

Ocena jakości energii elektrycznej w zakładzie przemysłowym – studium przypadku

Streszczenie. W dobie powszechnego stosowania przemienników częstotliwości w zakładach przemysłowych zagadnienie jakości energii elektrycznej nabiera coraz większego znaczenia. Nieprawidłowe parametry jakościowe energii elektrycznej mogą prowadzić do nieprawidłowej pracy urządzeń a niejednokrotnie również do ich uszkodzenia. W artykule przedstawiono wyniki przeprowadzonych pomiarów jakości energii elektrycznej pomierzonych w wybranych punktach linii technologicznej zakładu produkującego cement. Przedstawiono ocenę uzyskanych danych pod kątem zgodności z obowiązującymi normami.

Abstract. In the era of widespread use of frequency converters in industrial plants, the issue of power quality is becoming increasingly important. Incorrect quality parameters of the electricity supplied may lead to incorrect operation of the devices and often to their damage. The article presents the results of the analysis of the quality of electricity measured at chosen points of the technological line of the cement production plant. The results of the analysis of the obtained measurements in terms of compliance with the applicable standards are presented. (**Analysis of the quality of electricity in an industrial plant – case study**).

Słowa kluczowe: energia elektryczna, jakość energii elektrycznej, wyższe harmoniczne, efektywność energetyczna.

Keywords: electricity, power quality, harmonics, energy efficiency.

Wstęp

Energia elektryczna jest kluczowym elementem działania współczesnego społeczeństwa i funkcjonowania gospodarki. Podstawowe parametry energii elektrycznej to jej jakość oraz niezawodność dostaw. O jakości i niezawodności dostaw energii decyduje sposób jej dostawy, jak również sami odbiory energii [1].

Zagadnieniami dotyczącymi jakości i niezawodności dostaw energii elektrycznej w polskiej elektroenergetyce zaczęto się interesować pod koniec XX wieku. Wtedy też zaczęły się pojawiać publikacje na temat jakości energii elektrycznej Krajowego Systemu Energetycznego (KSE). Istotnym momentem było opublikowane w 2007 roku Rozporządzenia Ministra Gospodarki w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego, aktualizowane wielokrotnie [2]. Drugim dokumentem regulującym parametry napięcia zasilającego była norma EN 50160, której pierwsza edycja została opublikowana w 1998 roku, zaś obecnie obowiązująca wersja pochodzi z roku 2010, z ostatnią poprawką w roku 2019 [3]. W obu tych dokumentach podano definicje parametrów używanych do określenia jakości i niezawodności energii elektrycznej oraz ich dopuszczalne wartości. Do głównych parametrów jakościowych napięcia energii elektrycznej zalicza się: częstotliwość, zmiany wartości skutecznej, odkształcenie od wzorcowej sinusoidy, migotanie napięcia oraz symetrię w układach trójfazowych [4-8].

Najczęściej stosowane wskaźniki niezawodności dostaw energii elektrycznej to długość jednorazowej nieplanowanej przerwy w dostawie oraz łączny czas przerw w dostawie w ciągu roku. Operatorzy Systemu Dystrybucyjnego (OSD) mają coroczny obowiązek podawania wskaźników dotyczących niezawodności pracy sieci: wskaźnika przeciętnego systemowego czasu trwania przerwy długiej (SAIDI), wskaźnika przeciętnej systemowej częstotliwości przerw długich (SAIFI) z podziałem na przerwy planowane i nieplanowane oraz wskaźnika przeciętnej częstotliwości przerw krótkich (MAIFI) [1].

Zagadnienie jakości i niezawodności dostaw energii elektrycznej jest szczególnie istotne dla zakładów przemysłowych, prowadzących produkcję w sposób ciągły, gdzie ewentualne postoje wskutek awarii, zarówno systemu

elektroenergetycznego jak i urządzeń zakładowych mogą generować ogromne straty finansowe.

Celem pracy jest analiza danych pomiarów dotyczących jakości energii elektrycznej w jednej z krajowych cementowni. Do badań wytypowano duże odbiorniki niskiego napięcia o mocach rzędu setek kW zasilane z przetwornic częstotliwości, będące głównymi urządzeniami technologicznymi przemysłowni cementu. Pomiary przeprowadzono na dwóch młynach cementu, zasilanych z dwóch różnych stacji transformatorowych, co pozwoliło na ich porównanie. Podczas badań przeprowadzono pomiary napięć zasilających, prądów obciążenia, współczynnika THD oraz wyższych harmonicznych prądów oraz napięć.

Ogólny opis specyfiki produkcji cementu

Aktualnie w Polsce funkcjonuje 10 cementowni. Lokalizacja zakładów wynika zasadniczo z położenia złóż kamienia wapiennego, będącego głównym surowcem do wypału klinkieru. Produkcja cementu odbywa się w zakładowych młynowniach cementu oraz zewnętrznych przemysłowniach, gdzie klinkier jest mielony z dodatkiem gipsu, kamienia, pyłów, żużli hutniczych oraz popiołów z elektrowni i elektrociepłowni na gotowy cement.

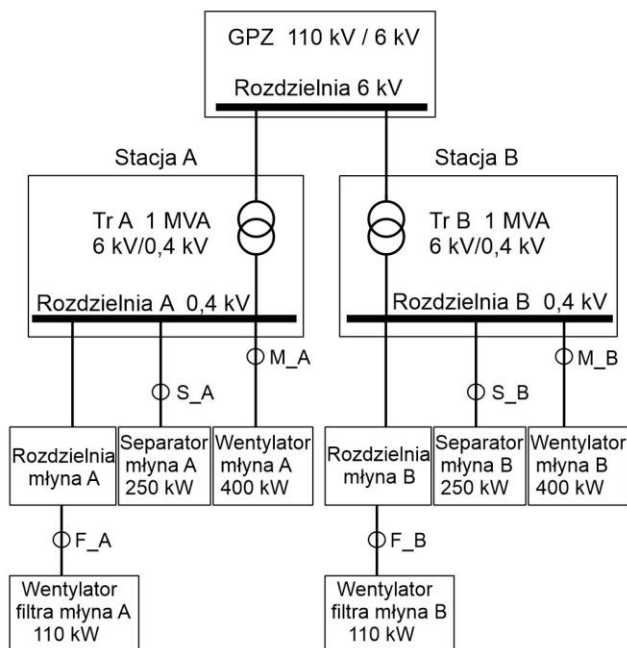
Przemysł cementowy jest przemysłem energochłonnym. Średnia moc pobierana z systemu elektroenergetycznego największych zakładów sięga ok. 50 MW. Wprowadzane obecnie obostrzenia dotyczące emisji gazów cieplarnianych wymagają od cementowni poszukiwania nowych rozwiązań, w tym technologii wychwytu dwutlenku węgla, jego transportu i magazynowania. Ze względu na konieczność zapewnienia wysokiej pewności zasilania dla pieców obrotowych i urządzeń pomocniczych cementownie mają redundantne zasilanie. Ponadto, urządzenia cementowni mogą być wykorzystywane przez OSD do odciążania KSE w przypadku ryzyka utraty jego stabilności. Średnia moc każdego młyna w cementowni sięga ok. 5 MW, co pozwala dyspozycji mocy odciążyć system o kilkanaście MW w razie konieczności - przy uzgodnieniu takiego działania z zakładem [1].

W typowej cementowni istnieje wiele urządzeń, które wymagają energii elektrycznej o właściwych parametrach jakościowych. W przypadku nagłego zatrzymania rozpalonego pieca obrotowego i braku możliwości obracania nim, ugięciu ulegnie walczak pieca, co skutkuje

kilkumiesięcznym postojem remontowym i stratami rzędu milionów złotych. Podobnie istotna jest również bezawaryjna praca instalacji podających paliwo do pieców czy urządzeń zmniejszających zanieczyszczenie środowiska. W cementowniach jakość energii elektrycznej jest szczególnie ważna z powodu dużej ilości energoelektroniki.

Przeprowadzone pomiary jakości energii elektrycznej

Do pomiarów jakości energii elektrycznej w badanej cementowni wytypowano urządzenia technologiczne dwóch linii przemiału cementu. Czas pomiędzy budową jednej linii a drugiej to ok. 10 lat, co pozwala również na porównanie różnych generacji urządzeń. Wytypowane urządzenia to napędy wentylatora młynowego, wentylatory filtra separatora oraz napędy separatorów. Urządzenia te są napędzane poprzez przetwornice częstotliwości, zasilanych z rozdzielnic oddziałowych. Uproszczony schemat zasilania przedstawiono na rysunku 1.



Rys.1. Schemat uproszczony układu zasilania badanej cementowni z zaznaczonymi punktami pomiarowymi

Z GPZ 110 kV/6 kV zasilane są dwa transformatory olejowe, każdy o mocy S_n równej 1 MVA. Zasilają one dwie rozdzielnie główne niskiego napięcia: rozdzielnię A oraz rozdzielnię B. Rozdzielnie te zaopatrują w moce odbiory technologiczne takie jak wentylator młyna, separator młyna, wentylatory filtra młyna, pozostałe napędy, biura, rozdzielnice lokalne, instalacje oświetleniowe itp.

Przedstawiona w artykule analiza dotyczy wyników pomiarów pobieranej energii elektrycznej na szynach rozdzielni niskiego napięcia dla dwóch niezależnych linii produkujących cement w 4 punktach pomiarowych oznaczonych na rysunku 1 oznaczonych jako F_A, F_B, M_A, M_B (pominięto S_A oraz S_B).

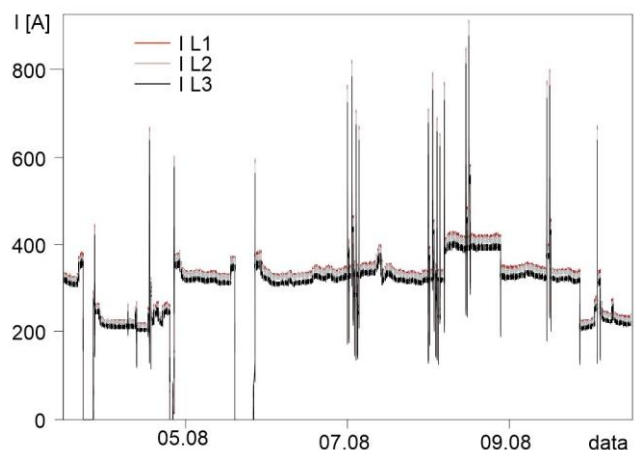
Pomiary zostały wykonane za pomocą analizatora jakości energii elektrycznej typu Lumel ND1 z przekładnikami typu LCTS-125/50SC o przekładni 1000/5 oraz LCTS-93/30SC o przekładni 400/5. Podczas pomiarów mierzone były wartości napięć, prądów, THD oraz wartości harmonicznej prądów i napięć w 1-sekundowych okresach pomiarowych. Zgodnie z wytycznymi, pomiary były rejestrowane przez minimum tydzień. Wielkości zarejestrowane przez analizator, wytypowane do dalszej

analizy, to napięcia zasilające, prądy obciążenia, harmoniczne prądów i napięć oraz współczynnik THDU. Dla każdego ze zmierzonych parametrów, oddzielnie dla każdej fazy, wykonano wykresy wartości chwilowych danego parametru. Ponadto, dla wybranych parametrów obliczono średnią, medianę oraz wartości minimalne i maksymalne z danego okresu.

W trakcie wszystkich realizowanych pomiarów nie zarejestrowano przekroczenia dopuszczalnych poziomów napięć. Nie wystąpiły również zapady napięcia oraz krótkie przerwy w zasilaniu obiektów.

Wyniki pomiarów dla wentylatora młyna A

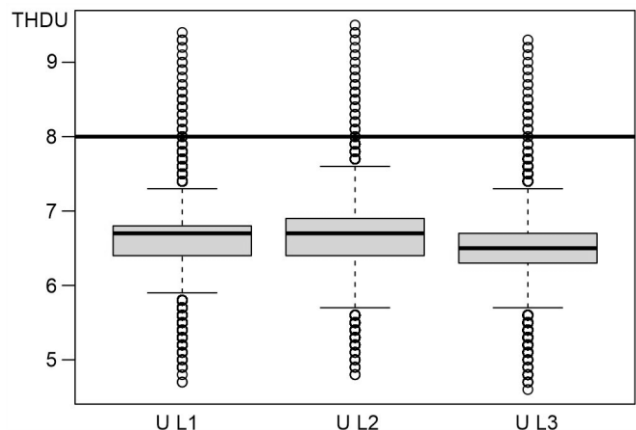
Dla wentylatora młyna zasilanego ze stacji A w okresie od 03.08 do 10.08.2022 zarejestrowano 605498 danych pomiarowych. Na rysunku 2 przedstawiono obwiednie prądów dla poszczególnych faz tego obiektu.



Rys.2. Zarejestrowana wartość prądów w punkcie pomiarowym M_A wentylatora młyna zasilanego ze stacji A (pomiar wykonany w okresie od 03.08 do 10.08.2022)

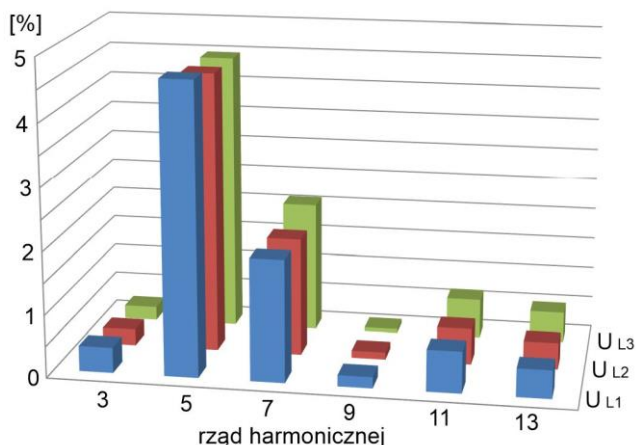
W celu oceny wpływu badanego obiektu na degradację jakości energii elektrycznej należy uwzględnić poziom tła zaburzeń elektromagnetycznych w danym punkcie pomiarowym. W tym celu w okresie gdy wentylator młyna był wyłączony (co miało miejsce w okresie od 17:30 do 20:50 dn. 03.08.2022 r.) określono poziom zaburzeń pochodzących od SE oraz będących skutkiem pracy innych odbiorów. Poziom THD napięcia w punkcie pomiarowym wyniósł 2%.

Na rysunku 3 przedstawiono rozkład rozrzutu wartości THDU dla poszczególnych faz podczas pracy wentylatora młyna z widocznymi przekroczenia wartości 8% THDU.



Rys.3. Poziomy rozkład rozrzutu wartości THDU dla poszczególnych faz podczas pracy wentylatora młyna zasilanego ze stacji A (dla pomiarów w okresie od 07.08 do 10.08.2022)

Istotnym zagadnieniem jest ocena poziomu poszczególnych harmonicznych, jakie występują w prądzie oraz napięciu badanego obiektu [9]. Wyższe harmoniczne powodują, iż generowane są dodatkowe straty mocy czynnej w transformatorach i kablach elektroenergetycznych, wzrasta temperatura pracy urządzeń elektroenergetycznych oraz obniża się poziom mocy czynnej, która może być przez nie przesyłana. Na rysunku 4 przedstawiono rozkład wartości początkowych harmonicznych w napięciu dla poszczególnych faz.

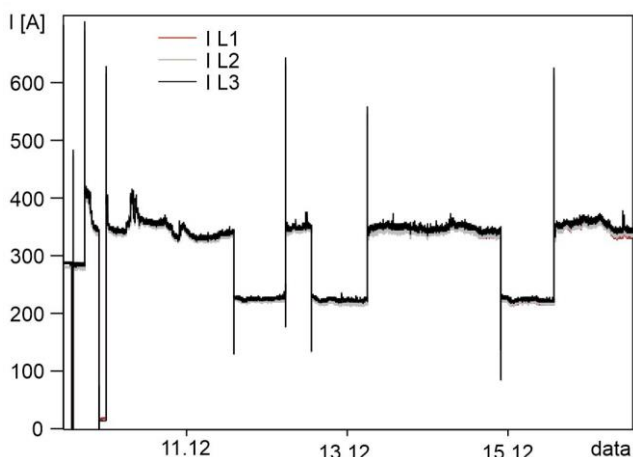


Rys.4. Zarejestrowane wartości harmonicznych w napięciu dla poszczególnych faz wentylatora młyna A w analizowanym okresie pomiarowym

Widoczny jest udział 5 harmonicznej napięcia którego mediana była na poziomie 5,4-5,5% oraz dla 7 harmonicznej na poziomie 2,2-2,5%. Poziomy wszystkich harmonicznych spełniały wymogi stawiane w normie [3].

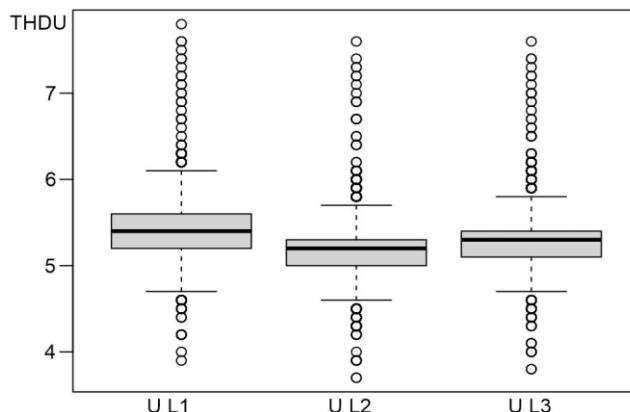
Wyniki pomiarów dla wentylatora młyna B

Dla wentylatora młyna zasilanego ze stacji B w okresie od 09.12.2022 do 16.12.2022 zarejestrowano 604798 danych pomiarowych. Na rysunku 5 przedstawiono obwiednie prądów poszczególnych faz wentylatora młyna w punkcie M_B.



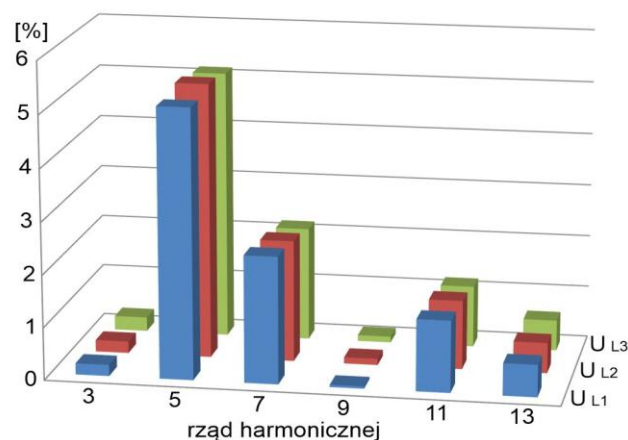
Rys.5. Zarejestrowana wartość prądów na sznycach stacji B (pomiar wykonany w okresie od 09.12 do 16.12.2022). Na wykresie, ze względu na prawie identyczne wartości prądu fazy L1 oraz L3 nie widoczna jest obwiednia prądu fazy L1.

Na rysunku 6 przedstawiono na wykresie typu boxplot rozkład THDU podczas pracy wentylatora młyna B. W żadnym momencie jego pracy nie zarejestrowano przekroczenia wartości 8% THDU. Poziom tła THD napięcia w punkcie pomiarowym M_B wynosił 1,8 %.



Rys.6. Zarejestrowany THDU na sznycach stacji B w okresie jego pracy (pomiar w okresie od 10.12 do 16.12.2022)

Na rysunku 7 przedstawiono zarejestrowane początkowe wartości harmonicznych w napięciu pracy wentylatora młyna B.

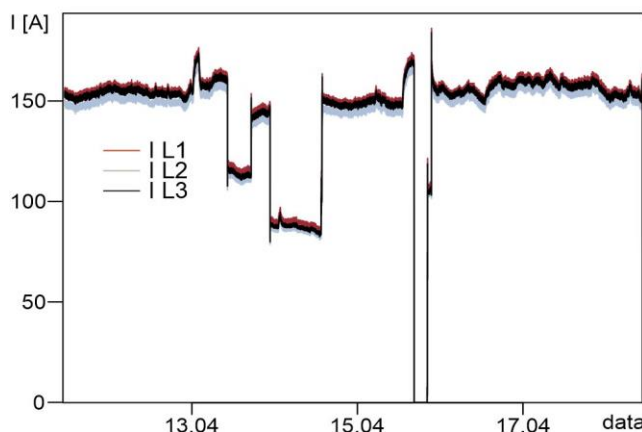


Rys.7. Zarejestrowane wartości harmonicznych w napięciu dla poszczególnych faz wentylatora młyna B

Mediana udziału 5 harmonicznej napięcia była na poziomie 4,5-4,7% a dla 7 harmonicznej na poziomie 1,9-2,1%. Poziomy wszystkich harmonicznych spełniały wymogi stawiane w normie [3].

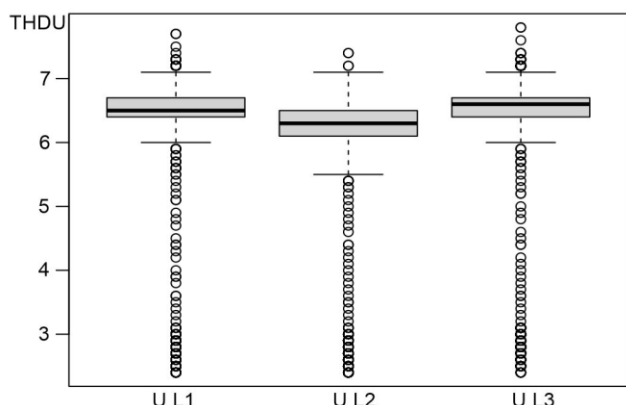
Wyniki pomiarów dla filtra młyna A

Dla wentylatora filtra młyna A w okresie od 11.04.2022 do 18.04.2022 zarejestrowano 605189 danych pomiarowych. Na rysunku 8 przedstawiono obwiednie prądów poszczególnych faz tego obiektu.



Rys.8. Zarejestrowana wartość prądów w punkcie pomiarowym F_A dla wentylatora filtra młyna A (pomiar wykonany w okresie od 11.04 do 18.04.2022)

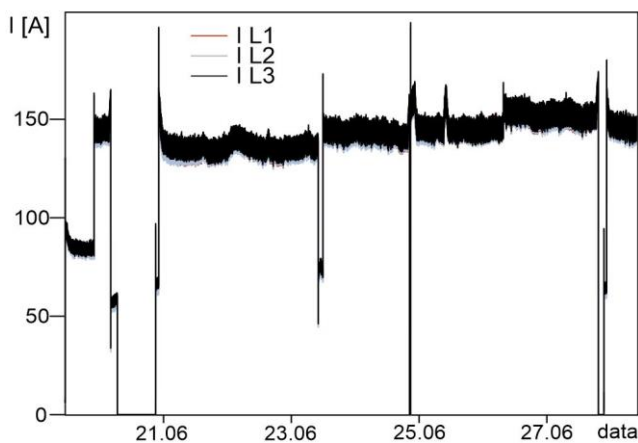
Na rysunku 9 przedstawiono rozkład rozrzutu wartości THDU dla poszczególnych faz dla pracującego wentylatora filtra młylna A.



Rys.9. Poziom THDU w punkcie pomiarowym F_A podczas pracy wentylatora filtra młylna A (z pominięciem czasów jego wyłączenia)

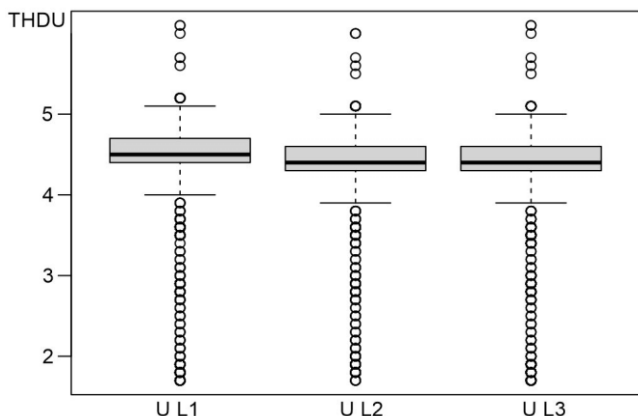
Wyniki pomiarów dla filtra młylna B

Wentylator filtra młylna zasilany ze stacji B w okresie od 19.06.2022 do 28.06.2022 zarejestrowano 605498 danych pomiarowych. Na rysunku 10 przedstawiono obwiednie prądów dla poszczególnych faz tego obiektu.



Rys.10. Zarejestrowana wartość prądów w punkcie pomiarowym F_B dla wentylatora filtra młylna B (pomiar wykonany w okresie od 19.06 do 28.06.2022)

Na rysunku 11 przedstawiono rozkład rozrzutu wartości THDU dla wentylatora filtra młylna B.



Rys.11. Poziom THDU w punkcie pomiarowym F_A podczas pracy wentylatora filtra młylna B (z pominięciem czasu jego wyłączenia)

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań i wykonanej analizy można wysunąć następujące wnioski ogólne oraz szczegółowe.

Odbiorca przemysłowy, posiadający własną sieć zakładową powinien zwracać szczególną uwagę na poziom jakości energii elektrycznej. Pozwoli mu to na bezawaryjną pracę zakładowych urządzeń elektrycznych, a tym samym optymalizację kosztów jego działania.

Wyższe harmoniczne prądu w układach zasilania zakładów przemysłowych są zjawiskiem powszechnym. Do oceny obecności wyższych harmonicznych napięcia i prądu stosowane są różne wskaźniki jakości, za podstawowy można uznać parametr THDU oraz THDI. Znajomość poziomu odkształcenia napięcia i prądu oraz spektrum wyższych harmonicznych jest jednym z pierwszych elementów analizy parametrów jakości energii elektrycznej. Skutki ich obecności najczęściej nie są obserwowane bezpośrednio i nie są łatwo policzalne ich koszty. Natomiast zastosowanie filtrów aktywnych czy pasywnych jest skutecznym rozwiązaniem, które umożliwi ograniczenie negatywnych następstw przepływu prądów odkształconych.

Przedstawiona w artykule analiza jakości energii elektrycznej dla dwóch ciągów technologicznych produkcji cementu zasilanych z różnych rozdzielnic niskiego napięcia zakładu przemysłowego pozwoliła m. in. na porównanie wprowadzanych zakłóceń do sieci elektrycznej przez poszczególne przetwornice częstotliwości różnych producentów. Pozwoliła również na ocenę poziomów THDU oraz poziomu poszczególnych harmonicznych w badanych punktach pomiarowych.

Pomimo iż badania jakości energii elektrycznej są czasochłonne, stanowią bardzo cenną bazę do dalszej analizy oraz poprawy efektywności zakładów przemysłowych.

Autorzy: dr hab. inż. Mirosław Kornatka, Politechnika Częstochowska, Katedra Elektroenergetyki, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: miroslaw.kornatka@pcz.pl; mgr inż. Mateusz Ostrycharz, Cementownia „Warta” S.A., Trębaczew, ul. Przemysłowa 17, 98-355 Działoszyn E-mail: mateusz.ostrycharz@wartasa.com.pl

LITERATURA

- [1] Filipiak I, Mielczarski W. Energetyka w okresie transformacji, PWN, Warszawa 2023
- [2] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (Dz.U. 2007 nr 93 poz. 623 z późn. zm.)
- [3] PN-EN 50160:2010 Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych
- [4] Hanzelka Z.: Jakość dostawy energii elektrycznej. Zaburzenia wartości skutecznej napięcia. Wydawnictwa AGH, Kraków 2013
- [5] Kowalski Z.: Jakość energii elektrycznej, Monografie Politechniki Łódzkiej, Łódź 2007
- [6] Hanzelka Z.: Jakość energii elektrycznej, część 4 – wyższe harmoniczne napięcie i prądów, <http://www.twelvee.com.pl/846399547.php>[dostęp:25.09.2023].
- [7] Strzałka-Gołuszka K., Strzałka J.: Jakość energii elektrycznej - parametry jakościowe, skutki złej jakości i sposoby poprawy, INPE, Warszawa 2010
- [8] Gała M.: Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych do oceny wpływu pracy odbiorników nieliniowych na jakość energii elektrycznej. Przegląd Elektrotechniczny, nr 6 2011, s. 40-46
- [9] Baghzouz Y.: Harmonic study of an industrial plant equipped with variable-frequency drives, Proceeding of the 5th International Conference - Electrical power quality and utilisation. 15-17.09.1999, ISBN 83-907546-6-5, s. 143-147