

mgr inż. CZESŁAW MAŁCZAK  
KGHM S.A. O ZG „Polkowice-Sieroszowice”  
mgr inż. ANDRZEJ MATERZOK  
mgr inż. ANDRZEJ MANCZYK  
OPA-ROW sp. z o.o.

# Wykorzystanie falownika średniego napięcia do modernizacji napędów maszyn wyciągowych górniczych wyciągów szybowych

*W artykule przedstawiono wnioski po przeprowadzonej modernizacji maszyny wyciągowej. Modernizację tę przeprowadzono z wykorzystaniem falowników średniego napięcia. Opisano i przedyskutowano sprawność maszyny, a także wpływ zastosowanego rozwiązania na jakość energii elektrycznej sieci zasilającej.*

## 1. WSTĘP

---

Podstawowym elementem górniczych wyciągów szybowych są maszyny wyciągowe. Muszą charakteryzować się dużą niezawodnością działania oraz zapewniać wysoki poziom bezpieczeństwa, gdyż ich wadliwe działanie, czy też awaria, może doprowadzić do katastrofy górniczego wyciągu szybowego.

W celu zwiększenia poziomu bezpieczeństwa oraz niezawodności pracy dokonuje się modernizacji maszyn wyciągowych z wykorzystaniem najnowszych technologii bazujących na zastosowaniu m.in. przemienników częstotliwości i sterowników swobodnie programowalnych.

W artykule został przedstawiony jeden ze sposobów modernizacji napędu maszyny wyciągowej z silnikiem asynchronicznym poprzez zastąpienie istniejącego układu oporowej regulacji prędkości obrotowej silnika nowym układem zasilania silnika wyciągowego, umożliwiającego bezstopniową regulację prędkości jazdy. Zrealizowany on został w oparciu o bezpośredni, regeneratywny przemiennik częstotliwości średniego napięcia (6 kV).

Seria napędów średniego napięcia RMVC firmy RXPE, stosowanych w przedmiotowych modernizacjach, wykorzystuje zaawansowane moduły mocy IGBT w połączeniu szeregowym, wykonanym w wielopoziomowej technologii cyfrowego sterowania szerokości impulsu SPWM. Tego typu napędy gwarantują znaczną oszczędność energii, wysoki współczynnik mocy i wysoką niezawodność w przeciwieństwie do

tradycyjnych metod energetycznych. Pozwalają one przedłużyć żywotność zasilanych silników i urządzeń napędzanych. Napędy te mają zastosowanie nie tylko do wentylatorów oraz pomp, tj. do napędów o małej szybkości zmian obciążenia, które nie pracują w warunkach oddawania energii do sieci zasilającej (hamowanie elektryczne), ale także do odbiorników o częstych i ciężkich rozruchach i zwalnianiu z oddawaniem energii do sieci (takich jak walcarki, maszyny papiernicze, lokomotywy, maszyny wyciągowe, itp.).

Napęd RMVC wykorzystuje szeregowie połączenie tranzystorów mocy IGBT w wielopoziomowej technologii, które cechuje się bezpośrednią generacją średniego napięcia wyjściowego bez użycia transformatora. Charakteryzują się one równocześnie wysoką wydajnością oraz szerokim zakresem częstotliwości wyjściowej. Napędy RMVC składają się z szafy mocy, wyjściowej szafy transformatora oraz szafy sterowania mikroprocesorowego. Napędy RMVC umożliwiają łagodny rozruch silnika, z małym prądem rozruchu, automatycznym sterowaniem rozruchu opartym na charakterystyce ustawień klienta, co pozwala na zaoszczędzenie energii i znaczącą poprawę efektywności produkcji [1].

## 2. ZASADA DZIAŁANIA

---

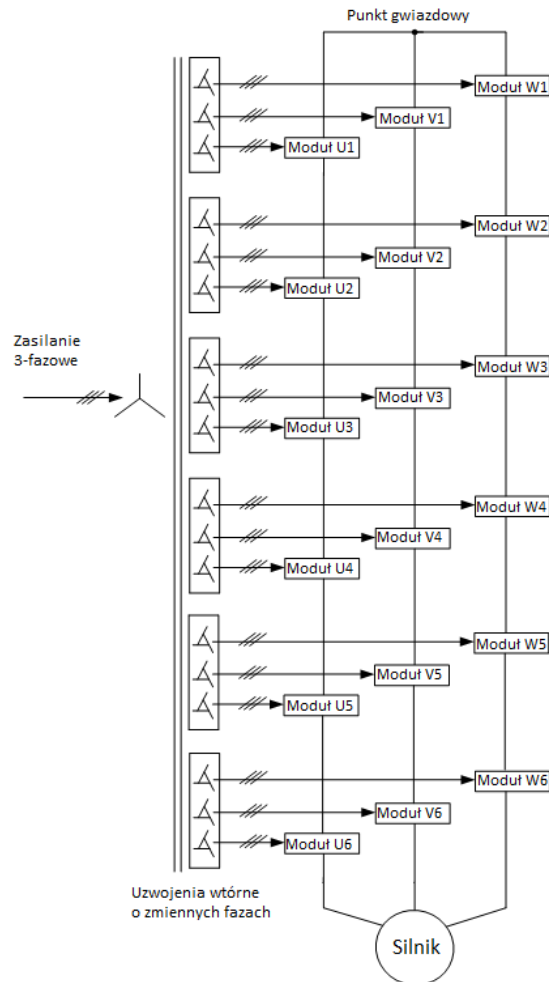
### 2.1. Generacja napięcia wyjściowego

Trzy grupy wtórnych uzwojeń transformatora o tym samym napięciu wyjściowym pracują jako

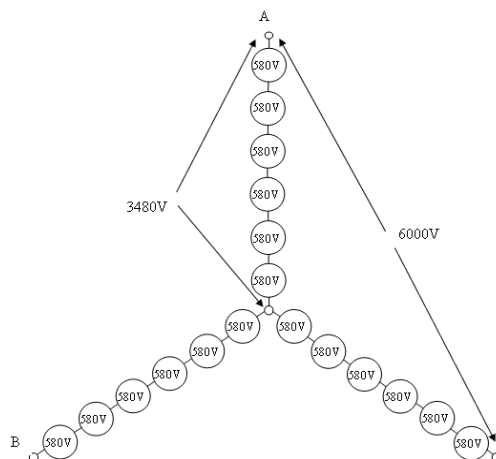
zasilacze do trzech grup modułów mocy w szafie. Wyjścia modułów mocy pierwszego poziomu są połączone do tego samego punktu (punkt gwiazdowy), podczas gdy pozostałe wyjścia są połączone szeregowo pomiędzy poszczególnymi modułami mocy. W ten sposób wszystkie moduły mocy są połączone szeregowo, tworząc 3-fazowe źródło służące

do zasilania silnika. Każdy moduł mocy posiada 3-fazowe wejście oraz jednofazowe wyjście PWM. Główny układ falownika pokazano na rysunku 1.

Napięcie wyjściowe falownika jest kształtowane w superpozycji wielu modułów zasilania. Zasada superpozycji dla falownika 6-stopniowego 6 kV jest przedstawiona na rysunku 2.



Rys. 1. Główny układ falownika

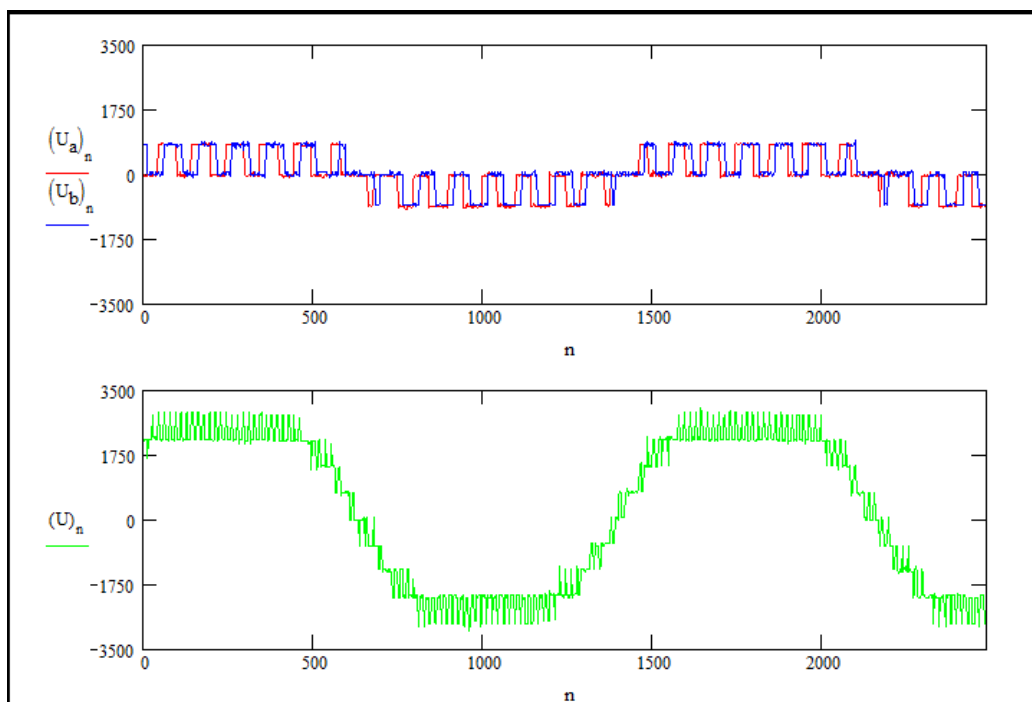


Rys. 2. Schemat wektorowy superpozycji napięć

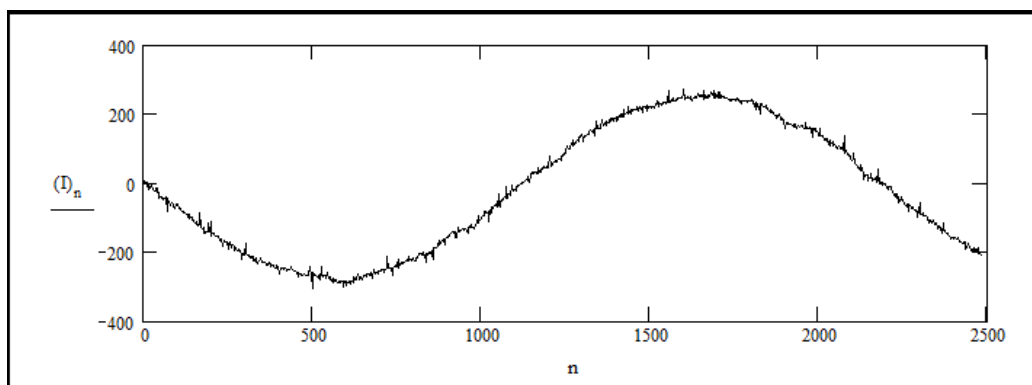
W przypadku gdy napięcie wyjściowe wynosi 6 kV, napięcie wyjściowe modułu mocy ma wartość 580 V. Po połączeniu szeregowym tych napięć o tej samej fazie, napięcie fazowe wynosi  $580 \text{ V} \times 6 = 3450 \text{ V}$ , co odpowiada 6 kV napięcia międzyprzewodowego.

Przy połączeniu szeregowym jednostek mocy, sygnał sinusoidalny będzie charakteryzował się schodkowym kształtem. Dobra jakość sygnału sinusoidal-

nego z niską wartością zmian  $du/dt$  nie stanowi zagrożenia dla izolacji silnika i kabla zasilającego silnik. Mało odkształcony sygnał pozwala użyć standardowych kabli o dowolnej długości do połączenia z silnikiem. Małe zniekształcenia harmoniczne również redukują mechaniczne wibracje oraz ograniczają siły działające na wał. Rysunki 3 i 4 przedstawiają zmierzone napięcia wyjściowe cel mocy, napięcie fazowe oraz prąd wyjściowy falownika.



Rys. 3. Napięcia cel mocy ( $U_a$ ,  $U_b$ ) oraz napięcie wyjściowe ( $U$ )



Rys. 4. Prąd wyjściowy falownika

## 2.2. System regulacji sterowania i zabezpieczeń

Układ sterujący jest w pełni cyfrowym urządzeniem przetwarzającym sygnały sterujące. Zawiera on płytę główną, panel CPU, panele PWM, panel wejść cyfrowych, panel wejść analogowych oraz układ wyświetlacza. Układ sterowania pozwala urządzeniu

pracować w trybie otwartej pętli lub zamkniętej pętli systemu regulacji prędkości, generuje on wielopozomowe sygnały sterujące PWM, realizuje szybką ochronę urządzenia, komunikuje się przez sieć, itd. Układ cyfrowego sterowania falownika realizuje dodatkowo wszystkie funkcje kontrolne i zabezpieczeniowe służące ochronie przemiennika i silnika, takie jak:

- kontrola nadprądowa i przeciążeniowa wejścia i wyjścia przemiennika,
- kontrola nadnapięciowa wyjścia przemiennika,
- kontrola nierównomierności obciążenia faz wyjścia,
- kontrola przerwy w obwodzie wejściowym lub wyjściowym,
- kontrola przegrzania elementów mocy,
- kontrola przegrzania transformatora wejściowego,
- kontrola komunikacji sterownika centralnego z celami mocy.

Wszystkie zabezpieczenia są szczegółowo sygnalizowane na panelu.

### 3. BUDOWA

#### 3.1. Transformator

Do zasilania przemiennika służy transformator posiadający trójfazowe gwiazdowe uzwojenie pierwotne o napięciu znamionowym 6 kV oraz 18 uzwojeń wtórnych (zasilających 18 modułów mocy) o tych samych napięciach wyjściowych 550 V, lecz przesunięte w fazie odpowiednio  $-25^\circ$ ,  $-15^\circ$ ,  $-5^\circ$ ,  $+5^\circ$ ,  $+15^\circ$ ,  $+25^\circ$  względem napięcia zasilania.

Transformator zasilający posiada dodatkowe uzwojenie wtórne o napięciu znamionowym 400 V, które zasilane z obcego napięcia wykorzystywane jest do wstępnego ładowania kondensatorów modułów mocy.

#### 3.2. Moduły mocy

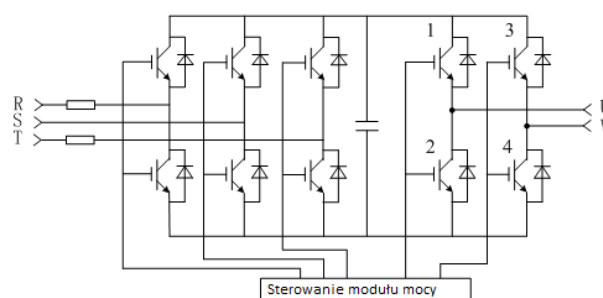
Funkcjonalnie każda z 18 cel mocy stanowi kompletny jednofazowy regeneratywny przemiennik częstotliwości niskiego napięcia z trójfazowym wejściem. Każda z cel jest podłączona do jednego uzwojenia wtórnego transformatora wejściowego poprzez trójfazowy dławik liniowy. Wyjścia cel są z kolei łączone szeregowo po 6 dla uzyskania napięcia jednej fazy zasilania linii wyjściowej. Taki układ połączeń minimalizuje narażenia elementów mocy i kondensatorów obwodu pośredniczącego na działanie wysokich napięć.

Każda z cel mocy jest wyposażona w wejściowy trójfazowy w pełni sterowalny tranzystorowy (IGBT) prostownik ze sterowaniem PWM. Sterowanie prostownika umożliwi regulowanie napięcia na obwodzie pośredniczącym DC (kondensatory) oraz korygowanie współczynnika mocy energii pobieranej z sieci (współczynnik mocy  $> 0,95$ ). Przesunięcie fazowe uzwojeń wtórnych wpływa na zmniejszenie zawartości harmonicznych wprowadzanych do sieci zasilającej. Wykonanie prostownika wejściowego zapewnia możliwość zarówno zasilania falownika

wyjściowego z sieci, jak i oddawanie do sieci energii odebranej z falownika wyjściowego (silnika). Sterowanie stopnia wejściowego realizuje także funkcję wstępnego ładowania kondensatorów obwodu pośredniczącego przed załączeniem zasilania 6 kV.

Stopień wyjściowy każdej z cel stanowi jednofazowy pełnomostkowy falownik napięcia ze sterowaniem PWM, wykonany w oparciu o w pełni sterowane elementy mocy (IGBT).

Podstawową strukturę modułu zasilania AC-DC-AC 3-fazowego prostownika/inwertora przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Schemat ideowy modułu mocy 4Q

Jednostka mocy składa się z prostownika, inwertora, obwodu kontroli, obwodu sterowania bramki, układu diagnostyki błędów, części komunikacyjnej, itd. Napięcie stałe DC uzyskiwane jest z 3-fazowego napięcia zmiennego w module prostownika. Rolą prostownika zbudowanego z 6 tranzystorów IGBT jest utrzymywanie stałego napięcia na bloku kondensatorów mocy. Zbudowany z tranzystorów IGBT moduł prostownika zapewnia dwukierunkowy przepływ energii (możliwe jest zarówno doładowywanie baterii kondensatorów napięciem z sieci, jak i przesyłanie energii zgromadzonej w kondensatorze do sieci). Zbudowany z 4 tranzystorów IGBT jednofazowy falownik przekształca napięcie stałe z kondensatorów mocy na zmienne napięcie wyjściowe za pomocą modulacji PWM.

#### 3.3. Układ sterowania

Układ sterowania falownika jest w pełni cyfrowym urządzeniem przetwarzającym sygnały sterujące. Jego główne elementy to:

- *plyta główna* służąca do zasilania całego urządzenia sterującego, przesyłu danych do wszystkich obwodów i wymiany danych z urządzeniami peryferyjnymi,
- *panele procesora CPU, wejść cyfrowych i wejść analogowych* używane do przetwarzania lokalnych sygnałów oraz realizacji układu regulacji napięcia i prędkości,

- panele PWM wykorzystywane do komunikacji optycznej światłowodami między częścią sterowniczą a modułami mocy,
- panel operatorski służący do diagnostyki działania przemiennika, lokalizacji uszkodzeń, podglądu parametrów i wielkości zmiennych sterowania.

Falownik pozwala realizować zdalny monitoring oraz sterowanie.

Zastosowana technologia łączy światłowodowych do połączeń między urządzeniem sterującym a modulem mocy (część niskiego napięcia jest odizolowana od części średniego napięcia) nie przenosi zakłóceń elektromagnetycznych i zapewnia doskonałą niezawodność pracy urządzenia.

## 4. WŁASNOŚCI RUCHOWE

### 4.1. Sterowanie

Uruchomienie falownika następuje samoczynnie po włączeniu napięcia sterowniczego 400 V, skasowaniu zabezpieczeń oraz załączeniu wyłącznika średniego napięcia. W pierwszym etapie następuje przyłączenie napięcia 400 V poprzez opory dodatkowe do uzwojenia wtórnego transformatora, co umożliwia stopniowe ładowanie kondensatorów cel mocy. Po osiągnięciu zadanej wartości napięcia następuje odłączenie napięcia 400 V, załączenie stycznika średniego napięcia i zasilenie strony pierwotnej transformatora oraz dalsze ładowanie kondensatorów nadzorowane przez układ sterowania. Po ukończeniu ładowania falownik zgłasza gotowość do pracy, wystawiając odpowiednie sygnały do pozostałych układów zewnętrznych.

Zadane wartości częstotliwości i amplitudy napięcia wyjściowego są generowane przez wewnętrzne regulatory prędkości i momentu silnika na podstawie wartości zadanej prędkości, sygnału prędkości rzeczywistej wału silnika i wewnętrznego sprzężenia prądowego. Układ sterowania pozwala urządzeniu pracować w trybie otwartej pętli lub zamkniętej pętli systemu regulacji prędkości.

W razie wykrycia przez układ zabezpieczeń nieprawidłowych stanów pracy falownika następuje jego awaryjne wyłączenie, co powoduje wystawienie sygnału awarii do zewnętrznych układów sterowania i wyłączenie napięcia zasilającego.

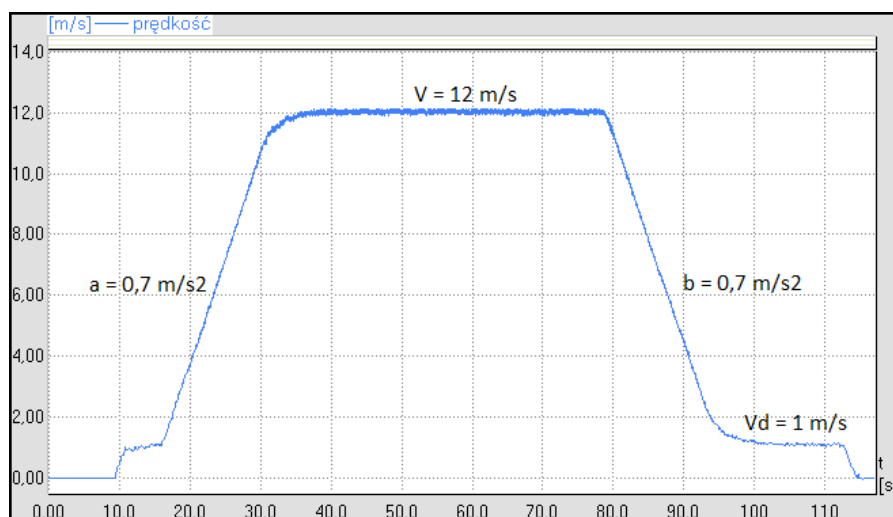
### 4.2. Napięcie wyjściowe

Zastosowanie falownika średniego napięcia do zasilania napędu umożliwia bezstopniowe sterowanie jego prędkością z równoczesnym ograniczeniem oddziaływania na sieć zasilającą.

Sposób generowania napięcia wyjściowego oparty na sumowaniu napięć szeregowo połączonych modułów mocy pozwala na uzyskanie dobrej jakości sinusoidalnego napięcia wyjściowego oraz zminimalizowanie zawartości harmonicznych w prądzie wyjściowym. Zmniejszenie zawartości harmonicznych jest istotne z punktu widzenia wydzielenia dodatkowych strat mocy i ciepła w silniku.

### 4.3. Realizacja diagramów jazdy

Zastosowanie falownika do modernizacji napędu maszyny wyciągowej pozwoliło na uzyskanie bardzo dobrych przebiegów prędkości. Napęd doskonale realizuje zadany diagram jazdy bez przeregulowań i oscylacji (rys. 6).

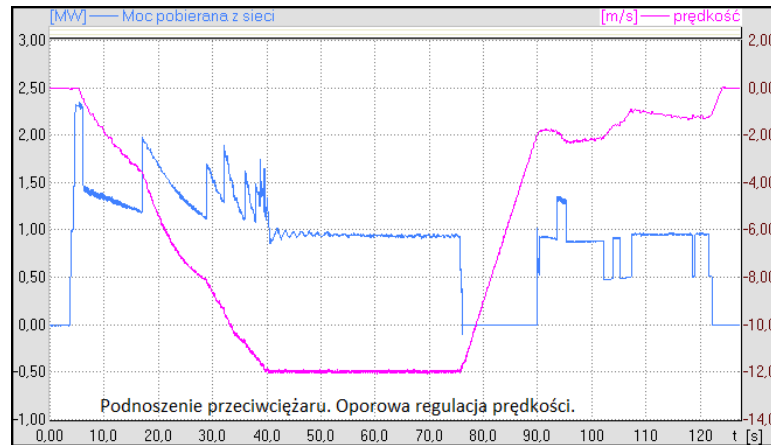


Rys. 6. Przebieg prędkości jazdy podczas opuszczania przeciwiężaru

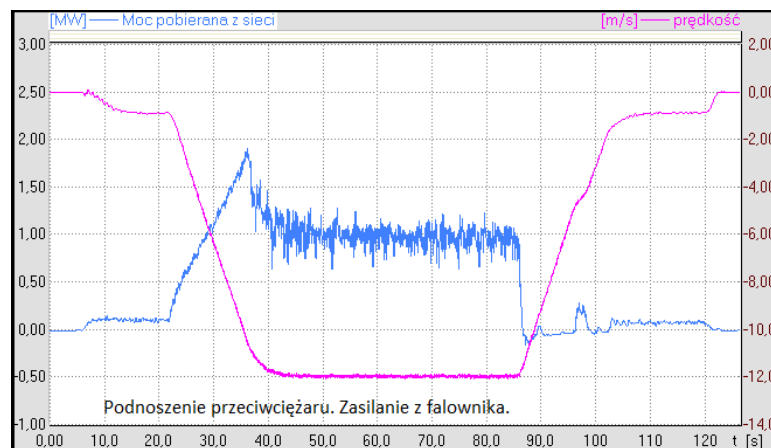
#### 4.4. Sprawność

Wyeliminowanie oporowej regulacji prędkości oraz niskie straty własne falownika pozwalają na uzyskanie wysokiej sprawności napędu. Na rysunkach 7÷10

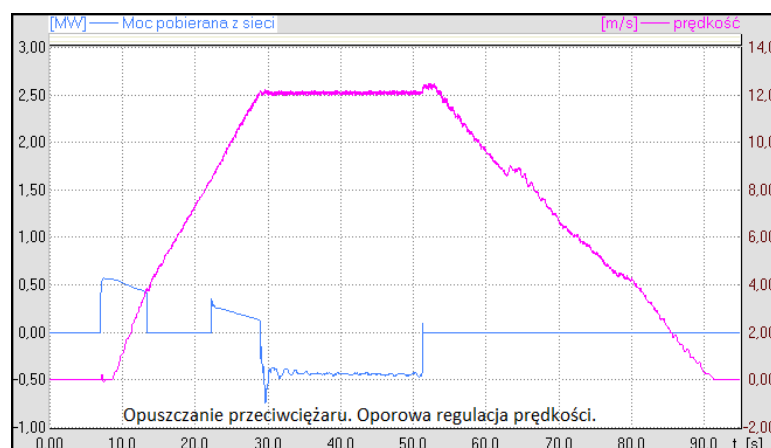
przedstawiono przebiegi prędkości i mocy pobieranej z sieci podczas podnoszenia i opuszczania przeciwiężaru przy oporowej regulacji prędkości oraz zasilaniu silnika z falownika.



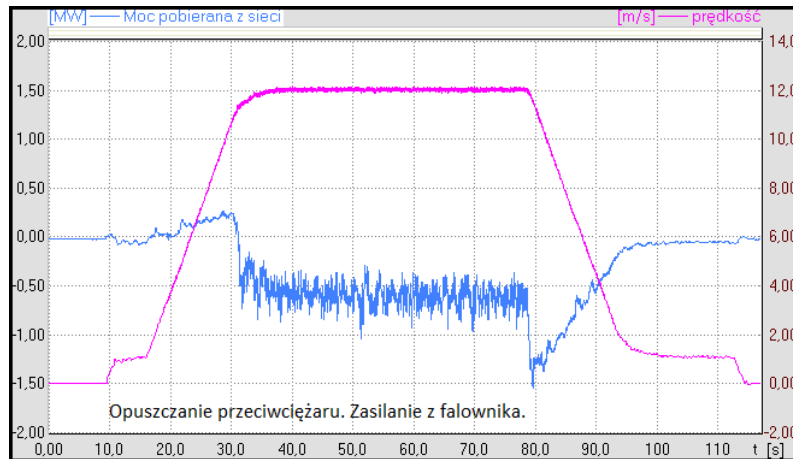
Rys. 7. Przebieg prędkości jazdy i mocy pobieranej z sieci podczas podnoszenia przeciwiężaru przy oporowej regulacji prędkości



Rys. 8. Przebieg prędkości jazdy i mocy pobieranej z sieci podczas podnoszenia przeciwiężaru przy zasilaniu z falownika



Rys. 9. Przebieg prędkości jazdy i mocy pobieranej z sieci podczas opuszczania przeciwiężaru przy oporowej regulacji prędkości



Rys. 10. Przebieg prędkości jazdy i mocy pobieranej z sieci podczas opuszczania przeciwcieżaru przy zasilaniu z falownika

Z przeprowadzonych pomiarów, których wyniki przedstawiono na rysunkach 7÷10, wynika, że zużycie energii przy zasilaniu z falownika podczas podnoszenia ciężaru jest o ok. 40% niższe niż w przypadku oporowej regulacji prędkości, natomiast przy opuszczaniu ciężaru ilość energii oddana do sieci przy zasilaniu z falownika jest o ok. 85% większa.

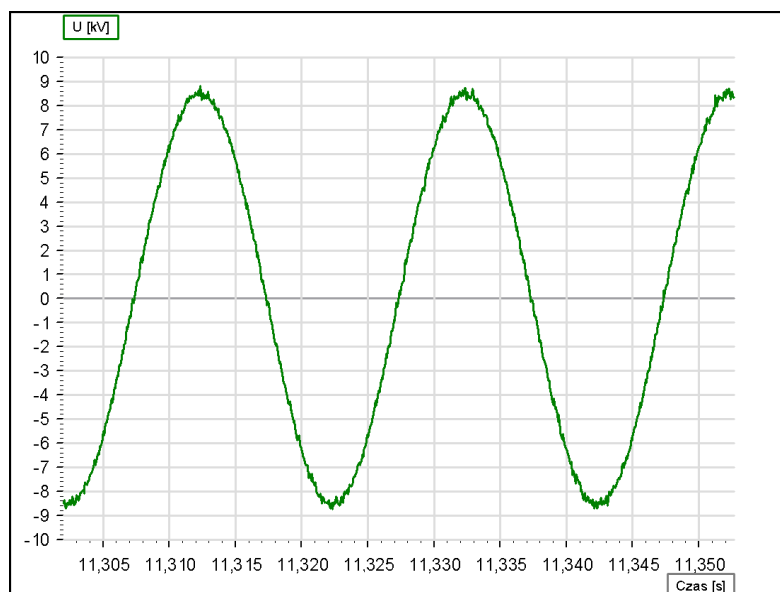
#### 4.5. Niezawodność i obsługa awarii

Układ zabezpieczeń falownika realizuje funkcje kontroli parametrów pracy w celu ochrony sprzętu w sytuacjach awaryjnych. Informacja o wystąpieniu błędu wyświetlana jest na panelu operatorskim szafy sterowania. Szczegółowe kody błędów pozwalają na precyzyjne określenie rodzaju awarii, a przypadku uszkodzenia cel mocy kod błędu umożliwia również lokalizację uszkodzenia. Informacje o uszkodzeniach

i kody błędu mogą być przesłane do zewnętrznych urządzeń (systemów wizualizacji, rejestratorów itp.).

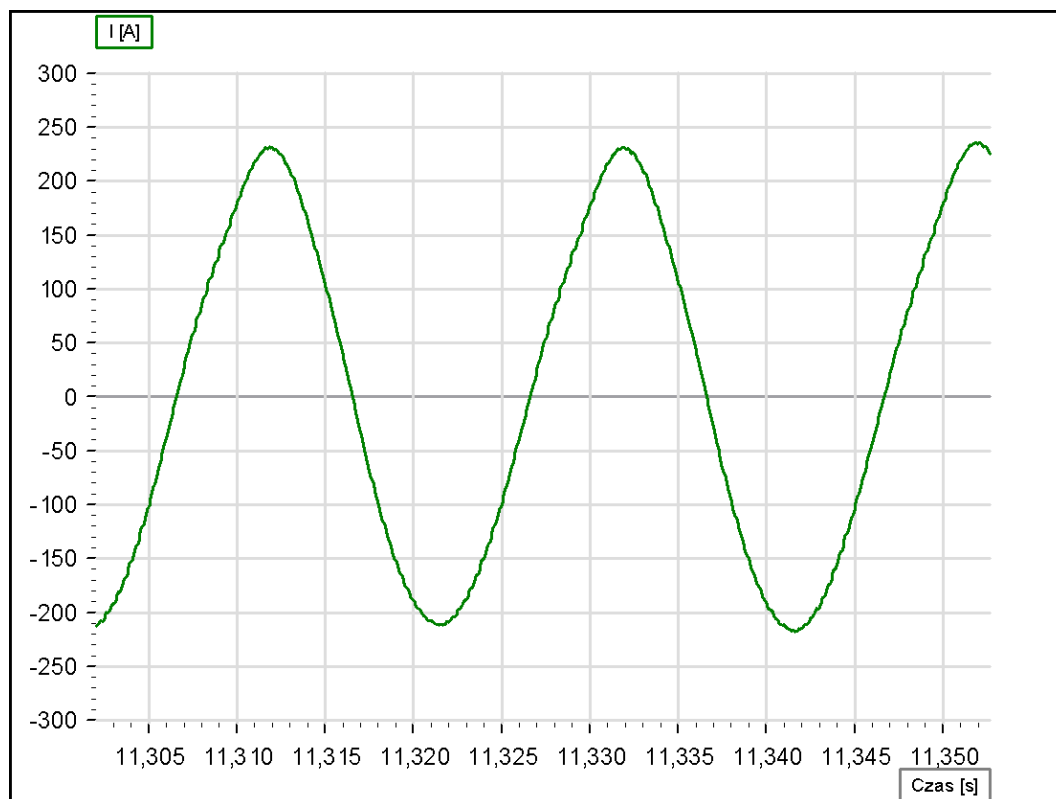
### 5. ODDZIAŁYWANIE NA SIĘĆ ZASILAJĄCĄ

Napięcia wtórne transformatora zasilającego mają 6 różnych przesunięć fazowych (-25°, -15°, -5°, +5°, +15°, +25°). Przesunięcie napięć zasilających poszczególne moduły mocy zapewnia małą zawartość harmonicznych w prądzie zasilającym. Taki sposób zasilania w znaczący sposób poprawia kształt sygnału prądowego po stronie zasilania oraz polepsza współczynnik mocy, może on osiągnąć wartość większą od 0,95 bez stosowania kompensacji. Rysunki 11 oraz 12 przedstawiają zarejestrowane przebiegi wejściowego napięcia oraz prądu.



Rys. 11. Kształt napięcia wejściowego





Rys. 12. Kształt prądu wejściowego

## 6. WNIOSKI

Dzięki zastosowaniu wielopoziomowego falownika średniego napięcia do modernizacji napędu maszyn wyciągowych uzyskano:

- możliwość wykorzystania istniejących silników i kabli zasilających dzięki dobrej jakości napięcia wyjściowego,
- precyzyjną regulację prędkości napędu od 0,1 m/s do 12 m/s, a tym samym bardzo dobrą realizację założonych diagramów jazdy naczyń wyciągowych górniczego wyciągu szybowego,
- precyzyjną regulację momentu napędowego napędu od najmniejszych prędkości, co umożliwia bezpieczne wykorzystanie napędu podczas robót szybowych wymagających wysokiej precyzji sterowania,

- poprawę sprawności zasilania napędu i tym samym ograniczenie zużycia energii elektrycznej,
  - poprawę współczynnika mocy napędu (kompensacja mocy biernej silnika),
  - większą niezawodność pracy maszyny wyciągowej oraz ograniczenie czasu usuwania awarii (auto-diagnostyka i identyfikacja błędów przez przekształtnik).
- Jednocześnie zastosowane rozwiązania nie wprowadziły niekorzystnego oddziaływania na sieć zasilającą.

### Literatura

1. User Manual, RMVC MV Variable Frequency Drive - Rongxin Power Electronic Co., Ltd., Anshan, China.

Recenzent: dr inż. Witold Dzierżanowski

### THE USE OF A MEDIUM-VOLTAGE INVERTER FOR THE MODERNIZATION OF WINDERS IN MINING SHAFTS

The article features conclusions drawn after the modernization of a winder. The modernization was conducted with the use of medium-voltage inverters. The efficiency of the winder was described and discussed along with the impact of this solution on the quality of energy in the power supply network.

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ МОДЕРНИЗАЦИИ ПРИВODOB ПОДЪЕМНЫХ МАШИН ШАХТНЫХ СTBOЛОВЫХ ПОДЪЕМОB

В реферате представлены выводы после выполнения модернизации подъемной машины. Данная модернизация была выполнена при использовании преобразователей среднего напряжения. Описана и проанализирована исправность машины, а также влияние использованного решения на качество электрической энергии сети питания.