

JAN BARZYŃSKI
Akademia Górniczo Hutnicza

EUGENIUSZ MATULA
Instytut Metalurgii Żelaza

ZAGADNIENIA OCHRONY PRZED RAŻENIAMI ELEKTRYCZNYMI
W SIECIACH TRÓJFAZOWYCH
Z IZOLOWANYM PUNKTEM ZEROWYM TRANSFORMATORA

Streszczenie. Przeprowadzono szczegółową analizę i praktyczne obliczenia wypadkowej impedancji, prądów doziemnych i napięć w sieciach trójfazowych 500 V z izolowanym punktem zerowym przy różnych długościach sieci i różnych opornościach izolacji żył względem ziemi. Stwierdzono, że decydujący wpływ na wielkość prądów doziemnych wywiera wypadkowa pojemność żył, natomiast wypadkowa rezystancja ma znaczenie dopiero przy wartościach poniżej 25 k Ω .

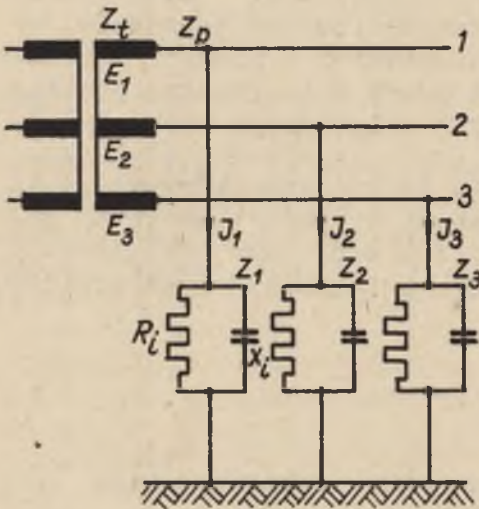
Wstęp

Sieci trójfazowe, trójprzewodowe z izolowanym punktem zerowym na napięcie skojarzone 3x500 V i 3 x 6 kV są najbardziej rozpowszechnione w przemyśle ciężkim i w górnictwie jako sieci rozdzielcze i zasilające duże odbiorniki, głównie napędy elektryczne. Sieci te wykonywane są z reguły kablami ziemnymi w izolacji papierowej oraz w górnictwie kablami oponowymi, górniczymi w izolacji gumowej na napięcia 0,75 do 6 kV.

W normalnych warunkach pracy punkt zerowy transformatora zasilającego jest izolowany względem ziemi, czyli impedancja punktu zerowego posiada bardzo dużą wartość.

Poszczególne żyły sieci kablowej łączą się z ziemią poprzez:

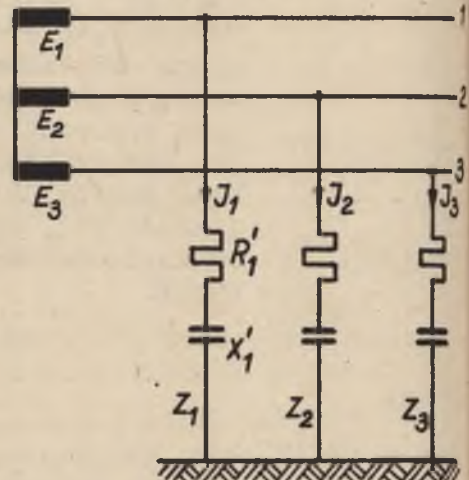
a) równomiernie rozłożone, na jednostkę długości wzdłuż całej trasy i równolegle połączone impedancje izolacji. Wypadkowa impedancja " Z_i " żył względem ziemi całej trasy składa się z wypadkowej rezystancji " R_i " i połączonej z nią równolegle wypadkowej reaktancji pojemnościowej $X_i = \frac{1}{C_i \cdot \omega}$, czyli $Z_i = R_i - jX_i$ (patrz rys. 1a). Obie wielkości, tj. rezystancja R_i i reaktancja X_i w niewielkim



Impedancja izolacji sieci względem ziemi

Rys. 1a. Układ rzeczywisty

Rys. 1b. Układ zastępczy



stopniu zależą od przekroju żył kabli, natomiast znacznie zmieniają się wraz z rozległością sieci przy czym wypadkowa rezystancja izolacji żył maleje a wypadkowa pojemność żył, względem ziemi, wzrasta ze wzrostem długości sieci.

b) wypadkową rezystancję izolacji względem ziemi, uzwojeń wszystkich maszyn, urządzeń odbiorczych i rozdzielczych.

Maszyny i urządzenia elektryczne są prawie z reguły na prąd trójfazowy i pracują zwykle z równomiernie obciążonymi fazami. W normalnych warunkach pracy można założyć, że tak wypadkowe impedancje izolacji sieci, jak i rezystancje izolacji maszyn i urządzeń są w poszczególnych fazach jednakowe. Zmiany wartości zachodzą wraz ze zmianą układu pracy, tj. ilości i wielkości załączonych odbiorników oraz z ich obciążeniem. Od wielkości maszyn i ich obciążenia (temperatury uzwojeń) zależy rezystancja izolacji uzwojeń.

c) celowo włączone pomiędzy poszczególne fazy a ziemią rezystancje " R_s " i reaktancje " X_s " (np. uzwojenia transformatorów napięciowych), które tworzą sztuczny punkt zerowy i są wykorzystywane w urządzeniach do sygnalizacji pojedynczych zwarc z ziemią. Wypadkowa impedancja tych urządzeń wynosi $Z_s = R_s + jX_s$.

Wymienione w punktach a, b i c oporności składają się na wypadkową impedancję poszczególnych faz względem ziemi.

Rezystancja izolacji żył kabli jest na ogół wysoka, a jej miejscowe osłabienie zwykle prowadzi w krótkim czasie do uszkodzeń, które muszą być szybko usunięte.

Decydujący wpływ na wypadkową oporność izolacji sieci względem ziemi posiadają te maszyny lub odbiorniki, nawet pojedyncze, których rezystancja izolacji jest znacznie niższa od pozostałych włączonych do sieci. Odbiornikiem takim może być np. stara maszyna elektryczna, której izolacja bardziej hygroskopijna uległa zawilgoceniu. Również rdza z pakietu blach znacznie osłabia izolację uzwojeń. Dużej mocy maszyny szczególnie niskoobrotowe z racji swych wymiarów i powierzchni styku izolacji z rdzeniem posiadają nawet w stanie nowym stosunkowo niską impedancją izolacji.

Wypadkowa impedancja wpływa na wielkość prądów doziemnych i napięć względem ziemi, które różne są w stanach normalnych oraz w przypadkach awaryjnych, tj. przy bezpośrednich i pośrednich zwarcjach z ziemią. Celem rozpatrzenia zagadnień związanych z bezpieczeństwem pracy przeprowadzono obliczenia prądów doziemnych i napięć dotykowych, które pojawiają się na kadłubach maszyn i osłonach urządzeń elektrycznych względem ziemi w różnych warunkach eksploatacyjnych. Ogólne obliczenia zawiera rozdział 2, zaś szczegółowe dla sieci 500 V rozdział 3.

2. Obliczenia ogólne

W sieci bez uziemionego punktu zerowego przedstawionej schematycznie na rys. 1a impedancje doziemne poszczególnych faz określamy przez indeksy "1", "2" i "3". W najogólniejszym przypadku zakładamy asymetryczność sił elektromotorycznych i impedancji. Impedancję przewodów " Z_p " i transformatora " Z_t " jako bardzo małe, rzędu dziesiątych oma, wobec impedancji izolacji względem ziemi zupełnie pomijamy. Na tej podstawie ustalić można równania:

$$\hat{E}_1 - \hat{J}_1 \cdot \hat{Z}_1 = \hat{E}_2 - \hat{J}_2 \cdot \hat{Z}_2$$

$$\hat{E}_1 - \hat{J}_1 \cdot \hat{Z}_1 = \hat{E}_3 - \hat{J}_3 \cdot \hat{Z}_3$$

$$\hat{J}_1 + \hat{J}_2 + \hat{J}_3 = 0$$

Stąd otrzymujemy wartości prądów płynących przez poszczególne impedancje doziemne i napięcia na nich:

$$\hat{J}_1 = \frac{\hat{E}_1 \cdot (\hat{Z}_2 + \hat{Z}_3) - \hat{E}_2 \cdot \hat{Z}_3 - \hat{E}_3 \cdot \hat{Z}_2}{\hat{Z}_1 \cdot \hat{Z}_2 + \hat{Z}_2 \cdot \hat{Z}_3 + \hat{Z}_3 \cdot \hat{Z}_1}$$

$$\hat{J}_2 = \frac{\hat{E}_2 \cdot (\hat{Z}_3 + \hat{Z}_1) - \hat{E}_3 \cdot \hat{Z}_1 - \hat{E}_1 \cdot \hat{Z}_3}{\hat{Z}_1 \cdot \hat{Z}_2 + \hat{Z}_2 \cdot \hat{Z}_3 + \hat{Z}_3 \cdot \hat{Z}_1}$$

$$\hat{J}_3 = \frac{\hat{E}_3 \cdot (\hat{Z}_1 + \hat{Z}_2) - \hat{E}_1 \cdot \hat{Z}_2 - \hat{E}_2 \cdot \hat{Z}_1}{\hat{Z}_1 \cdot \hat{Z}_2 + \hat{Z}_2 \cdot \hat{Z}_3 + \hat{Z}_3 \cdot \hat{Z}_1}$$

$$\hat{U}_1 = \hat{J}_1 \cdot \hat{Z}_1$$

$$\hat{U}_2 = \hat{J}_2 \cdot \hat{Z}_2$$

$$\hat{U}_3 = \hat{J}_3 \cdot \hat{Z}_3$$

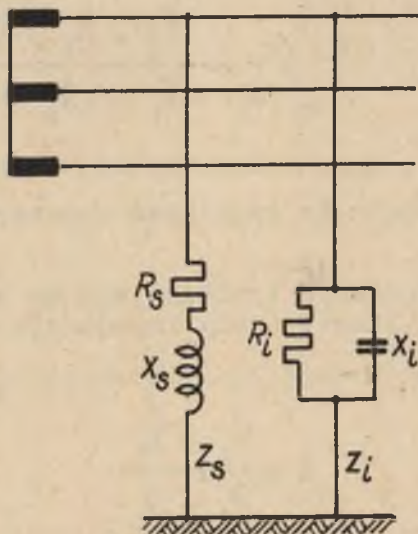
Przyjmując teraz symetrię sił elektromotorycznych E oraz impedancji oprócz jednej uszkodzonej $Z_3 = Z_u$, określić można prąd i napięcie w fazie uszkodzonej:

$$\hat{J}_u = \frac{3 \cdot \hat{E} \cdot \hat{Z}}{\hat{Z}^2 + 2 \cdot \hat{Z} \cdot \hat{Z}_u} = \frac{3 \cdot \hat{E}}{\hat{Z} + 2 \hat{Z}_u}$$

$$\hat{U}_u = \hat{J}_u \cdot \hat{Z}_u = \frac{3 \cdot \hat{E} \cdot \hat{Z}_u}{\hat{Z} + 2 \cdot \hat{Z}_u}$$

gdzie:

- " \hat{Z} " - jest impedancją doziemną fazy nieuszkodzonej,
- " \hat{Z}_u " - jest impedancją doziemną fazy uszkodzonej,
- " \hat{J}_u ", " \hat{U}_u " - prąd i napięcie w fazie uszkodzonej.



Rys. 2. Impedancja sieci i urządzeń

Uwzględniając impedancję izolacji sieci i odbiorników oraz impedancję względem ziemi celowo włączonych urządzeń otrzymamy zgodnie ze schematem na rys. 2.

$$\hat{Z}_i = \frac{\hat{R}_i \cdot \hat{X}_i}{\hat{R}_i + \hat{X}_i} = \frac{R_i \frac{1}{j \cdot C_i \cdot \omega}}{R_i + \frac{1}{j \cdot C_i \cdot \omega}} = \frac{R_i \cdot (1 - j \cdot R_i \cdot C_i \cdot \omega)}{1 + R_i^2 \cdot C_i^2 \cdot \omega^2}$$

$$\hat{Z}_s = R_s + j \cdot L_s \cdot \omega = \hat{R}_s + \hat{X}_s \quad \text{oraz}$$

impedancję wypadkową

$$\begin{aligned} \hat{Z} &= \frac{\hat{Z}_i \cdot \hat{Z}_s}{\hat{Z}_i + \hat{Z}_s} = \frac{\frac{\hat{R}_i \cdot \hat{X}_i}{\hat{R}_i + \hat{X}_i} (\hat{R}_s + \hat{X}_s)}{\frac{\hat{R}_i \cdot \hat{X}_i}{\hat{R}_i + \hat{X}_i} + \hat{R}_s + \hat{X}_s} = \\ &= \frac{\hat{R}_i \cdot \hat{X}_i \cdot (\hat{R}_s + \hat{X}_s)}{\hat{R}_i \cdot \hat{X}_i + (\hat{R}_s + \hat{X}_s) \cdot (\hat{R}_i + \hat{X}_i)} \end{aligned}$$

Przy ogólnym podejściu do zagadnień rozważymy trzy przypadki:

A. Gdy poza impedancją izolacji nie ma żadnych innych oporności względem ziemi, wtedy impedancja wypadkowa sprowadza się do postaci:

$$\hat{Z} = \frac{\hat{R}_i \cdot \hat{X}_i}{\hat{R}_i + \hat{X}_i}$$

B. Gdy włączone są pomiędzy poszczególnymi fazami a ziemią rezystancje "R_S" (np. woltomierze na napięciu poniżej 1 kV), wówczas

$$\hat{Z} = \frac{\hat{R}_S \cdot \hat{R}_i \cdot \hat{X}_i}{\hat{R}_i \cdot \hat{R}_S + \hat{X}_i \cdot (\hat{R}_i + \hat{R}_S)}$$

C. Gdy pomiędzy poszczególnymi fazami a ziemią włączone są reaktancje "X_S" (np. przekładniki napięciowe) wtedy:

$$\hat{Z} = \frac{\hat{R}_i \cdot \hat{X}_i \cdot \hat{X}_S}{\hat{X}_i \cdot \hat{X}_S + \hat{R}_i \cdot (\hat{X}_i + \hat{X}_S)}$$

W każdym z tych przypadków należy rozróżnić trzy możliwości:

a) gdy reaktancja izolacji jest znacznie większa od rezystancji

$$X_i \gg R_i$$

b) gdy reaktancja jest mniej więcej równa rezystancji:

$$X_i = R_i$$

c) gdy rezystancja jest znacznie większa od reaktancji

$$R_i \gg X_i$$

Impedancja wypadkowa doziemienia w poszczególnych przypadkach przy założeniach a:c przyjmuje następujące wartości:

A. a.

$$\hat{Z} = R_i$$

A. b.

$$\hat{Z} = \frac{1}{2} R_i \cdot (1 - j)$$

A. c.

$$\hat{Z} = \hat{X}_i$$

B. a.

$$\hat{Z} = \frac{R_s \cdot R_i}{R_s + R_i}$$

B. b.

$$\hat{Z} = \frac{R_s \cdot R_i}{R_i + R_s + j \cdot R_s}$$

B. c.

$$\hat{Z} = \frac{\hat{R}_s \cdot \hat{X}_i}{\hat{R}_s + \hat{X}_i}$$

C. a.

$$\hat{Z} = \frac{\hat{R}_i \cdot \hat{X}_s}{\hat{R}_i + \hat{X}_s} \quad \text{gdy również} \quad \hat{X}_i \gg \hat{X}_s$$

C. b.

$$\hat{Z} = \frac{R_i \cdot X_s}{X_s + j \cdot (X_i + X_s)}$$

C. c.

$$\hat{Z} = \frac{\hat{X}_i \cdot \hat{X}_s}{\hat{X}_i + \hat{X}_s} \quad \text{gdy również} \quad R_i \gg X_s$$

Ciekawy przypadek zachodzi przy rezonansie prądowym, kiedy

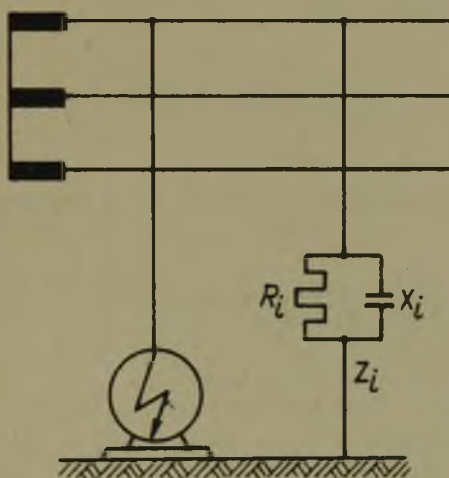
$$X_i = X_s = X$$

wtedy impedancja wypadkowa wyniesie

$$\hat{Z} = \frac{R_i \cdot X^2 - j \cdot R_i \cdot R_s \cdot X}{R_s \cdot R_i + X^2 - j \cdot R_s \cdot X}$$

a jeśli " R_s " jest bardzo małe w porównaniu do " R_i " i " X ", powyższy wzór przechodzi w prostą zależność:

$$Z = R_i$$



Rys. 3. Zwarzenie z kadłubem silnika

W fazie, w której nastąpiło przebicie izolacji i zwarcie metaliczne fazy z uziemionym korpusem, jak to podaje rys. 3 zostają wyłączone z układu impedancje tak izolacji, jak i celowo włączonych urządzeń. Pozostaje jedynie impedancja samego uziomu i ewentualnie drogi prądowej w ziemi.

3. Sieci 500 V na napięcie do 1 kV

W sieciach na napięcia do 1 kV przepisy wymagają by napięcie korpusu urządzenia chronionego względem ziemi nie przekraczało wartości 65 V.

Napięcie dotykowe może wystąpić przez:

- 1) dotknięcie jednej fazy w sieci nieuszkodzonej,
- 2) dotknięcie jednej fazy przy drugiej fazie uszkodzonej,
- 3) dotknięcie korpusu przy jednej fazie uszkodzonej,
- 4) dotknięcie korpusu przy dwu fazach uszkodzonych w dwu różnych odległych miejscach.

Rozpatrzono sieć o średnim przekroju 50 mm^2 , dla której rezystancję określono przez

$$R_i = 50000 \text{ k}[\Omega]$$

a reaktancję na podstawie tablicy 1 ze wzoru:

$$\hat{X}_i = \frac{j}{C_i \cdot \omega \cdot l} = -j \frac{8700}{l}$$

Zmienny współczynnik "k" pozwoli na analizę sieci przy różnych wartościach rezystancji. Reaktancja X_i zależy od długości sieci "l" w km. Impedancja izolacji wynosi zatem:

$$\hat{Z}_i = \frac{\hat{R}_i \cdot \hat{X}_i}{\hat{R}_i + \hat{X}_i} = \frac{3,78 \cdot k - j \cdot 21,75 \cdot k^2 \cdot l}{25 \cdot k^2 \cdot l^2 + 0,76} 10^4$$

Tablica 1

Pojemności i przewodności pojemnościowe dla kabla 1 kV
z izolacją rdzeniową i żyłami okrągłymi

Przekrój mm ²	C _r μF/km	C _i μF/km	Y _i μS/km	Y _{imx} dla 1,5 km μS	X _{imx} dla 1,5 km Ω
1,5	0,217	0,1085	34,2	51,3	19 500
2,5	0,256	0,128	40,2	60,3	16 580
4	0,301	0,1505	47,3	71,0	14 090
6	0,348	0,174	54,7	82,1	12 180
10	0,419	0,2095	65,8	98,6	10 130
16	0,551	0,2755	86,5	129,9	7 720
25	0,557	0,2785	87,6	131,4	7 620
35	0,633	0,3165	99,6	149,4	6 700
50	0,734	0,367	118,4	177,9	5 630
70	0,835	0,4175	131,0	196,5	5 100
95	0,937	0,4685	147,1	220,3	4 540
120	0,991	0,4955	156,0	234,0	4 280
150	1,025	0,5125	161,2	241,8	4 145
185	1,072	0,536	168,3	252,5	3 960
240	1,091	0,5455	171,8	257,7	3 890
300	1,166	0,583	183,1	274,6	3 640

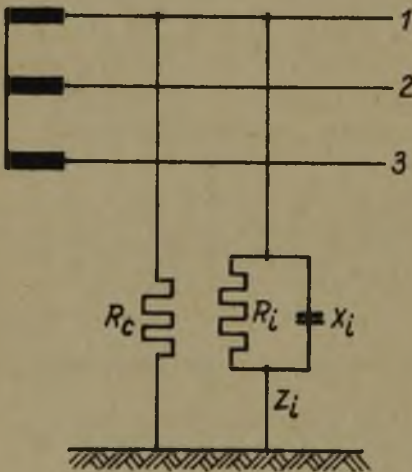
Przy symetryczności SEM i impedancji przewodów względem ziemi prąd i napięcie uszkodzonej fazy obliczymy ze wzoru:

$$J_u = \frac{3 \cdot E}{Z_i + 2 \cdot Z_u}$$

$$U_u = J_u \cdot Z_u$$

1. Dotknięcie fazy w sieci nieuszkodzonej

Według rys. 4 w nieuszkodzonej sieci o jednakowych impedancjach w każdej fazie, włącza się w jednej fazie wskutek dotknięcia oporność ciała ludzkiego, którą przyjmujemy ze względu na nieznaną wartość napięcia dotykowego na



$$R_c = 1000 \Omega$$

Impedancja fazy dotkniętej wyniesie

$$\hat{Z}_u = \frac{\hat{Z}_i \cdot \hat{R}_c}{\hat{Z}_i + \hat{R}_c}$$

Rys. 4. Dotknięcie fazy 1 sieci nieuszkodzonej

Całkowity prąd w fazie dotkniętej określa wzór:

$$J_u = \frac{3 \cdot E}{Z_i + 2 \frac{Z_i \cdot R_c}{Z_i + R_c}} = 3 \cdot E \frac{Z_i + R_c}{Z_i \cdot (Z_i + 3 \cdot R_c)}$$

a napięcie fazy dotkniętej:

$$U_u = J_u \cdot Z_u = 3 \cdot E \frac{R_c}{Z_i + 3 \cdot R_c} = U_c$$

Napięcie fazy dotkniętej " U_c " jest w najbardziej niekorzystnym przypadku napięciem, pod którym znalazł się człowiek. Prąd zatem, jaki wówczas popłynie przez ciało, wynosi:

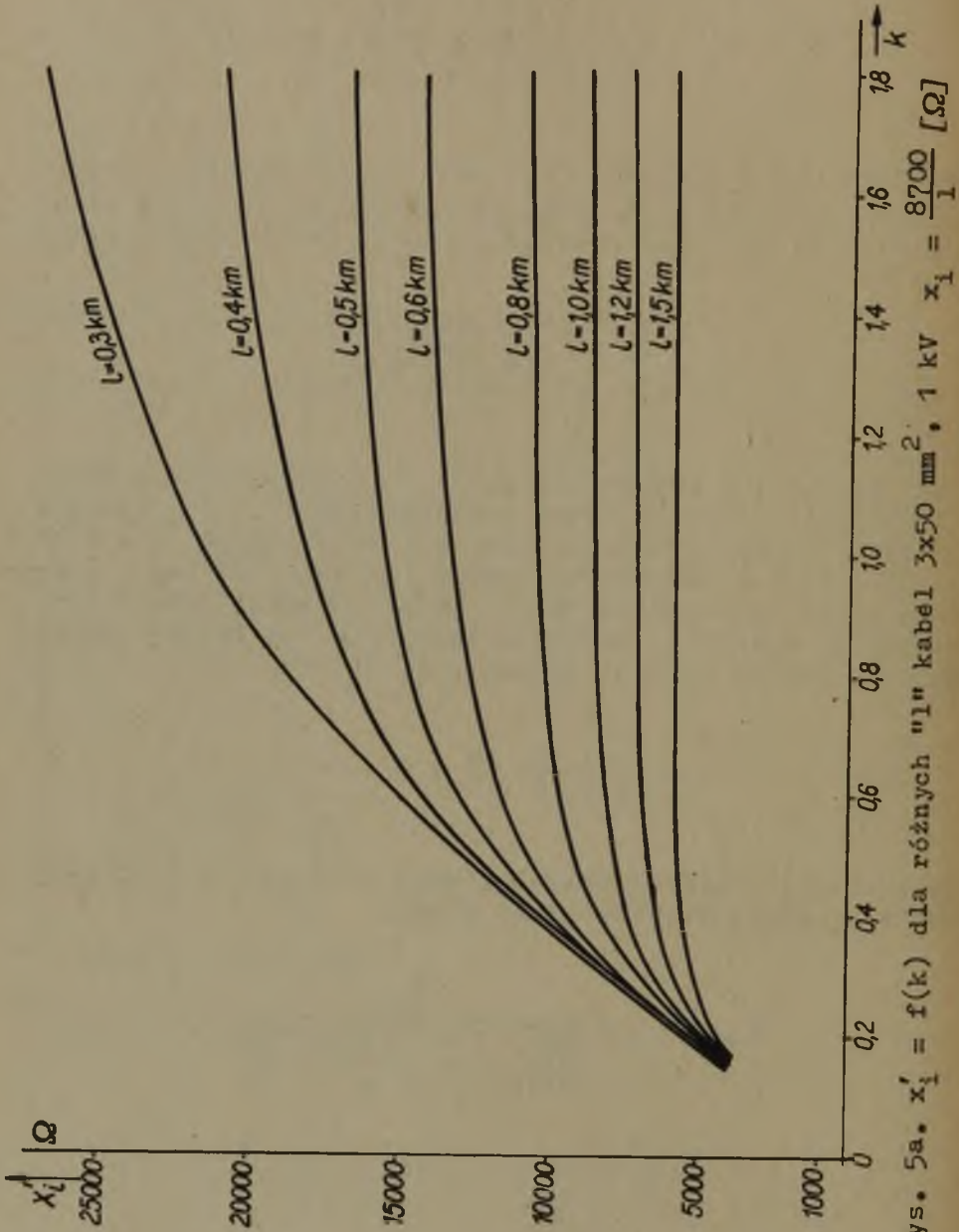
$$J_c = \frac{U_c}{R_c} = \frac{3 \cdot E}{Z_i + 3 \cdot R_c}$$

Na rys. 5a i b podano zastępcze składowe czynne i bierne impedancji izolacji sieci nieuszkodzonej w funkcji wielkości " k ", czyli zmieniającej się rezystancji dla różnych " l ", tj. zmiennych reaktancji izolacji. Na tej podstawie można dla każdego " k " i każdej długości sieci " l ", podanych na wykresie, określić zastępczą impedancję szeregową fazy według relacji (patrz rys. 1b):

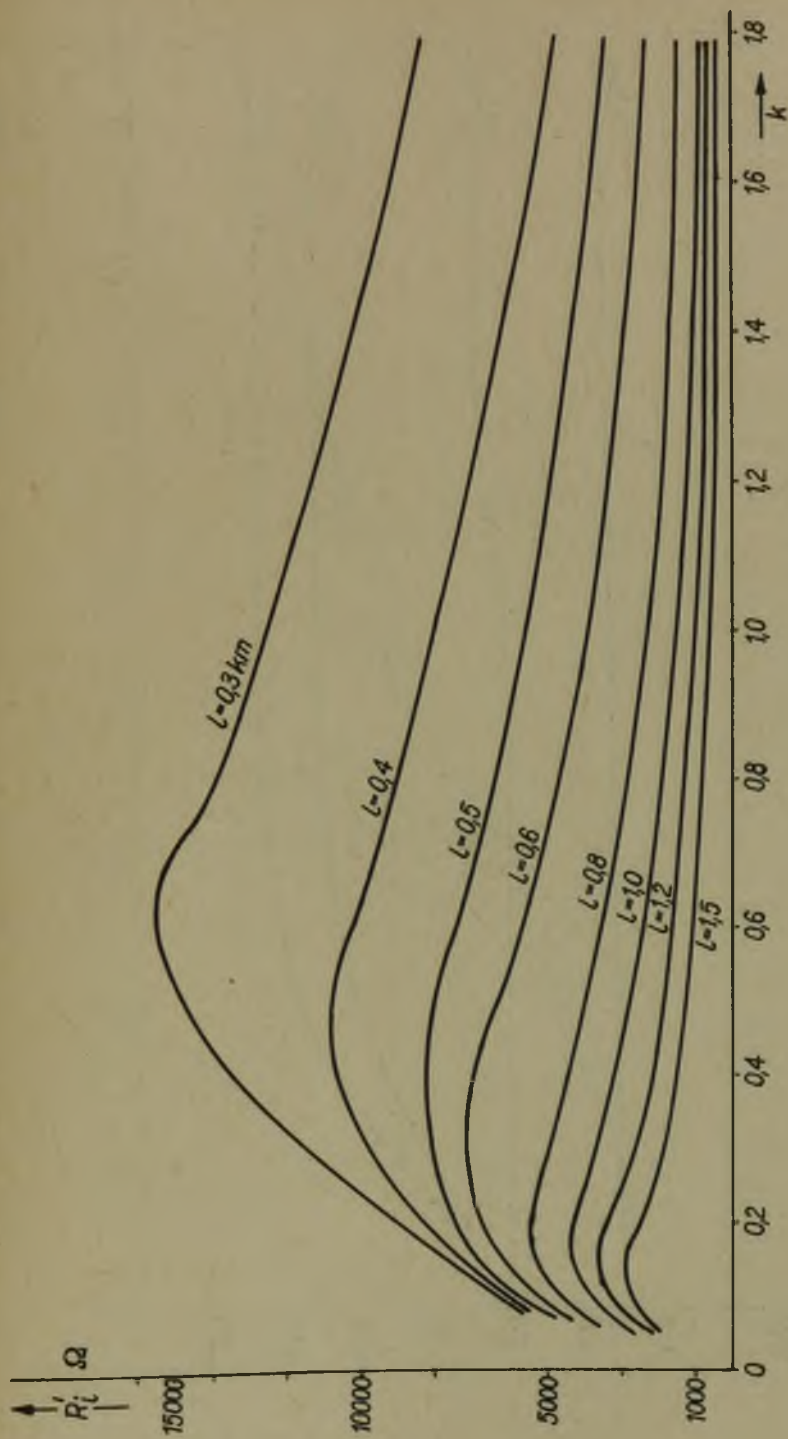
$$Z_i = R'_i - j \cdot X'_i$$

Wykorzystując powyższy wykres możemy obliczyć bezwzględną wartość napięcia dotykowego ze wzoru:

$$U_c = 3 \cdot E \frac{R_c}{\sqrt{(R'_i + 3 \cdot R_c)^2 + X'^2_i}}$$

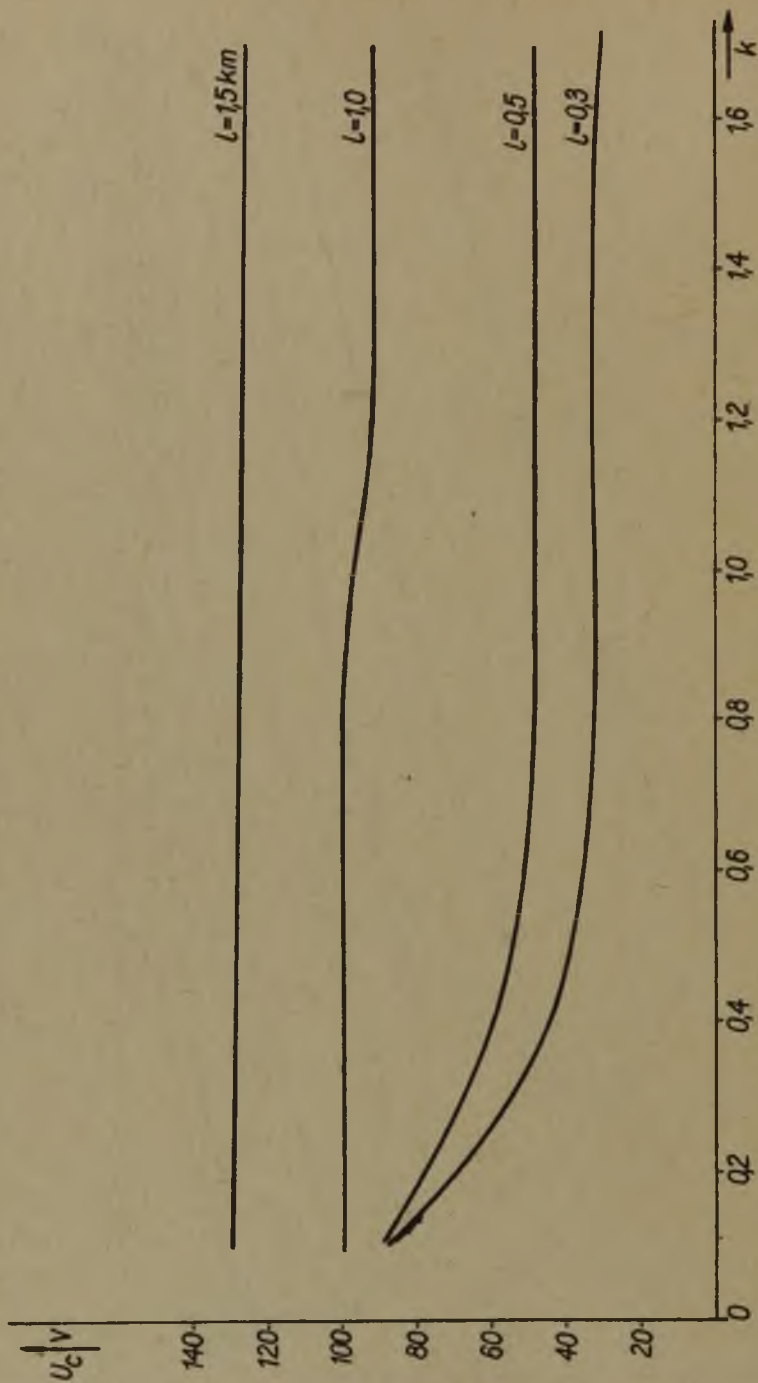


Rys. 5a. $x'_i = f(k)$ dla różnych "l" kabel 3x50 mm², 1 kV $x_1 = \frac{8700}{l} [\Omega]$



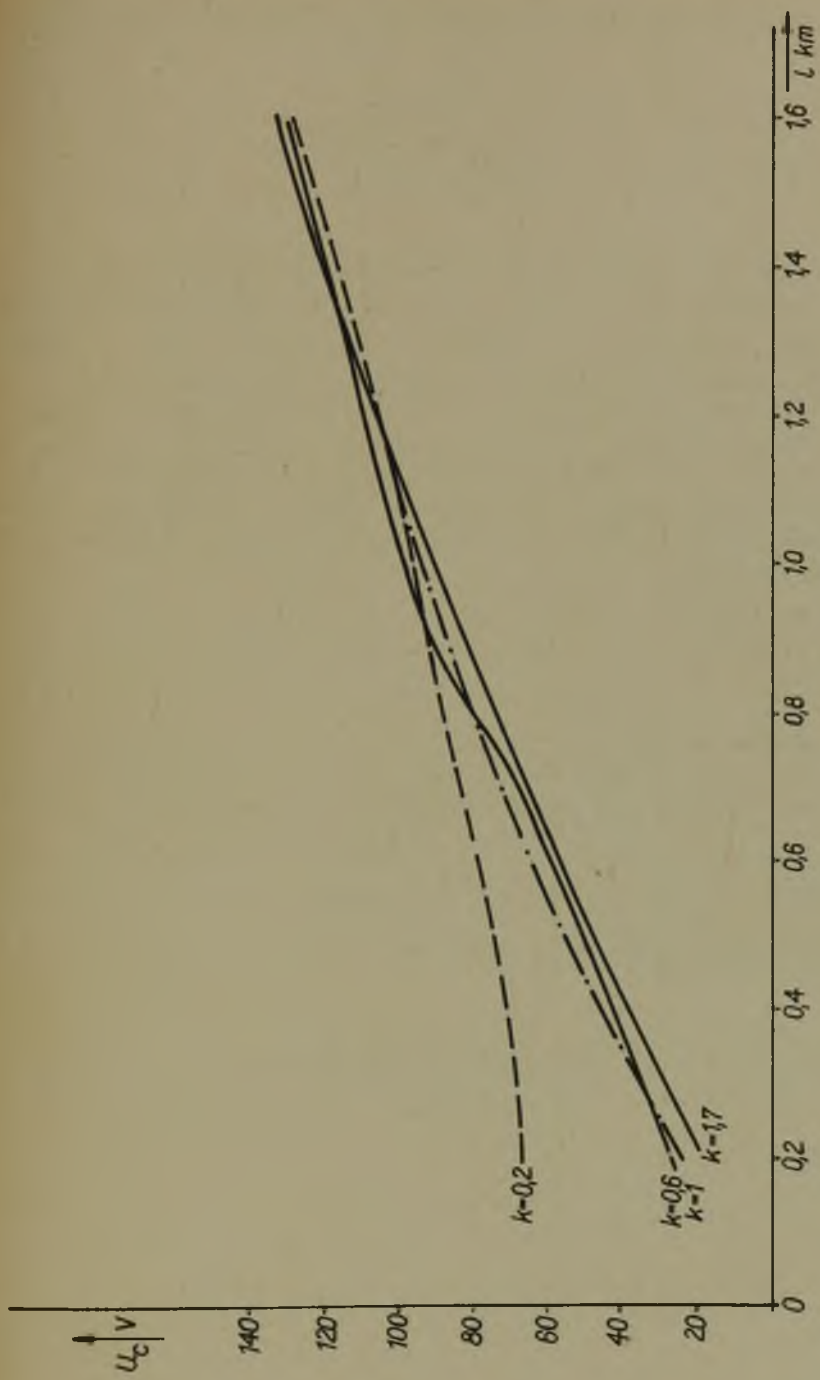
Rys. 5b

$R'_i = f(k)$ dla różnych "l" kabel 3x50 mm², 1 kV $R_i = 50000 \text{ k}[\Omega]$



Rys. 6

$U_c = f(k)$ dla różnych "l" kabel $3 \times 50 \text{ mm}^2$, 1 kV $R_i = 50000 \text{ k} \Omega$, $X_i = \frac{8760}{i} \Omega$



Rys. 7

$U_C = f(l)$ dla różnych "k" kabel 3x50 mm², 1kV $R_L = 50000 \text{ xk } (\Omega)$, $X_i = \frac{8760}{l} (\Omega)$

który po podstawieniu wartości przybiera postać:

$$U_c = \frac{876000}{\sqrt{(R'_1 + 3000)^2 + X_1^2}} V$$

Tak obliczone napięcie dotykowe naniesiono na rys. 6 jako krzywe funkcji $U_c = f(k)$ dla różnych długości sieci "l", a na rys. 7 jako krzywe funkcji $U_c = f(l)$ dla różnych "k". Jak wynika z wykresów, napięcie dotykowe zależy wybitnie od rozległości sieci "l", natomiast mały wpływ wykazuje współczynnik "k" dla wyższych wartości od 0,5. Ponieważ dla obliczonych wartości napięć dotykowych oporność człowieka leży powyżej przyjętej liczby 1000Ω , przeliczono to napięcie dla różnych oporności człowieka względem podłoża wg relacji:

$$R'_c = R_c \cdot m = 1000 \cdot m [\Omega]$$

Przeliczenia dokonano dla $k = 1$ i sieci o długości $l = 0,3$ i $l = 1,5$ km. Dla przyjętych współczynników odczytujemy z wykresu zastępczą impedancję szeregową:

$$\text{dla } k = 1 \text{ i } l = 0,3: Z_1 = 12500 - j \cdot 21700$$

$$\text{dla } k = 1 \text{ i } l = 1,5: Z_1 = 660 - j \cdot 5750$$

Podstawiając powyższe dane we wzór:

$$U_c = \frac{876000 \cdot m}{\sqrt{(R'_1 + 3000 \cdot m)^2 + X_1^2}}$$

otrzymujemy następujące wartości napięcia dotykowego dla sieci krótkiej o długości 300 m:

$m = 1$	$U_c = 33 \text{ V}$	$J_c = 33 \text{ mA}$
$m = 4$	$U_c = 106 \text{ V}$	$J_c = 26 \text{ mA}$
$m = 10$	$U_c = 181 \text{ V}$	$J_c = 18 \text{ mA}$

dla sieci długiej 1500 m:

$m = 1$	$U_c = 126 \text{ V}$	$J_c = 126 \text{ mA}$
$m = 4$	$U_c = 242 \text{ V}$	$J_c = 61 \text{ mA}$
$m = 10$	$U_c = 277 \text{ V}$	$J_c = 28 \text{ mA}$
$m = 20$	$U_c = 284 \text{ V}$	$J_c = 14 \text{ mA}$

Z obliczeń tych wynika, że dotknięcie jednego przewodu sieci 500 V z izolowanym punktem zerowym w warunkach niekorzystnych, tj. przy niskiej oporności człowieka względem ziemi jest niebezpieczne szczególnie w sieciach długich powyżej 300 m. Przy większej oporności przejściowej podłoża do ciała człowieka ($m > 1$) napięcie dotykowe wzrasta choć przy mniejszym prądzie rażeniowym zagrożenie jest mniejsze.

W sieciach kablowych 500 V decydującą rolę odgrywa pojemność kabli, a zatem długość sieci, natomiast rezystancja izolacji zaczyna wpływać dopiero gdy spadnie poniżej wartości 25 k Ω . Stan sieci o takim poziomie izolacji względem ziemi, uważamy za wadliwy. Chcąc uchronić się przed skutkami bezpośredniego dotknięcia jednej fazy, należałoby instalować sieci krótkie o łącznej długości nie przekraczającej wartości 300 m.

Wykresy i przeliczenia dokonano dla przekroju 50 mm², można je jednak wykorzystać i dla innych przekrojów, przyjmując ze względu na różną pojemność inną zastępczą długość sieci w myśl równania:

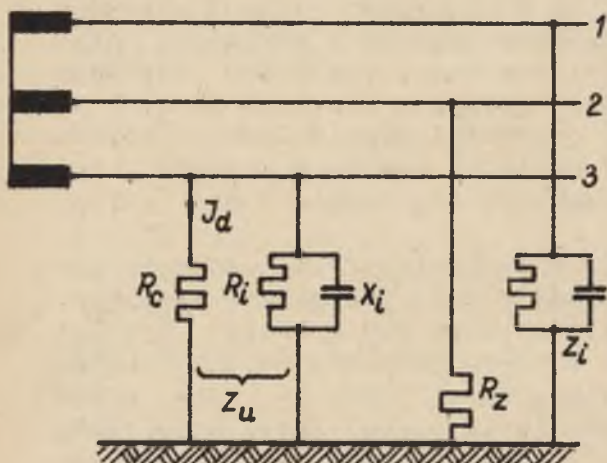
$$l_x = l_n \frac{C_n}{C_x}$$

Rezystancja izolacji jest prawie niezależną od przekroju i długości sieci, a zależy głównie od jej stanu.

2. Dotknięcie jednej fazy przy drugiej fazie uszkodzonej

Układ tego rodzaju przedstawia rys. 8. Ścisłe obliczony prąd całkowity w fazie uszkodzonej wynosi:

$$J_d = \frac{E_1 \cdot (Z_i + R_z) - E_2 \cdot Z_i - E_3 \cdot R_z}{Z_i \cdot R_z + Z_i \cdot Z_u + Z_u \cdot R_z}$$



gdzie:

J_d - prąd całkowity w fazie dotkniętej w A,

Z_i - impedancja szeregową w fazie zdrowej w,

Z_u - całkowita impedancja fazy dotkniętej w,

R_z - opór uziemienia jednej fazy.

Rys. 8. Dotknięcie fazy 3 sieci przy uszkodzonej fazie 2

wiej, jak i dotkniętej, można w dużym przybliżeniu przyjąć:

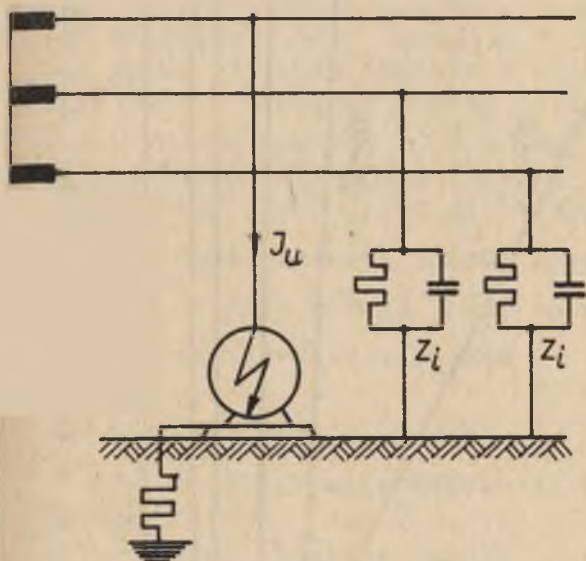
$$U_d = 500 \text{ V}$$

Wypadek ten jest znacznie niebezpieczniejszy od poprzedniego i grozi śmiertelnym porażeniem.

3. Dotknięcie korpusu silnika przy jednej fazie uszkodzonej

Przy zwarciu metalicznym fazy z korpusem silnika zostaje impedancja izolacji w tej fazie wyeliminowana i zastąpiona jedynie przez opór uziomu według rys. 9. Przez doziemienie popłynie prąd:

$$J_u = \frac{3 \cdot E}{Z_i + 2 \cdot R_o}$$



Ponieważ opór uziomu "R_o" jest wielokrotnie mniejszy od impedancji izolacji nawet przy złej izolacji, wzór powyższy można uprościć:

$$J_u = \frac{3 \cdot E}{Z_i}$$

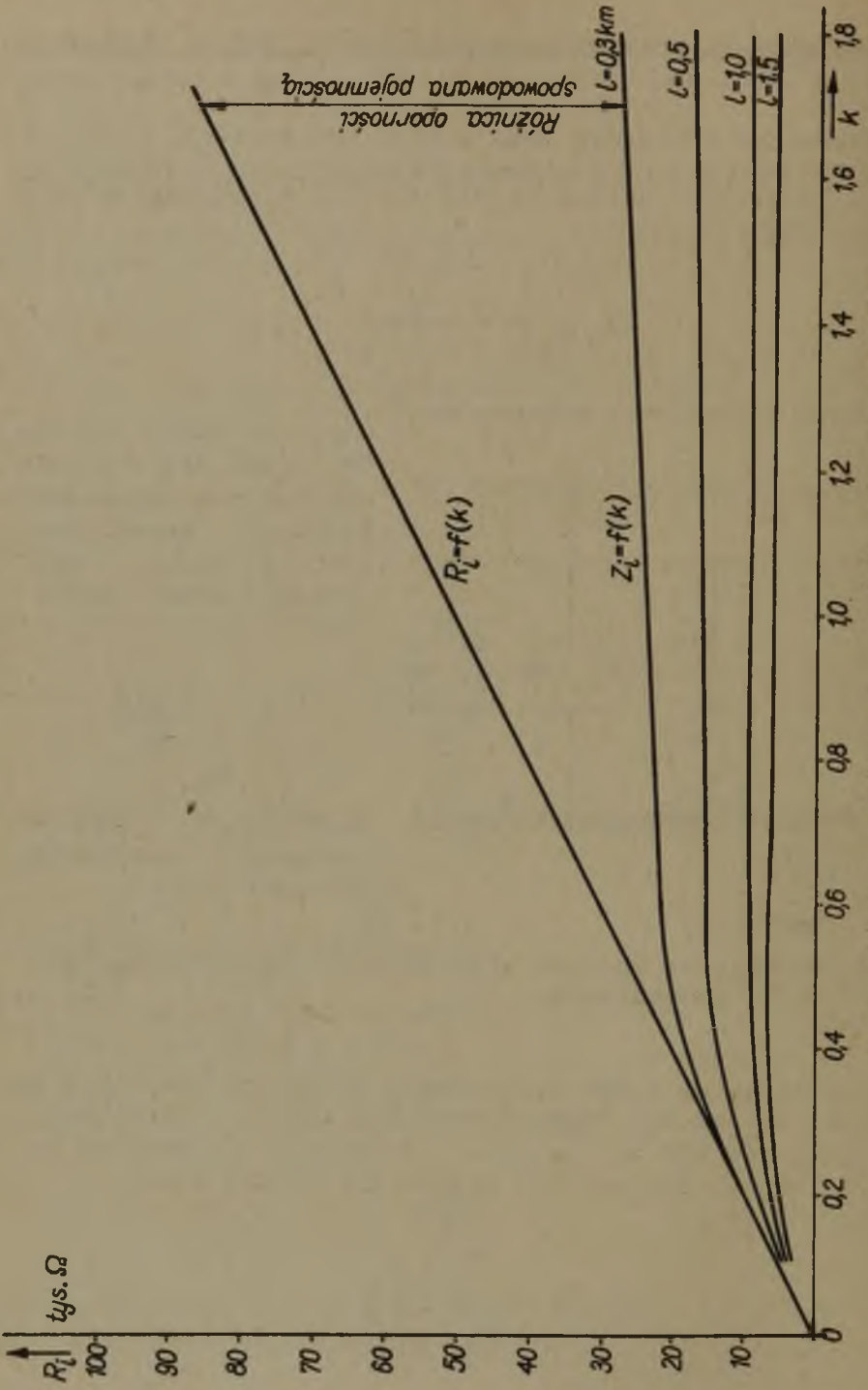
Bezwzględna wartość napięcia dotykowego wyniesie:

$$U_u = 3 \cdot E \frac{R_o}{Z_i}$$

Rys. 9. Dotknięcie kadłuba silnika uszkodzonego

Napięcie względem ziemi odniesienia zależy od oporności uziemienia ochronnego "R_o", którego wartość wg obowiązujących przepisów BUE nie powinna przekroczyć 4Ω oraz od impedancji sieci. Wartość tej impedancji podaje wzór:

$$Z_i = \frac{R_i \cdot X_i}{\sqrt{R_i^2 + X_i^2}}$$



Rys. 10. $R_i = f(k)$ i $Z_i = f(k)$ dla różnych "l"

Korzystając z wykresów na rysunkach 5a i b obliczono moduł " Z_i " dla różnych wartości " k " i " l " i podano na rys. 10 w postaci krzywych funkcji " $Z_i = f(k)$ " dla różnych " l " z podaniem funkcji " $R_i = f(k)$ ". Z wykresu tego wynika jasno, że dla sieci dłuższych 500 V zdecydowany wpływ wywiera reaktancja " X_i " bez względu na stan izolacji, przy krótkich sieciach wpływ ten maleje zwłaszcza przy złym stanie izolacji.

Bardzo korzystne ze względu na bezpieczeństwo pracy byłoby wyeliminowanie wpływu pojemności sieci. Uzyskuje się to przez włączenie odpowiednich dławików kompensacyjnych między fazy a ziemię. Przy rezonansie prądowym, abstrahując od małych strat czynnych w dławiku, reaktancja względem ziemi uzyskuje wartość nieskończenie wielką a w obwodzie faza - ziemia pozostaje jedynie rezystancja " R_i ". Przy sieci skompensowanej otrzymujemy następujące wartości przy bezpośrednim dotknięciu fazy zdrowej sieci przez człowieka w warunkach najbardziej niekorzystnych ($R_c = 1000 \Omega$):

przy dobrym stanie sieci	$R_i = 0,3 \text{ M}\Omega$	$J_d = 2,9 \text{ mA}$
przy średnim stanie sieci	$R_i = 0,1 \text{ M}\Omega$	$J_d = 8,6 \text{ mA}$
przy dopuszczalnym stanie sieci	$R_i = 50 \text{ k}\Omega$	$J_d = 16,5 \text{ mA}$
przy złym stanie sieci	$R_i = 25 \text{ k}\Omega$	$J_d = 31 \text{ mA}$

Przy sieci nieskompensowanej i rozległej nawet przy złym stanie izolacji $k = 0,2$, $R_i = 10\,000 \Omega$ wartość impedancji nie spada poniżej 5000Ω . Jeżeli uziemienie ochronne wykonane jest zgodnie z przepisami BUE i wynosi 4Ω wówczas napięcie dotykowe równa się

$$U_d = 867 \cdot \frac{4}{5000} = 0,7 \text{ V}$$

Można określić górną granicę oporu uziemienia tak, by napięcie względem ziemi nie przekroczyło maksymalnej wartości 65 V. Opór ten wyniesie $R_0 = 370 \Omega$.

Przy wspólnym uziemieniu ochronnym odbiorników groźnym staje się wypadek przerwy w ciągu sieci uziemiającej. Zająć mogą wtedy dwa przypadki:

- a) urządzenie jest odizolowane zupełnie względem ziemi. Wypadek ten omówiono w pierwszym ustępie, gdyż stanowi bezpośrednie dotknięcie fazy sieci zdrowej. W sieci skompensowanej o dobrym stanie izolacji, wypadek niegroźny, przy sieci nieskompensowanej wypadek prawie zawsze śmiertelny,
- b) urządzenie częściowo uziemione poprzez konstrukcje i beton. Napięcie względem ziemi wynosi:

$$U_u = 3 \cdot E \cdot \frac{R_z}{Z_i + 2 \cdot R_z}$$

i zależy od wartości oporu uziemienia urządzenia R_z .

4. Podwójne zwarcia z ziemią

Do rzadkich, lecz niebezpiecznych przypadków w sieciach z izolowanym punktem zerowym należy zaliczyć podwójne zwarcia doziemne dwóch różnych faz. Z przypadkami takimi trzeba się liczyć w sieciach nie posiadających ciągłej kontroli stanu izolacji i sygnalizacji pojedynczych zwarć z ziemią.

Doziemienie jednej fazy przy braku sygnalizacji może ująć uwadze obsługi, nawet przez dłuższy czas, ponieważ fakt ten w zupełności nie zakłóca normalnej pracy urządzeń. Minimalne napięcie dotykowe, które mogą pojawić się na uziemionych korpusach są niewyczuwalne. Możliwość wystąpienia drugiego doziemienia uzasadnia 1,73-krotny wzrost naprężenia izolacji przyłączonych urządzeń w fazach nieuszkodzonych. Ponadto w sieciach na napięcie 500 V zachodzi możliwość przebicia lub uszkodzenia bezpiecznika iskiernikowego. Wówczas pojedyncze zwarcie z ziemią przeradza się w zwarcie podwójne przez punkt zerowy. Jeżeli dla ochrony przed porażeniami zastosowano indywidualne uziemienia ochronne poszczególnych odbiorników bez wspólnego połączenia wszystkich korpusów odbiorników wówczas obwód zwarcia

zamknie się przez uziomy ochronne R_{10} i R_{20} i ziemię (rys. 11) przy czym impedancja pętli zwarciowej wyniesie:

$$Z_1 = 2 Z_t + Z'_p + Z''_p + Z'_d + Z''_d + R_{10} + R_{20} + X_s$$

Jeżeli wszystkie uziemione kadłuby maszyn i osłony urządzeń byłyby razem połączone wspólną szyną ochronną wówczas prąd zwarcia omija uziomy i ziemię a oporność pętli zwarciowej będzie znacznie mniejsza i wyniesie

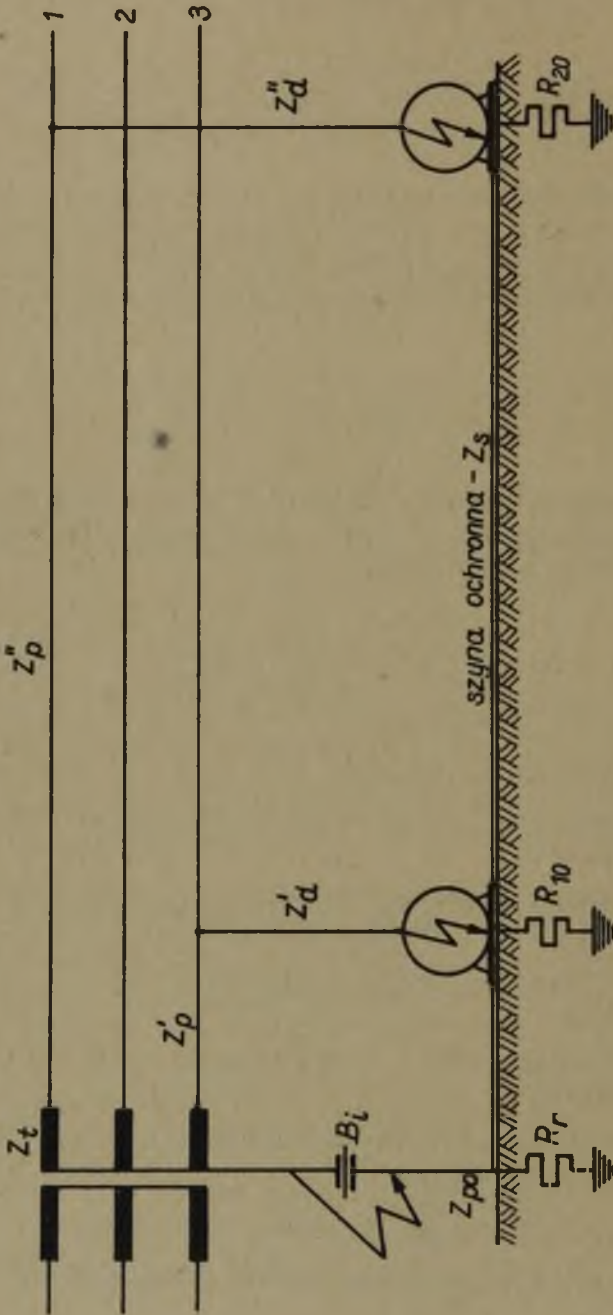
$$Z_2 = 2 Z_t + Z'_p + Z''_p + Z'_d + Z''_d + Z_s$$

Przy zwarceniu podwójnym przez uszkodzony bezpiecznik iskiernikowy "Bi" przy napięciu 1,73 razy mniejszym impedancja pętli zwarciowej będzie wynosić:

$$Z_3 = Z_t + Z'_p + Z'_d + Z_s + Z_{po}$$

W powyższych wzorach oznaczają:

- Z_t - impedancję jednej fazy zasilającego transformatora,
- Z_1 - impedancję jednego przewodu linii zasilających,
- Z'_d, Z''_d - impedancję jednego przewodu linii odbiorczych,
- Z_s - impedancję szyny uziemiającej na długości zwarcia,
- R_{10}, R_{20} - rezystancję uziemień ochronnych a R_r - uziomu roboczego,
- X_z - reaktancję drogi prądowej w ziemi,
- Z_{po} - impedancję przewodu uziemiającego punkt zerowy.



Rys. 11. Podwójne zwarcie z ziemią

Należy podkreślić, że w kablach zasilających i odbiorczych prąd zwarciový może płynąć na znacznej długości w jednej fazie, a suma prądów w kablu nie zeruje się, co pociąga za sobą zwiększenie reaktancji przewodów szczególnie przy istnieniu pancerza stalowego na kablu. Szyna uziemiająca stalowa posiada również pewną reaktancję szczególnie przy dużych prądach zwarciovych (straty przemagnesowania i prądów wirowych).

Należy dążyć, by prąd zwarciový obliczony ze wzoru:

$$J_z = \frac{U}{Z_{1,2}} \quad \text{lub} \quad J_z = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z_3} \quad (\text{zwarcie Bi})$$

był większy od prądu momentalnego zadziałania zabezpieczenia przynajmniej jednego z uszkodzonych urządzeń. Wtedy bowiem jedno urządzenie uszkodzone zostaje wyłączone i całe zagadnienie sprowadza się do pojedynczego zwarcia omówionego w poprzednim ustępie. Gdyby zawiodło szybkie wyłączenie przez zabezpieczenia zwarciové i napięcie na korpusach utrzymało się przez czas dłuższy wówczas nie powinno ono przekroczyć dozwolonych granic.

Przy zastosowaniu indywidualnych uziemień korpusów odbiorników bez szyny ochronnej, niezależnie od oporności uziomów ochronnych napięcie dotykowe przy podwójnych zwarciach będzie zawsze niebezpieczne. Natomiast przez zastosowanie szyny ochronnej łączącej wszystkie odbiorniki napięcia dotykowe, w najgorszym wypadku może równać się napięciu na szynie uziemiającej:

$$U_d = J_z \cdot Z_s = U \frac{Z_s}{Z_2}$$

W przypadku wielokrotnego uziemienia szyny ochronnej napięcie dotykowe można obniżyć do granic całkowicie bezpiecznych. W sieciach 500 V bez ciągłej kontroli stanu izolacji powinno się stosować szynę ochronną wielokrotnie uziemioną przez połączenie jej z uziemionymi konstrukcjami stalowymi urządzeń, budynków, rurociągami i płaszczami kabli ułożonych w ziemi.

Wnioski

Szczegółowe rozważania stanu zagrożenia i skuteczności ochrony przed porażeniami elektrycznymi w sieciach kablowych z izolowanym punktem zerowym na napięcie do 1 kV i powyżej prowadzą do następujących wniosków:

1. Sieci na napięcie do 1 kV

1.1. Z ciągłą kontrolą stanu izolacji

1. Ciągła kontrola stanu izolacji z optyczną i akustyczną sygnalizacją pojedynczych zwarc z ziemią może zabezpieczyć przed możliwością powstania zwarc podwójnych o ile pojedyncze zwarcia będą dostatecznie szybko likwidowane.

2. Przy doborze urządzeń do ciągłej kontroli stanu izolacji w krótkich sieciach 500 V poniżej 500 m należy zważać by oporność fazowa tych urządzeń (np. woltomierzy z oporem dodatkowym) względem ziemi nie była niższa od ok. 25 k Ω . W sieciach dłuższych powyżej 600 m, wobec niskiej wypadkowej reaktancji fazowej sieci wpływ rezystancji izolacji sieci jest bardzo mały.

3. W sieciach bardzo krótkich poniżej 100 m względnie w sieciach dłuższych, lecz skompensowanych wypadkowa oporność izolacji może obniżyć się nawet do wartości poniżej - 10k Ω nie powodując większego zagrożenia niż występuje ono w sieciach nieskompensowanych o długości 1 km.

4. Indywidualne względnie grupowe uziemiania ochronne kadłubów maszyn i urządzeń elektrycznych znacznie obniżają napięcie dotykowe i zapewniają dostateczną ochronę przed porażeniami elektrycznymi.

5. Oporność uziemienia ochronnego może być znacznie większa od 4 Ω i wynosić maksymalnie 20 do 30 Ω bez jakiegokolwiek zwiększenia zagrożenia dla obsługi.

2. Sieci nie posiadające urządzeń do ciągłej kontroli stanu izolacji

1. Brak ciągłej kontroli stanu izolacji sieci względem ziemi zmusza do przyjęcia możliwości powstania podwójnych zwarcí doziemnych (różnych faz), które prowadzą do dużych prądów zwarciovych.

2. Podczas podwójnych zwarcí z ziemią, o ile nie nastąpi szybkie przerwanie zwarcia mogą utrzymać się niebezpieczne napięcia dotykowe, przy czym indywidualne lub grupowe uziemienia ochronne kadłubów maszyn i urządzeń elektrycznych nawet o bardzo niskiej oporności np.

$$\left[R_o = \frac{65}{J_z} \right]$$

jak podają przepisy BUE nie zapewniają bezpieczeństwa.

3. Jedynym rozwiązaniem, które może zapewnić dostateczną ochronę w zakładach przemysłowych stanowi połączenie wszystkich kadłubów maszyn i urządzeń elektrycznych wspólną uziemioną szyną ochronną. Dzięki niej podwójne zwarcia do korpusów zamykają się przez tę szynę omijając ziemię. Celem maksymalnego obniżenia napięcia dotykowego należy szynę wielokrotnie uziemić wykorzystując w tym celu uziemione stalowe konstrukcje urządzeń przemysłowych, hal fabrycznych, rurociągi i płaszcze metalowe kabli ułożonych w ziemi.

4. Przekrój szyny ochronnej powinien być dostosowany do maksymalnego prądu przy zwarciu podwójnym, które może wystąpić w sieci.

5. Szyna ochronna powinna być połączona z uziomem roboczym bezpiecznika iskiernikowego by zabezpieczyć obsługę przed niebezpiecznym napięciem dotykowym, które pojawiłoby się na korpusie uszkodzonego odbiornika w przypadku przecięcia bezpiecznika iskiernikowego.

LITERATURA

- [1] Przepisy budowy urządzeń elektrycznych. SEP Warszawa 1963 r. wydanie III.
- [2] PN/E-05009. Urządzenia elektroenergetyczne. Ochrona przeciwporażeniowa w urządzeniach na napięciu znamionowe do 1000 V. Projekt ankietowany w r. 1965.
- [3] Meckel R.: Schutzmassnahmen gegen zu hohe Berührungsspannungen. VDE 1964. 5 verbesserte Ausgabe.
- [4] Schrank W.: Schutz gegen Berührungsspannungen. Verlag von R. Oldenburg 1942.
- [5] Wołkowiński K.: Uziemienia w urządzeniach elektroenergetycznych. PWT Warszawa 1956.

ЗАЩИТА ОТ ПОРАЖЕНИЙ ТОКОМ В ТРЕХФАЗНЫХ СЕТЯХ
С ИЗОЛИРОВАННОЙ НУЛЕВОЙ ТОЧКОЙ ТРАНСФОРМАТОРА

Р е з ю м е

Произведено подробный анализ и практические расчеты результирующего импеданса доземных токов и напряжений в трехфазных сетях 500 в с изолированной нулевой точкой при разных длинах сети и разных сопротивлениях изоляции кабельных жил по отношению к земле. Констатировано, что решающее влияние на величину доземных токов имеет результирующая емкость жил, а результирующий резистанс имеет значение только что при значениях менее 25 кΩ.

PROBLEM OF THE ELECTRIC SHOCK PROTECTION
IN THE THREE-PHASE NETWORKS WITH THE INSULATED
NEUTRAL POINT OF THE TRANSFORMER

S u m m a r y

The detailed analysis and the practical calculations of the impedance resultant, earth currents and voltage in the three-phase networks 500 V with the insulated neutral point at the networks several lengths and the several conductors insulation resistance against the earth.

It was stated, that the deciding effect on the value of the earth current has the resultant conductors capacity, but the resultant resistance is important just at the values under $25 \text{ k}\Omega$.