

Aneta BUGAJSKA*

WPLYW ZJAWISKA NASKÓRKOWOŚCI NA IMPEDANCJĘ WEJŚCIOWĄ KABLA WSPÓŁOSIOWEGO W STANIE JAŁOWYM Z MIEJSCOWYM OSŁABIENIEM IZOLACJI

W artykule przedstawiono wpływ zjawiska naskórkowości na impedancję wejściową kabla współosiowego w stanie jałowym z miejscowym osłabieniem izolacji z uwzględnieniem wymiarów poprzecznych żyły i ekranu oraz grubości izolacji kabla. Uwzględniono przy tym jakościowy i ilościowy wpływ tego zjawiska na całkowitą impedancję na jednostkę długości kabla współosiowego, czyli na rezystancję, indukcyjności własne żyły i ekranu oraz na indukcyjność wzajemną między nimi.

1. WSTĘP

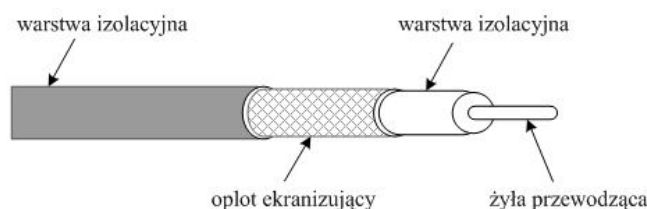
W elektroenergetycznych liniach kablowych istotnym zagadnieniem jest diagnostyka oraz lokalizacja miejsca uszkodzenia. Badania diagnostyczne pozwalają wyeliminować uszkodzenia, które powstały podczas transportu, określić potencjalne uszkodzenia mechaniczne i błędy montażowe oraz uzyskać informacje na temat aktualnego stanu technicznego linii kablowej, co pozwala przygotować planowe działania w zakresie serwisowania i ewentualnej wymiany odcinków kabli, których stan może być przyczyną awarii. Spośród wielu uszkodzeń linii kablowych spotyka się również takie, które polegają na miejscowym osłabieniu izolacji. Przy dużych rezystancjach przejścia nie powodują one prądów zwarciovych, tylko zwiększenie prądu pobieranego ze źródła. Eksploatacja takiej linii powoduje miejscowe nagrzewanie się kabla i związane z tym straty i doprowadza do uszkodzeń kabla [1, 2].

W metodach impulsowych lokalizacji uszkodzeń sygnał testujący zawiera składowe sinusoidalne o zwiększającej się częstotliwości [2]. W miarę wzrostu częstotliwości należy uwzględniać zjawisko naskórkowości zmieniające parametry jednostkowe kabla. W przypadku kabli elektroenergetycznych określa się parametry kabla do 30 MHz [3, 4]. Parametry jednostkowe kabla w stanie jałowym i w stanie zwarcia określają jego impedancję wejściową. W przypadku miejscowego osłabienia izolacji ta impedancja wejściowa zależy dodatkowo od miejsca wystąpienia uszkodzenia oraz od rezystancji uszkodzenia. Analiza

* Politechnika Świętokrzyska w Kielcach.

impedancji wejściowej elektroenergetycznego kabla współosiowego (rys. 1) w stanie jałowym z miejscowym osłabieniem izolacji może znaleźć zastosowanie w badaniach diagnostycznych oraz w lokalizowaniu uszkodzeń w kablach elektroenergetycznych.

Wpływ częstotliwości na zmianę rezystancji żyły i ekranu kabla jest zazwyczaj uwzględniany. Jednakże, jak to wykazano w pracach [5-10] również indukcyjność własna żyły i ekranu oraz indukcyjność wzajemna między nimi zależą od częstotliwości. W konsekwencji zmian rezystancji i indukcyjności całkowitej kabla od częstotliwości, spowodowanych zjawiskiem naskórkowości, impedancja wejściowa powinna te zmiany uwzględniać.



Rys. 1. Kabel współosiowy

Ocena jakościowa i ilościowa tego zjawiska na impedancję wejściową elektroenergetycznego kabla współosiowego w stanie jałowym z miejscowym osłabieniem izolacji jest celem niniejszego artykułu.

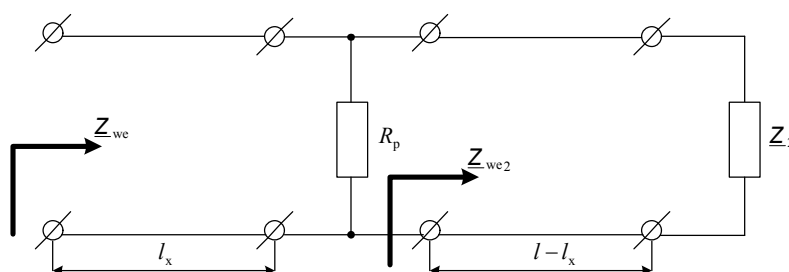
2. MODEL MATEMATYCZNY BADANEJ LINII

W metodach wstępnej lokalizacji uszkodzeń kabli elektroenergetycznych, kabel współosiowy może być traktowany jako linia długa o parametrach rozłożonych. Całkowitą rezystancję jednostkową kabla współosiowego R_0 bez uwzględniania zjawiska naskórkowości można wyrazić przez konduktywności żyły i ekranu kabla (σ_1 i σ_2) oraz promień R żyły, jak także przez promień wewnętrzny R_1 i zewnętrzny R_2 ekranu kabla. Indukcyjność całkowita kabla L_0 uwzględnia indukcyjności własne żyły L_{10} i ekranu L_{20} oraz indukcyjność wzajemną M_0 między nimi i wyrażona jest poprzez parametry poprzeczne kabla. Odpowiednie wzory na te wielkości podano w pracy [5].

W przypadku uwzględnienia zjawiska naskórkowości, rezystancja $R(\omega)$ i indukcyjność jednostkowa $L(\omega)$ kabla są funkcjami częstotliwości. Wielkości te są wtedy wyrażone przez zmodyfikowane funkcje Bessela, a odpowiednie wzory zostały podane w pracy [5]. Na ogół również konduktancja poprzeczna kabla

$G(\omega)$ jest funkcją częstotliwości ze względu na straty mocy związane z okresową polaryzacją dielektryka, ale w niniejszej pracy zostaje to pominięte. Dla tej wielkości przyjęto wzór podany w pracy [11]. Z pracy tej zaczerpnięto także wzór na jednostkową pojemność linii kablowej.

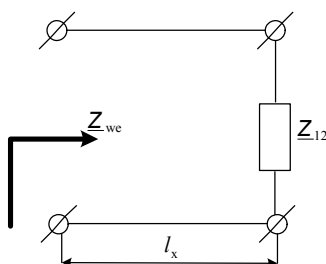
Linia długa o długości l została podzielona na dwie części: od początku do miejsca uszkodzenia l_x i od tego miejsca do końca linii $(l-l_x)$. Miejsce uszkodzenia zamodelowano rezystancją przejścia (R_p). Drugi odcinek $(l-l_x)$ wraz z obciążeniem ($Z_2 = \infty$) zastąpiono impedancją wejściową $Z_{we2}(\omega)$ (rys. 2).



Rys. 2. Model uszkodzonej linii długiej

Impedancja wejściowa $Z_{we2}(\omega)$ w stanie jałowym bez uwzględniania i z uwzględnieniem zjawiska naskórkowości została obliczona według wzorów podanych w pracach [10, 11].

Impedancja $Z_{we2}(\omega)$ połączona równolegle z rezystancją przejścia R_p stanowi obciążenie pierwszego odcinka linii (rys. 3).



Rys. 3. Model uszkodzonej linii długiej po równoległym połączeniu R_p i $Z_{we2}(\omega)$

Impedancja wejściowa całej linii bez uwzględniania zjawiska naskórkowości wynosi:

$$Z_{we}(\omega) = Z_c(\omega) \frac{Z_{12}(\omega) + Z_c(\omega) \tanh(\Gamma(\omega)l_x)}{Z_c(\omega) + Z_{12}(\omega) \tanh(\Gamma(\omega)l_x)} \quad (1)$$

gdzie

$$\underline{Z}_{12}(\omega) = \frac{R_p \underline{Z}_{we2}(\omega)}{R_p + \underline{Z}_{we2}(\omega)} \quad (2)$$

natomiast po uwzględnieniu zjawiska naskórkowości:

$$\underline{Z}_{wen}(\omega) = \underline{Z}_{cn}(\omega) \frac{\underline{Z}_{12n}(\omega) + \underline{Z}_{cn}(\omega) \tanh(\underline{\Gamma}_n(\omega) l_x)}{\underline{Z}_{cn}(\omega) + \underline{Z}_{12n}(\omega) \tanh(\underline{\Gamma}_n(\omega) l_x)} \quad (3)$$

gdzie

$$\underline{Z}_{12n}(\omega) = \frac{R_p \underline{Z}_{we2n}(\omega)}{R_p + \underline{Z}_{we2n}(\omega)} \quad (4)$$

3. OBLICZENIA NUMERYCZNE

W celu zbadania wpływu zjawiska naskórkowości na impedancję wejściową kabla współosiowego w stanie jałowym z miejscowym osłabieniem izolacji, zostały napisane programy komputerowe w środowisku Matlab. Obliczenia wykonano dla kabla typu YHKXS przyjmując: promień żyły $R=0.01\text{m}$, względną grubość izolacji określono parametrem $\eta=R_1/R=1.2$, względną grubość ekranu parametrem $\tau=R_1/R_2=0.9$. Przyjęto następujące wartości konduktywności: $\sigma_1=3.7037 \cdot 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ oraz $\sigma_2=5.5454 \cdot 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$. Ponadto przyjęto konduktywność izolacji $\sigma_i=10^{-11} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ oraz względną przenikalność dielektryczną izolacji $\epsilon_r=2.25 \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$. Dla kabla o długości $l=2500 \text{ m}$ przyjęto, że odległość do miejsca uszkodzenia (l_x) zmienia się od zera do 2000 m. Założono wartość częstotliwości $f=1 \text{ kHz}$ i $f=11.5 \text{ kHz}$.

Wpływ zjawiska naskórkowości na impedancję wejściową w stanie jałowym z miejscowym osłabieniem izolacji zbadano na podstawie zmian względnego współczynnika modułu impedancji wejściowej. Współczynnik ten bez uwzględniania zjawiska naskórkowości określono wzorem:

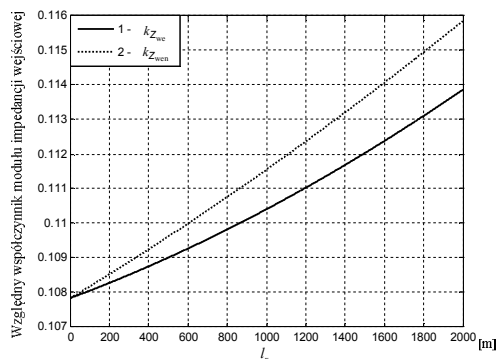
$$k_{Z_{we}} = \frac{Z_{we}(\omega)}{Z_{we0}(\omega)} \quad (5)$$

gdzie $Z_{we0}(\omega)$ - moduł impedancji wejściowej w stanie jałowym linii nieuszkodzonej bez uwzględniania zjawiska naskórkowości – wzór podany w pracach [10, 11].

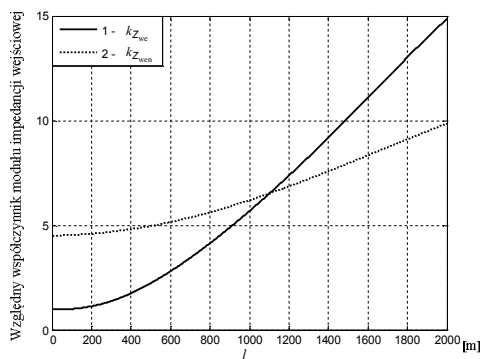
Natomiast po uwzględnieniu zjawiska naskórkowości:

$$k_{Z_{wen}} = \frac{Z_{wen}(\omega)}{Z_{we0}(\omega)} \quad (6)$$

Zależność tego współczynnika w funkcji odległości do miejsca uszkodzenia przedstawiono na rysunkach 4 i 5.

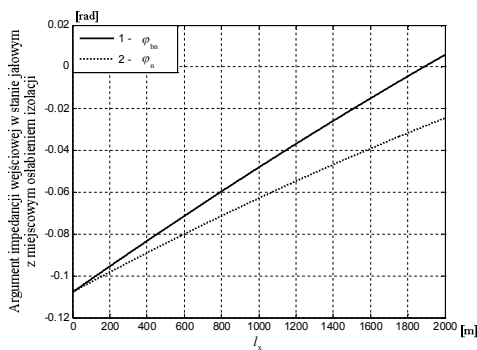


Rys. 4. Zależność współczynnika $k_{Z_{we}}$, $k_{Z_{wen}}$ linii nieobciążonej w funkcji odległości do miejsca uszkodzenia dla $R_p=10 \Omega$, $f=1 \text{ kHz}$

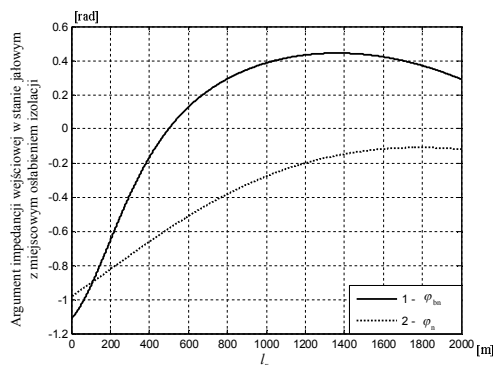


Rys. 5. Zależność współczynnika $k_{Z_{we}}$, $k_{Z_{wen}}$ linii nieobciążonej w funkcji odległości do miejsca uszkodzenia dla $R_p=10 \Omega$, $f=11.5 \text{ kHz}$

Zjawisko naskórkowości powoduje także zmianę argumentu impedancji wejściowej nieobciążonego kabla z miejscowym osłabieniem izolacji, co zostało przedstawione na rysunkach 6 i 7.

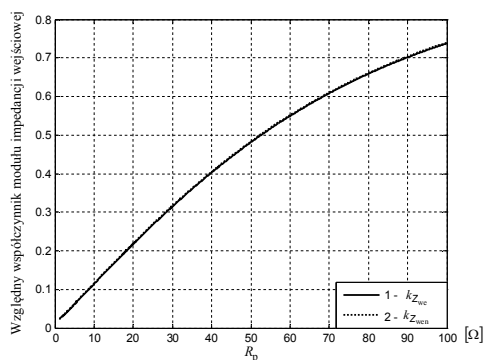


Rys. 6. Argument impedancji wejściowej w stanie jałowym z miejscowym osłabieniem izolacji w funkcji odległości do miejsca uszkodzenia z uwzględnieniem φ_n i bez uwzględniania zjawiska naskórkowości φ_{bn} , dla $R_p=10 \Omega$, $f=1 \text{ kHz}$

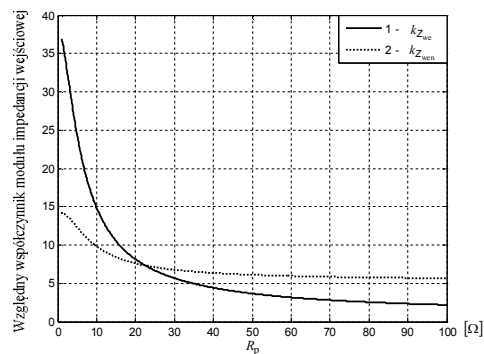


Rys. 7. Argument impedancji wejściowej w stanie jałowym z miejscowym osłabieniem izolacji w funkcji odległości do miejsca uszkodzenia z uwzględnieniem φ_n i bez uwzględniania zjawiska naskórkowości φ_{bn} , dla $R_p=10 \Omega$, $f=11.5 \text{ kHz}$

Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono zależność względnego współczynnika modułu impedancji wejściowej w funkcji rezystancji przejścia $R_p=1 \div 100 \Omega$.



Rys. 8. Zależność współczynnika $k_{z_{we}}$, $k_{z_{wen}}$ linii nieobciążonej w funkcji rezystancji przejścia R_p dla $f=1$ kHz, $l_x=2000$ m



Rys. 9. Zależność współczynnika $k_{z_{we}}$, $k_{z_{wen}}$ linii nieobciążonej w funkcji rezystancji przejścia R_p dla $f=11.5$ kHz, $l_x=2000$ m

4. WNIOSKI

W celu uniknięcia niejednoznaczności w badaniu wpływu zjawiska naskórkowości na impedancję wejściową kabla współosiowego w stanie jałowym z miejscowym osłabieniem izolacji, dobrano częstotliwość dopasowaną do długości kabla tak, że jedna czwarta długości fali elektromagnetycznej w kablu jest większa niż długość kabla. W artykule wzięto pod uwagę dwie częstotliwości $f=1$ kHz i $f=11.5$ kHz. Długość fali bez uwzględniania zjawiska naskórkowości ($\lambda=121757$ m przy $f=1$ kHz; $\lambda=10418$ m przy $f=11.5$ kHz) jest mniejsza w porównaniu z długością fali po uwzględnieniu tego zjawiska ($\lambda_n=134930$ m przy $f=1$ kHz; $\lambda_n=13789$ m przy $f=11.5$ kHz). Jest to spowodowane faktem, że współczynnik opóźnienia fazowego zależy przede wszystkim od indukcyjności całkowitej kabla współosiowego, co powoduje, podobnie jak indukcyjności całkowitej jego zmniejszanie się wraz z wzrostem częstotliwości [9].

Wraz ze wzrostem odległości do miejsca uszkodzenia względny współczynnik modułu impedancji wejściowej rośnie, przy czym jego wartość jest większa w przypadku uwzględnienia zjawiska naskórkowości i przy $f=1$ kHz wynosi około 0,116 % dla $l_x=2000$ m, natomiast bez uwzględniania zjawiska naskórkowości około 0,114 % dla $l_x=2000$ m (rys. 4). Dla częstotliwości $f=11.5$ kHz wraz ze wzrostem odległości do miejsca uszkodzenia względny współczynnik modułu impedancji wejściowej rośnie i w przypadku uwzględnienia zjawiska naskórkowości zmienia się on w zakresie od około 4,5 % do około 10 % natomiast bez uwzględniania zjawiska naskórkowości od około 1 % do około 15 % (rys.5). Przy odległości do miejsca uszkodzenia do około 1100 m większe zmiany względnego współczynnika modułu impedancji wejściowej można zauważyć

po uwzględnieniu zjawiska naskórkowości. Powyżej tej odległości bez uwzględniania tego zjawiska (rys. 5).

Porównując rysunki 4 oraz 5 można zauważyć, że zmiany względnego współczynnika modułu impedancji wejściowej uszkodzonego kabla w stanie jałowym w funkcji odległości do miejsca uszkodzenia są tym większe im większa jest częstotliwość przy pomiarze impedancji wejściowej kabla.

Wraz ze wzrostem odległości do miejsca uszkodzenia można także stwierdzić zmiany argumentu impedancji wejściowej. Dla częstotliwości $f=1$ kHz zmiany te są większe jeśli zjawisko naskórkowości nie zostanie uwzględnione, przy czym przy odległości do miejsca uszkodzenia do około 50 m zmiany te są prawie niezauważalne (rys. 6). Przy częstotliwości $f=11,5$ kHz i odległości do miejsca uszkodzenia równej około 115 m zmiany te są większe jeśli zjawisko naskórkowości zostanie uwzględnione, powyżej tej odległości bez uwzględniania tego zjawiska (rys. 7).

Dla $f=1$ kHz różnica między linią uszkodzoną i bez uszkodzenia jest prawie taka sama bez względu na fakt uwzględnienia lub nie uwzględniania zjawiska naskórkowości (rys. 8). Przy $f=11,5$ kHz można stwierdzić, że dla rezystancji przejścia od 1Ω do około 22Ω różnica między linią uszkodzoną i bez uszkodzenia jest mniejsza jeśli uwzględnione zostanie zjawisko naskórkowości. Dla rezystancji przejścia większej od około 22Ω różnica ta jest mniejsza jeśli zjawisko naskórkowości nie zostanie uwzględnione (rys. 9).

LITERATURA

- [1] Szczerski R., Lokalizacja uszkodzeń kabli i wybrane badania eksploatacyjne linii kablowych, WNT, Warszawa 1999.
- [2] Tarczyński W., Metody impulsowe w lokalizacji uszkodzeń w liniach elektroenergetycznych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2006.
- [3] Wagenaars P. et al., Estimation of Transmission Line Parameters for Single-Core XLPE Cables, Inter. Conf. on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, China, April 21-24, 2008.
- [4] Wagenaars P. et al., Approximation of Transmission Line Parameters of Single-Core and Three-Core XLPE Cables, IEEE Dielectr. and Electr. Insul., Vol. 17, No. 1, pp. 106-115, 2010.
- [5] Piątek Z., Impedances of Tubular High Current Busducts, Polish Ac. of Science, Com. of Elec. Eng. Series Progress in High Volt. Tech., Vol. 28, Wyd. Pol. Cz. 2008.
- [6] Kazimierczuk M. K., High – Frequency Magnetic Components, John Wiley & Sons, Ltd., 2009.
- [7] Paul C.R., Analysis of Multiconductor Transmission Lines, John Wiley & Sons, New Jersey 2008.
- [8] Paul C.R., Inductance Loop and Partial, John Wiley & Sons, New Jersey 2010.
- [9] Bugajska A., Wpływ zjawiska naskórkowości na zespolony współczynnik propagacji fali elektromagnetycznej, PAK, Vol. 28, nr 12/2010, ss. 1442-1444.

- [10] Bugajska A., Wpływ zjawiska naskórkowości na impedancję wejściową kabla współosiowego w stanie jałowym i w stanie zwarcia, Prace Instytutu Elektrotechniki, Warszawa 12/2012, ss. 5-18.
- [11] Piątek Z., Jabłoński P., Podstawy teorii pola elektromagnetycznego, WNT, Warszawa 2010.

**THE INFLUENCE OF THE SKIN EFFECT ON INPUT IMPEDANCE
IN A COAXIAL CABLE IN A NO-LOAD STATE
WITH LOCAL ISOLATION WEAKENING**

The article presents the influence of the skin effect on input impedance of a coaxial cable in a no-load state with local isolation weakening after taking into account dimensions of the interior radius of the cable screen, the radius of the conductor and the thickness of electrical insulation. Taken into account was also qualitative and quantitative influence of this effect on total unit impedance per unit length of a coaxial cable, that is resistance, self inductance of the conductor of the cable and the cable screen, and on the mutual inductance between them.