

Dariusz KUSIAK*
Zygmunt PIĄTEK*
Tomasz SZCZEGIELNIAK*
Paweł JABŁOŃSKI*

POLE MAGNETYCZNE RUROWEGO OSŁONIĘTEGO PRZEWODU FAZOWEGO W UKŁADZIE Z UZIEMIANYM LUB ZWARTYM EKRANEM – CZĘŚĆ I

W artykule wykazano jak na pole magnetyczne osłoniętego przewodu fazowego ma wpływ uziemienie lub zwarcie ekranu. Opisu tego dokonano wzorami dla względnych wartości pola i parametrów uwzględniających częstotliwość, konduktywność i wymiary poprzeczne ekranu. Uwzględniono przy tym także zjawisko naskórkowości oraz wewnętrzne i zewnętrzne zjawiska zblżenia. Część I opisuje znaczenie impedancji własnej ekranu i impedancji wzajemnej między przewodem fazowym a ekranem.

SŁOWA KLUCZOWE: pole magnetyczne, impedancja własna i wzajemna, ekran rurowy

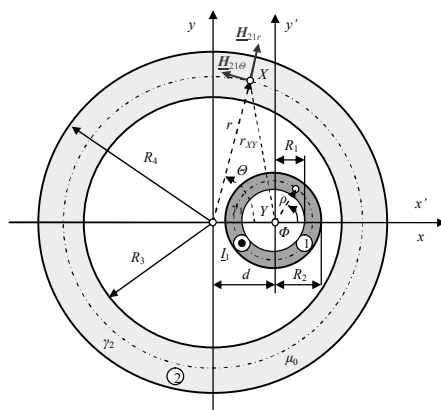
1. WPROWADZENIE

W torach wieloprądowych jeden lub więcej fazowych przewodów rurowych osłoniętych jest rurowym ekranem. Pole magnetyczne przewodu indukuje w osłonie prądy wirowe, które wytwarzają pole magnetyczne oddziaływania zwrotnego. Wypadkowe pole magnetyczne w obszarze wewnętrznym i zewnętrznym osłony jest sumą wektorową tych pól [1]. W ogólnym przypadku dwóch koncentrycznych przewodów rurowych osie przewodów nie pokrywają się tworząc tzw. układ niewspółosiowy – rysunek 1 [2].

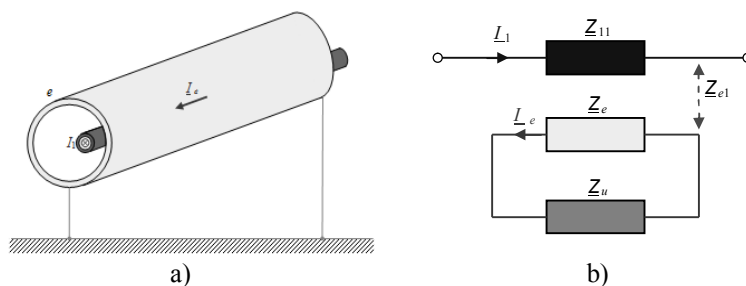
Rozpatrzono ekran (rys. 1) o konduktywności γ_2 , promieniu wewnętrznym R_3 i zewnętrznym R_4 , równoległy do niewspółosiowego wewnętrznego przewodu rurowego o konduktywności γ_1 , promieniu wewnętrznym R_1 i zewnętrznym R_2 z prądem sinusoidalnym o wielkości skutecznej zespolonej \underline{I}_1 . Odległość między osiami przewodów wynosi d .

Przewód fazowy z prądem \underline{I}_1 , z uziemionymi lub zwartymi (np. poprzez otaczające tor wieloprądowy konstrukcje stalowe) końcami przewodzącej osłony, przedstawiono na rysunku 2.

* Politechnika Częstochowska.



Rys. 1. Ekran rurowy z wewnętrznym niewspółosiowym przewodem rurowym



Rys. 2. Przewód fazowy ekranowany niewspółosiową przewodzącą osłoną uziemioną na jej końcach; a) widok ogólny, b) schemat zastępczy

Prąd powrotny w ekranie określono wzorem [3]

$$\underline{I}_e = -\underline{k}_i \underline{I}_1 \quad (1)$$

gdzie współczynnik zespolony

$$\underline{k}_i = \frac{\underline{Z}_{e1}}{\underline{Z}_e + \underline{Z}_u} \quad (2)$$

w którym impedancja \underline{Z}_e jest impedancją własną ekranu o skończonej długości, \underline{Z}_{e1} jest impedancją wzajemną między ekranem a przewodem fazowym, zaś \underline{Z}_u jest impedancją uziemienia lub obwodu zwierającego osłonę.

2. IMPEDANCJA EKRANU

Impedancja ekranu

$$\underline{Z}_e = R_e + j\omega L_e \quad (3)$$

i w pracach [4-6] Z. Piątek i B. Baron wprowadzają, że przy pominięciu zjawiska naskórkowości, rezystancja ekranu

$$R_{e0} = \frac{l}{\pi \gamma_2 (R_4^2 - R_3^2)} \quad (4)$$

oraz jego indukcyjność

$$L_{e0} = \frac{\mu_0 l}{2 \pi} \left[\ln \frac{2l}{R_4} - 1 + \frac{R_3^4}{(R_4^2 - R_3^2)^2} \ln \frac{R_4}{R_3} - \frac{1}{4} \frac{3R_3^2 - R_4^2}{R_4^2 - R_3^2} \right] = L_{ez} + L_{e0w} \quad (5)$$

gdzie indukcyjność zewnętrzna

$$L_{ez} = \frac{\mu_0 l}{2 \pi} \left(\ln \frac{2l}{R_4} - 1 \right) \quad (6)$$

oraz indukcyjność wewnętrzna

$$L_{e0w} = \frac{\mu_0 l}{2 \pi} \left[\frac{R_3^4}{(R_4^2 - R_3^2)^2} \ln \frac{R_4}{R_3} - \frac{1}{4} \frac{3R_3^2 - R_4^2}{R_4^2 - R_3^2} \right] \quad (7)$$

Jeśli uwzględnimy zjawisko naskórkowości, to rezystancja ekranu

$$R_e = \frac{\underline{\Gamma}_2 l}{4 \pi \gamma_2 R_4} \frac{\underline{a}}{\underline{b} \underline{b}^*} \quad (8)$$

gdzie

$$\begin{aligned} \underline{a} = & K_1(\underline{\Gamma}_2 R_3) K_1^*(\underline{\Gamma}_2 R_3) \left[I_0(\underline{\Gamma}_2 R_4) I_1^*(\underline{\Gamma}_2 R_4) - j I_1(\underline{\Gamma}_2 R_4) I_0^*(\underline{\Gamma}_2 R_4) \right] - \\ & - I_1(\underline{\Gamma}_2 R_3) I_1^*(\underline{\Gamma}_2 R_3) \left[K_0(\underline{\Gamma}_2 R_4) K_1^*(\underline{\Gamma}_2 R_4) - j K_1(\underline{\Gamma}_2 R_4) K_0^*(\underline{\Gamma}_2 R_4) \right] + \\ & + I_1(\underline{\Gamma}_2 R_3) K_1^*(\underline{\Gamma}_2 R_3) \left[K_0(\underline{\Gamma}_2 R_4) I_1^*(\underline{\Gamma}_2 R_4) + j K_1(\underline{\Gamma}_2 R_4) I_0^*(\underline{\Gamma}_2 R_4) \right] - \\ & - K_1(\underline{\Gamma}_2 R_3) I_1^*(\underline{\Gamma}_2 R_3) \left[I_0(\underline{\Gamma}_2 R_4) K_1^*(\underline{\Gamma}_2 R_4) + j I_1(\underline{\Gamma}_2 R_4) K_0^*(\underline{\Gamma}_2 R_4) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

$$\underline{b} = I_1(\underline{\Gamma}_2 R_4) K_1(\underline{\Gamma}_2 R_3) - I_1(\underline{\Gamma}_2 R_3) K_1(\underline{\Gamma}_2 R_4) \quad (10)$$

$$\underline{b}^* = I_1^*(\underline{\Gamma}_2 R_4) K_1^*(\underline{\Gamma}_2 R_3) - I_1^*(\underline{\Gamma}_2 R_3) K_1^*(\underline{\Gamma}_2 R_4) \quad (11)$$

Wtedy też indukcyjność ekranu

$$L_e = \frac{\mu_0 l}{2 \pi} \left\{ \ln \frac{2l}{R_4} - 1 + \frac{1}{\underline{\Gamma}_2 R_4 \underline{b}} \left[K_1(\underline{\Gamma}_2 R_3) I_0(\underline{\Gamma}_2 R_4) + I_1(\underline{\Gamma}_2 R_3) K_0(\underline{\Gamma}_2 R_4) - \frac{\underline{a}}{2 \underline{b}^*} \right] \right\} = L_{ez} + L_{ew} \quad (12)$$

gdzie indukcyjność wewnętrzna

$$L_{ew} = \frac{\mu_0 l}{2 \pi} \left\{ \frac{1}{\underline{\Gamma}_2 R_4 \underline{b}} \left[K_1(\underline{\Gamma}_2 R_3) I_0(\underline{\Gamma}_2 R_4) + I_1(\underline{\Gamma}_2 R_3) K_0(\underline{\Gamma}_2 R_4) - \frac{\underline{a}}{2 \underline{b}^*} \right] \right\} \quad (13)$$

W powyższych wzorach $I_1(\underline{\Gamma}_2 R_3)$, $K_1(\underline{\Gamma}_2 R_3)$, itp. oznaczają zmodyfikowane funkcje Bessela pierwszego rzędu, odpowiednio pierwszego i drugiego rodzaju [7].

Ze wzorów (8) i (12) otrzymujemy impedancję własną ekranu

$$\underline{Z}_e = j\omega \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left\{ \ln \frac{2l}{R_4} - 1 + \frac{1}{\Gamma_2 R_4 \underline{b}} \left[K_1(\Gamma_2 R_3) I_0(\Gamma_2 R_4) + I_1(\Gamma_2 R_3) K_0(\Gamma_2 R_4) \right] \right\} \quad (14)$$

oraz impedancję wewnętrzną

$$\underline{Z}_{ew} = j\omega \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left\{ \frac{1}{\Gamma_2 R_4 \underline{b}} \left[K_1(\Gamma_2 R_3) I_0(\Gamma_2 R_4) + I_1(\Gamma_2 R_3) K_0(\Gamma_2 R_4) \right] \right\} \quad (15)$$

Jeśli wprowadzi się wielkości względne $\beta = \frac{R_3}{R_4}$ oraz $\alpha = k_2 R_4$ ($k_2 = \sqrt{\omega \mu \gamma_2} / 2 = 1/\delta_2$), to przy pominięciu zjawiska naskórkowości otrzymano rezystancję ekranu

$$R_{e0} = \frac{l}{\pi \gamma_2 (1 - \beta^2) R_4^2} \quad (16)$$

oraz jego indukcyjność

$$L_{e0} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left[\ln \frac{2l}{R_4} - 1 + \frac{\beta^4}{(1 - \beta^2)^2} \ln \frac{1}{\beta} - \frac{1}{4} \frac{3\beta^2 - 1}{1 - \beta^2} \right] = L_{ez} + L_{e0w} \quad (17)$$

gdzie indukcyjność wewnętrzna

$$L_{e0w} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left[\frac{\beta^4}{(1 - \beta^2)^2} \ln \frac{1}{\beta} - \frac{1}{4} \frac{3\beta^2 - 1}{1 - \beta^2} \right] \quad (18)$$

Uwzględniając zjawisko naskórkowości wyznaczono rezystancję ekranu następującym wzorem

$$R_e = \frac{\sqrt{2j} \alpha l}{4 \pi \gamma_2 R_4^2} \frac{a}{\underline{b} \underline{b}^*} \quad (19)$$

oraz jego indukcyjność własną

$$L_e = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left\{ \ln \frac{2l}{R_4} - 1 + \frac{1}{\sqrt{2j} \alpha \underline{b}} \left[K_1(\sqrt{2j} \alpha \beta) I_0(\sqrt{2j} \alpha) + I_1(\sqrt{2j} \alpha \beta) K_0(\sqrt{2j} \alpha) - \frac{a}{2 \underline{b}^*} \right] \right\} = L_{ez} + L_{ew} \quad (20)$$

gdzie indukcyjność wewnętrzna

$$L_{ew} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2j} \alpha \underline{b}} \left[K_1(\sqrt{2j} \alpha \beta) I_0(\sqrt{2j} \alpha) + I_1(\sqrt{2j} \alpha \beta) K_0(\sqrt{2j} \alpha) - \frac{a}{2 \underline{b}^*} \right] \right\} \quad (21)$$

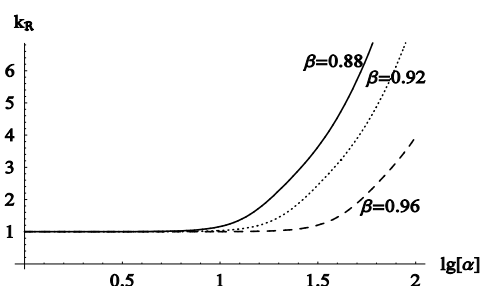
Względną zmianę rezystancji można wyrazić poprzez stosunek rezystancji przewodu z uwzględnieniem zjawiska naskórkowości – wzór (19) do rezystancji bez uwzględnienia tego zjawiska – wzór (16), czyli otrzymano

$$k_R = \frac{R_e}{R_{e0}} = \frac{\sqrt{2j}\alpha}{4} (1 - \beta^2) \frac{a}{\underline{b}\underline{b}^*} \quad (22)$$

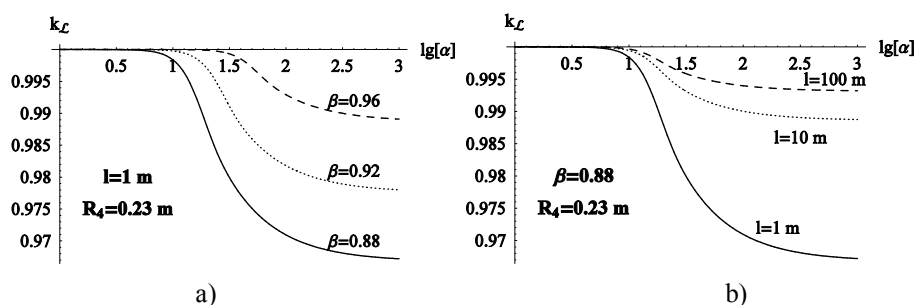
Podobnie dla indukcyjności całkowitej ze wzorów (17) i (20), otrzymano

$$k_L = \frac{L_e}{L_{e0}} = \frac{\ln \frac{2l}{R_4} - 1 + \frac{1}{\sqrt{2j}\alpha \underline{b}} \left[K_1(\sqrt{2j}\alpha\beta)I_0(\sqrt{2j}\alpha) + I_1(\sqrt{2j}\alpha\beta)K_0(\sqrt{2j}\alpha) - \frac{a}{2\underline{b}^*} \right]}{\ln \frac{2l}{R_4} - 1 + \frac{\beta^4}{(1-\beta^2)^2} \ln \frac{1}{\beta} - \frac{1}{4} \frac{3\beta^2 - 1}{1-\beta^2}} \quad (23)$$

Zależność powyższych współczynników od współczynnika α dla kilku wartości parametru β przedstawiono na rysunkach 3 i 4.



Rys. 3. Zależność rezystancji ekranu rurowego od parametru α



Rys. 4. Zależność indukcyjności ekranu rurowego od parametru α ; a) przy stałej długości i różnych wartościach względnej grubości β , b) przy stałej wartości względnej grubości β i różnych długości

Impedancja własna ekranu dla parametrów względnych ma postać

$$\underline{Z}_e = j\omega \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left[\ln \frac{2l}{R_4} - 1 + \frac{K_1(\sqrt{2j}\alpha\beta)I_0(\sqrt{2j}\alpha) + I_1(\sqrt{2j}\alpha\beta)K_0(\sqrt{2j}\alpha)}{\sqrt{2j}\alpha \underline{b}} \right] \quad (24)$$

oraz impedancja wewnętrzna

$$\underline{Z}_{ew} = j\omega \frac{\mu_0 l}{2\pi} \frac{K_1(\sqrt{2j}\alpha\beta)I_0(\sqrt{2j}\alpha) + I_1(\sqrt{2j}\alpha\beta)K_0(\sqrt{2j}\alpha)}{\sqrt{2j}\alpha b} \quad (25)$$

3. IMPEDANCJA WZAJEMNA PRZEWÓD FAZOWY – EKRAN

W pracach [8-9] Z. Piątek i B. Baron wyprowadzają indukcyjność wzajemną między przewodem fazowym a ekranem o skończonych długościach z pominięciem zjawisk naskórkowości i zbliżenia w postaci wzoru:

$$M_{e10} = M_{1e0} = M_{e0} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left[\frac{R_4^2 \ln \frac{2l}{R_4} - R_3^2 \ln \frac{2l}{R_3}}{R_4^2 - R_3^2} - \frac{1}{2} \right] \quad (26)$$

oraz impedancję wzajemną z uwzględnieniem tych zjawisk

$$\underline{Z}_{1e} = j\omega \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left\{ \ln \frac{2l}{R_4} - 1 + \frac{K_1(\underline{\Gamma}_2 R_3) [I_0(\underline{\Gamma}_2 R_4) - I_0(\underline{\Gamma}_2 R_3)] + I_1(\underline{\Gamma}_2 R_3) [K_0(\underline{\Gamma}_2 R_4) - K_0(\underline{\Gamma}_2 R_3)]}{\underline{\Gamma}_2 R_4 d_0} \right\} \quad (27)$$

lub też

$$\underline{Z}_{e1} = \frac{j\omega \mu_0 l}{2\pi} \left[\ln \frac{2l}{R_4} - 1 + \frac{b_0 I_0(\underline{\Gamma}_2 R_4) + c_0 K_0(\underline{\Gamma}_2 R_4)}{\underline{\Gamma}_2 R_3 d_0} \right] \quad (28)$$

albo dla parametrów względnych

$$\underline{Z}_{1e} = j\omega \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left\{ \ln \frac{2l}{R_4} - 1 + \frac{K_1(\sqrt{2j}\alpha\beta) [I_0(\sqrt{2j}\alpha) - I_0(\sqrt{2j}\alpha\beta)] + I_1(\sqrt{2j}\alpha\beta) [K_0(\sqrt{2j}\alpha) - K_0(\sqrt{2j}\alpha\beta)]}{\sqrt{2j}\alpha d_0} \right\} \quad (29)$$

oraz

$$\underline{Z}_{e1} = \frac{j\omega \mu_0 l}{2\pi} \left[\ln \frac{2l}{R_4} - 1 + \frac{b_0 I_0(\sqrt{2j}\alpha) + c_0 K_0(\sqrt{2j}\alpha\beta)}{\sqrt{2j}\alpha\beta d_0} \right] \quad (30)$$

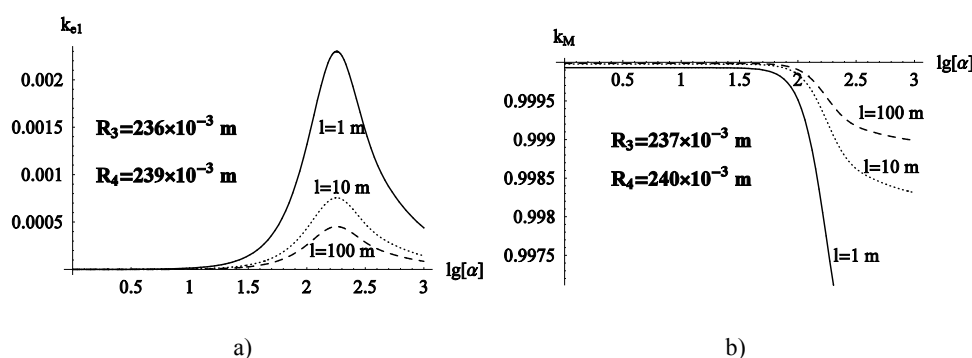
Struktura impedancji \underline{Z}_{1e} jest inna niż impedancji \underline{Z}_{e1} . Ze względu jednak na własności funkcji Bessela, niezależnie od parametrów $\underline{\Gamma}_2 R_3$ oraz $\underline{\Gamma}_2 R_4$ otrzymano

$$\underline{Z}_{e1} = \underline{Z}_{1e} \quad (31)$$

Części urojone, podzielone przez ω , impedancji wzajemnych są indukcyjnościami wzajemnymi, przy czym

$$M_{e1} = \frac{1}{\omega} \operatorname{Im}\{\underline{Z}_{e1}\} = M_{1e} = \frac{1}{\omega} \operatorname{Im}\{\underline{Z}_{1e}\} = M_e \quad (32)$$

Udział części rzeczywistej impedancji wzajemnej \underline{Z}_{e1} w całkowitej wartości tej impedancji scharakteryzowano współczynnikiem $k_{e1} = \operatorname{Re}\{\underline{Z}_{e1}\}/Z_{e1}$, zaś zmianę indukcyjności wzajemnej w zależności o parametru α współczynnikiem $k_M = M_e/M_{e0}$. Zależność powyższych współczynników od wartości parametru $\alpha = k_2 R_2$ przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Zależność impedancji wzajemnej od parametru α : a) części rzeczywistej, b) względnej indukcyjności wzajemnej

4. WNIOSKI

Z rysunków 3 i 4 wynika, że zjawisko naskórkowości powoduje przede wszystkim istotną zmianę rezystancji własnej ekranu. Zjawisko to, zależne od konduktywności, wymiarów poprzecznych ekranu, w tym grubości jego ścianek, powinno być uwzględniane przy wyznaczaniu impedancji własnej ekranu, nawet dla częstotliwości przemysłowej.

Z rysunku 5 wynika, że udział części rzeczywistej impedancji wzajemnej w całkowitej wartości modułu tej impedancji jest nieznaczny – nie przekracza 0,2 % dla wartości $\alpha \approx 100$. Zmiany indukcyjności wzajemnej nie przekraczają 0,2 % wartości indukcyjności wzajemnej wyznaczonej ze wzoru (29).

LITERATURA

- [1] Nawrowski R.: Tory wieloprądowe izolowane powietrzem lub SF₆, Wyd. Pol. Poznańskiej, Poznań 1998.
- [2] Piątek Z.: Impedances of Tubular High Current Busducts. Series Progress in High-Voltage technique, Vol. 28, Polish Academy of Sciences, Committee of Electrical Engineering, Wyd. Pol. Częst., Częstochowa 2008.

- [3] Kusiak D.: Pole magnetyczne dwu i trójbiegunowych torów wieloprądowych, Rozprawa doktorska, Pol. Częst., Wydz. El., Częstochowa 2008.
- [4] Baron B., Piątek Z.: Analityczno-numeryczne wyznaczanie impedancji własnych i wzajemnych płaskiego, osłoniętego, trójfazowego toru wieloprądowego. Polish - Ukrainian Joint Seminar, Solina 2000, pp. 15-18.
- [5] Piątek Z.: Indukcyjności przewodu osłoniętego, Przegląd Elektrotechniczny 1998, R. LXXIV, No 11, ss. 287-290.
- [6] Piątek Z., Baron B.: Impedancje GIL o skończonej długości, XXVI IC SPETO, Gliwice-Niedzica 2003, ss. 67-73.
- [7] Mc Lachlan N.W.: Funkcje Bessela dla inżynierów, PWN, Warsaw 1964.
- [8] Piątek Z., Baron B.: Impedancje jednobiegunowego GIL o skończonej długości, Śląskie Wiad. Elektryczne 2004, Nr 3 (54), Rok XI, maj-czerwiec 2004, s. 4-8.
- [9] Piątek Z.: Self and mutual impedances of a finite length gas-insulated transmission line (GIL), Electric Power Systems Research 2007, No. 77, pp. 191-201.

MAGNETIC FIELD OF TUBULAR SCREENED PHASE CONDUCTOR IN A SYSTEM WITH GROUNDED OR SHORTED SHIELD – PART I

The article discusses the influence of grounding or shorting of the screen on the magnetic field of screened phase conductor. This phenomenon has been described with the formulas relevant to the relative values of the field and the parameters allowing the frequency, conductivity, and the cross-section dimensions of screen. Into account was taken skin, internal and external proximity effects. Part I describes the importance of self impedance of the shield and the mutual impedance between the phase conductor and the shield.