

doi:10.15199/48.2016.01.12

Analiza numeryczna przebiegów udarowych. Wyniki badań

Streszczenie. Artykuł poświęcony jest zagadnieniom z zakresu inżynierii wysokonapięciowej. Obiektem zainteresowania są przebiegi impulsowe zwane udarami napięciowymi. W trakcie eksploatacji generatorów przebiegów udarowych pojawiają się sytuacje, w których na przebieg udarowy nakładają się składowe mające charakter tłumionych oscylacji. Są one niepożądane, ponieważ utrudniają identyfikację parametrów przebiegu. W celu ich eliminacji zastosowano algorytmy wstępnego przetwarzania danych. Zaprezentowano wyniki badań numerycznych uzyskane z wykorzystaniem opisanych algorytmów.

Abstract. This paper is devoted to the issues of the scope of high voltage engineering. The object of interests is surges waveforms called voltage surge. In the course of exploitation of surge waveforms, there are situations in which components having the character of damped oscillations impose on surge waveforms. They are unwanted because they make it difficult to identify the course of parameters. In order to eliminate them, preprocessing algorithms have been applied here. The paper presents the results of numerical obtained by the described algorithms. (**Numerical analysis of surge waveforms, research results**)

Słowa kluczowe: napięcia udarowe piorunowe, analiza danych, filtracja cyfrowa, wyznaczanie parametrów

Keywords: lightning impulse voltages, data analysis, digital filtering, parameters evaluation

Wprowadzenie

Układy izolacyjne stosowane w elektroenergetyce poddawane są różnego rodzaju narażeniom. Istotną rolę odgrywają wśród nich te, które związane są z konsekwencjami wystąpienia wyładowania atmosferycznego, które inicjuje w instalacji elektrycznej przepięcie mającego charakter udaru piorunowego. Z tego powodu istnieje potrzeba przeprowadzania badań laboratoryjnych wykonywanych na etapie poprzedzającym wysłanie danego układu izolacyjnego na rynek. Ich celem jest weryfikacja poprawności konstrukcji danego urządzenia poprzez poddanie go testom z wykorzystaniem przebiegów napięcia i prądu o określonym kształcie. Mając na celu możliwość porównywania wyników badań uzyskiwanych w różnych laboratoriach opracowano normę [1] definiującą sposób określania parametrów takich przebiegów. Zadanie to jest utrudnione w sytuacjach, w których na przebieg udarowy (użyteczny) nakładają się oscylacje [2] związane z pasożytniczymi pojemnościami i indukcyjnościami wynikającymi z uwarunkowań konstrukcyjnych generatora przebiegów udarowych. Z tego powodu konieczne jest wstępne przetwarzanie takiego sygnału na etapie poprzedzającym określenie parametrów przebiegu udarowego pozbawionego zakłóceń.

Rejestracje przebiegów udarowych prowadzone są z wykorzystaniem techniki cyfrowej. Uzyskana w ten sposób informacja ma postać numeryczną dogodną do przetwarzania z wykorzystaniem programów komputerowych implementujących różnego rodzaju algorytmy analizy i przetwarzania danych pomiarowych. W literaturze znaleźć można publikacje opisujące liczne rozwiązania oparte o zastosowanie metod optymalizacji nieliniowej [3] czy też filtracji cyfrowej rekursywnej i nierekursywnej [4]. W prezentowanym artykule zaproponowano model matematyczny udaru znormalizowanego rzeczywistego pełnego, który wykorzystano do analizy dokładności algorytmów identyfikacji jego parametrów czasowych i amplitudowych. Odniesieniem do otrzymanych wyników są parametry przebiegu niezakłóconego.

Badania numeryczne – dane wejściowe i algorytmy

W ramach badań zrealizowano przetwarzanie sygnału, który składa się z trzech komponentów opisanych poniżej i wykreślonych na rysunku 1.

Komponent 1 ($u(t)$ – rysunek 1) jest modelem udaru napięciowego piorunowego i łączeniowego. Dla każdego z

nich wartość szczytowa (U_m) jest równa 1V natomiast relacja między czasem trwania czoła T_1 i czasem do półszczytu na grzbiecie T_2 (kształt udaru) jest równa odpowiednio $T_1/T_2 = 1, 2/50$ oraz $T_1/T_2 = 250/2500$. Wzór wiążący wartość chwilową napięcia każdego z tych przebiegów z czasem ma postać [5]

$$(1) \quad u(t) = U_m' \left(\exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) \right)$$

gdzie: U_m' – amplituda, τ_1 – stała czasowa czoła, τ_2 – stała czasowa grzbiecia

Komponent 2 ($u_{\sin}(t)$ – rysunek 1) jest modelem oscylacji mającej charakter funkcji sinusoidalnej tłumionej eksponencjalnie danej wzorem (2)

$$(2) \quad u_{\sin}(t) = U_{m\sin} \sin(\omega t - \phi) \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\sin}}\right)$$

gdzie: $U_{m\sin}$ – amplituda sinusoidy przy braku tłumienia, ω – pulsacja, ϕ – faza odniesiona do chwili $t = 0$, τ_{\sin} – współczynnik tłumienia

Komponent 3 ($\varepsilon(t)$ – rysunek 1) jest sygnałem losowym o rozkładzie normalnym, wartości oczekiwanej μ oraz odchyleniu standardowym σ .

Przebiegi opisane wzorami (1), (2) oraz komponent 3 poddano sumowaniu i wykorzystano do wygenerowania sygnału będącego modelem rzeczywistego udaru napięciowego. Miał on postać daną wzorem (3)

$$(3) \quad u_r(t) = u(t) + u_{\sin}(t) + \varepsilon(t)$$

Celem przetwarzania sygnału zakłóconego było, na etapie pierwszym, otrzymanie przebiegu pozbawionego zakłóceń a na drugim etapie identyfikacja jego parametrów. Wykorzystano trzy algorytmy. Dwa bazowały na filtracji cyfrowej nierekursywnej (Algorytmy 2, 3) natomiast jeden na dopasowaniu funkcji modelowej danej wzorem (1) do zakłóconych danych (wzór 3) a następnie wygenerowaniu estymaty przebiegu niezakłóconego z wykorzystaniem wartości liczbowych U_m, τ_1, τ_2 (Algorytm 1).

W przypadku filtracji cyfrowej wykorzystano równanie różnicowe (4)

$$(4) \quad y(n) = b_0 x(n) + b_1 x(n-1) + \dots + b_M x(n-M)$$

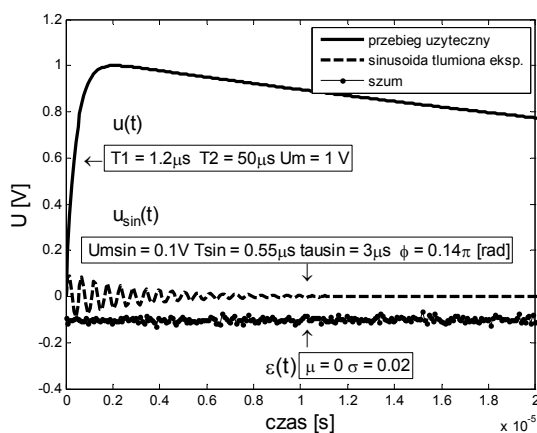
w którym n oznacza numer próbki ciągów x i y będących odpowiednio reprezentacją sygnału wejściowego i

wyjściowego, natomiast współczynniki od b_1 do b_M są próbkami odpowiedzi impulsowej zastosowanego filtra cyfrowego.

Przedstawione równanie wykorzystano do implementacji Algorytmu 2 (Tabela 1-2) natomiast jego modyfikację, polegającą na uzupełnieniu (rozszerzeniu) analizowanego wektora x dodatkowymi elementami do implementacji Algorytmu 3.

Wszystkie algorytmy zostały dokładnie opisane w [6], w której zamieszczono również opis metod wykorzystywanych do identyfikacji parametrów czasowych i amplitudowych udarów napięciowych piorunowych i łączeniowych.

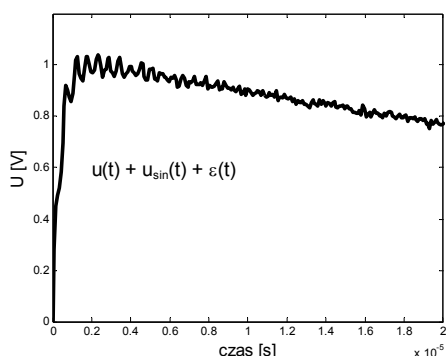
Na rysunku 1 zaprezentowano trzy przebiegi. Pierwszy z nich wykreślony linią ciągłą jest to komponent 1 opisany wzorem (1), kolejny przedstawiony linią przerywaną to składowa zdefiniowana za pomocą wzoru (2). Wykres będący zbiorem czarnych kropek przedstawia sygnał losowy celowo ułożony poniżej osi odciętych. Jest to zabieg mający na celu uzyskanie większej przejrzystości rysunku w rzeczywistości do analiz zastosowano przebieg losowy o wartości oczekiwanej równej zero.



Rys. 1. Przykładowe przebiegi czasowe wykorzystane do wygenerowania udaru napięciowego piorunowego znormalizowanego

Przykładowy przebieg opisany wzorem (3) przedstawiono na rysunku 2.

Finalnym celem badań numerycznych było określenie dwóch parametrów czasowych – czasu trwania czoła T_1 , czasu do półszczytu na grzbiecie T_2 i wartości szczytowej U_m .



Rys. 2. Przykładowy przebieg poddany przetwarzaniu

Badania numeryczne – wyniki

Wyniki badań zaprezentowano w dwóch tabelach skojarzonych z udarem piorunowym (Tabela 1) i łączeniowym (Tabela 2). W pierwszym wierszu podano nazwę badanego udaru oraz związane z nim czasy T_1 i T_2 .

W wierszu drugim wartości referencyjne tych parametrów. W dwóch kolejnych wierszach zamieszczono informacje o amplitudzie początkowej, współczynniku tłumienia oraz fazie tłumionej sinusoidy opisanej wzorem (2) oraz wartości oczekiwanej i odchyleniu standardowym komponentu 3. W kolejnym wierszu w komórce zlokalizowanej po lewej stronie podano okres przebiegu sinusoidalnego. Dla każdego z nich obliczono wartości liczbowe poszukiwanych parametrów (T_1, T_2, U_m) stosując opisane w [6] algorytmy.

Analiza treści tabeli 1 pozwala stwierdzić że najmniejsza rozbieżność występuje w przypadku obliczania wartości szczytowej U_m . W siedmiu przypadkach (wiersze 7, 11,12,13,15,16,17) następuje zawyżenie wartości liczbowej w stosunku do referencyjnej, w jednym przypadku (wiersz 8) jej zaniżenie. Generalnie rozbieżności te reprezentowane są na trzecim (6 przypadków) lub czwartym (2 przypadki) miejscu po przecinku. W odniesieniu do dokładności określenia czasu T_2 można zaobserwować, że w siedmiu przypadkach podana wartość jest zaniżona (wiersze 7,11,12,13,15,16,17) a w dwóch zawyżona (wiersze 8,9). Najgorszy przypadek dotyczy Algorytmów 2 i 3 dla okresu $T_{sin} = 0.13 \mu s$. Różnica pomiędzy wartościami wyliczonymi oraz wartością referencyjną ($50.0001 \mu s$) jest równa odpowiednio $0.6529 \mu s$ i $0.6799 \mu s$. Najlepsze wyniki uzyskano wykorzystując Algorytm 1. Obserwowane rozbieżności są nie większe od $0.03 \mu s$, a w jednym przypadku poniżej $0.01 \mu s$ (wiersz 7). Ostatnim parametrem, który pozostał do omówienia jest czas do półszczytu T_1 . Już pobieżna obserwacja treści tabeli 1 pozwala zauważyć istotną przewagę metody odtwarzania przebiegu niezakłóconego (Algorytm 1) [6] nad filtracją cyfrową. Wartości liczbowe ułożone w kolumnie związanej z omawianym parametrem różnią się maksymalnie o $0.015 \mu s$ (wiersz 9) w odniesieniu do wartości referencyjnej równej $1.1997 \mu s$. Algorytmy 2,3 dostarczają wyników różnej jakości przewagę ma jednak filtracja cyfrowa z rozszerzaniem analizowanego wektora [6]. Dla czasów $T_{sin} = 0.27 \mu s$ i $T_{sin} = 0.13 \mu s$ (wiersze 16,17) rozbieżności są porównywalne z tymi jakie uzyskano za pomocą optymalizacji gradientowej.

W tabeli 2 zamieszczono wartości liczbowe związane z udarem łączeniowym. W przypadku czasu T_2 w siedmiu przypadkach (wiersze 7,8,9,11,12,15,16) różnica pomiędzy wartością obliczoną a referencyjną ($2503.4324 \mu s$) jest nie większa niż $3 \mu s$. Najgorszy wynik uzyskano dla Algorytmu 2 i okresu $T_{sin} = 96 \mu s$ (wiersz 13). Dla czasu T_1 rozbieżności obserwowane dla Algorytmów 2, 3 są podobne (wartości średnie czasów zamieszczonych w wierszach 11, 12,13 oraz 15,16,17 są równe odpowiednio $4.5 \mu s$ oraz $3 \mu s$) i trudno tutaj mówić o przewadze któregoś z nich. Na pierwszym miejscu plasuje się Algorytm 1 w tym przypadku największą rozbieżność w stosunku do referencji ($251.5123 \mu s$) uzyskano dla $T_{sin} = 96 (1.7253 \mu s)M$ a najmniejszą dla $T_{sin} = 48 \mu s (0.8032 \mu s)$. W odniesieniu do wartości szczytowej występują podobne prawidłowości jak dla udaru piorunowego (4 wartości zaniżone – wiersze 11,13,15,17 oraz 3 – wiersze 8,12,16, zawyżone w stosunku do wartości referencyjnej równej $0.9995 V$).

Zaprezentowane w tabelach 1, 2 wyniki uzyskano w oparciu o zbiór programów komputerowych opracowanych na potrzeby opisywanych badań. Mając na celu zwiększenie komfortu pracy przy analizie przebiegów otrzymanych w laboratorium opracowano wyspecjalizowane narzędzie przeznaczone do przetwarzania i analizy parametrów przebiegów udarowych. Jego opis jest treścią kolejnego rozdziału.

Tabela 1. Wyniki identyfikacji parametrów udaru pełnego znormalizowanego $T_1/T_2 = 1,2/50 [\mu s/\mu s]$

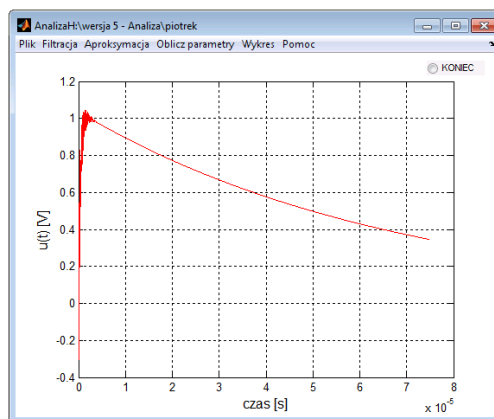
| | | | | |
|----|--|---------------|---------------|-----------|
| 1 | Znormalizowany udar napięciowy piorunowy $T_1/T_2 = 1,2/50 [\mu s/\mu s]$ | | | |
| 2 | Bez zakłócenia $T_1/T_2 = 1,1997/50,0010 [\mu s/\mu s]$ $U_m = 1,0000 V$ | | | |
| 3 | $U_{msin} = 0,1 V, \tau_{sin} = 3 \mu s, \phi = \pi/7 rad$ | | | |
| 4 | $\mu = 0, \epsilon = 0,02$ | | | |
| 5 | $T_{sin} [\mu s]$ | $T_1 [\mu s]$ | $T_2 [\mu s]$ | $U_m [V]$ |
| 6 | Algorytm 1 (optymalizacja gradientowa) | | | |
| 7 | 0.13 | 1.2013 | 49.9931 | 1.0001 |
| 8 | 0.27 | 1.1984 | 50.0309 | 0.9995 |
| 9 | 0.55 | 1.1854 | 50.0201 | 1.0000 |
| 10 | Algorytm 2 (filtr SOI) | | | |
| 11 | 0.13 | 1.3319 | 49.3481 | 1.0069 |
| 12 | 0.27 | 1.2655 | 49.8074 | 1.0038 |
| 13 | 0.55 | 1.2507 | 49.6765 | 1.0033 |
| 14 | Algorytm 3 (filtr SOI z rozszerzeniem wektora) | | | |
| 15 | 0.13 | 1.3018 | 49.3211 | 1.0069 |
| 16 | 0.27 | 1.2058 | 49.7538 | 1.0038 |
| 17 | 0.55 | 1.1878 | 49.6200 | 1.0033 |

Tabela 2. Wyniki identyfikacji parametrów udaru pełnego znormalizowanego $T_1/T_2 = 250/2500 [\mu s/\mu s]$

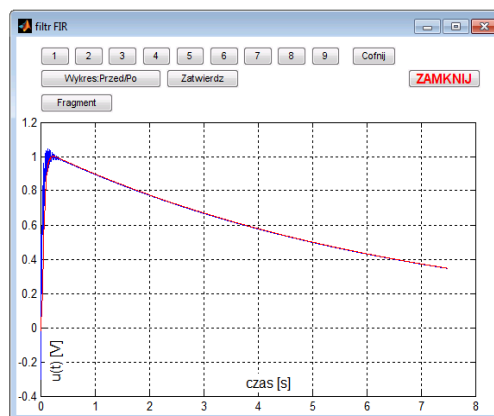
| | | | | |
|----|--|---------------|---------------|-----------|
| 1 | Znormalizowany udar napięciowy łączeniowy $T_1/T_2 = 250/2500 [\mu s/\mu s]$ | | | |
| 2 | Bez zakłócenia $T_1/T_2 = 251.5123/2503.4324 [\mu s/\mu s]$ $U_m = 0,9995 V$ | | | |
| 3 | $U_{msin} = 0,125 V, \tau_{sin} = 150 \mu s, \phi = \pi/6 rad$ | | | |
| 4 | $\mu = 0, \epsilon = 0,03$ | | | |
| 5 | $T_{sin} [\mu s]$ | $T_1 [\mu s]$ | $T_2 [\mu s]$ | $U_m [V]$ |
| 6 | Algorytm 1 (optymalizacja gradientowa) | | | |
| 7 | 48 | 250.7091 | 2500.9735 | 0.9995 |
| 8 | 72 | 250.6754 | 2501.1388 | 1.0000 |
| 9 | 96 | 249.7870 | 2501.0779 | 0.9995 |
| 10 | Algorytm 2 (filtr SOI) | | | |
| 11 | 48 | 252.0175 | 2502.8732 | 0.9993 |
| 12 | 72 | 252.6579 | 2502.8836 | 1.0001 |
| 13 | 96 | 260.2321 | 2510.4827 | 0.9992 |
| 14 | Algorytm 3 (filtr SOI z rozszerzeniem wektora) | | | |
| 15 | 48 | 252.1753 | 2502.8732 | 0.9993 |
| 16 | 72 | 250.0242 | 2500.5180 | 1.0001 |
| 17 | 96 | 256.6552 | 2507.2699 | 0.9992 |

Aplikacja do analizy parametrów przebiegów udarowych

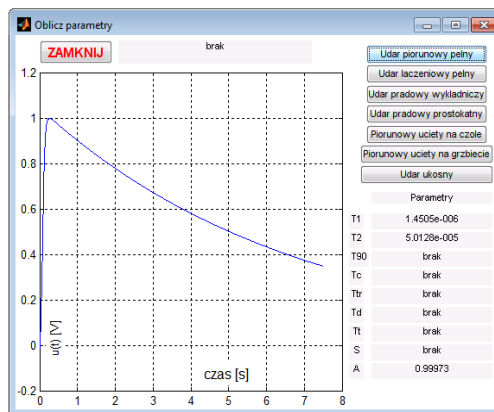
Najważniejszy moduł będący częścią składową aplikacji służy do określania parametrów udarów napięciowych piorunowych i łączeniowych pełnych, udarów prądowych wykładniczych i prostokątnych oraz udarów ukośnych i uciętych. Źródłem danych są pliki tekstowe mogące zawierać zarówno próbki przebiegów zarejestrowanych w laboratorium jak i tych wygenerowanych z wykorzystaniem programów komputerowych. Praca z aplikacją zaczyna się od uruchomienia graficznego interfejsu użytkownika, z którego można wywołać dziewięć modułów. Cztery z nich służą do przetwarzania danych z wykorzystaniem filtracji cyfrowej nierekursywnej, filtracji cyfrowej wykorzystującej proste i odwrotne dyskretne przekształcenie Fouriera i filtracji medianowej. Cztery kolejne moduły implementują metody optymalizacji i umożliwiają dopasowanie danych do różnych rodzajów funkcji nieliniowych z automatycznym generowaniem parametrów startowych (zmiennych optymalizowanych) inicjujących obliczenia. Ostatnie z wymienionych narzędzi służy do identyfikacji parametrów udarów. Przykładowe okna graficzne przedstawiono na rysunkach 3,4,5.



Rys. 3. Główne okno aplikacji



Rys. 4. Okno służące do filtracji cyfrowej przebiegów udarowych



Rys. 5. Okno służące do identyfikacji parametrów przebiegów udarowych

Wnioski

Głównym celem przeprowadzonych badań jest uzyskanie odpowiedzi na pytanie czy wykorzystanie cyfrowych metod analizy i przetwarzania danych umożliwiła uzyskanie informacji o zdefiniowanych w normie [2] parametrach przebiegów wytwarzanych przez generator udarów napięciowych. Okolicznością utrudniającą realizację tego zadania jest schemat zastępczy generatora zawierający pasożytnicze pojemności i indukcyjności, co przekłada się na występowanie w rzeczywistym przebiegu udarowym składowej sinusoidalnej wpływającej na dokładność określenia parametrów udaru. Konieczne jest, więc zastosowanie przetwarzania wstępnego takiego sygnału, który zawiera dodatkowo szum związany ze

specyfiką przetwarzania analogowo-cyfrowego oraz wpływem tła elektromagnetycznego i innych czynników.

Wśród zastosowanych metod wykorzystano filtrację cyfrową nierekursywną (Algorytm 2, 3) oraz algorytm dopasowujący model matematyczny do zakłóconych danych (Algorytm 1). Po wstępnym przetwarzaniu danych przeprowadzono identyfikację parametrów mających znaczenie diagnostyczne. Realizację drugiego zadania wykonano z wykorzystaniem algorytmów opisanych w [5].

Na tle wyników badań zaprezentowanych w innych publikacjach [7] można zauważyć podobne prawidłowości jak te, które uzyskać można w oparciu o przedstawioną analizę treści tabeli 1 i 2. Zastosowanie filtracji cyfrowej dostarcza przebiegów o zniekształconym zboczach, co przekłada się na niedokładność wyznaczenia czasu czoła – T_1 . Jakość identyfikacji pozostałych parametrów jest porównywalna do jakości uzyskanej z wykorzystaniem algorytmów użytych do badań przedstawionych w artykule.

Autor: mgr inż. Piotr Figoń, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, ul. Generała Sylwestra Kaliskiego 2, 01-476 Warszawa, E-mail: pfigon@wat.edu.pl

LITERATURA

- [1] Polska Norma PN-92/E-04060, Wysokonapięciowa technika probiercza, Ogólne określenia i wymagania probiercze.
- [2] Zydroń P., Roehrich J., Wytwarzanie i numeryczne modelowanie udarów napięciowych piorunowych, *Elektrotechnika i Elektronika*, 26 (2007), 79-85
- [3] Zydroń P., Janiszewski P., Numeryczne wyznaczanie parametrów udarów piorunowych. *Materiały V Ogólnopolskiego Sympozjum Inżyniera Wysokich Napięć IW-2000*, (2000), 445-450
- [4] Zydroń P., Przetwarzanie i analiza sygnałów wysokonapięciowych udarów piorunowych, *Przebiegów Elektrotechniczny*, 11b (2010), 304-307
- [5] Flisowski Z., Technika Wysokich Napięć, PWN 2010
- [6] Figoń P., Analiza numeryczna przebiegów udarowych. Algorytmy obliczeniowe. *IX Krajowa Konferencja „Diagnostyka Techniczna Urządzeń i Systemów”*, (2015), 32-36
- [7] Lewin P.L., Tran T.N., Swaffield D.J., H, Höllström J.K., Zero-Phase Filtering for Lightning Impulse Evaluation: A K-Factor filter for the revision of IEC60060-1 and -2, 23 (2008), 3-12
- [8] Matlab Signal Processing Toolbox. www.mathworks.com.