Zbigniew ŁUKASIK, Marek PODRAZA, Jerzy WOJCIECHOWSKI

ANALIZA JAKOŚCI ENERGII ELEKTRYCZNEJ UKŁADU ZASILANIA ZMODERNIZOWANEGO NAPĘDU TAŚMOCIĄGU WĘGLOWEGO

Streszczenie

W artykule przedstawiono wybrane wyniki analizy parametrów jakości energii elektrycznej, wykonanej w oparciu o przeprowadzone pomiary w linii nN, zasilającej taśmociąg węglowy. Analiza ma charakter porównawczy dla okresów przed i po modernizacji napędu taśmociągu, obejmującej zastosowanie w napędzie układu falownika. W rozważaniach uwzględniono stany rozruchu silników oraz ich pracy ze stałym obciążeniem.

WSTĘP

Jakość energii elektrycznej w systemie elektroenergetycznym to zagadnienie stale rozwijające się i nabierające coraz szerszego wymiaru. [3],[4],[6] Zaistnienie na rynku energii nowych technologii, którymi są: nowoczesne napędy, fotowoltaika, rekuperacja energii oraz smart grid, znacznie wzmocniło uwagę przykładaną do samej jakości energii elektrycznej. Wśród użytkowników energii istnieje coraz większa świadomość traktowania tego medium, jako towaru o określonej jakości. Służby energetyczne zakładów pracy posiadają coraz bardziej rozbudowany i nowoczesny aparat pomiarowy, jednak przeprowadzenie wnikliwej analizy parametrów energii elektrycznej, z określeniem przyczyn i skutków zjawisk nie jest kwestią łatwą i oczywistą. Należy więc udostępniać i promować interpretacje przeprowadzanych w różnych obiektach elektroenergetycznych pomiarów parametrów jakości. W niniejszym artykule autorzy przedstawili główne efekty takiej właśnie analizy parametrów energii, wykonanej w oparciu o przeprowadzone pomiary w elektroenergetycznej linii nN, zasilającej taśmociąg węglowy. Badania wykonane były przed i po modernizacji taśmociągu, co dało możliwość otrzymania analizy porównawczej. Została ona opracowana w oparciu o Rozporządzenie Ministra Gospodarki [2] oraz normę PN-EN 50160:2010 [1].

1. UKŁAD ZASILANIA TAŚMOCIĄGU WĘGLOWEGO

1.1. Silniki układu napędowego taśmociągu węglowego

Przed modernizacją taśmociąg węglowy napędzany był przez silniki indukcyjne z wirnikami klatkowymi, o parametrach znamionowych każdego: moc Pn=110kW, prąd In=183 A, współczynnik mocy cosφ=0,92 oraz sprawność η=94,2%. Silniki połączone były z przekładnią poprzez sprzęgła hydrokinetyczne. W trakcie modernizacji zainstalowano dwa nowe silniki o zbieżnych parametrach, wyposażone w wentylatory i hamulce. Silniki połączono z przekładnią poprzez sprzęgło stałe. Z uwagi na ciężki charakter pracy silników, a także bardzo duże prądy rozruchu modernizacja układu zasilania miała na celu zastąpienie tradycyjnego układu zasilania nowoczesnym, energooszczędnym układem napędowym.

1.2. Przemiennik częstotliwości układu napędowego

Przy projektowaniu nowego układu zasilania taśmociągu węglowego kierowano się potencjalnymi możliwościami sterowania napędu oraz wydajnością energetyczną [5]. Wybór przemiennika częstotliwości dał możliwość uzyskiwania łagodnego rozruchu i napędu silników, a poprawa sprawności pozwoliła na minimalizację strat mocy oraz redukcję zużycia energii. Zmodernizowany układ wyeliminował także zniszczenia materiałowe w postaci wypalenia się uzwojeń transformatora i mikrouszkodzeń na szynach rozdzielnicy, a zjawiska takie występowały przy prądach w niezmodernizowanym systemie rozruchu. Ze względu na duże moce silników (2x110kW) i trudne warunki rozruchowe zastosowano jedną przetwornicę częstotliwości na oba silniki napędowe. Wybrano przetwornicę wyposażoną w: filtr RF1 klasy A1 ograniczający zakłócenia zgodnie z normami IEC 61000 i EN 61800, wbudowane bezpieczniki, graficzny panel sterowania LCP, chooper hamulca oraz zewnętrzny rezystor hamujący (rezystor hamujący jako element mocno grzewczy zabudowano w szafie obok przetwornicy i powiązano z szafą kablem 2xYnKY 1x120mm^2).

1.3. Układ zasilania elektroenergetycznego

Przetwornica została zainstalowana w pomieszczeniu rozdzielni zasilającej napęd, w dodatkowej szafie, wyposażonej w system wentylacji i układ kontroli temperatury. Na wyjściu przetwornicy zastosowano rozłączniki izolacyjne 3-biegowe, z podwójną przerwą izolacyjną. Rozłączniki mają na celu umożliwienie dokonywania pomiarów kabla zasilającego silnik oraz kabla razem z silnikiem. Bez rozłącznika konieczne stawałoby się odpinanie kabli w szafie przetwornicy.

Dla zapewnienia prawidłowej pracy silniki zasilono za pomocą elektroenergetycznych kabli ekranowanych. Dobrano kabel typu TF-EMV-UV-3PLUS-3X150+3G25 2YSLCYK-J. Jest to specjalny przewód przyłączeniowy silników do przetwornic częstotliwości wg DIN VDE 0250, stosowany przy średnim obciążeniu mechanicznym dla połączeń elastycznych, w których nie występują naprężenia rozciągające. Układany jest on przeważnie w pomieszczeniach suchych, wilgotnych i mokrych, a także w przestrzeniach otwartych. W celu zoptymalizowania EMV wykonano obustronny, rozległy kontakt oplotu miedzianego z zaciskami poprzez dławiki kablowe. Ekrany kabli zostały uziemione na obu końcach. Konstrukcja 3 PLUS przewodów do silników przetwornic częstotliwości charakteryzuje się położeniem symetrycznym 3 żył, poprawiając cechy kompatybilności elektromagnetycznej (w porównaniu z 4 żyłami).

W starym układzie każdy silnik zasilany był z osobnego pola zasilającego dwoma równoległymi kablami 2x4x120mm^2, natomiast po modernizacji dwóch pól wykonano jedno pole zasilające przetwornik częstotliwości.

Modernizacji podlegała także sama rozdzielnica. W nowym rozwiązaniu zastosowano rozdzielnicę nN typu NGWR, przeznaczoną do pracy w sieci do 1kV, w układzie TN-C-S. Wszystkie części przewodzące dostępne instalacji przyłączono do uziemionego punktu zasilania za pomocą przewodów ochronnych PE. Zasilanie rozdzielnicy zrealizowane zostało mostem szynowym NWG M1 z transformatora 6/0,4kV o mocy 800kVA.

2. POMIARY JAKOŚCI ENERGII ELEKTRYCZNEJ W UKŁADZIE ZASILANIA NAPĘDU TAŚMOCIĄGU

2.1. Układ pomiarowy parametrów jakości energii

Pomiary parametrów energii elektrycznej linii zasilającej taśmociąg węglowy przeprowadzono przed i po wykonaniu jego modernizacji, w okresie jednego tygodnia każdy. Były to terminy: 3–10 listopada oraz 2–9 grudnia. Do wykonania pomiarów parametrów jakości energii użyto przyrządu klasy A (dedykowany do przeprowadzania pomiarów o wymaganej dużej dokładności). Był to uniwersalny trójfazowy przyrząd do pomiaru i diagnostyki: napięcia, prądu, częstotliwości, mocy, zużycia energii, asymetrii, składowych harmonicznych i interharmonicznych oraz migotania światła. Umożliwiał rejestrację wielu rodzajów zdarzeń sieciowych, takich jak: spadki i skoki, niestabilności, przerwy oraz nagłe zmiany napięcia. Dzięki specjalistycznemu i ergonomicznemu oprogramowaniu miernik posiadał bardzo szerokie pole analizy parametrów energii, zgodnych z normą jakości PN-EN 501.

Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono ogólny widok układu pomiarowego parametrów energii w rozdzielnicy nN, składający się z analizatora wraz z połączeniami.

Rys. 1. *Widok ogólny włączenia analizatora parametrów jakości energii elektrycznej w obwody zasilania elektroenergetycznego taśmociągu węglowego*

Rys. 2*. Podłączenie układu pomiaru prądu analizatora parametrów jakości energii elektrycznej w rozdzielnicy linii zasilania taśmociągu węglowego*

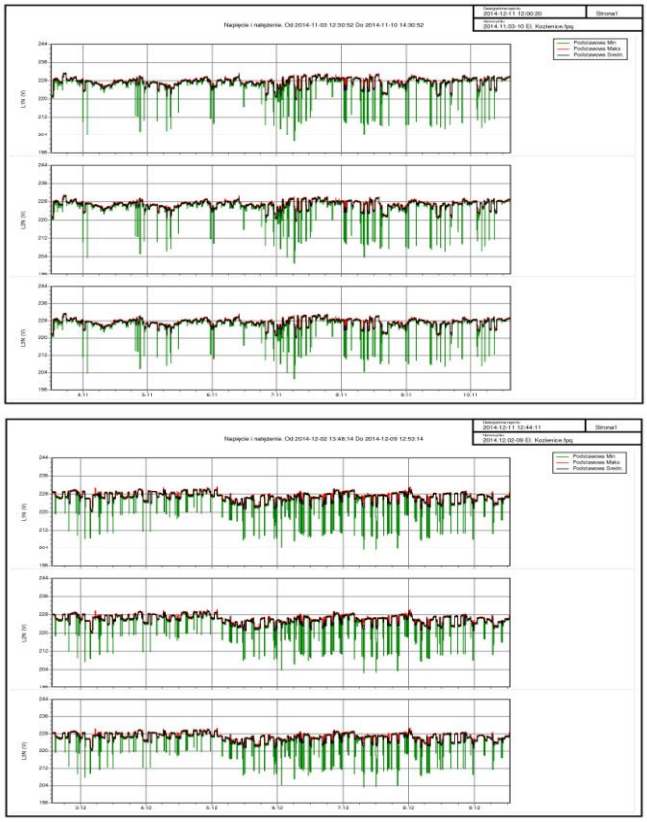
Pomiary parametrów jakości energii elektrycznej wykonano w obwodach rozdzielnic rozdzielni nN 0,4kV, zasilających napędy taśmociągu:

- w polu nr 1 – pomiary napięcia (szyny zbiorcze rozdzielnicy),
- w polu nr 3 – pomiary prądu (kable zasilające przetwornicę częstotliwości).

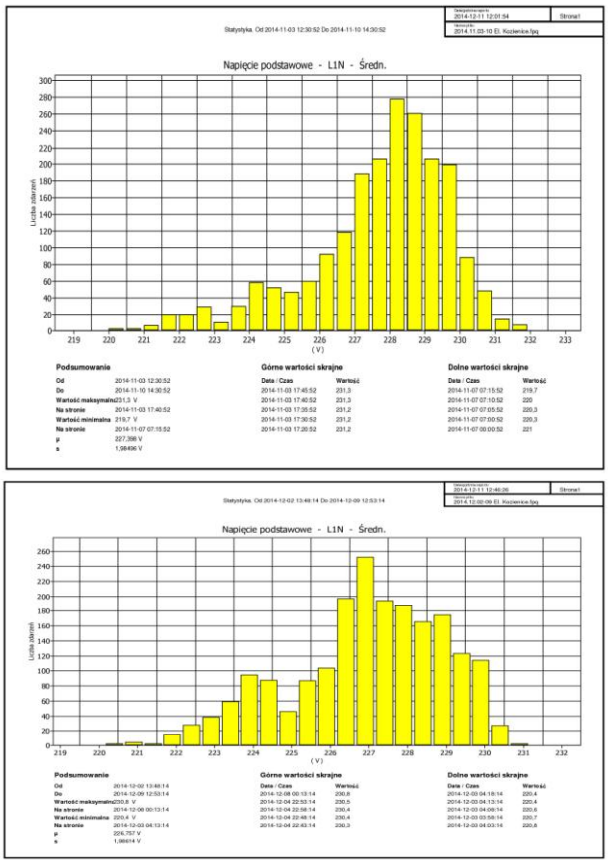
Pomiary wykonano dla stanu rozruchu silników oraz podczas normalnej pracy taśmociągu nawęglania, w okresie przed i po modernizacji, tj. przy bezpośrednim zasilaniu z sieci elektroenergetycznej oraz przy zasilaniu poprzez układ przemiennika częstotliwości. Mierzono następujące parametry charakteryzujące jakość energii elektrycznej: częstotliwość napięcia sieciowego, wartość skuteczną napięcia zasilającego, wahania napięcia zasilającego, szybkie zmiany napięcia zasilającego, asymetrię napięcia zasilającego, zapady napięcia, przerwy w zasilaniu, harmoniczne i interharmoniczne w napięciu zasilającym, prądy pobierane przez odbiornik (wartość ta nie jest regulowana przez przepisy), harmoniczne w prądzie pobieranym przez odbiornik (wartość ta nie jest regulowana przez przepisy).

2.2. Wyniki pomiarów parametrów jakości energii zasilanego układu napędowego taśmociągu

W wyniku przeprowadzonych sesji pomiarowych otrzymano obszerny zbiór parametrów energii zasilającej napęd taśmociągu węglowego. Poniżej autorzy przedstawili w formie wykresów nieliczny fragment uzyskanych rezultatów. Uwagę zwrócono na parametry charakterystyczne, prezentując ich wartości przed i po modernizacji.

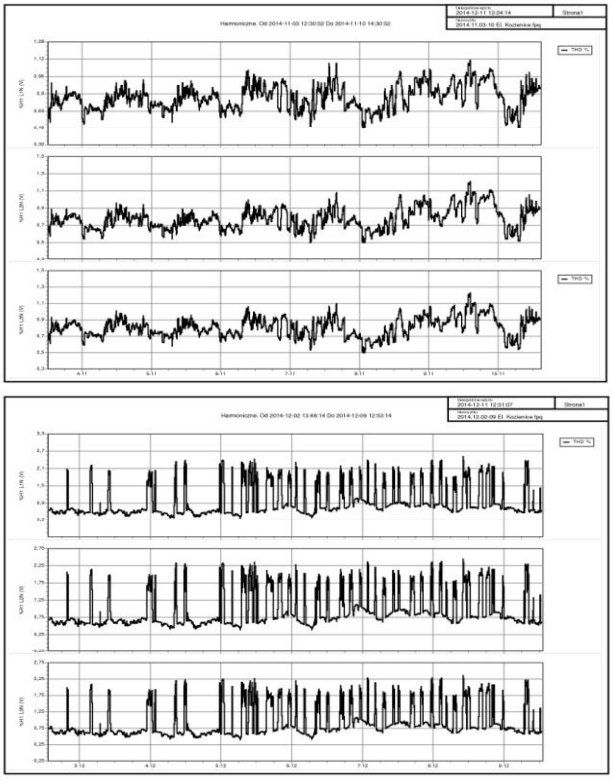


Rys. 3. *Wykresy zmian wartości skutecznej napięcia zasilania poszczególnych faz układu przed (wykres górny) i po (wykres dolny) modernizacji - tygodniowy okres pomiaru*

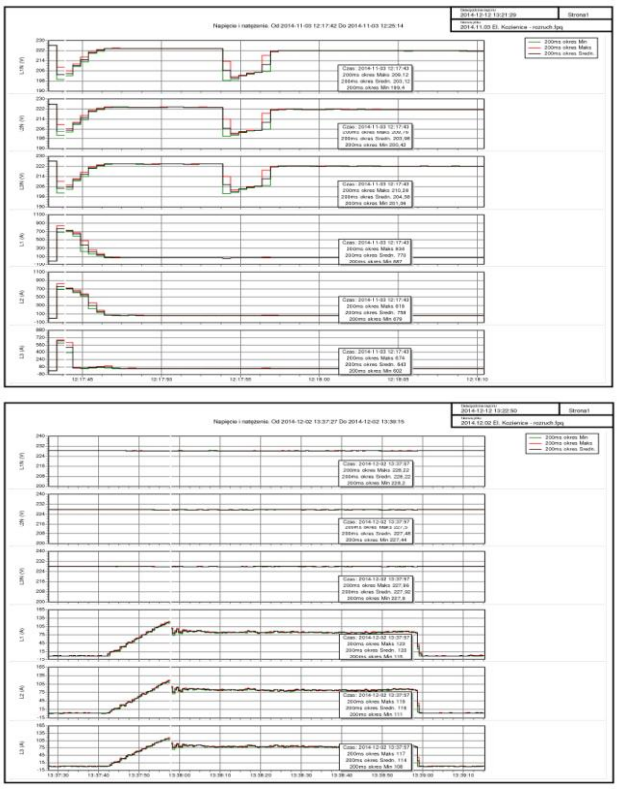


Rys. 4. *Statystyczny rozkład wartości skutecznych napięcia zasilania fazy L1N przed (wykres górny) i po (wykres dolny) modernizacji*

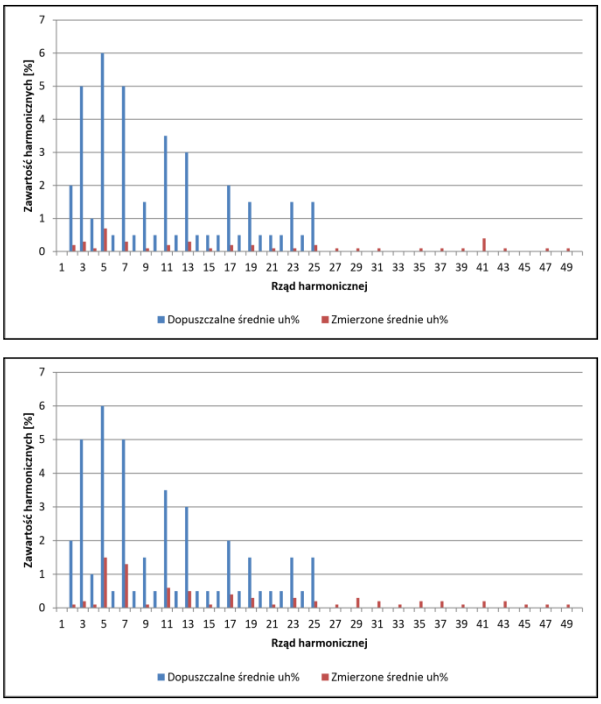
Jako kryterium oceny zawartości harmonicznych przyjęto rozporządzenie [2] oraz dopuszczalne wartości poszczególnych harmonicznych podmiotów zaliczanych do grupy III i IV.



Rys. 5. *Przebieg zawartości składowych harmonicznych (współczynnik THD) napięcia zasilania przed (wykres górny) i po (wykres dolny) modernizacji – tygodniowy okres pomiaru*



Rys. 6. *Przebieg wartości skutecznych napięcia i prądu rozruchu taśmociągu przed (wykres górny) i po (wykres dolny) modernizacji*



Rys. 7. *Wartości składowych harmonicznych napięcia podczas rozruchu przed (wykres górny) i po (wykres dolny) modernizacji – wybrany okres cyklu rozruchu*

Całkowita zawartość wyższych harmonicznych napięcia podczas rozruchu silników (wartość średnia dla całego cyklu rozruchu) przed modernizacją wynosiła: 1,0%. Po modernizacji wartość tego parametru wzrosła do 2,3%. Wartość współczynnika zawartości harmonicznych w prądzie zasilania zmieniła się w znacznie większych granicach. Przed modernizacją wynosiła ona 4%, zaś po

modernizacji wynosiła 130%. Należy tu oczywiście podkreślić, że dane te odnoszą się do procesu rozruchu silników.

2.3. Ocena jakości energii zasilania taśmociągu węglowego w oparciu o normy PN-EN 50160:2010

Na początku analizy należy zwrócić uwagę na bardzo dużą różnicę w poborze prądu podczas rozruchu przed i po modernizacji układu taśmociągu. W starym układzie zasilania napędów występowały udary prądu rzędu 900A, natomiast po modernizacji wartość prądu rozruchu spadła do 210A. Prądy rozruchu o bardzo dużych wartościach wydatnie przyczyniły się do znaczącej degradacji uzwojeń transformatora zasilającego napęd taśmociągu. Należy więc ocenić, że najważniejszy cel modernizacji układu został osiągnięty. Podobnie przedstawia się sytuacja z poborem prądu podczas pracy ze stałym obciążeniem. Układ po modernizacji charakteryzuje się zmniejszoną o co najmniej 20% wartością poboru prądu w czasie normalnej pracy.

W aspekcie parametrów napięcia zasilającego widoczne są bardzo duże zapady, powodujące dość częste działanie zabezpieczenia podnapięciowego rozdzielnicy.

Kolejną kwestią jest odkształcenie prądu i napięcia zasilania. Można było się spodziewać, że po modernizacji wyższe harmoniczne w napięciu THDu oraz w prądzie THDi będą miały większe wartości niż przed modernizacją. Całkowita zawartość wyższych harmonicznych w napięciu (THDu) w efekcie modernizacji wzrosła z 1,0% do 2,3%. Według normy PN-EN-50160 współczynnik THDu nie powinien przekraczać 8%. W odniesieniu do normy PN-EN-50160, wartość 2,3% jest wynikiem bardzo dobrym. Wyższe harmoniczne napięcia przed i po modernizacji rzędu 3, 5, 7, 11, 13 są zwiększone. Po modernizacji zwiększyła się zawartością wyższych harmonicznych w prądzie pobieranym przez napęd, THDi = 130%, w porównaniu do starego układu, gdzie THDi=3,7%. Norma PN-EN-50160 nie reguluje ile maksymalnie może wynosić zawartość wyższych harmonicznych w prądzie.

Norma PN-EN 50160 określa, że mierzona średnia wartość częstotliwość zawarta powinna być w przedziale 50Hz ± 1% (49,5-50,5 Hz) oraz 50Hz +4% i -6% (47-52 Hz) przez dane okresy czasu. Parametr częstotliwość przed i po modernizacji utrzymywał się na bardzo wysokim poziomie, zgodnym z normą.

Według normy PN-EN 50160 maksymalna tolerancja wartości asymetrii napięcia sieciowego mieści się w przedziale od 0 - 2.00%. Modernizacja pozwoliła zmniejszyć asymetrię napięć, która i przed modernizacją mieściła się w granicach normy.

PODSUMOWANIE

Prowadzenie badań i ocen jakości energii elektrycznej jest coraz powszechniejsze, a ma na celu przede wszystkim zwiększenie niezawodności oraz bezpieczeństwa pracy urządzeń i obiektów zasilanych w energię elektryczną. Ciągły rozwój przemysłu i życia społecznego, związanych z wykorzystywaniem energii elektrycznej wpływa z jednej strony na konieczność zapewnienia pewności energetycznej, zaś z drugiej na występowanie coraz większej liczby zakłóceń w sieciach elektroenergetycznych. Wykonywanie pomiarów parametrów energii elektrycznej i analiz ich wyników przyczynia się do spełnienia obu wyżej wymienionych zadań. W artykule przedstawiono nieliczny zbiór takich właśnie wyników w odniesieniu do układu zasilania taśmociągu węglowego. Jako ogólny wniosek można podać, że nakład finansowy poniesiony w trakcie modernizacji przyniósł spodziewane efekty. Ograniczono podstawowy problem, jakim były prądy rozruchu i pracy w warunkach ustalonych. Osiągnięto także poprawę wartości innych parametrów energii elektrycznej. Jedynym parametrem, który uległ pogorszeniu była zawartość składowych harmonicznych w prądzie, a wiec i w konsekwencji w napięciu zasilania. Wzrost ten jednak mieścił się w granicach przewidzianych normą.

BIBLIOGRAFIA

1. PN-EN 50160:2010, *Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych*.
2. *Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dn. 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego* (Dz. U. z dnia 29 maja 2007, poz 623).
3. Hanzelka Z., *Jakość dostawy energii elektrycznej. Zaburzenia wartości skutecznej napięcia.* Wydawnictwo AGH, Kraków 2013.
4. Klajn A., Markiewicz H., *Jakość energii i niezawodność zasilania w instalacjach elektrycznych*, Podręcznik INPE dla elektryków, 2007.
5. Szymański J., *Przemienniki częstotliwości w wielosilnikowym napędzie wału o dużym momencie rozruchowym*, VIII Krajowa Konferencja Naukowa - Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym SENE 2007, Łódź, 2007.
6. Olczykowski Z., Kornaszewski M., Wojciechowski J., *Zmiany parametrów napięcia zasilającego stalownię podczas wytopu w piecu łukowym*, Logistyka nr 6/2010.
7. Łukasik Z., Nowakowski W., Kuśmińska-Fijałkowska A., *Zarządzanie bezpieczeństwem infrastruktury krytycznej*, Logistyka nr 4/2014, 758-763.
8. Kuśmińska-Fijałkowska A., Łukasik Z., *Koordynowanie działań w organizacji w odniesieniu do Systemu Zarządzania Jakością,* Logistyka nr 3/2014, 3570-3576.

ANALYSIS OF POWER QUALITY OF MODERNIZED COAL CONVEYOR PROPULSION

Abstract

In the article selected results of the analysis of power quality parameters were presented. This analysis was made on the basis of measurements at low voltage lines delivering energy to coal conveyor. The analysis compares system parameters for the periods before and after the upgrade of coal conveyor drive, which consisted the application of power inverter in it. The status of starting the engines and their operation at constant load was taken into consideration.

Autorzy:

prof. dr hab. inż. **Zbigniew Łukasik** – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Wydział Transportu i Elektrotechniki, Instytut Automatyki i Telematyki, z.likasik@uthrad.pl

mgr inż. **Marek Podraza** – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Wydział Transportu i Elektrotechniki – absolwent

dr inż. **Jerzy Wojciechowski** – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Wydział Transportu i Elektrotechniki, Instytut Systemów Transportowych i Elektrotechniki, j.wojciechowski@uthrad.pl