

# Laboratory Test Results for the Travelling Wave Fault Location Scheme

## Authors

Krzysztof Glik  
Désiré D. Rasolomampionona

## Keywords

fault location, HV line, wavelet transform

## Abstract

The article describes the travelling wave fault location algorithm for high voltage lines based on wavelet transform. The algorithm is implemented in a prototype and tested in the laboratory. The article presents the hardware and software part of a travelling wave fault locator, methodology and test results.

DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2014103

## 1. Introduction

Accurate fault location in a HV line allows for quick recovery of its operation, which increases the power system security and reliability. The travelling wave fault location is more accurate than commonly used impedance methods. This accuracy is particularly good for a fault with high fault resistance in a HV line with serial compensation or two circuits, which is why the subject has aroused significant interest [1, 2]. Issues related to operating experiences with travelling wave locators are described in the literature [3–7]. Laboratory tests of such locators are rarely discussed [8], while only thorough laboratory tests of the device allows for its reliable operation at various types of faults in HV lines. The main problem in its laboratory testing is generation of a high-frequency (1–1.5 MHz) signal with an appropriate slope shape and rise time. The equipment used to test conventional locators/power system protections (for example Omicron CMC, which is used for protections testing [9]); can generate a signal up to a few kHz, which is why it was necessary to set up a new test bench.

## 2. Hardware

The travelling wave location is based on measurement of currents in three phases at HV line's both end by two separate devices (Fig. 1). The intermediary current transformer is adjusted to the secondary current of the main current transformer and is characterized by an increased bandwidth. The two devices (PC A and PC B with their analogue – digital cards) can be synchronised by a GPS system. The GPS receiver generates PPS synchronization signal that is transmitted to the input that triggers the analogue-to-digital card's sampling. Each current is processed at a frequency of 1 MHz. The samples are then analysed by the locator's algorithm, and in case of disturbance detection their specified range is saved in the memory of the two computers.

When a short circuit occurs, the time of arrival of the waves to the two opposite substations is transmitted between the two computers in order to determine the exact fault location. The communication is via a serial link. The user can supervise the device and view the results of its operation on the interface presented in section 3.2.

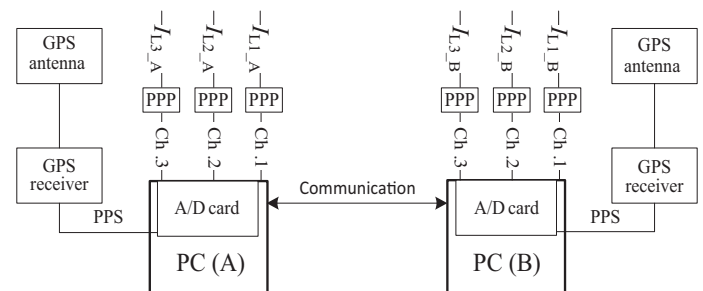


Fig. 1. Block diagram of the wave travelling fault locator, PPP – intermediary CT, PPS (Pulse Per Second) – synchronisation signal

## 3. Software

### 3.1. Fault location algorithm

The localization algorithm presented in article [10] in the device, the block diagram of which is depicted in Fig. 1. The location based on measurement of the three phase currents at both sides of the HV line, and then  $0, \alpha, \beta$  transformation is performed. For wave phenomena analysis the symmetrical components are not transformed, due to the nature of wave phenomena described by instantaneous voltages and currents, which can not be converted to their positive, negative, and neutral components. However, transformation matrices, i.e. Clarke matrix, which

consists of elements which are not complex numbers (as in the case of the transformation of symmetrical components) were applied. Upon the  $0, \alpha, \beta$  conversion, diagonal components are obtained, which are then subject to continuous wavelet transform. The algorithm is based on biorthogonal 3.3 wavelet, where the coefficients of the second wavelet decomposition level (frequency range 125–250 kHz for sampling frequency 1 MHz) are used. The wavelet transform is implemented by the Mallat algorithm [11]. The algorithm presented in [10] uses wavelet transform for the fault detection and classification, whereas the prototype device detects and classifies on the basis of the periodic component, while the location itself is based on wavelet transform. This is mainly because of the assumption that at the prototype's first trials the most important was the correct fault detection, which at this stage of the test seemed more attainable using conventional methods.

### 3.2. User interface

The graphic interface was implemented using the Visual Studio 2008 environment and object-oriented programming language C#. In the programme's first window the measurement card, sampling channel, measurement range, and sampling frequency are selected (Fig. 2).

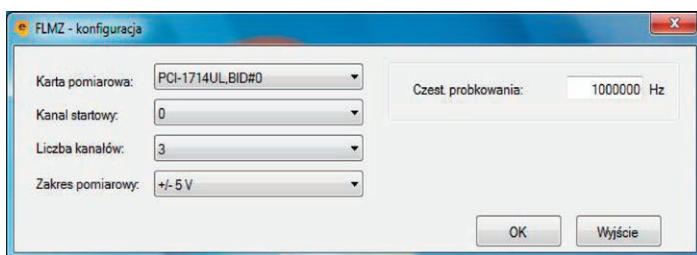


Fig. 2. Graphic interface, FLMZ configuration

In the next window the input signals are monitored in real time in all available channels (Fig. 3).

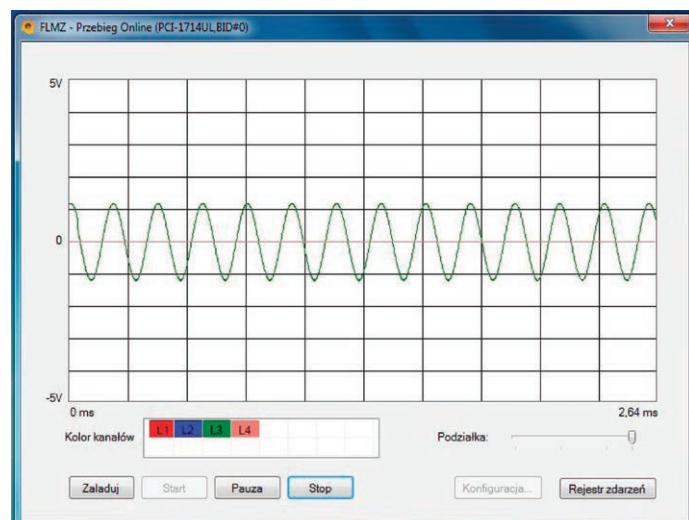


Fig. 3. Graphic interface, FLMZ waveform online

Lp.	Data zwarcia	Stacja A	Stacja B	Długość linii [km]	Typ zwarcia	Odi. do miejsca zwarcia(kt. A)	Odi. do miejsca zwarcia(kt. B)
65	2013-01-30_07-4...	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20,6	80,4
64	2013-01-30_07-4...	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20,6	80,4
63	2013-01-30_07-4...	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20,6	80,4
62	2013-01-30_07-4...	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20,6	80,4
61	2013-01-30_07-4...	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20,6	80,4
60	2013-01-30_07-4...	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20,6	80,4
59	2013-01-30_07-4...	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20,6	80,4
58	2013-01-30_07-4...	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20,6	80,4
57	2013-01-30_07-4...	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20,6	80,4
56	2013-01-30_07-4...	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20,6	80,4
55	2013-01-30_07-4...	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20,6	80,4
54	2013-01-30_07-4...	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20,6	80,4
53	2013-01-30_07-4...	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20,6	80,4
52	2013-01-30_07-4...	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20,6	80,4

Fig. 4. Graphic interface, FLMZ event records

All detected faults are then saved in the database (Fig. 4), with the option of their subsequent analysis and viewing their waveforms. Waveform offline viewing was implemented using a ZedGraph library.

### 4. The first test setup

The first test setup allows pre-testing the locator's travelling wave scheme performance. What's important - this setup allows checking whether the current transformer properly carries high frequencies, and does not distort the wave's front face. Another important aspect is the possibility to check the software that is dedicated to the locator, and is designed to visually render and record the waveforms after the fault detection. The signal from a fault simulated using a 9 V battery is transmitted through the intermediary CT simultaneously to the inputs of the two synchronized analogue-to-digital cards. Such a test method has been used by Qualitrol for testing the TWS Mark VI locator [12]. Interestingly, the other wave locator manufacturer, Kehui Electric, declares that it does not carry out laboratory checks of its GX-2000 locator.

The test setup is very similar to that shown in Fig. 1. The only difference is the battery that is located on the primary side of the intermediate CTs provided for devices A and B. Fig. 5 shows the pulse recorded by device A. In device B the pulse will appear delayed by not more than 1 ms, which corresponds to the standard GPS synchronization error. Such checks had been repeatedly performed for all phases, which verifies the correct selection of the travelling wave fault location scheme's components.

### 5. The second test setup

#### 5.1. Block diagram

The second test setup uses samples obtained after a fault simulated in the PSCAD/EMTDC programme (for simulation of electromagnetic transient components). The purpose of the following analysis was to examine the algorithm's response to an arcing fault. A primary arc resulting from an arcing fault, turning into an earth fault, was modelled. The secondary arc, associated with circuit

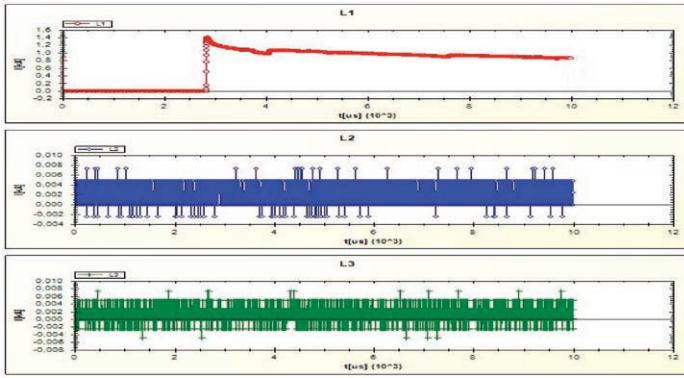


Fig. 5. FLMZ waveform offline, pulse from battery

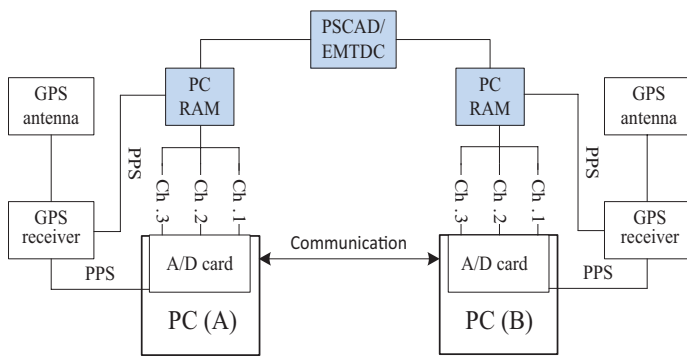


Fig. 6. Block diagram of the second test setup

breaker opening in the line, would not affect the travelling wave algorithm, and therefore was not considered.

Samples obtained from PSCAD/EMTDC programme were saved in computer memory (PC RAM), and then used in the algorithm for the two synchronized devices. Samples are entered upon a trigger signal (PPS) appearance on the analogue-to-digital card's synchronisation input. A diagram of the test setup is presented in Fig. 6.

### 5.2. The system model

In order to properly analyse wave phenomena, and to check the travelling wave fault detection, classification, and location algorithm's performance, a system composed of the following elements: equivalent source – HV lines – equivalent source was modelled.

The system shown in Fig. 9 consists of three three-phase 220 kV lines with lengths  $l_{G1-A} = 70$  km,  $l_{A-B} = 100$  km,  $l_{B-G2} = 150$  km, respectively. The HV lines were modelled as elements with distributed frequency-dependent parameters, while the other elements of the model (generator, substations, and transformers) were mapped as elements with concentrated parameters. It was assumed that the travelling wave fault locators were installed in substations A and B.

### 5.3. The arcing fault model

The primary arc was modelled as a current-dependent variable resistance [13, 14].

$$\frac{dg_p}{dt} = \frac{1}{\tau_p} (G - g_p) \tag{1}$$

where:

$g$  – equivalent conductance of primary arc,  $G$  – static conductance of arc,  $\tau_p$  – time constant of arc burning process.

It was assumed that:  $u = 15$  V/cm, characteristic unit arc voltage,  $R_{Luk} = 10-5 \Omega/cm$ , characteristic unit arc resistance,  $l_{Luk} = 400$  cm, electric arc length.

$$\tau_{Luk} = \frac{\alpha I_p}{l_{Luk}} \tag{2}$$

It was assumed that:  $\alpha = 2,5 \cdot 10^{-5}$ , constant parameter,  $I_p = 15000$  A, assumed peak arc current.

$$g(k) = G \cdot (1 - a_1) + g(k-1) \cdot a_1 \tag{3}$$

$$a_1 = e^{-T/\tau_p}, T - \text{modelling step}$$

$$g(0) = 0,054 \cdot \frac{i}{u_p \cdot l} \tag{4}$$

Initial conductance at fault:

$$g(t_z) = 0,054 \cdot \frac{i}{u_p \cdot l} \tag{5}$$

Equations 1–5 were used in the model shown in Fig. 9. The model was divided into three components, which determine the arc resistances before, after, and during the fault. The simulated fault was 30 km away from substation A, and 70 km from substation B, and the distances were changed during the laboratory tests. Fig. 7 shows the time-varying resistance of the electric arc in the fault location, which was obtained from simulation of the circuit in Fig. 9. The maximum arc resistance in the analyzed case did not exceed the limit of 25  $\Omega$ . The fault current in substation A is shown in Fig. 8. The fault occurred at time  $t_z = 0,225$  s. After this time overlapping of the high frequency signal and the current waves have been observed. Despite additional components, the waves' shape did not change significantly, owing to which the travelling wave algorithm worked properly for this fault type. This was experimentally confirmed in section 5.4.

### 5.4. Algorithm results

Numerous tests were carried out for different locations and angles of a single-phase L1-E arcing fault. An example waveform recorded by the device at frequency of 1 MHz is shown in Fig. 10. The algorithm results for a single-phase fault are shown in Fig. 11, where the red colour indicates areas of increased fault location error. The algorithm's erratic operation was observed for small fault angles, and correct results for virtually all remaining cases.

Besides the arcing faults, the algorithm was tested for various fault types (L2-E, L1-L2, L1-L2-L3, etc.). The results were similar to simulation results presented in reference [10], which has considered

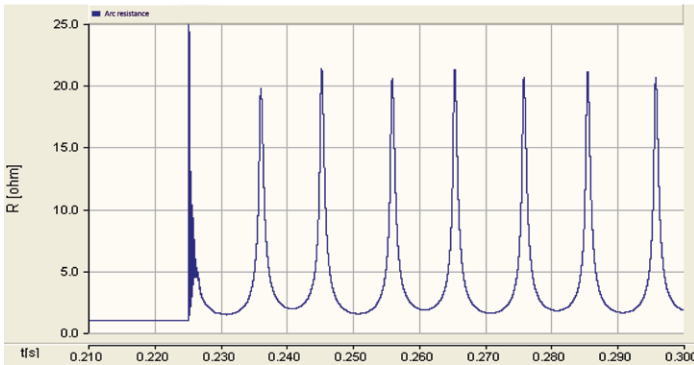


Fig. 7. Electric arc resistance, PSCAD/EMTDC

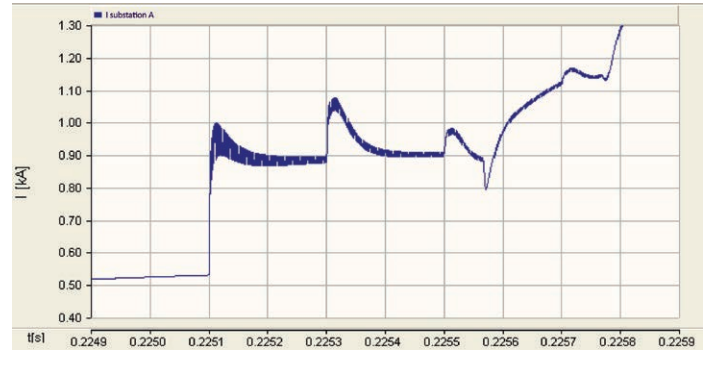


Fig. 8. Fault current in substation A after arcing fault occurrence,  $t_z = 0,225$  s, PSCAD/EMTDC

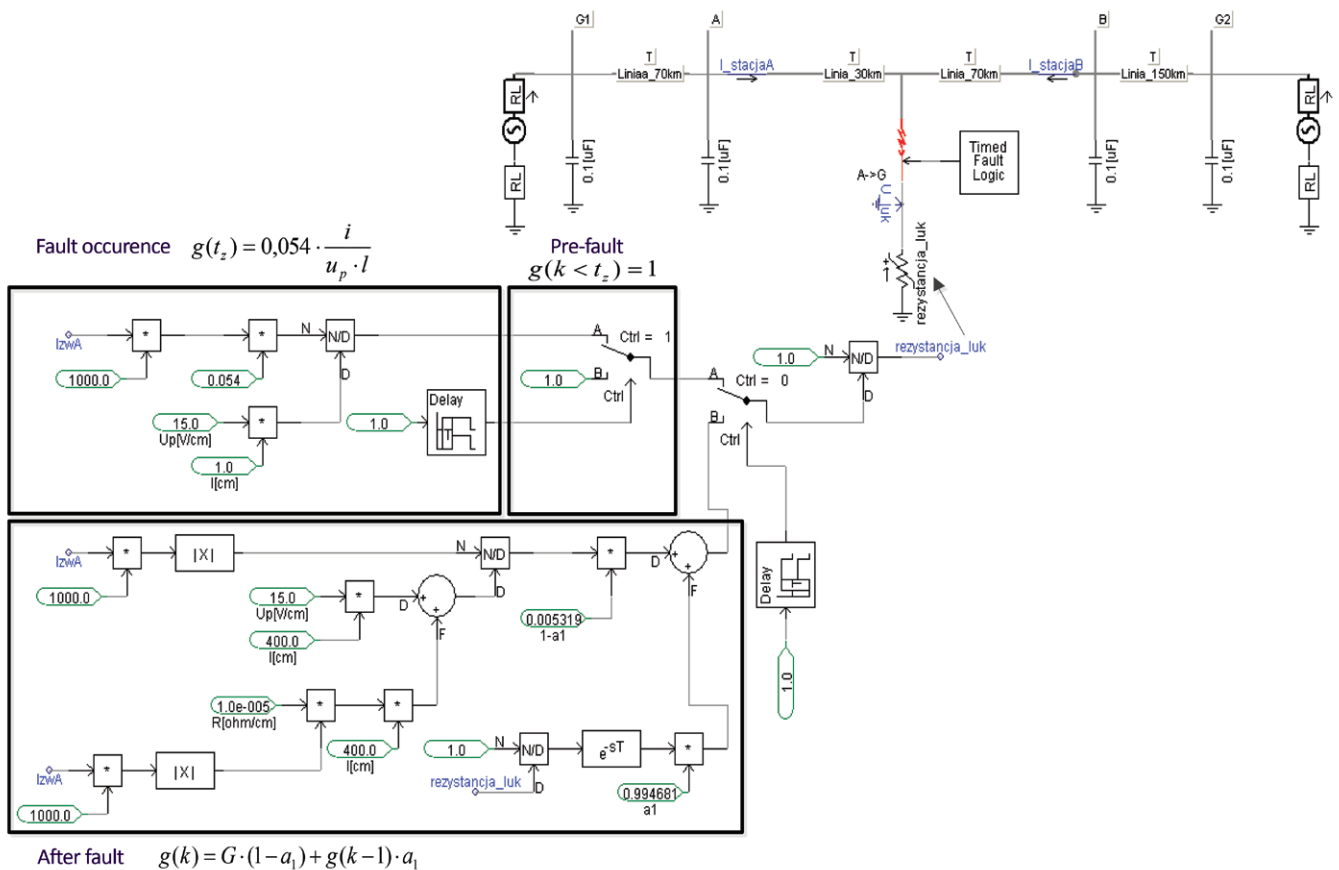


Fig. 9. Primary arc model, PSCAD/EMTDC

simulation results of the algorithm only (excluding the equipment). The proper algorithm performance resulted from the selection of a wavelet suitable for the given application, which would be the most similar to the signal's searched-for component, and in this case corresponded to the current increase associated with electromagnetic wave propagation. Moreover, the sufficiently high scope of the analysed frequency range allowed for precise determination of the pulse in time. It is noteworthy that the optimum algorithm selection was possible through the use of computer simulations, and it has been demonstrated in this article that the algorithm is implementable on a hardware platform.

## 6. Summary

The aim of the tests was to check the performance of a fault location algorithm based on wave phenomena, which would produce smaller errors than commonly used impedance fault location methods. Development of such an algorithm allows improving the power system stability due to the more effective line inspection enabled by accurate fault location. The paper describes the test bench and methodology, which allowed verifying the performance of the travelling wave fault location in the laboratory. The completed tests have confirmed the successful development of a wavelet transform – based fault location algorithm,

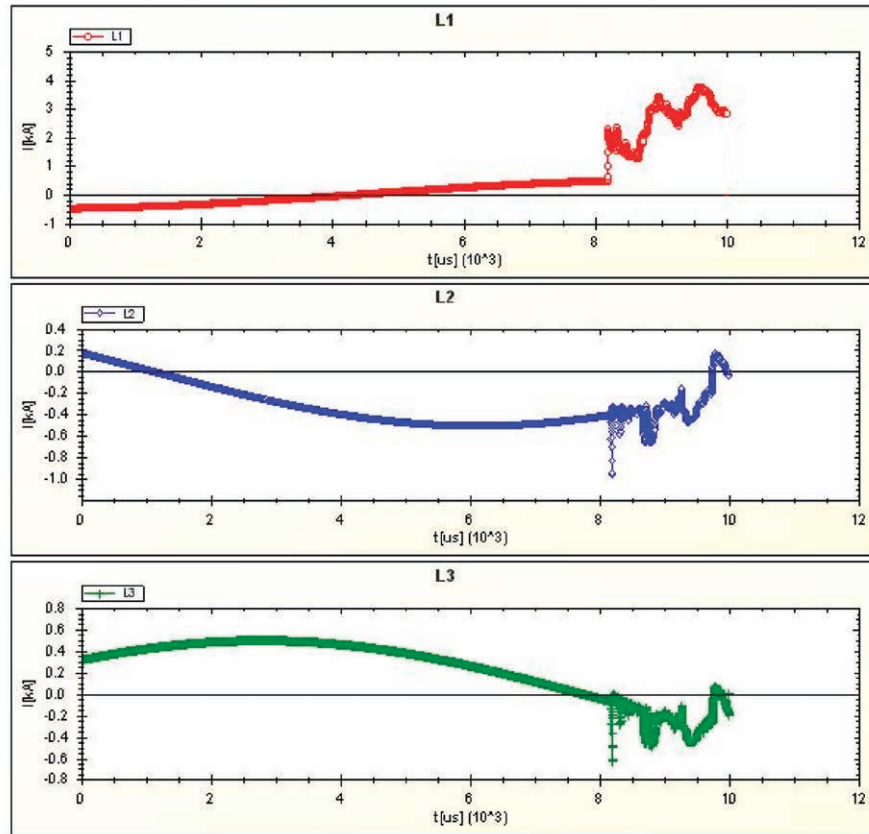


Fig. 10. Fault records, the device's graphic interface

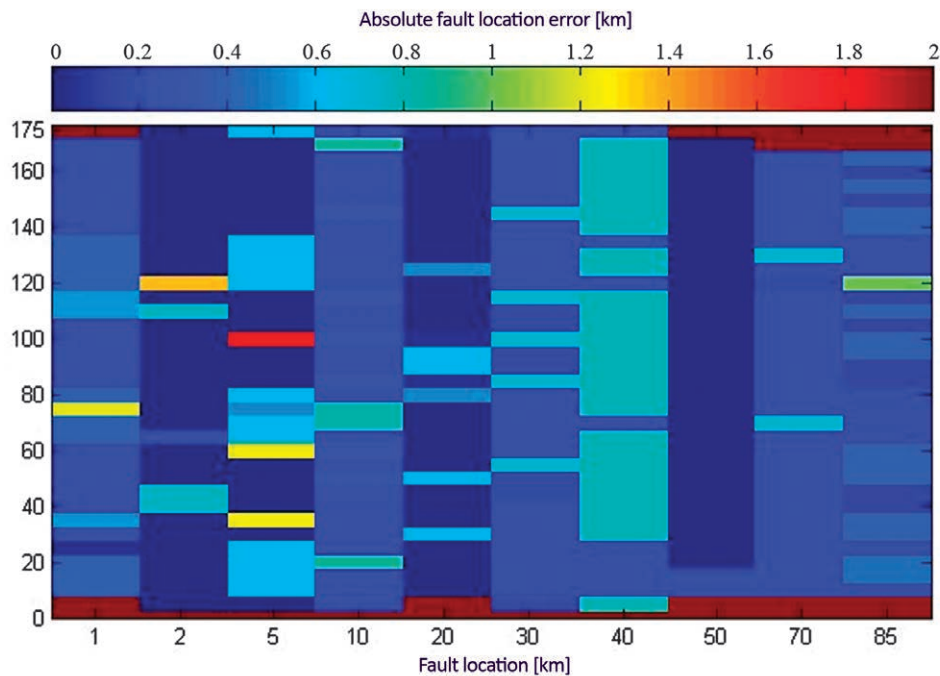


Fig. 11. Travelling wave algorithm results, line length: 100 km

which allows the exact location of faults in HV power lines using wave phenomena occurring there. This algorithm ensures fault location with an average error of 250 m, except in cases when the fault occurs at a voltage transition through zero (or near  $\pm 2.5^\circ$ ). The next step in checking the travelling wave location scheme

performance will be testing the device in real conditions, i.e. at a substation. Due to the relatively rare fault occurrences in HV lines, these tests can take a long time. The locator could be more likely checked in cases of switching operations, switching capacitor banks on, or of lightning. Events of these types are sources of

high frequency signals that can be detected by an appropriately set travelling wave locator.

## REFERENCES

1. Glik K. et al., Travelling wave fault location in power transmission systems: an overview, *Journal of Electrical Systems* 2011, No. 7, pp. 287–296.
2. Qin J., Chen X., Zheng J., Travelling wave fault location of transmission line using wavelet transform, *Proceedings of IEEE Powercon Conference*, 1998, pp. 533–537.
3. Gale P.F. et al., Travelling wave fault locator experience on ESKOM's transmission network, *Proc. IEE Seventh International Conference on Developments in Power System Protection*, 2001, pp. 327–330.
4. Gale P.F., Stokoe J., Crossley P.A., Practical experience with travelling wave fault locators on Scottish power's 275&400kV transmission system, *Proc. Sixth IEEE International Conference on Developments in Power System Protection*, 1997, pp. 192–196.
5. Xu B., Shu Z., Gale P., The application of travelling wave fault locators in China, *Proc. IET 9th International Conference on Developments in Power System Protection*, 2008, pp. 535–539.
6. Haffar El A., Lehtonen M., Evaluation of travelling wave fault location based on field measurements, *Proc. IET 9th International Conference on Developments in Power System Protection*, 2008, pp. 601–605.
7. Zimath S.L., Ramos M.A.F., Filho J.E.S., Comparison of impedance and travelling wave fault location using real faults, *Proc. IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 2010, pp. 1–5.
8. Zhen W. et al., Travelling wave fault location test technique and its applications using a high speed travelling wave generator, *Proc. Power and Energy Engineering Conference (APPEEC 2012)*, 2012, pp. 1–4.
9. Kowalik R., Januszewski M., Rasolomampionona D., Problems Found During Testing Synchronous Digital Hierarchical Devices Used on Power Protection Systems, *IEEE Transactions On Power Delivery* 2013, No. 28 (1), pp. 11–20.
10. Glik K., Rasolomampionona D., Kowalik R., Detection, classification and fault location in HV lines using travelling waves, *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)* 2012, No. 1a, pp. 269–275.
11. Mallat S., *A Wavelet Tour of Signal Processing*, New York: Academic, 2008.
12. TWS Mk VI User Manual, Travelling Wave Fault Locator, document ID: 40-08534-02.
13. Johns A.T., Aggarwal R.K., Song Y.H., Improved techniques for modeling fault arcs on faulted EHV transmission systems, *IEE – Generation, Transmission and Distribution* 1994, No. 141, pp. 148–154.
14. Rosołowski E., *Komputerowe metody analizy elektromagnetycznych stanów przejściowych [Computer methods for the analysis of electromagnetic transients]*, Wrocław 2009, p. 361.

## Krzysztof Glik

Warsaw University of Technology

e-mail: krzysztof.glik@ien.pw.edu.pl

Graduated as M.Sc. from the Faculty of Electrical Engineering at Warsaw University of Technology (2009). Now a PhD student at the Institute of Electrical Power Engineering of Warsaw University of Technology, and a researcher at CJR Polska. His main professional interests relate to travelling wave fault location.

## Désiré D. Rasolomampionona

Warsaw University of Technology

e-mail: desire.rasolomampionona@ien.pw.edu.pl

Since 1994 a researcher/teacher in the Electrical Power Engineering Institute of Warsaw University of Technology. He is currently the head of the Department of Power Apparatus, Protection and Control. His research interests focus mainly on issues relating to electrical power automation, power system control the operation control, and applications of telecommunications and modern information technologies in the power industry.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 29–34. When referring to the article please refer to the original text.

PL

## Wyniki testów działania układu falowej lokalizacji miejsca zwarcia w warunkach laboratoryjnych

### Autorzy

Krzysztof Glik  
Désiré D. Rasolomampionona

### Słowa kluczowe

lokalizacja zwarcia, linia WN, przekształcenie falowe

### Streszczenie

W artykule opisano algorytm falowej lokalizacji miejsca zwarcia w linii wysokiego napięcia (WN) oparty na przekształceniu falowym zaimplementowany w prototypie urządzenia, a następnie przetestowano w warunkach laboratoryjnych. Artykuł przedstawia opis części sprzętowej i programowej falowego lokalizatora, metodykę oraz wyniki testów.

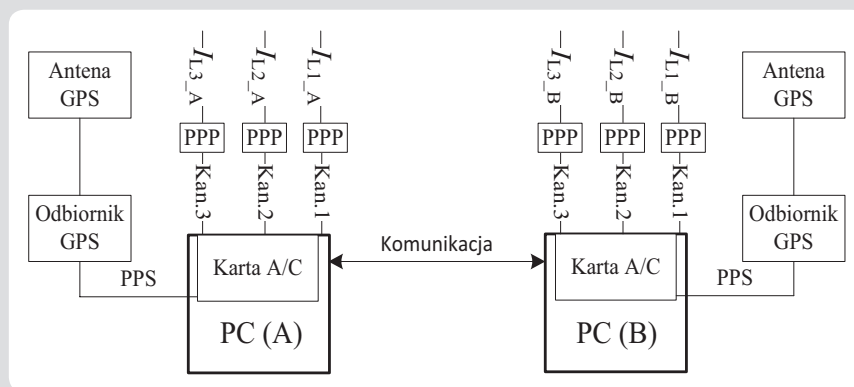
### 1. Wstęp

Dokładna lokalizacja miejsca zwarcia w linii WN pozwala na jej szybkie przywrócenie do pracy, co zwiększa bezpieczeństwo i niezawodność działania systemu elektroenergetycznego. Falowa lokalizacja miejsca zwarcia charakteryzuje się lepszą dokładnością w porównaniu z powszechnie wykorzystywanymi metodami impedancyjnymi. Dokładność ta jest szczególnie dobra dla zwarc z dużą rezystancją przejścia, dla linii WN szeregowo kompensowanych czy dwutorowych, dlatego też tematyka ta spotyka się z dużym zainteresowaniem [1, 2].

Zagadnienia dotyczące doświadczeń eksploatacyjnych falowych lokalizatorów opisano w literaturze [3–7]. Testowanie laboratoryjne takich lokalizatorów jest rzadko poruszane [8], a jedynie dokładne przetestowanie urządzenia w warunkach laboratoryjnych pozwala na niezawodne działanie przy różnych rodzajach zwarc, które występują w linii WN. Głównym problemem przy przeprowadzeniu testów laboratoryjnych jest generacja sygnału wysokoczęstotliwościowego (1–1,5 MHz), o odpowiednim przebiegu i czasie narastania zbrocza. Urządzenia, które wykorzystywane są do testowania konwencjonalnych lokalizatorów/zabezpieczeń elektroenergetycznych (przykładowo Omicron CMC, który znajduje zastosowanie przy testach zabezpieczeń [9]), mogą generować sygnał do kilku kHz, dlatego też niezbędne było zestawienie nowego stanowiska testowego.

### 2. Część sprzętowa lokalizatora

Działanie układu falowej lokalizacji bazuje na pomiarze prądów w trzech fazach, na dwóch krańcach linii WN przez dwa oddzielne urządzenia (rys. 1). Pośredniczący przekładnik prądowy jest dostosowany do prądu wtórnego głównego przekładnika prądowego oraz charakteryzuje się zwiększonym pasmem przenoszenia. Synchronizacja dwóch urządzeń (PC A i PC B razem z kartami analogowo-cyfrowymi A/C) jest możliwa poprzez system GPS. Odbiornik GPS generuje sygnał synchronizujący PPS, który jest przesyłany na wejście wyzwalające próbkowanie karty analogowo-cyfrowej. Każdy z prądów jest przetwarzany z częstotliwością 1 MHz. Próbkki są następnie analizowane przez algorytm lokalizatora i w przypadku



Rys. 1. Schemat blokowy falowego lokalizatora miejsca zwarcia, PPP – pośredniczący przekładnik prądowy, PPS (ang. Pulse Per Second) – sygnał synchronizacyjny

detekcji zakłócenia określony zakres próbek jest zapisywany w pamięci dwóch komputerów. Gdy dochodzi do zwarcia, czas nadejścia fal do dwóch przeciwnych stacji jest przesyłany między dwoma komputerami w celu określenia dokładnego miejsca zwarcia. Komunikacja odbywa się za pomocą łącza szeregowego. Użytkownik może nadzorować urządzenie oraz przeglądać wyniki działania poprzez interfejs, który przedstawiono w podrozdziale 3.2.

### 3. Część programowa lokalizatora

#### 3.1. Algorytm lokalizacji miejsca zwarcia

W urządzeniu zaimplementowano algorytm lokalizacyjny, przedstawiony w artykule [10]. Lokalizacja opiera się na pomiarze prądów z trzech faz po obu stronach linii WN, następnie wykonywane jest przekształcenie  $0, \alpha, \beta$ . W przypadku analizy zjawisk falowych nie stosuje się przekształcenia składowych symetrycznych, co wynika z charakteru zjawisk falowych opisywanych wartościami chwilowymi napięć i prądów, które nie mogą być przekształcane na składową zgodną, przeciwną i zerową. Zastosowanie natomiast znalazły macierze przekształcenia, tj. macierz Clarke'a, która składa się z elementów niebędących liczbami zespolonymi (jak to ma miejsce w przypadku przekształcenia składowych symetrycznych). W wyniku przekształcenia  $0, \alpha, \beta$  otrzymuje się składowe diagonalne, które

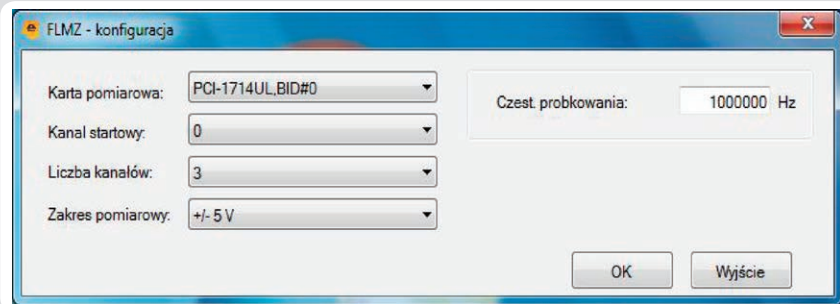
następnie poddawane są przekształceniu falowemu. Algorytm opiera się na falce biortogonalnej 3.3., przy czym wykorzystywane są współczynniki drugiego poziomu dekompozycji falowej (zakres częstotliwości 125–250 kHz dla częstotliwości próbkowania 1 MHz). Przekształcenie falowe jest realizowane za pomocą algorytmu Mallata [11].

W algorytmie przedstawionym [10] do detekcji i klasyfikacji zwarcia wykorzystano przekształcenie falowe, zaś w prototypie urządzenia detekcja i klasyfikacja jest oparta na składowej okresowej, natomiast sama lokalizacja wykorzystuje przekształcenie falowe. Wynika to głównie z założenia, że przy pierwszych próbach prototypu najważniejszą kwestią jest poprawna detekcja zwarcia, co na tym etapie testów wydaje się bardziej osiągalne przy zastosowaniu konwencjonalnych metod.

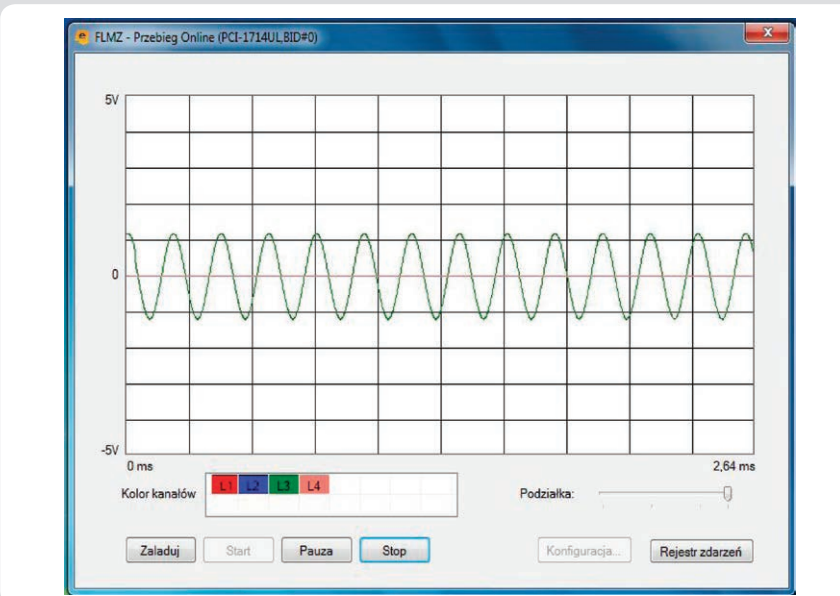
#### 3.2. Interfejs użytkownika

Interfejs graficzny zrealizowano za pomocą środowiska Visual Studio 2008 i obiektowego języka programowania C#. Pierwsze okno programu pozwala na wybór karty pomiarowej, kanału próbkowania, zakresu pomiarowego oraz częstotliwości próbkowania (rys. 2).

Następne okno pozwala na obserwację sygnału wejściowego na wszystkich dostępnych kanałach w czasie rzeczywistym (rys. 3).



Rys. 2. Interfejs graficzny, FLMZ konfiguracja



Rys. 3. Interfejs graficzny, FLMZ przebieg online

Lp.	Data zwania	Stacja A	Stacja B	Długość linii [km]	Typ zwania	Odl. do miejsca zwania(st.A)	Odl. do miejsca zwania(st.B)
65	2013-01-30_074...	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20.6	80.4
64	2013-01-30_074...	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20.6	80.4
63	2013-01-30_074...	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20.6	80.4
62	2013-01-30_074...	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20.6	80.4
61	2013-01-30_074...	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20.6	80.4
60	2013-01-30_074...	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20.6	80.4
59	2013-01-30_074...	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20.6	80.4
58	2013-01-30_074...	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20.6	80.4
57	2013-01-30_074...	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20.6	80.4
56	2013-01-30_074...	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20.6	80.4
55	2013-01-30_074...	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20.6	80.4
54	2013-01-30_074...	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20.6	80.4
53	2013-01-30_074...	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20.6	80.4
52	2013-01-30_074...	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20.6	80.4

Rys. 4. Interfejs graficzny, FLMZ rejestr zdarzeń

Wszystkie zarejestrowane zwarcia są następnie zapisywane w bazie danych (rys. 4), z możliwością ich późniejszego analizowania i przeglądania przebiegów

czasowych. Przeglądanie przebiegów czasowych w trybie offline zrealizowano za pomocą biblioteki ZedGraph.

#### 4. Pierwszy układ testowy

Pierwszy układ testowy pozwala na wstępne sprawdzenie działania układu falowego lokalizatora. Co ważne, można za pomocą tego układu sprawdzić, czy zastosowany przekładnik prądowy przenosi w sposób prawidłowy wysokie częstotliwości oraz nie zniekształca przedniego czoła fali. Istotną sprawą jest także możliwość sprawdzenia oprogramowania, które jest dedykowane dla lokalizatora i ma za zadanie wizualizować i zapisywać przebiegi po detekcji zwarcia. Sygnał z symulowanego zwarcia za pomocą baterii 9 V jest wysyłany jednocześnie na wejście dwóch zsynchronizowanych ze sobą kart analogowo-cyfrowych, poprzez pośredniczący przekładnik prądowy. Taką metodę badania wykorzystuje Qualitrol w przypadku lokalizatora TWS Mark VI [12]. Co ciekawe, drugi z producentów falowych lokalizatorów Kehui Electric deklaruje, że nie wykonuje sprawdzeń laboratoryjnych dla swojego lokalizatora GX-2000.

Układ testowy jest bardzo podobny do tego przedstawionego na rys. 1. Jedyną różnicą jest bateria, która znajduje się po pierwotnej stronie pośredniczących przekładników prądowych przewidzianych dla urządzeń A i B. Na rys. 5 przedstawiono wynik rejestracji impulsu przez urządzenie A. Impuls w urządzeniu B pojawia się z różnicą nie większą niż 1 μs, co odpowiada standardowemu błędowi synchronizacji dla systemu GPS. Sprawdzenia takie przeprowadzono wielokrotnie dla wszystkich faz, co potwierdza poprawność dobranych elementów składowych układu falowej lokalizacji miejsca zwarcia.

#### 5. Drugi układ testowy

##### 5.1. Schemat blokowy

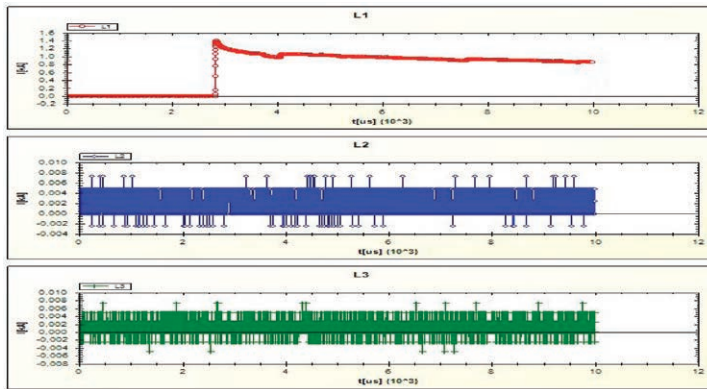
Drugi układ testowy wykorzystuje próbki otrzymane po zwarcie symulowanym w programie PSCAD/EMTDC (program do symulacji elektromagnetycznych składowych przejściowych). Celem poniższej analizy jest zbadanie, jak algorytm falowy działa przy zwarcu łukowym.

Modelowany jest łuk pierwotny, który pojawia się w miejscu zwarcia doziemnego. Łuk wtórny, związany z otwieraniem wyłącznika w linii, nie będzie miał wpływu na algorytm falowy, a więc nie jest rozpatrywany. Próbki otrzymane z programu PSCAD/EMTDC są zapisywane w pamięci komputera (PC RAM), a następnie wykorzystywane w algorytmie dwóch zsynchronizowanych ze sobą urządzeń. Próbki są wczytywane po pojawieniu się sygnału wyzwalającego (PPS) na wejściu synchronizującym karty analogowo-cyfrowej. Schemat tego układu testowego przedstawiono na rys. 6.

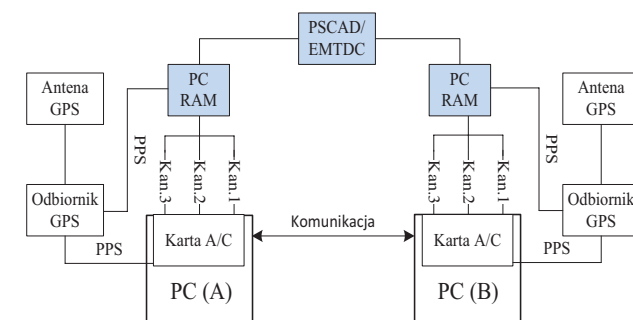
##### 5.2. Model systemu

W celu prawidłowego analizowania zjawisk falowych i sprawdzenia działania falowego algorytmu detekcji, klasyfikacji i lokalizacji miejsca zwarcia zamodelowano układ źródło zastępcze – linie WN – źródło zastępcze. System przedstawiony na rys. 9 składa się z trzech linii trójfazowych WN o napięciu 220 kV oraz długości  $l_{G1-A} = 70$  km,  $l_{A-B} = 100$  km,  $l_{B-G2} = 150$  km. Linie WN są modelowane jako elementy o parametrach rozłożonych zależnych od częstotliwości, przy czym pozostałe elementy modelu (generator, stacje, przekładniki) są odwzorowane jako elementy o parametrach

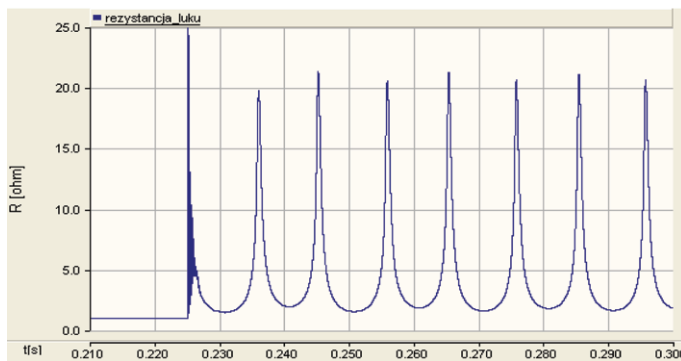




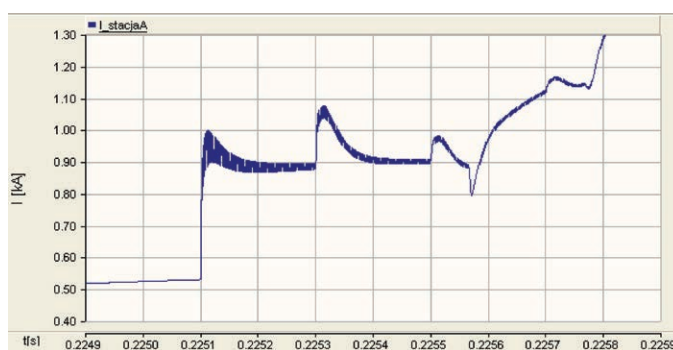
Rys. 5. FLMZ przebieg offline, impuls z baterii



Rys. 6. Schemat blokowy drugiego układu testowego



Rys. 7. Rezystancja łuku elektrycznego, PSCAD/EMTDC

Rys. 8. Prąd zwarciovowy w stacji A po wystąpieniu zwarcia łukowego,  $t_z = 0,225s$ , PSCAD/EMTDC

skupionych. Zakłada się, że falowy lokalizator miejsca zwarcia jest zainstalowany w stacji A i B.

### 5.3. Model zwarcia łukowego

Łuk pierwotny zamodelowano jako zmienną rezystancję zależną od prądu [13, 14].

$$\frac{dg_p}{dt} = \frac{1}{\tau_p} (G - g_p) \quad (1)$$

gdzie:

$g_p$  – zastępcza przewodność łuku pierwotnego,  $G$  – przewodność statyczna łuku,  $\tau_p$  – stała czasowa procesu palenia się łuku.

Przyjęto:

$u_p = 15$  V/cm, charakterystyczne napięcie jednostkowe łuku,  $R_{\text{Łuk}} = 10\text{--}5$   $\Omega/\text{cm}$ , charakterystyczna jednostkowa rezystancja łuku,  $l_{\text{Łuk}} = 400$  cm, długość łuku elektrycznego.

$$\tau_{\text{Łuk}} = \frac{\alpha l_p}{l_{\text{Łuk}}} \quad (2)$$

Przyjęto:

$\alpha = 2,5 \cdot 10^{-5}$ , stały parametr,  $I_p = 15000$  A, zakładana szczytowa wartość prądu łuku.

$$g(k) = G \cdot (1 - a_1) + g(k-1) \cdot a_1 \quad (3)$$

$$a_1 = e^{-T/\tau_p}, T - \text{krok modelowania}$$

$$g(0) = 0,054 \cdot \frac{i}{u_p \cdot l} \quad (4)$$

Wartość początkowa konduktancji w chwili zwarcia:

$$g(t_z) = 0,054 \cdot \frac{i}{u_p \cdot l} \quad (5)$$

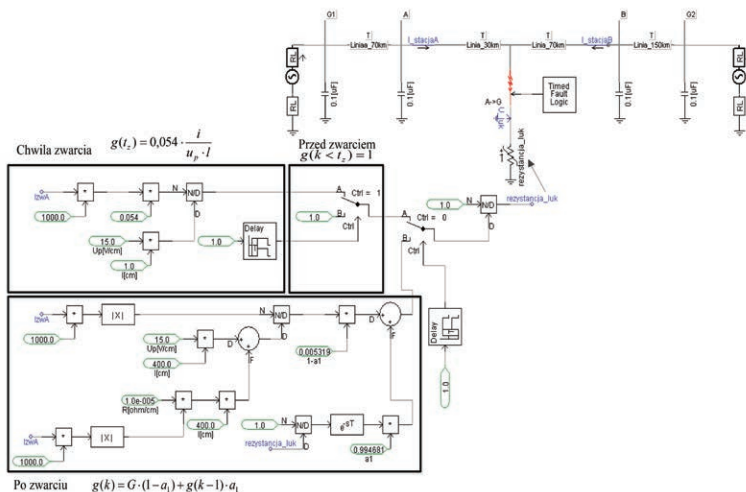
Równania 1–5 są wykorzystane w modelu przedstawionym na rys. 9. Model ten jest podzielony na trzy części, które określają wartość rezystancji łuku przed, po i podczas trwania zwarcia. Symulowane jest zwarcie w odległości 30 km od stacji A oraz 70 km od stacji B, przy czym odległości te są zmieniane podczas testów laboratoryjnych.

Na rys. 7 przedstawiono zmienną w czasie rezystancję łuku elektrycznego występującego w miejscu zwarcia, którą otrzymano w wyniku symulacji układu z rys. 9. Maksymalna wartość rezystancji łuku dla analizowanego przypadku nie przekracza granicy 25  $\Omega$ .

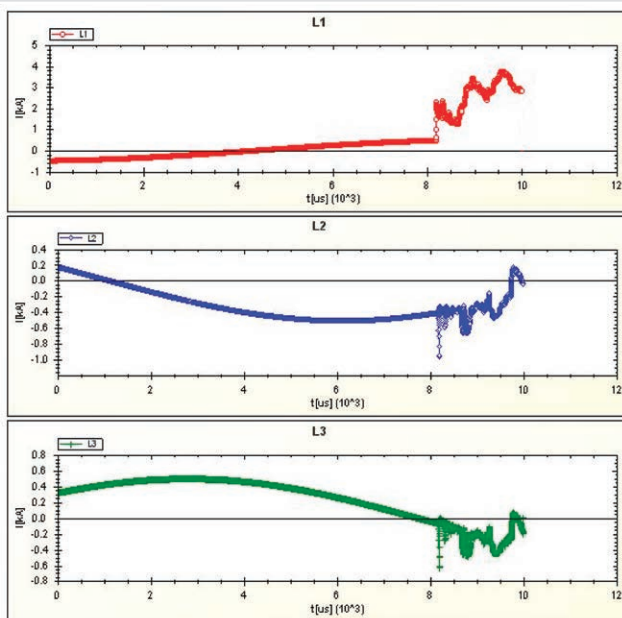
Prąd zwarciovowy w stacji A przedstawiono na rys. 8. Zwarcie zachodzi w chwili  $t_z = 0,225$  s. Można zaobserwować po tym czasie nakładanie się wysokoczęstotliwościowego sygnału na fale prądowe. Mimo dodatkowych składowych kształt fal nie zmienia się znacząco, dzięki czemu algorytm falowy działa poprawnie dla tego typu zwarc. Potwierdzono to doświadczalnie w podrozdziale 5.4.

### 5.4. Wyniki działania algorytmu

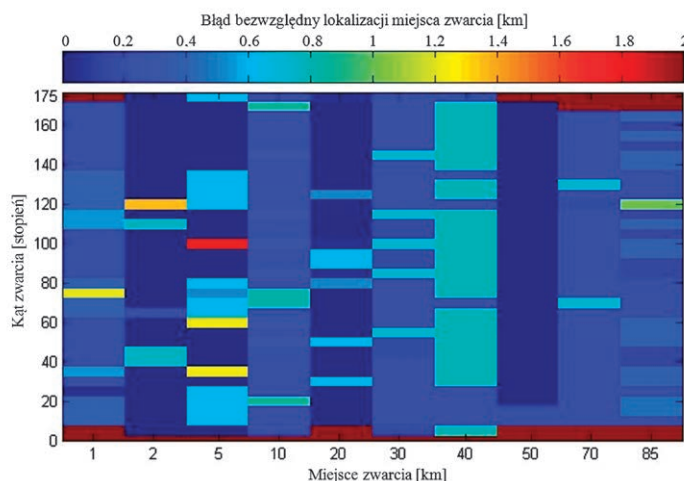
Zrealizowano liczne testy, dla różnej odległości miejsca zwarcia i kąta dla zwarcia jednofazowego L1-E łukowego. Przykładowy przebieg zarejestrowany przez urządzenie z częstotliwością 1 MHz przedstawiono na rys. 10. Wyniki działania algorytmu dla zwarcia



Rys. 9. Model łuku pierwotnego, PSCAD/EMTDC



Rys. 10. Wyniki rejestracji zwarcia, interfejs graficzny urządzenia



Rys. 11. Wyniki działania algorytmu falowego, długość linii: 100 km

jednofazowego przedstawiono na rys. 11, gdzie czerwony kolor oznacza obszary o zwiększonym błędzie lokalizacji miejsca zwarcia. Można zaobserwować błędne działanie algorytmu dla małych kątów zwarcia oraz poprawne wyniki dla praktycznie wszystkich pozostałych przypadków.

Oprócz zwarc łukowych przetestowano algorytm dla różnych typów zwarc (L2-E, L1-L2, L1-L2-L3 itd.), przy czym uzyskano wyniki zbliżone do wyników symulacyjnych, które przedstawiono w publikacji [10], gdzie uwzględniono jedynie wyniki symulacyjne algorytmu (bez uwzględnienia sprzętu).

Prawidłowe działanie algorytmu wynika z doboru odpowiedniej falki do danego zastosowania, która będzie najbardziej podobna do poszukiwanej składowej sygnału, a w tym przypadku odpowiada wzrostowi prądu związanemu z propagacją fali elektromagnetycznej. Co więcej, odpowiednio wysoki zakres rozpatrywanego zakresu częstotliwości pozwala na precyzyjne określenie danego impulsu w czasie. Warto zauważyć, że dobór optymalnego algorytmu był możliwy dzięki wykorzystaniu komputerowych symulacji, przy czym w tym artykule udowodniono, że algorytm jest możliwy do zaimplementowania na platformie sprzętowej.

## 6. Podsumowanie

Celem testów było sprawdzenie działania algorytmu lokalizacji miejsca zwarcia opartego na zjawiskach falowych, który będzie się charakteryzował mniejszymi błędami w porównaniu z obecnie powszechnie używanymi metodami impedancyjnymi lokalizacji miejsca zwarcia. Opracowanie takiego algorytmu pozwala na poprawę stabilności systemu elektroenergetycznego ze względu na bardziej efektywną inspekcję linii, która może być przeprowadzona dzięki dokładnej lokalizacji miejsca zwarcia.

W artykule opisano stanowisko testowe i metodologię badań, które pozwoliły na sprawdzenie działania układu falowej lokalizacji miejsca zwarcia w warunkach laboratoryjnych.

Przeprowadzone testy potwierdzają, że udało się opracować algorytm lokalizacji miejsca zwarcia oparty na przekształceniu falowym, pozwalający na dokładną lokalizację zwarc w liniach elektroenergetycznych WN z wykorzystaniem występujących w nich zjawisk falowych. Algorytm ten zapewnia lokalizację miejsca zwarcia ze średnim błędem 250 m, wyłączając przypadki, gdy zwarcie zachodzi przy przejściu napięcia przez zero (lub w pobliżu:  $\pm 2,5^\circ$ ). Kolejnym krokiem w sprawdzeniu działania układu falowej lokalizacji będzie testowanie urządzenia w rzeczywistych warunkach, tzn. na stacji elektroenergetycznej. Ze względu na stosunkowo rzadkie występowanie zwarc w liniach WN badania te mogą trwać długo. Z większym prawdopodobieństwem możliwe będzie sprawdzenie lokalizatora w wypadku wystąpienia operacji łączeniowych, załączania baterii kondensatorów czy przy występowaniu wyładowań atmosferycznych. Tego typu zdarzenia są źródłem sygnałów o wysokiej częstotliwości, które mogą być wykryte przez odpowiednio nastawiony falowy lokalizator.

### Bibliografia

1. Glik K. i in., Travelling wave fault location in power transmission systems: an overview, *Journal of Electrical Systems* 2011, No. 7, s. 287–296.
2. Qin J., Chen X., Zheng J., Travelling wave fault location of transmission line using wavelet transform, *Proceedings of IEEE Powercon Conference*, 1998, s. 533–537.
3. Gale P.F. i in., Travelling wave fault locator experience on ESKOM's transmission network, *Proc. IEE Seventh International Conference on Developments in Power System Protection*, 2001, s. 327–330.
4. Gale P.F., Stokoe J., Crossley P.A., Practical experience with travelling wave fault locators on Scottish power's 275&400kV transmission system, *Proc. Sixth IEEE International Conference on Developments in Power System Protection*, 1997, s. 192–196.
5. Xu B., Shu Z., Gale P., The application of travelling wave fault locators in China, *Proc. IET 9th International Conference on Developments in Power System Protection*, 2008, s. 535–539.
6. Haffar El A., Lehtonen M., Evaluation of travelling wave fault location based on field measurements, *Proc. IET 9th International Conference on Developments in Power System Protection*, 2008, s. 601–605.
7. Zimath S.L., Ramos M.A.F., Filho J.E.S., Comparison of impedance and travelling wave fault location using real faults, *Proc. IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 2010, s. 1–5.
8. Zhen W. i in., Travelling wave fault location test technique and its applications using high speed travelling wave generator, *Proc. Power and Energy Engineering Conference (APPEEC 2012)*, 2012, s. 1–4.
9. Kowalik R., Januszewski M., Rasolomampionona D., Problems Found During Testing Synchronous Digital Hierarchical Devices Used on Power Protection Systems, *IEEE Transactions On Power Delivery* 2013, No. 28 (1), s. 11–20.
10. Glik K., Rasolomampionona D., Kowalik R., Detection, classification and fault location in HV lines using travelling waves, *Przegląd Elektrotechniczny* 2012, nr 1a, s. 269–275.
11. Mallat S., *A Wavelet Tour of Signal Processing*, New York: Academic, 2008.
12. TWS Mk VI User Manual, Travelling Wave Fault Locator, document ID: 40-08534-02.
13. Johns A.T., Aggarwal R.K., Song Y.H., Improved techniques for modeling fault arcs on faulted EHV transmission systems, *IEE – Generation, Transmission and Distribution* 1994, No. 141, s. 148–154.
14. Rosołowski E., *Komputerowe metody analizy elektromagnetycznych stanów przejściowych*, Wrocław 2009, s. 361.

### Krzysztof Glik

mgr inż.

Politechnika Warszawska

e-mail: krzysztof.glik@ien.pw.edu.pl

Ukończył studia magisterskie na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej (2009). Obecnie jest doktorantem w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Warszawskiej oraz pracuje w CJR Polska. Jego główne zainteresowania zawodowe dotyczą falowej lokalizacji miejsca zwarcia.

### Désiré D. Rasolomampionona

dr hab. inż. prof. PW

Politechnika Warszawska

e-mail: desire.rasolomampionona@ien.pw.edu.pl

Od 1994 roku pracuje na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej w Instytucie Elektroenergetyki. Obecnie jest kierownikiem Zakładu Aparatów i Automatyki Elektroenergetycznej. Jego zainteresowania naukowe koncentrują się głównie wokół problemów dotyczących automatyki elektroenergetycznej, sterowania pracą systemu elektroenergetycznego oraz zastosowania telekomunikacji i nowoczesnych technik informatycznych w elektroenergetyce.