

Pomiary porównawcze wyższych harmonicznych napięcia w sieci przesyłowej 400 kV

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę wyników pomiarów porównawczych wyższych harmonicznych napięcia wykonanych w sieci przesyłowej 400 kV. Sygnały pomiarowe napięć uzyskano z trzech przetworników pomiarowych: rezystancyjnego dzielnika napięcia, napięciowego przekładnika indukcyjnego oraz napięciowego przekładnika pojemnościowego. Dokonano oszacowania błędów pomiarowych wyższych harmonicznych napięcia powodowanych przez przekładniki.

Abstract. In the paper the comparative analysis of voltage harmonics measurements performed in the transmission network of 400 kV is presented. The voltage were measured using three measuring instruments: resistive voltage divider, inductive voltage transformer and capacitive voltage transformer. Measurement errors were estimated for transformers with reference to the harmonic values obtained with the use of the voltage divider. **Comparative measurements of voltage harmonics in transmission network of 400 kV**

Słowa kluczowe: wyższe harmoniczne, jakość energii elektrycznej, pomiary jakości energii elektrycznej, przekładniki napięciowe.

Keywords: voltage harmonics, power quality, power quality measurements, voltage measuring instruments

doi:10.12915/pe.2014.07.51

Wstęp

Monitorowanie parametrów jakości energii elektrycznej, a w szczególności poziomów wyższych harmonicznych w sieciach elektroenergetycznych jest stopniowo wdrażane przez przedsiębiorstwa energetyczne na wszystkich poziomach napięć. Potrzeba taka była od dawna sygnalizowana [1]. Wynika ona nie tylko z konieczności spełnienia wymagań istniejących przepisów prawnych, ale także, a może przede wszystkim, z konsekwencji technicznych i ekonomicznych niedotrzymania dopuszczalnych wartości tych parametrów.

Wykonanie wiarygodnych pomiarów parametrów napięcia zasilającego w elektroenergetycznych sieciach przesyłowych i rozdzielczych wymaga zastosowania odpowiednio dokładnych układów pomiarowych [2], których jednym z elementów jest przekładnik napięciowy. Dokładność stosowanych w praktyce przekładników indukcyjnych i pojemnościowych wyznaczana jest dla częstotliwości podstawowej, a odpowiedź częstotliwościowa przekładników nie jest na ogół znana. Ponadto, wartości błędów amplitudy i kąta fazowego mierzonego napięcia mogą zmieniać się w czasie. W związku z powyższym, powstaje problem oceny dokładności pomiaru przekładników zainstalowanych w istniejących sieciach elektroenergetycznych, tak dla podstawowej jak i dla wyższych harmonicznych. Zagadnienie to jest podejmowane w literaturze. W artykule [3] przedstawiono wyniki analizy rzeczywistych błędów pomiaru napięcia za pomocą przekładników pojemnościowych zainstalowanych w sieciach 220 kV i 400 kV szwedzkiego systemu elektroenergetycznego. Badania wykonano w ramach programu kalibracji przekładników *in situ*. W publikacji [4] zaprezentowano odpowiedź częstotliwościową kilku przekładników pojemnościowych i indukcyjnych zainstalowanych w sieci wysokiego napięcia norweskiego systemu elektroenergetycznego. Podobne zagadnienia podjęli autorzy artykułu [5], przedstawiając analizę dokładności pomiaru harmonicznych przez przekładniki średniego napięcia w zakresie częstotliwości do 10 kHz. Badania wykonano w specjalnie zaprojektowanych obwodach testujących. W obu powyższych publikacjach wskazano na duże różnice pomiędzy przekładnią przekładników dla częstotliwości podstawowej i dla wyższych harmonicznych.

Również w Polsce, w celu oszacowania dokładności pomiarów wyższych harmonicznych w sieciach wysokiego napięcia przy wykorzystaniu przekładników napięciowych

różnych typów (indukcyjne, pojemnościowe), Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A. zainstalowały w jednej ze stacji elektroenergetycznych 400/110 kV rezystancyjny dzielnik pomiarowy [6, 7, 8]. Idealny dzielnik rezystancyjny z założenia powinien być elementem liniowym w dziedzinie częstotliwości i w związku z tym przenosić przebiegi chwilowe napięcia w stanach ustalonych i przejściowych pracy sieci bez żadnych zniekształceń. Powinien być zatem pozbawiony większości wad, które mają przekładniki napięciowe. Właściwości pomiarowe dzielnika w zakresie przenoszenia wyższych harmonicznych podane przez producenta zostały potwierdzone badaniami laboratoryjnymi, wykonanymi przez Instytut Elektrotechniki (Warszawa-Międzylesie) [7]. Ocenie podlegały względne zmiany przekładni (Δn) w funkcji częstotliwości, w odniesieniu do przekładni dzielnika przy częstotliwości sieciowej (50 Hz), zgodnie z zależnością:

$$(1) \quad \Delta n_{\%} = \frac{n - n_{50Hz}}{n_{50Hz}} 100\%$$

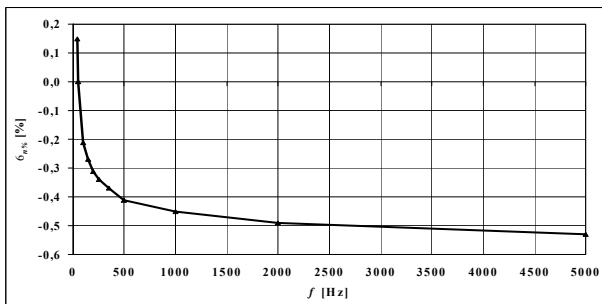
Charakterystykę częstotliwościową dzielnika w zakresie częstotliwości od 0 do 5000 Hz zaprezentowano na rys. 1.

W analogiczny sposób wykonano badania charakterystyk częstotliwościowych przekładników napięciowych zainstalowanych w stacji. Badania wykonano dla urządzeń tego samego typu znajdujących się w posiadaniu PSE S.A., a mianowicie przekładnika indukcyjnego typu SVS 420/8 i pojemnościowego typu CPTf 420. Porównanie charakterystyk częstotliwościowych przekładników z charakterystyką dzielnika przedstawiono na rysunku 2.

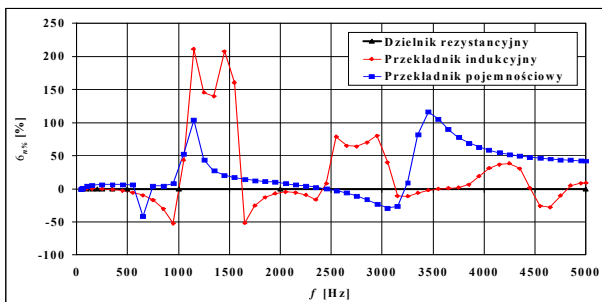
Na rysunkach 3 i 4 podano podstawowe dane techniczne przekładników wykorzystanych w pomiarach porównawczych.

Jak wynika z przedstawionych charakterystyk zmiany przekładni dzielnika w porównaniu do zmian przekładni badanych przekładników są pomijalne.

Przedstawione charakterystyki częstotliwościowe są zatem uzasadnioną podstawą do przyjęcia wyników pomiarów wyższych harmonicznych uzyskanych z wykorzystaniem dzielnika jako referencyjnych w odniesieniu do wyników pomiarów otrzymanych przy zastosowaniu przekładników.



Rys 1. Charakterystyka częstotliwościowa dzielnika rezystancyjnego w zakresie częstotliwości do 5000 Hz



Rys 2. Porównanie charakterystyk częstotliwościowych przetworników pomiarowych (dzielnika i przekładników) w zakresie częstotliwości do 5000 Hz

PRZEKŁADNIK NAPIĘCIOWY				
Trench Germany GmbH				
Oznaczenie typu SVS 420/8	nrk produkcji			
poziomy izolacji 520/630/1425 kV	numer seryjny			
A - N	400 000/√3 V 100/√3 V 5 VA	KL. 0,2	500 VA	1g - 1n
	400 000/√3 V 100/√3 V 10 VA	KL. 0,2 + 3P	500 VA	2a - 2n
	400 000/√3 V 100/√3 V 50 VA	KL. 3P	500 VA	3a - 3n
	400 000/√3 V 100/√3 V 25 VA	KL. 3P		da - dn
15 U _N 30s 50 Hz E JF				
Cisn. transportowe: 0,3 bar rel./20°C		IEC 60044-2		
Cisn. napętn: 5,5 bar rel./20°C		Dop. cisn. pracy: 7,4 bar rel.		Masa Sf _g : 22,1 kg
Cisn. sygnał: 5,0 bar rel./20°C		Transport: na leżąco / stojąco		Masa całk.: 960 kg
25 000				

Rys 3. Podstawowe dane techniczne przekładnika indukcyjnego typu SVS 420/8

TRENCH ITALIA		NORMA IEC 60044-5/2004	
PRZEKŁADNIK NAPIĘCIOWY POJEMNOŚCIOWY			
Typ	CPTf 420	NF	Rok
Um kV	420	Poziom izolacji	630/1425 kV
Temp. Pracy °C	-30/+40	C ₂ pF	80000
Oleju CP	Syntetyczna IEC86/750 kg	Oleju CI	Mineralny IEC296/55 kg
Maks. Jednoczesne Obciążenie 75VA/Klasa 0,2			
PRZEKŁADNIA kV/V	ZACISKI	VA	KLASA
400:√3/100:√3	1a - 1n	10	0,2
400:√3/100:√3	2a - 2n	15	0,2/3P
400:√3/100:√3	3a - 3n	50	3P
400:√3/100:3	da - dn	25	3P

Rys 4. Podstawowe dane techniczne przekładnika pojemnościowego typu CPTf 420

Wykonanie pomiarów

Pomiary wyższych harmonicznych w sieci 400 kV wykonane zostały za pomocą analizatora typu UP-2210 produkcji szwedzkiej firmy Unipower w okresie od 27.10.2011 do 20.12.2012. Na trzy niezależne wejścia napięciowe analizatora zostały wprowadzone jednocześnie sygnały pomiarowe tego samego napięcia fazowego pochodzące z rezystancyjnego dzielnika napięcia, napięciowego przekładnika indukcyjnego oraz napięciowego przekładnika pojemnościowego. Poszczególne wielkości mierzone były w sposób ciągły (co pół okresu krzywej napięcia) i uśredniane w przedziałach 10-minutowych. Wyznaczane były wartości skuteczne napięcia fazowego, wartości współczynników odkształcenia

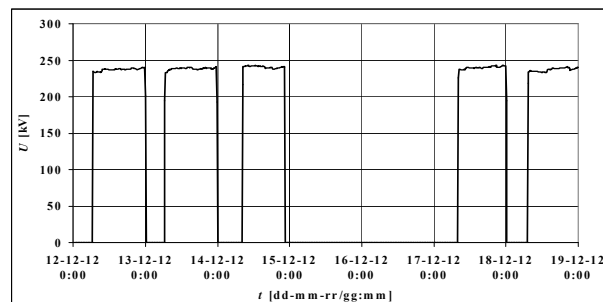
napięcia *THD* oraz wartości względne (procentowe) poszczególnych wyższych harmonicznych. Uzyskano w ten sposób liczne zbiory wartości poszczególnych wielkości mierzonych dla każdego z urządzeń pomiarowych.

Do dalszej analizy czas pomiaru podzielono na 5 okresów, obejmujących przeciętnie jeden kwartał (tab. 1). Dokonano następnego porównania wskazań przekładników pomiarowych oraz dzielnika odrębnie dla każdego okresu.

Tabela 1. Wykaz okresów pomiarowych

Nazwa okresu pomiarowego	Przedział czasu okresu pomiarowego	
	od	do
IV kw. 2011	27.10.2011	01.01.2012
I kw. 2012	01.01.2012	01.04.2012
II kw. 2012	01.04.2012	01.07.2012
III kw. 2012	01.07.2012	01.10.2012
IV kw. 2012	01.10.2012	20.12.2012

Należy tu nadmienić, że pole 400 kV, w którym zainstalowano dzielnik rezystancyjny załączane jest okresowo, dlatego liczność próbek (pomiarów uśrednianych w przedziałach 10-minutowych) możliwych do wykorzystania w celach porównawczych jest mniejsza niż liczba przedziałów 10-minutowych w analizowanym okresie czasu. Poza tym liczba próbek możliwych do wykorzystania jest różna w kolejnych porównywalnych okresach czasu zależnie od stopnia wykorzystania pola liniowego 400 kV, w którym przyłączony jest dzielnik. Dla przykładu, na rysunku 5 pokazano zmiany wartości skutecznej napięcia fazowego w polu dzielnika w okresie wybranego tygodnia, w którym liczność próbek dla poszczególnych mierzonych wielkości wyniosła $N = 494$ (zamiast 1008 przy pomiarze ciągłym) [8].



Rys 5. Zmiany napięcia w polu dzielnika w tygodniowym okresie pomiarowym

W związku z powyższym, do analizy porównawczej przyjmowano jedynie te rekordy danych, dla których był spełniony następujący warunek: uśrednione w przedziałach 10-minutowych wartości skuteczne napięcie doprowadzonych do kanałów pomiarowych analizatora mieszczą się w dopuszczalnym zakresie (np. $\pm 10\% U_N$). Rekordy danych, w których chociaż jedno napięcie miało wartość wykraczającą poza zakres nie były uwzględniane w analizie.

Metoda oceny wyników pomiarów

Ocenę dokładności pomiaru wyższych harmonicznych przez przekładniki napięciowe przeprowadzono według następującej procedury:

- 1). Ze zbiorów względnych wartości wyższych harmonicznych zmierzonych przy wykorzystaniu poszczególnych przetworników w danym okresie pomiarowym wyznaczono wartości średnie:

$$(2) \quad \bar{U}_{h\%} = \frac{\sum_{i=1}^N U_{h\%,i}}{N}$$

gdzie: $U_{h\%,i}$ - wartość względna h -tej harmonicznej w i -tym przedziale 10-minutowym, N - liczba pomiarów

oraz określono odchylenie standardowe:

$$(3) \quad \sigma_{U_{h\%}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (U_{h\%,i} - \bar{U}_{h\%})^2}{N}}$$

2). Dla poszczególnych harmonicznych napięcia pomierzonych za pomocą przekładników napięciowych (indukcyjnego bądź pojemnościowego) wyznaczono błąd względny, przyjmując jako wartość referencyjną wynik pomiaru uzyskany za pomocą dzielnika rezystancyjnego:

$$(4) \quad \delta_{U_{h\%,i}} = \frac{U_{h\%,i(p)} - U_{h\%,i(d)}}{U_{h\%,i(d)}} 100\%$$

gdzie: $U_{h\%,i(p)}$ - wartość względna h -tej harmonicznej w i -tym przedziale 10-minutowym zmierzona za pomocą przekładnika napięciowego, $U_{h\%,i(d)}$ - wartość względna h -tej harmonicznej w i -tym przedziale 10-minutowym zmierzona przy wykorzystaniu dzielnika rezystancyjnego

3). Wyznaczono wartość średnią i odchylenie standardowe błęd pomiaru dla danego okresu pomiarowego, zgodnie z zależnościami (5) i (6):

$$(5) \quad \bar{\delta}_{U_{h\%}} = \frac{\sum_{i=1}^N \delta_{U_{h\%,i}}}{N}$$

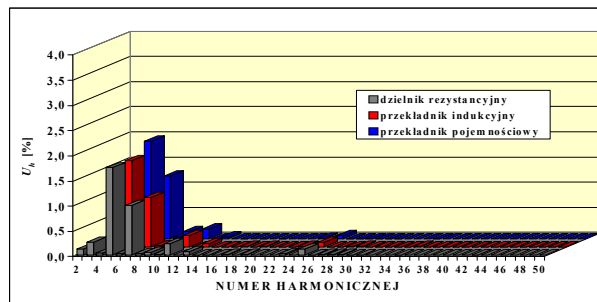
$$(6) \quad \sigma_{\delta_{U_{h\%}}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\delta_{U_{h\%,i}} - \bar{\delta}_{U_{h\%}})^2}{N}}$$

Wyniki pomiarów

Wartości średnie (udziały) wyższych harmonicznych i spektrum częstotliwościowe (widmo) dla okresu pomiarowego obejmującego IV kwartał 2011 r. pokazano na rysunku 6. Dominujące znaczenie mają w tym przypadku harmoniczne piąta i siódma. Wartości średnie udziałów pozostałych harmonicznych (z wyjątkiem 3. i 11.) nie przekraczają 0,1%. Błędy pomiarowe dla tak małych wartości osiągają znaczne wartości i z tego powodu analizę pomiarów porównawczych wyższych harmonicznych ograniczono w artykule do współczynnika THD i harmonicznych 5. i 7.

Wartości średnie współczynnika odkształcenia napięcia THD oraz wartości średnie błędów pomiaru tego współczynnika δ_{THD} wyznaczone dla poszczególnych okresów pomiarowych zestawiono w tabelach 2 i 3, a ich graficzną interpretację przedstawiono na rysunkach 7 i 8.

Należy zauważyć nieznaczność zmienności wyznaczonych parametrów. Średni błąd pomiaru THD dla ponadrocznego okresu analizy wynosi około -2 % dla przekładnika indukcyjnego i około 15,3 % dla przekładnika pojemnościowego, z czego wynika, że pomiary wykonane przy wykorzystaniu przekładnika indukcyjnego dają wartości THD nieco zaniżone, a przekładnika pojemnościowego znacznie zawyżone w odniesieniu do wartości rzeczywistych.



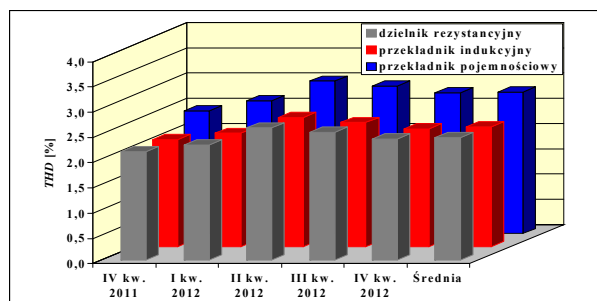
Rys. 6. Wartości średnie wyższych harmonicznych napięcia w wybranym okresie pomiarowym

Tabela 2. Wartości średnie całkowitego współczynnika odkształcenia napięcia THD napięcia w okresach pomiarowych

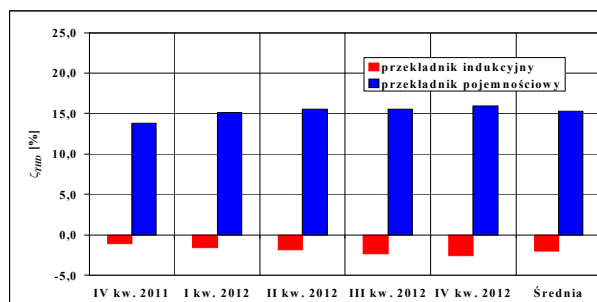
Okres pomiarowy	Liczba pomiarów	THD [%]		
		Dzielnik rezystancyjny	Przekładnik indukcyjny	Przekładnik pojemnościowy
1	3428	2,1452	2,1202	2,4379
2	3815	2,2793	2,2450	2,6353
3	5039	2,6115	2,5570	3,0201
4	7355	2,5246	2,4590	2,9198
5	4335	2,3880	2,3331	2,7864
Średnia ważona		2,4249	2,3743	2,8026

Tabela 3. Wartości średnie błędów pomiaru δ_{THD} w okresach pomiarowych

Okres pomiarowy	Liczba pomiarów	δ_{THD} [%]	
		Przekładnik indukcyjny	Przekładnik pojemnościowy
1	3428	-1,1090	13,8340
2	3815	-1,5651	15,1027
3	5039	-1,8809	15,5579
4	7355	-2,3027	15,5782
5	4335	-2,5674	15,9809
Średnia ważona		-1,9738	15,3217



Rys. 7. Porównanie wartości średnie całkowitego współczynnika odkształcenia napięcia THD napięcia w okresach pomiarowych

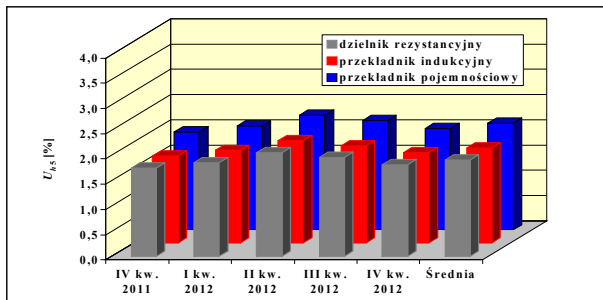


Rys. 8. Porównanie wartości średnie błędów pomiaru δ_{THD} przekładnikami w okresach pomiarowych

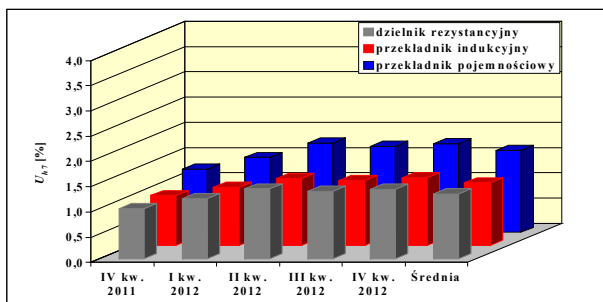
Analogiczną analizę wykonano dla wyższych harmonicznych 5. i 7., dominujących w widmie

częstotliwościowym mierzonego napięcia. Porównanie wartości średnich tych harmonicznych w poszczególnych okresach pomiarowych przedstawiano na rysunkach 9 i 10, a porównanie średnich wartości błędów pomiaru na rysunkach 11 i 12.

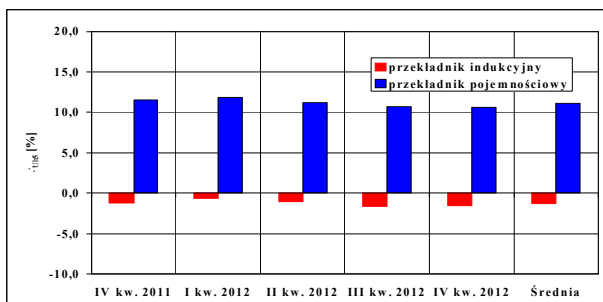
Wartość średnia błędu pomiaru piątej harmonicznej w analizowanym okresie czasu wynosi $-1,3\%$ dla przekładnika indukcyjnego i $11,1\%$ dla przekładnika pojemnościowego. Dla harmonicznej siódmej średnie wartości błędów wynoszą: $-3,0\%$ dla przekładnika indukcyjnego i $26,3\%$ dla przekładnika pojemnościowego.



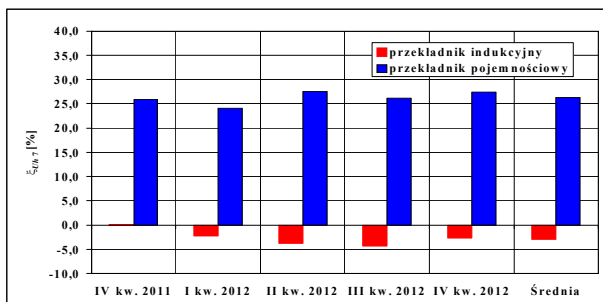
Rys. 9. Porównanie wartości średnich udziałów piątej harmonicznej napięcia w okresach pomiarowych



Rys. 10. Porównanie wartości średnich udziałów siódmej harmonicznej napięcia w okresach pomiarowych



Rys. 11. Porównanie wartości średnich błędów pomiaru piątej harmonicznej przekładnikami w okresach pomiarowych



Rys. 12. Porównanie wartości średnich błędów pomiaru siódmej harmonicznej przekładnikami w okresach pomiarowych

Podsumowanie

Pomiary porównawcze wyższych harmonicznych napięcia w sieci 400 kV przeprowadzono przy wykorzystaniu dzielnika rezystancyjnego oraz przekładników napięciowych indukcyjnego i pojemnościowego w okresie od 27.10.2011 r. do 20.12.2012 r. Wykazały one, że istotny wpływ na poziom odkształcenia napięcia w analizowanej stacji mają tylko piąta i siódma harmoniczna. Na podstawie analizy wyników pomiarów stwierdzono ponadto, że:

- wartości współczynnika THD pomierzone przy wykorzystaniu dzielnika i przekładnika indukcyjnego są podobne (średni błąd pomiarów wynosił około $-2,0\%$), natomiast średni błąd pomiarów wykonanych za pomocą przekładnika pojemnościowego osiąga stosunkowo dużą wartość ($15,3\%$).
- najlepszą dokładność pomiaru harmonicznych za pomocą przekładników uzyskano dla harmonicznej piątej (średni błąd pomiarów wynosił około $-1,2\%$ dla przekładnika indukcyjnego i 11% dla przekładnika pojemnościowego) i siódmej (średni błąd pomiarów wynosił około -3% dla przekładnika indukcyjnego i 26% dla przekładnika pojemnościowego), dominujących w spektrum częstotliwościowym napięcia.

Z porównania wartości błędów wynika, że pomiary harmonicznych wykonane za pomocą przekładnika indukcyjnego charakteryzują się większą dokładnością, natomiast zastosowanie przekładnika pojemnościowego prowadzi do znacznie większych błędów pomiarowych.

Wykonana analiza pozwala na krytyczną ocenę i odpowiednią korektę wyników realizowanych w praktyce pomiarów parametrów jakości energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych.

LITERATURA

- [1] Mierński R., Pawełek R., Wasiak I., On the Need to Control Power Quality in Polish Electrical Networks, *Electrical Power Quality and Utilisation*, 5 (1999), No 2, s. 21-27
- [2] IEC 61000-4-30: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measuring techniques- Power quality measurement methods
- [3] Bergman A.: In-Situ calibration of voltage transformers on the Swedish National Grid. Metering and Tariffs for Energy Supply, 3-5 July 1996, Conference Publication No. 426, s. 227 - 239
- [4] Seljeseth H., Sacthre E. A., Ohnstad T., Lien L., Voltage transformer frequency response. Measuring harmonics in Norwegian 300 kV and 132 kV Power Systems. *8th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP '98)*, Athens, Greece, October 14-16, 1998, s. 820 - 824
- [5] Klatt M., Meyer J., Elst M., Schegner P., Frequency responses of MV voltage transformers in the range of 50 Hz to 10 kHz. *14th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Bergamo, Italy, September 26-29, 2010
- [6] Kasprzak A., Orlikowski M., Brodecki D., Operation of voltage transformer in grids with distorted signals. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 2011, nr 4, s. 551 - 554
- [7] Błajszczak G., Olak J., Rezystancyjny dzielnik napięcia do pomiarów wyższych harmonicznych w sieciach 400 kV, Konferencja: *Aktualne problemy w elektroenergetyce (APE '11)*, Jurata, 8-10 czerwca 2011, s. 97-104
- [8] Pawełek R., Wasiak I., Błajszczak G., Jurek M., Olak J., Pomiary wyższych harmonicznych napięcia w sieci 400 kV, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, 2013, nr 32, s. 139-142

Autorzy: dr inż. Ryszard Pawełek, Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: ryszard.pawelek@p.lodz.pl; dr hab. inż. Irena Wasiak, prof. nadzw., Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: irena.wasiak@p.lodz.pl.