ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1994
Seria: ELEKTRYKA z. 137 Nr kol. 1244

Damian PAWELCZYK
Elektrownia Blachownia
Mariusz PRZYBYLSKI
Zbigniew WYSOCKI

IMPEDANCYJNY ALGORYTM LOKALIZACJI ZWARĆ W LINIACH NAPOWIETRZNYCH UWZGLĘDNIAJĄCY NASYCENIE PRZEKŁADNIKÓW PRĄDOWYCH

Streszczenie. Artykuł rozpatruje możliwość wykorzystania metod impedancyjnych do cyfrowej lokalizacji zwarć w liniach napowietrznych w przypadku głębokiego nasycenia przekładników prądowych. Wiąże się to z testowaniem dedykowanego algorytmu obliczania parametrów składowej podstawowej, bazującego na "oknie pomiarowym" o zmiennej długości.

AN IMPEDANCE ALRORITHM FOR OVERHEAD LINE FAULT LOCATION IN THE CASE OF THE CURRENT TRANSFORMERS SATURATION

Summary. The paper deals with the possibility of the usage of methods for the digital fault location in overhead lines in the case of CTs deep saturation. It is connected with the testing of dedicated algorithm for fundamental frequency component estimation which is based on variable data window.

EIN IMPEDANZALGORITHMUS DER KURZSCHLUSSORTUNG IN ÜBERTRAGUNGSLEITUNGEN MIT BERÜCKSICHTIGUNG VON SÄTTIGUNG DER STROMWANDLER

Zusammenfassung. In dem Beitrag werden die Möglichkeiten der Benutzung von Impedanzmethoden für digitalen Kurzschlussortung in Übertragungsleitungen bei starken Sättigung der Stromwandler dargestellt. Dies ist mit der Untersuchung von besonderen Algorithmus für Berechnung der Parameter der dominanten Schwingung verbunden. Der Algorithmus verwendet ein spezielles "Meßfenster" mit wechselnder Länge.

1. WPROWADZENIE

Pierwszorzędny dla impedancyjnych, cyfrowych algorytmów obliczania odległości do miejsca zwarcia [1], [2], [3] w napowietrznych liniach elektroenergetycznych, jest problem dokładnego wyznaczenia parametrów (amplituda, faza) składowej podstawowej na podstawie dyskretnych wartości przebiegów zwarciowych linii. Zagadnienie to nabiera szczególnego znaczenia w przypadku, gdy mamy do czynienia z deformacją analizowanuch przebiegów.

Do głównych czynników powodujących odkształcenie zwarciowych przebiegów linii od fali sinusoidalnej należy zaliczyć:

- sygnały pasożytnicze (wyższe harminiczne, składowa aperiodyczna, składowe oscylacyjne),
- nasycenie przekładników pomiarowych linii napowietrznej.

Tematyka określania składowej podstawowej z przebiegów zawierających sygnały pasożytnicze była na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat przedmiotem badań wielu naukowców, które zaowocowały licznymi użytecznymi algorytmami, przedstawionymi w pracach [4], [5], [6], natomiast problem ekstrakcji składowej podstawowej z przebiegów zdeformowanych głębokim nasyceniem przekładnika prądowego jest, zdaniem autorów, dotąd nie rozwiązany.

Nasuwa się zatem spostrzeżenie, iż możliwość korzystania z metod impedancyjnych dla lokalizacji zwarć powodujących nasycenie przekładników prądowych zależy od poprawnego rozwiązania tego problemu.

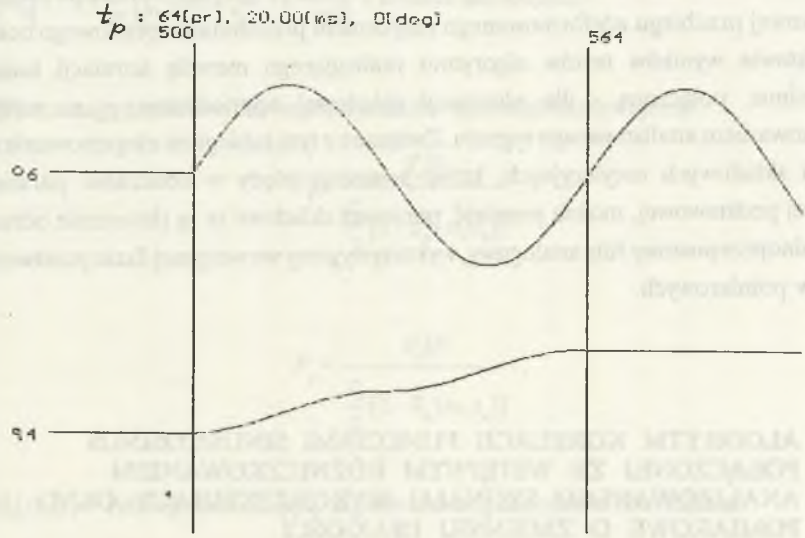
2. PROBLEMATYKA WYZNACZANIA SKŁADOWEJ PODSTAWOWEJ Z DYSKRETNYCH PRZEBIEGÓW PRĄDOWYCH ZDEFORMOWANYCH NASYCENIEM PRZEKŁADNIKA

Cyfrowe wyznaczanie składowej podstawowej prądu z przebiegów zdeformowanych nasyceniem przekładnika jest trudne z uwagi na konieczność wykonywania obliczeń na podstawie próbki z wąskiego przedziału czasowego Δt, w którym zachodzi jeszcze poprawna transformacja prądu zwarciowego. W ekstremalnie trudnych warunkach zwarciowych czas poprawnej transformacji przekładnika, liczony od momentu zaistnienia zwarcia, może być ograniczony do kilku milisekund [7].

Z powyższych rozważań wynika, że dla wyznaczenia składowej podstawowej z przebiegu zdeformowanego nasyceniem przekładnika przydatne mogą być tylko te algorytmy, które spełniają wymaganie wyznaczenia co najmniej kilku ustalonych wartości amplitudy i fazy na podstawie próbki wyłącznie z przedziału czasowego Δt.

Charakterystycznym parametrem algorytmów pomiarów cyfrowych jest okno pomiarowe, określane (przy danej częstotliwości próbkowania f_p) liczbą próbek N niezbędnych do obliczenia interesującej nas wielkości. Należy podkreślić, że wyniki obliczeń danej wielkości z przebiegu zawierającego zaburzenie związane np. ze zwarciem przechodzą stan nieustalony (rys. 1), którego czas trwania t_p jest wprost równy długości okna pomiarowego T:

$$t_p = T = N\frac{1}{f_p} . \tag{1}$$



Rys. 1. Stan przejściowy wyników obliczania amplitudy dla procedury o stałym oknie pomiarowym

Fig. 1. Illustration of transient state in calculated amplitude for procedure based on constant data window

Można zatem powiedzieć, że spełnienie powyższego wymagania narzuca algorytmom, analizującym przebiegi zdeformowane masyceniem przekładnika prądowego, warunek *sine qua non* odnośnie do długości okna pomiarowego

$$T < \Delta t . \tag{2}$$

Biorąc pod uwagę, że minimalne wartości czasu Δt wynoszą kilka ms, spełnienie warunku (2) mogą praktycznie zagwarantować jedynie algorytmy wykorzystujące do obliczeń okno pomiarowe o zmiennej długości [8], [5]. W algorytmach tych długość okna pomiarowego, mierzona liczbą próbek, rośnie liniowo poczynając od wartości 1. Takie podejście wpływa na znaczne zmniejszenie czasu t_p trwania stanu przejściowego obliczeń, związanego ze skokową zmianą analizowanego przebiegu, pod warunkiem że początek ekspandującego okna pomiarowego przypada na próbkę początkującą zaburzenie.

Należy zauważyć w tym miejscu, że program lokalizacji zwarć, w którym może znaleźć zastosowanie algorytm estymacji składowej podstawowej działający na ekspandującym oknie pomiarowym, zawiera procedurę wyznaczania początku zwarcia.

Przydatność idei ekspandującego okna pomiarowego do obliczania składowej podstawowej przebiegu zdeformowanego nasyceniem przekładnika prądowego oceniono na podstawie wyników testów algorytmu realizującego metodę korelacji funkcjami sinus/cosinus, połączoną - dla eliminacji składowej aperiodycznej - ze wstępnym różniczkowaniem analizowanego sygnału. Związane z tym zabiegiem eksponowanie ewentualnych składowych oscylacyjnych, które powodują błędy w obliczaniu parametrów składowej podstawowej, można pominąć, ponieważ składowe te są skutecznie odrzucane przez dolnoprzepustowy filtr analogowy, wykorzystywany we wstępnej fazie przetwarzania sygnałów pomiarowych.

3. ALGORYTM KORELACJI FUNKCJAMI SINUS/COSINUS POŁĄCZONEJ ZE WSTĘPNYM RÓŻNICZKOWANIEM ANALIZOWANEGO SYGNAŁU WYKORZYSTUJĄCY OKNO POMIAROWE O ZMIENNEJ DŁUGOŚCI

Obliczenie amplitudy i fazy wybranej harmonicznej ze złożonego przebiegu metodą korelacji polega na określeniu tzw. współczynników korelacji. W przypadku korelacji między funkcjami sinus/cosinus ze wstępnym różniczkowaniem, bazującej na zmiennym oknie pomiarowym, współczynniki korelacji opisane są następującymi równaniami

$$F_c = \frac{\int\limits_{t-t_x}^{t} x'(\tau)\cos\left[\omega_1\left(\tau - t + \frac{t_x}{2}\right)\right]d\tau}{\int\limits_{t-t_x}^{t} \cos^2\left[\omega_1\left(\tau - t + \frac{t_x}{2}\right)\right]d\tau} = \frac{Y_c(t)}{G_c(t_x)}, \tag{3}$$

$$F_s = \frac{\int_{t-t_x}^{t} x'(\tau)\sin\left[\omega_1\left(\tau - t + \frac{t_x}{2}\right)\right]d\tau}{\int_{t-t_x}^{t} \sin^2\left[\omega_1\left(\tau - t + \frac{t_x}{2}\right)\right]d\tau} = \frac{Y_s(t)}{G_s(t_x)}, \tag{4}$$

w których:

t_x - czas liczony od chwili wystąpienia zwarcia,

$x'(t)$ - pochodna przetwarzanego sygnału,

$\sin\left[\omega_1\left(\tau - t + \frac{t_x}{2}\right)\right]$, $\cos\left[\omega_1\left(\tau - t + \frac{t_x}{2}\right)\right]$ - funkcje korelujące.

Wyznaczając mianowniki współczynników korelacji otrzymujemy

$$F_c = \frac{Y_c(t)}{\frac{t_x}{2}[1 - S_a(\omega_1 t_x)]}, \tag{5}$$

$$F_s = \frac{Y_s(t)}{\frac{t_x}{2}[1 - S_a(\omega_1 t_x)]}, \tag{6}$$

gdzie $S_a(\omega_1 t_x)$ - funkcja bramkująca argumentu $\omega_1 t_x$ określona równaniem

$$S_a(\omega_1 t_x) = \frac{\sin(\omega_1 t_x)}{\omega_1 t_x}. \tag{7}$$

Amplitudę i fazę składowej podstawowej sygnału x(t) określają wzory

$$A_1 = \sqrt{F_c^2 + F_s^2}, \tag{8}$$

$$\alpha_1 = \operatorname{arctg}\frac{F_c}{F_s} - \left[\omega_1\left(t - \frac{t_x}{2} + \frac{\pi}{2}\right)\right]. \tag{9}$$

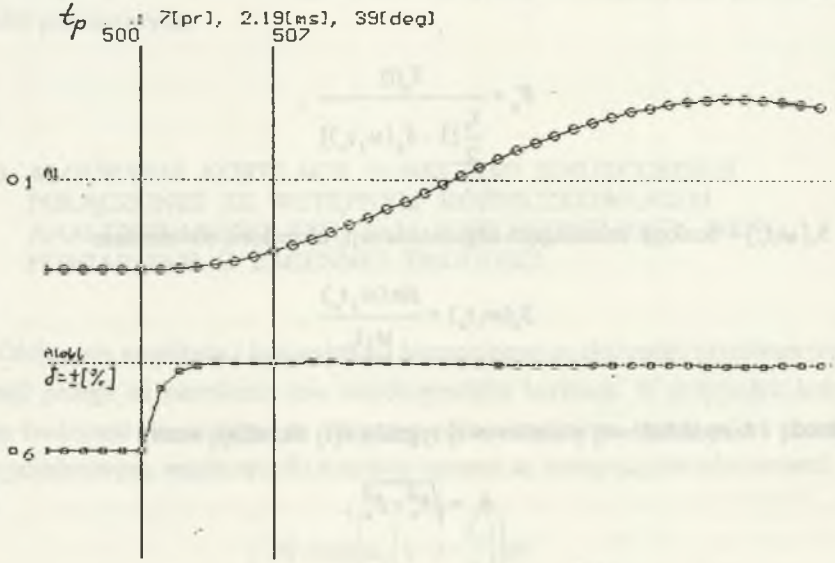
3.1. Testy algorytmu

Algorytm korelacji ze wstępnym różniczkowaniem doprowadzono do postaci cyfrowej [9], a następnie poddano testom polegającym na określaniu czasu t_p trwania stanu nieustalonego wyników obliczania składowej podstawowej z przebiegów zdeformowanych, uzyskiwanych analitycznie oraz z rejestracji prądu strony wtórnej nasyconego składową aperiodyczną przekładnika.

Przebiegi analityczne generowano cyfrowo opierając się na równaniu

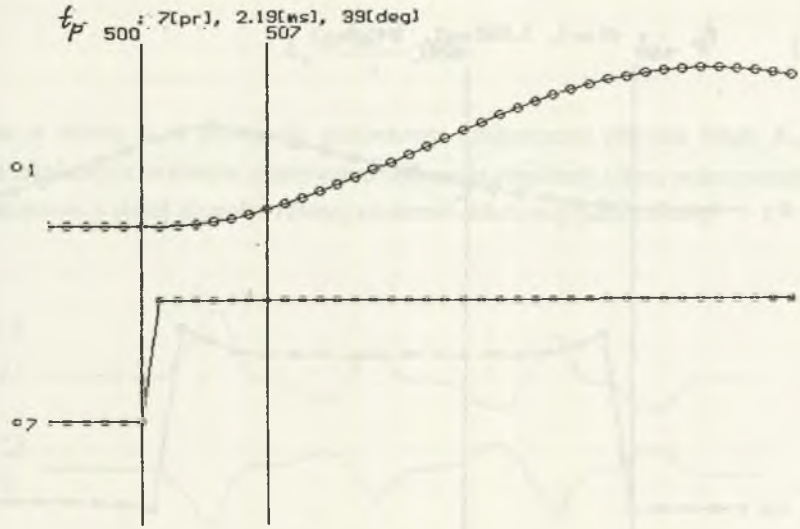
$$x(t) = A_1 \cos(\alpha_1) e^{-\frac{t}{T}} - A_1 \cos(\omega_1 t + \alpha_1) \ . \tag{10}$$

Wyniki testów, zilustrowane rysunkami 2 ÷ 5, wykazują, że czasy t_p nie przekraczają kilku ms i w związku z tym można zaryzykować stwierdzenie, iż zaprezentowany algorytm rozwiązuje w jakimś stopniu problem estymacji składowej podstawowej z przebiegów zniekształconych głębokim nasyceniem przekładnika prądowego i tym samym umożliwia stosowanie w takich przypadkach zwarć metod impedancyjnych do obliczania odległości zwarciowej.



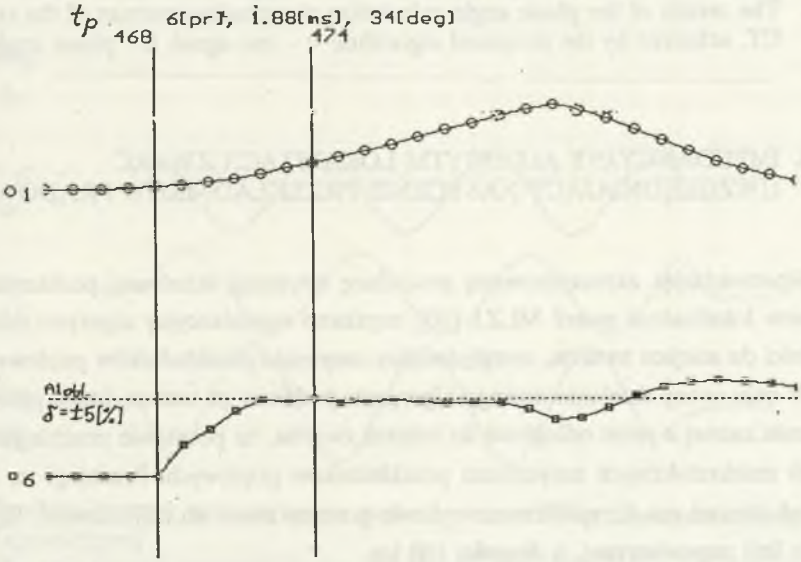
Rys. 2. Działanie proponowanego algorytmu podczas obliczeń amplitudy z przebiegu analitycznego: o - sygnał testowy, □ - amplituda

Fig. 2. The results of the amplitude calculation of distorted, computed signal, achieved by the proposed algorithm: o - test signal, □ - amplitude



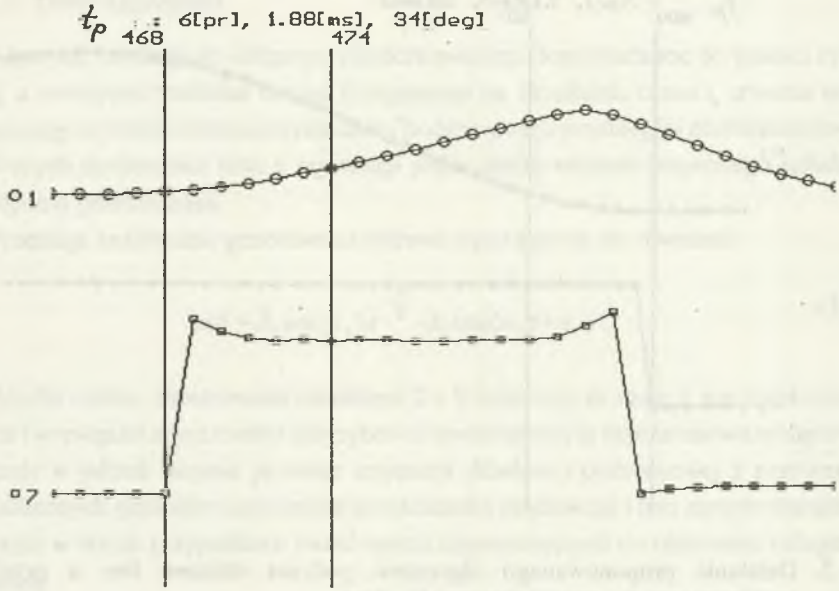
Rys. 3. Działanie proponowanego algorytmu podczas obliczeń fazy z przebiegu analitycznego: o - sygnał testowy, □ - faza

Fig. 3. The results of the phase angle calculation of distorted, computed signal, achieved by the proposed algorithm: o - test signal, □ - phase angle



Rys. 4. Działanie proponowanego algorytmu podczas obliczeń amplitudy z przebiegu prądu strony wtórnej nasyconego przekładnika: o - sygnał testowy, □ - amplituda

Fig. 4. The results of the amplitude calculation of secondary current of the saturated CT, achieved by the proposed algorithm: o - test signal, □ - amplitude



Rys. 5. Działanie proponowanego algorytmu podczas obliczeń fazy z przebiegu prądu strony wtórnej nasyconego przekładnika: o - sygnał testowy, □ - faza

Fig. 5. The results of the phase angle calculation of secondary current of the saturated CT, achieved by the proposed algorithm: o - test signal, □ - phase angle

4. IMPEDANCYJNY ALGORYTM LOKALIZACJI ZWARĆ UWZGLĘDNIAJĄCY NASYCENIE PRZEKŁADNIKÓW PRĄDOWYCH

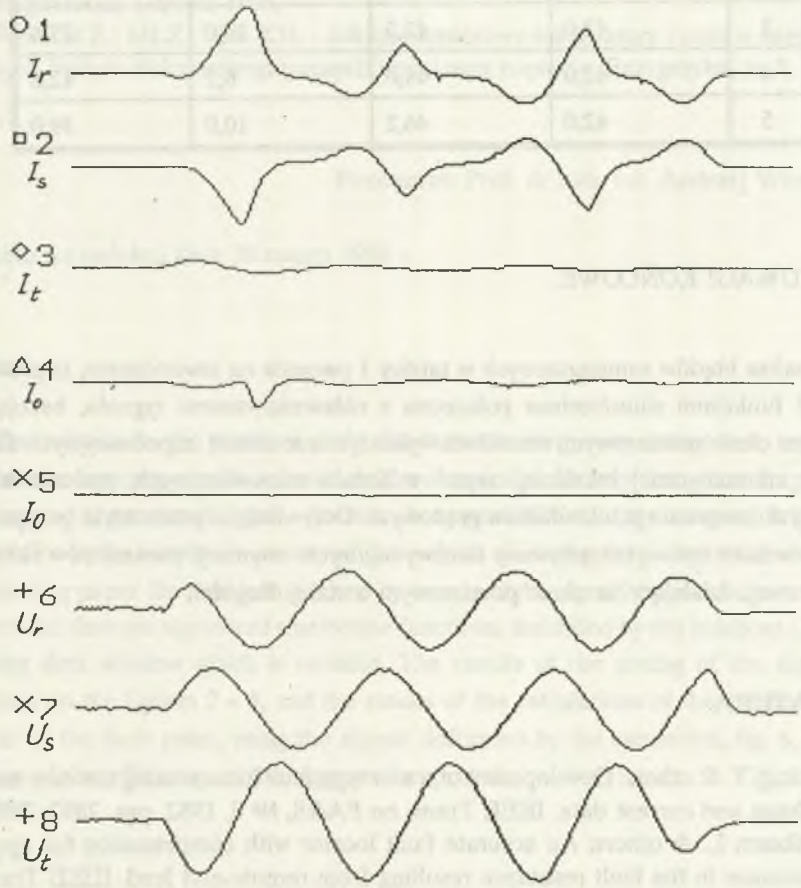
Wprowadzając zaprezentowaną procedurę estymacji składowej podstawowej do programu lokalizatora zwarć MLZ1 [10], uzyskano impedancyjny algorytm obliczania odległości do miejsca zwarcia, uwzględniający nasycenie przekładników prądowych.

W celu oceny działania nowego algorytmu poddano go testom, które polegały na obliczaniu znanej *a priori* odległości do miejsca zwarcia, na podstawie przebiegów zwarciowych zniekształconych nasyceniem przekładników prądowych. Przebiegi te, których przykład stanowi rys. 6, rejestrowano cyfrowo podczas zwarć na trójfazowym, fizycznym modelu linii napowietrznej, o długości 100 km.

Wyniki obliczeń odległości do miejsca zwarcia na podstawie przebiegów testowych dla zwarć RS, wraz z błędami zdefiniowanymi zależnością

$$\delta_{\%} = \frac{I_{obl} - I}{I} \cdot 100\% \tag{11}$$

zestawiono w tablicy 1, w której dla porównania umieszczono również błędy $\delta_{\%1}$ dla programu lokalizacji z bazowym algorytmem obliczania amplitudy i fazy, wykorzystującym okno pomiarowe o stałej długości równej okresowi składowej podstawowej.



Rys. 6. Przebiegi testowe zarejestrowane podczas zwarcia RS na fizycznym modelu linii napowietrznej

Fig. 6. The test signals, recorded during the RS phase to phase fault on the physical model of the overhead line

Tablica 1

Wyniki lokalizacji zwarć z przebiegów zdeformowanych nasyceniem przekładników prądowych

Lp.	l [km]	l_{obl} [km]	$\delta_{\%}$	$\delta_{\%1}$
1	42,0	44,1	5,0	47,8
2	42,0	44,6	6,2	19,0
3	42,0	47,5	13,0	27,6
4	42,0	44,6	6,2	42,8
5	42,0	46,2	10,0	39,0

5. UWAGI KOŃCOWE

Analiza błędów zamieszczonych w tablicy 1 pozwala na stwierdzenie, iż procedura korelacji funkcjami sinus/cosinus połączona z różniczkowaniem sygnału, bazująca na zmiennym oknie pomiarowym, umożliwia wykorzystanie metod impedancyjnych dla programów automatycznej lokalizacji zwarć w liniach napowietrznych, podczas których dochodzi do nasycenia przekładników prądowych. Oczywiście, w pozostałych przypadkach zwarć powinien być wykorzystywany bazowy algorytm estymacji parametrów składowej podstawowej, działający na oknie pomiarowym o stałej długości.

LITERATURA

1. Takagi T. & others: Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data. IEEE Trans. on PA&S, № 8, 1982, pgs. 2892÷2898.
2. Eriksson L. & others: An accurate fault locator with compensation for apparent reactance in the fault resistance resulting from remote-end feed. IEEE Trans. on PA&S, № 2, 1985, pgs. 424÷436.
3. Jeyasurya B., Bath C. A.: An accurate algorithm for transmission line fault location using digital relay measurements. Electric Machines and Power Systems, № 16, 1989, pgs. 25÷34.
4. Wiszniewski A.: Algorytmy pomiarów cyfrowych w automatyce elektroenergetycznej. WNT, Warszawa 1990.

5. Szafran J.: Rozpoznawanie sygnałów w cyfrowej automatyce zabezpieczeniowej. Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1990.
6. Rosołowski E.: Analiza algorytmów cyfrowych zabezpieczeń elektroenergetycznych. Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1991.
7. Wiszniewski A.: Przekładniki w elektroenergetyce. WNT, Warszawa 1982.
8. Wiszniewski A.: Digital high-speed calculation of the distorted signal fundamental component. IEE Proc., Nº 1, 1990, pgs. 19÷4.
9. Pawelczyk D.: Algorytm lokalizacji zwarć w liniach napowietrznych najwyższych napięć uwzględniający wpływ nasycenia przekładników prądowych. Praca dyplomowa magisterska, Gliwice 1993.
10. Wysocki Z.: MLZ1 i MLZ1L - mikroprocesorowe lokalizatory zwarć w napowietrznych liniach elektroenergetycznych wysokiego napięcia. Energetyka, nr 5, 1989.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Andrzej Wiszniewski

Wpłynęło do redakcji dnia 20 marca 1994 r.

Abstract

The solution to the problem of the fundamental frequency component, amplitude and phase computing - which is based on the samples of the very first, short fragment of non distorted short circuit signal - decides about possibilities of the usage of impedance methods for faults location in overhead lines which cause the deep saturation of CTs. In the following paper the problem is solved by means of the algorithm based on correlation between the derivate signal and sine/cosine functions, described by the relations (3) ÷ (9), assuming data window which is variable. The results of the testing of the algorithm, presented on the figures 2 ÷ 5, and the results of the calculations of the a priori known distance to the fault point, using the signals deformed by the saturation, fig. 6, are the evidence of the efficiency of the suggested approach.