

## **WPŁYW MODERNIZACJI UKŁADU ZASILANIA MASZYN WYCIĄGOWYCH NA PARAMETRY NAPIĘCIA W ZAKŁADACH GÓRNICZYCH**

**Tomasz SIOSTRZONEK<sup>1</sup>, Krzysztof CHMIELOWIEC<sup>2</sup>, Mateusz DUTKA<sup>3</sup>, Andrzej FIRLIT<sup>4</sup>, Krzysztof PIĄTEK<sup>5</sup>**

- |  |                             |
|--|-----------------------------|
| 1. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, tel.: 12 617 48 59 | e-mail: tsios@agh.edu.pl    |
| 2. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, tel.: 12 617 35 93 | e-mail: kchmielo@agh.edu.pl |
| 3. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, tel.: 12 617 39 20 | e-mail: mdutka@agh.edu.pl   |
| 4. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, tel.: 12 617 28 36 | e-mail: afirlit@agh.edu.pl  |
| 5. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, tel.: 12 617 39 20 | e-mail: kpiatek@agh.edu.pl  |

**Streszczenie:** Maszyna wyciągowa jest, pod względem mocy zainstalowanej, jednym z największych urządzeń w podziemnym zakładzie górniczym. Urządzenie to pracuje cyklicznie z dużą ilością rozruchów w ciągu godziny. Z tego powodu jest ono źródłem licznych zaburzeń w sieci elektroenergetycznej zakładu górniczego, takich jak: wyższe harmoniczne czy wahania napięcia. Obecnie w sterowaniu maszyn wyciągowych coraz powszechniej odchodzi się od stosowania tradycyjnego układu Leonarda na rzecz wielopulsowych przekształtników energoelektronicznych, co niesie za sobą podniesienie sprawności układu oraz lepsze zdolności regulacyjne, lecz może być przyczyną zwiększenia negatywnego oddziaływania na parametry jakości dostawy energii elektrycznej w sieci zasilającej zakładu górniczego. W artykule przedstawiono analizę wpływu zmiany układu zasilania maszyny wyciągowej na parametry jakości energii elektrycznej sieci zakładu górniczego na podstawie pomiarów układów zasilania dwóch maszyn wyciągowych, przed oraz po modernizacji.

**Słowa kluczowe:** maszyna wyciągowa, harmoniczne napięcia, jakość energii elektrycznej.

### **1. WPROWADZENIE**

Niniejszy artykuł poświęcony jest analizie danych pomiarowych, zarejestrowanych z wykorzystaniem analizatorów jakości energii elektrycznej (JEE), w dwóch śląskich kopalniach. Analiza została przeprowadzona pod kątem obecności w kopalnianej sieci elektroenergetycznej zaburzeń mogących mieć wpływ na działania urządzeń do niej przyłączonych, jak również negatywnych skutków finansowych w postaci kar umownych (moc bierna, wyższe harmoniczne i wahania napięcia).

W pierwszym przypadku pierwotnym układem zasilania był układ Leonarda, który podlegał modernizacji na układ przekształtnikowy 12-pulsowy z nawrotem przez wzbudzenie (przypadek 1). W drugim przypadku przed modernizacją zainstalowany był układ 12-pulsowy (Jantar B), który został zastąpiony układem 12-pulsowym z nawrotem przez obwód główny. W tym przypadku zmianie uległ sposób nawrotu układu napędowego. W obwodzie głównym maszyny wyciągowej zainstalowany został układ czterokwadrantowy. W obwodzie wzbudzenia prąd jest jednokierunkowy. Takie rozwiązanie może wpływać na zwiększenie poziomu zakłóceń pochodzących od układu przekształtnikowego.

Tego typu modernizacje są w ostatnich latach bardzo częste w polskich kopalniach. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że elektromaszynowy układ Leonarda, dzięki swojej konstrukcji, nie generuje zakłóceń, które są charakterystyczne dla układów energoelektronicznych – mocy biernej i wyższych harmonicznych [2]. Z tego powodu modernizacjom układów zasilania maszyn wyciągowych, polegającym na wprowadzaniu układów energoelektronicznych, zawsze towarzyszyć powinna analiza wpływu na jakość dostawy energii elektrycznej.

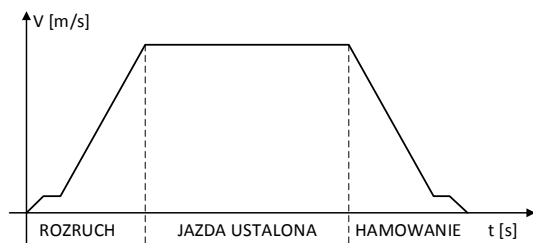
W pierwszym z opisywanych przypadków moc silnika wyciągowego nie uległa zmianie i wynosiła 2,2 MW, w drugim przypadku zwiększono moc silnika z 1,45 MW do 2,2 MW.

### **2. SPOSOBY OGRANICZANIA NEGATYWNEGO ODDZIAŁYWANIA NAPIĘCIA MASZYN WYCIĄGOWEJ NA SIEĆ ZASILAJĄCĄ**

Maszyna wyciągowa jest odbiornikiem, którego praca odbywa się w sposób cykliczny. Naczynie w szybie porusza się zgodnie z tzw. diagramem jazdy. Przykładowy diagram pokazano na rysunku 1. Każdy cykl składa się z trzech faz: rozruchu, jazdy ustalonej i hamowania. Z punktu widzenia oddziaływania na sieć zasilającą, najbardziej niekorzystny jest fragment diagramu związany z rozruchem maszyny. Wtedy też występuje największy poziom mocy biernej wywołanej przez układ [3].

Aby ograniczyć negatywne oddziaływanie układu napędowego na sieć zasilającą stosuje się układy tzw. przekształtników złożonych, których sterowanie w sposób kolejnościowy pozwala na ograniczenie mocy biernej nawet o 25%. Jednak pociąga to za sobą wzrost poziomów harmonicznych w sieci. Innym sposobem jest zastosowanie kompensatorów statycznych, a w przypadku takich układów jak maszyna wyciągowa, najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie układów nadążnych.

Dobór odpowiedniego układu kompensacji i filtracji powinien być poprzedzony pomiarami parametrów jakości dostawy energii elektrycznej (JDEE) oraz analizą techniczno-ekonomiczną proponowanych rozwiązań.



Rys. 1 Diagram jazdy maszyny wyciągowej

Zapewni to zastosowanie optymalnego rozwiązania. Jest to szczególnie istotne w zakładzie górniczym, w którym sieć elektroenergetyczna podlega ciągłym zmianom, ze względu na postępy prac w wyrobiskach i zmieniające się parametry sieci.

### 3. KRYTERIA OCENY JAKOŚCI DOSTAWY ENERGII ELEKTRYCZNEJ

Do oceny warunków dostawy energii elektrycznej w zakładach górniczych przyjęto następujące miary liczbowe:

- wartość skuteczną,
- asymetrię,
- wahania,
- odkształcenie.

Za podstawę oceny warunków zasilania przyjęto wymagania zawarte w normie [1]. Zgodnie z wytycznymi wymienionej normy analizowane punkty pomiarowe zakwalifikowane zostały do 3 klasy środowiska elektromagnetycznego.

Podstawowy czas agregacji danych pomiarowych, na podstawie którego przeprowadzona została ocena poprawności warunków zasilania, został ustalony na 1 minutę, tak aby uzyskać dokładną informację o zmienności obciążeń w rozważanych punktach pomiarowych na wypadek potrzeby doboru urządzeń kompensujących. Do pomiarów zostały wykorzystane rejestratory klasy A Fluke 1760 oraz PQBox 200. Przyrządy te przeznaczone są do badania jakości dostawy energii elektrycznej w sieciach zasilających oraz do długotrwałych rejestracji wskaźników jakości dostawy energii elektrycznej.

### 4. ANALIZA PRZYPADKU 1

Dwie tury pomiarów JEE analizatorami klasy A wykonane zostały w zakładzie górniczym realizującym modernizację układu zasilania maszyny wyciągowej z układu Leonarda na 12-pulsowy napęd przekształtnikowy. Do analizy wytypowane zostały trzy punkty pomiarowe o napięciu znamionowym 6 kV, istotne z punktu widzenia funkcjonowania zakładu górniczego oraz oceny jego oddziaływania na sieć zasilającą:

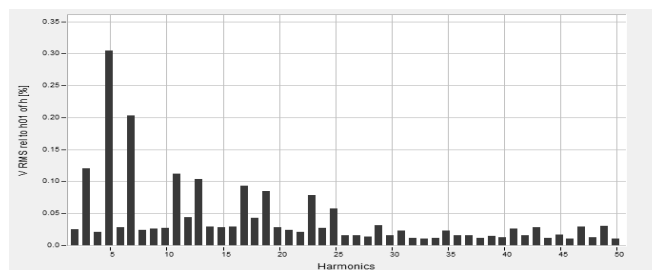
- P1 – zasilanie systemu, do którego w czasie normalnej pracy przyłączone jest maszyna wyciągowa,
- P2 – zasilanie części dołowej kopalni,
- P3 – na odpływie stacji 110/6 kV - zasilanie kopalni z oddzielnej sieci napowietrznej

W tabeli 1 przedstawiono porównanie miar liczbowych JDEE wyrażonych w postaci percentyli (CP), dla pomiarów realizowanych przed oraz po modernizacji układu zasilania maszyny wyciągowej. Uzyskane wyniki zestawiono z definiowanymi w [1] poziomami dopuszczalnymi.

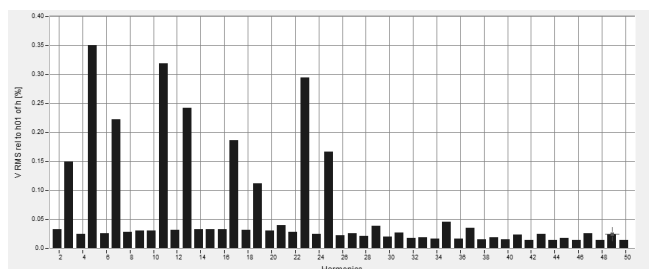
Tablica 1. Porównanie miar liczbowych JEE (wartości spośród 3 faz, które były najbardziej zbliżone do poziomów dopuszczalnych) uzyskanych dla przypadku 1

Parametr		Punkt	Przed	Po	Limit [1]
$U_{rms}$	CP0	P1	6,028 kV	6,033 kV	5,1 kV
		P2	6,019 kV	6,030 kV	
		P3	6,162 kV	6,133 kV	
	CP100	P1	6,374 kV	6,367 kV	6,6 kV
		P2	6,366 kV	6,361 kV	
		P3	6,419 kV	6,439 kV	
$k_{u2}$	CP100	P1	0,28%	0,18%	3%
		P2	0,17%	0,16%	
		P3	0,40%	0,36%	
$P_{it}$	CP95	P1	0,430	0,456	1
		P2	0,406	0,438	
		P3	0,731	0,848	
$THD_U$	CP100	P1	0,86%	3,89%	10%
		P2	0,88%	3,90%	
		P3	2,35%	1,29%	
	CP95	P1	0,65%	1,24%	nie dotyczy
		P2	0,65%	1,24%	
		P3	1,05%	0,99%	

Na rysunkach 2 i 3 zaprezentowane zostało widmo harmonicznych napięcia w punkcie P1, dla pomiarów realizowanych przed oraz po modernizacji.



Rys. 2 Wartości średnie z wartości 1-minutowych harmonicznych napięcia (za cały okres pomiaru) – przypadek 1, przed modernizacją



Rys. 3 Wartości średnie z wartości 1-minutowych harmonicznych napięcia (za cały okres pomiaru) – przypadek 1, po modernizacji

W monitorowanym okresie stwierdzono zarówno stany przekompensowania oraz niedokompensowania mocy biernej. W tabeli 2 przedstawiono procentowy udział poszczególnych stanów obciążenia w rozważanych punktach pomiarowych.

Tablica 2. Podsumowanie pomiarów mocy bierniej dla przypadku 1

Punkt	tgφ	Udział czasowy	
		Przed	Po
P1	od 0 do 0,4 (ind)	75,81%	53,48%
	<0 (poj)	1,23%	1,12%
	>0,4 (ind)	22,96%	45,40%
P2	od 0 do 0,4 (ind)	83,18%	47,27%
	<0 (poj)	4,72%	3,16%
	>0,4 (ind)	12,11%	45,95%
P3	od 0 do 0,4 (ind)	92,33%	94,52%
	<0 (poj)	6,73%	5,16%
	>0,4 (ind)	0,94%	0,32%

W wyniku przeprowadzonej analizy porównawczej stwierdzono:

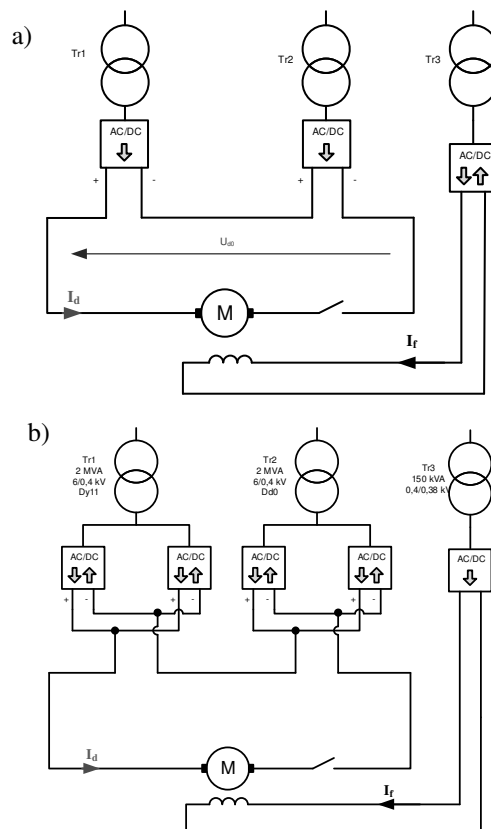
1. Brak istotnej zmiany w zakresie wartości skutecznej napięcia,
2. Zmniejszenie wartości maksymalnej asymetrii napięcia  $\sigma$ : 0,1% dla punktu P1, 0,01% dla punktu P2 oraz 0,04% dla punktu P3.
3. Zwiększenie poziomu wahań napięcia (CP95) względem stanu przed modernizacją  $\sigma$ : 6% dla P1, 8% dla P2 oraz 16% dla punktu P3, przy czym poziomy dopuszczalne określone w [1] nie zostały przekroczone.
4. Zwiększenie wartości współczynnika odkształcenia napięcia THDU (CP95) z 0,64% do 1,24% dla punktów P1 i P2 (wzrost o ponad 100% względem stanu pracy przed modernizacją), przy czym poziomy dopuszczalne określone w [1] nie zostały przekroczone.
5. Zwiększenie czasu niedokompensowania mocy bierniej w punktach P1 oraz P2.

## 5. ANALIZA PRZYPADKU 2

Dwie tury pomiarów JDEE analizatorami klasy A wykonane zostały w zakładzie górniczym realizującym modernizację układu zasilania maszyny wyciągowej z układu przekształtnikowego 12-pulsowego (JANTAR B) (rysunek 4a) na 12-pulsowy napęd przekształtnikowy. Przed modernizacją zmiana kierunku wirowania silnika realizowana była poprzez zmianę kierunku prądu w obwodzie wzbudzenia.

Po modernizacji, układ przekształtników obwodu głównego został zmieniony na czterokwadrantowy (rysunek 4b). Obwód wzbudzenia zasilany jest z przekształtnika nienawrotnego. Pomiary zrealizowane zostały w punkcie P1 (punkt zasilania maszyny wyciągowej).

W tablicy 1 przedstawiono porównanie miar liczbowych JDEE wyrażonych w postaci procenty (CP), dla pomiarów realizowanych przed oraz po modernizacji układu zasilania maszyny wyciągowej. Uzyskane wyniki zestawiono z definiowanymi w [1] poziomami dopuszczalnymi.



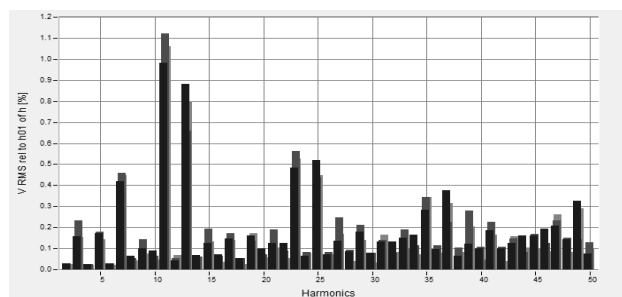
Rys. 4 Schemat układu maszyny wyciągowej przed (a) i po (b) modernizacji

Na rysunkach 5 i 6 zaprezentowane zostało widmo harmonicznych napięcia w punkcie P1, dla pomiarów realizowanych przed oraz po modernizacji.

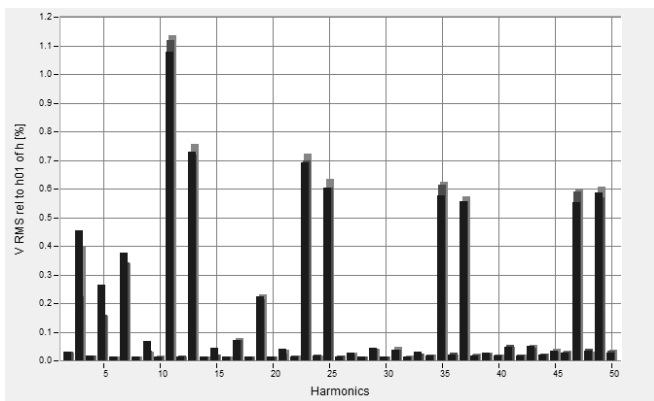
W monitorowanym okresie stwierdzono zarówno stany przekompensowania oraz niedokompensowania mocy bierniej. W tablicy 4 przedstawiono procentowy udział poszczególnych stanów obciążenia w rozważanych punktach pomiarowych.

Tablica 3. Porównanie miar liczbowych JEE (wartości spośród 3 faz, które były najbardziej zbliżone do poziomów dopuszczalnych) uzyskanych dla przypadku 1

Parametr	Punkt	Przed	Po	Limit [1]	
$U_{rms}$	CP0	P1	5,91 kV	5,89 kV	5,1 kV
	CP100	P1	6,254 kV	6,32 kV	6,6 kV
$k_{u2}$	CP100	P1	0,93%	1,4%	3%
$P_{it}$	CP95	P1	0,36	0,47	1
THDU	CP100	P1	2,40%	3,82%	10%



Rys. 5 Wartości średnie z wartości 1-minutowych harmonicznych napięcia (za cały okres pomiaru) – przypadek 2, przed modernizacją



Rys. 6 Wartości średnie z wartości 1-minutowych harmonicznego napięcia (za cały okres pomiaru) – przypadek 2, po modernizacji

Tablica 4 Podsumowanie pomiarów mocy biernej dla przypadku 2

Punkt	tgφ	Udział czasowy	
		Przed	Po
P1	od 0 do 0,4 (ind)	95,3%	74,3%
	<0 (poj)	0,8%	0%
	>0,4 (ind)	3,9%	25,7%

Przeprowadzone pomiary parametrów jakości dostawy energii elektrycznej kopalni pozwoliły na ocenę wpływu przeprowadzonej modernizacji na warunki pracy sieci kopalnianej. Stwierdzono, że w wyniku modernizacji układu zasilania maszyny wyciągowej zwiększeniu uległa asymetria napięcia, wahania napięcia oraz odkształcenie napięcia, przy czym poziomy dopuszczalne określone w [1] nie zostały przekroczone.

## 6. PODSUMOWANIE

Pomiar wskaźników jakości dostawy energii elektrycznej jest wykonywany w środowisku kopalnianym w celu określenia wpływu układów napędowych maszyn wyciągowych na sieć zasilającą lub jako etap wstępny przy doborze układów filtracji wyższych harmonicznym i kompensatorów mocy biernej. W opisanych przypadkach pomiary wykonywane dwuetapowo posłużyły do określenia

potencjalnego, negatywnego wpływu napędu przekształtnikowego na sieć zasilającą w stosunku do warunków panujących przed wprowadzonymi zmianami. Z przedstawionych wyników widać, że zdecydowane zwiększenie poziomu wskaźników w punkcie przyłączenia maszyny nie jest jeszcze podstawą do wnioskowania, że układ nie spełnia wymogów określonych w przepisach. Oczywiście, powinno się dążyć do jak największego ograniczenia wpływu układów przekształtnikowych napędów dużych mocy na sieć elektroenergetyczną, ale musi to również znaleźć swoje odzwierciedlenie we wskaźnikach ekonomicznych, związanych z opłacalnością produkcji. Znaczący to, że obecnie zwraca się szczególną uwagę w zakładach górniczych na zmniejszenie kar, które mogą zostać naliczone przez operatora systemu dystrybucyjnego. Jeżeli jednak poziomy dopuszczalne nie zostaną przekroczone, uznaje się, że sytuacja jest poprawna. Ma to jednak, w przypadku zakładów górniczych jeszcze inny skutek. W wyniku zaburzeń w sieci możliwe jest wystąpienie zjawisk, które znacząco mogą obniżyć poziom bezpieczeństwa pracy urządzenia transportowego, jakim jest maszyna wyciągowa. Szczególnie, jeżeli chodzi o transport załogi. W opisywanym przypadku nr 2, wystąpiły takie niekorzystne zjawiska, co zmusiło użytkownika do poszukiwania rozwiązań zmierzających do poprawy wskaźników jakości.

W obu analizowanych przypadkach wystąpiła niekorzystna zmiana w zakresie gospodarki mocą bierną, co determinuje konieczność przeprowadzenia modernizacji także układów kompensacyjnych.

## 7. BIBLIOGRAFIA

1. PN-EN 61000-2-4:2003 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) -- Część 2-4: Środowisko -- Poziomy kompatybilności dotyczące zaburzeń przewodzonych małej częstotliwości w sieciach zakładów przemysłowych.
2. Longhua M.: Measure and Suppression of harmonic Currents for Heavy-duty Hoisting Machines. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific Dalian, China, 2005.
3. Szklarski L., Zarudzki J.: Elektryczne maszyny wyciągowe, Warszawa PWN, 1998.

## THE INFLUENCE OF MODERNIZATION OF HOISTING MACHINES POWER SUPPLY SYSTEM ON THE VOLTAGE PARAMETERS IN MINES

The hoisting machine is one of the largest devices in the underground mining plant in terms of installed power. This device works cyclically with a large number of starts per hour. For this reason, it is the source of numerous disturbances in the mining power network, such as: higher harmonics and voltage fluctuations. Currently, the control of hoisting machines is increasingly diverging from the use of the traditional Ward Leonard control system in favor of multi-pulse power electronic converters, which results in increased system efficiency and better control capabilities, but may be the reason for an increase in the negative impact on the quality parameters of electricity supply in the mining plant's supply network. The article presents the analysis of the impact of changing the hoisting machine power supply system on the power quality parameters of the mining plant network based on measurements of the power supply systems of two hoisting machines, before and after modernization.

**Keywords:** hoisting machine, voltage harmonics, power quality.