

*zapad napięcia,
jakość energii elektrycznej*

Grzegorz KOSOBUDZKI*

POMIAR PARAMETRÓW KRÓTKOTRWAŁYCH ZAPADÓW NAPIĘCIA

Artykuł przedstawia wymagania normalizacyjne stawiane przyrządom do pomiaru jakości energii elektrycznej w zakresie wykrywania zapadów napięcia, mierzonych parametrów oraz dopuszczalnej niepewności pomiaru. Wyniki badań symulacyjnych oraz doświadczalne obliczenia ukazują niejednoznaczność podczas wykrywania i obliczania parametrów zapadów zgodnie z wymaganiami norm. Nie wykrycie zapadu napięcia, lub wyniki obliczeń obciążone błędami w przypadku detekcji zdarzenia występują dla krótkich lub płytkich zapadów napięcia. Przeanalizowano wyniki badań doświadczalnych otrzymanych z analizatorów jakości energii elektrycznej. Zapady napięcia były wprowadzane przez generator umożliwiający regulację głębokości zapadu, czasu jego trwania, kąta fazowego początku zapadu, generację zapadów w trójfazowych albo w wybranej fazie.

1. WPROWADZENIE

Zapadem napięcia nazywa się czasowe zmniejszenie wartości skutecznej napięcia w danym punkcie systemu energetycznego poniżej wartości progowej. Zazwyczaj przyjmuje się 90% wartości deklarowanej lub znamionowej napięcia [1]–[3]. W przepisach normalizacyjnych przyjęto, że wielkościami opisującymi zapad będzie minimalna wartość skuteczna podczas trwania zapadu, nazywana napięciem resztkowym lub residuum zapadu U_{res} , oraz czas pomiędzy chwilą w której wartość napięcia spadła poniżej wartości progowej a momentem gdy wartość jest równa lub większa niż próg zapadu powiększony o histerezę.

Z wartością progową porównywana jest wartość skuteczna półokresowa $U_{rms(1/2)}$ wyznaczana w oknie równym 1 okresowi mierzonego napięcia, rozpoczynającemu się w momencie przejścia przez zero składowej podstawowej harmonicznej [3]. Napięcie jest obliczane co pół okresu – stąd nazwa tego napięcia. Okno pomiarowe jest przesuwne - zawiera połowę próbek z poprzedniego okna i połowę nowych próbek.

* Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, 50-370 Wrocław, ul Wybrzeże Wyspiańskiego 27, email: grzegorz.kosobudzki@pwr.wroc.pl

W starszych wymaganiach norm [2,3] wartość skuteczna półokresowa $U_{rms(1/2)}$ była wyznaczana w oknie równym połowie okresu. Kolejne okna nie nachodziły na siebie. Okno nie jest synchronizowane z przejściem przez 0 podstawowej harmonicznej.

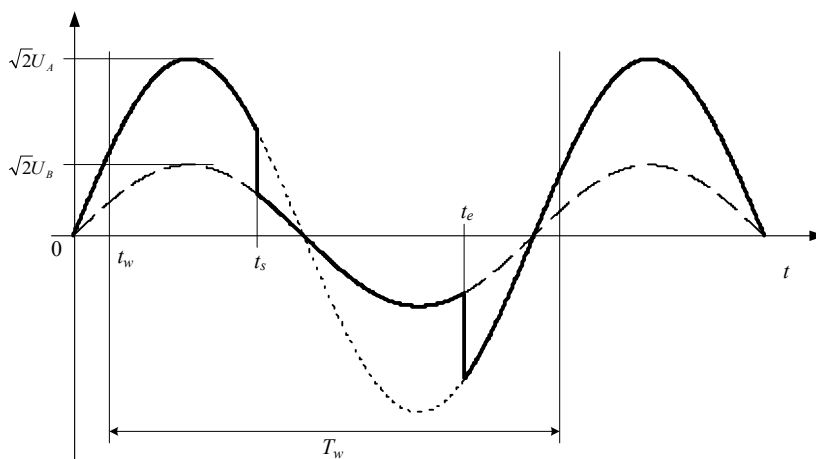
W obydwu edycjach norm częstotliwość próbkowania jest synchronizowana z częstotliwością przebiegu mierzonego w celu zapewnienia stałej liczby próbek w oknie pomiarowym.

Określone w kolejnych edycjach norm metody pomiaru zapadów są różne. Szczególnie wpływają one na wyniki otrzymywane dla zapadów napięcia o krótkim czasie trwania. Dotyczy to zarówno wartości napięcia resztkowego U_{res} jak i czasu trwania zapadu t_d . Wymagana przez normę [2] niepewność pomiaru napięcia resztkowego wynosi 0,2%, natomiast niepewność czasu trwania zapadu wynosi 20 ms – czyli jest tego samego rzędu co wartości czasu krótkich zapadów.

Przeprowadzona analiza teoretyczna i doświadczenia mają na celu porównanie zmierzonych parametrów zapadów przez analizator TOPAS1000 (okno pomiarowe napięcia półokresowego jest równe 10ms) oraz analizator FLUKE 1760 (okno pomiarowe wynosi 20 ms) z wartościami obliczonymi (teoretycznymi).

2. STANOWISKO BADAWCZE

Badania doświadczalne przeprowadzono na stanowisku złożonym z trójfazowego generatora AC6834B umożliwiającego generację zapadów jednofazowych i wielofazowych w układzie połączeń „gwiazda”. Do zacisków generatora podłączono dwa



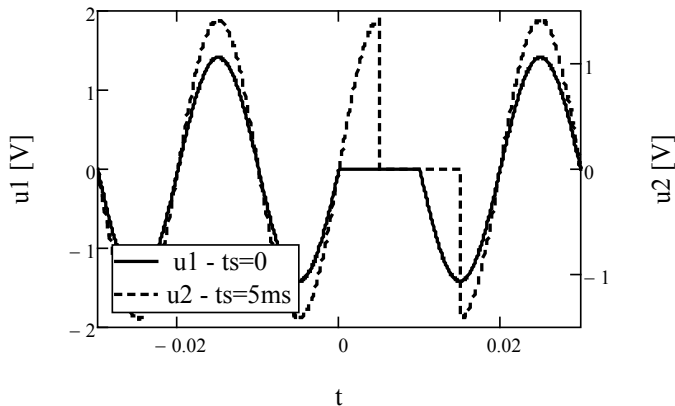
Rys. 1. Kształt przebiegu generowanego zapadu. Oznaczenia na rysunku 1:

U_A i U_B – wartości skuteczna napięcia znamionowego i w czasie zapadu,
 t_s i t_e – to kolejno początek i koniec zapadu, T_w – długość okna pomiaru wartości skutecznej napięcia,
 t_w – początek okna pomiarowego

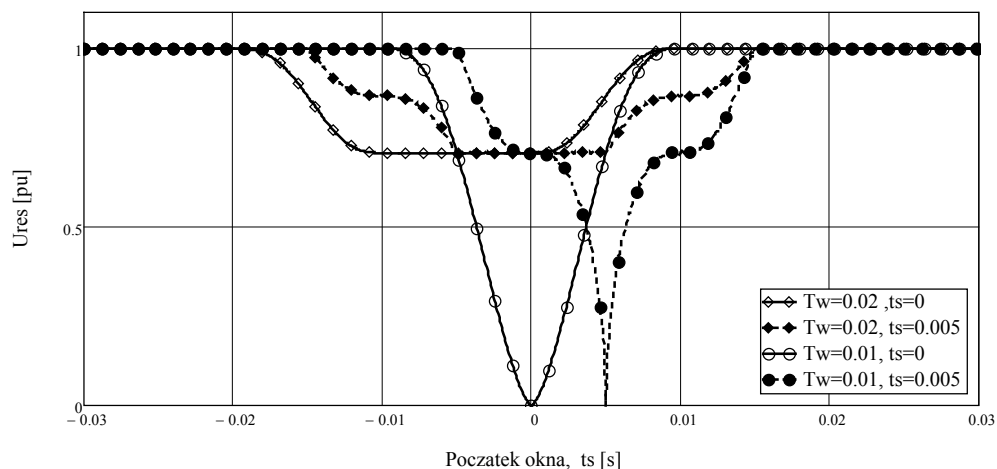
trójfazowe analizatory jakości energii elektrycznej. W celu łatwiejszego porównania wartości obliczonych z wartościami prawidłowymi, badania przeprowadzono przy sinusoidalnym kształcie krzywych napięcia. Generowane napięcie sinusoidalne miało współczynnik THD mniejszy od 0,5%, a dokładność ustawiania jego wartości skutecznej napięcia 0,5 V. Czas zmiany napięcia podczas zapadu nie przekracza 50 μ s. Parametry generowanego przebiegu napięcia oraz oznaczenia danych używanych w obliczeniach przedstawia rysunek 1.

3. WPŁYW PARAMETRÓW OKNA NA WYNIK POMIARU

Okno pomiarowe może w całości objąć krótki zapad napięcia lub również może zdarzyć się sytuacja, że tylko część zapadu. Przykładowe „wzorcowe zapady”, dla których przeprowadzono analizę przedstawiono na rysunku 2. W pierwszym zapadzie wycięta jest dodatnia połówka napięcia (początek zapadu $t_s = 0$ ms, koniec zapadu $t_e = 10$ ms, wartość skuteczna napięcia $U_B = 0$ V), w drugim przypadku początek zapadu zaczyna się przy wartości maksymalnej napięcia ($t_s = 0,005$ ms). Prawidłowa (teoretyczna) wartość napięcia resztkowego U_{res} wynosi 0% napięcia znamionowego dla okna o czasie $T_w = 10$ ms oraz 70,7% napięcia znamionowego dla czasu $T_w = 20$ ms przy założeniu, że cały zapad znajduje się w oknie pomiarowym. Wykresy obliczonej wartości napięcia resztkowego w zależności od chwili początkowej t_s okna pomiarowego przy jego długości $T_w = 10$ ms i $T_w = 20$ ms oraz dla zapadów przedstawionych na rysunku 2 pokazane są na rysunku 3.



Rys. 2. Kształt zapadów o czasie 10 ms. Linia ciągła – zapad o początku $t_s = 0$ ms (przejście napięcia przez 0), linia przerywana - początek zapadu $t_s = 5$ ms (przy wartości maksymalnej napięcia)



Rys. 3. Wartość względna napięcia resztkowego w zależności od początku okna pomiarowego. Zapad do wartości 0 V o czasie trwania 10 ms

Pomiary wykonane analizatorem FLUKE1760 (okno pomiaru 20 ms) wykazały, że wartość napięcia resztkowego zapadu o czasie trwania krótszym od połowy okna pomiarowego są zbliżone do wartości teoretycznej. Ponieważ okno pomiarowe jest przesuwne co 10 ms i zawiera połowę próbek z poprzedniego okna, więc czas trwania zapadu wynosi 20 ms. Wyniki będą prawidłowe nawet dla rozszynchronizowania początku okna pomiarowego z przebiegiem mierzonym (linie oznaczone rombami pokazane na rysunku 3).

Tabela 1. Zależność wartości napięcia resztkowego dla zapadu rozpoczynającego się 4 ms od czasu trwania i głębokości zapadu

	1 ms		2 ms		3 ms		4 ms		5 ms	
	Topas	oblicz.	Topas	oblicz.	Topas	oblicz.	Topas	oblicz.	Topas	oblicz.
1%:2,3V	205,4	206,5	179,6	180,1	154,8	155,2	138,3	137,1	129,5	128,7
5%:11,5V	205,5	206,6	179,6	180,2	155,3	155,4	139,6	137,4	133,1	129,0
10%:23V	205,8	206,8	180,1	180,6	157,7	156,1	140,1	138,3	131,7	130,0
20%:46V	206,7	207,5	182,0	182,3	158,9	158,8	142,6	141,9	136,6	134,2
30%:69V		208,8	185,2	185,1	163,9	163,3	149,5	147,8	144,9	140,8
40%:92V		210,5	188,9	188,9	170,8	169,4	157,1	155,7	150,4	149,6
50%:115V		212,7	193,9	193,8	178,8	176,9	168,4	165,3	161,0	160,1
60%:138V		215,3	199,6	199,5	186,6	185,6	177,0	176,3	175,8	172,2
70%:161V		218,4	206,2	206,1	196,3	195,4	190,3	188,4	187,4	185,4
80%:184V		221,8		213,4	206,7	206,2	202,8	201,5	201,3	199,5

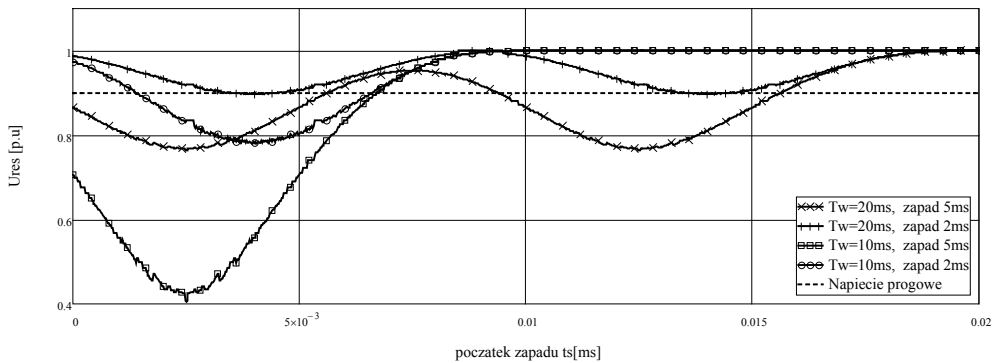
Pomiary wykonane analizatorem TOPAS1000 (okno pomiaru 10 ms) wskazały prawidłową wartość napięcia resztkowego oraz czas trwania zapadu dla początku okna

$t_s = 0$ ms. Dla $t_s = 5$ ms zmierzone napięcie resztkowe U_{res} zawierało się w przedziale od 36 V do 53 V. Jest to zgodne z oczekiwaniami teoretycznymi. Wynik pomiaru jest prawidłowy tylko gdy zapad o czasie 10ms zawiera się w oknie pomiarowym (linia oznaczona kółkami na rysunku 3). Wartości napięcia resztkowego U_{res} zmierzone przyrządem TOPAS1000 dla zapadów krótszych niż 10 ms przedstawiono w tabeli 1.

Brak wpisu wartości mierzonych napięć oznacza nie wykrycie zapadu. Ustawiona w analizatorze wartość napięcia progowego wynosi 207 V – 90% wartości deklarowanej.

Oznaczenia w tabeli: „Topas” – zmierzone wartości napięć przyrządem TOPAS1000, „oblicz.” – wartości obliczeń teoretycznych.

Analizator FLUKE1760 ze względu na posiadane okno pomiarowe 20 ms jest mniej przydatny do pomiarów zapadów napięcia o krótkim czasie trwania. Obliczone wartości napięcia resztkowego dla zapadu do $U_B = 0$ V oraz czasie trwania 5 ms i 2 ms w zależności od początku zapadu przedstawia rysunek 4. Linia przerywaną zaznaczono próg wykrycia zapadu – wynoszący 90% napięcia znamionowego. Przy tej wartości proggu analizator z oknem 20 ms nie wykryje zaburzenia trwającego 2 ms.

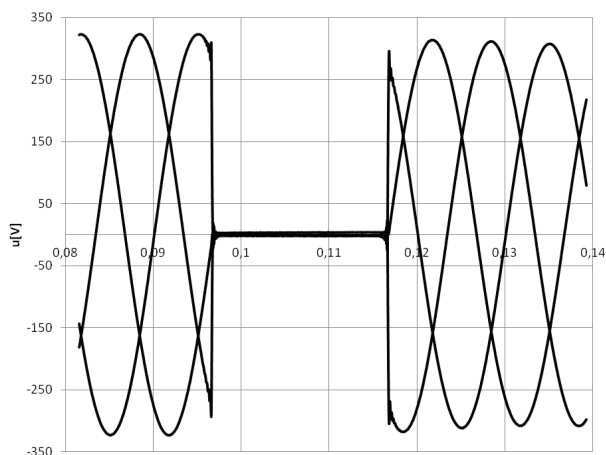


Rys. 4. Prawidłowa wartość napięcia resztkowego wyrażona względem napięcia znamionowego

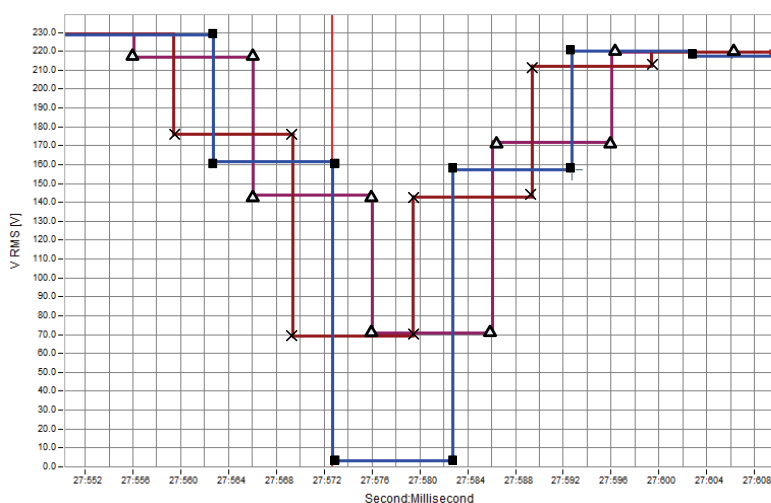
Przedstawione na rysunku 4 zmiany obliczonego napięcia resztkowego wynikają z obliczeń teoretycznych. Okno zaczyna się w chwili 0. Jeżeli zapad nie rozpoczyna się w chwili 0 i jest odpowiednio długi to nie znajdzie się cały w oknie pomiarowym. Następuje „rozmycie” zapadu – napięcie resztkowe ma wyższą wartość – czas zapadu jest dłuższy. Szczególnie widoczne jest to dla zapadu o długości okna pomiarowego 20 ms.

Na rysunku 5 przedstawiono przebiegi wartości chwilowej napięcia w czasie zapadu na wyjściu generatora (ustawiono jednoczesny napad napięcia do 0 V na czas 20 ms). Analizator FLUKE1760 wskazuje czas trwania zapadu, który wynosi 30 ms we wszystkich fazach. Napięcie resztkowe wyznaczone dla fazy L1 wynosi 3,4 V, natomiast dla fazy L2 oraz L3 wynosi około 70 V. Opis tych zapadów mierzonych przez przyrząd FLUKE1760 przedstawia tablica 2. Zapad trójfazowy – trwa od chwili

gdy w dowolnej fazie napięcie spadnie poniżej wartości progowej do chwili gdy wszystkie napięcia osiągną wartości powyżej progu zapadu powiększonego o histerezę. Przebiegi napięć poszczególnych faz mają moment przejścia przez 0 w różnych czasach a w związku z tym występują różne początki okna pomiarowego i wyznaczania skutecznej wartości napięcia $U_{RMS(1/2)}$. Rejestrowane analizatorem Fluke1760 wartości napięć przedstawiono na rysunku 6. Czas trwania zapadu trójfazowego w przybliżeniu jest równy wielokrotności 1/3 okresu.



Rys. 5. Zapad testowy o długości 1 okresu napięcia wytwarzanego przez generator AC6834B– przebiegi zarejestrowane analizatorem FLUKE1760



Rys. 6. Wartości skuteczne $U_{RMS(1/2)}$ zarejestrowane analizatorem FLUKE1760.
Oznaczenia: faza L1 – kwadrat, L2 – trójkąt, L3 – X

Tabela 2. Detekcja zapadu z rysunku 5 przez przyrząd FLUKE1760

Zdarzenie		czas	Czas trwania [ms]	Ures [V]
Zapad	V L2	09:49:27,569379	29,981	69,37
Zapad	V L1	09:49:27,572700	30,079	3,384
Zapad	V L3	09:49:27,576020	30,078	70,81
Zapad trójfazowy	V L123-N	09:49:27,569379	36,719	3,384

Znormalizowany algorytm według którego przeprowadza się pomiary zapadów napięcia analizatorem TOPAS1000 nie obejmował zapadu trójfazowego. Taki zapad rejestrowano dla każdej fazy jako trzy zdarzenia niezależne, a wyniki przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Detekcja zapadu z rysunku 5 przez przyrząd TOPAS1000

Zdarzenie		czas	Czas trwania [ms]	Ures [V]
Zapad	V L1	09:54:04,787765	20,000	2,869
Przerwa	V L2	09:54:04,777765	30,000	1,255
Przerwa	V L3	09:54:04,777765	30,000	0,5435

4. PODSUMOWANIE

Nowa edycja norm [2], [3] zmieniła algorytm detekcji zapadów napięcia. Wydłużone okno pomiarowe do 20 ms powoduje mniejszą skuteczność w wykrywaniu krótkich zapadów napięcia. Krótki lub płytki zapad może zostać nie wykryty. Ponadto wykryty zapad jest „rozmywany”, czyli ma mniejszą głębokość (wyższe napięcie resztkowe) i dłuższy czas trwania zapadu.

Współczesne analizatory umożliwiają analizę kształtu krzywej napięcia. Krótki zapad można potraktować jako impulsowe zakłócenie przejściowe.

Problem wykrywania krótkich zapadów napięcia ma istotne praktyczne znaczenie. Jako jeden z przykładów można podać wrażliwość na zapady wysokoprężnych lamp wyładowczych (lampy uliczne). Wystąpienie krótkich zapadów napięcia w czasie pracy lampy powoduje jej wyłączenie lampy, a ponowne załączenie lampy następuje po czasie kilkunastu a nawet kilkudziesięciu sekund.

LITERATURA

- [1] IEEE Std 1159-2009: IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.
- [2] PN-EN 50160:2010: Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych.
- [3] PN-EN 61000-4-30:2011: Kompatybilność Elektromagnetyczna., Metody badań i pomiarów – Metody pomiaru jakości energii elektrycznej

MEASUREMENT OF THE PARAMETERS OF SHORT-TERM VOLTAGE DIPS

The paper presents the standardization requirements imposed for instruments for measuring power quality indicators in the range of detection of voltage dips, measured parameters and acceptable measurement uncertainty. The results of simulation and experimental calculations show the ambiguity in detecting and calculating the parameters of voltage dips in accordance with the requirements of the standards. Failure to detect the voltage dip, or the results of calculations by errors in the case of detection events occur for short or shallow voltage dips. Analyzed the experimental results obtained from the power quality analyzers. Voltage dips were introduced by the generator for adjusting the depth of the dip, its duration, the phase angle of the starting the dip, generation dips in three-phase or in the selected phase.