

POMIARY JAKOŚCI ENERGII W EKSPLOATACJI INSTALACJI I URZĄDZEŃ ELEKTRYCZNYCH ZAKŁADU PRZEMYSŁOWEGO

Marek OLESZ

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
tel: 58 347-18-20 e-mail: marek.olesz@pg.gda.pl

Streszczenie: W referacie opisano wyniki pomiarów dla instalacji elektrycznych zakładu przemysłowego z szczególnym uwzględnieniem baterii kondensatorów pracujących w obecności wyższych harmonicznych. Występowanie wysokich wartości harmonicznych prądowych w warunkach rezonansu pojemności baterii z indukcyjnością transformatora może być przyczyną przegrzewania i uszkodzenia izolacji kondensatorowej.

Analiza pomiarów z rejestratorów jakości energii elektrycznej umożliwia wprowadzenie zmian w instalacjach elektrycznych poprawiających bezpieczeństwo użytkownika oraz zmniejszenie kosztów eksploatacyjnych.

Słowa kluczowe: jakość energii elektrycznej, baterie kondensatorów, zapady i przebiecia, harmoniczne

1. WSTĘP

Układy elektroniczne, powszechnie stosowane w sterowaniu urządzeń produkcyjnych i przesyłaniu danych w obiektach przemysłowych, są wrażliwe na przebiecia i zapady napięcia zasilającego. Przy wymienionych zaburzeniach w instalacji elektrycznej, układy sterujące mogą powodować niepoprawną pracę części silnopiędowej urządzeń (przekształtniki napięcia, napędy silnikowe, spawarki elektryczne itp.) prowadzącą do utraty kontroli nad właściwym przebiegiem poszczególnych etapów procesu produkcyjnego. W związku z powyższym do prawidłowej eksploatacji niektórych urządzeń konieczny jest monitoring jakości energii dostarczanej przez energetykę zawodową oraz zastosowanie środków poprawiających ciągłość zasilania w niewrażliwych miejscach zakładu.

Spółka dystrybucyjna energii elektrycznej zobowiązana jest rozporządzeniem [2] i normą [1] do dostarczenia do przyłącza odbiorcy odpowiedniej jakości energii zdefiniowanej: częstotliwością, odchyleniem i asymetrią napięcia, współczynnikiem migotania światła, zapadami i przerwami w napięciu zasilającym oraz kształtem napięcia określonym zawartością wyższych harmonicznych.

Należy nadmienić, że w sytuacji znacznego poboru mocy, porównywalnej lub przekraczającej moc znamionową transformatora, odbiorca wprowadza niewłaściwą jakość energii przez pobór znacznych harmonicznych prądu obciążenia. Obserwowane wówczas odkształcenia napięcia w sieci, a przy pracy odbiorników niespokojnych zapady i przebiecia utrudniają prawidłową eksploatację urządzeń.

W tego rodzaju sytuacjach w urządzeniach i instalacjach mogą występować m. in.:

- niespodziewane wyłączenia wskutek nieprawidłowego działania zabezpieczeń – np. wyłączników różnicowo-prądowych,
- nadmierne wzrosty temperatury, prowadzące do wzrostu strat w transformatorach, maszynach elektrycznych, kondensatorach do poprawy współczynnika mocy $\cos\phi$,
- nieprawidłowe działanie urządzeń energoelektronicznych, elektronicznych i informatycznych,
- pobory mocy biernej pojemnościowej prowadzące do występowania dodatkowych kosztów zakupu energii elektrycznej.

Za przyłączem w wewnętrznej instalacji obiektu przemysłowego obowiązują odmienne wymagania dla jakości energii [3], które uzależniono od klas środowiska elektromagnetycznego, w których odbywa się eksploatacja urządzeń odbiorczych (klasa 1, 2, 3). Podobnie jak dla sieci publicznych norma [3] określa szereg wymagań dotyczących napięcia zasilającego podając jednoznaczne dla prawidłowej eksploatacji odbiorników energii elektrycznej wartości dopuszczalne.

W celu stwierdzenia ich dotrzymania wykonuje się w przyłączy głównym i w wewnętrznej sieci zasilającej zakładu pomiary jakości energii elektrycznej. Rejestracja stanów nieustalonych, zapadów i przebiec może pomóc w analizie problemów eksploatacyjnych, właściwym doborze aparatury łączeniowej i jej zabezpieczeń, weryfikacji procedur koordynacyjnych izolacji, ograniczeniu kosztów związanych z przekroczeniem poziomu mocy zamówionej oraz mocy biernej.

W pracy analizowano wyniki pomiarów jakości napięcia zasilającego w przyłączy zakładu przemysłowego, w którym obserwowano problemy eksploatacyjne związane z uszkodzaniem się kondensatorów w baterii do poprawy współczynnika mocy $\cos\phi$.

2. WYNIKI POMIARÓW JAKOŚCI NAPIĘCIA DLA ZAKŁADU PRZEMYSŁOWEGO

Badania parametrów napięcia w zakładzie przemysłowym wyposażonym w dużą liczbę odbiorników nieliniowych przeprowadzono w głównej rozdzielni zakładu na zaciskach niskiego napięcia transformatora zasilającego o parametrach: 15,75/0,4 kV, S=1000 kVA, $I_n=1450$ A,

układ połączeń Dyn5. Równolegle do transformatora przyłączono baterię do poprawy współczynnika mocy $\cos\phi$ o mocy biernej 325 kVar. Do rejestracji parametrów technicznych charakteryzujących jakość energii elektrycznej zgodnie z [3] użyto analizatora jakości energii typu 2292 firmy METREL, próbkującego rejestrowane napięcia w trybie standardowym, to znaczy w przypadku pomiarów jakości energii z częstotliwością 6400 Hz. Program komputerowy *PWRlink* współpracujący z przyrządem umożliwia analizę zebranych danych pomiarowych w celu wykonania stosownych analiz statystycznych według wymagań [3]:

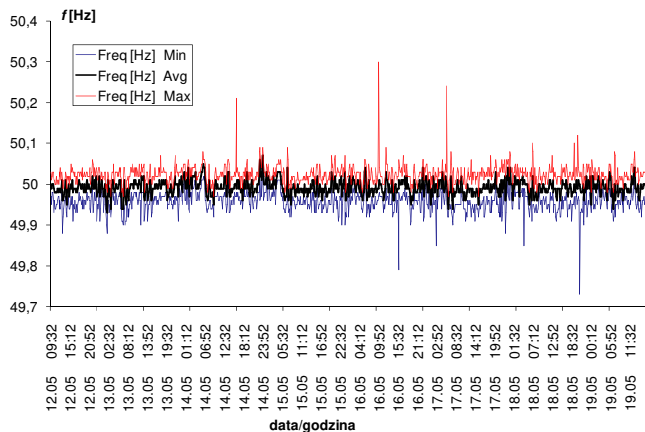
- częstotliwości napięcia, rejestrowano wartość maksymalną, minimalną i średnią z zebranych próbek za okresy 10-minutowe,
- poziomu napięcia, czyli wartości średnich, maksymalnych i minimalnych wyznaczonych ze zbioru napięć skutecznych kolejnych okresów w czasie 10 minut,
- całkowitego współczynnika harmonicznych napięcia THD_U i prądu THD_I wyliczanego w kolejnych 8 okresach (160 ms) napięcia zasilającego i prądu obciążenia; z zebranych przez 10-minutowy czas analizy próbek przyrząd wyznaczał wartość maksymalną i średnią całkowitego współczynnika zawartości harmonicznych,
- wartości poszczególnych harmonicznych tj. 3., 5., 7., 9., 11., 13. harmonicznej napięcia zasilającego i prądu obciążenia; z zebranych przez 10 minut próbek przyrząd wyznaczał wartość maksymalną dla poszczególnych wymiennionych powyżej harmonicznych.

Otrzymane wyniki pomiarów porównywano z parametrami dopuszczalnymi zaburzeń dla klasy 2, która dotyczy wewnętrznych miejsc przyłączenia urządzeń w instalacji obiektu przemysłowego oraz wspólnych miejsc połączenia z siecią publiczną.

2.1 Częstotliwość napięcia zasilającego

Częstotliwość napięcia zasilającego zakład nie wykroczyła poza zakres 50 Hz $\pm 0,3$ Hz w całym okresie rejestracji. Rejestrowane zmiany mieszczą się w dopuszczalnym zakresie, a przykład zmian częstotliwości napięcia pokazano na rys. 1.

Wykorzystywane w analizie jakości energii elektrycznej normy [1, 3] zalecają dopuszczalny przedział zmian częstotliwości 49,5 \div 50,5 Hz przez 95% dni w roku oraz 47 \div 52 Hz przez cały czas.



Rys. 1. Poziomy zarejestrowanych częstotliwości napięcia zasilającego, Min, Avg, Max, odpowiednio minimalna, średnia i maksymalna częstotliwość wyznaczona na podstawie kolejnych okresów napięcia w czasie 10 minut

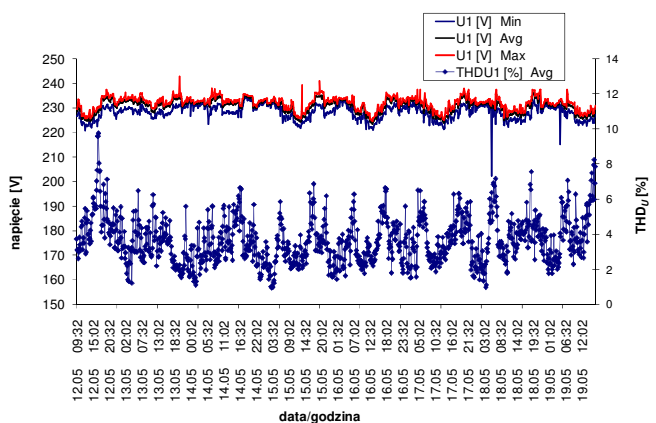
2.2 Napięcie fazowe

W tabelicy 1 zestawiono zbiorcze porównanie 95% kwantyli średnich i maksymalnych napięć skutecznych w poszczególnych fazach obliczonych za okresy 10-minutowe. W trakcie pomiarów nie zanotowano zmian poziomu napięcia zasilającego ponad wartości dopuszczalne zawierające się zgodnie z wymaganiami normy [3] w zakresie 207 \div 253 V.

Wartości skuteczne napięcia wyznaczone za kolejne okresy 20 ms zawierają się w zakresie 202 \div 246 V (rys. 2). Różnica napięć pomiędzy poszczególnymi fazami jest rzędu pojedynczych woltów. W czasie tygodniowej rejestracji wystąpiło 0 przerw w zasilaniu i 1 zapad wynikający z wewnętrznych stanów przejściowych w czasie czynności łączeniowych zakładu. Podane w tabeli kwantyle 95% wartości średnich zawierają się w dopuszczalnym zakresie 230 V $\pm 10\%$.

Tablica 1. Kwantyle 95% wartości średnich i maksymalnych ze zbioru napięć skutecznych rejestrowanych w kolejnych okresach 10 minutowych

parametr	jednostka	wartość dop.	wartość maksym. w okresie 10 min			wartość średnia za okres 10 min. – kwantyl 95%		
			L1	L2	L3	L1	L2	L3
poziom wymagany dla zmian napięcia: 230 V $\pm 10\%$								
maksymalne	% U_n	10	2,72	4,26	3,94	0,86	3,11	2,43
minimalne	% U_n	-10	-2,83	-1,37	-1,29	-2,31	-1,1	-1,06
przerwy w zasilaniu	-	-	0	0	0	-	-	-
zapady	-	-	1	1	7	-	-	-
wsp. migotania światła P_{lt}	P_{lt}	1	0,98	0,46	0,47	0,42	0,41	0,43
poziom wymagany dla zmian częstotliwości: 50 Hz $\pm 1\%$								
maksymalna	%	1	0,13			-0,03		
minimalna	%	-1	-0,14			-0,08		



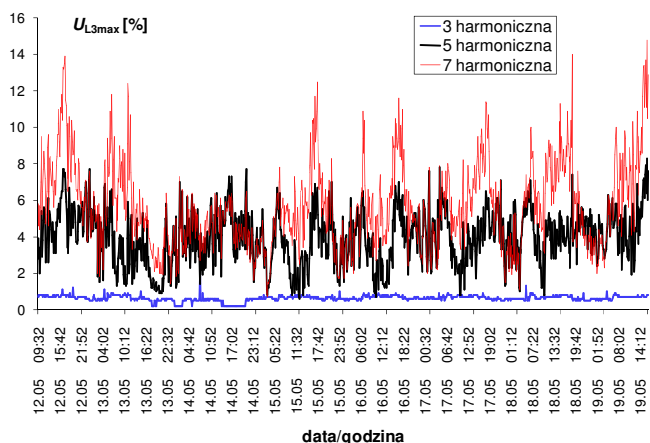
Rys. 2. Przykładowe wartości skuteczne napięć fazowych w miesięcznym okresie pomiarowym, U_1 Min, Avg, Max, odpowiednio minimalna, średnia i maksymalna wartość skuteczna napięcia fazy L1 obliczona na podstawie kolejnych okresów napięcia w czasie 10 minut, $THDU_1$ – średni współczynnik zawartości harmonicznych napięcia obliczony na podstawie kolejnych 8 okresów (160 ms)

Występujące zmiany napięcia w zakresie 202 V \div 246 V, mające miejsce w fazach L1, L2, L3 mogą wynikać z różnic rezystancji połączeń układu szyn zasilających lub nierównomierności obciążenia poszczególnych faz. Na przykładowym przebiegu zmian wartości maksymalnych

średnich i minimalnych napięcia fazy L1 w ciągu tygodnia można zaobserwować periodyczne zmiany wynikające z pracy zakładu w godzinach od 6⁰⁰ do 18⁰⁰. Około godziny 12⁰⁰ rejestrowano najniższy poziom napięcia zasilającego w sieci, przy największych wahaniami napięcia związanych z różnicą pomiędzy wartościami maksymalnymi i minimalnymi rejestrowanymi w cyklu 10-minutowym.

2.3 Harmoniczne napięcia

Przykładowy wykres współczynnika zawartości harmonicznym THD_U w fazie L3 pokazany na rys. 3 wskazuje na niewielką ilość harmonicznym napięcia za wyjątkiem składowej piątej i siódmej (tab. 2, rys. 3).



Rys. 3. Trzecia, piąta i 7 składowa harmonicznym napięcia fazy L3 (wartość maksymalna), która przekracza w pojedynczych okresach 10-minutowy uśredniony dopuszczalny poziom podany w [1, 3]

W celu porównania poziomów harmonicznym z wartościami progowymi wyznacza się kwantyle 95% z wartości średnich obliczanych za okresy 10-minutowe. Poziom THD_U nie przekracza 6%, poza krótkotrwałymi wzrostami do 11% mającymi miejsce w fazach L1, L2 i L3. Szczegółowa analiza poszczególnych harmonicznym wskazuje na dominujący udział składowych 5. i 7., przy czym ich poziom odpowiednio nie przekracza 3,5% i nieznacznie przekracza wymagane normą [3] 5%. Harmoniczne parzyste nie występują, a pozostałe nieparzyste oprócz 5, 7 są poniżej 1,1%. Otrzymane wartości oprócz poziomu 7. harmonicznym napięcia są zgodne z wymaganiami [3] zestawionymi w tablicy 2.

Należy nadmienić, że pomiary wykazały występowanie wartości maksymalnych 7. harmonicznym napięcia nawet do 15%, co przykładowo pokazano na rysunku 3.

Według rysunku 4 pochodzącego z innej rejestracji zdarzały się 10-minutowe okresy, w których średnia wartość 7. harmonicznym osiągała aż 8,2%. Duże odkształcenia napięcia powodowały m. in. przepływ znacznych prądów 7. harmonicznym przez baterię kondensatorów, a w konsekwencji ich nadmierne nagrzewanie prowadzące do zmiany kształtu, aż do rozerwania obudowy włącznik. Odkształcenia napięcia wymuszają również znaczne poziomy składowych harmonicznym w prądzie zasilającym, co może powodować nadmierne nagrzewanie transformatora i dalsze odkształcanie krzywej napięcia zasilającego.

W tego rodzaju sytuacjach należy rozważyć zastosowanie odpowiednich filtrów pasywnych lub aktywnych powodujących przesunięcie częstotliwości rezonansowej układu transformator – bateria kondensatorów w zakres częstotliwości, przy których poziom

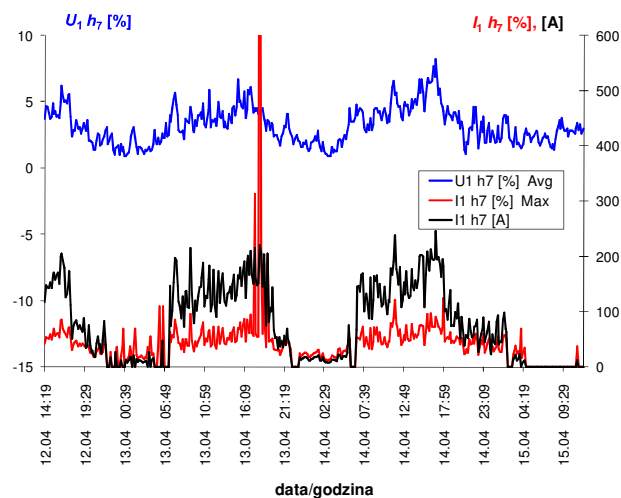
harmonicznym napięciowych jest niewielki (np. dla harmonicznym parzystych).

Tablica 2. Kwantyle 95% wartości średnich i maksymalnych wybranych harmonicznym nieparzystych rejestrowanych w okresach 10-minutowych

harmonicznym	wartość dopuszczal. [% U _n]	wartość maksym. w okresie 10 min. [% U _n]			wartość średnia za okres 10 min. - kwantyl 95% [% U _n]		
		L1	L2	L3	L1	L2	L3
THD _U	8	9,74	11,19	11,56	6,03	6,66	6,89
150 Hz	5	0,7	0,6	0,7	0,6	0,3	0,6
250 Hz	6	4,7	4,9	5,4	3,1	3,3	3,6
350 Hz	5	8,1	9,7	9,9	4,8	5,5	5,7
450 Hz	1,5	0,1	0,4	0,4	0	0,1	0
550 Hz	3,5	2,1	1,9	2,4	1	1	1,1
650 Hz	3	0,7	1,5	1,2	0,3	0,5	0,4
750 Hz	0,5	0	0	0	0	0	0
850 Hz	2	0,3	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1
950 Hz	1,5	0,3	0,3	0,3	0	0	0

3. USZKADZANIE KONDENSATORÓW

W celu określenia przyczyn uszkodzania kondensatorów polegających na wybrzuszeniu i pękaniu obudów przeanalizowano wpływ wyższych harmonicznym napięcia podany w pracach [4÷9].



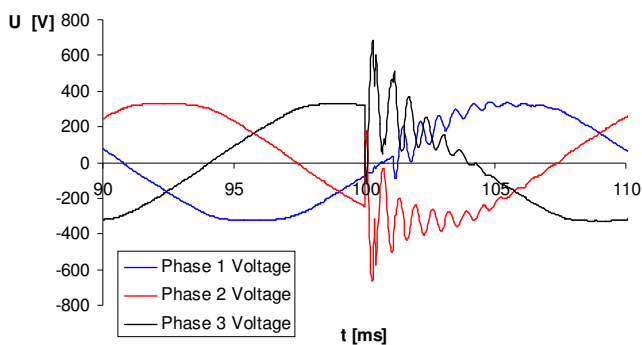
Rys. 4. Siódma harmonicznym napięcia U1 h7 Avg (wartość średnia) przekracza wg [1, 3] dopuszczalny poziom 5%, I1 h7 – wartości maksymalne prądu 7. harmonicznym

Z monografii [4] wiadomo, że folia polipropylenowa w zakresie częstotliwości powyżej 50 Hz wykazuje nawet obniżenie poziomu współczynnika strat dielektrycznych tgδ. Dodatkowo, obserwuje się nieznaczny wpływ temperatury w zakresie 223K – 423K na poziom współczynnika strat zmierzonego przy częstotliwości 1 kHz. Nowe, niestarzone próbki folii polipropylenowej charakteryzują się w przybliżeniu stałą wartością współczynnika tgδ na poziomie około 0,0002. Dzięki niewielkiemu współczynnikowi temperaturowemu obserwuje się stałą pojemność kondensatorów przy zmianach temperatury.

Na skutek starzenia termicznego i elektrycznego współczynnik strat wzrasta nawet 10-krotnie, co powoduje wzrost temperatury obudowy o 20 K, a w konsekwencji

kilkukrotne skrócenie czasu życia izolacji kondensatora [5, 6, 7]. W związku z powyższym, dokumenty normalizacyjne IEEE [8, 9] określają szereg wymagań parametrów jakościowych energii elektrycznej oraz izolacji kondensatorów zapewniających utrzymanie baterii w ruchu. Norma IEEE 519 [8] zdecydowanie zaostroża wymagania zawarte w dokumentach [2, 3] proponując dopuszczalny 5% poziom THD oraz nieprzekraczalną 20% głębokość krótkotrwałych mikrosekundowych zapadów napięcia. Jednocześnie zwraca się uwagę na zawartość harmonicznych prądowych, określaną procentowo w stosunku do znamionowego prądu obciążenia. Dla nieparzystych składowych harmonicznych, do 11. włącznie poziom ten wynosi zaledwie 4%.

Innym problemem eksploatacyjnym baterii kondensatorów do poprawy współczynnika mocy $\cos\phi$ są przepięcia towarzyszące czynnościom łączeniowym. Na rysunku 5 przedstawiono typowy przebieg przepięcia przy załączaniu baterii o mocy 20 kVAr, przy którym amplituda osiągnęła 800 V, a czas trwania stanu nieustalonego wyniósł 5 ms.



Rys. 5. Przepięcie wywołane załączeniem członu 20 kVAr baterii kondensatorów

Amplitudy napięcia i prądu towarzyszące załączeniom baterii są uwzględniane przy projektowaniu styczników pracujących w kategoriach AC-6 b. Po wykonaniu określonej granicznej liczby łączy występuje pogorszenie stanu styków stycznika załączającego kondensator, co może powodować sporadyczne przepięcia o wartościach amplitudy napięcia do 700 V, a następnie cykliczne stany nieustalone napięcia i prądu.

4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono w instalacji elektrycznej zakładu parametry jakościowe napięcia zasilającego zgodne z wymaganiami normy [3], za wyjątkiem 7. harmonicznej napięcia.

Obserwowane 95% kwantyle dla uśrednionych za 10 minut wahań napięcia zasilającego pozostają w zakresie 224 V ÷ 237 V (pomiar w okresie 20 ms 202 V ÷ 246 V) i są zgodne z wymaganiami normy odnośnie poziomu napięcia zasilającego.

Nie stwierdzono odchyłań częstotliwości poza wartości dopuszczalne.

Liczne odbiorniki o charakterze nieliniowym pobierające znaczne prądy odkształcone powodują, że w czasie pracy zakładu uśredniony za okresy 10-minutowe współczynnik zawartości harmonicznych THD_U w napięciu zasilającym dochodzi nawet do 11% (poza godzinami pracy zakładu THD_U wynosi tylko 3%).

Obserwowana wysoka wartość THD_U, a szczególnie 7. harmonicznej napięcia zasilającego wymusza krytyczne wartości prądu w baterii kondensatorów, które są prawdopodobną przyczyną przegrzewania izolacji kondensatorowej i odkształcania ich obudów.

5. BIBLIOGRAFIA

1. PN – EN 50160: 2010, Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych.
2. Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z 04.05.2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego, Dz. U. Nr 93, poz. 623, 2007.
3. PN-EN 61000-2-4:2003 (U), Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) - Część 2-4: Środowisko - Poziomy kompatybilności dotyczące zaburzeń przewodzonych małej częstotliwości w sieciach zakładów przemysłowych.
4. Zalewski J., Dielektryki kondensatorów energetycznych, Studia i monografie, z. 20, Wyższa Szkoła Inżynierska w Opolu, 1988.
5. Sebillote E., Theoleyre S. i inni, AC Degradation of Impregnated Polypropylene Films, IEEE Trans. on Electrical Insulation, vol. 27, no. 3, June 1992.
6. Cygan S. P., Laghari J. R., Effect of Multistress Aging (Radiation, Thermal, Electrical) on Polypropylene, IEEE Trans. on Nuclear Science, vol. 38, no. 3, June 1991.
7. Gallay R., Metallized Film Capacitor Lifetime Evaluation and Failure Mode Analysis, Proceedings of the CAS-CERN Accelerator School: Power Converters, Baden, Switzerland, 7–14 May 2014, (CERN, Geneva, 2015).
8. IEEE SM 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.
9. IEEE Std 18™-2002, IEEE Standard for Shunt Power Capacitors, IEEE Power Engineering Society 2002.

POWER QUALITY MEASUREMENTS IN OPERATION OF ELECTRICAL DEVICES AND SYSTEMS IN INDUSTRY

The paper presents the results of measurements of electrical industrial plant with a detailed consideration of capacitors operating in a harmonic environment. The seventh harmonics of supply voltage, reaching high average value of 16% has been detected in tested installation. Due to the resonance phenomena, amplification and propagation of current harmonics causes in capacitor banks overheating as well as deforming the cases. Furthermore recordings of transient states, allowed to register overvoltages involved while switching on the capacitor bank. Data analysis of power quality recorder in electrical installations improving safety and reducing operating costs.

Keywords: power quality energy, capacitor banks, dips and overvoltages, harmonics