

*jakość energii elektrycznej, niesymetria napięcia*

Grzegorz KOSOBUDZKI\*

## **POMIAR NIESYMETRII NAPIĘCIA W SIECIACH TRÓJFAZOWYCH**

Artykuł prezentuje różnice pomiędzy znormalizowanymi oraz stosowanymi metodami określania współczynnika niesymetrii trójfazowego napięcia zasilającego. Pokazano, że rozpatrywane wzory uproszczone oraz zawarte w normach, w analizowanym zakresie zmian napięć międzyfazowych dają wartości współczynnika niesymetrii różniące się o kilka procent wartości względnej (różnica wyników w wartościach bezwzględnych na poziomie setnych części procenta). Analizę symulacyjną poparto przykładowymi badaniami trójfazowego napięcia zasilającego.

### **1. WSTĘP**

#### **1.1. PODSTAWOWE PRZYCZYNY I SKUTKI WYSTĘPOWANIA NIESYMETRII NAPIĘCIA ZASILAJĄCEGO**

Główną przyczyną występowania niesymetrii napięć trójfazowych są niesymetryczne obciążenia (szczególnie jednofazowe) dużej mocy. Ogólne przyczyny występowania asymetrii napięć są zależne od rodzaju sieci przesyłowej (publiczna, zakładowe, niskiego napięcia, miejska, itp.) oraz typu odbiorców. W sieciach publicznych niskiego napięcia dominują odbiorniki jednofazowe, które są włączane przez odbiorców losowo. Niesymetria obciążenia może być znaczna oraz zmienna w czasie. Na niesymetrię wpływają niesymetryczna impedancje sieci przesyłowej.

Brak symetrii napięcia zasilającego powoduje:

- dodatkowe straty energii w silnikach asynchronicznych co może powodować wzrost temperatury i przegrzanie,
- dodatkowe straty energii w generatorach oraz drgania elementów maszyn,
- zwiększenie strat w transformatorach,
- wzrost strat w bateriach kondensatorów kompensujących moc bierną,

---

\* Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Politechnika Wroclawska, ul. Smoluchowskiego 19, 50-370 Wrocław; email: grzegorz.kosobudzki@pwr.wroc.pl

- obniżenie sprawności przekształtników energoelektronicznych,
- skrócenie czasu eksploatacji urządzeń.

Wymienione powyżej przykłady negatywnego oddziaływania asymetrii napięć na pracę urządzeń są podstawą do monitorowania i podejmowania działań zmierzających do symetryzacji.

## 1.2. SKŁADOWE SYMETRYCZNE NAPIĘCIA TRÓJFAZOWEGO

Trójfazowy system, w którym napięcia fazowe lub międzyfazowe mają różną wartość a przesunięcia fazowe pomiędzy wektorami nie są równe  $120^\circ$  może być opisany i analizowany metodą składowych symetrycznych. Niesymetryczny układ wektorów napięcia trójfazowego jest sumą symetrycznych składowych kolejności zgodnej, przeciwnej i zerowej. Wartość składowej symetrycznej kolejności zgodnej  $\underline{U}_1$  opisuje zależność

$$\underline{U}_1 = \frac{1}{3}(\underline{U}_A + a\underline{U}_B + a^2\underline{U}_C), \quad (1)$$

symetrycznej kolejności przeciwnej  $\underline{U}_2$

$$\underline{U}_2 = \frac{1}{3}(\underline{U}_A + a^2\underline{U}_B + a\underline{U}_C) \quad (2)$$

natomiast symetrycznej kolejności zerowej  $\underline{U}_0$

$$\underline{U}_0 = \frac{1}{3}(\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C). \quad (3)$$

W zależnościach 1–3  $\underline{U}_A$ ,  $\underline{U}_B$  i  $\underline{U}_C$  oznaczają fazowe napięcia zespolone, natomiast

$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (4)$$

jest operatorem obrotu.

Wartość współczynnika niesymetrii oblicza się z zależności

$$K_{U_2} = \frac{U_2}{U_1} 100\%, \quad (5)$$

w której  $U_1 = |\underline{U}_1|$ ,  $U_2 = |\underline{U}_2|$ . Zerowa składowa symetryczna nie wpływa na niesymetrię napięć. Szerzej teorię składowych symetrycznych i jej zastosowanie do określania asymetrii układu trójfazowego opisano w [11], [12]. Z napięć fazowych i kątów obliczana jest niesymetria w czasie badań odporności odbiorników na asymetrię napięcia [4]. Zależności podane w tej normie są przekształconą postacią formuł 1–5.

## 2. WZORY DO OBLICZANIA WSPÓLCZYNNIKA NIESYMETRII NAPIĘCIA ZASILAJĄCEGO

W praktyce inżynierskiej oraz w standardach stosowane są zależności do określania współczynnika asymetrii z wartości skutecznych napięć międzyfazowych. W dalsze części pokazane zostaną różnice w otrzymywanych wynikach z różnych formuł. Normy [1], [2], [3], [6], [8] określają poziomy dopuszczalne asymetrii napięcia. Ponadto norma [5] opisująca metody pomiaru jakości energii wymaga aby niepewność pomiaru niesymetrii zasilania dla przyrządów klasy A (analizatory używane do dokładnych pomiarów) była lepsza niż  $\pm 0.15\%$  (wartości bezwzględnej).

### 2.1. NORMA EN 61000-4-30

W standardzie [5] wartość współczynnika asymetrii obliczana jest z zależności

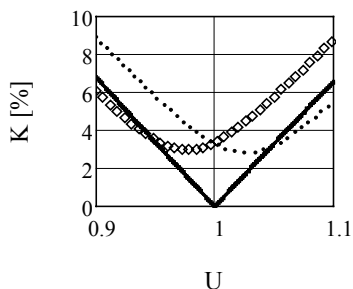
$$K_{U_2} = 100\% \cdot \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}}, \quad (6)$$

w której

$$\beta = \frac{U_{AB}^4 + U_{BC}^4 + U_{CA}^4}{(U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2)^2}, \quad (7)$$

natomiast  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$  to wartości skuteczne napięć międzyfazowych.

Na rysunku 1 przedstawiono zmiany wartości współczynnika niesymetrii z zależności (6) przy stałych napięciach  $U_{AB}$ , i  $U_{BC}$ . Natomiast na rysunku 2, trójwymiarowym zmieniają się dwa napięcia międzyfazowe.

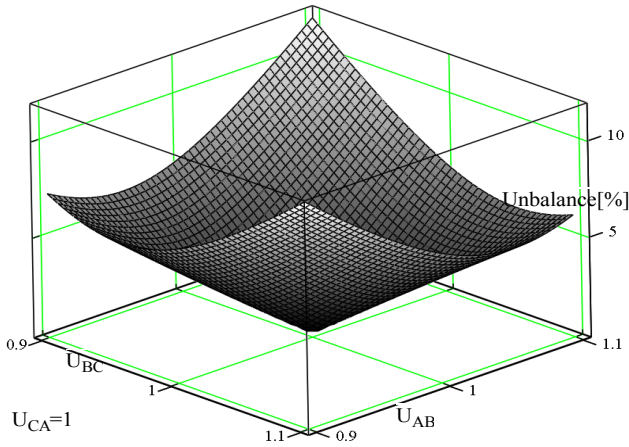


Rys. 1. Wartość współczynnika asymetrii z zależności (6);

$U_{CA} = 1$ ;  $U_{BC} = 1$ , – linia ciągła,  $U_{BC} = 0.95$ , – linia z rombami,  $U_{BC} = 1.05$ , – linia przerywana

Fig. 1. Unbalance factor calculated from the formula (6);

$U_{CA} = 1$ ;  $U_{BC} = 1$ , – solid line,  $U_{BC} = 0.95$ , – line with diamonds,  $U_{BC} = 1.05$ , – dotted line



s

Rys. 2. Wartość współczynnika niesymetrii napięcia zasilania z zależności (6)  
Fig. 2. Voltage unbalance factor calculated from the formula (6)

## 2.2. NORMY EN 61000-2-2, EN 61000-2-4, EN-61000-4-12

W normach określających poziomy kompatybilności dotyczące zaburzeń przewodzonych [1], [2], [3] współczynnik asymetrii wyznacza się z wartości skutecznych napięć międzyfazowych

$$K_{U_2} = \sqrt{\frac{6(U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2)}{(U_{AB} + U_{BC} + U_{CA})^2}} - 2. \quad (8)$$

Wykresy dwu i trójwymiarowe zmian wartości współczynnika asymetrii od napięcia międzyfazowego, obliczone z zależności (8), mają kształty podobne do umieszczonych na rysunkach 1 i 2.

## 2.3. NORMA GOST 13109-97

W normie rosyjskiej [8] współczynnik asymetrii określa stosunek kolejności przeciwnej do kolejności zgodnej (5). Wartość symetrycznej kolejności zgodnej obliczana jest z równania

$$U_1 = \sqrt{\frac{1}{12} \left[ \left( \sqrt{3}U_{AB} + \sqrt{4U_{AB} - \left( \frac{U_{BC}^2 - U_{CA}^2}{U_{AB}} + U_{AB} \right)^2} \right)^2 + \left( \frac{U_{BC}^2 - U_{CA}^2}{U_{AB}} \right)^2 \right]} \quad (9)$$

lub postaci przybliżonej, dopuszczonej do stosowania, gdzie symetryczna zgodna równa się wartości średniej  $U_{Avg}$  napięć międzyfazowych.

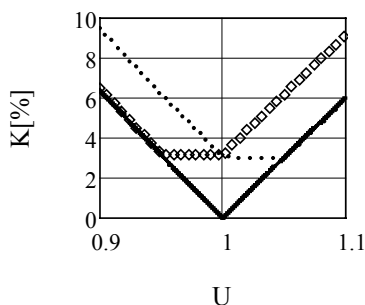
$$U_1 = U_{Avg} = \frac{1}{3}(U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}). \quad (10)$$

Wartość symetrycznej kolejności przeciwnej obliczana jest z równania

$$U_2 = \sqrt{\frac{1}{12} \left[ \left( \sqrt{3}U_{AB} - \sqrt{4U_{AB}^2 - \left( \frac{U_{BC}^2 - U_{CA}^2}{U_{AB}} + U_{AB} \right)^2} \right)^2 + \left( \frac{U_{BC}^2 - U_{CA}^2}{U_{AB}} \right)^2 \right]} \quad (11)$$

lub określona w przybliżeniu ze znajomości maksymalnej różnicy pomiędzy napięciem międzyfazowym najwyższym a najniższym

$$U_2 = 0,62(\max\{U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}\} - \min\{U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}\}) \quad (12)$$



Rys. 3. Wartość współczynnika asymetrii z zależności uproszczonej podanej w normie ГOCT 13109-97;  $U_{CA} = 1$ ;  $U_{BC} = 1$ , – linia ciągła,  $U_{BC} = 0,95$ , – linia z rombami,  $U_{BC} = 1,05$ , – linia przerywana  
Fig. 3. Unbalance factor calculated from the simplified formula given in the standard ГOCT 13109-97;  $U_{CA} = 1$ ;  $U_{BC} = 1$ , – solid line,  $U_{BC} = 0,95$ , – line with diamonds,  $U_{BC} = 1,05$ , – dotted line

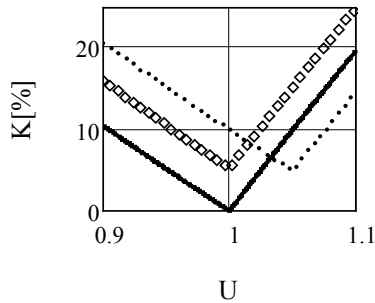
Wartość współczynnika asymetrii określonego stosunkiem składowej przeciwnej (11) do zgodnej (9) jest równoważna zależności (6) podanej w normie EN 61000-4-30 [5]. Na rysunku 3 przedstawiono zmianę współczynnika niesymetrii w przypadku zastosowania zależności uproszczonej (12).

#### 2.4. ZALECENIA EP29

W zaleceniach dotyczących planowania limitów kompatybilności dla systemu energetycznego w Wielkiej Brytanii [10] za współczynnik asymetrii napięcia zasilają-

cego przyjmuje się maksymalne odchylenie napięcia międzyfazowego od wartości średniej  $U_{Avg}$  napięć

$$K_{U_2} = \frac{\max\{|U_{AB} - U_{Avg}|, |U_{BC} - U_{Avg}|, |U_{CA} - U_{Avg}|\}}{U_{Avg}} 100\% \quad (13)$$



Rys. 4. Wartość współczynnika asymetrii z zależności (13);  $U_{CA} = 1$ ;  $U_{BC} = 1$ , – linia ciągła,  $U_{BC} = 0,95$ , – linia z rombami,  $U_{BC} = 1,05$ , – linia przerywana

Fig. 4. Unbalance factor calculated from the formula (13);  $U_{CA} = 1$ ;  $U_{BC} = 1$ , – solid line,  $U_{BC} = 0.95$ , – line with diamonds,  $U_{BC} = 1.05$ , – dotted line

Zależność (13) jest preferowany także przez The National Electrical Manufacturers Association (NEMA), zrzeszenie ponad 450 producentów sprzętu elektrycznego i medycznego oraz w normie [9].

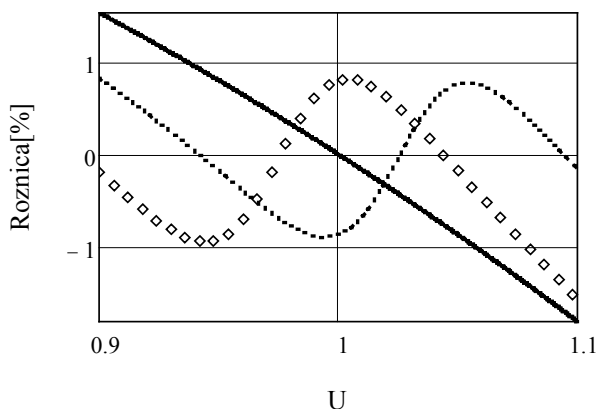
### 3. PORÓWNANIE WARTOŚCI WSPÓŁCZYNNIKA ASYMETRII W ZALEŻNOŚCI OD ZASTOSOWANEJ FORMUŁY

#### 3.1. METODA SYMULACYJNA

Wartości otrzymywanego współczynnika niesymetrii porównywano z wynikami obliczonymi z zależności (6). Przyjęto tą zależność jako odniesienie, ponieważ profesjonalne analizatory jakości energii elektrycznej mają zaimplementowane algorytmy dostępne w normie [5] i innych tam powoływanych. W porównaniu przyjęto sinusoidalny kształt napięcia międzyfazowego o jednostkowej wartości skutecznej  $U_{CA} = 1$  natomiast pozostałe zmieniano od 0,9 do 1,1.

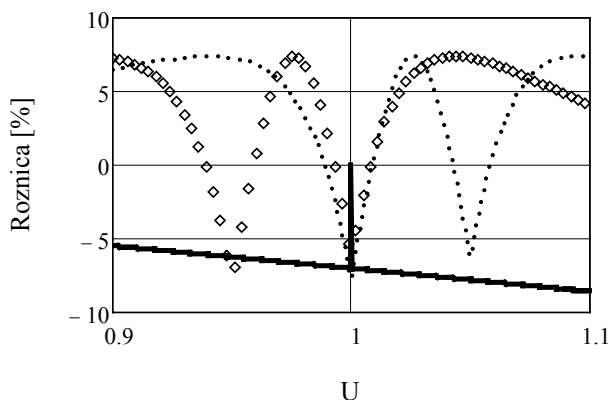
Wykresy przedstawione na rysunkach od 5 do 7 są przekrojami z wykresów trójwymiarowych, przedstawiają różnicę względną pomiędzy współczynnikami otrzymywanymi z różnych wzorów. Ze względu na brak przejrzystości zrezygnowano z wykresów przestrzennych.

Największe różnice w odniesieniu do zależności z normy 61000-4-30 występują w zależności (13).



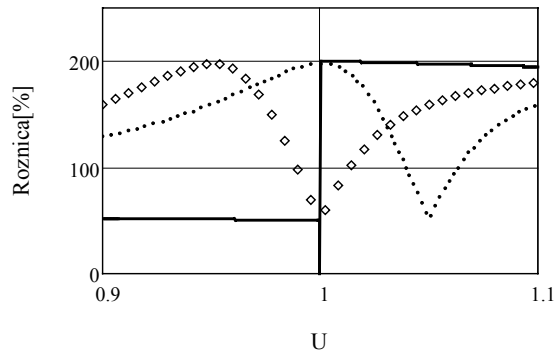
Rys. 5. Względne różnice pomiędzy współczynnikiem obliczonym z normy EN 61000-2-2 a EN 61000-4-30;  $U_{CA} = 1$ ;  $U_{BC} = 1$ , – linia ciągła,  $U_{BC} = 0,95$ , – linia z rombami,  $U_{BC} = 1,05$ , – linia przerywana

Fig. 5. Relative differences between the unbalance factor calculated from the standard EN 61000-2-2 and EN 61000-4-30;  $U_{CA} = 1$ ;  $U_{BC} = 1$ , – solid line,  $U_{BC} = 0.95$ , – line with diamonds,  $U_{BC} = 1.05$ , – dotted line



Rys. 6. Względne różnice pomiędzy współczynnikiem obliczonym z normy ГOCT 13109-97 a EN 61000-4-30;  $U_{CA} = 1$ ;  $U_{BC} = 1$ , – linia ciągła,  $U_{BC} = 0,95$ , – linia z rombami,  $U_{BC} = 1,05$ , – linia przerywana

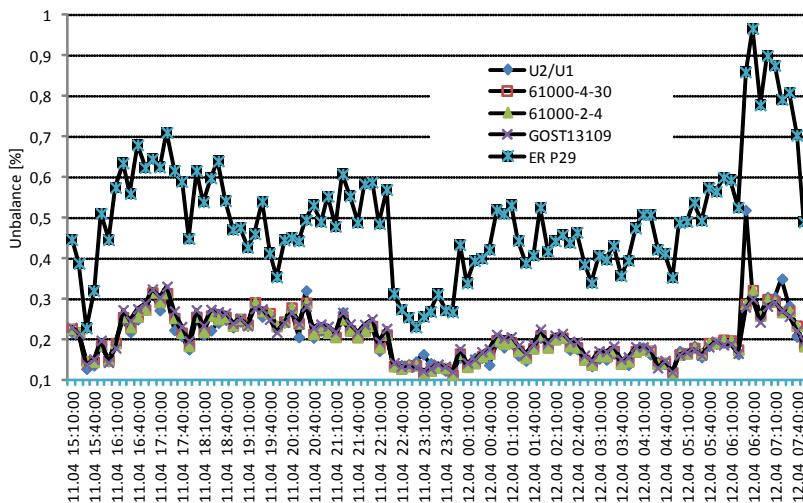
Fig. 6. Relative differences between the unbalance factor calculated from the standard ГOCT 13109-97 and EN 61000-4-30;  $U_{CA} = 1$ ;  $U_{BC} = 1$ , – solid line,  $U_{BC} = 0.95$ , – line with diamonds,  $U_{BC} = 1.05$ , – dotted line



Rys. 7. Względna różnica pomiędzy współczynnikiem obliczonym z zależności (13) a EN 61000-4-30;  $U_{CA} = 1$ ;  $U_{BC} = 1$ , – linia ciągła,  $U_{BC} = 0,95$  – linia z rombami,  $U_{BC} = 1,05$  – linia przerywana  
 Fig. 7. Relative differences between the unbalance factor calculated from the formula (13) and EN 61000-4-30;  $U_{CA} = 1$ ;  $U_{BC} = 1$  – solid line,  $U_{BC} = 0,95$  – line with diamonds,  $U_{BC} = 1.05$  – dotted line

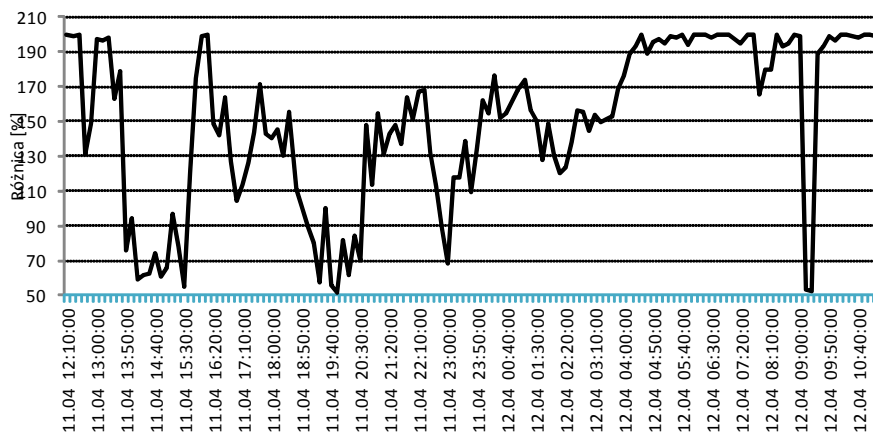
### 3.2. PORÓWNANIE WARTOŚCI WSPÓŁCZYNNIKA NIESYMETRII OTRZYMANÝCH Z NAPIĘĆ ZAREJESTROWANYCH W ZŁĄCZU ZASILAJĄCYM LABORATORIUM

Wszystkie zależności z których jest obliczany współczynnik niesymetrii zakłada sinusoidalny kształt napięcia. Norma [6] wymaga aby w publicznych sieciach niskiego napięcia współczynnik odkształcenia harmonicznymi THD był mniejszy od 8%. Napięcia rejestrowano analizatorem jakości energii Topas100. W okresie rejestracji



Rys. 8. Współczynnik asymetrii w obliczony z różnych zależności podawanych w normach  
 Fig. 8. Unbalance factor calculated from different formulas given in the standards





Rys. 9. Względna różnice pomiędzy współczynnikiem obliczonym z zależności (13) a EN 61000-4-30  
Fig. 9. Relative differences between the unbalance factor from the formula (13) and EN 61000-4-30

napięć wartość THD była zawarta pomiędzy 1,7 a 3,3%. Wartość współczynnika niesymetrii w wybranym przedziale czasu przedstawiają rysunek 8. Na rysunku linią  $U_2/U_1$  oznaczono wartość współczynnika niesymetrii obliczonego przez analizator. Pozostałe zostały wyznaczone ze wzorów znajdujących się w wymienionych normach.

Wartości współczynnika niesymetrii otrzymane z zależności znajdujących się w normach [1–5, 8] są zbieżne. Obliczenie niesymetrii ze wzoru (13) [10] skutkuje otrzymaniem wartości nawet dwukrotnie większych od wymaganych przez przepisy EN61000-4-30 (rys. 9).

#### 4. PODSUMOWANIE

Z przeprowadzonych analiz oraz przykładowych pomiarów sieci zasilającej wynika, że do obliczenia niesymetrii zasilania w celach inżynierskich (technicznych) może być zastosowany dowolny wzór podany w normach [1]–[5], [7], [8]. Różnice pomiędzy wynikami nie przekraczają kilku procent. Zależność podana w rekomendacji [10] daje wartość współczynnika niesymetrii nawet dwukrotnie wyższą.

W celu określenia zgodności parametrów jakości napięcia zasilającego w sieci publicznej z wymaganiami normy [6] powinna być stosowana zależność (6).

#### LITERATURA

- [1] PN-EN 61000-2-2:2003, Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC), *Poziomy kompatybilności zaburzeń przewodzonych małej częstotliwości i sygnałów przesyłanych w publicznych sieciach zasilających niskiego napięcia.*

- [2] PN-EN 61000-2-4:2003, Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC), *Poziomy kompatybilności dotyczące zaburzeń przewodzonych małej częstotliwości w sieciach zakładów przemysłowych.*
- [3] PN-EN 61000-2-12:2004, Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC), *Poziomy kompatybilności dla zaburzeń przewodzonych niskiej częstotliwości i sygnałów sygnalizacji w publicznych sieciach zasilających średniego napięcia.*
- [4] PN-EN 61000-4-27:2004 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC), *Metody badań i pomiarów - Badanie odporności na asymetrię napięcia.*
- [5] PN-EN 61000-4-30:2011, Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC), *Metody badań i pomiarów - - Metody pomiaru jakości energii.*
- [6] PN-EN 50160:2010 , *Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych*
- [7] IEEE Std 1159-2009, *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.*
- [8] ГОСТ 13109-97, *Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная, нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.*
- [9] ANSI C84.1, 2006, *American National Standard for Electric Power System and Equipment – Voltage Ratings(60Hertz).*
- [10] Engineering Recommendation P29, *Planning limits for voltage unbalance in the United Kingdom,* The Electricity Council, London, March 1990
- [11] BAGGINI A., *Handbook of Power Quality,* John Wiley&Sons, Ltd, 2008.
- [12] KOWALSKI Z., *Jakość energii elektrycznej,* Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2007.

## MEASUREMENT OF THE VOLTAGE UNBALANCE IN TREE PHASE SYSTEM

The paper presents the differences between standardized and used methods of determining the unbalance factor for three-phase system. It is shown that the simplified formulas and formulas included in the standards, in analysed voltage range, produce unbalance factor differing by several percent relative value (the difference results in absolute value at the level of hundredths parts of percent). Simulation analysis and experimental test of three-phase voltage lead to the same conclusions.