

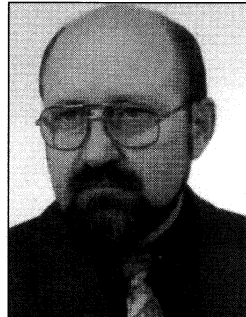
Marek WOŁOSZYK

POLITECHNIKA GDAŃSKA

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I AUTOMATYKI, KATEDRA MIERNICTWA ELEKTRYCZNEGO

Błędy w autokalibracyjnych pomiarach prądu uziemienia przy użyciu cęgów prądowych

Dr inż. Marek Wołoszyk



Uzyskał dyplom magistra inżyniera na Wydz. Elektrycznym Politechniki Gdańskiej w 1978r. w zakresie przetwarzania i użytkowania energii elektrycznej. Tytuł doktora nauk technicznych uzyskał na tym samym wydziale w 1988r. Obecnie pracuje jako adiunkt w Katedrze Miernictwa Elektrycznego Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Główny kierunek działalności naukowej związany jest ze statycznymi i udarowymi metodami pomiarów uziemień.

Streszczenie

We współczesnych miernikach rezystancji uziemienia normą staje się możliwość kontroli wybranego uziemienia pracującego w systemie uziemień bez odłączania go od tego systemu. Prąd płynący przez uziemienie mierzy się w takim przypadku przy użyciu przetwornika cęgowego. Wymagane znaczne rozmiary „okna” cęgów wymuszają stosowanie przetworników o zakresach pomiarowych wielokrotnie większych od wartości mierzonych prądów, co może prowadzić do powstawania nadmiernych błędów pomiarowych. Znaczną poprawę dokładności można uzyskać poprzez zastosowanie pomiaru autokalibracyjnego, w którym wykonuje się kilka pomiarów etapowych, a następnie wartość prądu mierzonego wyznacza się na drodze obliczeniowej.

Abstract

Measurement of earthing impedance (resistance) of complex earthing system without disconnecting the tested earthing from the system is getting more and more popular. In that case current flowing through the earthing is taken with a clamp current transformer. Required large dimensions of the clamp „window” make it necessary to use a transformer of high current range, very exceeding the actual current value. Such situation may result in unacceptable high measurement errors. The accuracy can be improved with autocalibrating technique.

1. Wstęp

Prawidłowo wykonywane pomiary parametrów uziemień, a także właściwa interpretacja uzyskanych wyników, są niezwykle istotnymi elementami zapewnienia bezpieczeństwa obsługi oraz poprawnej pracy wielu urządzeń elektrycznych.

Najbardziej rozpowszechnioną metodą pomiaru rezystancji uziemienia jest metoda techniczna [1]. Większość współczesnych mierników wykorzystuje tę zasadę z różnymi modyfikacjami [2, 3]. W miernikach tych mierzy się prąd płynący przez uziemienie oraz wywołany przezeń spadek napięcia w odniesieniu do strefy ustalonego potencjału. Ostateczny wynik pomiaru wyznacza się w mikrokontrolerze zgodnie z prawem Ohma.

Pomiar spadku napięcia na uziemieniu pracującym w obrębie dużego obiektu przemysłowego utrudniają zwykle zakłócenia o częstotliwości sieciowej pochodzące od prądów błądzących [3].

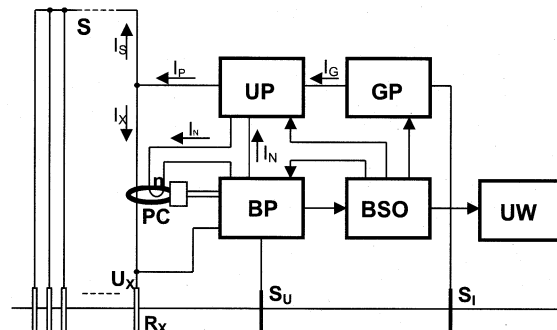
Wyznaczanie wartości prądu pomiarowego płynącego przez badane uziemienie nie stwarza większych trudności, pod warunkiem, iż na czas pomiaru rozkręca się złącze kontrolne przerywając tym

samym połączenie uziemianego obiektu z uziomem. Powoduje to jednak konieczność wyłączenia z ruchu urządzeń, których uziemienie są kontrolowane, oraz dużą pracochłonność pomiarów.

Niektóre mierniki stwarzają możliwość pomiaru prądu płynącego przez uziemienie bez rozkręcania złącza kontrolnego. Wykorzystuje się do tego celu cęgowy przetwornik prądu [2], które jednakże muszą objąć swym „oknem” dosyć gruby pręt lub płaskownik, stosowane zazwyczaj do połączenia instalacji z uziomem.

2. Pomiar wybranego uziemienia pracującego w systemie

Wyznaczanie impedancji uziemienia pracującego w systemie uziemień bez odłączania tego uziemienia od systemu wykonuje się zwykle przy użyciu metody technicznej. Przykładowy układ realizujący tę metodę przedstawiono na rys. 1 [4].



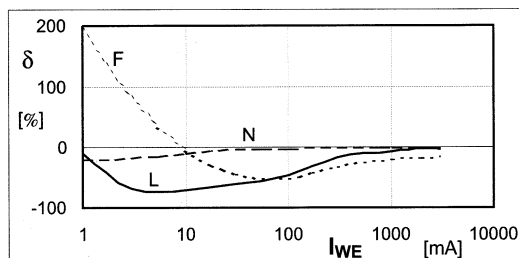
Rys. 1. Pomiar rezystancji wybranego uziemienia R_X pracującego w systemie uziemień S bez odłączania uziemienia od tego systemu (bez uzwojenia n – układ klasyczny, z uzwojeniem dodatkowym n – układ autokalibracyjny). Oznaczenia: PC – przetwornik cęgowy, BP – blok pomiarowy, UP – układ przelączający, GP – generator prądu, BSO – blok sterująco-obliczeniowy, UW – układ wyjściowy, S_U , S_I – sondy pomocnicze napięciowa i prądowa, I_G – prąd generowany, I_N – prąd odniesienia, I_P – prąd pomiarowy, I_S – prąd odpływający przez system uziemień, I_X – prąd uziemienia badanego

Spadek napięcia na badanym uziemieniu wyznaczany jest w odniesieniu do strefy ustalonego potencjału, w której umieszcza się pomocniczą sondę napięciową S_U . Prąd pomiarowy I_P , generowany w mierniku, doprowadzony jest do przewodu łączącego badane uziemienie R_X z systemem S. Prąd ten rozplywa się na dwie części: prąd I_X płynący przez badane uziemienie oraz I_S – prąd odprowadzany do gruntu przez cały system uziemień S (za wyjątkiem R_X). Wartość prądu I_X mierzonego za pośrednictwem przetwornika cęgowego PC w znacznym stopniu zależy od wielkości systemu uziemień i jest zwykle znacznie mniejsza od wartości generowanego prądu pomiarowego I_P .

Znaczne rozmiary okna wymuszają stosowanie przetworników cęgowych o dość dużych zakresach prądowych, zazwyczaj wielokrotnie większych od generowanego prądu pomiarowego. Jednocześnie prąd badany osiąga stosunkowo niskie wartości. Dla dużych systemów uziemień prąd I_X przepływający przy takich pomiarach przez badane uziemienie może mieć wartość nawet pojedynczych miliamperów. Pomiar tak małych prądów w stosunku do zakresu pomiarowego przetwornika cęgowego może prowadzić do powstawania niedopuszczalnie dużych błędów pomiarowych.

Dla określenia, z jakiego rzędu błędami należy się liczyć przy wyborczych pomiarach uziemień pracujących w rozległych systemach, wykonano wstępne badania kilku typów cęgowych prze-

kładników prądowych. Przebadoano m. in. przetwornik typu 80i-400 firmy Fluke o zakresie 2... 400A i rozmiarach okna 30x50mm, a także przetwornik UC1-500 firmy Lumel o średnicy okna $\varnothing 65\text{mm}$ wykorzystywany często w cęgowych pomiarach uziemień. Stwierdzone wartości błędów przetwarzania odniesione do wartości mierzonej dla prądów wejściowych z zakresu 1mA... 3A przedstawiono na rys. 2. Dla porównania podano również błędy precyzyjnego przetwornika firmy Norma-LEM o zakresie 50mA... 100A i średnicy okna (12mm). Przetwornik ten pracuje poprawnie nawet przy prądach o wartości poniżej 10 mA, jednakże z uwagi na małą średnicę okna nie nadaje się on do pomiarów uziemień.



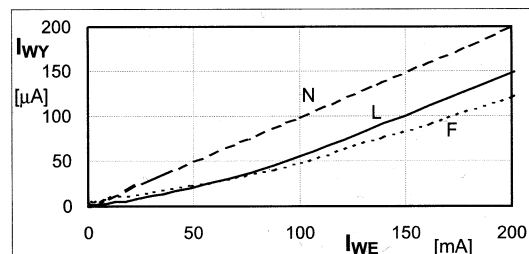
Rys. 2. Błąd przetwarzania odniesiony do wartości mierzonej w funkcji wartości prądu mierzonego dla przykładowych cęgowych przetworników prądu firm: Fluke (F), Norma-LEM (N) oraz Lumel (L)

W cęgach, jak w każdym przekładniku prądowym występuje błąd wynikający z konieczności zapewnienia przepływu magnesującego niezbędnego do zachowania strumienia magnetycznego [5]. Wartość tego błędu gwałtownie wzrasta dla małych wartości prądu w uzwojeniu pierwotnym. Metody zmniejszania wartości omawianego błędu wymagające wyraźnego zwiększenia masy przekładnika [6, 7] z oczywistych względów nie mają zastosowania do przekładników cęgowych. Metody redukcji czy też kompensacji prądu magnesującego przy użyciu układów elektronicznych [8] dają dobre efekty dla prądów pierwotnych rzędu 0,5A jednakże poniżej tych wartości ich skuteczność jest bardzo problematyczna. Pomiary rezystancji uziemienia przy użyciu mierników z integralnym zasilaniem wykonuje się dla prądów pomiarowych rzędu kilkuset mA, jednakże kontrolując uziemienia pracujące w rozległych systemach należy z wystarczającą dokładnością wyznaczać nawet prądy w wartościach pojedynczych mA.

3. Pomiary autokalibracyjne

Zastosowanie w mierniku rezystancji uziemienia mikrokontrolera umożliwi matematyczną obróbkę wyników. Pozwala to na znaczną poprawę dokładności wyznaczania wartości prądu poprzez zastosowanie pomiaru autokalibracyjnego [9, 10]. Można w tym celu wykorzystać przetwornik cęgowy z dodatkowym przewodem przeprowadzonym przez jego okno (uzwojenie n na rys. 1) [10].

Pomiar autokalibracyjny przebiega sekwencyjnie. W kolejnych krokach mierzy się sumę prądu uziemienia oraz prądu w przewodzie dodatkowym będących w fazie zgodnej, a także w fazach przeciwnych. Wyznacza się również wartość prądu wymuszanego w przewodzie dodatkowym (uzwojeniu n) bez przepływu prądu przez uziemienie badane. Odcinek charakterystyki wokół takiego punktu można z dobrą dokładnością aproksymować linią prostą. Linia ta nie będzie się pokrywać z charakterystyką teoretyczną przetwornika, a więc nie będzie ona przechodzić przez punkt zerowy wykresu jak również jej nachylenie może odbiegać od nachylenia charakterystyki w znamionowym zakresie pracy przetwornika. Oznacza to występowanie znacznych błędów addytywnych i multiplikatywnych dla tak aproksymowanej charakterystyki przetwarzania. Przykładowe charakterystyki przetworników cęgowych w zakresie bardzo małych prądów mierzonych przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Charakterystyki przetwarzania w zakresie bardzo małych prądów dla przykładowych przetworników cęgowych firmy Norma-LEM (N), Lumel (L) oraz Fluke (F)

Wartości prądu badanego za pośrednictwem przetwornika cęgowego I_X oraz prądu odniesienia I_N wyznaczanego bezpośrednio w bloku pomiarowym BP można w postaci cyfrowej zapisać jako

$$N_X = k \cdot I_X \quad N_n = c \cdot I_n \quad (1)$$

gdzie: c – współczynnik przetwarzania a/c w bloku BP,

k – współczynnik przetwarzania a/c w bloku BP wraz z przetwornikiem cęgowym PC.

Pomiar autokalibracyjny wykonywany jest w kilku etapach. Wszystkie pomiary etapowe obarczone są znacznymi błędami. Łączne błędy całego toru pomiarowego (w tym przetwornika cęgowego) wokół wybranego punktu pracy można sprowadzić do składowej addytywnej i multiplikatywnej. Wartości tych błędów składowych nie są znane natomiast wiadomo, iż są one bardzo zbliżone w kolejnych etapach pomiaru. Warunkiem jest w tym przypadku nie rozwieranie cęgów w czasie pomiaru, a więc zachowanie takiej samej szczeliny w ciągu całego cyklu pomiarowego. Wyniki etapowe zawierają takie same elementy, a więc wartości prądów oraz błędów składowych, powiązane w różnych kombinacjach dla poszczególnych etapów. Znając opis tych kombinacji oraz wyniki pomiarów etapowych można wyeliminować na drodze obliczeniowej większość błędów.

W najprostszym trybie autokalibracji „A” wykonuje się tylko dwa pomiary etapowe: 1 – dla sumy prądów odniesienia I_N oraz badanego I_X (prądy w fazie zgodnej), 2 – dla prądu odniesienia z wyłączonym prądem uziemienia I_X . Wyniki tych pomiarów etapowych w postaci cyfrowej opisane są zależnościami

$$N_1 = k \cdot [(I_N + I_X + \Delta I_a) \cdot (1 + \delta_k) \pm \Delta I_{d1}] \quad (2)$$

$$N_2 = k \cdot [(I_N + \Delta I_a) \cdot (1 + \delta_k) \pm \Delta I_{d2}]$$

gdzie: ΔI_a – błąd addytywny reprezentujący przesunięcie prostej aproksymującej względem charakterystyki idealnej,

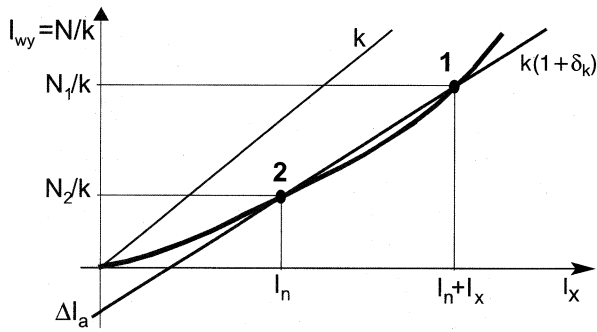
δ_k – błąd multiplikatywny wynikający z nachylenia prostej aproksymującej innego niż dla charakterystyki idealnej (k),

$\Delta I_{d(1,2)}$ – błąd dyskretyzacji w etapie (1, 2,...), związany z przyjętym zakresem przetwarzania a/c.

Błędy dyskretyzacji we wzorach (2) zapisano ze znakiem \pm gdyż w odróżnieniu od błędów addytywnych i multiplikatywnych mogą one przyjmować różne znaki w poszczególnych pomiarach etapowych.

Ilustrację graficzną trybu autokalibracji „A” (w przesadnych proporcjach) z prostą aproksymującą przechodzącą przez punkty 1 i 2 charakterystyki przedstawiono na rys. 4.

Wynik pomiaru prądu I_X ustala się w mikrokontrolerze na drodze obliczeniowej zgodnie z zależnością



Rys. 4. Graficzna ilustracja trybu autokalibracji „A”

$$N_A = N_N \cdot \frac{N_1 - N_2}{N_2} \quad (3)$$

Podstawiając do powyższej zależności wzory (1) i (2) oraz przyjmując najbardziej niekorzystny układ błędów dyskretyzacji w pomiarach etapowych można wyznaczyć wynik pomiaru obciążony maksymalnym błędem jako

$$N_A = c \cdot \left[I_X \left(1 - \frac{\Delta I_a}{I_N + \Delta I_a} \right) \pm \frac{2 \cdot \Delta I_d \cdot I_N}{(I_N + \Delta I_a) \cdot (1 + \delta_k)} \right] \quad (4)$$

przy czym zakłada się, że

$$\Delta I_a \ll (I_N + \Delta I_a) \cdot (1 + \delta_k) \quad (5)$$

co jest nietrudne do spełnienia.

Jeśli ponadto spełnione są warunki

$$\Delta I_a \ll I_N \quad \text{oraz} \quad \delta_k \ll 1 \quad (6)$$

to wówczas

$$N_A \approx c \cdot I_X \left(1 - \frac{\Delta I_a}{I_N} \pm \frac{2 \cdot \Delta I_d}{I_X} \right) \quad (7)$$

W powyższym wzorze wyraźnie widać dwa składniki błędu, przy czym składnik $(\Delta I_a / I_N)$ reprezentuje błąd metody, zaś $(2 \cdot \Delta I_d / I_X)$ wynika z rozdzielczości przetwarzania a/c.

Kolejny tryb autokalibracji „B” wymaga wykonania trzech pomiarów etapowych, przy czym w etapie trzecim mierzy się różnicę prądów I_N oraz I_X (prądy w przeciwnym kierunku).

$$\begin{aligned} N_1 &= k \cdot [(I_N + I_X + \Delta I_a) \cdot (1 + \delta_k) \pm \Delta I_{d1}] \\ N_2 &= k \cdot [(I_N + \Delta I_a + \Delta I_n) \cdot (1 + \delta_k) \pm \Delta I_{d2}] \\ N_3 &= k \cdot [(I_N - I_X + \Delta I_a) \cdot (1 + \delta_k) \pm \Delta I_{d3}] \end{aligned} \quad (8)$$

gdzie: ΔI_n – błąd aproksymacji dla prądu I_N

Ilustrację graficzną trybów autokalibracji „B” i „C” przedstawiono na rys. 5.

Dla autokalibracji typu „B” wycinek charakterystyki, na którym leżą punkty 1, 2 i 3 odpowiadające pomiarom prądów $I_N + I_X$, I_N oraz $I_N - I_X$ aproksymowany jest prostą przechodzącą przez punkty 1 i 3. Oprócz błędów addytywnego ΔI_a oraz multiplikatywnego δ_k występujących we wszystkich pomiarach etapowych powstaje więc dla pomiaru prądu odniesienia I_N pewien dodatkowy błąd aproksymacji ΔI_n . Błędy te zobrazowane są na rysunku.

Wynik pomiaru wyznaczany jest według wzoru

$$N_B = \frac{N_N}{2} \cdot \frac{N_1 - N_3}{N_2} \quad (9)$$

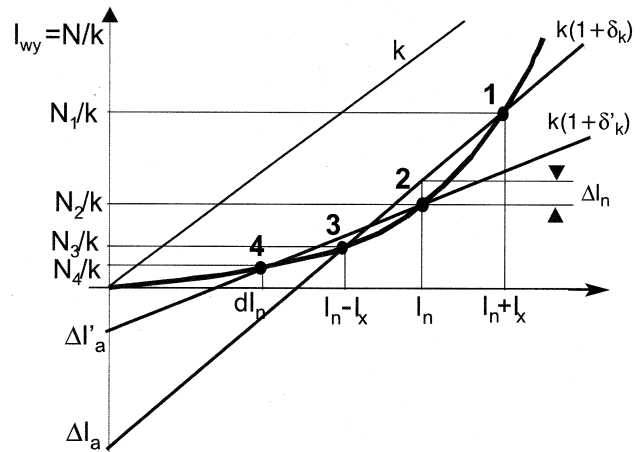
Postępując analogicznie jak dla trybu „A” można wyznaczyć wynik pomiaru obciążony błędem maksymalnym jako

$$N_B = c \cdot \left[I_X \left(1 - \frac{\Delta I_a + \Delta I_n}{I_N + \Delta I_a + \Delta I_n} \right) \pm \frac{\Delta I_d \cdot I_N}{(I_N + \Delta I_a + \Delta I_n) \cdot (1 + \delta_k)} \right] \quad (10)$$

Przy spełnionych założeniach (6) oraz dla $\Delta I_n \ll I_N$ można napisać, że wynik dla trybu „B” wynosi

$$N_B \approx c \cdot I_X \left(1 - \frac{\Delta I_a}{I_N} \pm \frac{\Delta I_d}{I_X} \right) \quad (11)$$

Jak widać z powyższego wzoru błąd metody w trybie autokalibracji „B” jest taki sam jak w „A” natomiast maksymalny błąd wynikający z rozdzielczości przetwarzania a/c jest dwukrotnie mniejszy.



Rys. 5. Graficzna ilustracja trybów autokalibracji „B” i „C”

Trzeci tryb autokalibracji „C” wymaga wykonania czterech pomiarów częściowych, przy czym etap czwarty wykonywany jest przy prądzie odniesienia o innej wartości niż w pozostałych etapach. Wyniki pomiarów częściowych w postaci cyfrowej można w tym trybie opisać zależnościami

$$\begin{aligned} N_1 &= k \cdot [(I_N + I_X + \Delta I_a) \cdot (1 + \delta_k) \pm \Delta I_{d1}] \\ N_2 &= k \cdot [(I_N + \Delta I'_a) \cdot (1 + \delta'_k) \pm \Delta I_{d2}] \\ N_3 &= k \cdot [(I_N - I_X + \Delta I_a) \cdot (1 + \delta_k) \pm \Delta I_{d3}] \\ N_4 &= k \cdot [(d \cdot I_N + \Delta I'_a) \cdot (1 + \delta'_k) \pm \Delta I_{d4}] \end{aligned} \quad (12)$$

gdzie: ΔI_a , δ_k – błędy addytywny i multiplikatywny dla etapów 1 i 3 (aproksymowanych prostą 1-3 z rys. 5),

$\Delta I'_a$, δ'_k – błędy addytywny i multiplikatywny dla etapów 2 i 4 (aproksymowanych prostą 2-4 z rys. 5),

d – współczynnik podziału prądu odniesienia w etapie 4 ($d < 1$).

Wynik pomiaru oblicza się w mikrokontrolerze według wzoru

$$N_C = \frac{N_N}{2} \cdot \frac{N_1 - N_3}{N_2 - N_4} \quad (13)$$

W tym trybie autokalibracji przyjmuje się dwie różne proste aproksymujące. Jedna z nich, przechodząca przez punkty charakterystyki 1 i 3, służy do interpretacji wyników uzyskanych dla pomiaru prądów $I_N + I_X$ oraz $I_N - I_X$. Związane są z nią błędy: addytywny ΔI_a i multiplikatywny δ_k . Druga prosta, przechodząca przez punkty 2 i 4 charakterystyki, służy do interpretacji wyników etapowych uzyskanych dla pomiaru dwóch różnych wartości prądu odniesienia I_N oraz $d \cdot I_N$. Błędy addytywny i multiplikatywny mają w tym przypadku nieco inne wartości niż dla etapów 1 oraz 3 i wynoszą odpowiednio $\Delta I'_a$ i δ'_k . Zagadnienie to zostało zilustrowane graficznie na rys. 5.

Postępując analogicznie jak dla trybów „A” i „B” oraz dla $\delta_k \cdot \delta'_k \ll 1$ i $(\delta'_k)^2 \ll 1$ można wyznaczyć wynik pomiaru autokalibracyjnego typu „C” obciążony błędem maksymalnym jako

$$N_C = \frac{c}{1-d} \cdot [I_X (1 + \delta_k - \delta'_k) \pm \frac{\Delta I_d}{(1 + \delta_k)}] \quad (14)$$

Jeżeli zachodzi $\delta_k \ll 1$ to wówczas wynik pomiaru można opisać zależnością

$$N_C \cong \frac{c}{1-d} \cdot I_X \cdot [1 + (\delta_k - \delta'_k) \pm \frac{\Delta I_d}{I_X}] \quad (15)$$

Należy zaznaczyć, iż w tym przypadku nie jest wymagane spełnienie założeń $\Delta I_d \ll 1$ ani $\Delta I'_d \ll 1$.

Jak widać z zależności (15) w trybie „C” błąd dyskretyzacji jest na takim samym poziomie jak dla trybu „B” natomiast błąd metody nie zawiera składnika związanego z błędem addytywnym. Błąd metody wynika w tym przypadku jedynie z różnych współczynników nachylenia prostych aproksymujących przyjętych dla pomiarów etapowych 1 i 3 (δ_k) oraz pomiarów 2 i 4 (δ'_k).

4. Porównanie błędów dla różnych trybów autokalibracji

Porównując zależności (7), (11) i (15) można stwierdzić, iż błąd pomiaru wynikający ze stosunku błędu dyskretyzacji ΔI_d przetwornika a/c do wartości prądu mierzonego I_X może być dla trybu autokalibracji typu „A” dwukrotnie większy niż dla trybów „B” i „C”. Wynika z tego, że tryb „A” będzie dawał najgorsze wyniki przy pomiarze bardzo małych prądów, dla których stosunek ($\Delta I_d / I_X$) może osiągać znaczące wartości. W zakresie nieco większych prądów dokładności uzyskiwane dla trybów „A” i „B” będą porównywalne. Dla autokalibracji zarówno typu „A” jak i „B” rolę prądu odniesienia może pełnić prąd pomiarowy, co jest bardzo proste i wygodne w realizacji.

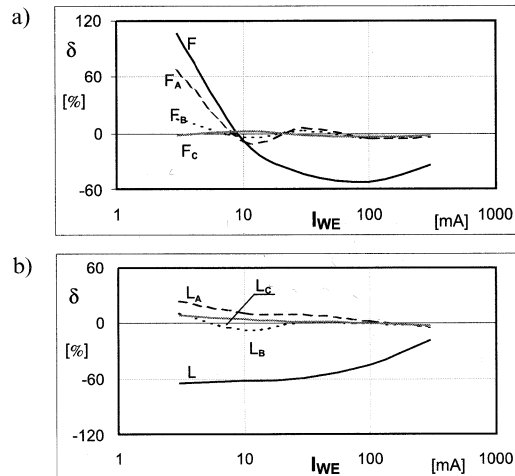
Błąd dyskretyzacji dla trybów „B” i „C” jest podobny natomiast różni się zdecydowanie w tych sposobach pomiaru błędy wynikające ze składowych addytywnych i multiplikatywnych. Składowa addytywna stanowiąca główne źródło błędu w trybie „B” nie wpływa na dokładność pomiaru typu „C”. Jest to tym bardziej korzystne, że przyjęte założenie $\Delta I_d \ll 1$ nie zawsze może być do końca spełnione. Błąd pomiaru z wykorzystaniem autokalibracji typu „C” wynika w znacznym stopniu z różnicy błędów multiplikatywnych dla pomiarów etapowych 1 i 3 oraz 2 i 4. Przy odpowiednio dobranych do mierzonego prądu I_X wartościach prądu odniesienia I_N oraz współczynnika podziału d można w pomiarach typu „C” uzyskać bardzo dobre dokładności, jednakże należy pamiętać, że wiąże się to z dosyć kłopotliwą koniecznością generowania prądów odniesienia o dwóch różnych wartościach.

Aby zilustrować efekt zastosowania autokalibracji, na rys. 6 przedstawiono charakterystyki błędów przebadanych przetworników cęgowych (wraz z całym torem pomiarowym) uzyskane przy pomiarze przedstawionymi metodami. Podane wartości błędów wyznaczano dla prądu mierzonego $I_X = 3 \dots 300$ mA przy prądzie odniesienia $I_N = 1$ A oraz współczynnika podziału $d = 0,5$.

Jak widać na powyższym rysunku, zastosowanie autokalibracji umożliwia wielokrotne zmniejszenie błędów pomiarowych w stosunku do pomiarów przy małych prądach przetwornikami cęgowymi o znacznych rozmiarach okna.

5. Podsumowanie

Przedstawiony tryb postępowania wykorzystujący zasadę pomiarów autokalibracyjnych pozwala na znaczną poprawę dokładności pomiaru małych prądów przy użyciu cęgów prądowych. W efekcie polepsza to dokładność wyznaczania rezystancji uzie-



Rys. 6. Błąd pomiaru prądu przy użyciu przetworników cęgowych firmy Fluke (a) oraz Lumel (b) bez autokalibracji (krzywe: F, L) i przy zastosowaniu trzech trybów autokalibracji ($F_A, B, C; L_A, B, C$) dla prądu odniesienia $I_N = 1$ A i współczynnika podziału $d = 0,5$

mienia w szczególnie niekorzystnych warunkach pomiaru, a więc dla rozbudowanych systemów uziemień i to bez rozłączania złączy kontrolnych na czas pomiarów.

Projektując urządzenie pomiarowe należy wziąć pod uwagę zarówno zakres wyznaczanych wartości prądu jak i wymaganą dokładność pomiaru gdyż przyjęcie konkretnego typu autokalibracji wiąże się ze stopniem rozbudowy układu pomiarowego.

Autokalibrację typu „A” można zrealizować w niezwykle prostym układzie, jednakże dla bardzo małych prądów jej dokładność będzie ograniczona. Prawie dwukrotną poprawę dokładności w tym zakresie można uzyskać poprzez rozbudowę układu przelazającego i zastosowanie autokalibracji typu „B”. Najlepsze efekty daje wykorzystanie autokalibracji typu „C”, jednakże wymaga ona rozbudowy układu wykonawczego umożliwiającej generowanie prądów odniesienia o różnych wartościach. Wybór konkretnego rozwiązania powinien być dostosowany do zakładanych parametrów urządzenia pomiarowego.

Literatura

- [1] H. Markiewicz: *Bezpieczeństwo w elektroenergetyce*; WNT, Warszawa, 1999.
- [2] LEM Electrical Grounding Techniques, *Unilap GEO X*, Materiały firmowe LEM Instruments Inc., 2001.
- [3] M. Wołoszyk: *Wyznaczanie impedancji uziemienia w obecności zakłóceń metodą podharmonicznej*. Krajowy Kongres Metrologii KKM'2001, Warszawa, 24-27.06.2001.
- [4] M. Wołoszyk: *Wyznaczanie impedancji uziemienia z autokalibracyjnym pomiarem prądu*, V Szkoła-Konferencja „Metrologia Wspomagana Komputerowo” MWK'01, Rynia k/Warszawy, 21-24.05.2001
- [5] A. Koszmider, J. Olak, Z. Piotrowski: *Przekładniki prądowe*; WNT, Warszawa, 1985.
- [6] N. L. Kusters, W. J. M. Moore: *The compensated current comparator; a new reference standard for current-transformer calibrations in industry*, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. IM-13, June 1964.
- [7] N. E. Mironjuk, I. E. Popow: *Calculating the errors of measurement of current transformers*, Sov. Electr. Eng., vol. 53, 1982.
- [8] D. Slomovitz: *Electronic error reduction system for clamp-on probes and measuring current transformers*, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 49, no. 6, December 2000
- [9] F. E. Wagner: *Process Measurement by Selfcalibrating Measuring Systems*; World Congress IMEKO IX, Berlin, 1982, vol. V/II, str. 150-160.
- [10] M. Wołoszyk: *Sposób i układ do autokalibracyjnego selektywnego wyznaczania impedancji uziemienia pracującego w systemie uziemień bez odłączania tego uziemienia od systemu*; Zgłoszenie patentowe, Polska, 2000.