

Paweł Zydrón¹

BADANIE KALIBRATORÓW ŁADUNKU POZORNEGO WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH

Streszczenie: W referacie omówiono zagadnienia związane z aktualnymi wymaganiami stawianymi kalibratorom ładunku pozornego, stosowanym do skalowania układów pomiarowych wyładowań niezupełnych. Przedstawiono porównanie obecnie obowiązujących norm – krajowej PN-04066/86 oraz międzynarodowej IEC60270-2000 – w tym zakresie. Opiszano jedną z proponowanych metod wyznaczania ładunków pozornych wytwarzanych przez kalibratory oraz zaprezentowano jej praktyczną realizację.

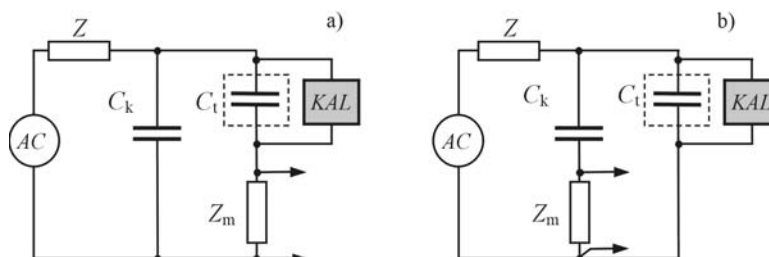
Słowa kluczowe: wyładowania niezupełne (wnz), skalowanie, pomiary szerokopasmowe, uśrednianie sygnałów

1. Wprowadzenie

Pomiary wyładowań niezupełnych stanowią jeden z elementów diagnostyki układów izolacyjnych wysokiego napięcia, stosowany zarówno w badaniach poprodukcyjnych, jak i eksploatacyjnych. W drugiej grupie tradycyjnie wyróżnia się pomiary wykonywane na obiektach podczas ich normalnej pracy – on-line oraz na obiektach wyłączonych z ruchu – off-line. W każdym z wymienionych przypadków istotne znaczenie ma poprawne i zgodne z normami wykonanie badań, w tym stosowanie właściwie wyskalowanych przyrządów pomiarowych. Podstawową wielkością wyznaczaną podczas większości pomiarów wyładowań niezupełnych jest tzw. *ładunek pozorny* to znaczy ładunek, który doprowadzony w sposób impulsowy na zaciski badanego obiektu zmienia panujące na nich napięcie o tę samą wartość, co samo wyładowanie. Wartości ładunków pozornych impulsów wyładowań są wyznaczone przede wszystkim na obiektach o stałych skupionych oraz – rzadziej – na obiektach o stałych rozłożonych. W drugim przypadku podstawowym utrudnieniem towarzyszącym pomiarom są występujące zjawiska falowe, a mierzoną wielkością jest wówczas często amplituda napięcia impulsu. Należy zauważyć, że mierniki wyładowań nie są skalowane w wartościach bezwzględnych ładunku, a każdy pomiar jest pomiarem porównawczym. Operacją, która umożliwi określenie wskazań miernika wyładowań względem znanych wartości ładunków

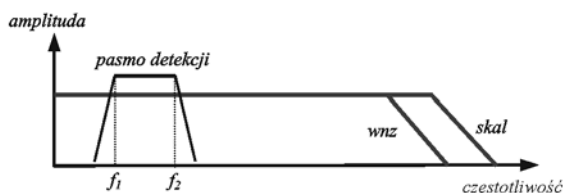
¹ AGH, Zakład Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

odniesienia jest *skalowanie*. Polega ono na podaniu ładunków o znanej wartości i mających postać krótkotrwałych impulsów prądowych, z układu skalującego zwanego kalibratorem (*KAL*) dołączanego równolegle do badanego obiektu – co dla podstawowych układów detekcji przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Sposób dołączenia kalibratora *KAL* w dwóch podstawowych układach detekcji wyładowań niezupełnych: a) szeregowym, b) równoległym (*AC* – źródło napięcia probierczego, C_i – pojemność obiektu badanego, C_k – kondensator sprzęgający, Z_m – impedancja detekcyjna, Z – impedancja filtru w.cz.)

Istotne znaczenie dla poprawnego przeprowadzenia skalowania ma zastosowanie impulsu prądowego o odpowiednio szerokim paśmie częstotliwości. Przy pomiarach klasycznych – zgodnych z normami IEC-60270 [1] oraz PN/E-04066 [2], impuls podlega całkowaniu przez pasmowoprzepustowy układ detekcyjny o częstotliwościach granicznych: dolnej f_1 i górnej f_2 . Częstotliwość graniczna widma impulsów skalujących powinna być wówczas wielokrotnie wyższa od częstotliwości f_2 i porównywalna z częstotliwością graniczną mierzonych wyładowań (rys. 2).



Rys. 2. Wzajemna zależność widm: wyładowań niezupełnych (*wnz*) i impulsów skalujących (*skal*) oraz pasma detekcyjnego dla poprawnego skalowania układu pomiarowego (na podstawie [1])

Najczęściej układy skalujące wykonywane są jako zasilane bateryjnie przenośne przyrządy (rys. 3), których głównymi elementami są:

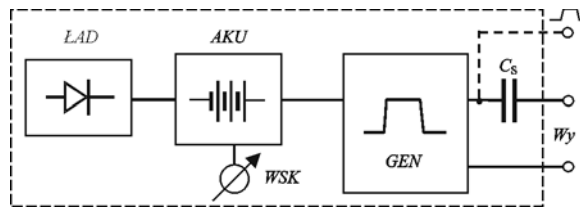
- generator impulsów prostokątnych o stromych zboczach i amplitudzie U_s ;
- kondensator C_s o niewielkiej pojemności lub zestaw takich kondensatorów, wytwarzające ciąg impulsów prądowych o ładunku q_s określonym wzorem:

$$q_s = U_s \cdot C_s \quad (1)$$

Większość kalibratorów jest wykonywana jako przyrządy niskonapięciowe co powoduje, że skalowanie w układzie pomiarowym odbywa się bez wysokiego napięcia, a po jego przeprowadzeniu są one odłączane. Z tego powodu dla zachowania odpowiedniej dokładności

ści skalowania wymagane jest, aby pojemność C_s była co najmniej 10-krotnie mniejsza od pojemności badanego obiektu C_t . W przypadku zastosowania układu skalującego z kondensatorem wysokonapięciowym, który pozostaje na czas właściwego pomiaru, warunek ten nie jest wymagany.

2. Wymagania norm stawiane kalibratorom ładunku pozornego



Rys. 3. Schemat blokowy typowego generatora ładunków skalujących: GEN – generator napięciowych impulsów prostokątnych, C_s – kondensator, AKU – akumulator, WSK – wskaźnik napięcia, ŁAD – ładowarka

Ze względu na wymienione wyżej wymagania częstotliwościowe, wynikające z nich parametry czasowe impulsów skalujących wytwarzanych przez kalibratory ładunku pozornego powinny być porównywalne z parametrami impulsów wyładowań występujących w obiektach badanych. W praktyce widmo impulsu skalującego zależy od czasu narastania t_r (lub opadania t_d) zbocza fali prostokątnej generatora GEN (rys.2). Czas ten – określany dla przedziału pomiędzy 10% a 90% wartości amplitudy fali – powinien być jak najkrótszy, dla zapobieżenia powstawaniu błędów całkowania ładunku w układzie detekcji. Dla tak określonego czasu narastania (opadania) zbocza można wyznaczyć 3-decybelową częstotliwość graniczną, która w przybliżeniu wynosi:

$$f_{-3dB} = \frac{0,35}{t_r(t_d)} \quad (2)$$

Zarówno nowa norma międzynarodowa [1] jak i obowiązująca jeszcze norma krajowa [2] określają parametry czasowe jakie powinny spełniać impulsy generowane przez kalibratory ładunku pozornego, a wymagania te przedstawiono w tabeli 1. W zależności od kształtu przebiegu z generatora GEN na wyjściu układu skalującego mogą być wytwarzane impulsy ładunkowe mające jedną lub dwie polarność. W dotychczas stosowanych układach są to najczęściej dwa impulsy na okres napięcia probierczego tzn. 100/120 impulsów na sekundę.



Wartość ładunku impulsu prądowego generowanego przez układ skalujący może być sprawdzona dwiema podstawowymi metodami [1, 3]:

- przez pomiar bezpośredni przy użyciu układu całkującego,
- przez rejestrację kształtu impulsu prądowego na rezystorze o małej wartości i obliczenie pola jego powierzchni.

Ponadto, zgodnie z zaleceniami normy IEC60270 dla sprawdzenia cyfrowych systemów rejestracji wyładowań niezupełnych wymagane jest wytwarzanie przez układy skalujące sekwencji impulsów mających zarówno ściśle określone parametry czasowe jak i liczbę. Stwarza to konieczność stosowania rozbudowanych, cyfrowo sterowanych układów skalujących. W ka-

złym z przypadków podczas badań należy uwzględnić wpływ zmiany wartości parametrów generatora na wielkość szacowanej niepewności pomiarowej [4]. Należy zaznaczyć, że zgodna z normami, pełna procedura skalowania obejmuje: 1) skalowanie układów pomiarowych wyładowań niezupełnych; 2) określenie parametrów stosowanego miernika wyładowań na każdym z jego zakresów, w tym m.in.: czasu rozdzielczego, dolnej f_1 i górnej f_2 częstotliwości granicznej, liniowości, stabilności i dokładności.

Tabela 1. Normatywne wartości parametrów czasowych kalibratorów wnz

Norma krajowa PN/E-04066/86 (IEC60270-1981)			
Parametr	Wartość		Komentarz
czas narastania t_r	$t_r < \frac{1}{f_2}$	ale nie więcej niż 100ns	f_2 – górna częstotliwość graniczna układu detekcji wyładowań
	$t_r \leq \frac{0,03}{f_2}$	dla $f_2 < 500$ kHz	zał. krajowy ZK-4
	$t_r \leq 50ns$	dla $f_2 > 500$ kHz	
Norma międzynarodowa IEC60270-2000			
Parametr	Wartość		Komentarz
czas narastania t_r	$t_r \leq 60ns$	dla $f_2 > 500$ kHz	f_2 – j.w.
	$t_r \leq \frac{0,03}{f_2}$	dla $f_2 < 500$ kHz	
kształt impulsu napięciowego		poziom H nie może się zmienić więcej niż o 5%	na wyjściu kalibratora impulsy dwóch biegunowości
		$t_d > (1 / t_r)$	na wyjściu kalibratora impulsy jednej biegunowości

3. Układ do pomiaru ładunków wytwarzanych przez kalibratory

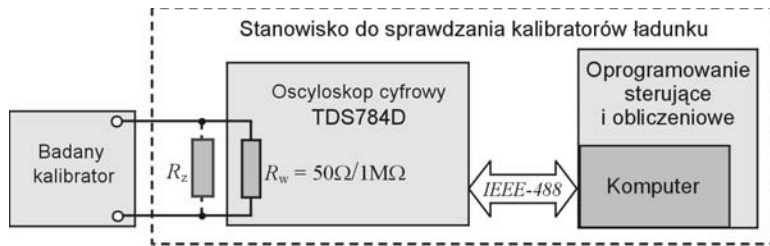
Metoda pomiarowa służąca wyznaczeniu wartości ładunków wytwarzanych przez kalibratory wnz zalecana przez normę IEC [1] (załącznik A) polega na szerokopasmowej rejestracji impulsu produkowanego przez kalibrator na rezystorze o małej rezystancji. Ładunek q , odpowiadający scałkowanej w czasie wartości prądu jest określony wzorem:

$$q = \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt = \frac{1}{R} \int_{t_1}^{t_2} u_R(t) dt \quad (3)$$

gdzie: R – wartość rezystancji rezystora, $i(t)$ – prąd z kalibratora, $u_R(t)$ – napięcie na rezystorze, t_1 , t_2 – umowne chwile początku i końca całkowania rejestrowanego sygnału.

Na rysunku 4 przedstawiono działający na tej zasadzie układ pomiarowy, stosowany do badania kalibratorów wyładowań niezupełnych w Laboratorium Wysokich Napięć Zakładu Elektroenergetyki AGH w Krakowie.

Zastosowany oscyloskop cyfrowy (Tektronix TDS 784D) pozwala na szerokopasmową rejestrację sygnałów (20MHz–200MHz–1GHz) z dużymi częstotliwościami próbkowania – do 4 Gpróbk/s. Podczas sprawdzania kalibratorów wykorzystywany jest wewnętrzny rezy-



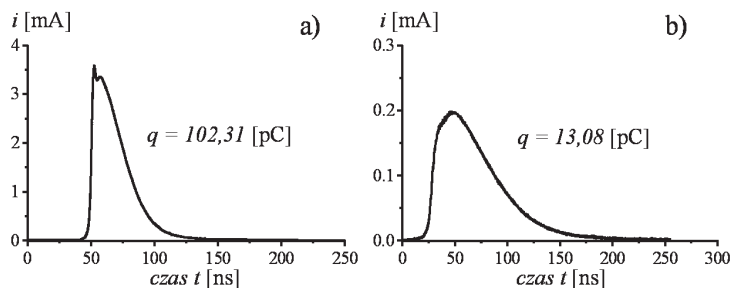
Rys. 4. Schemat blokowy stanowiska do wyznaczania ładunków generowanych przez kalibratory do skalowania układów pomiarowych wyładowań niepełnych

stor $R_w = 50 \Omega$ lub rezystor zewnętrzny R_z dołączany równolegle do wewnętrznego $R_w = 1 M\Omega$. Norma IEC [1] określa, że przy stosowaniu tej metody rezystor powinien mieć wartość od 50Ω do 200Ω , a minimalna szerokość pasma układu rejestracji winna wynosić 50 MHz . W przedstawianym układzie stosowane jest pasmo 200 MHz i częstotliwość próbkowania 2 GHz . Ponadto norma ta zaleca, aby wynik pomiaru był uśrednieniem minimum 10 pojedynczych rejestracji. Wykorzystując możliwości zastosowanego oscyloskopu pomiary są wykonywane w trybie akumulacji przy zadanej liczbie sumowań M wynoszącej od 400 do 1000 przebiegów (całkowity czas rejestracji dla typowych kalibratorów od 4 do 20 sekund). Pozwala to na poprawę warunków pomiaru przez zwiększenie wartości współczynnika sygnał/szum SNR dla zakłóceń niesynchronicznych względem rejestrowanych impulsów o wartość równą pierwiastkowi z M . Oscyloskop jest sterowany z komputera nadzorczego przez interfejs *IEEE-488* przy użyciu programu *WaveStar*[®] (*Tektronix*), a wyniki są zapamiętywane w postaci plików tekstowych. Uwzględniając wymienione wyżej parametry układu pomiarowego oraz rejestrowane sekwencje próbek sygnału, wartości ładunków q generowanych przez badane kalibratory są wyznaczane przy użyciu arkusza kalkulacyjnego *Excel*[®] (*Microsoft*) zgodnie ze wzorem:

$$q[\text{pC}] = \frac{1}{R \cdot f_s} \cdot \sum_{i=1}^N u_i = 10 \cdot \sum_{i=1}^N u_i \quad (4)$$

gdzie: R – rezystancja [Ω], f_s – częstotliwość próbkowania [Hz], u_i – wartość próbki napięcia [V], N – liczba analizowanych próbek.

Na rysunku 5 przedstawiono zarejestrowane opisaną metodą i przeliczone impulsy prądowe uzyskane podczas sprawdzania dwóch kalibratorów stosowanych do skalowania



Rys. 5. Przykładowe impulsy prądu płynącego przez rezystor $R = 50 \Omega$ wytwarzane przez kalibratory ładunku do skalowania układów pomiarowych wyładowań niepełnych

układów pomiarowych, wykorzystujących klasyczne układy detekcji wyładowań niezupełnych.

4. Podsumowanie

W referacie przedstawiono aktualne wymagania norm [1, 2] dotyczące kalibratorów stosowanych podczas skalowania układów pomiarowych wyładowań niezupełnych. Zaprezentowano również praktyczną realizację stanowiska do pomiaru generowanych przez nie ładunków, z wykorzystaniem metody cyfrowego uśredniania impulsów prądu. Należy zaznaczyć, że szczególne wymagania odnośnie do parametrów impulsów skalujących – nie opisywane w omawianych normach – występują w przypadku pomiarów w zakresach *UHF/VHF*, a więc np. podczas badania gazowych układów izolacyjnych. Ze względu na bardzo krótkie czasy narastania i trwania impulsów wyładowań w tych układach, dla potrzeb skalowania używane są generatory o specjalnej konstrukcji, pozwalające na uzyskanie impulsów o czasach narastania nawet ok. 70 ps [5].

Literatura

- [1] IEC Publication 60270-2000 – *Partial discharge measurements*, IEC, 2000
- [2] Polska Norma PN-86/E-04066 – *Pomiary wyładowań niezupełnych*
- [3] **Lukas W. Schon K., Lemke E., Elze H.** – *Comparison of two techniques for PD calibrators*, Conf. Proc. 10th ISH, CD file 3106, Montreal, Canada, 1997
- [4] **Gobbo R., Pesavento G., Sardi A., Varetto G., Cherbaucich C., Rizzi G.** – *Influence quantities of PD calibrators contribution to the uncertainty estimate*, Conf. Proc. 11th ISH, paper 5.272.P5, London, England, 1999
- [5] **Neuhold S.M., Benedickter H.R., Schmatz M.L.** – *A 300V mercury switch pulse generator with 70 psec rise time for investigation of UHF PD signal transmission in GIS*, Conf. Proc. 11th ISH, paper 5.78, London, England, 1999

TESTING OF PARTIAL DISCHARGE APPARENT CHARGE CALIBRATORS

Paper presents current state of standardisation of partial discharge calibrators accordingly to international standard IEC60270-2000 [1] and domestic standard PN/E-04066-86 [2]. Measuring digital system for evaluation of apparent charge generated by these calibrators meeting IEC standard requirements is described.

Prace opisane w niniejszym referacie zrealizowano w ramach umowy 10.10.120.138/p finansowanej przez Komitet Badań Naukowych.