Jakość i Użytkowanie Energii Elektrycznej
Tom IX Zeszyt 2 Rok 2003

BŁĘDY POMIARU CZYNNEJ ENERGII ELEKTRYCZNEJ LICZNIKAMI INDUKCYJNYMI PRZY PRZEBIEGACH ODKSZTAŁCONYCH

Errors of Electric Active Energy Measurement Made with Induction Meters at the Presence of Distorted Waveforms

Robert PIETRUCHA
Akademia Górniczo-Hutnicza

Streszczenie: **Artykuł przedstawia analizę błędów wskazań energii, mierzonej za pomocą indukcyjnych liczników energii czynnej, powstałych w obecności wyższych harmonicznych. Wyznaczono błędy trójfazowych liczników przy znaczącym udziale 3, 5 i 7 harmonicznej w prądzie jednofazowego odbiornika oraz przy zasilaniu odbiornika RTV. Przedstawiono statystyczną analizę wyników pomiarów, zaproponowano empiryczną zależność umożliwiającą oszacowanie błędów trójfazowych liczników energii czynnej przy odbiegających od sinusoidy przebiegach prądu i obciążeniu jednofazowym. Przedstawiono także analizę wpływu kątów fazowych 3, 5, 7 i 9 harmonicznej prądu na znak błędu dodatkowego liczników jednofazowych. Pokazano, że błąd dodatkowy pomiaru czynnej energii elektrycznej za pomocą jednofazowych liczników indukcyjnych może mieć zarówno wartości ujemne, jak i dodatnie, i zależy od kątów fazowych poszczególnych harmonicznych prądu.**

Summary: **The paper contains an analysis of energy registration errors, measured with induction active energy meters, occurring in the presence of the higher harmonics. The three-phase meter's errors have been determined at a significant participation of the 3rd, 5th and 7th harmonics in the current of a single-phase electric receiver and for radio and TV equipment. A statistical analysis of the measurement results is presented and an empirical dependence for the estimation of errors of three-phase active energy meters at distorted (non-sinusoidal) wave-forms of the current of a single-phase load has been proposed. An effect of phase angles of the 3rd, 5th, 7th and 9th current harmonics on sign of additional measuring error of the single-phase meters has also been presented. It has been shown that an additional error of electric active energy measurements made with a single-phase induction watt-hour meters can be either of minus or plus sign, depending on phase angles of individual higher current harmonics.**

Słowa kluczowe: harmoniczne, licznik indukcyjny, pomiar energii czynnej
Key words: harmonics, induction meter, active energy measurement

1. WSTĘP

Masowe korzystanie z urządzeń elektronicznych, zarówno dużej, jak i małej mocy, powoduje pobór z sieci elektroenergetycznej prądów odkształconych, które mogą być źródłem wielu zakłóceń. Odbiorniki nieliniowe mogą gwałtownie zmieniać pobór energii w czasie krótszym od jednego okresu napięcia zasilającego. Szybkie zmiany mocy wymuszają przepływ odkształconego, niesinusoidalnego prądu. Inaczej mówiąc, odbiorniki nieliniowe generują do sieci elektroenergetycznej wyższe harmoniczne prądu. Odkształcony prąd wywołuje odkształcone spadki napięcia na impedancjach sieci, które są proporcjonalne zarówno do wartości prądu, jak i częstotliwości harmonicznej. Odkształcone spadki napięcia w sieci powodują powstanie odkształconych napięć w punktach przyłączenia odbiorników, co może prowadzić do ich nieprawidłowej pracy, uszkodzenia lub w ogóle uniemożliwić ich działanie. Na domiar złego, w miarę pogorszenia się jakości napięcia zasilającego, widmo harmonicznych w prądzie odbiornika coraz bardziej się eksponuje, co oznacza, że poziom zawartości wyższych harmonicznych w napięciu na zaciskach nieliniowego odbiornika zwiększa się w miarę jego pierwotnego odkształcenia od sinusoidy. Również niejedno-

czesność użytkowania oraz fazowa nierównomierność obciążeń sieci ww. odbiornikami wzmagają negatywne skutki oddziaływania na sieć i jeszcze bardziej pogarszają się parametry jakościowe energii elektrycznej. W takich warunkach mogą wystąpić zakłócenia w pracy wybranych odbiorników (np. sprzęt RTV i komputery) oraz błędy pomiaru za pomocą tradycyjnych indukcyjnych liczników energii elektrycznej.

W historii swojego istnienia, liczącego ponad sto lat, licznik indukcyjny zawsze wyróżniał się spośród innych urządzeń pomiarowych. Powodem tego było stosowanie go do pomiaru energii, związane nierozłącznie z rozliczeniami finansowymi. Stąd nieustanne dążenie do podniesienia na coraz to wyższy poziom jego własności metrologicznych. Doprowadzono do perfekcji takie jego cechy, jak trwałość i pewność działania, związane z prostotą jego konstrukcji. Utrzymywanie nawet przez długie lata wysokiej klasy dokładności sprawiło, że licznik indukcyjny stał się podstawowym przyrządem do pomiarów energii elektrycznej w ciągu ostatniego półwiecza. Występowanie coraz większych odkształceń napięcia, szczególnie w sieciach nn, stawia jednak pod znakiem zapytania rzetelność rozliczeń finansowych pomiędzy dostawcą a odbiorcą z zastosowaniem liczników tego typu.

2. WYBRANE PARAMETRY JAKOŚCI ENERGII ELEKTRYCZNEJ

— *Moc czynna [active power]* — zdefiniowana jest jako suma mocy czynnych poszczególnych harmonicznych napięcia i prądu:

$$P = U_0 I_0 + \Sigma U_h I_h \cos\varphi_h$$

— *Moc pozorna [apparent power]* — zdefiniowana jest jako iloczyn wartości skutecznych napięcia i prądu:

$$S = U_{rms} I_{rms}$$

— *Współczynnik mocy [true power factor]* — zdefiniowany jest jako stosunek mocy czynnej do mocy pozornej:

$$PF = P / S$$

— *Współczynnik mocy harmonicznej podstawowej [displacement power factor]* — zdefiniowany jest jako stosunek mocy czynnej do mocy pozornej harmonicznej podstawowej (cosinus kąta pomiędzy podstawowymi harmonicznymi napięcia i prądu):

$$dPF = P_1 / S_1$$

— *Współczynnik udziału wyższych harmonicznych napięcia (prądu) [harmonic ratio]* — zdefiniowany jest jako stosunek wartości skutecznych poszczególnych wyższych harmonicznych do wartości skutecznej harmonicznej podstawowej badanego przebiegu:

$$HR_{U(I)} = U(I)_h / U(I)_1$$

— *Współczynnik odkształcenia napięcia (prądu) [total harmonic distortion]* — zdefiniowany jest jako stosunek wartości skutecznej wyższych harmonicznych, licząc od drugiej, do wartości skutecznej harmonicznej podstawowej badanego przebiegu:

$$THD_{U(I)} = U(I)_{RMS\,h} / U(I)_1$$

3. PRZEGLĄD LITERATURY

W literaturze przedmiotu [1÷7, 9, 11÷13, 15÷19, 23÷24] szeroko omówiono błędy pomiarowe tradycyjnych indukcyjnych liczników energii czynnej w obecności wyższych harmonicznych prądu i napięcia. Większość badań dotyczyła jednak przypadków szczególnych: wpływu 3 harmonicznej prądu, niezależnego oddziaływania 3, 5 i 7 harmonicznej prądu i napięcia, oraz pracy licznika obciążonego jednofazowym sterowanym prostownikiem. Na podstawie otrzymanych wyników nie można więc wyciągnąć wniosków co do zachowania się liczników podczas pomiarów w sieciach elektroenergetycznych o dużym poziomie różnych wyższych harmonicznych występujących jednocześnie. Dlatego też konieczne stało się uzupełnienie badań szczegółową analizą zjawisk zachodzących w liczniku zasilanym przebiegami niesinusoidalnymi. Wyniki tej analizy mogą posłużyć do wyznaczenia granicznej niedokładności pomiarów energii w typowych sieciach nn. Zagadnienie to jest ważne, gdyż zniekształcenia przebiegów prądu i napięcia w sieciach elektroenergetycznych sn i nn przejawiają tendencję do wzrostu. Na podstawie rozeznania w literaturze można sformułować następujące wnioski dotyczące błędów wskazań liczników indukcyjnych przy przebiegach odkształconych:

— Kiedy napięcie jest sinusoidalne, błędy liczników indukcyjnych są generalnie małe, o ile nie występuje 3 harmoniczna w prądzie [2, 5]. Jednak, gdy zarówno prąd, jak i napięcie są niesinusoidalne — błędy są znaczne, nawet przy małym odkształceniu napięcia [2, 5, 13].

— Największe błędy pomiaru energii za pomocą tych liczników powstają w obecności: 3, 5 i 7 harmonicznej prądu [2, 5, 13]. Jedną z przyczyn może być niewłaściwa transformacja odkształconego od sinusoidy przebiegu prądu cewki prądowej licznika w przebieg prądów wirowych w tarczy [24]. Wartość prądów wirowych w tarczy jest proporcjonalna do pochodnej wymuszenia, którym jest prąd w cewce prądowej licznika [24]. Przebiegi prądów przy znaczącej zawartości 3, 5 i 7 harmonicznej mają dużą stromość narastania, równoznaczną z dużą wartością pochodnej prądu, co powoduje, że powstające prądy wirowe mają przebieg odbiegający swym kształtem od kształtu wymuszenia [24]. W dyskusji o artykule [13] P.S. Filipski [7] twierdzi, że przy dużej zawartości 3, 5, 7 harmonicznej w przebiegu mierniki indukcyjne mierzą energię z błędami odpowiednio nawet: ~20%, ~30%, ~50%, w zależności od współczynnika mocy PF. Wynika z tego, że błędy przy zawartości 5 i 7 harmonicznej mają większe wartości od błędów przy zawartości 3 harmonicznej w przebiegu. Wzrost zawartości 5 harmonicznej w szczycie obciążenia systemu elektroenergetycznego [9] wywołuje odpowiednie pogorszenie pomiaru energii elektrycznej w tym okresie, w którym jest ona najdroższa.

Tabela 1. Błędy jednofazowych liczników indukcyjnych przy przebiegach odkształconych

Napięcie (HR_{U1}=100%)				Prąd (HR_{I1}=100%)				Błąd licznika (%)	Literatura
HR_{U3} (%)	HR_{U5} (%)	HR_{U7} (%)	THD_U (%)	HR_{I3} (%)	HR_{I5} (%)	HR_{I7} (%)	THD_I (%)		
7,5	7,5		11				0	+1,5	[9]
10			10	10			10	-1,6	[7, 9]
15	3		15	20			20	-1,4 do +2,8	[5]
25	5		26	20			20	-1,7 do +4,3	[5]
	5		5	15	10	3	18	-5	[11]
10			10	20			20	-5,5 do -6,1	[13]
2	7		7	13	22		26	-6,7	[13]
	10		10		20		20	-6,4 do -6,8	[13]
		2	2		12	9	15	-6,8	[13]
		10	10			20	20	-6,6 do -6,9	[13]
			3				126	+9,1	[6]
5			5	10			10	0 do +/-10,0	[2]
	5		5		10		10	0 do +/-10,0	[2]
		5	5			10	10	0 do +/-10,0	[2]
33	20	14	41	33	20	14	41	-10,1 do +9,2	[5]

Tabela 2. Błędy trójfazowych liczników indukcyjnych przy przebiegach odkształconych

Napięcie (HR_{U1}=100%)				Prąd (HR_{I1}=100%)				Błąd licznika (%)	Literatura
HR_{U3} (%)	HR_{U5} (%)	HR_{U7} (%)	THD_U (%)	HR_{I3} (%)	HR_{I5} (%)	HR_{I7} (%)	THD_I (%)		
			2,09 do 2,96				2,94 do 4,66	-5,57	[6]
			2,12 do 3,78				83,88 do 104,2	-8,75	[6]

— Wartość błędu dodatkowego licznika indukcyjnego wywołanego wyższymi harmonicznymi prądu rośnie wraz ze wzrostem stosunku wartości skutecznych ww. harmonicznych do harmonicznej podstawowej $HR_{U(I)}$ [9, 23], jest natomiast odwrotnie proporcjonalna do wartości współczynnika mocy PF obciążenia [2, 3, 5, 7]. Przy takich samych przebiegach i obniżonym współczynniku mocy z wartości $PF = 1$ do wartości $PF = 0,5$, błędy mogą wzrosnąć nawet 2-krotnie [2].

— Zmiana prądu obciążenia nie wpływa znacząco na wartość błędu pomiaru energii w funkcji częstotliwości [5].

— Błąd pomiaru energii elektrycznej indukcyjnymi licznikami przy jednoczesnym występowaniu różnych wyższych harmonicznych nie jest równy sumie błędów wywołaną przez każdą harmoniczną z osobna [2].

— Błąd pomiaru za pomocą tradycyjnych indukcyjnych liczników czynnej energii elektrycznej może mieć zarówno wartości ujemne, jak i dodatnie [2, 5], i zależy od kąta fazowego poszczególnych harmonicznych prądu [2, 4, 5, 13].

— Charakter oddziaływania na licznik wyższych harmonicznych napięcia oraz prądu jest jednakowy i niezależny od typu licznika, jego zakresu pomiarowego i klasy dokładności [12]. Właściwością licznika, która najlepiej charakteryzuje możliwości pomiaru energii prądu odkształconego, jest jego charakterystyka częstotliwościowa [12].

Wybrane wartości błędów liczników indukcyjnych, zasilanych przebiegami odkształconymi, uzyskane w pomiarach przez różnych autorów, zestawiono w tabelach 1 i 2. Z tabeli tych wynika, że nawet przy nieznacznie odkształconych przebiegach mogą występować znaczne błędy pomiaru energii z zastosowaniem tradycyjnych liczników indukcyjnych.

4. BŁĘDY LICZNIKÓW INDUKCYJNYCH PRODUKCJI KRAJOWEJ

Ze względu na nieliniowy i złożony charakter pracy poszczególnych członów licznika, ścisłe analityczne ujęcie zjawisk zachodzących podczas zasilania go prądem i napięciem o prze-

biegach dowolnych jest bardzo trudne. Po rozpatrzeniu własności momentów mechanicznych i elektrycznych oraz strumieni działających na tarczę licznika, okazuje się, że błąd dodatkowy, powstający podczas pomiarów energii przebiegów odkształconych, wynika z następujących przyczyn [5]:

a) błędnego i nieliniowego przetwarzania harmonicznych prądu i napięcia na harmoniczne strumieni magnetycznych, zależnego od charakterystyki częstotliwościowej licznika;
b) dodatkowego tłumienia ruchu tarczy nie zrównoważonym momentem napędowym, wywołanym przez wyższe harmoniczne strumieni magnetycznych;
c) nieliniowości rzeczywistych obwodów magnetycznych licznika i powstawania dodatkowych zniekształceń w strumieniach oraz w indukowanych przez nie prądach;
d) niesłuszności przyjmowanego w teorii założenia o rezystancyjnym charakterze impedancji tarczy licznika.

Z analizy wartości częstotliwości błędów liczników indukcyjnych można wyciągnąć następujące wnioski, przydatne w ocenie dodatkowych błędów pomiaru energii wyższych harmonicznych [5]:

a) znaczny wzrost częstotliwości powyżej częstotliwości znamionowej powoduje duży ujemny błąd dodatkowy licznika, którego wartość praktycznie nie zależy od prądu obciążenia, ale jest funkcją współczynnika mocy;
b) częstotliwościowe własności licznika zależą od jego parametrów konstrukcyjnych; małymi błędami częstotliwościowymi charakteryzują się liczniki, w których znamionowa prędkość obrotowa tarczy jest niewielka, tarcza cienka, tłumienie prądowe i napięciowe oraz rezystancja uzwojenia napięciowego — nieduże;
c) dla częstotliwości harmonicznych $f_v = v f_n$ błąd częstotliwościowy $\delta_v = \delta_f$ można przedstawić jako funkcję współczynnika mocy harmonicznej cos φ_v.

Badania liczników indukcyjnych jedno- i trójfazowych [5] wykazały, że w przypadku sinusoidalnego napięcia sieci błędy dodatkowe są tym większe, im większy jest udział trzeciej harmonicznej prądu. Na podstawie pomiarów zależności tego błędu od zawartości trzeciej harmonicznej w prądzie HR_{I3}, kąta fazowego φ_{I3}, współczynnika mocy harmonicznej podstawowej dPF i prądu obciążenia I ustalono zależność empiryczną określającą wartość graniczną błędu [5]:

$$\left|\delta_p\right|_{max} = \frac{0,2}{dPF} HR_{I3} \qquad (1)$$

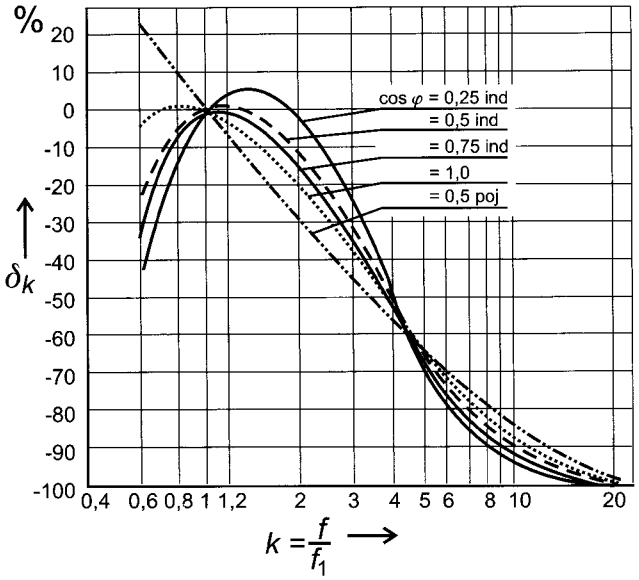
Przy napięciu i prądzie odkształconym licznik powinien mierzyć energię odpowiadającą mocy określonej wg następującego wyrażenia (przy braku składowej stałej) [5, 12]:

$$P = \sum_{V=1}^{n} P_V = \sum_{V=1}^{n} U_V I_V \cos\varphi_V = \\ = U_1 I_1 \cos\varphi_1 + \sum_{V=2}^{n} U_V I_V \cos\varphi_V \qquad (2)$$

gdzie:

U_V, I_V — wartości skuteczne napięcia i prądu harmonicznych rzędu v;

φ_V — przesunięcie fazowe harmonicznej rzędu v.



Rys. 1. Rodzina charakterystyk częstotliwościowych liczników indukcyjnych serii 52 produkcji PAFAL S.A. [5, 12]

Aby licznik mierzył poprawnie energię odpowiadającą poszczególnym harmonicznym, powinien mieć płaską charakterystykę częstotliwościową $E_l = f(P)$ w paśmie częstotliwości, w którym znajdują się częstotliwości poszczególnych harmonicznych. W warunkach rzeczywistych charakterystyka licznika znacznie różni się od liniowej. Wypadkowa charakterystyka częstotliwościowa krajowych liczników indukcyjnych typów (A, B, C) 52 ma przebieg jak na rysunku 1, dla prądu $I = I_n$ [5, 12]. Pomiary uzupełniające [5] wykazały, że zmiana prądu obciążenia nie wpływa istotnie na charakter zależności $\delta_f = f(f)$.

Zależność błędu pomiaru energii odpowiadającej poszczególnym harmonicznym można wyznaczyć ze wzoru:

$$\delta_V = a_V + b_V \operatorname{tg}\varphi_V + c_V \sqrt{\left(1 + \operatorname{tg}^2\varphi_V\right)} \qquad (3)$$

W tabeli 3 zestawiono wartości współczynników a_v, b_v, c_v wyznaczone dla liczników produkcji krajowej serii 52 [5, 12].

Sumaryczny błąd dodatkowy pomiaru energii całkowitej przy przebiegu odkształconym można wyznaczyć z zależności [5]:

Tabela 3. Współczynniki a_v, b_v, c_v dla liczników produkcji krajowej serii 52 [5, 12]

Harmoniczna	Współczynniki		
	a_v	b_v	c_v
2	-0,20	+0,053	-0,003
3	-0,38	+0,023	-0,004
5	-0,64	-0,008	-0,004
7	-0,78	-0,017	-0,005
9	-0,85	-0,016	-0,005
11	-0,90	-0,012	-0,005

Tabela 4. Dopuszczalne składowe harmoniczne napięcia rzędu n HR_U według normy PN-EN 50160

Nieparzyste harmoniczne				Parzyste harmoniczne	
Nie będące krotnością 3		Będące krotnością 3			
Rząd n	**Wartość względna napięcia HR_U**	**Rząd n**	**Wartość względna napięcia HR_U**	**Rząd n**	**Wartość względna napięcia HR_U**
5	6%	3	5%	2	2%
7	5%	9	1,5%	4	1%
11	3,5%	15	0,5%	6...24	0,5%
13	3%	21	0,5%		
17	2%				
19	1,5%				
23	1,5%				
25	1,5%				

$$\delta_d = \frac{\sum_{v=2}^{n} \delta_V U_V I_V \cos\varphi_V}{\sum_{v=1}^{n} U_V I_V \cos\varphi_V} \tag{4}$$

gdzie:

δ_V — błąd pomiaru energii będący funkcją rzędu mierzonej harmonicznej, określony zależnością (3).

W granicznym przypadku całkowity błąd licznika indukcyjnego można więc traktować jako superpozycję tylko dwóch składników ((1) + (4)), związanych z wąskim pasmem częstotliwościowym licznika i nieliniowościami obwodów magnetycznych toru napięciowego [5], tj.:

$$\delta = \delta_p + \delta_d = \frac{0,2}{dPF} HR_{I3} + \frac{\sum_{v=2}^{n} \delta_V U_V I_V \cos\varphi_V}{\sum_{v=1}^{n} U_V I_V \cos\varphi_V} \tag{5}$$

Zależność (5) pozwala zatem na wyznaczenie granicznej niedokładności pomiarów energii w dowolnych warunkach.

W obwodach z prostownikami tyrystorowymi, w których w idealnym przypadku przebieg prądu jest wycinkiem sinusoidy, dodatkowego znaczenia nabiera także opóźnienie czasowe strumieni i indukowanych przez nie prądów, czyli inercja elektryczna obwodów. Z analizy tego zjawiska wynika, że zmianom ulega głównie średni moment tłumienia prądowego, co powoduje zmiany prędkości obrotowej tarczy i powstawanie błędu dodatkowego δ_T [5].

Błędy wskazań liczników indukcyjnych mierzących poprawnie energię przy sinusoidalnym kształcie prądu i napięcia, dla przebiegu prądu odkształconego przez układ tyrystorowy, zwłaszcza przy dużym kącie odcięcia, znacznie przekraczają wartości dopuszczalne. W przypadku nieciągłej krzywej prądu, mającej swe źródło w układzie tyrystorowego odbiornika, i przy sinusoidalnym kształcie napięcia występują błędne wskazania licznika, szybko rosnące po przekroczeniu kąta wysterowania tyrystora $\alpha = 90°$, mogące osiągnąć wartości nawet kilkunastu procent [24]. Dla kątów wysterowania większych niż $\alpha = 23°$ błędy wskazań przekraczają wartości dopuszczalne dla licznika tej klasy [24]. Dla kątów wysterowania α większych od $\alpha = 90°$ błędy licznika indukcyjnego mają znak dodatni, co oznacza, że licznik wskazuje za dużo [24].

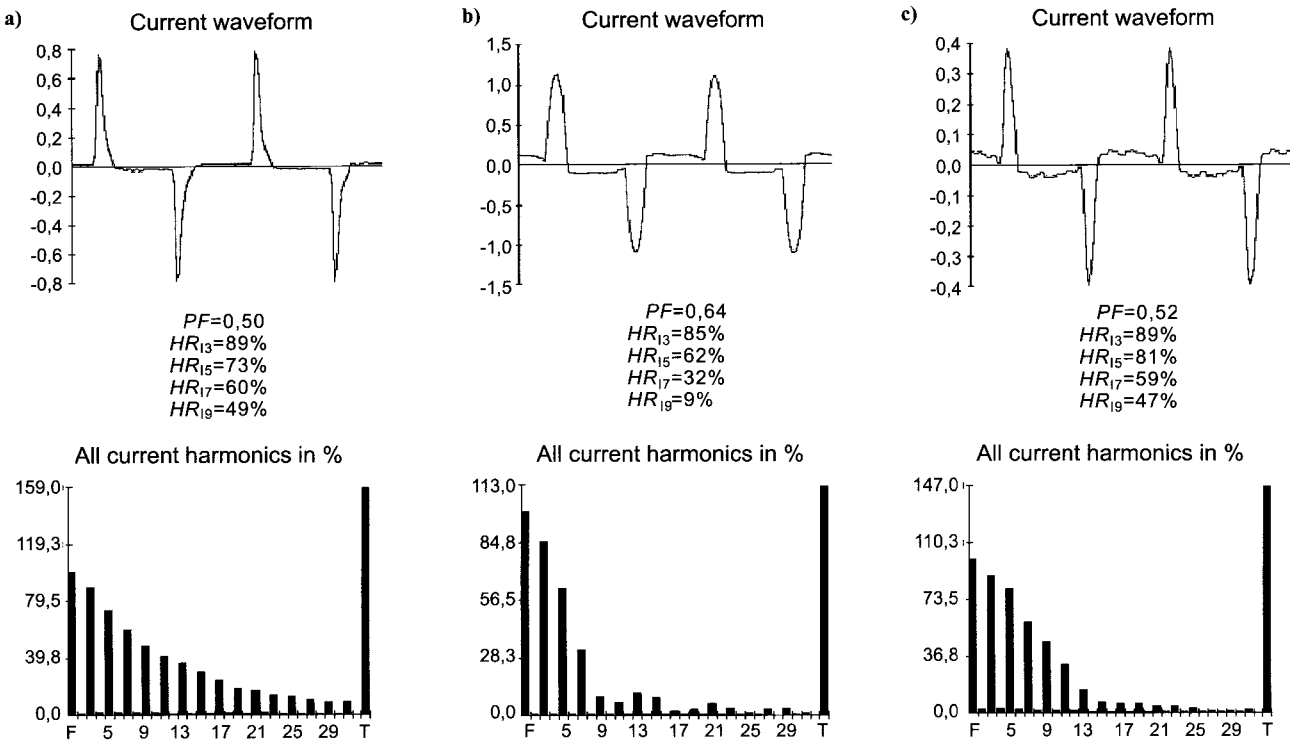
5. AKTUALNY STAN NORMALIZACJI JAKOŚCI ENERGII ELEKTRYCZNEJ W POLSCE

W wyniku prac Normalizacyjnej Komisji Problemowej nr 104 ds. Kompatybilności Elektomagnetycznej przetłumaczono i ustanowiono w kraju wiele norm europejskich dotyczących jakości energii elektrycznej. Pomimo że — zgodnie z ustawą o normalizacji i certyfikacji — stosowanie norm jest dobrowolne, to nawet w przypadku, gdy dana norma nie zostanie wprowadzona do obowiązkowego stosowania jako rozporządzenie właściwego ministra, ranga i pochodzenie tych dokumentów upoważniają do ich stosowania przy rozwiązywaniu problemów związanych z jakością energii elektrycznej. Do jednych z ważniejszych, z punktu widzenia spółek dystrybucyjnych, należy zaliczyć normę PN-EN 50160 „Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych" [21].

W ostatnim okresie, oprócz norm, pojawiły się także wytyczne określające standardy jakościowe energii elektrycznej. W Rozporządzeniu Ministra Gospodarki z dnia 25 września 2000 r. [22] określono m.in. standardy jakościowe obsługi odbiorców energii elektrycznej.

5.1. Norma PN-EN 50160

W normie określono m.in. parametry napięcia w złączach sieci rozdzielczych niskiego napięcia w warunkach normalnych. W normalnych warunkach pracy, w ciągu każdego tygodnia, 95% ze zbioru 10-minutowych, średnich wartości skutecznych dla każdej harmonicznej napięcia powinno być mniejsze lub równe wartościom podanym w tabeli 4. Ponadto, współczynnik THD napięcia zasilającego (uwzględniający wszystkie harmoniczne, aż do rzędu 40) powinien być mniejszy lub równy $THD_U = 8\%$.



Rys. 2. Przebiegi i widma amplitudowo-częstotliwościowe prądów: a) energooszczędna świetlówka kompaktowa, b) komputer osobisty, c) magnetowid

5.2. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 25 września 2000 r.

W rozporządzeniu określono m.in. standardy jakości obsługi odbiorców energii elektrycznej w sieci niskiego napięcia. Mówi się w nich, że jeżeli strony nie ustaliły w umowie sprzedaży standardów jakości energii elektrycznej, to dla miejsc przyłączenia leżących w sieci o napięciu znamionowym nie wyższym niż 1kV:

— współczynnik odkształcenia napięcia nie może przekraczać wartości THD_U = 8,0%,

— zawartość poszczególnych harmonicznych napięcia odniesionych do harmonicznej podstawowej nie może przekraczać wartości HR_U = 5,0%.

6. WYŻSZE HARMONICZNE PRĄDU WYBRANYCH ODBIORNIKÓW

Wśród odbiorników użytkowanych w biurach, czy gospodarstwach domowych, występuje wiele takich, które charakteryzują się niskim współczynnikiem mocy PF przy stosunkowo dużym udziale 3, 5, 7 i 9 harmonicznej prądu. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe przebiegi i widma amplitudowo-częstotliwościowe prądów wybranych odbiorników nieliniowych użytkowanych w gospodarstwach domowych. Pomiary wykonano miernikiem HARMONALYZER HA-2000 firmy AMPROBE.

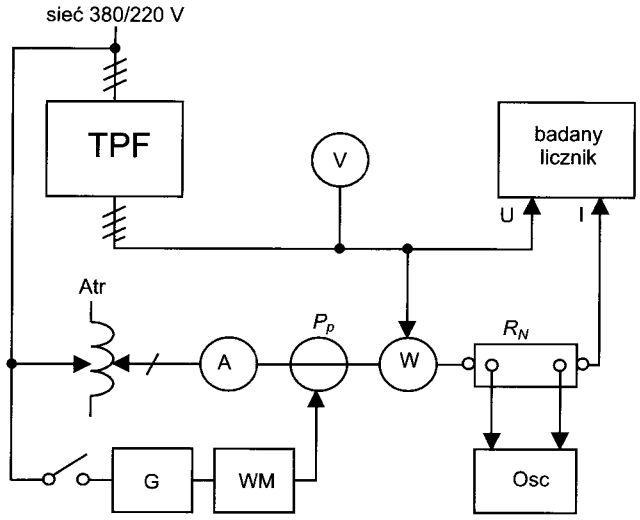
7. BŁĘDY POMIARU CZYNNEJ ENERGII ELEKTRYCZNEJ TRÓJFAZOWYMI LICZNIKAMI INDUKCYJNYMI W OBECNOŚCI WYŻSZYCH HARMONICZNYCH PRĄDU PRZY OBCIĄŻENIU JEDNOFAZOWYM

Poniżej przedstawiono analizę błędów dodatkowych pomiaru energii czynnej trójfazowymi indukcyjnymi licznikami, powstałych w obecności wyższych harmonicznych prądu przy obciążeniu jednofazowym. Zgodnie z kierunkiem podobnych analiz [2, 3, 5, 7, 9, 13, 23] wyznaczano błędy liczników przy znaczącym udziale 3, 5 i 7 harmonicznej w prądzie jednofazowego odbiornika w zależności od jego współczynnika mocy PF oraz przy zasilaniu odbiornika RTV. Przedstawiono statystyczną analizę wyników pomiarów, zaproponowano empiryczną zależność umożliwiającą oszacowanie błędów trójfazowych indukcyjnych liczników energii czynnej przy odkształconych od sinusoidy przebiegach prądu i obciążeniu jednofazowym.

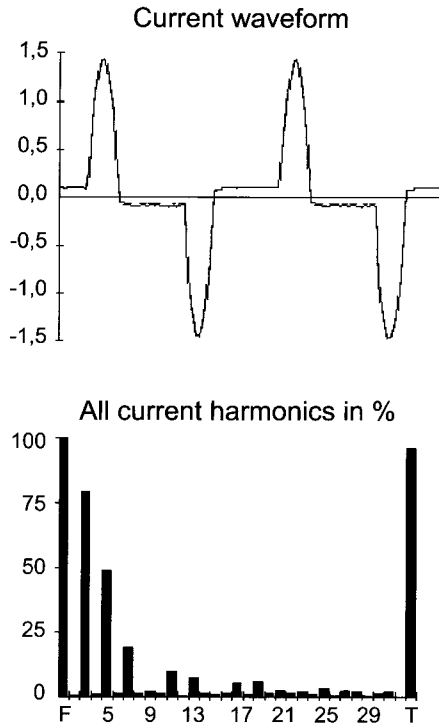
7.1 Metodyka badań

Zgodnie z celem badań: wyznaczeniem błędów trójfazowych indukcyjnych liczników czynnej energii elektrycznej w obecności wyższych harmonicznych prądu, przy obciążeniu jednofazowym, oraz weryfikacją uzyskanych analitycznych zależności błędu dodatkowego, wybrano dwuetapową procedurę pomiarów.

W pierwszej fazie badań do liczników przyłączono trójfazowe napięcie — praktycznie sinusoidalne o częstotliwości 50 Hz (HR_{I3} = 0,5%, HR_{I5} = 2,5%, HR_{I7} = 1%, THD_U = 3%) i po dwugodzinnej stabilizacji wymuszono przepływ jedno-



Rys. 3. Schemat blokowy układu pomiarowego.
TPF — transformatorowy przesuwnik fazowy z regulacją kąta (±1°el) i napięcia (±1V); V — woltomierz cyfrowy klasy 0,2; Atr — autotransformator; A — amperomierz elektrodynamiczny klasy 0,2; W — watomierz elektrodynamiczny klasy 0,2 (45-500-1000Hz); G — generator; WM — wzmacniacz mocy 100W; P_p — przekładnik prądowy klasy 0,2; R_N — rezystor szerokopasmowy 0,01Ω; Osc — oscyloskop.



Rys. 4. Kształt oraz widmo harmonicznych prądu jednofazowego odbiornika RTV

fazowego prądu sinusoidalnego o częstotliwości 50Hz lub odkształconego (z regulowaną zawartością 3, 5, 7 harmonicznej). Wartości natężeń prądów podstawowej harmonicznej zmieniano w zakresie $I_1 = (1 \div 10)A$, a wyższych harmonicznych odpowiednio $HR_I = (20 \div 100)\%$. Dwa niezależne układy regulacyjne: napięcia i prądu, poprzez wykorzystanie przesuwnika fazy pomiędzy podstawowymi harmonicznymi, umożliwiały regulację wartości współczynnika mocy harmonicznej podstawowej w zakresie $dPF = 0{,}5 \div 1$, a dla odkształconego przebiegu prądu wartości współczynnika mocy odpowiednio $PF = 0{,}2 \div 1$. Zgodnie z zarządzeniem [25], które mówi, że błędy liczników energii elektrycznej mogą być wyznaczone metodą pomiaru mocy i czasu [8], wartości energii w czasie pomiarów kontrolowano watomierzem i stoperem. Dla liczników klasy 2 wymaga się przy tym, aby wartości błędów maksymalnych podczas pomiarów nie były większe niż: $E_{\max} = +/-0{,}30\%$ przy $dPF = 1$ oraz $E_{max} = +/-0{,}45\%$ przy $dPF = 0{,}5i$ [8]. W czasie pomiarów dokonywano obserwacji kształtu prądu oraz wyników bieżących analiz widma częstotliwościowego prądów i napięć za pomocą przyrządu HARMONALYZER HA-2000 firmy AMPROBE.

Schemat układu pomiarowego dla tej fazy badań przedstawia rysunek 3. Wartość całkowitego błędu pomiaru mocy czynnej licznikami δ obliczono według zależności [20]:

$$\delta = \frac{E_l - E_r}{E_r} 100[\%] \tag{6}$$

gdzie:
δ — błąd całkowity,
E_l — wartość energii wskazanej przez licznik,
E_r — poprawna wartość energii.

Przy czym:

$$E_r = Pt \tag{7}$$

gdzie:
P=const — moc czynna mierzona watomierzem,
t — czas pomiaru.

Względny błąd energii rzeczywistej — traktowanej jako wartość obliczona — po uwzględnieniu klasy użytego watomierza (0,2) i błędu pomiaru czasu (±1s) oceniono na: $E_{rmax} = +/-0{,}25\%$.

Przypadek niekorzystnego dla licznika trójfazowego — ze względu na błędy — warunku pomiaru mocy odbioru jednofazowego (przypadek dość częsty w praktyce) przewidziany jest normą [20]. Norma ta dla liczników wielofazowych klasy 2 przy napięciu symetrycznym i obciążeniu tylko jednej fazy, zmieniającym się w zakresie $I = (0{,}2 \div 1)I_n$ dopuszcza błąd pomiaru energii równy $\delta_{\max} = +/-3\%$. Wskazanej analizie poddano kilka jednakowych liczników kilowatogodzin prądu trójfazowego firmy PAFAL klasy 2: MOD C52, 3x220/380V, 10(40)A, 50Hz, 120obr/kWh. W wyniku badań uzyskano zestawy po 94 wyniki błędu całkowitego δ w funkcji wskazanych wyżej wielkości: I_1, dPF, HR_I, PF. Nie przedstawia się tablicy wyników pomiarów ze względu na jej rozmiar.

W drugiej fazie badań liczniki użyto do pomiaru energii czynnej zużywanej przez sprzęt RTV przyłączony jako odbiornik jednofazowy. Wyznaczono dla tej sytuacji wartość błędu całkowitego energii, który wyniósł $\delta_z = +2{,}6\%$, przy: $I_{rms} = 0{,}61A$, $I_1 = 0{,}44A$, $THD_I = 0{,}96$, $dPF = 0{,}99$, $PF = 0{,}70$. Kształt oraz widmo harmonicznych prądu odbiornika RTV przedstawia rysunek 4.

Tabela 5. Wybrane wyniki estymacji parametrów modelu błędu całkowitego

Wartości estymowanych parametrów (i odchyleń standardowych)				Współczynnik korelacji
A	*B*	*C*	*D*	
0,398	0,111	-0,762	2,3	0,841
(0,577)	(0,411)	(0,219)	(0,361)	

7.2 Analiza wyników pomiarów

Zgodnie z kierunkiem analiz błędów liczników indukcyjnych w obecności wyższych harmonicznych prądu przeprowadzonych w [5], zdecydowano się estymować analityczną postać błędu całkowitego liczników o dwu składnikach:

$$\delta = \delta_p + \delta_d \tag{8}$$

gdzie:
δ_p — błąd podstawowy,
δ_d — błąd dodatkowy.

Zachowano proponowaną przez [5], ogólną formułę błędu podstawowego jako:

$$\delta_p = \frac{A}{I_1} + \frac{B}{dPF} + \frac{C}{I_1 dPF} \tag{9}$$

a błąd dodatkowy od wyższych harmonicznych wyrażono jako:

$$\delta_d = \frac{DTHD_I}{PF} \tag{10}$$

gdzie: *A, B, C, D* — parametry.

Bazę dla modelowania ww. postaci błędu stanowiły 94 zestawy danych wielowymiarowych, otrzymane metodami omówionymi w pierwszej fazie badań.

Estymację parametrów: *A, B, C, D* przeprowadzono wykorzystując algorytmy pakietu STATISTICA poprzez minimalizację funkcjonału:

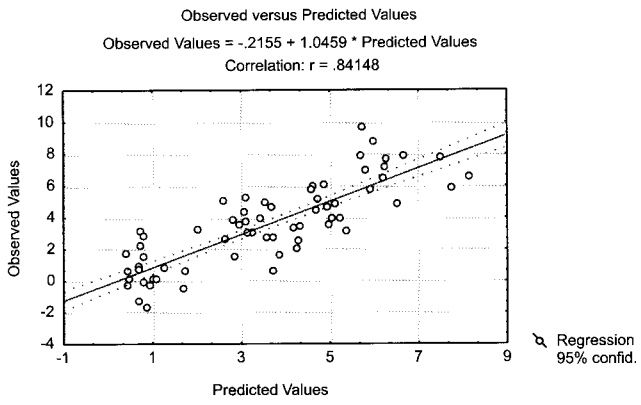
$$F_{\min} = \sum_{i=1}^{94} (\delta - \delta_e)^2 \tag{11}$$

gdzie:
δ — wartość eksperymentalna błędu wyznaczona w pierwszej fazie badań zgodnie z (6),
δ_e — estymowana postać błędu zgodnie z (8), (9), (10).

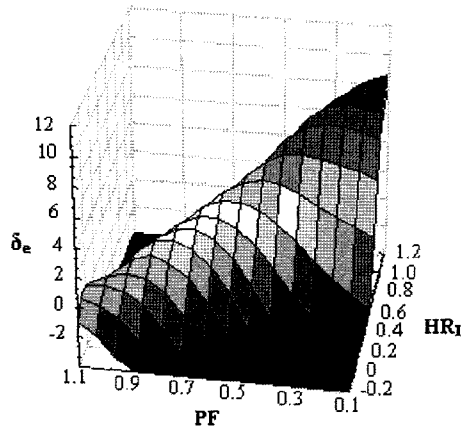
Wybrane wyniki estymacji ww. modelu zestawiono w tabeli 5.

Na rysunkach 5÷6 przedstawiono obszary danych wyjściowych (błędów eksperymentalnych) i błędów estymowanych oraz wizualizację przestrzenną błędu całkowitego badanych liczników, estymowanego metodą najmniejszych kwadratów.

Po uwzględnieniu w (8), (9), (10) wartości estymowanych parametrów według tabeli 5 oraz wielkości pomierzonych w czasie obciążenia odbiornikiem RTV (rys. 4) otrzymuje się odpowiednio:



Rys. 5. Obszar estymacji modelu błędu całkowitego dla trójfazowego licznika indukcyjnego obciążonego jednofazowo



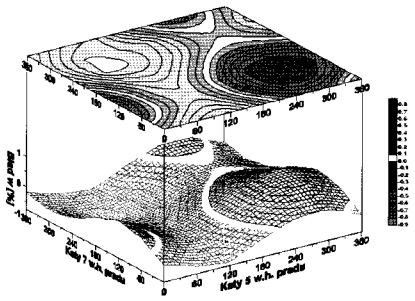
Rys. 6. Estymowana wartość błędu całkowitego wynikającego z wyższych harmonicznych prądu i współczynnika mocy dla trójfazowego licznika indukcyjnego obciążonego jednofazowo

$$\delta_e = \frac{0,398}{0,44} + \frac{0,111}{0,99} - \frac{0,762}{0,44 \cdot 0,99} + \frac{2,3 \cdot 0,96}{0,7} = 2,4\% \tag{12}$$

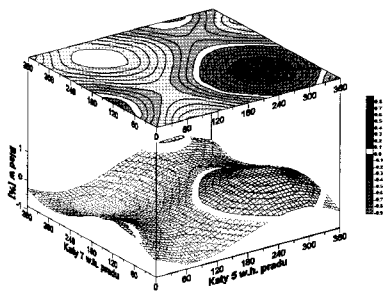
Porównując wyniki pomiarów błędu całkowitego liczników obciążonych odbiornikiem RTV z wartością obliczoną z zależności (12) otrzymujemy błąd estymowany $\delta_e = 2,4\%$, wobec błędu zmierzonego $\delta_z = 2,6\%$, co sugeruje zbieżność otrzymanych wyników.

8. WPŁYW KĄTÓW FAZOWYCH HARMONICZNYCH PRĄDU NA BŁĄD DODATKOWY POMIARU CZYNNEJ ENERGII ELEKTRYCZNEJ JEDNOFAZOWYMI LICZNIKAMI INDUKCYJNYMI PRZY PRZEBIEGACH ODKSZTAŁCONYCH

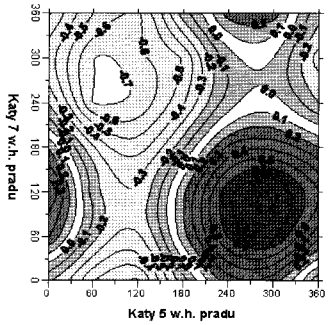
Poniżej przedstawiono analizę wpływu kątów fazowych harmonicznych prądu na znak błędu dodatkowego pomiaru czynnej energii elektrycznej jednofazowymi licznikami indukcyjnymi przy przebiegach odkształconych. Zgodnie z kierunkiem podobnych analiz wpływu kątów fazowych poszczególnych harmonicznych prądu na znak wartości błędu [2, 4, 5, 13], zdecydowano się na pomiary błędów przy zawartości 3, 5, 7 i 9



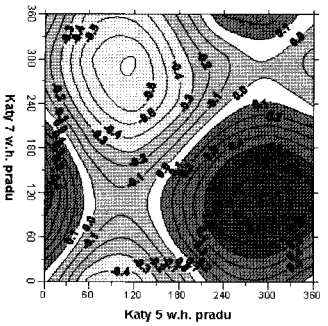
Rys. 7. Zależność błędu dodatkowego jednofazowego licznika indukcyjnego od kątów 5 i 7 harmonicznej prądu przy $PF = 0{,}75$ i kącie 3 harmonicznej prądu $\varphi_{I3} = 0°$, przy którym wystąpił maksymalny błąd dodatni licznika



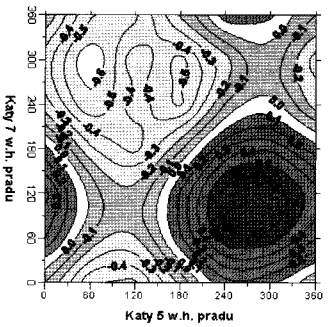
Rys. 8. Zależność błędu dodatkowego jednofazowego licznika indukcyjnego od kątów 5 i 7 harmonicznej prądu przy $PF = 0{,}75$ i kącie 3 harmonicznej prądu $\varphi_{I3} = 240°$, przy którym wystąpił maksymalny błąd ujemny licznika



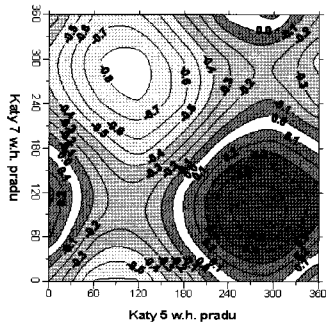
dla kąta 3 harmonicznej prądu φ_{I3}=0°



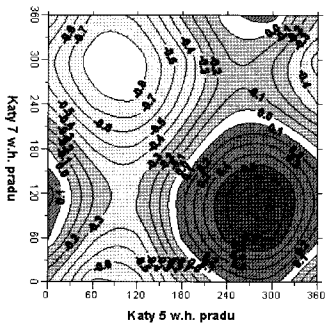
dla kąta 3 harmonicznej prądu φ_{I3}=60



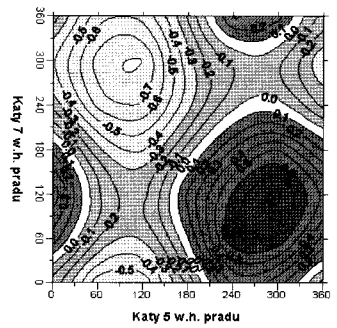
dla kąta 3 harmonicznej prądu φ_{I3}=120



dla kąta 3 harmonicznej prądu φ_{I3}=180



dla kąta 3 harmonicznej prądu φ_{I3}=240



dla kąta 3 harmonicznej prądu φ_{I3}=300

Rys. 9. Zależność błędu dodatkowego jednofazowego licznika indukcyjnego od kątów 5 i 7 harmonicznej prądu przy zmianie kąta 3 harmonicznej prądu w granicach $\varphi_{I3} = 0 \div 360°$ co 60° przy $PF = 0{,}75$

harmonicznej zarówno w napięciu, jak i prądzie. Przedstawiono wizualizację przestrzenną wpływu kątów fazowych 3, 5 i 7 harmonicznej prądu na wartość błędu dodatkowego liczników oraz analizę superpozycji nakładania się błędów spowodowanych poszczególnymi harmonicznymi napięcia i prądu.

8.1. Warunki przeprowadzenia badań

Badania wykonano na stanowisku do badań liczników EMH ENERGIE-MESSTECHNIK-GMBH. Wyposażone jest ono w trójfazowy elektroniczny licznik kontrolny o następujących klasach dokładności: E_{max} = +/–0,05% dla $PF = 1$ oraz E_{max} = +/–0,1% dla $PF = 0{,}5$. Przebadano kilka jednakowych liczników kilowatogodzin prądu jednofazowego firmy PAFAL klasy 2: MOD A5, 220V, 5(25)A, 50Hz, 750obr/kWh. Ze względu na ograniczenie wartości współczynnika udziału wstrzykiwanych harmonicznych $HR_{U(I)} \leq 10\%$, zdecydowano się na zasilenie obwodów napięciowych jednofazowych liczników zniekształconym napięciem o wartości skutecznej $U = 220$V i wartościach nieparzystych harmonicznych zgodnych z [21, 22] tzn.: $HR_{U3} = 5\%$, $HR_{U5} = 5\%$, $HR_{U7} = 5\%$, $HR_{U9} = 1{,}5\%$ oraz przepuszczono przez tor prądowy zniekształcony prąd o wartości skutecznej $I = 5$A i wartościach nieparzystych harmonicznych równych $HR_{I3} = 10\%$, $HR_{I5} = 10\%$, $HR_{I7} = 10\%$, $HR_{I9} = 10\%$. Kąty fazowe poszczególnych harmonicznych prądu zmieniano w zakresie $\varphi_I = 0 \div 360°$ co 60°. Współczynnik mocy odbiornika wynosił $PF = 0{,}75$.

Wstępne wyniki badań pokazały, że wartość błędu dodatkowego licznika zależy w niewielkim stopniu od zmian kąta fazowego 3 i 9 harmonicznej prądu, przy czym najmniej dla 9 harmonicznej, natomiast zmienia się znacznie wraz ze zmianą kątów fazo-

Tabela 6. Wpływ poszczególnych harmonicznych napięcia i prądu na wartość błędu dodatniego

HR_{U3}=5%, HR_{U5}=5%, HR_{U7}=5%, HR_{U9}=1,5% HR_{I3}=10%, HR_{I5}=10%, HR_{I7}=10%, HR_{I9}=10% φ_{U3}=0°, φ_{U5}=0°, φ_{U7}=0°, φ_{U9}=0° φ_{I3}=0°, φ_{I5}=300°, φ_{I7}=120°, φ_{I9}=180°				Błąd licznika [%]
HR_{U3}				0,20
	HR_{U5}			0,74
		HR_{U7}		0,63
			HR_{U9}	0,36
HR_{U3}	HR_{U5}	HR_{U7}	HR_{U9}	1,09
HR_{I3}				0,15
	HR_{I5}			0,41
		HR_{I7}		0,35
			HR_{I9}	0,13
HR_{I3}	HR_{I5}	HR_{I7}	HR_{I9}	1,09

Tabela 7. Wpływ poszczególnych harmonicznych napięcia i prądu na wartość błędu ujemnego

HR_{U3}=5%, HR_{U5}=5%, HR_{U7}=5%, HR_{U9}=1,5% HR_{I3}=10%, HR_{I5}=10%, HR_{I7}=10%, HR_{I9}=10% φ_{U3}=0°, φ_{U5}=0°, φ_{U7}=0°, φ_{U9}=0° φ_{I3}=240°, φ_{I5}=60°, φ_{I7}=300°, φ_{I9}=0°				Błąd licznika [%]
HR_{U3}				-0,22
	HR_{U5}			-0,73
		HR_{U7}		-0,73
			HR_{U9}	-0,43
HR_{U3}	HR_{U5}	HR_{U7}	HR_{U9}	-1,14
HR_{I3}				-0,25
	HR_{I5}			-0,52
		HR_{I7}		-0,48
			HR_{I9}	-0,22
HR_{I3}	HR_{I5}	HR_{I7}	HR_{I9}	-1,14

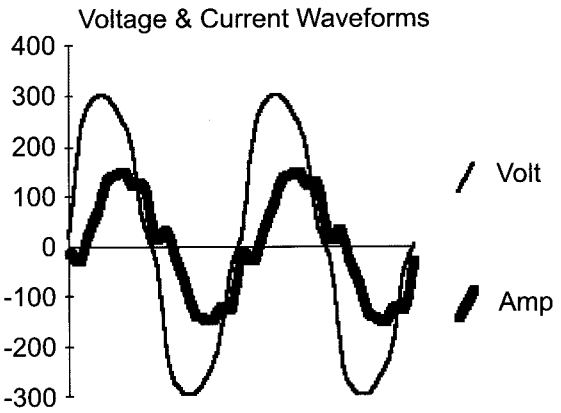
wych 5 i 7 harmonicznej prądu. Zdecydowano się zatem na pomiar wartości błędu dodatkowego w zależności od zmian kąta fazowego 5 i 7 harmonicznej prądu, przy różnych kątach 3 harmonicznej prądu i przy wyłączonej 9 harmonicznej prądu.

8.2. Badanie wpływu kąta fazowego 3, 5 i 7 harmonicznej prądu

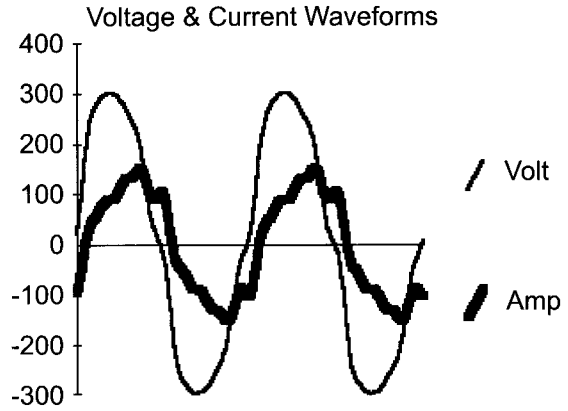
Badania wykonano przy wyłączonej 9 harmonicznej prądu oraz przy kątach fazowych 3, 5, 7 i 9 harmonicznej napięcia równych $\varphi_{U(3,5,7,9)} = 0°$. Maksymalny błąd dodatni $\delta = 0{,}82\%$ wystąpił dla następujących kątów harmonicznych prądu: $\varphi_{I3} = 0°$, $\varphi_{I5} = 300°$, $\varphi_{I7} = 120°$. Maksymalny błąd ujemny $\delta = (-0{,}87)\%$ wystąpił dla następujących kątów harmonicznych prądu: $\varphi_{I3} = 240°$, $\varphi_{I5} = 60°$, $\varphi_{I7} = 300°$. Wizualizację przestrzenną wpływu kątów fazowych 3, 5 i 7 harmonicznej prądu na wartość błędu dodatkowego liczników przedstawiają rysunki 7÷9.

8.3. Analiza superpozycji błędów wynikających z poszczególnych harmonicznych napięcia i prądu

Do przebiegu prądu wprowadzono dodatkowo 9 harmoniczną prądu o wartości $HR_{I9} = 10\%$ i pomiary przeprowadzono powtórnie, zagęszczając charakterystykę w pobliżu kątów, przy których wystąpił maksymalny błąd dodatni i ujemny. Kąty fazowe 3, 5, 7 i 9 harmonicznej napięcia były równe $\varphi_{U(3,5,7,9)} = 0°$.



Rys. 10. Kształt krzywych napięcia i prądu przy niekorzystnych kątach harmonicznych, przy których wystąpił maksymalny błąd dodatni liczników



Rys. 11. Kształt krzywych napięcia i prądu przy niekorzystnych kątach harmonicznych, przy których wystąpił maksymalny błąd ujemny liczników

Maksymalny błąd dodatni $\delta = 1{,}09\%$ wystąpił dla następujących kątów harmonicznych prądu: $\varphi_{I3} = 0°$, $\varphi_{I5} = 300°$, $\varphi_{I7} = 120°$, $\varphi_{I9} = 180°$. Wprowadzenie 9 harmonicznej prądu zwiększyło maksymalny błąd dodatni z $\delta = 0{,}82\%$ do $\delta = 1{,}09\%$. Maksymalny błąd ujemny $\delta = (-1{,}14)\%$ wystąpił dla następujących kątów harmonicznych prądu: $\varphi_{I3} = 240°$, $\varphi_{I5}=60°$, $\varphi_{I7}=300°$, $\varphi_{I9}=0°$. Wprowadzenie 9 harmonicznej prądu zwiększyło maksymalny błąd ujemny z $\delta = (-0{,}87)\%$ do $\delta = (-1{,}14)\%$. Wprowadzenie 9 harmonicznej nie zmieniło niekorzystnych kątów 3, 5, 7 harmonicznej prądu, przy jakich występuje maksymalny błąd dodatni i ujemny.

Przy ustawionych, najbardziej niekorzystnych dla maksymalnego błędu dodatniego i ujemnego, kątach harmonicznych prądu oraz dla kątów wszystkich harmonicznych napięcia równych $\varphi_{U(3,5,7,9)} = 0°$ zbadano wpływ poszczególnych harmonicznych napięcia i prądu na wartość maksymalnego błędu dodatniego i ujemnego. Wyniki analizy przedstawiono w tabelach 6÷7.

Wyniki badań pokazują, że nie można mówić o superpozycji nakładania się błędów, gdyż błąd wynikający z sumy wszystkich harmonicznych występujących jednocześnie jest mniejszy niż suma błędów spowodowanych poszczególnymi harmonicznymi z osobna. Największy wpływ na wartość maksymalnego błędu dodatniego i ujemnego mają 5 i 7 harmo-

niczna napięcia i prądu, dziwi więc fakt konieczności sprawdzania — zgodnie z normą [20] — wpływu tylko 3 harmonicznej prądu na wartość błędu dodatkowego licznika, która to na wartość błędu ma wpływ mniejszy niż 5 i 7 harmoniczna prądu. Norma ta mówi, że przy $THD_U < 1\%$ oraz $HR_{I3} = 10\%$, przy najmniej korzystnej fazie 3 harmonicznej prądu w stosunku do harmonicznej podstawowej, błąd dodatkowy dla licznika indukcyjnego klasy 2 nie powinien być większy niż $\delta_d = 0{,}8\%$. Przy obecnie występujących w sieci zniekształceniach napięcia większych niż $THD_U = 1\%$ wskazane byłoby, zdaniem autora, sprawdzanie wpływu także 5 i 7 harmonicznej prądu na wartość błędu dodatkowego licznika.

Kształt krzywych napięcia i prądu dla powyższych przypadków przedstawiają rysunki 10÷11.

9. WNIOSKI

— Powyższe wyniki pomiarów i analiz wykazują, że błędy podstawowy i dodatkowy trójfazowych liczników indukcyjnych obciążonych jednofazowo dają się opisać analitycznie. Jednoznaczny jest charakter błędu dodatkowego. Rośnie on w miarę wzrostu zawartości harmonicznych i zmniejszania się wartości współczynnika mocy.

— Błąd dodatkowy pomiaru energii elektrycznej za pomocą jednofazowego licznika indukcyjnego może mieć zarówno wartości dodatnie, jak i ujemne i zależy od kątów fazowych poszczególnych harmonicznych prądu.

— Największe błędy dodatkowe pomiaru energii za pomocą jednofazowych liczników indukcyjnych powstają w obecności 5 i 7 harmonicznej prądu.

— Fizyczne zjawiska powodowane przez odkształcone napięcia i prądy nie są sumarycznymi zjawiskami wywołanymi przez wszystkie harmoniczne, na które takie odkształcone przebiegi są rozkładane. Błąd dodatkowy pomiaru energii elektrycznej za pomocą tradycyjnych jednofazowych liczników indukcyjnych przy jednoczesnym występowaniu różnych harmonicznych nie jest równy sumie błędów spowodowanych każdą harmoniczną z osobna.

10. LITERATURA

1. Arseneau R., Filipski P.: *Effects of harmonics on watthour and demand meters*. Canadian Electrical Association Meeting, Calgary, October 27–30, 1985.
2. Baghzouz Y., Tan O.T.: *Harmonic analysis of induction watthour meter performance*. IEEE Trans. Power Appar. Syst., 1985, PAS-104, 2, 399–406.
3. Borowiak W., Chmielewski W., Domina W.: *Harmoniczne i co dalej?* Pod Prądem, wrzesień 1997, s. 9–12.
4. Cox M. D., Williams T. B.: *Induction varhour and solid-state varhour meters performances on nonlinear loads*. IEEE Trans. Power Del., 1990, 5, 4, 1678–1686.
5. Dacko G.: *Wpływ zniekształceń prądu i napięcia sieci na dokładność pomiaru energii licznikami indukcyjnymi*. Energet., 1980, 7, 263–268.
6. Domijan A., Embriz-Santander E., Gilani A., Lamer G., Stiles C., Williams C.W.: *Watthour meter accuracy under controlled unbalanced harmonic voltage and current conditions*. IEEE Trans. Power Del., 1996, 11, 1, 64–72.
7. Filipski P.S., Arseneau R.: *Behavior of wattmeters and watthourmeters under distorted waveform conditions*. IEEE Publications. New York, NY, 1990, 13–22.
8. Fiut J.: *Nowe rozwiązania aparatury i systemów do badań liczników energii elektrycznej*. VIII Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Aktualne problemy w elektroenergetyce". 11–13 czerwca 1997, Gdańsk, Jurata, s. 203–213.
9. Fuchs E.F., Roesler D.J., Kovacs K.P.: *Sensitivity of electrical appliances to harmonics and fractional harmonics of the power system's voltage. Part II: television sets, induction watthour meters and universal machines*. IEEE Trans. Power Del., 1987, PWRD-2, 2, 445–453.
10. Kowalski Z.: *Cechy i parametry jakościowe energii elektrycznej*. JUEE, 1995, 1, 1, 7–16.
11. Kuśmierek Z.: *Pomiar energii elektrycznej w warunkach odkształcenia napięcia i prądu*. IV Szkoła – Konferencja "Elektrotechnika prądy niesinusoidalne". 1998, Zielona Góra, s. 236–247.
12. Kuśmierek Z.: *Pomiary mocy i energii w układach elektroenergetycznych*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1994.
13. Makram E.B., Wright C.L., Girgis A.A.: *A harmonic analysis of the induction watthour meter's registration error*. IEEE Trans. Power Del., 1992, 7, 3, 1080–1087.
14. Marszałkiewicz K.: *Ocena odkształceń napięcia i prądu wywołanych pracą oświetlenia ulicznego i zagrożeń z tego wynikających*. Seminarium CIRED „Jakość energii elektrycznej". Poznań, 29 kwietnia 1997 r.
15. Mielczarski W., Anders G.J., Colon M.F., Lawrance W.B., Khalsa H., Michalik G.: *Quality of electricity supply & management of network losses*. Published by Optimal Energy Solutions, Melbourne 1997.
16. Pietrucha R., Siwik A.: *Errors of electric energy measurement with three-phase meters in the presence of the current higher harmonics*. 4th International Conference "Electrical Power Quality and Utilisation". September 23th-25th, 1997, Cracow, Poland, pp. 277–284.
17. Pietrucha R.: *An effect of current harmonic phase angles on an additional error of electric active energy measurement made with single-phase induction meters at the presence of distorted waveform*. International Scientific Conference "Electric Power Engineering 2000". September 27th-29th, 2000, Visalaje, Czech Republic, pp. 18–27.
18. Pietrucha R.: *Ocena zagrożeń w instalacjach niskiego napięcia w obecności wyższych harmonicznych pochodzących od odbiorników nieliniowych*. IV Konferencja Naukowo-Techniczna „Jakość energii elektrycznej i wyrobów elektrotechnicznych". 27–30 kwietnia 1998, Świnoujście, s. 88–96.
19. Pietrucha R.: *Wpływ kątów fazowych harmonicznych prądu na błąd dodatkowy pomiaru czynnej energii elektrycznej jednofazowymi licznikami indukcyjnymi przy przebiegach odkształconych*. V Konferencja Naukowo-Techniczna „Jakość energii elektrycznej i wyrobów elektrotechnicznych". 27 kwietnia–1 maja 1999, Piechowice–Praga, s. 37–44.
20. PN-93/E-06504: *Liczniki energii elektrycznej. Liczniki indukcyjne energii czynnej prądu przemiennego klasy: 0,5, 1 i 2.*
21. PN-EN 50160: *Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych.*
22. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 25 września 2000 r. (Dz. U. z dnia 13 października 2000 r.).
23. Siwik A.: *Energooszczędne lampy wyładowcze jako źródła zakłóceń w sieciach niskich napięć*. JUEE, 1996, 2, 2, 3–8.
24. Zalas J.: *Zagadnienie pomiaru energii odbiorników tyrystorowych licznikiem indukcyjnym*. Praca doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Instytut Maszyn i Sterowania Układów Elektroenergetycznych, Kraków 1978.
25. Zarządzenie nr 4 Prezesa Głównego Urzędu Miar w sprawie wprowadzenia przepisów metrologicznych o użytkowych licznikach energii elektrycznej prądu przemiennego z dnia 07.02.1995 r. [8].

Mgr inż. Robert Pietrucha

Studia wyższe ukończył w roku 1996 na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Aktualnie pracuje jako asystent w Katedrze Elektroenergetyki AGH. Zajmuje się jakością energii elektrycznej.

Adres do korespondencji:
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
Tel: (+12) 617-37-73, Fax: (+12) 634-57-21
E-mail: mandaryn@uci.agh.edu.pl