

EFEKTYWNY POMIAR I ANALIZA JAKOŚCI ENERGII ELEKTRYCZNEJ

Miroslaw WŁAS

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
tel.: 58 347-23-37 e-mail: mirosław.wlas@pg.gda.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono stan prawny oraz parametry określające jakość energii elektrycznej (JEE). Przedstawiono dwa rodzaje urządzeń do pomiaru JEE – stacjonarne analizatory i urządzenia przenośne. Wskazano konieczność ciągłego monitoringu wskaźników JEE.

Artykuł przedstawia cztery przypadki pomiaru parametrów energii elektrycznej, gdzie doszło do awarii systemu zasilania lub baterii kondensatorów czego przyczyną było pogorszenia JEE. Dla opisanych przypadków przedstawiono wyniki pomiarów i wyjaśniono przyczyny awarii.

Słowa kluczowe: jakość energii, pomiary, rezonans równoległy w sieciach energetycznych

1. WPROWADZENIE

Dynamiczny rozwój elektroniki i energoelektroniki powoduje, że w sieci energetycznej pracuje coraz więcej odbiorników nieliniowych. Do odbiorników o nieliniowym charakterze obciążeń należy zaliczyć szczególnie układy prostownikowe, a zwłaszcza układy z pojemnościowym filtrem napięcia. Są to układy stanowiące, dla sieci zasilającej, odbiorniki o charakterze ekstremalnie nieliniowym. Pobierają one z sieci prąd o charakterze impulsowym, co w konsekwencji powoduje odkształcenie napięcia w sieci elektroenergetycznej [1, 2, 3]. W zakresie jakości energii i przyczyn jej pogorszenia jest dostępna literatura światowa, jak i krajowa [3, 4].

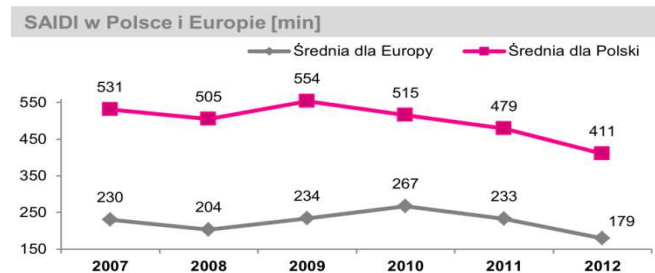
Na jakość dostaw energii elektrycznej (jakość zasilania odbiorców) składa się: jakość energii (napięcia), niezawodność (ciągłość) dostawy i jakość obsługi klienta. W dużej mierze jakość dostaw zależy od niezawodności systemu elektroenergetycznego, wytwarzania energii i bezpieczeństwa dostaw surowców, z których jest wytwarzana energia. Tematem tego artykułu jest jakość energii i w związku z tym nie rozważamy długich przerw w napięciu i problematyki niezawodności dostaw i obsługi klienta. Trzeba jednak zwrócić uwagę, że wskaźnik czasu trwania przerwy długiej wyrażony w minutach na odbiorcę na rok (SAIDI) jest w Polsce ponad dwukrotnie większy niż średnia europejska [5], co pokazano na rys. 1.

Jakość energii elektrycznej - to zbiór parametrów opisujących właściwości procesu dostarczania energii do użytkownika w normalnych warunkach pracy, określających ciągłość zasilania (długie i krótkie przerwy w zasilaniu) oraz charakteryzujących napięcie zasilania (wartość, niesymetrię, częstotliwość, kształt przebiegu). Do podlegających kontroli parametrów JEE należą: częstotliwość, wartość napięcia, wahania i odchylenia napięcia, zapady napięcia, przerwy w

zasilaniu, przepięcia przejściowe i dorywcze, przepięcia o częstotliwości sieciowej (pojawiające się chwilowo podczas włączania i rozłączania elementów sieci przesyłowej), asymetria napięcia zasilającego, harmoniczne i interharmoniczne dla napięcia i prądu, napięcia sygnalizacyjne nałożone na napięcie zasilające. Określenie obowiązujących parametrów jakościowych energii elektrycznej dostarczanej odbiorcom w poszczególnych grupach przyłączeniowych podano w Rozporządzeniu Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 20 grudnia 2004 r. w sprawie szczegółowych warunków przyłączenia podmiotów do sieci elektroenergetycznych, ruchu i eksploatacji tych sieci (Dz. U. z 2005 r. Nr 2, poz. 6). Doprecyzowanie parametrów nastąpiło w Rozporządzeniu Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego [13]

Nazewnictwo oraz parametry zjawisk określających jakość energii elektrycznej definiuje Polska Norma PN-EN 50160:2010 [12]. Norma PN-EN 50160 określa główne parametry napięcia w złączu elektroenergetycznym sieci rozdzielczych niskiego napięcia (nn) i średniego napięcia (SN) w normalnych warunkach pracy tych sieci. Ostatnia wersja normy [12] rozszerza zakres napięć nn i SN o sieci wysokiego napięcia (WN) do 132 kV włącznie.

Dla celów tej normy, jako niskie napięcie przy dostarczaniu energii przyjmuje się takie, którego górna granica skutecznej wartości znamionowej wynosi 1 kV, w przypadku średniego napięcia wartość ta zawarta jest w przedziale od 1 kV do 35 kV. Pierwotnie zapisy wydania normy PN-EN 5016 z 2002 roku wpisano w większości w tzw. rozporządzenie przyłączeniowe *Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 28 grudnia 2004 r.* w sprawie szczególnych warunków przyłączenia podmiotów do sieci elektroenergetycznych. Obecnie, po prawnym zastąpieniu powyższy akt funkcjonuje w postaci rozporządzenia [13] w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego.

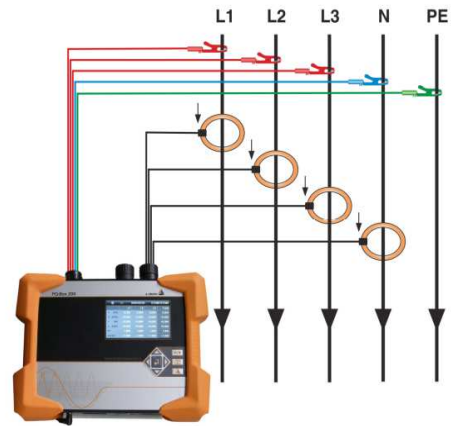


Rys. 1. Rozkład wskaźnika SAIDI w Polsce i w Europie [5]

2. POMIARY JEE

2.1. Parametry JEE

Brak nazwy tablicy Około 80% problemów jakości energii elektrycznej (JEE) pochodzi z obiektów przemysłowych, biurowych i komunalnych są to: załączanie i wyłączenie dużych odbiorów, niewłaściwe okablowanie i uziemienie, przeciążenie obwodów, przyłączanie odbiorników nieliniowych generujących znaczne harmoniczne prądu. Około 20% problemów dotyczących jakości energii elektrycznej, pochodzi z systemu przesyłowego i dystrybucyjnego (uderzenia pioruna, awaria urządzeń, warunki pogodowe, przełączenia i remonty).



Tab. 1. Zestawienie parametrów JEE [14]

Rys. 3. Schemat podłączenia analizatora PQBox 200

Charakterystyka napięcia zasilającego	Wartości dopuszczalne		Parametry mierzone lub obliczane			
	napięcie niskie ($U_n \leq 1 \text{ kV}$)	napięcie średnie ($1 \text{ kV} < U_n \leq 35 \text{ kV}$)	Miara podstawowa	Przedział uśredniania	Czas badań	%
Częstotliwość	50 Hz +/- 1% (49,5 Hz do 50,5 Hz) 50 Hz + 4/-6% (47 Hz do 52 Hz)		Wartość średnia	10 s	tydzień	99,5
Odchylenia napięcia	$U_n \pm 10 \%$	$U_n \pm 10 \%$	RMS	10 min	tydzień	95
	$U_n +10/- 15 \%$				-	100
Szybkie zmiany napięcia	$\leq 5 \%$ ($\leq 10 \%$ kilka razy w ciągu dnia)	$\leq 4 \%$ ($\leq 6 \%$ kilka razy w ciągu dnia)	RMS	10 ms ^{*)}	dzień	100
	Długookresowa uciążliwość $P_{fl} \leq 1$				Algorytm	2h ($P_{st} = 10 \text{ min}$)
Zapady napięcia (10 ms - 1 min, U poniżej 90 % U_n lub U_d)	Obserwowane : 10 – 1000 w roku. Większość o czasie trwania < 1 s i głębokości < 60 %. Na pewnych obszarach częste zapady o głębokości między 10 a 15 %.		RMS	10 ms	rok	100
Krótkie przerwy w zasilaniu (3 min, U poniżej 1% U_n lub U_d)	Obserwowane : od 10 do kilkuset w roku 70 % z nich powinno być mniejsze niż		RMS	10 ms ^{*)}	rok	100
Długie przerwy w zasilaniu (> 3 min, U poniżej 1% U_n lub U_d)	Obserwowane : mniej niż 10 do 50 w roku		RMS	10 ms ^{*)}	rok	100
Dorywcze przepięcia między przewodem fazowym a ziemią	Z reguły nie przekraczają 1,5 kV	Z reguły nie przekraczają 1,7 lub 2 U_d (zależnie od połączenia punktu neutralnego)	RMS	10 ms ^{*)}	-	100
Przejściowe przepięcia między przewodem fazowym a ziemią	Z reguły nie przekraczają 6 kV o czasie narastania od ms do mniej niż 1 μs		Wartość maksymalna	-	-	100
Asymetria	Wskaźnik asymetrii kolejności przeciwnej $\leq 2 \%$ N pewnych obszarach $\leq 3 \%$		RMS	10 min	tydzień	95
Harmoniczne	THD (do 40 harmonicznej $\leq 8 \%$; udziały harmoniczny zestawiono w tabeli)		RMS	10 min	tydzień	95
Interharmoniczne	Brak obecnie specyfikacji		-			
Signal napięciowy do transmisji informacji	Opisany krzywą zależną od częstotliwości w granicach od 1,1 do 9 % U_n lub U_d		RMS	3 s	dzień	99














Rys. 2. Możliwości komunikacyjne analizatora Nexus 1500

Parametry JEE przedstawione w tab. 1 opracowane na podstawie normy [12], a dotyczą przede wszystkim parametrów napięcia.

2.2. Analizatory do pomiaru JEE

Do wiarygodnego pomiaru parametrów JEE zgodnie z normą PN-EN50160, należy użyć analizatorów parametrów sieci. W Laboratorium Inteligentnej Energetyki LAB-6, Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej wykorzystuje się dwa rodzaje analizatorów: do pomiarów długookresowych powyżej 7 dni analizator stacjonarny Nexus 1500 firmy EiG (ElectroIndustries/GaugeTech) (Rys. 2.), a do pomiarów tygodniowych analizator przenośny PQBox 200 firmy A-Eberle (Rys.3). Ważnym jest, aby analizatory posiadały certyfikat potwierdzający otrzymanie Klasy A dla analizatora. Analizatory Klasy A spełniają wszystkie wymogi normy IEC 6100-4-30 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Metody badań i pomiarów – Metody pomiaru jakości energii. Drugim kryterium doboru analizatorów było oprogramowanie oraz łatwość tworzenia raportów (Rys. 4.), możliwość analizowania przebiegów oscyloskopowych oraz ustawiania progów wyzwolenia rejestracji do przebiegów dokumentujących pogorszenie parametrów JEE.

 Power Frequency (x.1)	Pass
 Supply Voltage Variations (x.3.x)	Pass
 Rapid Voltage Changes (x.4.1)	Fail
 Flicker (x.4.2)	Pass
 Supply Voltage Dips (x.5)	Fail
 Short Interruption of Supply Voltage (x.6)	Pass
 Long Interruption of Supply Voltage (x.7)	Pass
 Temporary power frequency overvoltage (x.8)	Fail
 Supply Voltage Unbalance (x.10)	Pass
 Harmonic Voltage (x.11)	Pass
 Mains Signaling Voltage (x.13)	Pass

Rys. 4. Raport wykonany z oprogramowania do analizatora Nexus

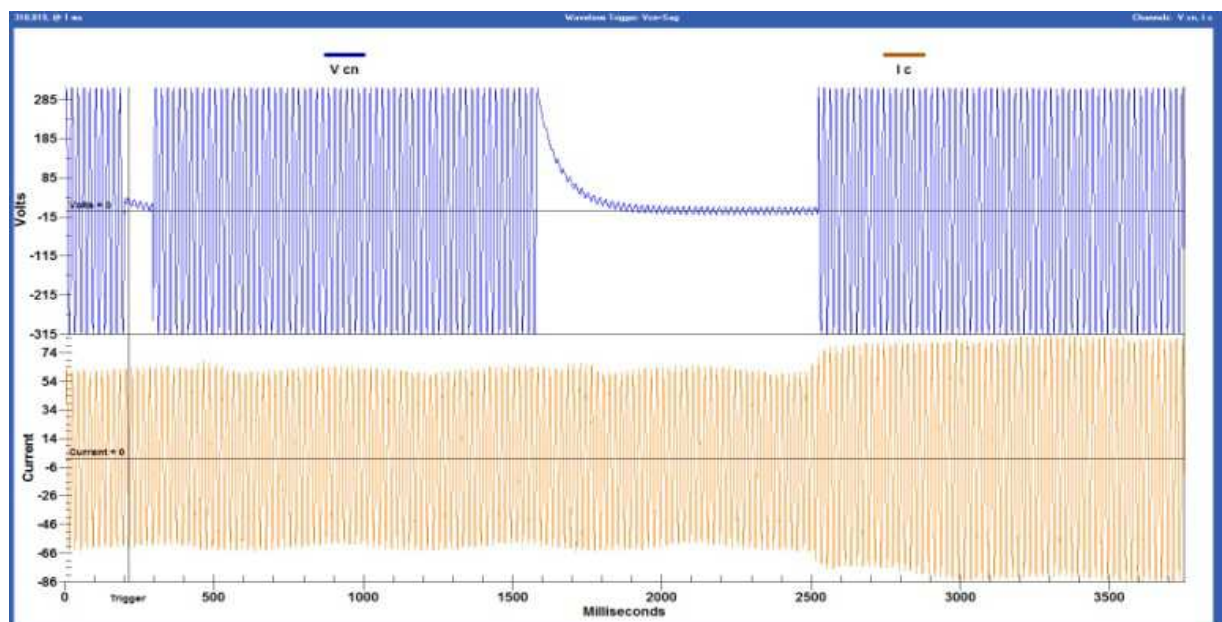
3. BADANIA TERENOWE

3.1. Zapady napięcia

Pierwszym przykładem badań terenowych było wykonanie długookresowych pomiarów w zakładzie produkcyjnym w powiecie malborskim. Badania wykonano w okresie 3 miesięcy, ze względu na sporadyczne występowanie zapadów i wahań napięcia. Zastosowanie analizatora Nexus 1500 umożliwiło rejestrację przebiegów oscyloskopowych z częstotliwością 10 MHz (ponad 166000 punktów w okresie napięcia sieci). Analizator zamontowano w układzie sieci TN-C-S na napięciu 0,4kV.

Zgodnie z rys.4 raport sugerował zapady napięcia. Na rys.5 przedstawiono przebiegi napięcia i prądu w fazie C. Zapady napięcia nie przekraczały 1,5 sekundy i zwarcia nie były wykrywane przez zabezpieczenia linii w GPZ. Analiza przebiegów napięć i prądów wykazała, że przy zapadzie napięcia, prąd w badanej fazie maleje (Rys. 5). Oznacza to, że zaburzenie występuje po stronie wyższego napięcia. Można zapisać ogólną zasadę polegającą na obserwacji zmian napięcia oraz prądu podczas trwania zaburzenia:

- $dU/dI < 0$ (prąd rośnie, napięcie maleje) – zaburzenie jest zlokalizowane po stronie niskiego napięcia
- $dU/dI > 0$ (prąd maleje, napięcie maleje) – zaburzenie jest zlokalizowane po stronie średniego napięcia.



Rys. 5. Przebiegi napięcia fazowego i prądu

Przyczyną awarii był pęknięty izolator na linii 15kV, który powodował doziemienie w czasie ulewnych deszczów.

3.2. Harmoniczne napięcia

Kolejnym przykładem badań terenowych było wykonanie jednodniowych w ciepłowni miejskiej zlokalizowanej w pobliżu Warszawy. W ciepłowni wykonano modernizację zasilania pomp obiegowych oraz wentylatorów kotłowych. Dodatkowo wprowadzono zasilanie silników indukcyjnych z przekształtników napięciowych z mostkiem prostownikowym diodowym na wejściu przekształtnika. W okresie roku od modernizacji wystąpiło uszkodzenie jednego stopnia baterii kondensatorów o mocy 25 kVAr (Rys. 7). Badania wykonano analizatorem PQBox 200 w ciągu jednego dnia pod koniec okresu grzewczego. Przebiegi prądu wykazały znaczną, bo wynoszącą maksymalnie 50% zawartość współczynnika wyższych harmonicznych THD I przy, przy poziomie THD U wynoszącym maksymalnie 3,2%. Zwiększenie zawartości harmonicznych napięcia powoduje zwiększenie wartości harmonicznych prądu a co za tym idzie wartości skutecznej prądu kondensatorów. Jak wykazały pomiary przyczyną awarii kondensatora 25kVAr w sekcji 2 było najprawdopodobniej przegrzanie kondensatora, spowodowane przekroczeniem dopuszczalnego prądu długotrwałego i przekroczeniem dopuszczalnych start czynnych w dielektryku. W tab. 2 poniżej zestawiono dane prądu zmierzonego, znamionowego i dopuszczalnego kondensatora 50 kVAr. W czasie pomiarów stwierdzono, że prąd fazowy przekroczył 79 A. Z pewnością i ten kondensator w przyszłości ulegnie także zniszczeniu.

Tab. 2. Prądy kondensatora 50kVAr

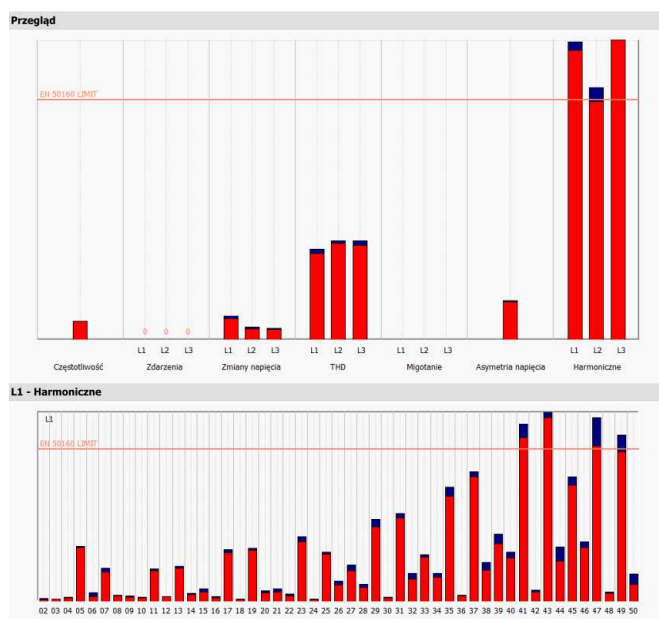
Parametr	Faza	L1	L2	L3
Prąd zmierzony kondensatora 50kVAr		79,3A	78,5A	78,7A
Prąd znamionowy kondensatora zgodnie z katalogiem		58A	58A	58A
Prąd dopuszczalny kondensatora zgodnie z katalogiem		87A	87A	87A



Rys. 6. Przebiegi prądu i napięcia oraz THD I i THD U oraz mocy czynnej PG, biernej Qv i odkształconej D



Rys. 7. Uszkodzony kondensator 25kVAr



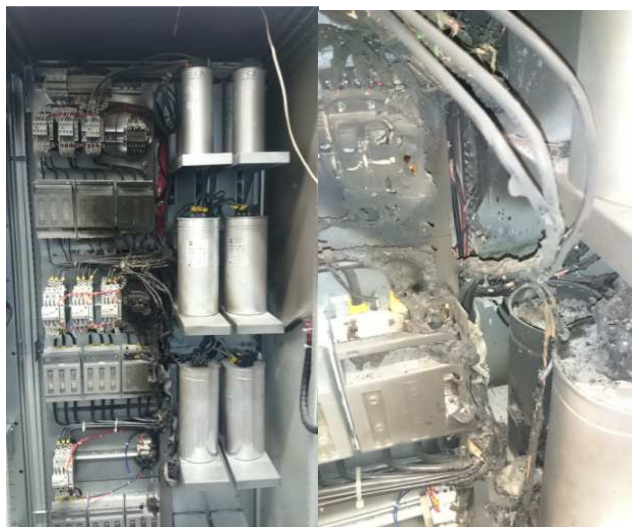
Rys. 8. Raport wygenerowany z oprogramowania WinPQ

Wykorzystując oprogramowanie analizatora PQ Box 200 (WinPQ mobile 64 bit) można wygenerować raport, który ocenia zgodność parametrów JEE z rozporządzeniem Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 roku (rys. 8). Ewidentnie wyższe harmoniczne napięcia (związane z modulacją PWM) przekraczają wartości dopuszczalne określone normą PN-EN 50160. Występuje harmoniczne 41, 43, 47 i 49.

3.3. Harmoniczne prądu

Kolejny przypadek dotyczy awarii i pożaru baterii kondensatorów o mocy 250kVAr zainstalowanej w zakładzie produkcyjnym w Łysomicach pod Toruniem (Rys. 9.). Badania wykonane analizatorem PQBox200, wykazały dużą zawartość harmonicznego prądu w tym 3, 5, 7 (rys. 10). Za spektakularną eksplozję kondensatora odpowiedzialne jest zjawisko rezonansu napięciowego dla 3, 5 lub 7 wyższej harmonicznej prądów. Rezonans następuje pomiędzy impedancją sieci a pojemnością baterii (rys. 11b). Rezonans spowodował gwałtowny wzrost napięcia na zaciskach kondensatora w wyniku czego doszło do wybuchu kondensatora po przekroczeniu napięcia przebicia i przepływie prądu zwarciovego. Obecność dużej wartości 3 har. prądu oznacza, że do kompensacji mocy biernej należy użyć baterii wypo-

sażonej w dławiki o współczynniku tłumienia 14%, który zapewnia szerokie pasmo filtracji i dobre tłumienie od trzeciej harmonicznnej.



Rys. 9. Uszkodzenia wewnątrz obudowy baterii kondensatorów

Harmoniczne								
	L1 - 95%	L1 - Max	L2 - 95%	L2 - Max	L3 - 95%	L3 - Max	LN - 95%	LN - Max
02	1.2032 [%]	9.0649 [%]	1.8975 [%]	20.2550 [%]	3.9307 [%]	45.6407 [%]	5.4907 [%]	12.1988 [%]
03	37.9394 [%]	51.7547 [%]	34.2710 [%]	55.6927 [%]	95.1104 [%]	267.3804 [%]	120.4016 [%]	208.3380 [%]
04	0.6577 [%]	6.4293 [%]	0.9563 [%]	9.0435 [%]	1.7658 [%]	19.4475 [%]	2.4832 [%]	11.3012 [%]
05	34.6848 [%]	42.6796 [%]	17.8516 [%]	33.3981 [%]	37.1119 [%]	116.4146 [%]	37.6383 [%]	66.2848 [%]
06	0.5811 [%]	5.1489 [%]	0.9827 [%]	5.5819 [%]	1.3712 [%]	4.2877 [%]	1.3388 [%]	8.5288 [%]
07	31.5884 [%]	26.2717 [%]	30.7094 [%]	34.3085 [%]	30.0388 [%]	74.3074 [%]	20.3382 [%]	34.0318 [%]
08	0.6447 [%]	3.8746 [%]	0.5786 [%]	2.9426 [%]	1.1605 [%]	3.0862 [%]	0.9143 [%]	6.4182 [%]
09	5.4913 [%]	9.4096 [%]	10.7765 [%]	15.7077 [%]	27.9609 [%]	74.2358 [%]	45.7010 [%]	77.5653 [%]
10	1.5518 [%]	2.9582 [%]	2.4217 [%]	3.3960 [%]	2.0318 [%]	3.0118 [%]	0.6767 [%]	4.5613 [%]
11	7.1196 [%]	10.6247 [%]	8.8153 [%]	14.2921 [%]	17.5974 [%]	45.3354 [%]	6.4035 [%]	8.2446 [%]
12	0.3947 [%]	2.2839 [%]	0.5966 [%]	3.8371 [%]	1.0800 [%]	3.0972 [%]	0.8372 [%]	3.4783 [%]
13	3.0579 [%]	6.0539 [%]	4.4902 [%]	10.0159 [%]	9.1662 [%]	22.7288 [%]	5.5537 [%]	10.9950 [%]
14	0.4496 [%]	1.6592 [%]	0.5356 [%]	2.0758 [%]	1.1157 [%]	3.6659 [%]	0.6580 [%]	2.6486 [%]
15	2.6300 [%]	4.8267 [%]	1.3862 [%]	4.5564 [%]	13.0220 [%]	39.6056 [%]	8.3139 [%]	17.6630 [%]
16	0.4282 [%]	1.4203 [%]	0.5815 [%]	1.9495 [%]	1.1253 [%]	3.2689 [%]	0.5467 [%]	1.9504 [%]
17	1.3176 [%]	2.9799 [%]	1.9293 [%]	3.8620 [%]	7.8629 [%]	28.2980 [%]	3.7705 [%]	5.6881 [%]
18	0.3645 [%]	1.3125 [%]	0.4985 [%]	1.7353 [%]	1.0595 [%]	2.7366 [%]	0.4020 [%]	1.1699 [%]
19	1.5795 [%]	3.6416 [%]	3.0387 [%]	6.7242 [%]	5.7736 [%]	29.3132 [%]	2.7778 [%]	7.6698 [%]
20	0.4170 [%]	1.1257 [%]	0.4995 [%]	1.8513 [%]	1.0421 [%]	2.7650 [%]	0.4572 [%]	1.2007 [%]
21	0.9506 [%]	1.8386 [%]	1.1589 [%]	2.8180 [%]	3.6283 [%]	15.2333 [%]	5.9982 [%]	12.8407 [%]
22	0.3598 [%]	0.9625 [%]	0.4757 [%]	1.3450 [%]	1.0514 [%]	3.7102 [%]	0.3719 [%]	0.8459 [%]
23	1.5650 [%]	3.1413 [%]	1.5280 [%]	2.3760 [%]	7.8787 [%]	22.4881 [%]	2.3285 [%]	4.8363 [%]
24	0.3503 [%]	0.9815 [%]	0.4880 [%]	1.3636 [%]	1.0287 [%]	3.0781 [%]	0.5820 [%]	1.2217 [%]
25	1.4496 [%]	1.7296 [%]	1.7528 [%]	2.5451 [%]	8.3877 [%]	23.9480 [%]	2.4403 [%]	3.0843 [%]
26	0.3893 [%]	0.9984 [%]	0.4795 [%]	1.0786 [%]	0.9667 [%]	3.4560 [%]	0.3083 [%]	1.3942 [%]
27	0.4989 [%]	1.1354 [%]	0.6729 [%]	1.3393 [%]	6.4845 [%]	18.0326 [%]	1.7319 [%]	3.3739 [%]
28	0.3867 [%]	1.0037 [%]	0.4829 [%]	1.3553 [%]	0.9795 [%]	2.8516 [%]	0.3236 [%]	2.1564 [%]
29	0.6159 [%]	1.0183 [%]	0.7937 [%]	1.4125 [%]	4.2981 [%]	12.5420 [%]	1.2084 [%]	2.3992 [%]
30	0.3556 [%]	0.8183 [%]	0.4509 [%]	0.8767 [%]	0.9350 [%]	3.3473 [%]	0.2734 [%]	2.1605 [%]
31	0.6158 [%]	1.4109 [%]	0.6493 [%]	1.8210 [%]	5.6932 [%]	19.2390 [%]	1.1552 [%]	4.0715 [%]
32	0.3269 [%]	0.6490 [%]	0.4558 [%]	0.8175 [%]	0.9422 [%]	3.4622 [%]	0.2298 [%]	2.0598 [%]
33	0.4392 [%]	1.1182 [%]	0.5484 [%]	1.2248 [%]	4.5670 [%]	14.6302 [%]	0.5843 [%]	2.1202 [%]
34	0.3512 [%]	0.6340 [%]	0.4476 [%]	0.8267 [%]	0.9228 [%]	2.6924 [%]	0.2092 [%]	1.1621 [%]
35	0.6103 [%]	1.4543 [%]	0.5606 [%]	1.0420 [%]	3.4478 [%]	9.3859 [%]	0.7478 [%]	1.1355 [%]
36	0.3683 [%]	0.6371 [%]	0.4308 [%]	0.8532 [%]	0.9346 [%]	2.4398 [%]	0.2860 [%]	0.7472 [%]
37	0.4955 [%]	1.1313 [%]	0.6720 [%]	1.2789 [%]	2.7831 [%]	11.6694 [%]	0.5081 [%]	1.1002 [%]
38	0.3259 [%]	0.6478 [%]	0.4564 [%]	0.8893 [%]	0.9255 [%]	2.8280 [%]	0.1775 [%]	0.9505 [%]
39	0.4362 [%]	1.0175 [%]	0.4928 [%]	0.9021 [%]	2.7106 [%]	10.0212 [%]	0.4298 [%]	1.1764 [%]
40	0.3480 [%]	0.6101 [%]	0.4517 [%]	0.7886 [%]	0.9400 [%]	3.0237 [%]	0.1845 [%]	1.0164 [%]
41	0.4083 [%]	0.8658 [%]	0.5437 [%]	1.1940 [%]	2.4437 [%]	7.4638 [%]	0.5594 [%]	1.1968 [%]
42	0.3449 [%]	0.6263 [%]	0.4449 [%]	0.8604 [%]	0.9489 [%]	2.5030 [%]	0.1905 [%]	0.7688 [%]
43	0.4077 [%]	0.9165 [%]	0.5302 [%]	1.3654 [%]	1.2422 [%]	5.7513 [%]	0.4165 [%]	1.7299 [%]
44	0.3155 [%]	0.5927 [%]	0.4349 [%]	0.8471 [%]	0.8797 [%]	2.5662 [%]	0.1492 [%]	0.9719 [%]
45	0.3976 [%]	0.9512 [%]	0.5289 [%]	0.9771 [%]	1.4657 [%]	6.6356 [%]	0.3342 [%]	1.1761 [%]
46	0.3715 [%]	0.6785 [%]	0.4392 [%]	0.8407 [%]	0.8962 [%]	3.1448 [%]	0.1674 [%]	1.3694 [%]
47	0.4733 [%]	1.1331 [%]	0.5537 [%]	1.0531 [%]	1.5188 [%]	4.0149 [%]	0.3808 [%]	1.5031 [%]
48	0.3350 [%]	0.6039 [%]	0.4350 [%]	0.8438 [%]	0.8321 [%]	3.1276 [%]	0.1559 [%]	1.4820 [%]
49	0.3942 [%]	0.9808 [%]	0.5366 [%]	0.9426 [%]	1.2730 [%]	5.2190 [%]	0.3132 [%]	1.3452 [%]
50	0.3351 [%]	0.5552 [%]	0.4505 [%]	0.8033 [%]	0.8729 [%]	2.3531 [%]	0.1351 [%]	1.1672 [%]

Rys. 10. Pomiar harmonicznnych prądu zaznaczono harmoniczne przekraczające wartości dopuszczalne

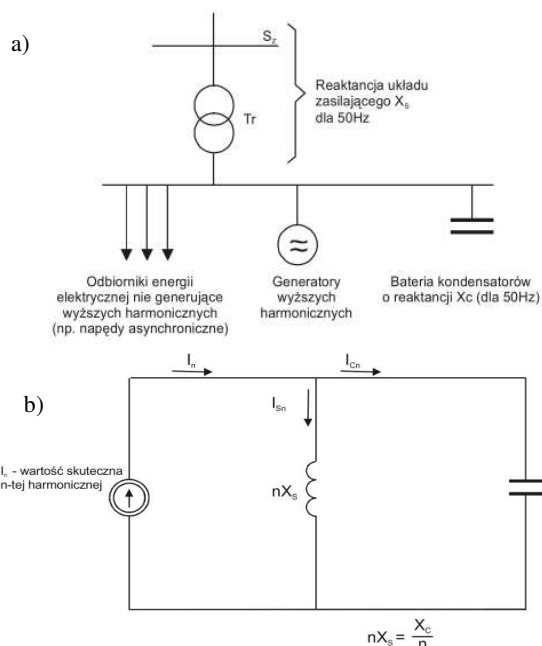
Reaktancję zastępczą baterii kondensatorów i sieci względem źródła prądu n-tej harmonicznnej można zapisać zgodnie z rys. 8 wzorem (1):

$$X_{Wn} = \frac{X_S X_C}{n X_S - \frac{X_C}{n}} \quad (1)$$

W przypadku rezonansu równoległego zachodzi dla n-tej harmonicznnej równość:

$$n X_S = \frac{X_C}{n} \quad (2)$$

Stąd mianownik wyrażenia (1) na reaktancję wypadkową osiąga wartość zerową, a tym samym reaktancja wypadkowa X_{Wn} osiąga teoretycznie wartości nieskończenie duże. Dla wydatku I_n źródła prądowego, niezależnego od obciążenia, na zaciskach baterii (szynach zbiorczych) napięcie wzrasta teoretycznie do nieskończenie dużej wartości. To napięcie wymusi nieskończona wartość prądu I_{Sn} obciążającego sieć (wzmocnienie n-tej harmonicznnej). W układach praktycznych elementy rezystancyjne oraz brak idealnej równości w zapisie równania (2) sprawiają, że prądy i napięcia towarzyszące rezonansowi osiągają wartości skończone, lecz na tyle wysokie, aby uważać je za groźne.



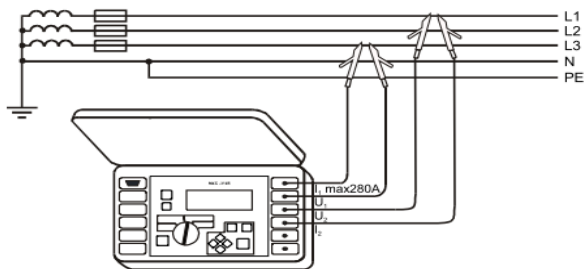
Rys. 11. Schemat układu zasilającego a) i schemat zastępczy z harmonicznymi prądu jako źródłem prądowym b)

Źródło harmonicznnych (np. przetwornica częstotliwości) „widzi” równoległe połączenie baterii o pojemności X_C oraz transformatora o impedancji rozproszenia X_S , które tworzą w tym układzie obwód rezonansu równoległego (Rys. 11). W czasie badań zmierzono za pomocą miernika impedancji pętli zwarcia MZC-310S impedancję $X_S=0,025\Omega$. Moc maksymalna kondensatorów wynosi 250 kVar ($X_C=U^2/Q=0,64 \Omega$), choć najczęściej występuje moc 130 kVar ($X_C=U^2/Q=400^2/130000=1,23 \Omega$). Łatwo wyliczyć że na podstawie zależności (2) w badanym układzie występuje rezonans dla 5 i 7 harmonicznnej:

$$n = \sqrt{\frac{X_C}{X_S}} = \sqrt{\frac{0,64}{0,025}} = 5,05$$

$$n = \sqrt{\frac{X_C}{X_S}} = \sqrt{\frac{1,23}{0,025}} = 7,01$$

Wniosek jest oczywisty: przy takich zakłóceniach prądu kompensator powinien być wyposaony w dławiki odstrajające od rezonansu.



Rys. 12. Schemat układu pomiaru impedancji MZC-310S [6]

3.4. Moc i energia bierna

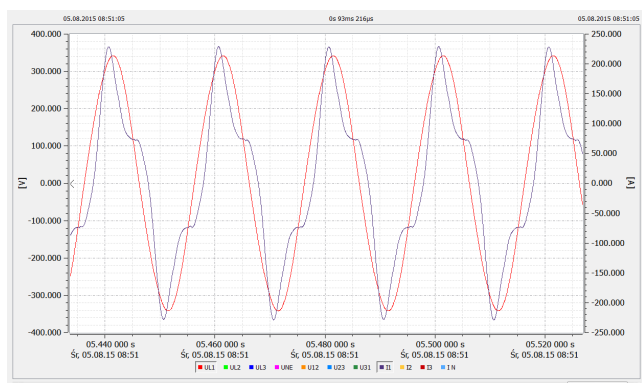
Ostatni analizowany przypadek dotyczył przekroczeń energii biernej pojemnościowej w systemie zasilania oświetlenia ulicznego z lampami wyposażonymi w źródła wysokoprężne sodowe. Zgodnie z informacjami przekazanymi przez zleceniodawcę w okresie letnim dochodziło do przekroczeń energii biernej pojemnościowej, która w okresach miesięcznych wynosiła 2MVarh. Już kilkugodzinny pomiar energią analizatorem PQbox 200 wykazał (tab. 3), że energia czynna jest wyznaczana dość dokładnie (błąd pomiaru 1,7%), zaś energia bierna pojemnościowa wyznaczana z blisko 44% błędem [11]. Pomiaru były jednak za krótkie (2h), by ocenić dokładność licznika, a dodatkowo zgodnie z normami [7, 8, 9] moc bierna powinna być wyznaczana z pierwszej harmonicznej napięcia i prądu. Niestety liczniki energii elektrycznej wykorzystują do wyliczenia mocy biernej inne algorytmy, w tym teorię mocy Budeanu, która definiuje prąd i napięcie w dziedzinie częstotliwości, jako sumę poszczególnych harmonicznych, a moc bierną opisuje równaniem:

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \sin \varphi_n \quad (3)$$

w którym n to rząd wyższej harmonicznej w prądzie i napięciu. Zgodnie z tą teorią wartość mocy biernej Q musi być

Tab. 3. Wyniki pomiarów poboru energii

Energia	odczyt z licznika z mnożnikiem 150/5 [kWh, kVArh]	Odczyt z analizatora PQ-Box 200 [kWh, kVArh]
Czynna	147,24	144,66
Bierna ind.	10,29	9,27
Bierna poj.	1,80	1,25



Rys. 13. Przebiegi napięcia i prądu fazowego przy pomiarach lamp wyładowczych

Szczegóły	Min	Średnia	Max
F	49.981 Hz	49.992 Hz	49.999 Hz
UL1	237.194 V	237.685 V	237.896 V
UL2	236.146 V	236.500 V	236.702 V
UL3	237.172 V	237.524 V	237.705 V
THD1	2.465 %	2.479 %	2.491 %
THD2	2.332 %	2.358 %	2.377 %
THD3	1.939 %	1.967 %	1.990 %
IL1	126.976 A	127.400 A	127.611 A
IL2	111.755 A	112.080 A	112.270 A
IL3	108.160 A	108.478 A	108.660 A
THD I1	36.553 %	36.841 %	37.054 %
THD I2	33.637 %	34.000 %	34.238 %
THD I3	32.114 %	32.546 %	32.809 %
THD IN	741.088 %	744.950 %	749.665 %
P L1	28.142 KW	28.268 KW	28.326 KW
P L2	24.950 KW	25.034 KW	25.086 KW
P L3	24.403 KW	24.487 KW	24.534 KW
QV L1	1.993 KVar	2.110 KVar	2.201 KVar
QV L2	1.098 KVar	1.193 KVar	1.267 KVar
QV L3	260.619 Var	254.993 Var	434.234 Var
QV total	3.378 KVar	3.657 KVar	3.897 KVar
PH L1	4.042 °	4.259 °	4.435 °
PH L2	2.515 °	2.725 °	2.889 °
PH L3	0.611 °	0.830 °	1.014 °
PF L1	0.933	0.934	0.935
PF L2	0.944	0.944	0.946
PF L3	0.950	0.950	0.952
PF total	0.942	0.943	0.944
tan(phi) L1	0.071	0.074	0.078
tan(phi) L2	0.044	0.048	0.050
tan(phi) L3	0.011	0.014	0.018
tan(phi)	0.043	0.047	0.050

Rys. 14. Wyniki pomiarów analizatorem obwodów oświetlenia

uzupełniona o wartość mocy dystorsji D , która powoduje, że teoria Budeanu jest spójna:

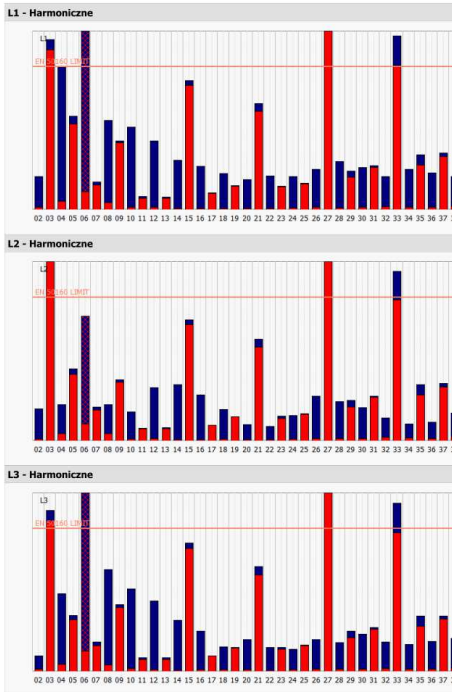
$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2 \quad (4)$$

Najbardziej rozpowszechnione obecnie algorytmy obliczania mocy [9, 10], z których korzystają analizatory między innymi PQ Box200, są opisane w normie DIN 40110-2. Według tej normy moc bierna liczona jest z zależności (5):

$$Q_{tot \Sigma} = \sqrt{Q_{v, \Sigma}^2 + D_{\Sigma}^2 + Q_u^2} \quad (5)$$

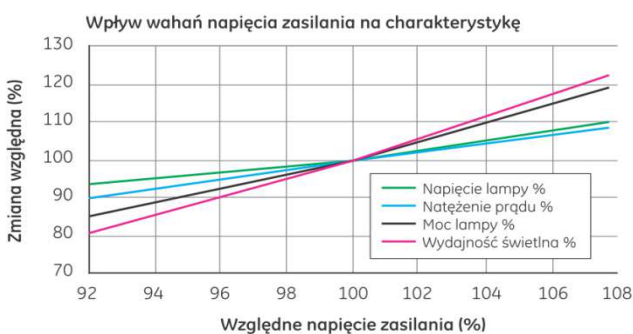
gdzie: $Q_{v, \Sigma}$ – moc bierna dla przebiegów o częstotliwości 50Hz we wszystkich fazach, D_{Σ} – suma mocy odkształcenia we wszystkich fazach, Q_u – asymetria mocy biernej. Moc bierna odkształceń D - zwana również mocą bierną harmonicznych - opisuje specjalną formę mocy biernej, powodowaną w sieciach prądu przemiennego i siły przez odbiorniki nieliniowe np. prostowniki w przekształtnikach jak na rysunku 6a) lub dławiki w lampach wyładowczych jak na rysunku 13. Harmoniczne prądu w kombinacji z napięciem sieci tworzą składowe mocy biernej, które nazywane są mocami biernymi odkształconymi. Z tab. 3 wynika, że kluczowym problemem w analizowanym przypadku jest silne odkształcenie prądu, które powoduje pogorszenie jakości napięcia. Występuje wówczas bardzo duża moc odkształceń, która w niektórych licznikach energii jest interpretowana jako moc bierna pojemnościowa i powoduje naliczanie dodatkowych opłat za energię bierną pojemnościową. Jako współczynnik mocy PF, współczynnik mocy czynnej lub współczynnik rzeczywisty określa się w elektrotechnice stosunek mocy rzeczywistej P do mocy pozornej S : $PF = P/S$. Współczynnik mocy zawiera się między 0 a 1. Niski $\tan \phi$ (Rys. 14) świadczy o niewielkiej zawartości mocy biernej indukcyjnej pochodzącej od podstawowej harmonicznej 50 Hz. Współczynnik mocy PF bliski 0,94 świadczy o tym, że moc odkształceń jest znaczna.

Pomiary napięcia i prądu w szafce oświetleniowej wykazały duże odkształcenia prądu, które powodują, że na długiej linii kablowej występują znaczne odkształcenia napięcia. 3, 27 33 i 45 - harmoniczne napięcia przekraczają wartości dopuszczalne, co pokazano na rys. 15.

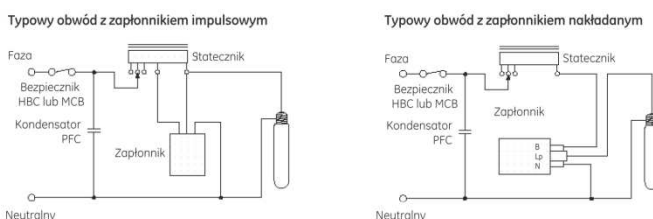


Rys. 15. Zawartość harmonicznych napięcia

Wysokoprężne lampy sodowe zastosowane do oświetlenia drogowego zapewniają dobrą skuteczność świetlną, zachowują jasność przez cały czas użytkowania, mają długą trwałość, dzięki czemu ograniczają koszty energii elektrycznej i eksploatacji. Ponadto są one kompatybilne zarówno ze statecznikami magnetycznymi i elektronicznymi zatwierdzonymi przez producenta źródła światła. Istotne znaczenie ma zastosowanie statecznika dostosowanego do napięcia zasilania podanego na oprawie. Typowe schematy połączeń obwodów sterujących z zapłonikiem „nakładanym” lub „impulsowym” zostały przedstawione na rysunku 18.



Rys. 16. Wpływ wahań napięcia na wydajność lampy sodowej



Rys. 18. Typowe układy zapłonowe [15]



Rys. 17. Przebiegi mocy czynnej, biernej pierwszej harmonicznej i kąta między pierwszą harmoniczną napięcia i prądu

W celu maksymalnego wydłużenia żywotności lamp istotne jest, aby po zamknięciu lamp w obudowie wzrost napięcia lampy nie przekraczał wartości 3% napięcia znamionowego. Zalecenia producentów i wpływ wahań napięcia pokazano na rys. 16. Lampy są przeznaczone do współpracy ze źródłami zasilania w zakresie od 220 V do 250 V 50/60 Hz i statecznikami dławikowymi o dostosowanej do lampy charakterystyce. W celu maksymalnego wydłużenia żywotności lampy, utrzymania strumienia świetlnego i jednolitego koloru, napięcie zasilania i charakterystyka statecznika powinny zawierać się w zakresie tolerancji $\pm 3\%$. Wahania zasilania w zakresie $\pm 5\%$ są dopuszczalne tylko przez krótki czas. Jest to możliwe do uzyskania poprzez pomiar średniego napięcia zasilania w instalacji i dobór stateczników z odpowiednimi parametrami (można przełączyć zaczepek w stateczniku na -10 V). Moc na kondensatorze PFC można opisać wzorem:

$$Q = U^2 \omega C \quad (6)$$

gdzie: U – napięcie fazowe, ω – prędkość kątowna napięcia sieci, C – pojemność kondensatora PFC.

Z wzoru (6) wynika, że moc bierna na kondensatorze wzrasta z kwadratem napięcia i przy przekroczeniu napięcia o 5% wzrośnie o ponad 10%, co powoduje przekompensowanie i występowanie energii biernej pojemnościowej. Dodatkowo moc bierna pojemnościowa występująca w ciągu dnia w układzie pomiarowym węzła drogowego wynika z występowania filtrów RFI, które pracują w ciągu dnia. Przy niedociążonej linii kablowej YAKY 4x240 w ciągu

dnia generowana jest moc bierna pojemnościowa o wartości około 360 VAR.

Opłaty miesięczne za generację energii biernej pojemnościowej w ciągu dnia są minimalne:

$$E_q = 360 \text{ VAR} \times 18 \text{ h} \times 31 \text{ dni} = 0,2 \text{ MVARh}, (34\text{zł})$$

Główną przyczyną powstawania opłat za energię bierną pojemnościową jest występowanie zbyt dużego napięcia na lampach. W czasie pomiarów, w stanie ustalonym (po rozgrzaniu się lamp wyładowczych), stwierdzono napięcie 237,5 V, to jest o 3,2% więcej niż napięcie znamionowe. Producenci oświetlenia nie zalecają, aby przekraczano próg 3%. Prawdopodobnie w godzinach nocnych przy nieobciążonych liniach SN napięcie jest jeszcze większe, co przekłada się na większe zużycie energii, szybsze zużycie źródeł światła i wygenerowanie mocy i energii biernej pojemnościowej. Weryfikacja tej hipotezy jest możliwa przy wykonaniu badań wielodniowych np. 7 dni zgodnie z normą PN-EN 50160.

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Badania wykazały przydatność analizatorów jakości energii do wyjaśniania przyczyn awarii kondensatorów w systemie energetycznym oraz występowanie zwiększonej mocy biernej pojemnościowej w przypadku badania oświetlenie ulicznego. W celu poprawy jakości energii elektrycznej w przyszłości i uniknięcia awarii, dobrym rozwiązaniem byłoby instalowanie analizatorów na wszystkich stacjach SN/nn oraz zbieranie danych pomiarowych. Badania wykazały, że konieczny jest stały monitoring zarówno napięcia, jaki i prądu oraz mocy czynnych i biernych. Okazują się, że nie wystarczy monitorować wyłącznie napięcia i częstotliwości, czyli parametrów, które określono w Rozporządzeniu Systemowym [13]. Ocenie należy także poddawać zawartość harmonicznych prądu oraz określić ich pochodzenie. Najczęściej przyczyną harmonicznych prądowych są nielinerne odbiorniki u odbiorcy energii, choć w wielu przypadkach mogą być zainstalowane u sąsiada, a odkształcone napięcie poprzez sieć operatora systemu powoduje straty u klienta, którego instalację badamy. Należy określić precyzyjnie odpowiedzialność Operatora Systemu Dystrybucyjnego oraz Odbiorcy Końcowego za wprowadzanie zaburzeń do sieci zasilającej. Urząd Regulacji Energetyki powinien być upoważniony do bieżącej kontroli poszczególnych parametrów JEE oraz powinien określić tryb oraz zasady rozstrzygania sporów. Brak uregulowań prawnych powoduje, że odbiorcy przemysłowi nie planują instalacji analizatorów ani urządzeń do kompensacji wyższych harmonicznych prądu.

5. BIBLIOGRAFIA

1. S. Ruiz-Alvarez, A. J. Saavedra-Montes, i E. A. Ospina-Serrano, „Analysis of harmonic pollution caused by typical loads in offices”, w *2015 IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA)*,

2015, ss. 1–6.

2. M. Włas, Z. Krzemiński, J. Pietryka, i J. Szewczyk, „Techniczne i ekonomiczne aspekty wykorzystania przekształtników dwukierunkowych w praktyce”, *Automatyka, Elektryka, Zakłócenia*, t. nr 4, ss. 26–33, 2011.
3. Z. Hanzelka, „Jakość dostawy energii elektrycznej zaburzenia wartości skutecznej napięć”, Wydawnictwo AGH. Kraków, 2013.
4. Z. Hanzelka: „Rozważania o jakości energii elektrycznej” *Elektroinstalator* 10/2001 [dostęp on-line na dzień 25.08.2016]: <http://www.twelvee.com.pl/42767005.php?c=%D0%B5>
5. Odyna P.: „Regulacja jakościowa z perspektywy Operatora Systemu Dystrybucyjnego”. *Piknik Jakości Energii* 23.10.2014 AGH Kraków <http://piknik.tauron-dystrybucja.pl>.
6. Instrukcja obsługi miernik impedancji pętli zwarcia MZC-310S – Wersja 3.5 z dnia 27.01.2016 dostęp on-line <http://www.sonel.pl/pl/katalog-produktow/pomiary-ochronne/mzc-310s.html>
7. PN-EN 62053-21:2006 Urządzenia do pomiarów energii elektrycznej (prądu przemiennego) -- Wymagania szczegółowe -- Część 21: Liczniki statyczne energii czynnej (klas 1 i 2)
8. PN-EN 62053-23:2006 Urządzenia do pomiarów energii elektrycznej (prądu przemiennego) -- Wymagania szczegółowe -- Część 23: Liczniki statyczne energii biernej (klas 2 i 3)
9. IEEE Std 1459-2010 Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions; IEEE, New York, 2010.
10. Papież K.: Pomiar mocy biernej z wykorzystaniem transformacji Hilberta w świetle normy IEEE Std 1459-2010. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, (2011), nr.4, 15-18
11. Wakieć A.: Wpływ dokładności pomiaru poszczególnych elementów układów pomiarowo rozliczeniowych energii elektrycznej na wartość różnicy bilansowej. *Energia Elektryczna* (2009), nr.4, 17-19
12. PN – EN 50160: 2010, „Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych”
13. Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z 04.05.2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego, Dz. U. Nr 93, poz. 623, 2007
14. Pawłęga A.: „Przepisy regulujące dopuszczalne zmiany parametrów JEE” Instytut Elektroenergetyki Politechnika Warszawska Dostęp online na dzień 21.01.2016 www.ien.pw.edu.pl/EIG/instrukcje/JAK_W_2_1.pdf
15. Czapp S.: Odształcenie prądu pobieranego przez urządzenia oświetleniowe i jego wpływ na instalację zasilającą *Acta Energetica* nr 11 rok 2011 Gdańsk

EFFECTIVE MEASUREMENT AND ANALYSIS OF ELECTRICAL ENERGY QUALITY

The article resetting legal status and parameters defining the quality of electricity (QoE). There are two types of measurement devices JEE - stationary analyzers and portable devices. It indicated the need for continuous monitoring of indicators QoE. This article presents four cases parameter measurement of electricity, where there was a failure of the power supply or capacitor Bank. Author present the results of measurements and explains the cause of the failure or reactive power appear.

Keywords: power quality measurements, resonance in power networks.