

Aneta BUGAJSKA*

OCENA I WERYFIKACJA METODY IMPEDANCYJNEJ IDENTYFIKACJI USZKODZEŃ POPRZECZNYCH W ELEKTROENERGETYCZNYM KABLU WSPÓŁOSIOWYM – CZĘŚĆ 2

W części 1 artykułu przedstawiono wyniki oceny i weryfikacji metody lokalizacji uszkodzeń w elektroenergetycznym kablu współosiowym XRUHKXS 1x120 mm². W części 2 określono wartości wskaźników statystycznych z uwzględnieniem wartości impedancji poprzecznej uszkodzenia oraz wartości częstotliwości pomiarowej dla kabla XUHAKXS 1x70 mm² o długości $x = 76$ m, przy założonej odległości do miejsca uszkodzenia $x = 5$ m. Ponadto oszacowano wartości błędów bezwzględnych i procentowych z uwzględnieniem odległości do miejsca uszkodzenia, wartości impedancji poprzecznej uszkodzenia oraz wartości częstotliwości pomiarowej. Otrzymane wyniki zostały porównane z metodą reflektometru.

SŁOWA KLUCZOWE: elektroenergetyczny kabel współosiowy, odległość do miejsca uszkodzenia, impedancja poprzeczna uszkodzenia, wskaźniki statystyczne

1. WERYFIKACJA POMIAROWA ZAPROPONOWANEJ METODY DLA KABLA XUHAKXS 1x70 mm²

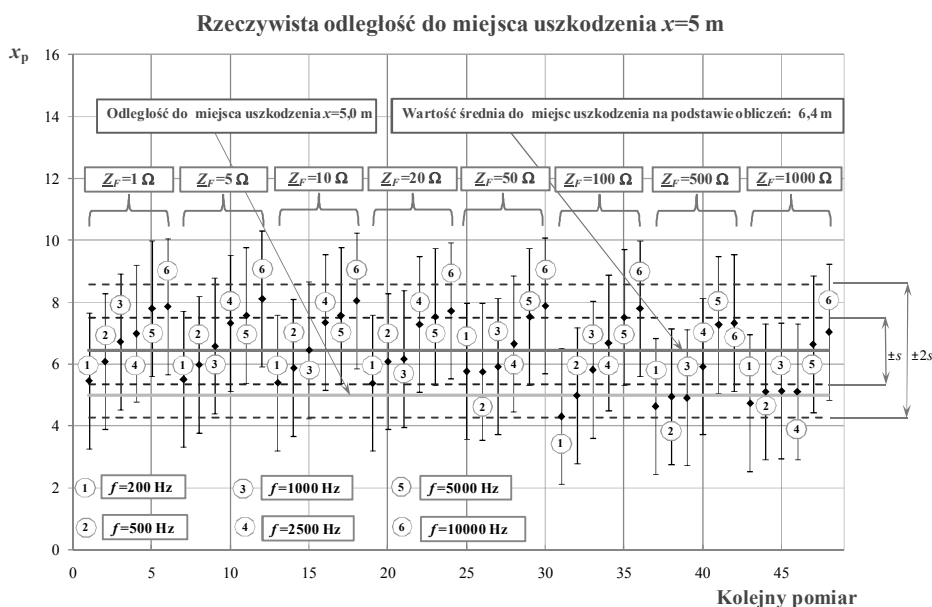
Podobnie jak w przypadku badania kabla z części 1 do pomiarów wartości impedancji wejściowych użyto mostka LCR HM8118 firmy Hameg. Uszkodzenie modelowano rezystorem dekadowym D05 kl. 0,1 oraz kondensatorem dekadowym DK 50, w celu kompensacji indukcyjności linii łączącej rezystor dekadowy z miejscem uszkodzenia. Parametry falowe kabla tj. impedancja charakterystyczna oraz zespolony współczynnik propagacji fali elektromagnetycznej zostały wyznaczone poprzez pomiar impedancji wejściowych kabla nieuszkodzonego w stanie rozwarcia i w stanie zwarcia. Obliczenia numeryczne zostały wykonane w programie Matlab, natomiast obliczenia wskaźników statystycznych przy wykorzystaniu arkusza kalkulacyjnego Excel. Zamodelowano uszkodzenie w odległości 5 m oraz 15 m (część 3) od punktu R dla kabla XUHAKXS o długości 76 m. W przeprowadzonych badaniach wzięto pod uwagę 6 wartości

*Politechnika Świętokrzyska.

częstotliwości pomiarowej z zakresu od 200 Hz do 10 kHz oraz 8 wartości impedancji uszkodzenia z zakresu od 1 Ω do 1 k Ω .

2. WERYFIKACJA POMIAROWA PRZY RZECZYWISTEJ ODLEGŁOŚĆ DO MIEJSCA USZKODZENIA $x = 5$ m

Na rysunku 1 przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych w określeniu odległości do miejsca uszkodzenia pogrupowane w zależności od wartości impedancji uszkodzenia, natomiast na rysunku 2 w zależności od zastosowanej wartości częstotliwości pomiarowej dla kabla XUHAKXS 1x70 mm² o długości 76 m, przy założonej odległości do miejsca uszkodzenia $x = 5$ m.



Rys. 1. Wyniki obliczeń numerycznych w określaniu odległości do miejsca uszkodzenia dla kabla XUHAKXS 1x70 mm² o długości 76 m, przy założonej odległości do miejsca uszkodzenia $x = 5$ m, pogrupowane według wartości impedancji uszkodzenia

Podobnie jak w przypadku analizowanego w części 1 kabla XRUHKXS 1x120 mm², także dla kabla XUHAKXS 1x70 mm² wzrost impedancji uszkodzenia pozwalał na określenie wartości średniej odległości do miejsca uszkodzenia z większą poprawnością. Przy założonej odległości do miejsca uszkodzenia $x = 5$ m wartość średniej odległości do miejsca uszkodzenia mieści się w zakresie od $\bar{x} = 5,6$ m przy impedancji uszkodzenia $Z_F \cong 1$ k Ω do $\bar{x} = 6,8$ m przy $Z_F \cong 1$ Ω . Uwzględniając wartość częstotliwości pomiarowej najdokładniejszą

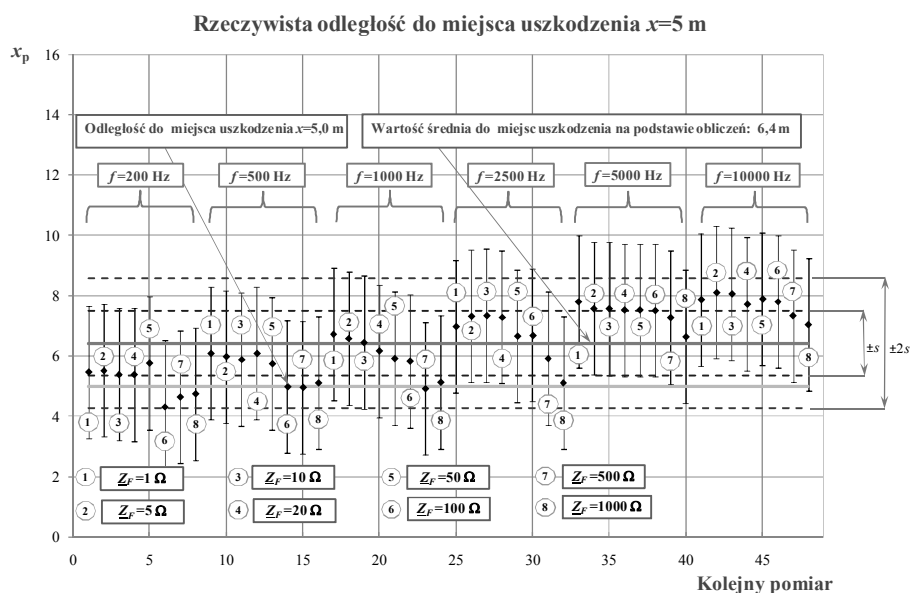
odległość do miejsca uszkodzenia otrzymano dla $f = 200$ Hz ($\bar{x} = 5,2$ m), natomiast przy $f = 10$ kHz wartość średniej pozwoliła na określenie odległości do miejsca uszkodzenia z najmniejszą dokładnością i wynosiła $\bar{x} = 7,7$ m (rys. 1, 2, tab. 1, 2). Wartość mediany podobnie jak w przypadku wartości średniej, pozwalała na określenie odległości do miejsca uszkodzenia z najmniejszym błędem przy wartości impedancji uszkodzenia $\underline{Z}_F \cong 1$ k Ω ($Me = 5, 1$ m), natomiast z największym dla $\underline{Z}_F \cong 1$ Ω ($Me = 6,9$ m). Rozpatrując wartość częstotliwości pomiarowej, najdokładniej odległość do miejsca uszkodzenia można było wyznaczyć przy $f = 200$ Hz ($Me = 5,4$ m), natomiast przy $f = 10$ kHz wartość mediany umożliwiła określenie odległości do miejsca uszkodzenia z najmniejszą dokładnością i wynosiła $Me = 7,8$ m (tab. 1, 2) [1–3].

Tabela 1. Wskaźniki statystyczne obliczeń numerycznych dla kabla XUHAKXS 1x70 mm² o długości 76 m, przy założonej odległości do miejsca uszkodzenia $x = 5$ m, z uwzględnieniem 6 różnych wartości częstotliwości pomiarowej dla każdej wartości impedancji uszkodzenia

	Impedancja uszkodzenia, \underline{Z}_F							
	1 Ω	5 Ω	10 Ω	20 Ω	50 Ω	100 Ω	500 Ω	1000 Ω
Średnia \bar{x} , m	6,8	6,9	6,8	6,7	6,6	6,2	5,8	5,6
Mediana Me , m	6,9	7,0	6,9	6,7	6,3	6,3	5,4	5,1
Średnia ucinana \bar{x}_{tk} , m	6,9	6,9	6,8	6,8	6,5	6,3	5,8	5,5
Poprawność pomiaru e_i , m	1,8	1,9	1,8	1,7	1,6	1,2	0,8	0,6
Rozstęp r_0 , m	2,4	2,6	2,7	2,3	2,1	3,5	2,7	2,3
Odchylenie standardowe z próby s , m	0,9	1,0	1,0	0,9	0,9	1,4	1,2	1,0
Współczynnik zmienności CV , %	13,8	14,5	15,3	14,1	14,2	22,4	20,8	17,0

Biorąc pod uwagę wartość średniej ucinanej ($k = 0,4$) dla wartości impedancji poprzecznej uszkodzenia $\underline{Z}_F \cong 1$ Ω jej wartość wyniosła $\bar{x}_{tk} = 6,9$ m i w porównaniu z rzeczywistą odległością do miejsca uszkodzenia ($x = 5$ m) była większa o 1,9 m. Najdokładniejszą wartość do miejsca uszkodzenia otrzymano przy wartości impedancji $\underline{Z}_F \cong 1$ k Ω , wtedy $\bar{x}_{tk} = 5,5$ m (tab. 1). Rozpatrując wartość czę-

stotliwości pomiarowej najlepszą poprawność pomiaru w określeniu odległości do miejsca uszkodzenia uzyskano przy częstotliwości $f = 200$ Hz, wówczas $\bar{x}_{ik} = 5,2$ m. Dalszy wzrost częstotliwości powodował zwiększanie się średniej ucinanej, co miało również wpływ na mniejszą poprawność pomiaru w określeniu odległości do miejsca uszkodzenia i przy wartości częstotliwości pomiarowej $f = 10$ kHz jej wartość była największa i wyniosła $\bar{x}_{ik} = 7,8$ m (tab. 2). Poprawność pomiaru, uwzględniając wartość impedancji poprzecznej uszkodzenia, mieści się w zakresie od $e_1 = 0,6$ m ($Z_F \cong 1$ k Ω) do $e_1 = 1,9$ m ($Z_F \cong 500$ Ω) (tab. 1), natomiast rozpatrując wartość częstotliwości pomiarowej od $e_1 = 0,2$ m ($f = 200$ Hz) do $e_1 = 2,7$ m ($f = 10$ kHz) (tab. 2). Biorąc pod uwagę rozstęp wyników pomiarów przy wartości impedancji poprzecznej uszkodzenia $Z_F \cong 50$ Ω jest on najmniejszy i wynosi $r_0 = 2,1$ m, a największy przy $Z_F \cong 100$ Ω , wtedy $r_0 = 3,5$ m (tab. 1). Rozpatrując rozstęp wyników pomiarów pod względem zastosowanej wartości częstotliwości pomiarowej można stwierdzić, że najmniejszy jest on przy częstotliwościach $f = 500$ Hz i $f = 10$ kHz – $r_0 = 1,1$ m, natomiast największy przy $f = 2500$ Hz, wówczas $r_0 = 2,2$ m (tab. 2) [1-3].



Rys. 2. Wyniki obliczeń numerycznych w określaniu odległości do miejsca uszkodzenia dla kabla XUHAKXS 1x70 mm² o długości 76 m, przy założonej odległości do miejsca uszkodzenia $x = 5$ m, pogrupowane według wartości częstotliwości pomiarowej

Odchylenie standardowe z próby analizując wartość impedancji poprzecznej uszkodzenia mieści się w zakresie od $s = 0,9$ m ($Z_F \cong 1$ Ω , $Z_F \cong 20$ Ω oraz $Z_F \cong 50$ Ω) do $s = 1,4$ m przy $Z_F \cong 100$ Ω , natomiast rozpatrując wartość często-

tliwości pomiarowej od $s = 0,3$ m przy $f = 5$ kHz do $s = 0,8$ m przy $f = 2,5$ kHz (rys. 1, 2, tab. 1, 2). Biorąc pod uwagę wartość współczynnika zmienności CV wyników pomiarów, można zauważyć, że najmniejsza jego wartość występuje przy $Z_F \cong 1 \Omega$ - $CV = 13,8$ %, a największa przy $Z_F \cong 100 \Omega$ - $CV = 22,4$ % (tab. 1). Uwzględniając wartość częstotliwości pomiarowej, wartość współczynnika CV mieści się w zakresie od $CV = 4,7$ % ($f = 5$ kHz, $f = 10$ kHz) do $CV = 11,8$ % ($f = 2,5$ kHz) [1–3].

Tabela 2. Wskaźniki statystyczne obliczeń numerycznych dla kabla XUHAKXS 1x70 mm² o długości 76 m, przy założonej odległości do miejsca uszkodzenia $x = 5$ m, z uwzględnieniem 8 różnych wartości impedancji uszkodzenia dla każdej wartości częstotliwości pomiarowej

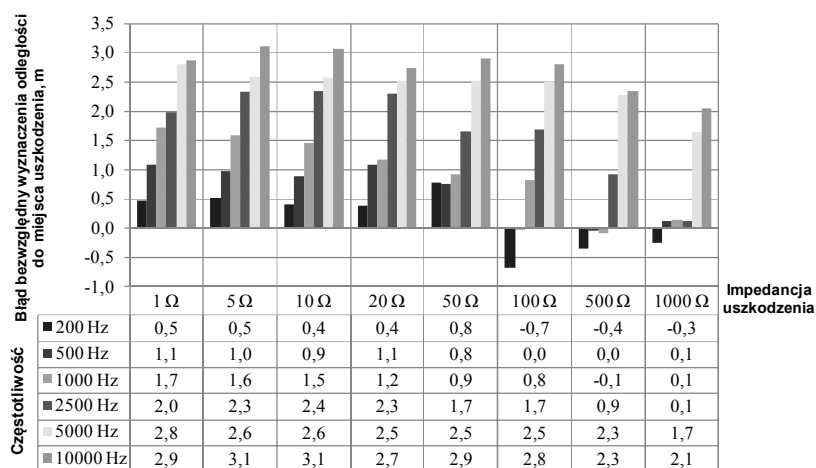
	Częstotliwość, f					
	200 Hz	500 Hz	1000 Hz	2500 Hz	5000 Hz	10000 Hz
Średnia \bar{x} , m	5,2	5,6	6,0	6,7	7,4	7,7
Mediana Me , m	5,4	5,8	6,1	6,8	7,5	7,8
Średnia ucinana \bar{x}_{tk} , m	5,2	5,6	6,0	6,8	7,5	7,8
Poprawność pomiaru e_j , m	0,2	0,6	1,0	1,7	2,4	2,7
Rozstęp r_0 , m	1,5	1,1	1,8	2,2	1,2	1,1
Odchylenie standardowe z próby s , m	0,5	0,5	0,7	0,8	0,3	0,4
Współczynnik zmienności CV , %	9,9	8,9	11,1	11,8	4,7	4,7

3. OSZACOWANIE BŁĘDÓW PRZY OKREŚLANIU ODLEGŁOŚCI DO MIEJSCA USZKODZENIA - $x = 5$ m

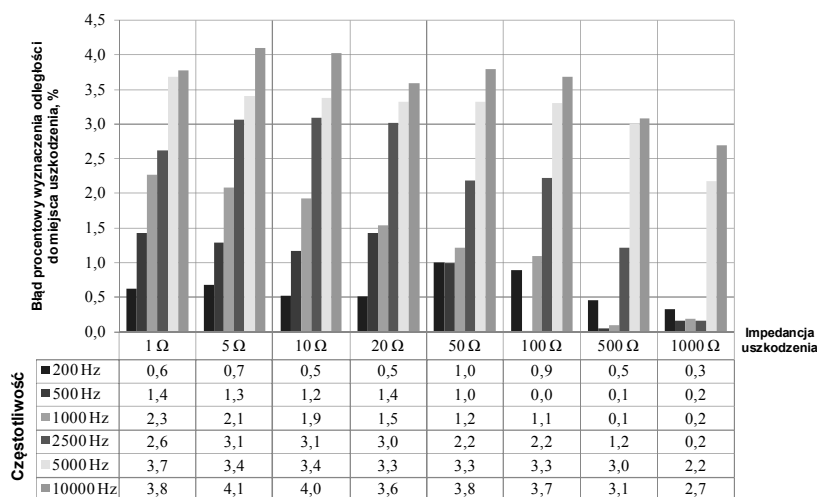
Na rysunku 3 przedstawiono wartość błędu bezwzględnego, natomiast na rysunku 4 błędu procentowego w określeniu odległości do miejsca uszkodzenia, dla kabla XUHAKXS 1x70 mm², przy założonej odległości $x = 5$ m [1-3]. Wartość błędu procentowego, w określeniu odległości do miejsca uszkodzenia, wyznaczono według zależności [4–8].

Przy impedancji uszkodzenia $Z_F \cong 1 \Omega$, rzeczywistej odległości do miejsca uszkodzenia $x = 5$ m, częstotliwością, przy której z najmniejszy błędem można było wyznaczyć odległość do miejsca uszkodzenia, jest wartość częstotliwości

pomiarowej $f = 200$ Hz, dla $Z_F \cong 5 \Omega - f = 200$ Hz, $Z_F \cong 10 \Omega - f = 200$ Hz, $Z_F \cong 20 \Omega - f = 200$ Hz, $Z_F \cong 50 \Omega - f = 500$ Hz, $Z_F \cong 100 \Omega - f = 500$ Hz, $Z_F \cong 500 \Omega - f = 500$ Hz oraz $Z_F \cong 1000 \Omega - f = 2500$ Hz (rys. 3, 4).



Rys. 3. Błąd bezwzględny wyznaczenia odległości do miejsca uszkodzenia w kablu XUHAKXS $1 \times 70 \text{ mm}^2$ o długości 76 m, przy założonej odległości do miejsca uszkodzenia $x = 5$ m, z uwzględnieniem wartości częstotliwości pomiarowej oraz wartości impedancji uszkodzenia



Rys. 4. Błąd procentowy wyznaczenia odległości do miejsca uszkodzenia kabla XUHAKXS $1 \times 70 \text{ mm}^2$ o długości 76 m, przy założonej odległości do miejsca uszkodzenia $x = 5$ m, z uwzględnieniem wartości częstotliwości pomiarowej oraz wartości impedancji uszkodzenia

4. WNIOSKI

W oparciu o wykonane badania eksperymentalne i obliczenia numeryczne dla kabla XUHAKXS 1x70 mm² o długości 76 m, przy zamodelowanej odległości do miejsca uszkodzenia $x = 5$ m, można wysunąć wnioski:

1. Wzrost wartości impedancji uszkodzenia pozwolił na wyznaczenie odległości do miejsca uszkodzenia z większą poprawnością (tab. 1, 2).
2. Poprawność pomiaru była korzystniejsza przy mniejszych wartościach częstotliwości pomiarowej. Wzrost wartości częstotliwości pomiarowych pogarszał poprawność pomiaru (tab. 1, 2).
3. Wskaźniki statystyczne wartości oczekiwanej: wartość średniej, mediany, oraz średniej ucinanej określenia odległości do miejsca uszkodzenia, uwzględniając wartości impedancji poprzecznej uszkodzenia oraz wartości częstotliwości pomiarowej, przyjmują jednakowe lub niewiele różniące się od siebie wartości. Każdy z tych wskaźników może być dobrą miarą wyznaczenia odległości do miejsca uszkodzenia (tab. 1, 2).
4. Otrzymane wartości odchylenia standardowego i rozstępu są wyższe w porównaniu z wartościami otrzymanymi dla kabla XRUHKXS 1x120 mm² o długości 37 m, przy rzeczywistej odległości do miejsca uszkodzenia $x = 7$ m, który został omówiony w części 1.
5. Najbardziej korzystnymi wartościami częstotliwości pomiarowej z zakresu od $f = 200$ Hz do $f = 10$ kHz, w określeniu odległości do miejsca uszkodzenia są wartości częstotliwości pomiarowej $f = 200$ Hz oraz $f = 500$ Hz (rys. 1 – 4, tab. 1, 2).

LITERATURA

- [1] Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik, Główny Urząd Miar, 1999.
- [2] Dietrich E., Schulze A., Metody statystyczne w kwalifikacji środków pomiarowych maszyn i procesów produkcyjnych, Notika System, Warszawa 2000.
- [3] PKN-ISO/IEC Guide 99. Międzynarodowy słownik metrologii. Pojęcia podstawowe i ogólne oraz terminy z nimi związane (VIM), Warszawa 2010.
- [4] Iżykowski J., Fault Location on Power Transmission Lines, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008.
- [5] Aloui T., Ben Amar F., Derbal N., Hadj Abdallah H., Real Time Prelocalization of Underground Single-Phase Cable Insulation Failure by Using the Sheath Behavior at Fault Point, Electric Power Systems Research, 81, pp. 1936– 1942, 2011. (12).
- [6] Tag Eldin E.M., Gilany M.I., Abdelaziz M.M., Ibrahim D.K., An Accurate Fault Location Scheme for Connected Aged Cable Lines in Double-Fed Systems, Electrical Engineering, 88, pp. 431–439, 2006. (13).

- [7] Bugajska A., Metody impedancyjne wstępnej lokalizacji uszkodzeń poprzecznych w kablach elektroenergetycznych, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2013.
- [8] Bugajska A., Estimation of Fault Transverse Impedance and the Distance to Fault Location in an Open Coaxial Power Cable on the Basis of Measurement of Input Impedances, International Review of Electrical Engineering (IREE), Vol. 8, N. 3, May-June 2013, pp.1091-1098.

**ASSESSMENT AND VERIFICATION OF IMPEDANCE METHOD
IDENTIFYING TRANSVERSE FAULTS
IN COAXIAL POWER CABLE. Part 2.**

The first part of the paper presents the results of the evaluation and verification of the method used for locating faults in XRUHKXS 1x120 mm² power cable. The second part determines the values of statistical indicators taking into account the transverse fault impedance in the range from 1 Ω to 1 k Ω and the values of measurement frequency in the range from $f = 200$ Hz to $f = 10$ kHz in XUHKXS 1x70 mm² power cable with the length $x = 76$ m and assumed distance to the fault location $x = 5$ m. The values of absolute and percentage errors were estimated with regard to the distance to fault location and the values of fault impedance and measurement frequency. The results were compared with the reflectometry method.

(Received: 8. 02. 2016, revised: 7. 03. 2016)