

Wybrane parametry jakości energii elektrycznej w sieci wysokiego napięcia zasilającej piec łukowy prądu przemiennego

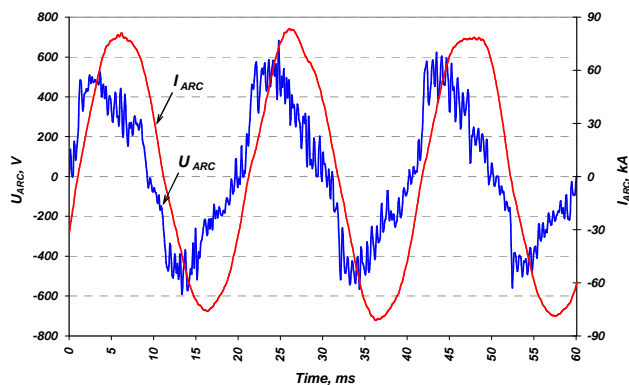
Streszczenie. W artykule zaprezentowano układ zasilania pieca łukowego AC wraz z systemem zdalnego ciągłego pomiaru, rejestracji i analizy parametrów jakości energii elektrycznej oraz przedstawiono wybrane wyniki badań eksperymentalnych zrealizowanych w sieci elektroenergetycznej WN zasilającej piec łukowy AC. Dokonano oceny wpływu pracy pieca łukowego AC na stopień degradacji jakości energii elektrycznej w węzle PWP systemu elektroenergetycznego.

Abstract. The supply system of an AC arc furnace together with the system of remote continuous measurement, recording and analysis of power quality parameters as well as selected results of experimental research conducted in the high voltage power network feeding the electric AC arc furnace have been presented in this article. The article also contains the assessment of the influence of the electric AC arc furnace work on the degree of electric power degradation at a point of common coupling PCC. (**Selected parameters of electric power quality in the high voltage power network feeding the electric AC arc furnace**).

Słowa kluczowe: jakość energii elektrycznej, wyższe harmoniczne, piec łukowy, systemy monitorowania jakości energii elektrycznej
Keywords: power quality, harmonics, electric arc furnace, power quality monitoring systems

Wstęp

Jakość energii elektrycznej w systemie elektroenergetycznym w decydującej mierze uzależniona jest od charakterystyki przyłączanych i użytkowanych odbiorników energii elektrycznej. Szczególnie negatywny wpływ na stopień degradacji jakości energii elektrycznej mają wszelkiego rodzaju odbiorniki nieliniowe, zwłaszcza urządzenia górnicze i hutnicze dużych mocy takie jak piece łukowe, układy napędowe dużych mocy walcarek, maszyn wyciągowych itp. [3,8]. Elektryczne piece łukowe prądu przemiennego do wytopu stali pochodzącej ze złomu są złożonymi urządzeniami technologicznymi generującymi ciągłe widmo harmonicznym prądu powodując odkształcenie i wahania napięcia zasilającego. Największy wpływ mają harmoniczne rzędu 2, 3, 5 i 7 względem częstotliwości sieci zasilającej [6,9,10,15]. Ponadto występująca niestabilność łuku zwłaszcza w początkowej fazie wytopu stali powoduje stochastyczne zmiany prądu zasilania pieca, co czyni go odbiorem niespokojnym. Tezę tę potwierdzają przebiegi napięć i prądów występujące podczas procesu wytopu stali w torze zasilania pieca łukowego AC na poziomie średniego i niskiego napięcia [6,10,15]. W kilkuokresowym przedziale zmienności prądu i napięcia przedstawionym na rys. 1 nie jest wyraźnie widoczny znaczny stopień odkształcenia prądu, objawiający się niezaprzeczalnie podczas analizy sygnałów w dłuższym przedziale czasu. Występujące wówczas znaczne odchyłki kształtu i wartości amplitudy prądu potwierdzają sformułowaną tezę o niespokojnym charakterze pieca łukowego AC.



Rys. 1. Wartości chwilowe napięcia U_{ARC} i prądu łuku I_{ARC} [6].

Odształcony prąd charakteryzuje się ponadto losowo zmienną w czasie zawartością wyższych harmonicznym. W zależności od wartości mocy zwarcia w punkcie wspólnego przyłączenia praca pieca łukowego AC może powodować odkształcenia i fluktuacje napięcia zasilania. W skrajnych przypadkach, przy małej wartości mocy zwarcia systemu elektroenergetycznego, może wystąpić niekorzystne zjawisko zwane migotaniem światła [8].

Istotnym zagadnieniem podczas przyłączania do systemu elektroenergetycznego użytkowanych pieców łukowych jest określenie wpływu zaburzeń elektromagnetycznym powstających podczas pracy pieców łukowych na stopień degradacji jakości energii elektrycznej. Ocena taka dokonywana jest w wyniku realizacji prac pomiarowo-badawczych w punkcie wspólnego przyłączenia PWP i może mieć na celu również weryfikację dotrzymania zapisów kontraktowych na dostawę energii elektrycznej.

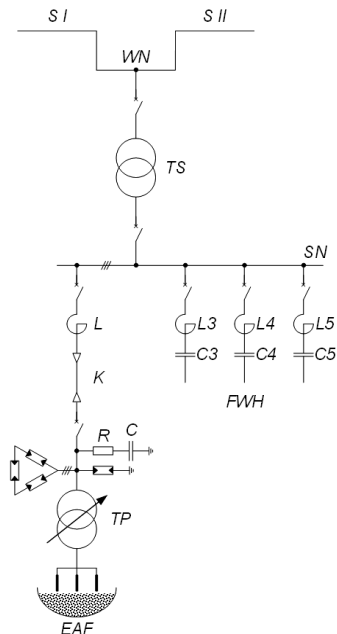
Monitorowanie wartości parametrów określających jakość energii elektrycznej w sieci elektroenergetycznej zasilającej piec łukowy AC może mieć charakter incydentalny, ograniczony do określonego przedziału czasu (np. określona liczba wytopów stali) i wynikać z potrzeby rozwiązania konkretnego problemu technicznego [6,7] lub też może być realizowana w sposób ciągły, a jej wyniki mogą być rejestrowane i archiwizowane przez wymagany przedział czasu nawet kilkuletni [1].

Systemy służące do ciągłego monitorowania jakości energii elektrycznej w wybranych węzłach systemu elektroenergetycznego są obecnie użytkowane lub wdrażane głównie przez operatorów systemów przesyłowych i dystrybucyjnych w wielu krajach europejskich, w tym również w Polsce [17].

Charakterystyka pieca łukowego AC jako odbiornika energii elektrycznej

Uproszczony schemat układu zasilania pieca łukowego prądu przemiennego AC wraz z układami i urządzeniami kompensacyjnymi, filtrującymi i stabilizującymi łuk został przedstawiony na rys. 2. W rozpatrywanej instalacji elektroenergetycznej zasilającej piec łukowy AC, która przełączona jest do systemu elektroenergetycznego w węzle PWP, dla którego moc zwarcia S_{PWP} wynosi ok. 8 GVA, zastosowane zostały następujące rozwiązania techniczne polegające na:

- kaskadowym połączeniu transformatora sieciowego z powietrznym dławikiem szeregowym stabilizującym łuk (bez dodatkowych układów transduktorowych) oraz transformatora piecowego z przełącznikiem zaczełów umożliwiającym płynną regulację napięcia i prądu strony wtórnej transformatora;
- włączeniu trzech gałęzi filtrów biernych L-C na poziomie średniego napięcia do kompensacji wyższych harmonicznych prądów z zapewnieniem kompensacji mocy biernej dla składowej podstawowej;
- włączeniu ochrony przepięciowej na poziomie średniego napięcia w postaci dwójników tłumiących R-C oraz odgromników zaworowych.



Rys. 2. Schemat układu zasilania pieca łukowego AC.

Zagwarantowanie dużej wartości mocy zwarcia sieci zasilającej w punkcie PWP wraz ze skutecznym działaniem urządzeń kompensująco-filtrujących na poziomie SN zapewnia szybki i prawidłowy przebieg procesu stalowniczego przy jednoczesnym ograniczeniu stopnia degradacji jakości energii elektrycznej. Zależność mocy zwarcia jako wartości odniesienia do wartości nominalnych parametrów elektroenergetycznych urządzeń instalacji pieca łukowego AC zostały przedstawione w tabeli 1.

Tabela 2. Zestawienie wartości podstawowych parametrów technicznych instalacji pieca łukowego AC.

Parametr		Wartość [%]
względna moc transformatora sieciowego	S_{TS}/S_{ZV}	0,8
względna moc transformatora piecowego	S_{TP}/S_{ZV}	1,25
względna moc bierna pojemnościowa filtrów dla 1-szej harmonicznej	$Q_{\#}/S_{ZV}$	0,52
względna reaktancja dławika szeregowego	X_L/X_{TS}	155,3
względna reaktancja dławika szeregowego odniesiona do minimalnej reaktancji transformatora piecowego	X_L/X_{TPmin}	243
względna reaktancja dławika szeregowego odniesiona do maksymalnej reaktancji transformatora piecowego	X_L/X_{TPmax}	106,56

System ciągłego monitorowania jakości energii elektrycznej w sieci elektroenergetycznej zasilającej piec łukowy AC

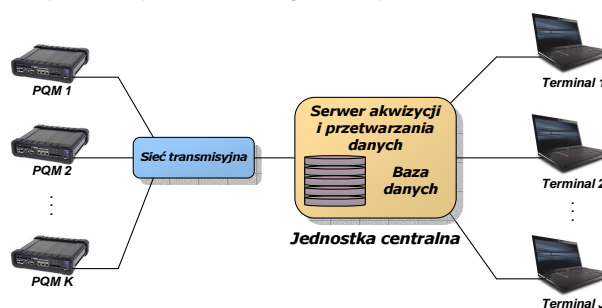
Ze względu na ustawy [19] obowiązek dostarczania odbiorcom energii elektrycznej spełniającej obowiązujące

wymagania jakościowe wynikające z Rozporządzenia Ministra Gospodarki [18], to przede wszystkim przedsiębiorstwa energetyczne wykonujące zadania operatorów systemów przesyłowego i dystrybucyjnych zainteresowane są wdrażaniem systemów pomiarowych przeznaczonych do ciągłej oceny i analizy jakości energii elektrycznej. Również niektórzy odbiorcy, szczególnie posiadający odbiorniki wrażliwe na degradację jakości energii elektrycznej, wdrażają w swoich wewnętrznych sieciach elektroenergetycznych oraz w węzłach przyłączenia do systemu elektroenergetycznego systemy zdalnej rejestracji parametrów jakości energii elektrycznej w celu ciągłego monitorowania jakości dostarczanej im energii elektrycznej. Podobne decyzje o budowie systemów pomiarowych do ciągłej oceny i analizy jakości energii elektrycznej podejmują odbiorcy posiadający odbiorniki nieliniowe dużej mocy, w celu oceny wpływu ich pracy na jakość energii elektrycznej w węzle PWP, co ma zasadnicze znaczenie w przypadku zaistnienia ewentualnego sporu dotyczącego ich odpowiedzialności kontraktowej wobec operatora systemu elektroenergetycznego w związku z możliwością przekroczenia dopuszczalnych poziomów emisji zaburzeń elektromagnetycznych.

System oceny i analizy jakości energii elektrycznej składa się z czterech zasadniczych elementów funkcjonalnych:

- zbioru urządzeń pomiarowych, do których należą: rejestratory wielkości elektrycznych oraz parametrów jakości energii elektrycznej, przekładniki napięciowe, przekładniki prądowe oraz dodatkowe przetworniki prądowe np. cęgowe;
- sieci zapewniającej zdalną transmisję danych oraz komunikację z urządzeniami pomiarowymi,
- jednostki centralnej składającej się z serwera wraz z dedykowanym oprogramowaniem odpowiedzialnego za pozyskiwanie danych z rejestratorów, przetwarzanie i analizę danych, tworzenie raportów, archiwizowanie oraz tworzenie kopii bezpieczeństwa danych oraz ich udostępnianie uprawnionym klientom/terminalom;
- terminali klienckich pozwalających na zdalny dostęp do danych pomiarowych oraz ich indywidualnej analizy według zadanych kryteriów.

Na rys. 3 zaprezentowano schemat ideowy systemu oceny i analizy jakości energii elektrycznej.



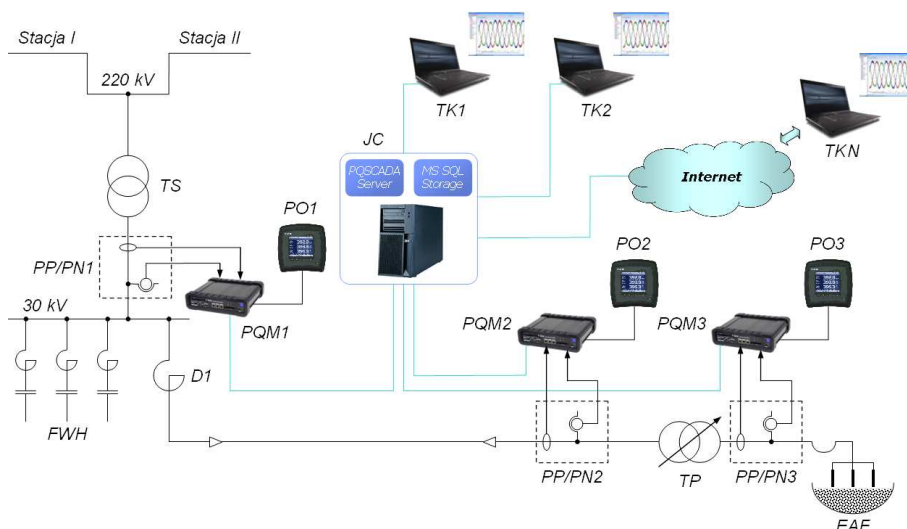
Rys. 3. Schemat ideowy systemu oceny i analizy jakości energii elektrycznej.

Zasadniczym elementem systemów zdalnego monitorowania jakości energii elektrycznej są rejestratory danych pomiarowych PQM. Od samych rejestratorów oraz od sposobu ich przyłączenia do istniejących lub dedykowanych obwodów przekładników prądowych i napięciowych oraz od ich klasy zależy dokładność, z jaką określane są wartości poszczególnych wielkości elektrycznych oraz parametrów jakości energii elektrycznej. Niezwykle istotnym jest spełnienie przez rejestratory wszystkich wymagań właściwych norm [11,12,13,14], na

potwierdzenie czego wydawane są przez niezależne jednostki badawcze, po pozytywnym zakończeniu wymaganych testów, odpowiednie świadectwa zgodności. Szczególnie zalecane jest stosowanie rejestratorów klasy A, których dokładność pomiaru oraz sposób określania wartości poszczególnych parametrów jakości energii elektrycznej zapewniają odpowiednią wiarygodność pomiaru, niezbędną do rozstrzygnięcia ewentualnych sporów pomiędzy stronami kontraktu.

Pomimo zapewnienia ciągłej komunikacji pomiędzy jednostką centralną a rejestratorami pomiarowymi, niezbędnym jest, by każdy z rejestratorów zapewniał możliwość gromadzenia danych pomiarowych we własnej wewnętrznej pamięci przez odpowiednio długi czas w celu zagwarantowania ciągłości pozyskiwanych danych przez jednostkę centralną również w przypadku czasowej awarii sieci zdalnej transmisji danych. W wielu przypadkach zalecane jest również zastosowanie redundantnych torów transmisji danych pomiarowych, co dodatkowo uniezależnia system monitoringu jakości energii elektrycznej od ewentualnych przerw awaryjnych w sieci transmisji danych. Ze względu na mogącą zaistnieć potrzebę współpracy w systemie rejestratorów różnych typów dostarczanych przez poszczególnych producentów, jak również na potrzebę wymiany danych pomiędzy systemami monitorowania jakości energii elektrycznej, należącymi do różnych podmiotów lub operatorów, projektowane i wdrażane systemy monitorowania winny zapewniać otwartość, dzięki możliwości przesyłania danych pomiarowych zapisanych w określonych formatach. Przykładem uniwersalnego formatu zapisu i wymiany danych pomiarowych jest standard PQDIF (ang. Power Quality Data Interchange Format) opracowany przez Electric Power Research Institute (EPRI) i Electrotec Concepts [1,4]. Oprócz zapewnienia zgodności z formatem PQDIF, producenci urządzeń pomiarowych oraz oprogramowania dedykowanego do przetwarzania danych pomiarowych na potrzeby analizy jakości energii elektrycznej oferują własne rozwiązania o rozszerzonym zakresie funkcjonalnym pozwalające na stosowanie zaawansowanych technik kompresji danych o współczynniku kompresji dochodzącym do 1000:1 [4,16,20].

Na rys. 4. przedstawiono system ciągłej oceny i analizy jakości energii elektrycznej wdrożony u dużego odbiorcy przemysłowego posiadającego piec łukowy AC przyłączony za pośrednictwem wewnętrznej sieci elektroenergetycznej do systemu w PWP na poziomie 220 kV.



Rys. 4. System ciągłej oceny i analizy jakości energii elektrycznej w sieci zasilającej piec łukowy AC.

Składa się on z rejestratorów typu G4500 firmy Elspec PQM1-PQM3 wraz z panelami operatorskimi PO1-PO3, istniejącego układu przekładników prądowych i napięciowych PP/PN1-PP/PN3, serwera jednostki centralnej oraz grupy terminali klienckich TK1-TKN posiadających dostęp do danych pomiarowych za pośrednictwem wewnętrznej sieci Ethernet jak również sieci Internet.

Serwer jednostki centralnej pracujący pod kontrolą oprogramowania PQSCADA odpowiedzialny jest za pozyskiwanie i przetwarzanie danych pomiarowych z pamięci rejestratorów, których struktura w systemie definiowana jest w sposób hierarchiczny. Rejestratory przetwarzają dane pomiarowe z zastosowaniem algorytmu szybkiej transformaty Fouriera (FFT) i zgodnie z firmowym standardem dokonują kompresji danych w dziedzinie częstotliwości. Sygnały napięcia próbkowane są z rozdzielczością 1024 próbek na okres, natomiast sygnały prądów przetwarzane są z rozdzielczością 256 próbek na okres. Zastosowanie pamięci 8 GB pozwala na ciągłą rejestrację wartości chwilowych napięć i prądów nawet przez rok [2]. Po pobraniu skompresowanych danych z urządzeń pomiarowych, serwer PQSCADA dokonuje ich dekompresji i rekonstrukcji, a następnie wyznacza wartości wszystkich parametrów elektroenergetycznych oraz wskaźników jakości energii elektrycznej, które przekazywane są do bazy danych SQL i udostępniane na terminalach klienckich [5,16]. Elspec Investigator jest narzędziem służącym do kompleksowej wizualizacji i analizy parametrów jakości energii elektrycznej oraz pozwala na generowanie szerokiego wachlarza raportów i statystyk. Rejestrowane dane pomiarowe mogą być eksportowane do formatu PQZIP oraz również do formatów PQDIF i COMTRADE, co zapewnia otwartość systemu.

Wybrane wyniki pomiarów

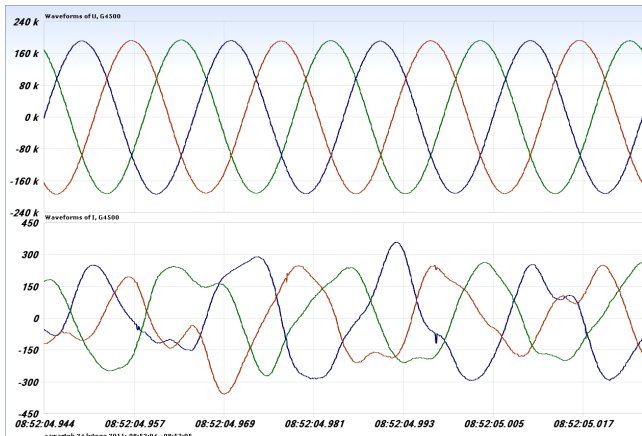
Dzięki zdalnemu systemowi ciągłego monitoringu parametrów jakości energii elektrycznej, odbiorca przemysłowy uzyskuje na bieżąco niezbędną informację o stopniu degradacji jakości energii elektrycznej w węźle PWP oraz skuteczności pracy układu kompensacji wyższych harmonicznych. Ma również pełny obraz stanu wewnętrznej sieci elektroenergetycznej w zakładzie na poziomie S_n i n_n – rys. 4. Pozyskiwane i gromadzone dane pomiarowe mogą również stanowić podstawę do rozstrzygnięcia ewentualnych sporów na płaszczyźnie zapisów kontraktowych oraz pełnią nieocenioną rolę

w badaniu przebiegu oraz źródeł wszelkiego rodzaju awarii mogących wystąpić w wewnętrznej sieci elektroenergetycznej. Ciągła rejestracja i archiwizowanie wartości chwilowych napięć i prądów nawet w kilkuletnim przedziale czasu pozwala na przeanalizowanie każdego z zaistniałych w przeszłości zdarzeń próbka po próbce.

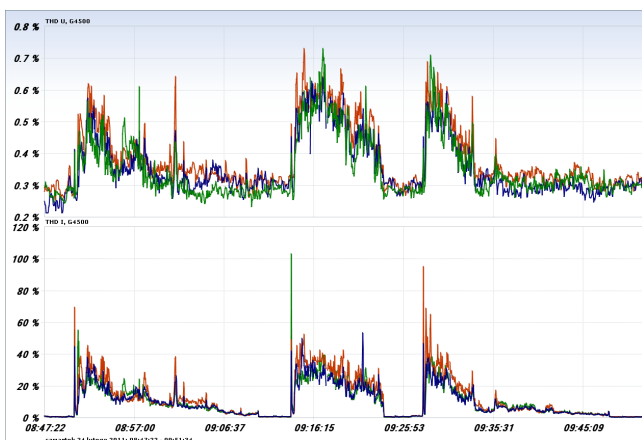
Na rysunkach rys. 5 – rys. 9. przedstawione zostały przykładowe wyniki pomiarów zrealizowanych przez system ciągłego monitorowania parametrów jakości energii elektrycznej na poziomie WN w sieci elektroenergetycznej zasilającej piec łukowy AC.

Na rys. 5 zaprezentowano wartości chwilowe napięć i prądów w węźle PWP podczas

roztopiania złomu w piecu łukowym. Pomimo znacznego odkształcenia prądów, napięcia fazowe posiadają kształt niemal sinusoidalnie zmienny. Potwierdza to dokonana analiza częstotliwościowa zrealizowana w długim cyklu obserwacji. Na rys. 6 przedstawiono wykresy zmian wartości współczynników THD U i THD I wyznaczone w węźle PWP w okresie pełnego cyklu wytopu stali. Pomimo iż wartości THD I w fazie roztopiania chwilami przekraczają 100 %, to jednak maksymalne wartości współczynników THD U osiągają wartość ok. 0,75 %, natomiast w fazie rafinacji: THD U = 0,3 %, THD I = 2÷3 % – rys. 6.



Rys. 5. Wartości chwilowe napięć i prądów fazowych – L1, – L2, – L3 po stronie pierwotnej transformatora sieciowego TS – faza roztopiania złomu.

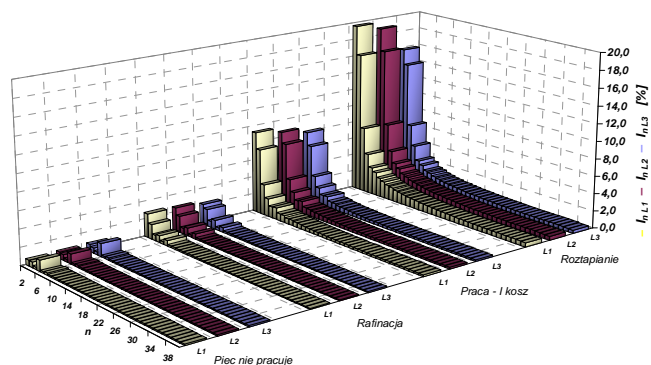


Rys. 6. Wartości współczynników THD napięć i prądów fazowych – L1, – L2, – L3 wyznaczone po stronie pierwotnej transformatora sieciowego TS w czasie pełnego cyklu wytopu stali.

Na rys. 7 i rys. 8 zaprezentowano widma względne odpowiednio: prądów płynących w torze zasilającym piec łukowy w węźle PWP, czyli po stronie pierwotnej transformatora sieciowego TS oraz napięć fazowych w PWP dla różnych stanów pracy pieca: podczas roztopiania wsadu, w 10. minucie pracy po zasypaniu pierwszego kosza ze złomem, w stanie rafinacji stali oraz w przerwie pomiędzy wytopami podczas wyłączenia pieca. Znamiennej cechą wyróżniającą piec łukowy spośród innych odbiorników nieliniowych jest ciągłość charakterystyki częstotliwościowej prądu płynącego w jego torze zasilającym – rys. 7.

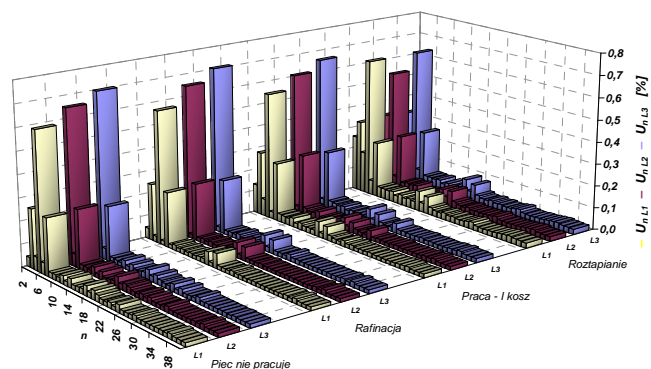
Przedstawione również zostały wyniki analizy wpływu pracy pieca łukowego AC na intensywność zjawiska

migotania światła. Wyznaczono wartości wskaźników krótko- i długookresowego migotania światła P_{st} i P_{It} – rys. 9. Praca pieca łukowego powoduje wzrost wartości P_{st} od $0,13 \div 0,24$ do $0,39 \div 1,83$, natomiast wartości

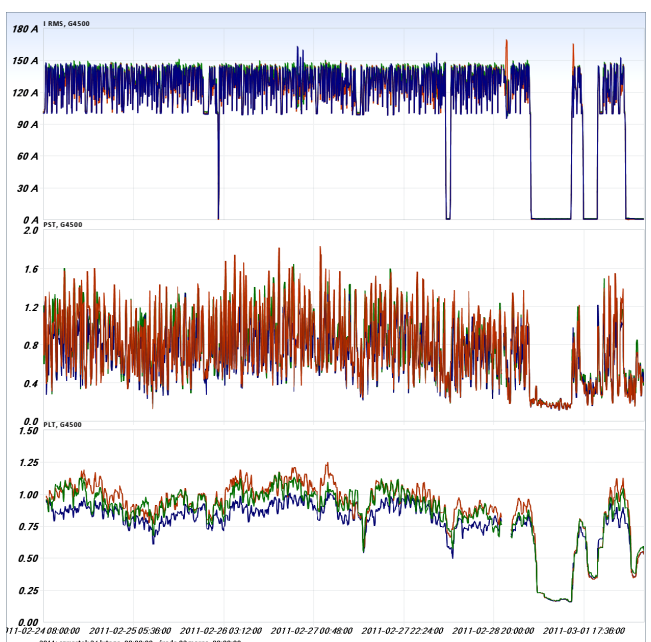


wskaźnika P_{It} zwiększają się odpowiednio od $0,16 \div 0,22$ do $0,77 \div 1,25$ – rys. 9 i tabela 2.

Rys. 7. Widmo względne wyższych harmonicznych prądów I_{L1} , I_{L2} , I_{L3} po stronie pierwotnej transformatora sieciowego TS.



Rys. 8. Widmo względne wyższych harmonicznych napięć fazowych U_{L1} , U_{L2} , U_{L3} na szynach rozdzielni WN.



Rys. 9. Wartości skuteczne prądów I_{L1} , I_{L2} , I_{L3} po stronie pierwotnej transformatora sieciowego TS oraz wartości wskaźników P_{stL1} , P_{stL2} , P_{stL3} i P_{ItL1} , P_{ItL2} , P_{ItL3} podczas kilkunastu dniowego okresu obserwacji.

Tabela 2. Wartości wskaźników P_{st} i P_{it} określone podczas pracy, w stanie wyłączenia pieca łukowego AC oraz w reprezentatywnym tygodniowym okresie obserwacji.

Parametr	P_{stL1}	P_{stL2}	P_{stL3}	P_{itL1}	P_{itL2}	P_{itL3}
<i>Piec łukowy pracuje, 8-godzinny okres obserwacji</i>						
w. min.	0,46	0,39	0,42	0,88	0,87	0,77
w. max	1,83	1,64	1,41	1,25	1,17	1,02
w. średnia	1,15	1,08	0,98	1,09	1,02	0,92
PC95	1,64	1,47	1,32	1,21	1,13	1,00
<i>Piec łukowy nie pracuje, 8-godzinny okres obserwacji</i>						
w. min.	0,13	0,14	0,13	0,16	0,17	0,16
w. max	0,24	0,24	0,24	0,22	0,22	0,22
w. średnia	0,19	0,19	0,18	0,18	0,18	0,18
PC95	0,22	0,22	0,21	0,20	0,20	0,20
<i>Tygodniowy okres obserwacji</i>						
w. min.	0,13	0,14	0,13	0,16	0,16	0,16
w. max	1,83	1,64	1,41	1,25	1,17	1,02
w. średnia	0,94	0,90	0,82	0,90	0,87	0,79
PC95	1,52	1,40	1,25	1,15	1,10	0,98

Podsumowanie i wnioski

Wdrożenie systemu ciągłej analizy i oceny wartości parametrów jakości energii elektrycznej wykorzystującego rejestratory zgodne z klasą A stanowi nieodzowne narzędzie wspierające proces rozstrzygnięcia ewentualnych sporów na płaszczyźnie zapisów kontraktowych oraz pomaga w szczegółowym badaniu przebiegu oraz źródeł wszelkiego rodzaju awarii mogących wystąpić w wewnętrznej sieci elektroenergetycznej odbiorcy.

Na podstawie zaprezentowanych wyników badań stwierdzono, iż pomimo znacznego odkształcenia prądów w torze WN zasilającym piec łukowy AC, napięcia fazowe posiadają kształt niemal sinusoidalnie zmienny. Wartości THD I w fazie roztopiania chwilami przekraczają 100 %, podczas gdy maksymalne wartości współczynników THD U osiągają ok. 0,75 %, natomiast w fazie rafinacji THD U = 0,3 %, THD I = 2÷3 % – rys. 6.

Największe wartości osiągają harmoniczne o rzędach 2, 3 i 4, przyjmując średnio wartości: $I_2 = 18,1\%$, $I_3 = 15,6\%$ i $I_4 = 7,2\%$ w fazie roztopiania złomu. Natomiast już w 10-tej minucie pracy pieca stopień odkształcenia prądów zmniejsza się ponad dwukrotnie: $I_2 = 8,7\%$, $I_3 = 7,2\%$ i $I_4 = 3,4\%$, natomiast w fazie rafinacji: $I_2 = 2,6\%$, $I_3 = 1,8\%$, $I_4 = 0,7\%$ i $I_5 = 0,9\%$.

Wśród dominujących harmonicznych napięcia wyróżnić można składowe o rzędach: 2, 3, 5 i 7, jednak ich zawartość w niewielkim stopniu zależy od stanu pracy pieca, co potwierdza, iż źródła zaburzeń elektromagnetycznych decydujących o stopniu odkształcenia napięcia zlokalizowane są powyżej analizowanego węzła PWP – rys. 8. Praca pieca łukowego nie powoduje przekroczenia dopuszczalnych wartości wyższych harmonicznych napięcia określonych w rozporządzeniu [18].

Widoczny jest wyraźny wpływ pracy pieca łukowego na intensywność wahań napięcia w węźle PWP, co wiąże się ze wzrostem wartości percentyli PC95 określonych na podstawie wartości wskaźników P_{it} do poziomu 1,00÷1,21 podczas pracy pieca. Wyłączenie pieca powoduje zmniejszenie się wartości ww. wskaźników do 0,2 – tabela 2. Przeprowadzenie oceny w tygodniowym okresie obserwacji potwierdza fakt przekroczenia dopuszczalnej wartości P_{it} wynoszącej 0,8 [18], bowiem percentyle PC95 wynoszą odpowiednio: $P_{itL1} = 1,15$, $P_{itL2} = 1,10$ i $P_{itL3} = 0,98$ – tabela 2.

LITERATURA

[1] Firlit A., Błajszczak G.: Narzędzia do oceny i analizy jakości energii elektrycznej. Elektroenergetyka Nr 12/2009, s. 787-793

[2] G4500 Portable. Technical Specifications, Elspec Ltd., Israel

[3] Gała M.: Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych do oceny wpływu pracy odbiorników nieliniowych na jakość energii elektrycznej. Przegląd Elektrotechniczny, Nr 6/2011, s. 42-46

[4] IEEE 1159.3 Recommended Practice for the Transfer of Power Quality Data

[5] Investigator version 2.3. User manual, Issue 1.0 August 2009, Elspec Ltd., Israel

[6] Jagiela K., Rak J., Gała M., Kepinski M.: Identification of Electric Power Parameters of AC Arc Furnace Low Voltage System, 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power ICHQP 2010, IEEE Conference Proceeding, 26-29 Sept. 2010, pp. 1-7, ISBN 978-1-4244-7244-4

[7] Jagiela K., Gała M., Rak J., Kepinski M., Szewczyk K.: Analysis of Electric Energy Quality in Arc Furnace System with Follow-up SVC Compensation. 10th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation EPQU 2009, IEEE Conference Proceeding, 15-17 Sept. 2009, pp. 1-5, ISBN 978-1-4244-5171-5

[8] Jagiela K., Gała M.: Wpływ pracy hutniczych odbiorników elektrycznych na wahania napięcia w sieciach elektroenergetycznych. VII Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Nowe Technologie i Osiągnięcia w Metalurgii i Inżynierii Materiałowej Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2.06.2006, Nr 58 s. 225-228

[9] Kuśmierk Z.: Harmoniczne w systemach elektroenergetycznych. Przegląd Elektrotechniczny, Nr 6/2006, s. 8-19

[10] Liu Y. J., Chang G. W., Hong R. C.: Curve-fitting-based method for modeling voltage-current characteristic of an ac electric arc furnace, Electric Power Systems Research, no. 80 (2010), pp. 572-581

[11] PN-EN 50160:2010 Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych

[12] PN-EN 61000-4-7:2007/A1:2011 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Część 4-7: Metody badań i pomiarów. Ogólny przewodnik dotyczący pomiarów harmonicznych i interharmonicznych oraz przyrządów pomiarowych, dla sieci zasilających i przyłączonych do nich urządzeń

[13] PN-EN 61000-4-15:1999, Ap1/2003, A1:2005 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Część 4-15: Metody badań i pomiarów. Miernik migotania światła. Specyfikacja funkcjonalna i projektowa

[14] PN-EN 61000-4-30: 2009 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Część 4-30: Metody badań i pomiarów. Metody pomiaru jakości energii

[15] Prieto M. A., Donsión M. P.: An improved time domain arc furnace model for harmonic analysis, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 19, no. 1, Jan. 2004, pp. 367-373

[16] PQSCADA version 3.2. User manual, Issue 1.1 December 2009, Elspec Ltd., Israel

[17] PSE Operator S.A.: Budowa systemu monitorowania jakości energii elektrycznej. Specyfikacja istotnych warunków zamówienia. Konstancin-Jeziorna, lipiec 2010 r., dostępne na: www.pse-operator.pl

[18] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (Dz. U z 2007 Nr 93, poz. 623 z późn zm.)

[19] Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. Prawo energetyczne. Dz. U. z 2006 r. Nr 89, poz. 625 z późn zm.)

[20] Zygarelicki J.: Analiza i kompresja danych pomiarowych sygnału z sieci elektroenergetycznej dla potrzeb badania jakości energii. Rozprawa doktorska, Opole 2007

Autorzy: dr inż. Marek Gała, Politechnika Częstochowska, Instytut Elektrotechniki Przemysłowej, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: m.gala@el.pcz.czest.pl; dr hab. inż. Kazimierz Jagiela, Politechnika Częstochowska, Instytut Elektrotechniki Przemysłowej, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: k.jagiela@el.pcz.czest.pl; dr inż. Tomasz Garstka, Politechnika Częstochowska, Instytut Modelowania i Automatyzacji Procesów Przeróbki Plastycznej, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: tomek@wjp.pcz.pl.