

Oddziaływanie przemienników częstotliwości na jakość energii elektrycznej w układzie potrzeb własnych elektrowni.

Część I - Badania obiektowe

Streszczenie. W artykule przedstawiono ocenę oddziaływania przemienników częstotliwości na jakość energii w sieci zasilającej. Oceny dokonano na podstawie pomiarów parametrów napięcia zasilającego, przeprowadzonych w rzeczywistej sieci o napięciu znamionowym 6 kV, do której zostały przyłączone napędy dużej mocy z przemiennikami częstotliwości. Wyznaczone parametry jakościowe porównano z obowiązującymi limitami. W artykule przedstawiono wybrane wyniki pomiarów oraz ich analizę i wnioski.

Abstract. In the paper the assessment of influence of frequency converters on power quality in the supplying network is presented. The assessment was made on the basis of voltage monitoring in real 6 kV network with high power frequency converter drives. Power quality indices determined from measurements were compared with their limits. Selected results of measurements as well as their analysis and conclusions are presented in the paper. (Influence of frequency converters on power quality in power station ancillary services network. Part 1 – Monitoring in real network)

Słowa kluczowe: przemienniki częstotliwości, napędy przekształtnikowe, jakość energii, parametry napięcia zasilającego

Keywords: frequency converters, converter drives, power quality, supplying voltage indices

doi:10.12915/pe.2014.01.07

Wstęp

W sieciach elektroenergetycznych potrzeb własnych elektrowni coraz częstsze zastosowanie znajdują układy napędowe średniego napięcia z regulacją prędkości obrotowej za pomocą przemienników częstotliwości. Rozwiązanie takie przynosi udokumentowane korzyści techniczne i ekonomiczne, takie jak poprawa właściwości eksploatacyjnych napędu oraz zwiększenie efektywności energetycznej [1, 2, 3, 4]. Z drugiej jednak strony przemienniki częstotliwości, jak wszystkie urządzenia nieliniowe, wpływają na jakość energii elektrycznej w sieci, do której są przyłączone.

Jakość energii elektrycznej odnosi się do pewnych znormalizowanych cech (parametrów) napięcia zasilającego, które charakteryzują poziom określonego zaburzenia elektromagnetycznego¹, powodującego zmiany w idealnym przebiegu napięcia.

Odbiorniki o nieliniowej charakterystyce napięciowo-prądowej są źródłami wyższych harmonicznych prądu. Przepływ prądów wyższych harmonicznych przez sieć zasilającą powoduje spadki napięcia dla tych harmonicznych na elementach sieci, a w konsekwencji odkształcenie napięcia zasilającego w węzłach sieci, niekorzystne z punktu widzenia innych zasilanych odbiorników. Ponadto, nadmierny poziom zawartości harmonicznych w prądzie obciążenia napędów ogranicza przepustowość transformatorów zasilających, może także powodować zakłócenia w pracy zabezpieczeń elektroenergetycznych.

Praca napędów przekształtnikowych w układach potrzeb własnych elektrowni wiąże się z częstą zmianą pobieranej mocy czynnej i biernej. Konsekwencją zmian mocy są zmiany wartości skutecznej napięcia zasilającego, stanowiące jeden z parametrów jakości energii elektrycznej.

Wiedza na temat wpływu pracy napędów na wartości parametrów jakościowych napięcia jest istotna przy projektowaniu nowych układów potrzeb własnych elektrowni i elektrociepłowni. Ocena ilościowa oddziaływań dla projektowanego napędu jest możliwa jedynie na drodze

symulacyjnej, przy wykorzystaniu modelu napędu z przemiennikiem częstotliwości. W ogólnym przypadku można przyjąć następujący tok postępowania:

1. Wyznaczenie parametrów jakości napięcia zasilającego dla obiektu rzeczywistego
2. Odzworowanie obiektu rzeczywistego za pomocą modelu. Weryfikacja parametrów modelu na podstawie danych pomiarowych
3. Adaptacja modelu symulacyjnego do potrzeb projektowanego napędu i wyznaczenie badanych oddziaływań.

W opisany sposób przeprowadzono analizę oddziaływań przemienników częstotliwości zastosowanych w napędach potrzeb własnych zero-emisyjnych bloków energetycznych o mocy 900 MW na parametry ultranadkrytyczne, o sprawności brutto powyżej 50%, przewidywanych do wprowadzenia w krajowym systemie elektroenergetycznym. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki pomiarów parametrów jakości napięcia zasilającego przeprowadzonych w obiekcie rzeczywistym. Modelowanie i symulacja (według p. 2 i 3) zostaną przedstawione w części II artykułu.

Ocena jakości energii elektrycznej

W istniejących i eksploatowanych sieciach elektroenergetycznych jakość energii ocenia się na drodze pomiarowej, przez porównanie zmierzonych wartości parametrów napięcia zasilającego z ich wartościami dopuszczalnymi. Parametry te oraz ich wartości dopuszczalne zdefiniowane są w normie PN-EN 50160 [5], w odniesieniu do punktu przyłączenia instalacji odbiorcy niskiego (nn) lub średniego napięcia (SN) do sieci publicznej, tzw. Punktu Wspólnego Połączenia (PWP). Dopuszczalne wartości parametrów jakościowych podane w normie PN-EN 50160 są z reguły zgodne z poziomami kompatybilności elektromagnetycznej określonymi dla poszczególnych zaburzeń w normach IEC.

Podstawowym dokumentem określającym zarówno standardy jakościowe obsługi odbiorców, jak i parametry techniczne napięcia zasilającego w krajowym systemie elektroenergetycznym jest Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 20.12.2004 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego [6] stanowiące akt wykonawczy do Ustawy Prawo energetyczne [7]. Graniczne wartości parametrów napięcia podane są w Rozporządzeniu w zależności od napięcia znamionowego sieci, do której

¹ Zgodnie z [PN-T-01030 1996], zaburzeniem elektromagnetycznym jest każde zjawisko elektromagnetyczne, które może spowodować pogorszenie działania urządzeń. Terminu „zaburzenie” używa się w elektroenergetyce często zamiennie z terminem „zakłócenie”, chociaż norma stosuje to ostatnie w znaczeniu skutku działania zaburzenia.

przyłączani są odbiorcy energii². W odniesieniu do sieci SN i nn są one zgodne z odpowiednimi wartościami zawartymi w normie [5].

Normalizowanymi parametrami jakości energii elektrycznej są następujące wielkości:

- zmiana częstotliwości³

$$(1) \quad \Delta f_{\%} = \frac{f_L - f_n}{f_n} 100\%$$

- zmiana napięcia⁴

$$(2) \quad \Delta U_{L\%} = \frac{U_L - U_c}{U_c} 100\%$$

- wskaźnik długookresowego migotania światła⁵

$$(3) \quad P_{It} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^{12} P_{st_i}^3}{12}}$$

- współczynnik asymetrii napięcia

$$(4) \quad K_{2U\%} = \frac{U_{1(2)}}{U_{1(1)}} 100\%$$

- względna wartość h -tej harmonicznej napięcia

$$(5) \quad U_{h\%} = \frac{U_h}{U_1} 100\%$$

- całkowity współczynnik odkształcenia harmonicznymi

$$(6) \quad THD_{\%} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}}{U_1} 100\%$$

Występujące we wzorach (1.1 ÷ 1.6) wielkości oznaczają:

f_L – uśredniona w przedziale pomiarowym częstotliwość napięcia,

f_n – częstotliwość znamionowa,

U_c – wartość skuteczna napięcia deklarowanego w punkcie PWP,

U_L – uśredniona w przedziale pomiarowym wartość skuteczna napięcia zasilającego (fazowego bądź międzyfazowego),

$U_{1(1)}$ – uśredniona w przedziale pomiarowym wartość skuteczna składowej zgodnej harmonicznej podstawowej napięcia zasilającego,

$U_{1(2)}$ – uśredniona w przedziale pomiarowym wartość skuteczna składowej przeciwnej harmonicznej podstawowej napięcia zasilającego,

U_h – uśredniona w przedziale pomiarowym wartość skuteczna napięcia h -tej harmonicznej ($h = 1, \dots, 40$),

U_1 – uśredniona w przedziale pomiarowym wartość skuteczna harmonicznej podstawowej napięcia zasilającego,

P_{st} – uśredniona w przedziale pomiarowym wartość wskaźnika krótkookresowej uciążliwości migotania światła

² Podmioty przyłączane do sieci elektroenergetycznej dzieli się na 6 grup przyłączeniowych, zależnie od napięcia znamionowego sieci, do której są bezpośrednio przyłączani.

³ Parametr ten, wspólny dla sieci elektroenergetycznych połączonych z krajowym systemem elektroenergetycznym (KSE) nie jest dalej analizowany.

⁴ Parametr ten dotyczy zmian napięcia powodowanych zmianami całkowitego obciążenia sieci.

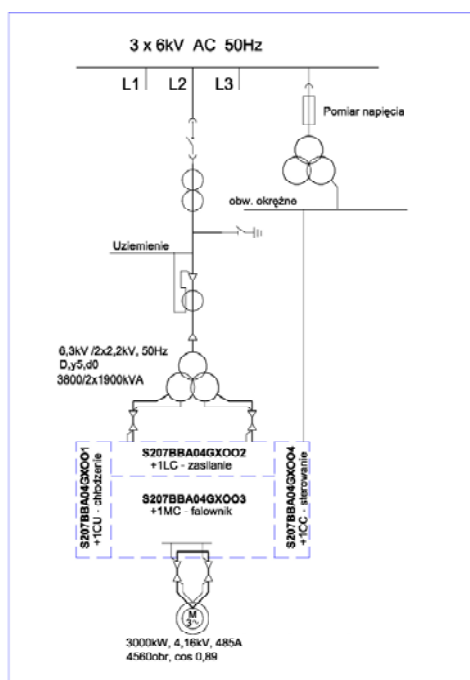
⁵ Migotaniem światła nazywa się wrażenie niestabilności postrzegania wzrokowego spowodowane zmianą strumienia świetlnego źródła światła. Przyczyną zjawiska migotania są wahania napięcia.

(pomiar przyrządem spełniającym wymagania normy PN-EN 61000-4-15 [8].

Zasady pomiaru i oceny wskaźników jakości energii elektrycznej zdefiniowane są w normie PN-EN 61000-4-30 [9]. Dokładne pomiary parametrów jakościowych w celu weryfikacji z postanowieniami norm i przepisów zakwalifikowane są do klasy A, dla której wymaga się określonego przedziału niepewności. Dla tej klasy pomiarowej określone są procedury i metody pomiarowe.

Opis badanego obiektu i metody pomiaru

Pomiary wielkości elektrycznych charakteryzujących jakość napięcia zasilającego przeprowadzono dla jednego z falownikowych układów napędowych o napięciu znamionowym 6 kV, zastosowanych do napędu pompy wody zasilającej w sieci potrzeb własnych istniejącej elektrociepłowni (rys. 1).



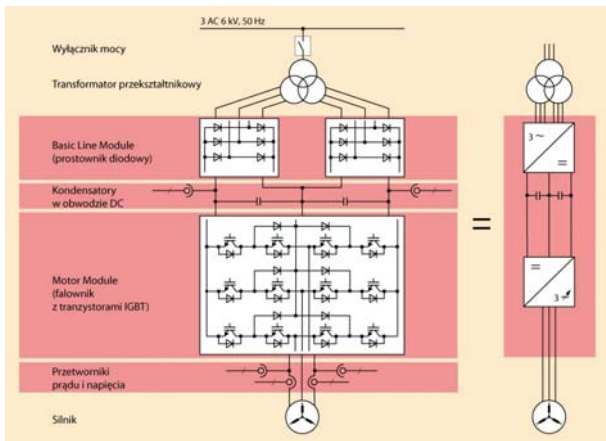
Rys.1. Schemat układu napędowego z przemiennikami częstotliwości

Do zasilania falownika wykorzystano transformator trójzwojowy w wykonaniu specjalnym, o następujących danych znamionowych: moc znamionowa $S_n = 3800$ kVA, napięcia znamionowe $U_n = 6,3/2,2/2,2$ kV, napięcia zwarcia $u_z = 8\%/8\%$, grupa połączeń Dd0y5, zakres regulacji $\pm 2 \times 2,5\%$. Zastosowano 12-pulsowy falownik z aktywnym obwodem wejściowym i z wyjściowym filtrem pojemnościowym. Schemat falownika przedstawiono na rysunku 2.

Pomiary zrealizowano zgodnie z wymaganiami obowiązujących przepisów za pomocą dedykowanych do takich badań analizatorów typu Fluke 1760, spełniających wymagania przyrządów klasy A. Analizator został przyłączony w rozdzielni 6 kV w polu zasilającym falownik pompy wody zasilającej.

Okres pomiarowy obejmował jeden tydzień. Pomiar wykonywany był w sposób ciągły, przy długości okna pomiarowego równej 0,01 s. Wyznaczane wielkości były uśredniane w czasie 10 minut, za wyjątkiem wskaźnika długookresowego migotania światła, dla którego założono 2 godzinny przedział uśredniania. Do oceny jakości energii wybrano percentyle 0,95 uśrednionych wskaźników⁶.

⁶ Percentyle 0,95 są parametrami statystycznymi; są to wartości, które nie są przekraczane przez 95 % czasu obserwacji.

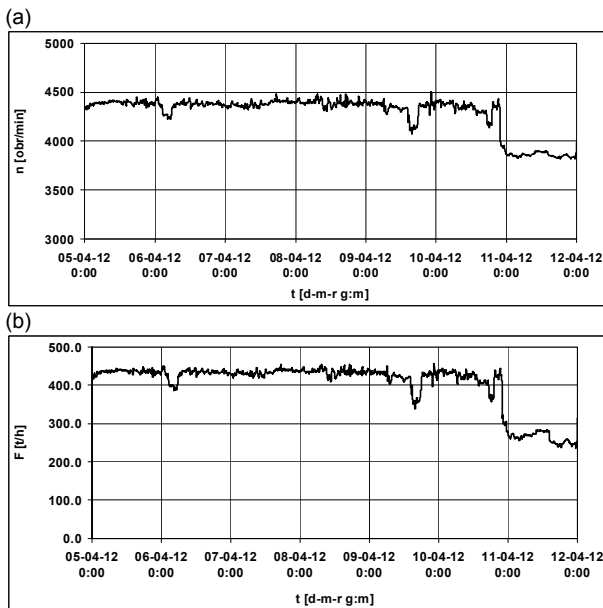


Rys.2. Schemat układu napędowego z przemiennikami częstotliwości

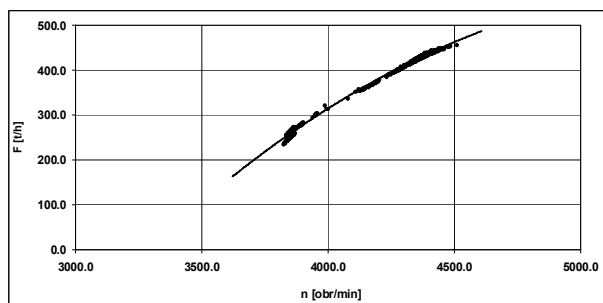
Wyniki i analiza pomiarów

Poniżej przedstawiono wybrane wyniki zarejestrowanych w okresie pomiarowym wielkości.

Wydajność pompy wody zasilającej jest regulowana poprzez zmianę prędkości obrotowej układu napędowego. Na rysunku 3 przedstawiono wartości prędkości oraz odpowiadające im zmiany wydajności pompy, zarejestrowane w okresie pomiarowym. Zależność wydajności pompy od prędkości silnika ilustruje rysunek 4.

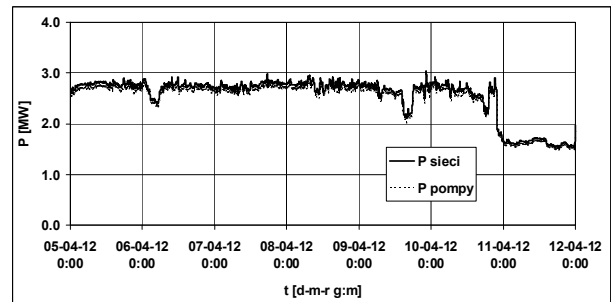


Rys.3. Zmiany prędkości obrotowej silnika badanego układu napędowego (a) oraz wydajności pompy wody zasilającej (b) w okresie pomiarowym

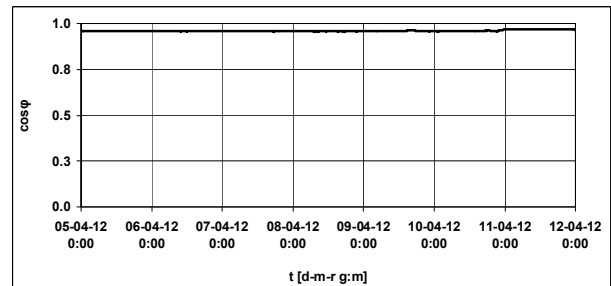


Rys.4. Zależność wydajności pompy wody zasilającej od prędkości obrotowej silnika napędowego

Układ napędowy pracuje ze zmienną mocą czynną przy prawie stałej wartości współczynnika mocy, równej 0,96. Zmiany tych wielkości w okresie pomiarowym pokazano odpowiednio na rysunkach 5 i 6.

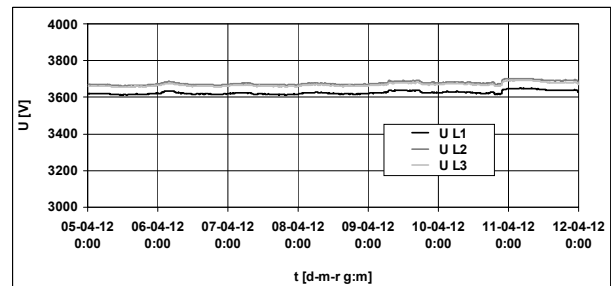


Rys.5. Pobór mocy czynnej układu napędowego w okresie pomiarowym

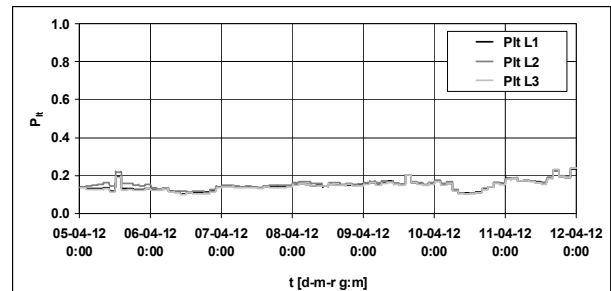


Rys.6. Zmiany wartości $\cos \phi$ układu napędowego w okresie pomiarowym

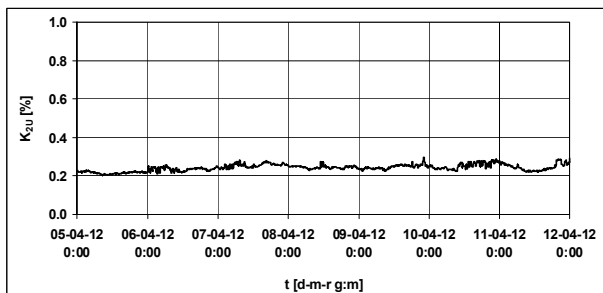
Na kolejnych rysunkach przedstawiono zmiany parametrów jakościowych napięcia zasilającego: wartości skuteczne napięć fazowych (rys. 7), wskaźnik długookresowego migotania światła (rys. 8), współczynnik asymetrii (rys. 9) oraz harmoniczne i współczynnik THD napięcia (rys. 10).



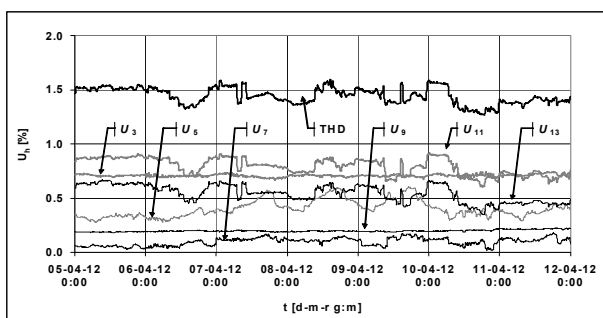
Rys.7. Zmiany uśrednionych wartości skutecznych napięć fazowych w okresie pomiarowym



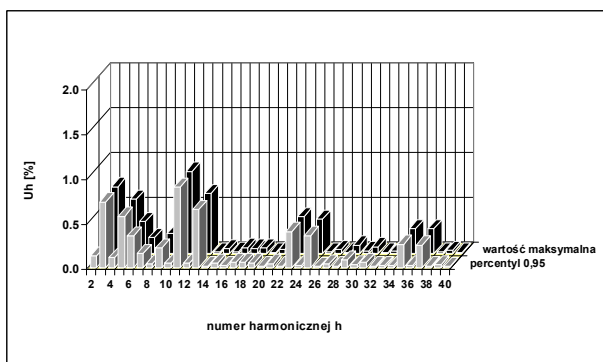
Rys.8. Zmiany wartości wskaźników długookresowego migotania światła w okresie pomiarowym



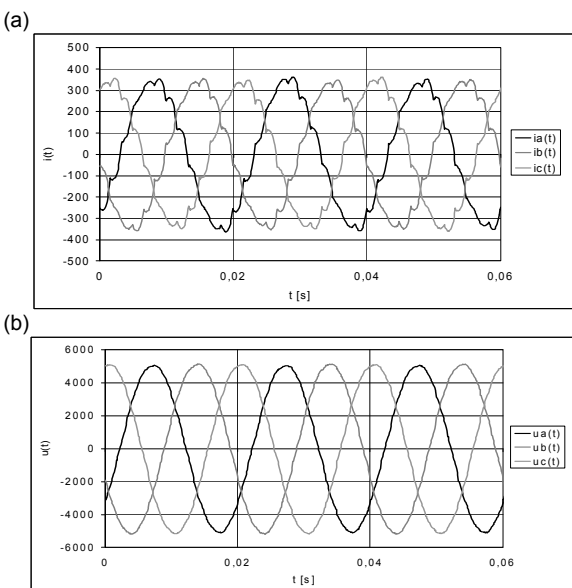
Rys.9. Zmiany wartości współczynnika asymetrii napięcia w okresie pomiarowym



Rys.10. Zmiany wartości całkowitego współczynnika odkształcenia napięcia THD oraz wybranych harmonicznych dla fazy L1 w okresie pomiarowym



Rys.11. Harmoniczne napięcia zasilającego przekształtnikowy układ napędowy



Rys.12. Przebiegi prądu (a) i napięcia (b) falownika

Odształcenie napięcia zasilającego jest efektem poboru przez falownik odkształconego prądu. Na rysunku 11 pokazano widmo harmonicznych napięcia, zaś rysunek 12 prezentuje porównanie przebiegów prądu i napięcia falownika. W widmie harmonicznych napięcia widoczne są harmoniczne charakterystyczne dla pracy przekształtnika, tj. harmoniczne rzędów 11, 13, 23, 25.

Występowanie innych harmonicznych (np. 3, 5 i 7) wynika z występującego tła odkształcenia napięcia oraz z niesymetrii budowy i sterowania przekształtnika. Podobnie można uzasadnić różną od zera wartość współczynnika asymetrii w tym przypadku.

Zbiórce wyniki pomiarów w zestawieniu z wartościami dopuszczalnymi odpowiednich wskaźników zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki pomiarów wskaźników jakości energii elektrycznej w polu zasilającym przekształtnikowy napęd dużej mocy

Wartości skuteczne napięcia zasilającego					
Wartości pomierzone [% U_n]			Wartości dopuszczalne [% U_n]		
	U_{L1}	U_{L2}	U_{L3}	Minimalna	Maksymalna
Maksymalna	105,23	106,77	106,48		
Percentyl 0,95	105,13	106,70	106,39	90,0	110,0
Minimalna	104,14	105,58	105,37		
Wskaźnik długookresowego migotania światła					
Wartości pomierzone [-]			Wartość dopuszczalna [-]		
	$P_{it,L1}$	$P_{it,L2}$	$P_{it,L3}$		
Maksymalna	0,2374	0,2407	0,2390		
Percentyl 0,95	0,1933	0,1990	0,1917	1,0	
Minimalna	0,1043	0,1050	0,1011		
Współczynnik asymetrii					
Wartości pomierzone K_{2U} [%]			Wartość dopuszczalna [%]		
Maksymalna	0,2949				
Percentyl 0,95	0,2738		2,0		
Minimalna	0,2030				
Współczynniki odkształcenia napięcia THD					
Wartości pomierzone [%]			Wartość dopuszczalna [%]		
	THD_{L1}	THD_{L2}	THD_{L3}		
Maksymalna	1,59	1,55	1,63		
Percentyl 0,95	1,56	1,51	1,60	8,0	
Minimalna	1,26	1,19	1,32		

Z porównania pomierzonych wskaźników z obowiązującymi limitami wynika, że zarówno percentyle 0,95, jak i wartości maksymalne parametrów mieszczą się w zadanych granicach.

Podsumowanie

Napędy przekształtnikowe dużej mocy, stosowane coraz częściej w układach potrzeb własnych elektrowni oraz w sieciach przemysłowych, są z punktu widzenia sieci zasilającej odbiornikami zaburzającymi. Uzasadniona jest celowość określenia stopnia wprowadzanych zaburzeń i wpływu tego typu odbiorników na jakość energii elektrycznej w sieci.

Pomiary przeprowadzone przez autorów, zgodnie z obowiązującymi przepisami, w rzeczywistej sieci elektroenergetycznej z przyłączonymi do niej napędami przekształtnikowymi pozwoliły na wyznaczenie znormalizowanych parametrów charakteryzujących jakość energii elektrycznej, a tym samym określenie stopnia oddziaływania napędów na sieć zasilającą.

Stwierdzono, że we wszystkich badanych przypadkach wartości parametrów jakościowych mieszczą się w dopuszczalnych granicach. Można więc stwierdzić, że praca układu napędowego nie powoduje pogorszenia jakości energii elektrycznej w stopniu uzasadniającym

konieczność zastosowania jakichkolwiek dodatkowych rozwiązań i środków zaradczych.

Przedstawione w artykule wyniki zostały uzyskane w badaniach współfinansowanych przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach umowy SP/E/1/67484/10 – Strategiczny Program Badawczy – Zaawansowane technologie pozyskiwania energii: Opracowanie technologii dla wysokosprawnych „zero-emisyjnych” bloków węglowych zintegrowanych z wychwytem CO₂ ze spalin

LITERATURA

- [1] Dubownik R., Opalka B., Elektryczne układy zasilania i regulacji prędkości obrotowej, <http://www.elektroenergetyka.pl>
- [2] Koczara W., Szulc Z., Efektywność energetyczna regulowanych układów napędowych pomp wody zasilającej i pomp sieciowych, X Międzynarodowa Konferencja Naukowo-techniczna „Elektrownie ciepłe”, 6-8.06.2011, Słok/Belchatowa
- [3] Kubera T., Szulc Z., Poprawa efektywności energetycznej układu napędowego pompy wody zasilającej dużej mocy, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, Nr 78/2007
- [4] Przybylski J., Szulc Z., Wpływ struktury obwodu wejściowego przemiennika częstotliwości na efektywność energetyczną

układu napędowego, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, Nr 73/2005

- [5] PN-EN 50160: Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych, PKN, 2010
- [6] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego. Dziennik Ustaw z 2007 r., nr 98, poz. 623.
- [7] Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. - Prawo energetyczne. Dziennik Ustaw z 1997, nr 54, poz. 348
- [8] PN-EN 61000-4-15: Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Metody badań i pomiarów. Miernik migotania światła. Specyfikacja funkcjonalna i projektowa, PKN, 2011
- [9] PN-EN 61000-4-30: Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Metody badań i pomiarów. Metody pomiaru jakości energii, PKN, 2011

Autorzy: dr inż. Ryszard Pawelek, Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: ryszard.pawelek@p.lodz.pl; dr hab. inż. Irena Wasiak, prof. nadzw., Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: irena.wasiak@p.lodz.pl.