

## WPLYW CZĘSTOTLIWOŚCI NAPIĘCIA NA PRĄDY UPŁYWOWE OGRANICZNIKÓW PRZEPIĘĆ

Marek OLESZ

1. Politechnika Gdańska

tel: 583471820

fax: 583472136

e-mail: m.olesz@ely.pg.gda.pl

**Streszczenie:** W referacie przedstawiono wyniki pomiarów prądu upływowego dla tlenkowych ograniczników przepięć niskiego napięcia (ZnO) badanych przy wymuszeniach napięciem sinusoidalnym w zakresie 50 Hz ÷ 10 kHz. Zastosowane procedury pomiarowe umożliwiły dodatkowo wydzielenie składowych: rezystancyjnej i pojemnościowej z prądu upływowego oraz określenie wpływu częstotliwości na parametry elementów odwzorowujących zaproponowany model ogranicznika przepięć. Wiedza w zakresie wpływu częstotliwości na prądy upływowe ogranicznika jest konieczna w zastosowaniach praktycznych do prawidłowej interpretacji wyników pomiarów otrzymywanych w energetyce zawodowej, kiedy należy uwzględniać wpływ wyższych harmonicznych w napięciu zasilającym.

**Słowa kluczowe:** ograniczniki przepięć niskiego napięcia, warystory, diagnostyka

### 1. WSTĘP

Ograniczniki niskiego napięcia (nn) są powszechnie stosowane w instalacjach elektroenergetycznych do zmniejszenia skutków przepięć atmosferycznych i łączeniowych. Elementy te na skutek oddziaływania napięcia w sieci, a szczególnie wskutek przepływu prądów wyładowczych, ulegają starzeniu, którego jednym z symptomów jest często wykorzystywana w diagnostyce stanu technicznego zmiana charakterystyki prądowo – napięciowej w obszarze przedprzebiciowym [1, 2]. Zmiana ta może być między innymi wykrywalna za pomocą pomiaru prądu upływowego, a w szczególności jego składowej rezystancyjnej [2, 3].

Interpretacja otrzymanych tą metodą wyników pomiarów ogranicznika jest dość kłopotliwa, ponieważ wartość prądu upływowego zależy od następujących czynników [3]:

- wartości skutecznej napięcia sieci,
- zawartości wyższych harmonicznych napięcia zasilającego (kształt krzywej napięcia),
- czasu pomiędzy załączeniem pod napięcie ogranicznika, a wykonaniem pomiaru,
- temperatury ogranicznika wynikającej z temperatury otoczenia i składowej rezystancyjnej prądu upływowego.

Analizując współczynniki poprawkowe uwzględniające wpływ temperatury warystora oraz poziomu napięcia i jego częstotliwości w sieci, można stwierdzić, że w tym ostatnim przypadku pojawia się źródło największych błędów podczas przeliczania wyników pomiaru na poziom odniesienia – np.

dotyczący tylko składowej podstawowej harmonicznej napięcia.

W celu opracowania metod wspomagających kompensację prądów upływowych pochodzących od wyższych harmonicznych napięcia zasilającego wykonano szczegółowe badania odpowiedzi prądowej warystorów na napięcie sinusoidalne o regulowanej częstotliwości.

Najprostszy model warystora dla całego zakresu prądów do stanu przewodzenia włącznie zaproponowany w [4] zawiera połączone równoległe elementy  $R$ ,  $C$  odwzorowujące warstwy między ziarnami ZnO. Połączenie równoległe  $RC$  w pracy [5] zostało rozszerzone przez dołączenie szeregowego rezystora  $R_g$  modelującego przewodzenie ziaren ZnO i indukcyjność ceramiki  $L$ . W literaturze spotyka się wiele propozycji modelowania ograniczników przepięć, które w praktyce pozwalają z powodzeniem symulować stany nieustalone zachodzące w instalacjach elektroenergetycznych.

Ze względu na zainteresowanie tylko odpowiedzią prądową warystora w zakresie przedprzebiciowym uproszczono powyższy schemat do prostego modelu równoległego  $RC$ , którego parametry wyznaczono w dalszej części referatu na podstawie przeprowadzonych badań.

### 2. METODYKA BADAŃ

Badania przeprowadzono na ogranicznikach typu DEHNquard (rys. 1) o następujących parametrach:

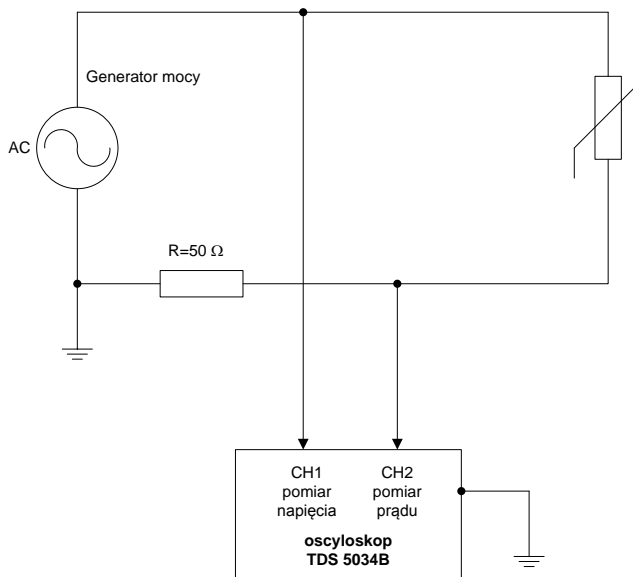
- napięcie trwałej pracy  $U_c=275$  V,
- znamionowy prąd wyładowczy  $8/20$   $\mu$ s – 20 kA,

do których przykładano napięcie o częstotliwości 50 Hz ÷ 10 kHz wymuszane z wzorcowego generatora mocy (rys. 2).

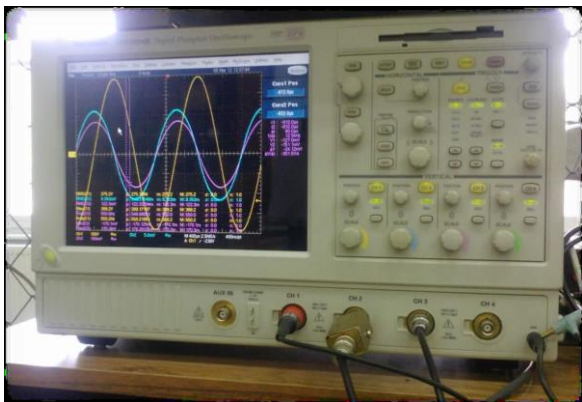
Generator typu PO – 28 umożliwiał płynną regulację częstotliwości w zakresie 20 Hz ÷ 20 kHz o napięciu do 340 V. Wartość napięcia wyjściowego generatora oraz prądu upływowego mierzono wykorzystując wejścia CH1 i CH2 oscyloskopu cyfrowego TDS 5034B (rys. 3). Otrzymane przebiegi napięcia i prądu (mierzono spadek napięcia na oporniku bezindukcyjnym) wykorzystano do dalszych obliczeń składowej rezystancyjnej i pojemnościowej prądu upływowego, a następnie do określenia parametrów najprostszego schematu zastępczego ogranicznika dla obszaru przedprzebiciowego w postaci równoległego połączenia elementów  $R$  i  $C$ .



Rys. 1. Ogranicznik DEHNGuard (po prawej uszkodzona wkładka)



Rys. 2. Układ pomiarowy do badania prądów upływowych ograniczników przepięć dla różnych częstotliwości napięcia zasilającego



Rys. 3. Oscyloskop z przebiegami napięcia i prądu mierzonego za pomocą spadku napięcia na rezystorze bezindukcyjnym oraz z wykorzystaniem cęg typu ALCL – 40D

W celu obliczenia rezystancji ogranicznika wyliczano moc  $P$  wydzielaną w strukturze ZnO [7] za pomocą zależności (1) wykorzystując całkowanie numeryczne zarejestrowanych oscyloskopem przebiegów napięcia i prądu upływowego w czasie.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t) = UI_R \quad (1)$$

gdzie:  $u(t)$ ,  $i(t)$  – przebiegi napięcia fazowego i prądu upływowego w czasie,  $T$  – okres zmian napięcia w sieci,  $U$  – wartość skuteczna napięcia na zaciskach ogranicznika obliczona za pomocą procedur pomiarowych oscyloskopu,  $I_R$  – wartość skuteczna składowej czynnej prądu upływowego ogranicznika.

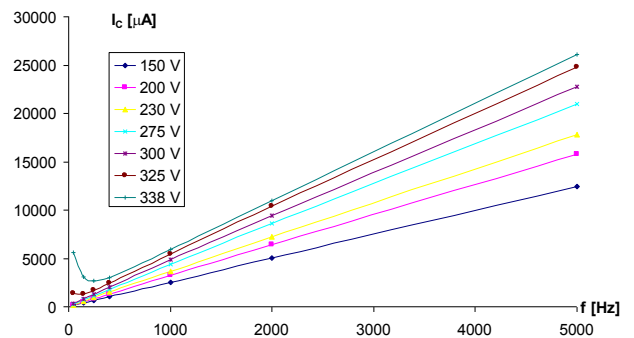
Następnie na podstawie otrzymanych wyników pomiarów  $u(t)$  i  $i(t)$  dla różnych częstotliwości napięcia wyliczano wartości:

- składowej czynnej  $I_R$  korzystając z mocy  $P$  i przekształcenia zależności (1),
- składowej pojemnościowej  $I_C$  według zależności (2).

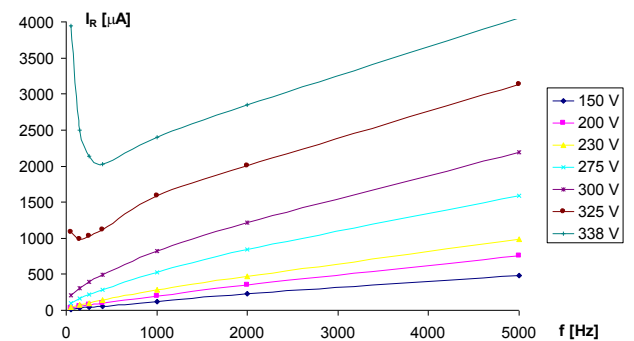
$$I_C = \sqrt{I^2 - I_R^2} \quad (2)$$

gdzie:  $I$  - wartość skuteczna prądu upływowego ogranicznika obliczona za pomocą procedur pomiarowych oscyloskopu z wartości chwilowych spadku napięcia na rezystorze bezindukcyjnym  $R = 50 \Omega$ .

Wartości  $I_R$  i  $I_C$  zestawiono w funkcji częstotliwości napięcia generatora na rysunkach 4 i 5.



Rys. 4. Składowa pojemnościowa prądu upływowego wybranego ogranicznika w funkcji częstotliwości napięcia zasilającego



Rys. 5. Składowa czynna prądu upływowego wybranego ogranicznika w funkcji częstotliwości napięcia zasilającego

Otrzymane charakterystyki umożliwiły obliczenie rezystancji  $R$  i pojemności  $C$  modelu warystora według wzorów (3) i (4).

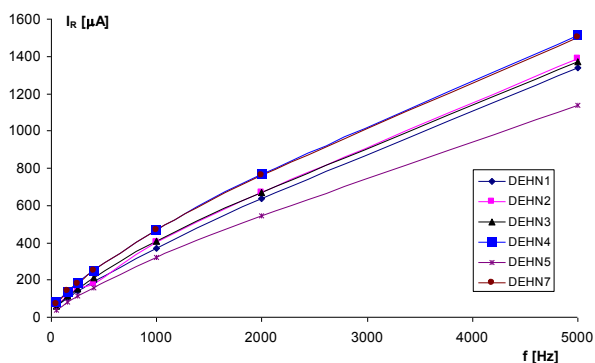
$$R = \frac{U}{I_R} \quad (3)$$

$$C = \frac{I_C}{2\pi f U} \quad (4)$$

### 3. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

Ogranicznik w stanie przedprzebieciowym jest wysokostratną pojemnością. Po przejściu w stan przebieciowy, co w danym przypadku według danych producenta rozpoczyna się od napięcia 275 V obserwuje się dopiero od 325 V wyraźnie wyższą składową rezystancyjną. Przy wyższych częstotliwościach składowa rezystancyjna maleje, aby przy częstotliwości charakterystycznej dla danego napięcia osiągnąć minimum i następnie wzrastać praktycznie liniowo z częstotliwością. Podobna zależność, ale z mniejszą intensywnością ma miejsce dla składowej pojemnościowej, która jest kilkukrotnie wyższa w stosunku do rezystancyjnej.

Otrzymane charakterystyki dla różnych ograniczników Dehnquard wykazują niewielki rozrzut wartości prądów pokazany przykładowo dla składowej rezystancyjnej na rysunku 6. Co ciekawe, dwa ograniczniki w grupie badanych (oznaczone nr 2 i 3) o wyraźnych nadpaleniach węglowych na izolacyjnej powierzchni obudowy na skutek przepływu prądu wyladowczego w czasie wyladowania piorunowego (rys. 1) nie wykazują prądu upływowego znacząco odbiegającego od nowych ograniczników. Dotyczy to zarówno składowej czynnej, jak i pojemnościowej, w całym zakresie badanych częstotliwości. Dla poszczególnych ograniczników uzyskiwano poprawne napięcie referencyjne przy przepływie prądu stałego o wartości 1 mA mieszczące się w zakresie 386 V ÷ 474 V [6] oraz mierzono prąd upływowy o wartościach niższych od wytycznych normy [8], która proponuje dla napięcia  $U_c$  poziom dopuszczalny do 1 mA.



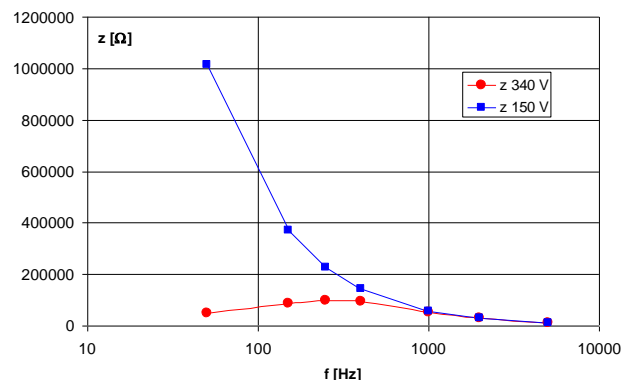
Rys. 6. Rozrzut charakterystyk składowej czynnej prądu upływowego ograniczników w funkcji częstotliwości przy napięciu 275 V

Otrzymane w pomiarach zależności  $I_R(f)$  wskazują na możliwość stosowania danego typu ograniczników nawet do częstotliwości 2500 Hz, przy której wciąż występuje poziom składowej rezystancyjnej niższy niż 1 mA. Przy takiej wartości prądu czynnego moc wydzielana przy napięciu trwałej pracy jest na poziomie 275 mW, co powoduje niewielką zmianę temperatury ogranicznika. Producenci ograniczników przystosowanych do pracy w sieci o częstotliwościach 50 lub 60 Hz nie podają granicznej częstotliwości dopuszczalnej pracy. W przypadku wykorzystania ograniczników przy napięciu o częstotliwości 400 Hz lub w układach przekształtnikowych, w których występują silnie odkształcone przebiegi napięcia, użytkownik ze względu na brak w katalogach produktów podanych wyżej informacji ma kłopoty z prawidłowym doбором ogranicznika.

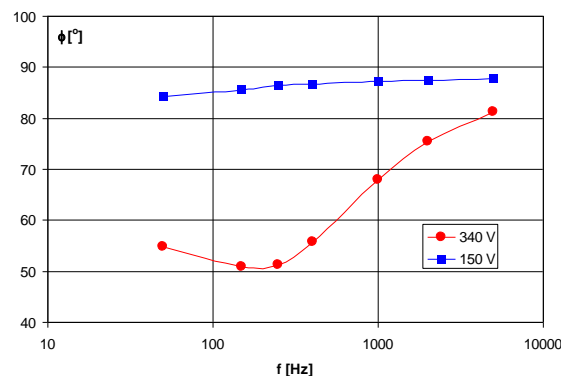
Na podstawie uzyskanych w pomiarach charakterystyk  $I(f)$ , obliczono charakterystyki modułu  $z(f)$  i kąta

przesunięcia  $\phi(f)$  impedancji ogranicznika dla napięć z zakresu od 150 do 340 V, które pokazano odpowiednio na rysunkach 7 i 8.

W zakresie przedprzebieciowym ogranicznika dla napięcia  $U < U_c$  (czyli do napięcia 275 V) występuje zmiana modułu impedancji ogranicznika, która silnie maleje w funkcji częstotliwości według charakterystyki potęgowej. Natomiast kąt przesunięcia fazowego nieznacznie wzrasta z częstotliwością od 84° do 88°, co aproksymowano z dobrą dokładnością zależnością logarytmiczną.



Rys. 7. Moduł impedancji  $z(f)$  badanego ogranicznika prądów



Rys. 8. Kąt przesunięcia fazowego impedancji o charakterze pojemnościowym badanego ogranicznika prądów

Zmiany impedancji i kąta przesunięcia fazowego w zakresie przedprzebieciowym są więc niewielkie, co można wykorzystać do korekcji wpływu wyższych harmonicznych w napięciu zasilającym [3].

Dopiero dla  $U > U_c$  występuje zasadnicza zmiana obu parametrów wynikająca z pojawienia się w zakresie do 1000 Hz wyższej składowej rezystancyjnej silnie obniżającej moduł impedancji oraz zmieniającej charakter warystora z pojemnościowego w kierunku obciążenia czynnego.

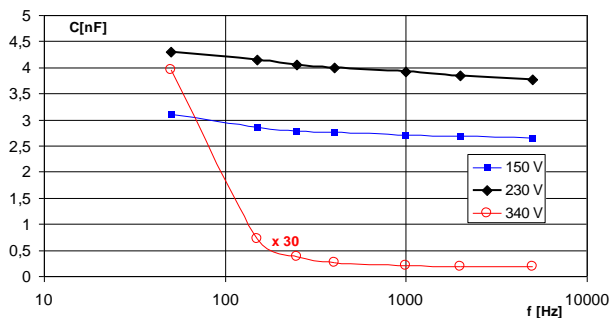
Kolejne charakterystyki z rysunków 9 i 10 pokazują parametry uproszczonego modelu równoległego RC w funkcji częstotliwości przyłożonego napięcia, obliczone na podstawie zależności (3) i (4).

W tym przypadku uzyskane przebiegi wskazują na niedoskonałość zaproponowanego modelu, gdyby zastosować go poza zakresem przebieciowym dla napięć przekraczających poziom napięcia  $U_c$ . Wynika to z faktu, że przy napięciu 340 V pojemność  $C$  w modelu ogranicznika gwałtownie maleje do poziomu nawet 5,5 nF dla częstotliwości przekraczających 250 Hz.

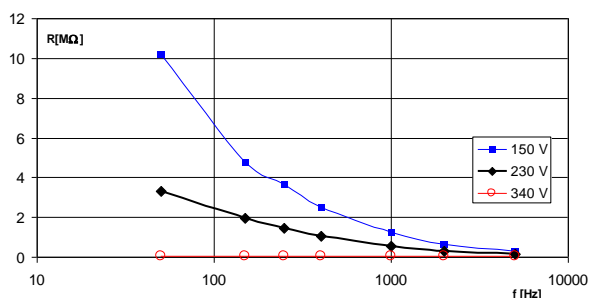
Natomiast mierzone pojemności badanych ograniczników przy niskich wartościach napięcia mostkiem RLC wynoszą około 2,6 nF malejąc ze wzrostem częstotliwości, podobnie jak pokazane przebiegi dla 150 V

i 230 V. Wynika stąd niewielki wpływ częstotliwości na pojemność zastępczą dla  $U < U_c$ .

Analiza przebiegu z rysunku 10 wskazuje na silne zmniejszenie rezystancji ogranicznika zarówno ze wzrostem napięcia, jak i częstotliwości. Z pracy [9] wynika, że przewodność ZnO jest proporcjonalna do częstotliwości  $f^{(-s)}$ . Wykładnik potęgi  $s$ , który zawiera się w przedziale (0,1) zależy od temperatury i wynosi  $0,8 \div 0,9$  dla temperatury pokojowej. W badaniach cienkich próbek ZnO przy wzroście temperatury do 500 K obserwowano niewielkie wartości  $s$  rzędu 0,1 [9].



Rys. 9. Pojemność  $C$  w funkcji częstotliwości  $f$  dla uproszczonego modelu RC równoległe ogranicznika



Rys. 10. Rezystancja  $R$  w funkcji częstotliwości  $f$  dla uproszczonego modelu RC równoległe ogranicznika

Na podstawie aproksymacji zależności  $R(f)$  z rysunku 10 stwierdzono poziom współczynnika  $s$  na poziomie około 0,7. Poprzez analogię do zjawisk w izolatorach najprawdopodobniej w strukturze ogranicznika wraz ze wzrostem częstotliwości występują opóźnienia z nadążeniem przez nośniki prądu za zmianami pola, co zmniejsza ilość energii traconej w warystorze.

#### 4. WNIOSKI KOŃCOWE

Dla ograniczników ZnO tego samego typu obserwuje się niewielki rozrzut prądu upływowego w funkcji przyłożonego napięcia dla  $U < U_c$ .

Rozrzut ten wzrasta z zwiększaniem częstotliwości i poziomem przyłożonego napięcia – szczególnie dla  $U > U_c$ .

Wiedza o prądach upływowych ograniczników dla wyższych częstotliwości umożliwi na podstawie obliczenia ilości wydzielanego ciepła określenie dopuszczalności stosowania warystorów w sieciach o  $f=400$  Hz oraz w układach przekształtnikowych.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

- Smulko J., Olesz M., Hasse L., Kaczmarek L., Lentka G., Problems of varistor quality assessment during exploitation, Metrology and Measurement Systems. Vol. XIX, No. 2, 2012, s. 395-404, ISSN 0860-8229.
- Olesz M., Diagnostyka niskonapięciowych warystorowych ograniczników prądu, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki nr 31, 2012, ISSN 1425-5766.
- Olesz M., Wpływ kształtu napięcia na pomiar prądu upływowego ograniczników prądu, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki nr 34, 2013, ISSN 1425-5766.
- Hinrichsen V, Peiser R., Simulation of the electrical and thermal behaviour of metal oxide surge arresters under AC stress, Int. Symposium on HV Eng., New Orleans 1989, paper 26.04,
- Philipp H. R., Levinson L. M., Degradation phenomena in zinc oxide varistors – a review. In: Advances in electronic ceramic. Vol. 7. Additives and interfaces in electronic ceramics. Ed.: Yan M. F., Hener A. H. Columbus, Ohio: Am. Ceram. Soc. 1984, p. 1 – 21.
- Instrukcja użytkownika testera ograniczników prądu PM 20, DEHN, Publikacja nr 1608/ PL/ UPDATE 02.08 Id-No. 051432.
- Olesz M., Algorytmy obliczania składowej czynnej prądu upływu ograniczników prądu, Przegląd Elektrotechniczny nr 11a, 2012.
- PN – EN 61643 – 11: 2006, Niskonapięciowe urządzenia do ograniczania prądu w sieciach rozdzielczych niskiego napięcia. Wymagania i próby.
- Lal K. i inni, Frequency dependent conductivity of thin ZnO films prepared by r. f. sputtering technique, Czechoslovak Journal of Physics, vol. 53, no. 3, 2003.

## THE INFLUENCE OF VOLTAGE HARMONICS ON ARRESTER LEAKAGE CURRENT MEASUREMENT

**Keywords:** low voltage arresters, ZnO varistors, diagnostics

The measurement of the metal – oxide surge arresters (MOSA) leakage current and the analysis of its components is a key diagnostic criterion according to technical standards. The paper presents leakage current measurements of low voltage ZnO surge arresters tested with non-deformed sinusoidal voltage in the range of 50 Hz – 10 kHz. The proposed measurements methods allow to select resistive and capacitive leakage current components. In addition, the effect of frequency on the parameters of the proposed model of MOSA was evaluated. Knowledge of the influence of frequency on leakage current is required in practical applications for the correct interpretation of the results of measurements obtained in the power industry, especially in the environment of higher harmonic voltage.