Andrzej OLENCKI

Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Elektrycznej

POMIAR STRAT NIETECHNICZNYCH ENERGII ELEKTRYCZNEJ Z WYKORZYSTANIEM NOWOCZESNYCH TECHNIK DIAGNOSTYCZNYCH

Streszczenie. *Opisano problemy związane z pomiarem strat nietechnicznych energii elektrycznej związanych z niekontrolowanymi, przez układy pomiarowo-rozliczeniowe, przepływami energii. Przedstawiono aspekty teorii o prostopadłościanie mocy z uwzględnieniem mocy odkształcenia i dystorsji oraz o roboczej i odbitej mocy czynnej odbitej jako podstawy pomiaru strat. Zaproponowano wykorzystanie funkcji: pomiaru widma mocy, pomiaru odbitej mocy czynnej, pomiaru mocy dystorsji i odkształcenia, licznika kontrolnego roboczej mocy czynnej oraz prostopadłościanu energii, zaimplementowanych w krajowych testerach liczników energii dla potrzeb pomiaru strat nietechnicznych. Nowe możliwości pomiarowe mogą być wykorzystane do wyznaczania miejsc powstawania strat i różnic bilansowych oraz do ograniczania strat energii w dystrybucji. Rozważania teoretyczne poparte zostały przykładami wyników badań rzeczywistych obiektów elektroenergetycznych.*

Measuring Nontechnical Power Loss Using Modern Diagnostic Techniques

Słowa kluczowe: nietechniczne straty energii, odbita moc czynna, robocza moc czynna, moc czynna harmonicznych, pomiary, harmoniczne.
Keywords: nontechnical losses, reflected active power, working active power, harmonic active power, measurement, harmonic.

Wprowadzenie

Straty energii elektrycznej w krajowym systemie elektroenergetycznym są reprezentowane przez wskaźnik strat i różnic bilansowych wyrażony następującym wzorem:

$$\Delta E_{\%} = \frac{\Delta E}{E_{wp}} \cdot 100 \tag{1}$$

gdzie:
ΔE - straty i różnice bilansowe w sieci,
E_{wp} energia elektryczna wprowadzona do sieci.

W ostatnich latach wartość wskaźnika $\Delta E_{\%}$ ma tendencję lekko malejącą i utrzymuje się na poziomie około 1,5% w sieci WN, 3,0% w sieci SN i 5,7% w sieci nn [1], co oznacza, że istotne rezerwy w zakresie poprawy efektywności energetycznej są w ograniczaniu strat szczególnie w sieciach nn.

Różnica bilansowa RB Operatora Systemu Dystrybucyjnego OSD, jako różnica między energią wprowadzoną do sieci OSD a energią oddaną z sieci OSD wynika ze strat:
- technicznych związanych z przepływem energii przez sieć,
- nietechnicznych związanych z błędnymi wynikami pomiaru (błędy systemów pomiarowych i bilingowych, błędy pomiarowe, niedokładność i błędy odczytów) i nielegalnym poborem energii elektrycznej.

Przy rozważaniu strat nietechnicznych związanych z błędnymi wynikami pomiaru należy mieć na uwadze maksymę Menadżera Energii [2]:
- nie możesz zarządzać czymś, czego nie mierzysz,
- jeżeli czegoś nie mierzysz, nie możesz tego ulepszyć.

Niesinusoidalne prądy i napięcia w sieciach elektroenergetycznych powodują różne problemy, w tym straty nietechniczne energii elektrycznej [3,4]. Straty te, w odróżnieniu od strat wynikających z nielegalnego poboru energii elektrycznej, wynikają z niedoskonałości stosowanego sprzętu pomiarowego.

Prostopadłościan mocy i teoria mocy odbitej jako podstawa pomiaru strat

W analizie nietechnicznych strat energii można wykorzystać pojęcia mocy odkształcenia (deformacji) *H* i dystorsji *D*, które występują w równaniu mocy pozornej *S* następującej postaci [5]:

$$S^2 = U^2 \cdot I^2 = S_1^2 + H^2 = P_1^2 + Q_1^2 + H^2 = P_1^2 + D^2 \tag{2}$$

gdzie:
S_1 - moc pozorna pierwszej harmonicznej,
P_1 moc czynna pierwszej harmonicznej,
Q_1 moc bierna pierwszej harmonicznej.

Moc odkształcenia dana jest wzorem:

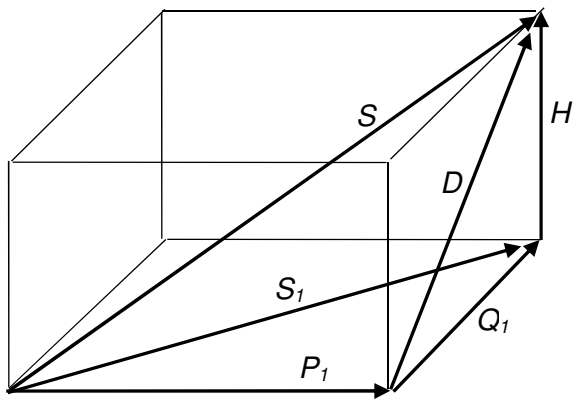
$$H = \sqrt{U^2 \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \tag{3}$$

gdzie:
n - rząd harmonicznej,
I_n - wartość skuteczna n-tej harmonicznej prądu.

Moc dystorsji dana jest wzorem:

$$D = \sqrt{Q_1^2 + H^2} \tag{4}$$

Graficzną reprezentację zdefiniowanych mocy przedstawia prostopadłościan mocy pokazany na rysunku 1.



Rys.1. Prostopadłościan mocy

W analizie nietechnicznych strat energii można również wykorzystać koncepcję roboczej mocy czynnej oraz energii roboczej zaproponowanej przez prof. Czarneckiego w [6], w której wyróżniono trzy składniki mocy czynnej: roboczą moc czynną, odbitą moc czynną i szkodliwą moc czynną. Moc czynna P dana jest wzorem

$$P = P_1 + \sum_{n=2}^{\infty} P_n = P_1 + P_h \tag{5}$$

gdzie P_n są harmonicznymi mocy a P_h jest sumą harmonicznych mocy. W przypadku odbiorników nieliniowych moc P_h ma ujemną wartość, jest mocą przepływu energii od odbiornika do źródła i z tego powodu została nazwana odbitą mocą czynną (reflected active power) P_r:

$$P_r = -P_h \tag{6}$$

Moc czynna pierwszej harmonicznej P_1 została nazwana roboczą mocą czynną (working active power) i oznaczona jako P_w , stąd moc czynna odbiornika nieliniowego dana jest wzorem:

$$P = P_w - P_r \tag{7}$$

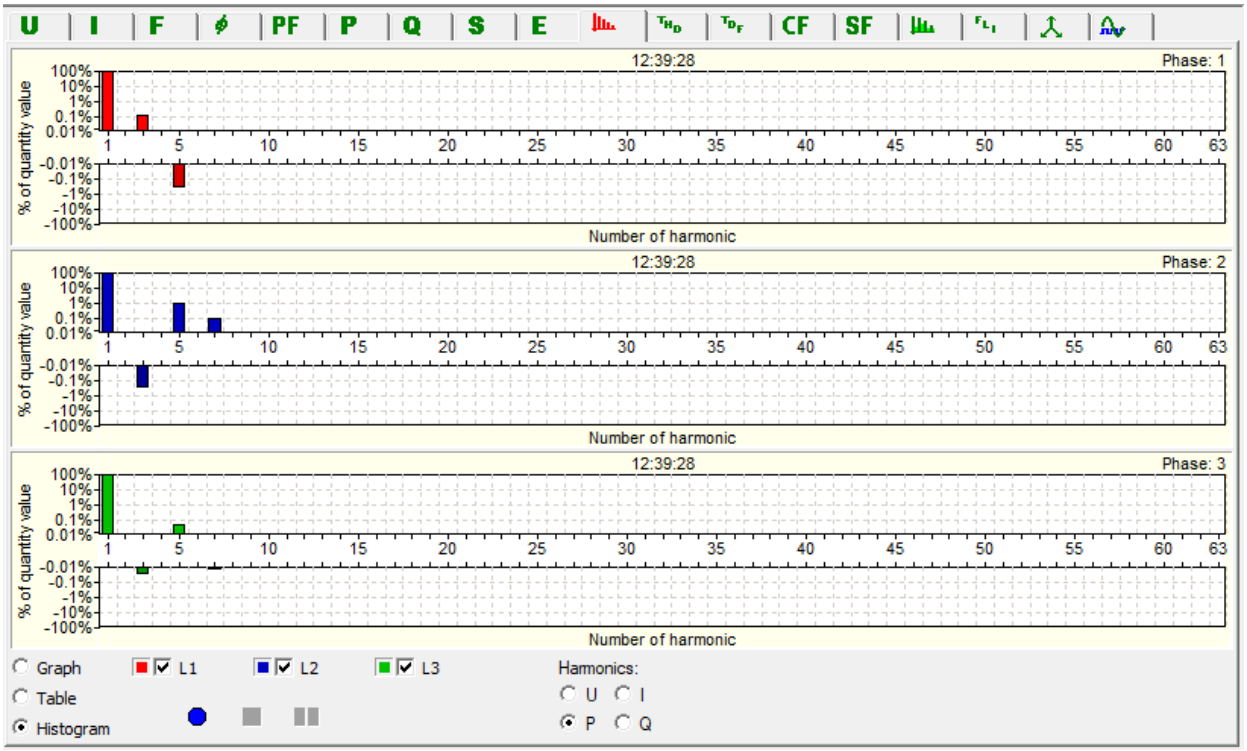
Teoria odbitej mocy czynnej została potwierdzona eksperymentalnie. W badaniach laboratoryjnych rzeczywistych obciążeń podłączanych do wymuszalnika wykazano [7], że procentowy udział odbitej mocy czynnej wyrażony wzorem:

$$n/a = \frac{P_r}{P} \times 100\% = \frac{P_1 - P}{P} \times 100\% \tag{8}$$

stanowi do kilku procent mocy czynnej. Natomiast w badaniach mocy pobieranej przez obrabiarkę CNC wykazano [8], że harmoniczne mocy posiadają wartość ujemną, co potwierdza poprawność równania (6).

Funkcja pomiaru widma mocy

Funkcja pomiaru widma mocy polega na pomiarze pierwszej harmonicznej mocy P_1 i składowych harmonicznych P_n z wizualizacją w postaci histogramu lub tablicy. Rysunek 2 przedstawia przykładowy histogram harmonicznych mocy czynnej rzeczywistego laboratorium pomiarowego zasilanego z sieci trójfazowej. Harmoniczne ze znakiem dodatnim są dostarczane przez dostawcę, natomiast harmoniczne ze znakiem ujemnym stanowią odbitą moc czynną.



Rys.2. Histogram harmonicznych mocy czynnej laboratorium pomiarowego

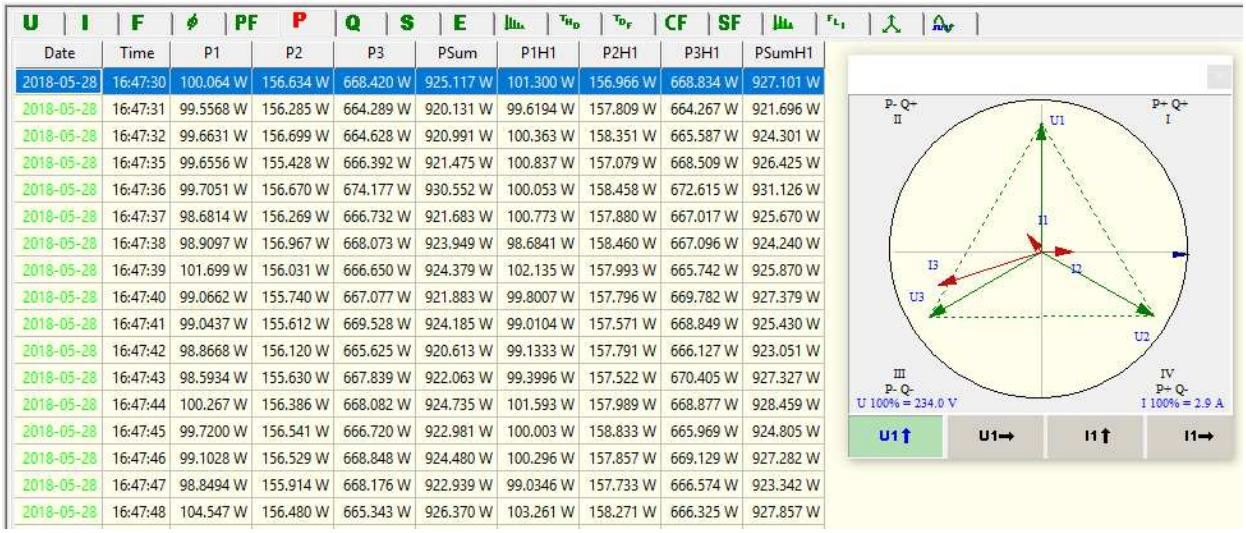
Histogram harmonicznych mocy jest dobrym narzędziem do szybkiej orientacyjnej oceny różnicy bilansowej w przyłączu z podziałem na fazy i harmoniczne. Z przykładowego rysunku 2 widać, że w fazie L1 odbita moc czynna zawarta w 5-tej harmonicznej jest większa niż moc czynna 3-ciej harmonicznej dostarczanej przez OSD. Ponieważ liczniki energii czynnej mierzą moc zgodnie ze wzorem (5), w fazie L1 następuje zaniżanie wskazań licznika. Odwrotna sytuacja występuje w fazie L2.

Nowoczesne testery układów pomiarowo-rozliczeniowych mają zaimplementowaną funkcję pomiaru widma mocy czynnej i biernej właśnie dla potrzeb badania kierunków przepływu energii. Funkcjonalność tą posiadał już tester Calport 100, którego możliwości w tym zakresie były prezentowane w 2001 roku na konferencji „Diagnostyka w sieciach elektroenergetycznych zakładów przemysłowych" [9]. Histogram prezentowany na rysunku 2 pochodzi z najnowszego krajowego testera TE30 [10] .

Funkcja pomiaru odbitej mocy czynnej

Funkcja pomiaru odbitej mocy czynnej polega na pomiarze mocy czynnej P i mocy czynnej pierwszej harmonicznej P_1 , aby ze wzoru (5) wyliczyć sumę harmonicznych mocy P_h która wg wzoru (7) stanowi odbitą moc czynną. Rysunek 3 przedstawia przykładową tablicę mocy czynnych i mocy czynnych pierwszych harmonicznych laboratorium pomiarowego zasilanego z sieci trójfazowej, gdzie P1, P2, P3 i PSum oznaczają odpowiednio moce czynne faz L1, L2, L3 oraz ich sumę, natomiast P1H1, P2H1, P3H1 i PSumH1 oznaczają moce czynne pierwszych harmonicznych faz L1, L2, L3 oraz ich sumę.

Dla zaznaczonego na rysunku 3 wiersza z godziny 16:47:30 procentowy udział odbitej mocy czynnej, wyliczony ze wzoru (8), wynosi +1,23% dla fazy L1, +0,21% dla fazy L2, +0,06% dla fazy L3 i +0,21% dla sumy faz L123. Tablica pomiaru odbitej mocy jest dobrym narzędziem do bieżącej oceny udziału odbitej mocy czynnej w poszczególnych fazach.



Date	Time	P1	P2	P3	PSum	P1H1	P2H1	P3H1	PSumH1
2018-05-28	16:47:30	100.064 W	156.634 W	668.420 W	925.117 W	101.300 W	156.966 W	668.834 W	927.101 W
2018-05-28	16:47:31	99.5568 W	156.285 W	664.289 W	920.131 W	99.6194 W	157.809 W	664.267 W	921.696 W
2018-05-28	16:47:32	99.6631 W	156.699 W	664.628 W	920.991 W	100.363 W	158.351 W	665.587 W	924.301 W
2018-05-28	16:47:35	99.6556 W	155.428 W	666.392 W	921.475 W	100.837 W	157.079 W	668.509 W	926.425 W
2018-05-28	16:47:36	99.7051 W	156.670 W	674.177 W	930.552 W	100.053 W	158.458 W	672.615 W	931.126 W
2018-05-28	16:47:37	98.6814 W	156.269 W	666.732 W	921.683 W	100.773 W	157.880 W	667.017 W	925.670 W
2018-05-28	16:47:38	98.9097 W	156.967 W	668.073 W	923.949 W	98.6841 W	158.460 W	667.096 W	924.240 W
2018-05-28	16:47:39	101.699 W	156.031 W	666.650 W	924.379 W	102.135 W	157.993 W	665.742 W	925.870 W
2018-05-28	16:47:40	99.0662 W	155.740 W	667.077 W	921.883 W	99.8007 W	157.796 W	669.782 W	927.379 W
2018-05-28	16:47:41	99.0437 W	155.612 W	669.528 W	924.185 W	99.0104 W	157.571 W	668.849 W	925.430 W
2018-05-28	16:47:42	98.8668 W	156.120 W	665.625 W	920.613 W	99.1333 W	157.791 W	666.127 W	923.051 W
2018-05-28	16:47:43	98.5934 W	155.630 W	667.839 W	922.063 W	99.3996 W	157.522 W	670.405 W	927.327 W
2018-05-28	16:47:44	100.267 W	156.386 W	668.082 W	924.735 W	101.593 W	157.989 W	668.877 W	928.459 W
2018-05-28	16:47:45	99.7200 W	156.541 W	666.720 W	922.981 W	100.003 W	158.833 W	665.969 W	924.805 W
2018-05-28	16:47:46	99.1028 W	156.529 W	668.848 W	924.480 W	100.296 W	157.857 W	669.129 W	927.282 W
2018-05-28	16:47:47	98.8494 W	155.914 W	668.176 W	922.939 W	99.0346 W	157.733 W	666.574 W	923.342 W
2018-05-28	16:47:48	104.547 W	156.480 W	665.343 W	926.370 W	103.261 W	158.271 W	666.325 W	927.857 W

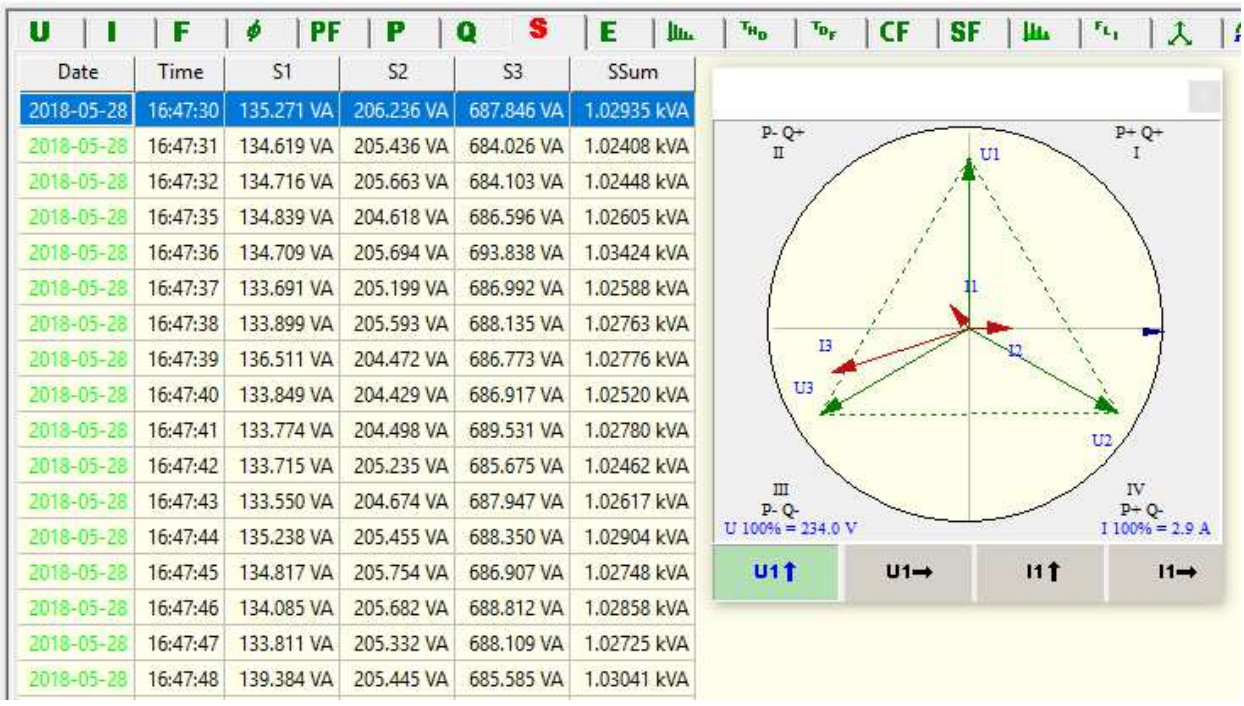
Rys.3. Tablica mocy czynnych i mocy czynnych pierwszej harmonicznej

Funkcja pomiaru mocy dystorsji i mocy odkształcenia

Funkcja pomiaru mocy dystorsji *D* polega na pomiarze mocy pozornej *S* i mocy czynnej pierwszej harmonicznej P_1 zgodnie z następującym wzorem:

$$D = \sqrt{S^2 - P_1^2} \tag{9}$$

który wynika z przekształcenia wzoru (2). W tym celu wymagana jest dodatkowo informacja o bieżących wartościach mocy pozornej, co przedstawiono w tablicy na rysunku 4.



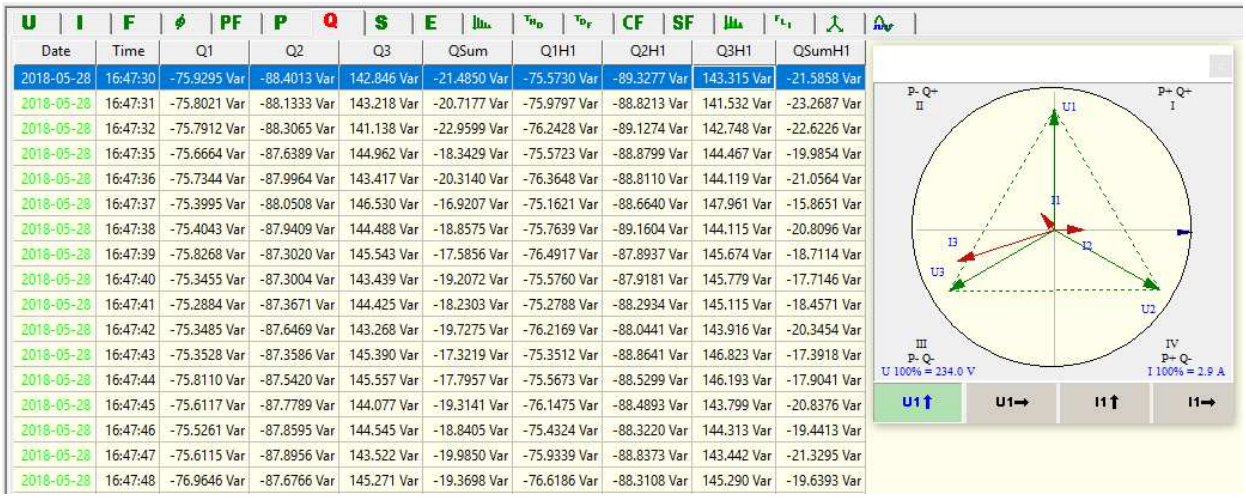
Date	Time	S1	S2	S3	SSum
2018-05-28	16:47:30	135.271 VA	206.236 VA	687.846 VA	1.02935 kVA
2018-05-28	16:47:31	134.619 VA	205.436 VA	684.026 VA	1.02408 kVA
2018-05-28	16:47:32	134.716 VA	205.663 VA	684.103 VA	1.02448 kVA
2018-05-28	16:47:35	134.839 VA	204.618 VA	686.596 VA	1.02605 kVA
2018-05-28	16:47:36	134.709 VA	205.694 VA	693.838 VA	1.03424 kVA
2018-05-28	16:47:37	133.691 VA	205.199 VA	686.992 VA	1.02588 kVA
2018-05-28	16:47:38	133.899 VA	205.593 VA	688.135 VA	1.02763 kVA
2018-05-28	16:47:39	136.511 VA	204.472 VA	686.773 VA	1.02776 kVA
2018-05-28	16:47:40	133.849 VA	204.429 VA	686.917 VA	1.02520 kVA
2018-05-28	16:47:41	133.774 VA	204.498 VA	689.531 VA	1.02780 kVA
2018-05-28	16:47:42	133.715 VA	205.235 VA	685.675 VA	1.02462 kVA
2018-05-28	16:47:43	133.550 VA	204.674 VA	687.947 VA	1.02617 kVA
2018-05-28	16:47:44	135.238 VA	205.455 VA	688.350 VA	1.02904 kVA
2018-05-28	16:47:45	134.817 VA	205.754 VA	686.907 VA	1.02748 kVA
2018-05-28	16:47:46	134.085 VA	205.682 VA	688.812 VA	1.02858 kVA
2018-05-28	16:47:47	133.811 VA	205.332 VA	688.109 VA	1.02725 kVA
2018-05-28	16:47:48	139.384 VA	205.445 VA	685.585 VA	1.03041 kVA

Rys.4. Tablica mocy pozornych

Funkcja pomiaru mocy odkształcenia *H* polega na pomiarze mocy pozornej *S* oraz mocy czynnej pierwszej harmonicznej P_1 i mocy biernej pierwszej harmonicznej Q_1 zgodnie z następującym wzorem:

$$H = \sqrt{S^2 - P_1^2 - Q_1^2} \tag{10}$$

który wynika z przekształcenia wzoru (2). W tym celu wymagana jest dodatkowo informacja o bieżących wartościach mocy biernej pierwszej harmonicznej, co przedstawiono w tablicy na rysunku 5.



Date	Time	Q1	Q2	Q3	QSum	Q1H1	Q2H1	Q3H1	QSumH1
2018-05-28	16:47:30	-75.9295 Var	-88.4013 Var	142.846 Var	-21.4850 Var	-75.5730 Var	-89.3277 Var	143.315 Var	-21.5858 Var
2018-05-28	16:47:31	-75.8021 Var	-88.1333 Var	143.218 Var	-20.7177 Var	-75.9797 Var	-88.8213 Var	141.532 Var	-23.2687 Var
2018-05-28	16:47:32	-75.7912 Var	-88.3065 Var	141.138 Var	-22.9599 Var	-76.2428 Var	-89.1274 Var	142.748 Var	-22.6226 Var
2018-05-28	16:47:35	-75.6664 Var	-87.6389 Var	144.962 Var	-18.3429 Var	-75.5723 Var	-88.8799 Var	144.467 Var	-19.9854 Var
2018-05-28	16:47:36	-75.7344 Var	-87.9964 Var	143.417 Var	-20.3140 Var	-76.3648 Var	-88.8110 Var	144.119 Var	-21.0564 Var
2018-05-28	16:47:37	-75.3995 Var	-88.0508 Var	146.530 Var	-16.9207 Var	-75.1621 Var	-88.6640 Var	147.961 Var	-15.8651 Var
2018-05-28	16:47:38	-75.4043 Var	-87.9409 Var	144.488 Var	-18.8575 Var	-75.7639 Var	-89.1604 Var	144.115 Var	-20.8096 Var
2018-05-28	16:47:39	-75.8268 Var	-87.3020 Var	145.543 Var	-17.5856 Var	-76.4917 Var	-87.8937 Var	145.674 Var	-18.7114 Var
2018-05-28	16:47:40	-75.3455 Var	-87.3004 Var	143.439 Var	-19.2072 Var	-75.5760 Var	-87.9181 Var	145.779 Var	-17.7146 Var
2018-05-28	16:47:41	-75.2884 Var	-87.3671 Var	144.425 Var	-18.2303 Var	-75.2788 Var	-88.2934 Var	145.115 Var	-18.4571 Var
2018-05-28	16:47:42	-75.3485 Var	-87.6469 Var	143.268 Var	-19.7275 Var	-76.2169 Var	-88.0441 Var	143.916 Var	-20.3454 Var
2018-05-28	16:47:43	-75.3528 Var	-87.3586 Var	145.390 Var	-17.3219 Var	-75.3512 Var	-88.8641 Var	146.823 Var	-17.3918 Var
2018-05-28	16:47:44	-75.8110 Var	-87.5420 Var	145.557 Var	-17.7957 Var	-75.5673 Var	-88.5299 Var	146.193 Var	-17.9041 Var
2018-05-28	16:47:45	-75.6117 Var	-87.7789 Var	144.077 Var	-19.3141 Var	-76.1475 Var	-88.4893 Var	143.799 Var	-20.8376 Var
2018-05-28	16:47:46	-75.5261 Var	-87.8595 Var	144.545 Var	-18.8405 Var	-75.4324 Var	-88.3220 Var	144.313 Var	-19.4413 Var
2018-05-28	16:47:47	-75.6115 Var	-87.8956 Var	143.522 Var	-19.9850 Var	-75.9339 Var	-88.8373 Var	143.442 Var	-21.3295 Var
2018-05-28	16:47:48	-76.9646 Var	-87.6766 Var	145.271 Var	-19.3698 Var	-76.6186 Var	-88.3108 Var	145.290 Var	-19.6393 Var

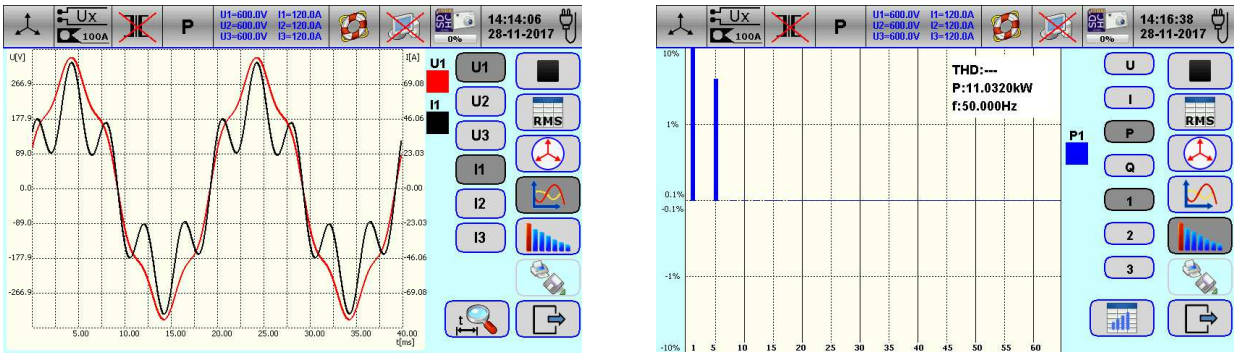
Rys.5. Tablica mocy biernych i mocy biernych pierwszej harmonicznej

Funkcja licznika kontrolnego roboczej mocy czynnej

Liczniki energii biernej mierzą już moc bierną i energię bierną ze składowych prądów i napięć o częstotliwości podstawowej wg normy PN-EN 62053-24 [11]. Natomiast liczniki energii czynnej, dotychczas, mierzą moc czynną i energię czynną wszystkich harmonicznych wg normy PN-EN 50470-3 [12]. W normie tej są wyspecyfikowane następujące warunki badań błędu dodatkowego spowodowanego obecnością harmonicznych w napięciu i prądzie:

- zawartość 5-tej harmonicznej w napięciu równa 10% i w prądzie równa 40%,
- współczynnik mocy pierwszych harmonicznych równy plus 1, co odpowiada kątowi 0°,
- pierwsza harmoniczna napięcia i 5-ta harmoniczna napięcia są w fazie,
- współczynnik mocy 5-tych harmonicznych jest równy plus 1, co odpowiada kątowi 0°.

Ilustrację graficzną tych wymagań przedstawia rysunek 6 w postaci zrzutów ekranów oscyloskopowego napięcia i prądu oraz histogramu widma mocy czynnej zarejestrowanych za pomocą testera TE30 współpracującego z kalibratorem C300B [13] jako źródło sygnałów.

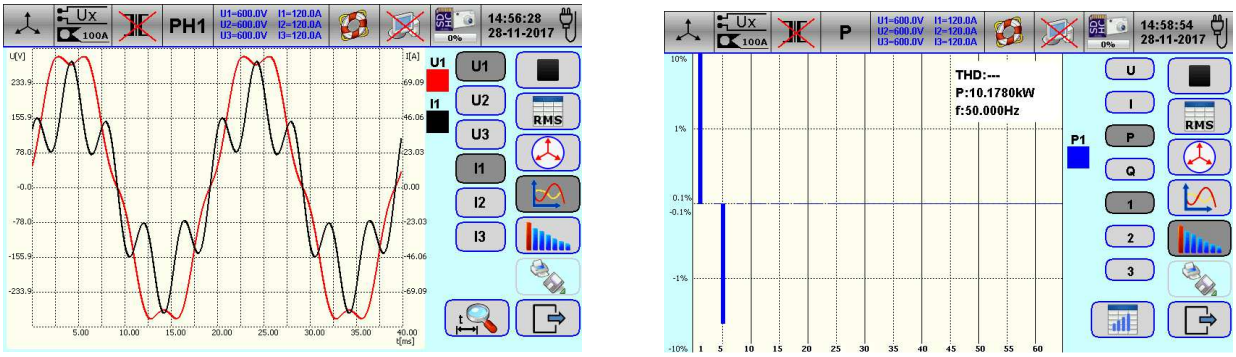


Rys.6. Oscylogram napięcia i prądu oraz widmo mocy czynnej wg wymagań normy [12]

Warunki badań na obecność harmonicznych opisane w normie [12] należy uznać za niereprezentatywne dla rzeczywistych warunków występujących w sieciach energetycznych z nieliniowymi obciążeniami. W szczycie poboru prądu obciążenia kształt napięcia powinien być wypłaszczany a nie podbity w górę, jak na oscylogramie rysunku 6. Zgodnie z teorią roboczej

mocy czynnej [6], moc harmonicznych odbiorników nieliniowych ma ujemną wartość, a zatem słupek 5-tej harmonicznej mocy prezentowany na rysunku 6 powinien być w dół, a nie w górę od linii zerowej. Dlatego do dalszych badań błędu dodatkowego licznika spowodowanego obecnością harmonicznych w napięciu i prądzie urealniono wymagania normy [12] do następujących:
- zawartość 5-tej harmonicznej w napięciu równa 10% i w prądzie równa 40%,
- współczynnik mocy pierwszych harmonicznych równy plus 1, co odpowiada kątowi 0°,
- pierwsza harmoniczna napięcia i 5-ta harmoniczna napięcia są w przeciwfazie,
- współczynnik mocy 5-tych harmonicznych jest równy minus1, co odpowiada kątowi równe 180°.

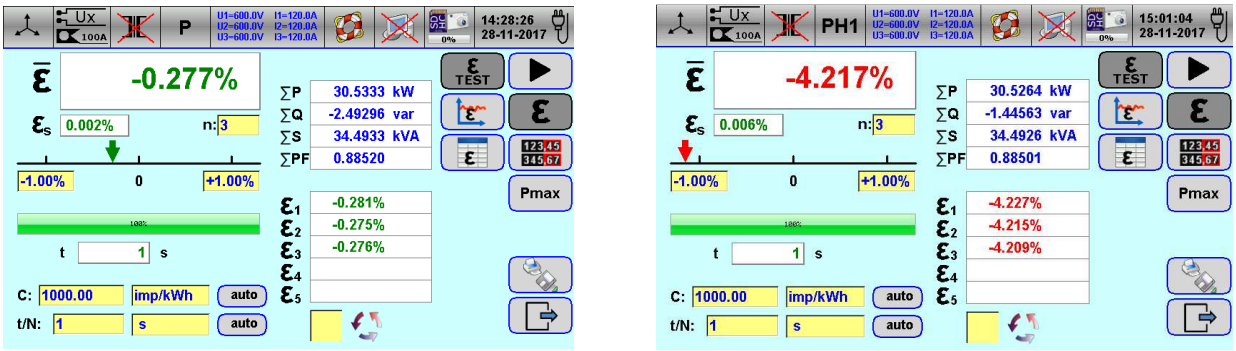
Ilustrację graficzną urealnionych wymagań przedstawia rysunek 7 z wypłaszczonym w szczycie kształtem napięcia i ujemnym słupkiem mocy harmonicznej.



Rys.7. Oscylogram napięcia i prądu oraz widmo mocy czynnej zgodne z teorią mocy [6]

W warunkach obecności harmonicznych prezentowanych na rysunku 7 wykonano badanie błędu licznika użytkowego z zastosowaniem licznika kontrolnego pracującego w następujących trybach:
- pomiaru mocy czynnej wszystkich harmonicznych oznaczonej jako P,
- pomiaru mocy pierwszej harmonicznej – roboczej mocy czynnej oznaczonej jako PH1.

Jeżeli licznik kontrolny mierzy moc czynną wszystkich harmonicznych, błąd licznika użytkowego wynosi -0,227% i mieści się w klasie dokładności (rysunek 8). Jeżeli licznik kontrolny mierzy roboczą moc czynną, błąd licznika użytkowego wynosi -4,217%. Ten ujemy wynik oznacza, że robocza moc czynna przepływająca przez licznik jest o około 4% większa niż moc czynna odbiornika nieliniowego. Różnica obu wyników pomiaru błędu nie jest uwzględniania w systemach rozliczeniowych, stanowi stratę dla dostawcy i bonus dla nieliniowego odbiorcy.



Rys.8. Wyniki pomiaru błędu licznika przy pomiarze mocy P (lewy) i PH1 (prawy)

Funkcja pomiaru prostopadłościanu energii

Na rysunku 9 przedstawiono tablicę z wynikami pomiaru następujących składników energii: energii czynnej, biernej i pozornej faz L1, L2, L3 i ich sumy oraz pierwszych harmonicznych energii czynnej i biernej faz L1, L2, L3 i ich sumy. Jest to odpowiednik licznika z 20-toma liczydłami, którego wskazania można odświeżać co zadany czas – w przykładowej tablicy co 10s. Z wyników pomiaru zawartych w tablicy można obliczyć odbitą energię czynną, energię

dystorsji i energię odkształcenia zamieniając we wcześniej opisanych wzorach (5), (9) i (10) moce na odpowiednie energie. Funkcja pomiaru energii wyspecyfikowanych w tablicy przedstawionej na rysunku 9 umożliwia ocenę strat nietechnicznych w danym przyłączu w ciągu określonego czasu, np. doby wraz z podziałem na poszczególne fazy oraz z określeniem czasu ich występowania.

U | I | F | ϕ | PF | P | Q | S | E | CF | SF

Date	Time	E PSum	E QSum	E SSum	E P1	E P2	E P3	E Q1	E Q2	E Q3	E S1	E S2	E S3	E P1H1	E P2H1	E P3H1	E PSumH1	E Q1H1	E Q2H
2018-05-29	12:15:43	820.605 Wh	-92.4231 Varh	897.247 VAh	190.319 Wh	238.451 Wh	391.835 Wh	10.8461 Varh	-75.7707 Varh	-27.4984 Varh	198.912 VAh	298.760 VAh	399.575 VAh	191.106 Wh	241.782 Wh	391.962 Wh	824.851 Wh	10.5784 Varh	-75.9625
2018-05-29	12:15:53	828.102 Wh	-93.2667 Varh	905.571 VAh	192.013 Wh	241.053 Wh	395.036 Wh	10.9528 Varh	-76.4770 Varh	-27.7426 Varh	200.688 VAh	302.036 VAh	402.847 VAh	192.816 Wh	244.416 Wh	395.148 Wh	832.381 Wh	10.6863 Varh	-76.6747
2018-05-29	12:16:03	835.536 Wh	-94.1057 Varh	913.840 VAh	193.706 Wh	243.604 Wh	398.226 Wh	11.0494 Varh	-77.1696 Varh	-27.9855 Varh	202.462 VAh	305.269 VAh	406.110 VAh	194.509 Wh	247.002 Wh	398.346 Wh	839.857 Wh	10.7776 Varh	-77.3718
2018-05-29	12:16:13	843.019 Wh	-94.9514 Varh	922.150 VAh	195.406 Wh	246.216 Wh	401.396 Wh	11.1589 Varh	-77.8802 Varh	-28.2301 Varh	204.243 VAh	308.556 VAh	409.352 VAh	196.217 Wh	249.648 Wh	401.518 Wh	847.383 Wh	10.8851 Varh	-78.0854
2018-05-29	12:16:23	850.710 Wh	-95.8187 Varh	930.669 VAh	197.098 Wh	248.819 Wh	404.793 Wh	11.2630 Varh	-78.5877 Varh	-28.4940 Varh	206.015 VAh	311.833 VAh	412.822 VAh	197.919 Wh	252.287 Wh	404.918 Wh	855.124 Wh	10.9864 Varh	-78.7978
2018-05-29	12:16:33	858.409 Wh	-96.6886 Varh	939.193 VAh	198.791 Wh	251.436 Wh	408.182 Wh	11.3682 Varh	-79.2966 Varh	-28.7602 Varh	207.789 VAh	315.120 VAh	416.285 VAh	199.622 Wh	254.935 Wh	408.307 Wh	862.864 Wh	11.0910 Varh	-79.5136
2018-05-29	12:16:43	866.124 Wh	-97.5687 Varh	947.735 VAh	200.497 Wh	254.058 Wh	411.570 Wh	11.4694 Varh	-80.0082 Varh	-29.0299 Varh	209.575 VAh	318.417 VAh	419.743 VAh	201.336 Wh	257.587 Wh	411.691 Wh	870.615 Wh	11.1878 Varh	-80.2283
2018-05-29	12:16:53	873.688 Wh	-98.4351 Varh	956.131 VAh	202.186 Wh	256.711 Wh	414.791 Wh	11.5711 Varh	-80.7261 Varh	-29.2800 Varh	211.344 VAh	321.750 VAh	423.038 VAh	203.033 Wh	260.276 Wh	414.914 Wh	878.223 Wh	11.2872 Varh	-80.9532
2018-05-29	12:17:03	881.211 Wh	-99.2951 Varh	964.490 VAh	203.885 Wh	259.317 Wh	418.009 Wh	11.6718 Varh	-81.4380 Varh	-29.5289 Varh	213.123 VAh	325.040 VAh	426.328 VAh	204.740 Wh	262.915 Wh	418.146 Wh	885.800 Wh	11.3841 Varh	-81.6701
2018-05-29	12:17:13	888.735 Wh	-100.153 Varh	972.846 VAh	205.575 Wh	261.937 Wh	421.223 Wh	11.7699 Varh	-82.1491 Varh	-29.7740 Varh	214.893 VAh	328.338 VAh	429.615 VAh	206.440 Wh	265.572 Wh	421.357 Wh	893.369 Wh	11.4784 Varh	-82.3869
2018-05-29	12:17:23	896.228 Wh	-101.014 Varh	981.158 VAh	207.268 Wh	264.535 Wh	424.426 Wh	11.8671 Varh	-82.8494 Varh	-30.0320 Varh	216.665 VAh	331.603 VAh	432.890 VAh	208.138 Wh	268.198 Wh	424.550 Wh	900.887 Wh	11.5744 Varh	-83.0926
2018-05-29	12:17:33	903.771 Wh	-101.872 Varh	989.511 VAh	208.962 Wh	267.183 Wh	427.625 Wh	11.9661 Varh	-83.5576 Varh	-30.2809 Varh	218.440 VAh	334.909 VAh	436.162 VAh	209.839 Wh	270.881 Wh	427.761 Wh	908.481 Wh	11.6691 Varh	-83.8050
2018-05-29	12:17:43	911.292 Wh	-102.731 Varh	997.853 VAh	210.651 Wh	269.789 Wh	430.852 Wh	12.0664 Varh	-84.2659 Varh	-30.5314 Varh	220.209 VAh	338.182 VAh	439.462 VAh	211.537 Wh	273.516 Wh	430.984 Wh	916.036 Wh	11.7661 Varh	-84.5152
2018-05-29	12:17:53	918.728 Wh	-103.583 Varh	1.00610 kVAh	212.345 Wh	272.393 Wh	433.990 Wh	12.1681 Varh	-84.9759 Varh	-30.7751 Varh	221.983 VAh	341.448 VAh	442.669 VAh	213.236 Wh	276.154 Wh	434.132 Wh	923.522 Wh	11.8653 Varh	-85.2284
2018-05-29	12:18:03	926.248 Wh	-104.445 Varh	1.01443 kVAh	214.034 Wh	275.008 Wh	437.206 Wh	12.2575 Varh	-85.6813 Varh	-31.0208 Varh	223.752 VAh	344.724 VAh	445.956 VAh	214.934 Wh	278.802 Wh	437.346 Wh	931.083 Wh	11.9538 Varh	-85.9369
2018-05-29	12:18:13	933.722 Wh	-105.278 Varh	1.02274 kVAh	215.731 Wh	277.549 Wh	440.443 Wh	12.3605 Varh	-86.3764 Varh	-31.2624 Varh	225.529 VAh	347.941 VAh	449.266 VAh	216.637 Wh	281.371 Wh	440.583 Wh	938.591 Wh	12.0569 Varh	-86.6374
2018-05-29	12:18:23	941.154 Wh	-106.117 Varh	1.03100 kVAh	217.427 Wh	280.087 Wh	443.640 Wh	12.4630 Varh	-87.0647 Varh	-31.5155 Varh	227.305 VAh	351.158 VAh	452.534 VAh	218.338 Wh	283.935 Wh	443.779 Wh	946.052 Wh	12.1530 Varh	-87.3297
2018-05-29	12:18:33	949.160 Wh	-107.013 Varh	1.03982 kVAh	219.116 Wh	282.680 Wh	447.364 Wh	12.5646 Varh	-87.7670 Varh	-31.8104 Varh	229.074 VAh	354.417 VAh	456.329 VAh	220.036 Wh	286.554 Wh	447.505 Wh	954.095 Wh	12.2543 Varh	-88.0395
2018-05-29	12:18:43	957.080 Wh	-107.897 Varh	1.04857 kVAh	220.787 Wh	285.232 Wh	451.061 Wh	12.6796 Varh	-88.4661 Varh	-32.1102 Varh	230.821 VAh	357.651 VAh	460.097 VAh	221.712 Wh	289.137 Wh	451.214 Wh	962.064 Wh	12.3647 Varh	-88.7441
2018-05-29	12:18:53	965.105 Wh	-108.790 Varh	1.05740 kVAh	222.458 Wh	287.853 Wh	454.795 Wh	12.7800 Varh	-89.1670 Varh	-32.4029 Varh	232.565 VAh	360.934 VAh	463.903 VAh	223.391 Wh	291.786 Wh	454.942 Wh	970.119 Wh	12.4661 Varh	-89.4511
2018-05-29	12:19:03	972.673 Wh	-109.639 Varh	1.06578 kVAh	224.125 Wh	290.427 Wh	458.122 Wh	12.8890 Varh	-89.8620 Varh	-32.6663 Varh	234.307 VAh	364.174 VAh	467.302 VAh	225.061 Wh	294.390 Wh	458.270 Wh	977.721 Wh	12.5709 Varh	-90.1477
2018-05-29	12:19:13	980.268 Wh	-110.497 Varh	1.07419 kVAh	225.794 Wh	293.035 Wh	461.439 Wh	12.9996 Varh	-90.5679 Varh	-32.9283 Varh	236.051 VAh	367.448 VAh	470.693 VAh	226.736 Wh	297.034 Wh	461.597 Wh	985.367 Wh	12.6806 Varh	-90.8583
2018-05-29	12:19:23	987.923 Wh	-111.398 Varh	1.08268 kVAh	227.459 Wh	295.695 Wh	464.769 Wh	13.1079 Varh	-91.3072 Varh	-33.1983 Varh	237.791 VAh	370.795 VAh	474.096 VAh	228.411 Wh	299.688 Wh	464.927 Wh	993.025 Wh	12.7869 Varh	-91.5840
2018-05-29	12:19:33	995.490 Wh	-112.253 Varh	1.09108 kVAh	229.129 Wh	298.284 Wh	468.076 Wh	13.2204 Varh	-92.0128 Varh	-33.4609 Varh	239.537 VAh	374.067 VAh	477.475 VAh	230.085 Wh	302.310 Wh	468.223 Wh	1.00062 kWh	12.8970 Varh	-92.2947
2018-05-29	12:19:43	1.00312 kWh	-113.120 Varh	1.09954 kVAh	230.798 Wh	300.925 Wh	471.400 Wh	13.3315 Varh	-92.7316 Varh	-33.7196 Varh	241.282 VAh	377.388 VAh	480.871 VAh	231.764 Wh	304.987 Wh	471.548 Wh	1.00830 kWh	13.0075 Varh	-93.0248
2018-05-29	12:19:53	1.01078 kWh	-114.006 Varh	1.10802 kVAh	232.458 Wh	303.586 Wh	474.734 Wh	13.4335 Varh	-93.4519 Varh	-33.9877 Varh	243.016 VAh	380.729 VAh	484.277 VAh	233.429 Wh	307.677 Wh	474.884 Wh	1.01599 kWh	13.1060 Varh	-93.7511
2018-05-29	12:20:03	1.01820 kWh	-114.855 Varh	1.11627 kVAh	234.131 Wh	306.190 Wh	477.882 Wh	13.5501 Varh	-94.1681 Varh	-34.2366 Varh	244.765 VAh	384.015 VAh	487.494 VAh	235.110 Wh	310.314 Wh	478.039 Wh	1.02346 kWh	13.2194 Varh	-94.4729
2018-05-29	12:20:13	1.02588 kWh	-115.870 Varh	1.12481 kVAh	235.798 Wh	308.878 Wh	481.207 Wh	13.6647 Varh	-95.0285 Varh	-34.5060 Varh	246.507 VAh	387.405 VAh	490.894 VAh	236.784 Wh	313.037 Wh	481.360 Wh	1.03118 kWh	13.3309 Varh	-95.3352
2018-05-29	12:20:23	1.03347 kWh	-116.726 Varh	1.13323 kVAh	237.471 Wh	311.464 Wh	484.537 Wh	13.7773 Varh	-95.7347 Varh	-34.7681 Varh	248.255 VAh	390.674 VAh	494.296 VAh	238.462 Wh	315.647 Wh	484.698 Wh	1.03881 kWh	13.4410 Varh	-96.0478
2018-05-29	12:20:33	1.04095 kWh	-117.598 Varh	1.14152 kVAh	239.141 Wh	314.096 Wh	487.713 Wh	13.8913 Varh	-96.4514 Varh	-35.0374 Varh	249.999 VAh	393.978 VAh	497.544 VAh	240.141 Wh	318.317 Wh	487.884 Wh	1.04634 kWh	13.5528 Varh	-96.7694
2018-05-29	12:20:43	1.04833 kWh	-118.439 Varh	1.14972 kVAh	240.810 Wh	316.710 Wh	490.809 Wh	14.0042 Varh	-97.1631 Varh	-35.2804 Varh	251.744 VAh	397.270 VAh	500.707 VAh	241.811 Wh	320.958 Wh	490.982 Wh	1.05375 kWh	13.6612 Varh	-97.4856

Graph
Table

Averaging
every 10 results

Rys.9. Tablica wyników pomiaru energii

Z zestawionych w tablicy wyników pomiaru składników energii można, analogicznie do prostopadłościanu mocy prezentowanego na rysunku 1, przedstawić graficzną reprezentację zmierzonych energii w postaci prostopadłościanów energii dla każdej z faz i ich sumy.

Wnioski

Aby móc poprawiać efektywność energetyczną przez ograniczanie strat nietechnicznych należy mieć narzędzia do pomiaru mocy przepływu energii. Niesinusoidalne prądy i napięcia w sieciach elektroenergetycznych powodują przepływy energii w różnych kierunkach, przy czym przepływ części energii nie jest kontrolowany z uwagi na niedoskonałości sprzętu pomiarowego.

Przepływy energii i straty można analizować korzystając z teorii prostopadłościanu mocy czy teorii odbitej mocy czynnej. Teoria odbitej mocy czynnej, opracowana przez prof. Czarneckiego, jest szczególnie interesująca dla potrzeb pomiaru strat, ponieważ odbita moc czynna stanowi czystą stratę. Dopiero dwa lata temu, w pracy [7] wykonanej w USA, potwierdzono eksperymentalnie na stanowisku laboratoryjnym zasadnicze tezy tej teorii o przepływie energii harmonicznych w odwrotnym kierunku do przepływu energii pierwszej harmonicznej.

W kraju mamy szczególnie korzystną sytuację w zakresie możliwości opomiarowania strat związanych z niekontrolowanymi dotychczas przepływami energii. Krajowy tester liczników typu TE30 [1] oraz wdrażany do produkcji trójfazowy system z licznikiem kontrolnym i zintegrowanym źródłem trójfazowym typu TS33 [14] mają zaimplementowane funkcje dedykowane dla potrzeb pomiaru strat. Funkcje pomiaru mocy takie jak: widma mocy, odbitej mocy czynnej, mocy dystorsji czy mocy odkształcenia umożliwiają bieżącą ocenę przepływów energii, które w czasie są zmienne. Funkcja licznika kontrolnego roboczej mocy czynnej umożliwia pomiar błędu procentowego w naliczaniu energii z tytułu niekontrolowanych przepływów energii przez zainstalowany system pomiarowo-rozliczeniowy. Funkcja pomiaru prostopadłościanu energii umożliwia pomiar wszystkich składników energii w celu dokładnego wyliczenia strat.

Literatura

[1] Niewiedział E., Niewiedział R.: Analiza statystyczna strat energii elektrycznej w krajowym systemie elektroenergetycznym w ostatnim piętnastoleciu. VII Konferencja Naukowo-Techniczna Straty energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych, Kołobrzeg, 2016, s.7-18

[2]Metering Best Practices: A Guide to Achieving Utility Resource Efficiency, Release 3.0. U.S. Department of Energy, March 2015

[3] Zhezhelenko I. V., Sayenko Y.L.: Electric losses, caused by high harmonic in electric power supply systems, ISNCC, Łagów, Poland, 2010

[4] Ghorbani M. J., Mokhari H.: Impact of Harmonics on Power Quality and Losses in Power Distribution Systems, IJECE Vol.5, No.1, February 2015, pp. 166-174

[5] Firlit A.: Teorie mocy w obwodach prądu przemiennego, Elektro Info, 2009, nr 12, s. http://www.elektro.info.pl/artykul/id3093,teorie-mocy-w-obwodach-pradu-przemiennego.html

[6] Czarnecki L. S.: Czy moc czynna jest mocą użyteczną i za co powinniśmy płacić?, Automatyka, Elektryka, Zakłócenia, 2011, Vol. 2, Nr 5, s. 24-32

[7] Troups T.: Measurement of Working, Reflected, and Detrimental Active Power in Three Phase System. PHD Dissertation, Louisiana State University, USA, May 2015

[8] Bartman J., Sobczyński D.: Zarys analizy mocy pobieranej przez obrabiarkę CNC, Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania, 2017, Vol. 58, Nr 11, s.15-17

[9] Olencki A.: Analizator Calport 100 – nowy trend w diagnostyce i eksploatacji sieci energetycznych. II Konferencja naukowo-techniczna Diagnostyka w sieciach elektroenergetycznych zakładów przemysłowych, Płock, 2001, s.3-10

[10] Trójfazowy analizator sieci i tester liczników energii i przekładników TE30. Calmet, TE30 Data sheet PL 2016-03 https://www.calmet.com.pl/images/pdf/TE30-Trojfazowy-Licznik-Wzorcowy-Karta-Katalogowa-PL.pdf

[11] Urządzenia do pomiarów energii elektrycznej (prądu przemiennego) – Wymagania-szczegółowe – Część 24: Liczniki statyczne energii biernej dla częstotliwości podstawowej (klas 0,5 S, 1 S i 1). PN-EN 62053-24:2015-03

[12] Urządzenia do pomiarów energii elektrycznej (prądu przemiennego) – Część 3: Wymagania szczegółowe – Liczniki statyczne energii czynnej (klas A, B i C). PN-EN 50470-3:2009

[13] Trójfazowy kalibrator mocy i tester aparatury energetycznej C300B. Calmet, C300B Data sheet PL 2015-03 https://www.calmet.com.pl/images/pdf/C300B-Trojfazowy-Kalibrator-Mocy-Karta-Katalogowa-PL.pdf

[14] Trójfazowy system do automatycznego testowania z licznikiem kontrolnym i zintegrowanym źródłem prądu i napięcia TS33. Calmet, TS33 Data sheet PL 2018-05

***Autorzy**: dr hab. inż. Andrzej Olencki, prof.UZ, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Elektrycznej, ul. prof. Z. Szafrana 2, 65-516 Zielona Góra, E-mail: A.Olencki@iee.uz.zgora.pl*