

## Modelowanie urządzeń ograniczających przepięcia w sieci elektroenergetycznej o napięciu poniżej 1000 V

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono metodę jednoznacznego odwzorowania charakterystyk napięciowo-prądowych warystorów tlenkowych stosowanych w urządzeniach do ograniczania przepięć w sieciach rozdzielczych niskich napięć. Opracowany dyskretny model warystora wykorzystano do obliczeń w programie ATP/EMTP.

**Abstract.** This paper presents method, which unambiguously describe V-I characteristic of metal oxide varistor, which are used in surge protective devices connected to low-voltage distribution systems. A new model of varistor was used to computer simulation in program ATP/EMTP.

**Słowa kluczowe:** urządzenia do ograniczania przepięć, warystory tlenkowe, dyskretny model, program ATP/EMTP.

**Keywords:** surge protection device, metal oxide varistor, discrete model, program ATP/EMTP.

### Wstęp

Warystory tlenkowe ZnO są podstawowymi elementami urządzeń ograniczających przepięcia SPD (ang. Surge Protective Device) w sieciach elektroenergetycznych niskich, średnich i wysokich napięć. W urządzeniach tych wykorzystywana jest podstawowa właściwość warystorów, jaką jest malejąca rezystancja przy wzroście płynącego przez nie prądu.

Dotychczas w symulacjach komputerowych do modelowania warystorów wykorzystywano elementy liniowe lub nieliniowe o stałych skupionych. Z takich elementów tworzą układy połączeń umożliwiające z mniejszym lub większym błędem odwzorowanie przebiegów prądu w funkcji napięcia panującego na warystorach.

Przy dokładnej analizie zawsze pojawiały się problemy związane z wyznaczeniem parametrów zastępczych warystora. Nie bez znaczenia był również fakt statycznego i dynamicznego wyznaczania tych parametrów.

W przypadku analizy stanów nieustalonych, jakie wywołują napięcia i prądy udarowe dochodzące do sieci elektroenergetycznej, trudno jest, wykorzystując dostępne modele matematyczne, bezbłędnie aproksymować dynamiczne charakterystyki napięciowo-prądowe warystorów. Dodatkowo wyniki badań warystorów stosowanych w urządzeniach do ograniczania przepięć w sieciach rozdzielczych niskiego napięcia wykazały, że przy zaniku prądu udarowego płynącego przez warystor napięcie na nim osiąga mniejsze wartości w porównaniu z napięciem przy wzroście tego prądu. Tworzą się charakterystyczne pętle, których nie uwzględniano przy modelowaniu dynamicznych charakterystyk niskonapięciowych warystorów.

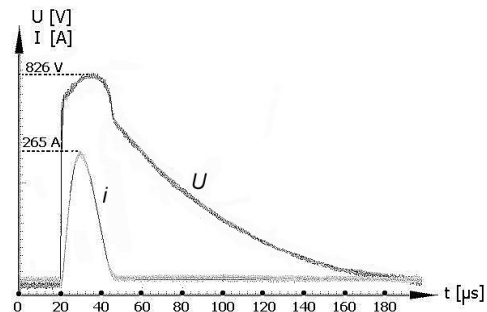
Rozwiązaniem powyższych problemów, umożliwiającym jednoznaczne odwzorowanie charakterystyk napięciowo-prądowych warystorów, jest zastosowanie technik cyfrowych. Błąd, jaki występuje podczas takiego analizy jest równy połowie kroku kwantyzacji przetworników AC/DC.

### Dyskretny model warystora

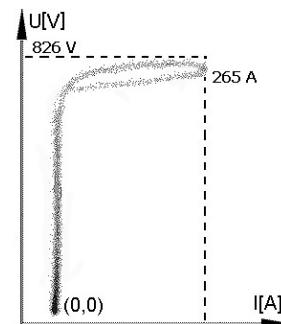
W prowadzonych badaniach wykorzystywano warystory badane zgodnie z wymaganiami prób klasy II [3] o następujących podstawowych parametrach  $U_c=275$  V,  $i_{sn}=20$  kA,  $i_{max}=40$  kA. Są to typowe warystory tlenkowe ZnO stosowane w urządzeniach ograniczających przepięcia w sieciach niskich napięć.

W czasie pomiarów doprowadzono do przepływu przez warystory prądów wyładowczych o kształcie 8/20 $\mu$ s. Przykłady zarejestrowanych przebiegów prądu i napięcia

oraz charakterystykę napięciowo-prądową jednego z badanych warystorów przedstawiono na rys.1 i 2.



Rys.1. Przebiegi prądu płynącego w warystorze oraz panującego na nim napięcia



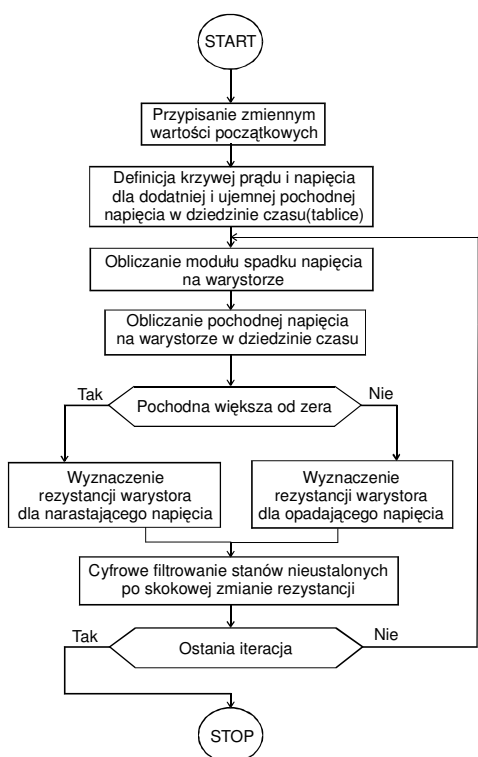
Rys.2. Dynamiczna charakterystyka napięciowo-prądowa badanego warystora

Wyniki pomiarów zapisano w formacie arkusza kalkulacyjnego. Zastosowanie do rejestracji wysokiej klasy oscyloskopu cyfrowego pozwoliło otrzymać dostateczną liczbę punktów, co umożliwiło dokładne odwzorowanie modelowanych przebiegów.

Otrzymane charakterystyki dynamiczne warystora w sposób jednoznaczny określają zależność między wartością prądu i napięcia oraz uwzględniają występujące przesunięcie fazowe. W tworzonym modelu uzasadnione jest również uwzględnianie indukcyjności przewodów (ok. 1 $\mu$ H/m) stosowanych do połączeń warystora w układzie ograniczającym przepięcia.

Dyskretny model warystora opracowano dla programu ATP/EMTP (ang. Electromagnetic Transient Program [1]),

który jest powszechnie wykorzystywany do obliczeń stanów nieustalonych w sieciach elektroenergetycznych. Tok postępowania przy tworzeniu modelu przedstawia rys. 3.



Rys.3. Algorytm dyskretnego modelu warystora

Zasadniczym punktem w algorytmie jest rozdzielenie procesu obliczeniowego pod wpływem wartości pochodnej napięcia obliczanej w kolejnych iteracjach dla poszczególnych dyskretnych wartości czasu.

Pochodna jest obliczana z większego z napięć występujących na zaciskach analizowanego warystora. Dzięki temu możliwe jest stosowanie opracowanego modelu warystora do przypadków występowania napięcia udarowego o biegunowości ujemnej lub prądu udarowego wpływającego do sieci od strony systemu uziomowego.

W dalszej kolejności wyznaczany jest przedział (poszczególne punkty zdefiniowanej charakterystyki stanowią granice przedziałów), w którym aktualnie znajduje się napięcie i wyznaczone są brakujące punkty w zdefiniowanej na początku charakterystyce.

Zaletą modelu jest możliwość zastosowania opracowanego algorytmu do aproksymacji dowolnego elementu o nieliniowej pętlicowej charakterystyce dynamicznej. Oczywiście sama rejestracja rzeczywistej charakterystyki warystora, ze względu na przetworniki AC/DC stosowane w przyrządach pomiarowych i ich skończoną rozdzielczość, wprowadza naturalne i akceptowalne powszechnie skokowe zmiany wartości mierzonych parametrów [2].

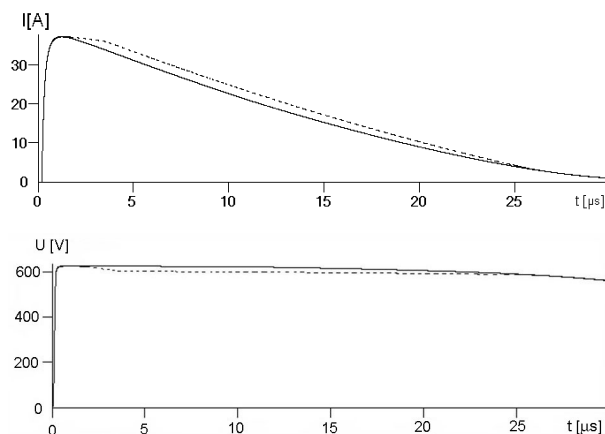
### Weryfikacja modelu warystora

Dotychczas w programie ATP/EMTP do modelowania ograniczników przepięć wykorzystywano element typu MOV (ang. Metal Oxide Varistor). Definiowana w programie krzywa V-I może się składać tylko z 16-stu punktów i nie uwzględnia występowania charakterystycznej pętli. Do aproksymacji brakujących punktów charakterystyki dynamicznej wykorzystywana jest funkcja wykładnicza.

Zastosowanie tej funkcji eliminuje załamania na aproksymowanej krzywej, ale jednocześnie ogranicza zakres zastosowań tego modelu. Dodatkowym problemem jest konieczność stosowania tzw. współczynnika odniesienia ( $V_{ref}$ ), który zapobiega występowaniu nierzeczywistych, dużych wartości napięcia w wyniku aproksymacji wykładniczej [1].

Wykorzystując zarejestrowane charakterystyki napięciowo-prądowe, porównano opracowany dyskretny model warystora z typowym modelem elementu typu MOV w programie ATP/EMTP.

Przykładowe przebiegi obliczonych prądów płynących w obu modelach warystorów i napięć na nich panujących przedstawiono na rys.4.



Rys.4. Obliczone przebiegi prądów płynących w modelach warystora oraz napięć na nim występujących.

Na rys. 4 liniami przerywanymi oznaczono przebiegi otrzymane dla opracowanego modelu warystora, a ciągłymi dla modelu wykorzystywanego w programie ATP/EMPT.

### Wnioski

Przedstawiony model warystora umożliwił jednoznaczne i dokładniejsze, w porównaniu z dotychczas stosowanymi modelami, odwzorowanie rzeczywistych kształtów charakterystyk napięciowo-prądowych warystorów, które są przenoszona do modelu bezpośrednio z krzywych otrzymanych doświadczalnie. Stosując w programie ATP/EMTP opracowany model warystora można przeanalizować zjawiska zachodzące w przypadku wystąpienia napięcia lub prądu udarowego w sieciach rozdzielczych niskiego napięcia, w których zastosowano pojedyncze lub wielostopniowe układy do ograniczania przepięć. Dodatkową zaletą opracowanego algorytmu jest możliwość jego zastosowania do modelowania dowolnego elementu nieliniowego.

### LITERATURA

- [1] ElectroMagnetic Transients Program (EMTP) Rule Book, 76-92
- [2] User Guide to Models in ATP, 23-137
- [3] PN-IEC 61643-1:2001, Urządzenia do ograniczania przepięć w sieciach rozdzielczych niskiego napięcia. Część 1. Wymagania techniczne i metody badań.

Autorzy: dr hab. inż. Andrzej Sowa, Politechnika Białostocka, Katedra Telekomunikacji i Aparatury Elektronicznej, ul. Wiejska 45d, 15-351 Białystok, E-mail: [andrzejsowa@ochrona.net.pl](mailto:andrzejsowa@ochrona.net.pl); mgr inż. Jarosław Wiater, Katedra Telekomunikacji i Aparatury Elektronicznej, ul. Wiejska 45d, 15-351 Białystok, E-mail: [jaroslawwiater@vela.pb.bialystok.pl](mailto:jaroslawwiater@vela.pb.bialystok.pl).