

WYZNACZANIE PRĄDU UPŁYWOWEGO PRZEZ POMIAR CZĄSTKOWYCH REZYSTANCJI IZOLACJI W WIELOBIEGUNOWYCH OBWODACH INSTALACJI

1. WSTĘP

Okresowe pomiary rezystancji izolacji należą do najczęściej wykonywanych badań instalacji i urządzeń elektroenergetycznych. W zależności od stopnia zagrożenia pożarem wykonuje się je w odstępach czasu nie przekraczających 5 lat lub 1 roku, a w warunkach ekstremalnego zagrożenia porażeniem – w mniejszych odstępach czasu. Sposób ich wykonywania w obwodach wielobiegunowych, niezmienny od dziesięcioleci, nie jest metodycznie poprawny. Wynik pomiaru jest mniejszy, czasem wielokrotnie mniejszy, niż rzeczywista wartość domniemanej wielkości mierzonej, np. rezystancji izolacji określonego bieguna względem ziemi. Jeśli mimo to jest on większy niż najmniejsza przepisana wartość, to stan urządzenia uznaje się za zadowalający. Porównuje się też, i słusznie, wyniki identycznie przeprowadzonych – i podobnie niepoprawnych – pomiarów przy kolejnych badaniach okresowych. Jednakowoż wyniki takich pomiarów nie są bezpośrednio przydatne do prawidłowej diagnozy stanu urządzenia i jego zachowania się w szczególnych warunkach ruchowych. Nie są też użyteczne przy wyznaczaniu wartości cząstkowych prądów upływowych, płynących z każdego bieguna do ziemi.

Są dziś dostępne mierniki prądu upływowego i prądu różnicowego wykorzystujące zasadę przekładnika Ferrantiego. Prąd różnicowy, obejmujący składową czynną i pojemnościową, uwzględniający symetryzację prądów w układach wielofazowych, mierzony bądź obliczany przy różnym zestawie załączonych urządzeń jest sumą wektorową prądów upływowych określonych urządzeń. Poprawnie przeprowadzone pomiary [1, 2] dają wyniki miarodajne przy doborze wyłączników różnicowoprądowych, przy analizie wybiórczości ich działania i badaniu zachowania się ich w trudniejszych warunkach użytkowania.

Wyniki te są jednak ograniczenie przydatne, jeśli chodzi o zagrożenie pożarowe ze strony prądów upływowych. Rzecz w tym, iż w układach wielofazowych następuje symetryzacja prądów upływowych [1, 2] i mała wartość prądu różnicowego, zmierzona na początku obwodu, nie jest równoznaczna z małymi wartościami cząstkowych prądów upływowych, płynących przez cząstkowe rezystancje izolacji.

W krańcowym przypadku, przy dowolnie ale równomiernie obniżonym poziomie rezystancji izolacji, płyną duże cząstkowe prądy upływowe, a prąd różnicowy jest równy zero i nie pobudza nawet najczulszego wyłącznika różnicowoprądowego.

Kiedy cząstkowe prądy upływowe płynące przez cząstkowe rezystancje izolacji mają dużą wartość, wtedy składowe pojemnościowe prądów upływowych na ogół są pomijalnie małe. Jest to słuszne zwłaszcza w odniesieniu do tras przewodowych. Dopuszczalne staje się zatem operowanie tylko składowymi czynnymi tych prądów, związanymi jednoznacznie z wartościami cząstkowych rezystancji izolacji doziemnej.

2. UŁOMNA PROCEDURA DOTYCHCZASOWYCH POMIARÓW

Nawet w najprostszym przypadku, w trzyprzewodowym obwodzie jedno-fazowym o napięciu U_0 , wartość składowej czynnej I_R prądu upływowego nie jest jednoznacznie związana z wynikiem pomiaru rezystancji izolacji r_{1E} (rys. 1). O wartości prądu I_R decyduje cząstkowa rezystancja izolacji doziemnej przewodu fazowego R_{1E}

$$I_R = \frac{U_0}{R_{1E}} \quad (1)$$

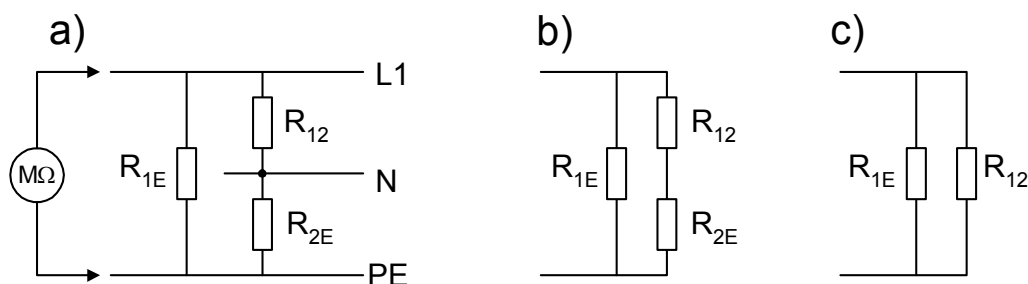
Tymczasem, jak wynika z rys. 1, wynikiem pomiaru rezystancji izolacji jest wartość mniejsza

$$r_{1E} = \frac{R_{1E} \cdot (R_{12} + R_{2E})}{R_{1E} + R_{12} + R_{2E}}, \quad (2)$$

jeśli podczas pomiaru przewód neutralny nie jest uziemiony lub wartość jeszcze mniejsza

$$r_{1E} = \frac{R_{1E} \cdot R_{12}}{R_{1E} + R_{12}}, \quad (3)$$

jeśli przewód neutralny podczas pomiaru pozostaje uziemiony.



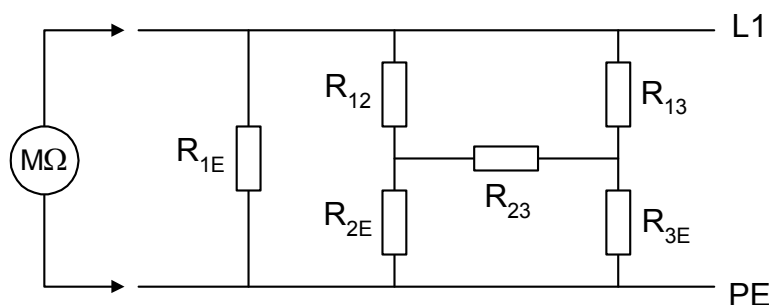
Rys. 1. Pomiar „rezystancji izolacji doziemnej” przewodu fazowego L1 w obwodzie trzyprzewodowym: a) sposób przyłączenia megaomomierza; b) mierzona rezystancja, jeśli przewód N nie jest uziemiony; c) mierzona rezystancja, jeśli przewód N jest uziemiony (L1 -przewód fazowy, N- przewód neutralny, PE –przewód ochronny)

W obwodzie o większej liczbie biegunów sytuacja jest bardziej złożona.

Każdorazowo mierzy się jakąś rezystancję wynikającą z naturalnego powiązania wszystkich wchodzących w grę cząstkowych rezystancji izolacji doziemnej i międzybiegunowej, a nie wielkość podawaną w protokole pomiarów. W obwodzie zawierającym n biegunów nieuziemionych, liczba cząstkowych rezystancji izolacji, które mogą wpływać na wynik każdego pomiaru rezystancji izolacji doziemnej i międzybiegunowej wynosi:

$$N = \frac{(n+1)!}{2(n-1)!} \quad (4)$$

np. 6 rezystancji cząstkowych w obwodzie o $n = 3$ (rys. 2), ale już 15 rezystancji cząstkowych w obwodzie o $n = 5$.



Rys. 2. Rzeczywisty układ cząstkowych rezystancji izolacji przy „pomiarze rezystancji izolacji doziemnej R_{1E} ” w obwodzie o liczbie $n = 3$ (obwód 3-fazowy bez przewodu neutralnego albo z przewodem neutralnym uziemionym podczas pomiaru)

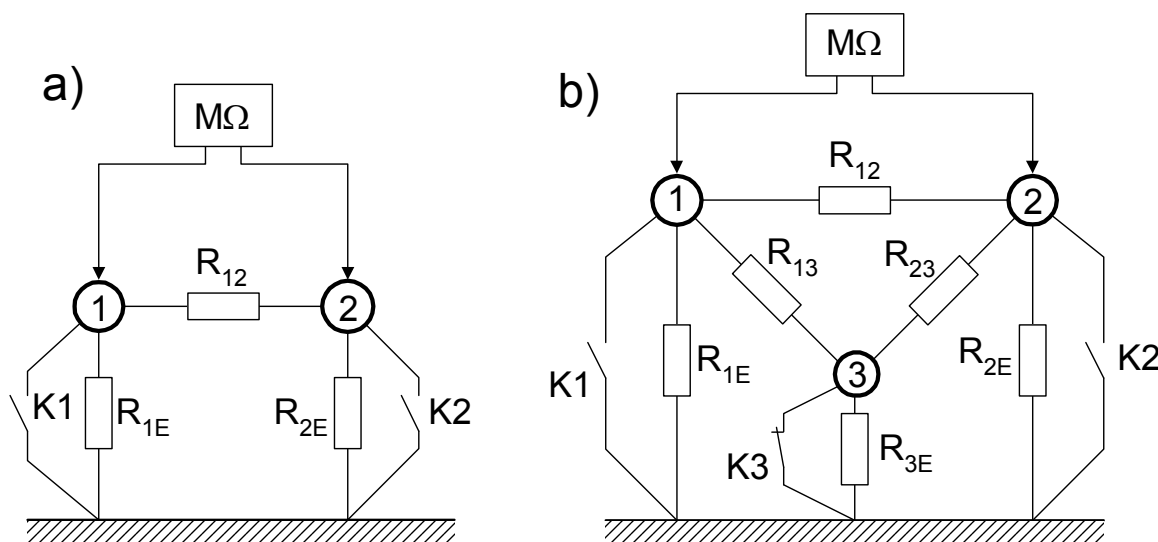
W braku specjalnego wyposażenia do poprawnego pomiaru rezystancji izolacji sytuację taką można świadomie akceptować zwłaszcza, jeśli kolejne pomiary przeprowadza się identycznie, jeśli wszyscy postępują jednakowo i rozumieją przyjętą konwencję oraz jej skutki. Wyniki kolejnych pomiarów stają się porównywalne, a najmniejsza dopuszczalna wartość rezystancji izolacji może być ustalona dla mierzonej fikcyjnej wielkości. Rzeczywista wartość prądu upływowego wynika jednak z praw elektrotechniki i może różnić się, nawet wielokrotnie, od oszacowań wynikających z pomierzonych wartości „rezystancji izolacji doziemnej”.

Zachowując dotychczasową metodykę pomiarów rezystancji izolacji można by w obwodzie o N rezystancjach cząstkowych wykonać największą możliwą liczbę pomiarów niezależnych, tzn. takich, że wynik żadnego z nich nie daje się uzyskać przez przetwarzanie wyników pozostałych pomiarów; ta liczba również wynosi N . Należałoby następnie – poprzez analizę wzajemnych powiązań rezystancji cząstkowych – napisać układ N równań wiążących wyniki pomiarów z wartościami rezystancji cząstkowych, przy czym zwiększaniu liczby N odpowiadają coraz bardziej złożone równania. Rozwiązaniem układu równań byłyby poszukiwane wartości cząstkowych rezystancji izolacji. Droga ta jest tak zawiła i pracochłonna, że nie jest wykorzystywana.

3. RACJONALIZACJA POMIARU REZYSTANCJI CZĄSTKOWYCH

W obwodzie o N rezystancjach cząstkowych nie uniknie się wykonania N pomiarów, można jednak przeprowadzić je w sposób udoskonalony, ułatwiający przetwarzanie wyników, również błyskawiczne przetwarzanie elektroniczne. W tym celu podczas każdego z pomiarów należy uziemić wszystkie bieguny, do których nie jest aktualnie przyłączony megaomomierz i dzięki temu – radykalnie zmniejszyć liczbę cząstkowych rezystancji izolacji wpływających na wynik każdego z pomiarów. Im większa liczba nieuziemiionych biegunów n , tym większą korzyść daje takie postępowanie.

Wymaganą sekwencję pomiarów oraz przetwarzanie ich wyników przeprowadza miernik mikroprocesorowy, do którego przyłącza się wszystkie (n) bieguny czynne układu oraz ziemię (E) bądź przewód ochronny PE. Układ sterujący wykonuje kolejno N pomiarów, przykładając każdorazowo napięcie pomiarowe między bieguny i - j , przy czym $i \in (1 \div n)$, $j \in (1 \div n)$, $i \neq j$, oraz między każdy z biegunów i ziemię, zarazem zwierając z ziemią wszystkie pozostałe bieguny. Kolejne wyniki są wprowadzane do pamięci, po zakończeniu przewidzianej sekwencji pomiarów są przetwarzane, po czym wyświetla się wartości wszystkich cząstkowych rezystancji izolacji.



Rys. 3. Zasada pomiaru cząstkowych rezystancji izolacji w obwodach wielobiegunowych – pomiar przy przyłączeniu megaomomierza do biegunów 1 i 2: a) w obwodzie dwubiegunowym (otwarte łączniki K1 i K2); b) w obwodzie trzybiegunowym (otwarte łączniki K1 i K2, zamknięty łącznik K3)

Procedura ta zostanie niżej wyjaśniona na przykładzie prostych obwodów o dwóch ($n = 2$) i o trzech ($n = 3$) biegunach nieuziemiionych (rys. 3), ale podobny tok

rozumowania odnosi się do obwodów o dowolnej liczbie biegunów. Opis matematyczny wygodniej przedstawić operując konduktancją izolacji, a nie rezystancją. Zastosowane oznaczenia są następujące:

- r_{ij} (r_{iE}) – zmierzona wartość rezystancji izolacji między biegunami $i-j$ (między biegunem i a ziemią),
- g_{ij} (g_{iE}) – odpowiadające im wartości konduktancji izolacji,
- R_{ij} (R_{iE}) – rzeczywista wartość cząstkowej rezystancji izolacji między biegunami $i-j$ (między biegunem i a ziemią),
- G_{ij} (G_{iE}) – odpowiadające im wartości konduktancji izolacji.

W obwodzie o dwóch biegunach nieuziemionych ($n = 2$) pomiary konduktancji „izolacji doziemnej każdego z biegunów” – przy zwartym z ziemią drugim biegunie – dają następujące wyniki:

$$g_{1E} = G_{1E} + G_{12} \quad g_{2E} = G_{2E} + G_{12}, \quad (5)$$

natomiast wynikiem trzeciego pomiaru, konduktancji „izolacji międzybiegunowej” przy otwartych obu łącznikach (rys. 3a), jest wartość

$$g_{12} = G_{12} + \frac{G_{1E} \cdot G_{2E}}{G_{1E} + G_{2E}} \quad (6)$$

Z tych trzech równań można wyznaczyć wszystkie trzy rzeczywiste wartości cząstkowych konduktancji izolacji. Poszukiwanie wartości konduktancji izolacji międzybiegunowej G_{12} prowadzi do równania kwadratowego

$$\left(\frac{G_{12}}{g_{12}} \right)^2 - 2 \left(\frac{G_{12}}{g_{12}} \right) + \left[\left(\frac{g_{1E}}{g_{12}} + \frac{g_{2E}}{g_{12}} \right) - \left(\frac{g_{1E}}{g_{12}} \cdot \frac{g_{2E}}{g_{12}} \right) \right] = 0, \quad (7)$$

z którego można wyznaczyć

$$G_{12} = g_{12} \left(1 \pm \sqrt{1 - D_{12}} \right) \quad \text{gdzie} \quad D_{12} = \left(\frac{g_{1E}}{g_{12}} + \frac{g_{2E}}{g_{12}} \right) - \left(\frac{g_{1E}}{g_{12}} \cdot \frac{g_{2E}}{g_{12}} \right) \quad (8)$$

Można następnie obliczyć – z równań (5) – rzeczywiste wartości cząstkowych konduktancji izolacji doziemnej G_{1E} oraz G_{2E} i/lub ich odwrotności - rzeczywiste wartości cząstkowych rezystancji izolacji doziemnej R_{1E} oraz R_{2E} . Z dwóch możliwych rozwiązań równania kwadratowego (7) odrzuca się to, które daje ujemną wartość którejkolwiek z obliczanych konduktancji bądź rezystancji izolacji.

Podobnie, w obwodzie o trzech biegunach nieuziemionych ($n = 3$) pomiary konduktancji „izolacji doziemnej każdego z biegunów” – po zwarcie z ziemią pozostałych – dają następujące rezultaty:

$$g_{1E} = G_{1E} + G_{12} + G_{13} \quad g_{2E} = G_{2E} + G_{23} + G_{21} \quad g_{3E} = G_{3E} + G_{13} + G_{23} \quad (9)$$

natomiast wynikiem pomiaru konduktancji „izolacji międzybiegunowych” są wartości:

przy uziemionym biegunie 1
$$g_{23} = G_{23} + \frac{(G_{2E} + G_{12})(G_{3E} + G_{13})}{(G_{2E} + G_{12}) + (G_{3E} + G_{13})} \quad (10)$$

przy uziemionym biegunie 2
$$g_{13} = G_{13} + \frac{(G_{3E} + G_{23})(G_{1E} + G_{12})}{(G_{3E} + G_{23}) + (G_{1E} + G_{12})} \quad (11)$$

przy uziemionym biegunie 3 (rys. 3b)
$$g_{12} = G_{12} + \frac{(G_{1E} + G_{13})(G_{2E} + G_{23})}{(G_{1E} + G_{13}) + (G_{2E} + G_{23})} \quad (12)$$

Wyniki pomiarów pozwalają napisać układ 6 prostych równań o 6 niewiadomych. Z zależności (9) wyznacza się dla każdego bieguna konduktancję izolacji doziemnej

$$G_{1E} = g_{1E} - G_{12} - G_{13} \quad G_{2E} = g_{2E} - G_{13} - G_{12} \quad G_{3E} = g_{3E} - G_{13} - G_{23} \quad (13)$$

Otrzymane wyrażenia wstawia się do wzorów (10, 11, 12), w których pozostanie tylko jedna niewiadoma. Wzory (9÷12) określające zależności między poszczególnymi konduktancjami można przekształcić do równania kwadratowego o postaci ogólnej

$$\left(\frac{G_{ij}}{g_{ij}} \right)^2 - 2 \left(\frac{G_{ij}}{g_{ij}} \right) + D_{ij} = 0 \quad (14)$$

Rzeczywiste wartości cząstkowych konduktancji izolacji międzybiegunowych G_{ij} , oraz doziemnych G_{iE} wyznacza się z zależności

$$G_{ij} = g_{ij} \left(1 \pm \sqrt{1 - D_{ij}} \right) \quad \text{oraz} \quad G_{iE} = g_{iE} - \sum_{j \neq i} G_{ij}, \quad (15)$$

$$\text{w których} \quad D_{ij} = \left[\left(\frac{g_{iE}}{g_{ij}} + \frac{g_{jE}}{g_{ij}} \right) - \left(\frac{g_{iE}}{g_{ij}} \cdot \frac{g_{jE}}{g_{ij}} \right) \right] \quad (16)$$

Po wyznaczeniu konduktancji izolacji międzybiegunowych G_{ij} (G_{12} , G_{13} , G_{23}) przystępuje się do wyznaczenia konduktancji izolacji doziemnych G_{iE} (G_{1E} , G_{2E} , G_{3E}) za pomocą wzorów (13). Dopiero wtedy uzyskuje się pewność, które wartości G_{ij} obliczone ze wzoru (15) są właściwe, te mianowicie, które prowadzą do nieujemnych wartości wszelkich cząstkowych konduktancji i rezystancji izolacji.

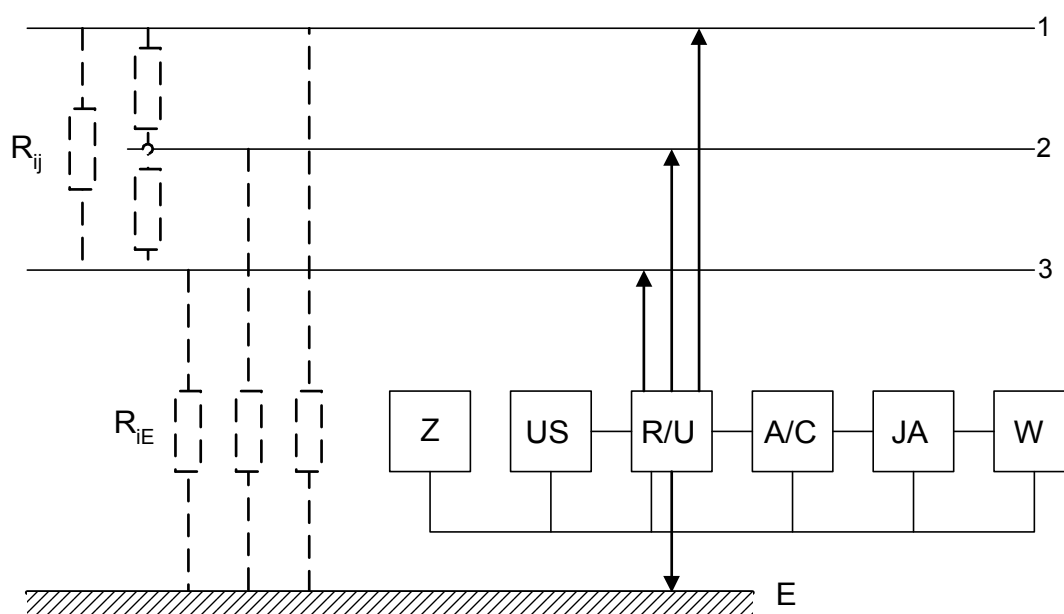
4. KONCEPCJA MIERNIKA

Mikroprocesorowy miernik cząstkowych rezystancji izolacji z zasilaczem bateryjnym Z (rys. 4) zawiera układ sterujący US, który wykonuje – poprzez przetwornik R/U (rezystancja/napięcie) – sekwencję N kolejnych pomiarów:

- przykładając wymagane przy pomiarze rezystancji izolacji napięcie pomiarowe stałe, ze źródła o przepisanej charakterystyce zewnętrznej, między dwa bieguny obwodu lub między jeden z biegunów a ziemię,
- zwierając z ziemią wszystkie pozostałe bieguny układu.

Wyniki poszczególnych pomiarów, przetworzone z postaci analogowej w cyfrową w przetworniku A/C, podaje się do kolejnych rejestrów jednostki arytmetycznej JA, w której są obrabiane. Po wprowadzeniu ostatniego wyniku na wyświetlaczu W ukazują się:

- ♦ wyniki wszystkich N pomiarów domniemanych rezystancji izolacji doziemnych r_{iE} oraz międzybiegunowych r_{ij} ,
- ♦ rzeczywiste wartości wszystkich N cząstkowych rezystancji izolacji doziemnych R_{iE} oraz międzybiegunowych R_{ij} , niezbędne do odpowiedzialnej diagnozy stanu obwodu i jego zachowania się w szczególnych warunkach ruchowych,
- ♦ rzeczywiste wartości prądów upływowych poszczególnych biegunów.



Rys. 4. Schemat blokowy mikroprocesorowego miernika cząstkowych rezystancji izolacji i cząstkowych prądów upływowych (objaśnienia w tekście)

Układ miernika cząstkowych rezystancji izolacji, wykorzystującego program komputerowy LabVIEW, istnieje i działa od kilku lat [3, 4]. Rozwinięciem pomysłu jest przedstawiony w referacie miernik cząstkowych prądów upływowych. Dysponując wartościami cząstkowych rezystancji izolacji doziemnych R_{iE} można, po

wprowadzeniu do pamięci miernika wartości napięć doziemnych, obliczyć i wyświetlić wszystkie rzeczywiste wartości cząstkowych prądów upływowych płynących poprzez izolację, a ściślej – ich składowe czynne (1). W razie potrzeby można je dowolnie dodawać, tworząc sumy algebraiczne bądź wektorowe.

5. WNIOSKI

Wartość prądu różnicowego bądź prądu upływowego, którą operuje się przy doborze i analizie warunków pracy wszelkich zabezpieczeń różnicowoprądowych nie jest – ogólnie rzecz biorąc – miarodajna dla oceny zagrożenia pożarowego ze strony upływowych prądów doziemnych.

Parametrem dobrze charakteryzującym zagrożenie pożarowe jest wartość składowej czynnej prądów upływowych płynących przez cząstkowe rezystancje izolacji. Przedstawiony w referacie miernik mikroprocesorowy umożliwia łatwy i poprawny pomiar tych wielkości. Miernik jest również przydatny przy lokalizowaniu uszkodzeń w układach wielobiegunowych i diagnozowaniu stanu urządzeń dla innych celów.

LITERATURA

1. Musiał E.: Pomiar prądu upływowego instalacji i urządzeń elektrycznych. W: [Materiały] Ogólnopolski Kurs Techniczno-Szkoleniowy „Pomiary kontrolne w urządzeniach elektroenergetycznych o napięciu znamionowym do 1 kV”. Poznań, 5-6 czerwca oraz 16-17 października 1997. Poznań: EKO-TECH, Inst. Elektroenerg. P. Pozn., SEP Oddz. Pozn. 1997 s. 1-13.
2. Musiał E.: Prąd upływowy i prąd różnicowy w instalacjach elektrycznych. Charakterystyka, znaczenie, pomiary. Ogólnopolski Kurs „Pomiary kontrolne w urządzeniach elektroenergetycznych. Sposoby, wymagania, nieprawidłowości”, EKO-TECH, Poznań, 11-12 marca 1999. Materiały konferencyjne, s. 1-13.
3. Roskosz R., Skiba A.: Modyfikacja pomiarów poszczególnych izolacji w kablach wielożyłowych. APE'95, Gdańsk, 11-12 czerwca 1995. Materiały konferencyjne, s. 231-238.
4. Roskosz R., Świsulski D.: Practical approaches for measurement of the insulation resistance of the multicore cables. XIV IMEKO World Congress 1997, Tampere, Finland. Proceedings, s. 171-176.

Dane bibliograficzne:

Musiał E., Roskosz R.: **Wyznaczanie prądu upływowego przez pomiar cząstkowych rezystancji izolacji w wielobiegunowych obwodach instalacji.** W: [Materiały Konferencyjne] XII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Bezpieczeństwo elektryczne”, Wrocław, [wrzesień] 1999. Inst. Energoelekt. Polit. Wroc., SEP Oddz. Wrocław. 1999, t. I, s. 415-423.