wynosiło 3 [kV]

Węzły obliczeniowe	Potencjały w węzłach [kV] dla przykładu				Punkty obliczeniowe	Potencjały w punktach [kV] dla przykładu			
	1	2	3	4		1	2	3	4
K_1	2,9551	2,7528	2,9638	2,8945	-	-	-	-	-
A_1	2,9102	2,5058	2,9276	2,7891	B_1	2,5662	2,0377	2,6262	2,645
A_3	2,2933	1,9047	2,3432	2,2776	B_3	2,0672	1,7242	2,1102	2,148
A_2	2,5495	2,1574	2,6037	2,5307	B_2	2,3197	1,9044	2,3703	2,401
A_4	2,0399	1,6843	2,0837	2,0249	B_4	1,8139	1,5284	1,8508	1,896
A_5	1,7865	1,4749	1,8241	1,7722	B_5	1,5605	1,3274	1,5196	1,643
A_6	1,5332	1,2692	1,5646	1,5194	B_6	1,3072	1,1245	1,3321	1,391
A_7	1,2798	1,0646	1,3050	1,2666	B_7	1,0538	0,9230	1,0735	1,138
A_8	1,0264	0,8602	1,0455	1,0138	B_8	0,8004	0,7184	0,8130	0,895
A_9	0,7731	0,6551	0,7859	0,7610	B_9	0,5471	0,5174	0,5534	0,632
A_{10}	0,5197	0,4478	0,5264	0,5082	B_{10}	0,2942	0,3209	0,3942	0,379
A_{11}	0,2660	0,2338	0,2667	0,2553	B_{11}	0,0452	0,1388	0,0375	0,131
A_{12}	0,000	0,000	0,000	0,000	B_{12}	0,000	0,000	0,000	0,000
K_2	0,0449	0,2455	0,0362	0,1055	-	-	-	-	-

niowych i ich rozkład odwzorowują stan pracy izolatora z nierównomierną warstwą zabrudzeniową o dużej zawartości elektrolitów.

Wyniki obliczeń rozkładu napięcia zestawiono w tablicy 4 i przedstawiono na rysunku 8.

Wnioski

Na dokładność wyników obliczeń istotny wpływ ma dokładność pomiaru rezystancji gałęziowych występujących w rezystancyjnym schemacie zastępczym izolatora przedstawionych na rysunku 2.

Wyniki obliczeń rozkładu napięcia na powierzchni izolatorów z kloszem śrubowym, pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

1. Izolatory z kloszem śrubowym posiadają liniowy rozkład napięcia na powierzchni wzdłuż jego osi, niezależnie od stopnia zabrudzenia i rozkładu warstwy zabrudzeniowej na kloszu.

2. W przypadku izolatorów z kloszem śrubowym nie jest celowe, ani potrzebne stosowanie dodatkowych warstw sterujących upływnościowo osiowym rozkładem napięcia.

3. Celowe może być stosowanie pasma sterującego tylko w części brzegowej izolatora, kołpak – pierwszy klosz.

LITERATURA

[1] Chojcan J.: Program analizy liniowych obwodów prądu stałego nie zawierających sterowanych źródeł. Zesz. Nauk. Pol. Śl. 385, 1972 r.

[2] Hampton B.F.: Flashover mechanism of polluted insulation. Proc. JEE, 1964, s. 985.

[3] Juchniewicz J.: Przeskok zabrudzeniowy. PWN Warszawa 1966 r.

[4] Kałużny A.: Zastosowanie kloszy śrubowych do izolatorów wysokiego napięcia pracujących w warunkach zwiększonej upływności powierzchniowej. Praca doktorska Pol. Śl. Gliwice, 1973 r.

[5] Lewszunow R.T. i inni: Opytnaja ekspluatacja z glazurju powysziennoj prowodimosti. Elektriczeskije Stancjii, nr 8, 1968.

[6] Pohl Z., Sojda E.: O niektórych zasadniczych zagadnieniach metodyki prób zabrudzeniowych. Prace I.P.EiEl. Pol. Wrocławskiej, nr 4, 1971 r.

Przyjęto do druku w maju 1974 r.

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ СТЕРЖНЕВЫХ ИЗОЛЯТОРОВ С ВИНТООБРАЗНЫМИ ЮБКАМИ

Р е з ю м е

В статье представлен математический анализ распределения напряжения на поверхности стержневых изоляторов, эксплуатируемых в естественных условиях.

Проанализирована возможность применения управляемого слоя и его влияние на распределение напряжения вдоль оси изолятора.

DISTRIBUTION ANALYSIS OF VOLTAGE ON THE SURFACE OF LONG ROD INSULATORS WITH SCREW PETTICOATS

S u m m a r y

Mathematical analysis of the distribution of voltage on surface of long rod insulators with screw petticoats which operated in natural exploitation conditions are presented.

The possibility of application of a control layer and its influence on the voltage distribution along the insulator axis is discussed.