

Układ sterowania górniczego wielosilnikowego przenośnika taśmowego

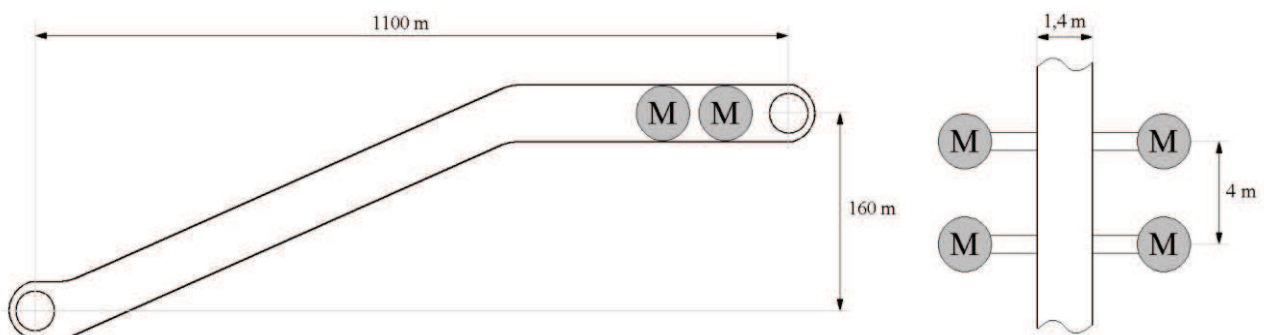
W artykule przedstawiono koncepcję i realizację praktyczną układu sterowania wielosilnikowego przenośnika taśmowego przeznaczanego do transportu urobku w kopalniach górnictwa podziemnego [1], [2], [3]. Układ napędowy składa się z czterech silników o mocy 500 kW każdy i napięciu zasilania 1000 V zasilanych z falowników napięciowych napędzających przenośnik taśmowy o długości 1100 m. Przedstawiono specyficzne wymagania związane z eksploatacją układu oraz sposób realizacji sterowania przenośnika. Zaprezentowano system łączności pomiędzy poszczególnymi elementami układu. Omówiono procedury sterowania częstotliwością napięcia zasilającego silników w trakcie rozruchu przenośnika oraz procedury wyrównywania momentów obciążenia w trakcie pracy z zadaną prędkością posuwu taśmy.

1. WSTĘP

Do odstawy urobku w górnictwie podziemnym i odkrywkowym powszechnie stosuje się przenośniki taśmowe. Szacuje się, że w kopalniach zainstalowanych jest kilka tysięcy sztuk przenośników o łącznej mocy zainstalowanej napędów rzędu kilkuset MW [2].

Zastosowanie energoelektronicznych przekształtników do zasilania układów napędowych przenośników

pozwała na zmniejszenie ich energochłonności, a nowoczesne mikroprocesorowe systemy sterowania wpływają na poprawę warunków eksploatacyjnych. Umożliwiają również stosunkowo prostą budowę systemów pozwalających na monitorowanie na powierzchni pracy urządzeń zainstalowanych w podziemiach kopalni. W artykule przedstawiono jedno z rozwiązań mikroprocesorowego sterowania pracą wielosilnikowego przenośnika taśmowego do transportu urobku przeznaczanego do pracy w górnictwie podziemnym.



Rys. 1. Układ napędowy wielosilnikowego przenośnika taśmowego

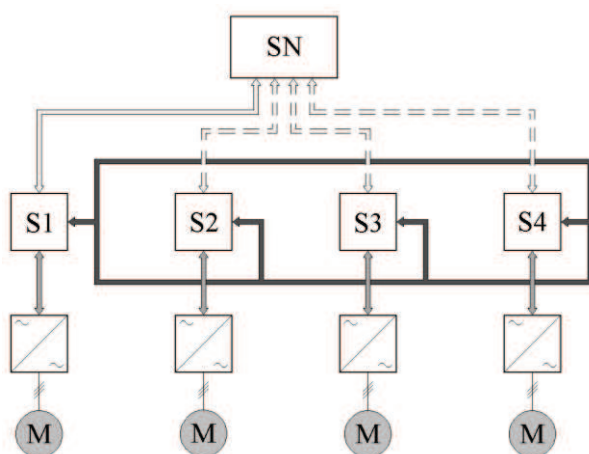
2. UKŁAD NAPĘDOWY

Obiektem sterowania jest wielosilnikowy przenośnik taśmowy do transportu urobku w kopalni węgla kamiennego. Układ napędowy składa się z czterech silników indukcyjnych 3-fazowych z wirnikiem jednoklatkowym o mocy 500 kW każdy i napięciu zasilania 1000 V, obudowy przeciwwybuchowej – produkowanych przez firmę Damel [6]. Silniki umieszczono parami na wspólnych wałach w początkowej części przenośnika. Odległość pomiędzy osiami wałów wynosi 4 m. Każdy z silników zasilany jest z opracowanego przez firmę ENEL-PC przemiennika częstotliwości typu FNTKa-640/1000 500 kW [7], umieszczonego w ognioszczelnej obudowie falownika PCO-1/500/c produkowanego przez firmę Carboautomatyka S.A. [5]. Falowniki pracują z wykorzystaniem modulacji wektorowej.

Na rys. 1 przedstawiono schemat rozmieszczenia silników zespołu napędowego wielosilnikowego przenośnika taśmowego.

3. UKŁAD NAPĘDOWY

Na rys. 2 przedstawiono uproszczony schemat podstawowego układu sterowania zespołem napędowym przenośnika taśmowego.



Rys. 2. Schemat podstawowego układu sterowania zespołu napędowego wielosilnikowego przenośnika taśmowego

Bezpośrednie sterowanie każdego z silników M układu napędowego realizowane jest przez zasilanie z falowników napięciowych. Zadana częstotliwość pracy silnika przekazywana jest do falownika ze współpracującym z nim sterownikiem lokalnym $S1-S4$.

Prędkość przesuwu taśmy przenośnika zadawana jest do jednego ze sterowników lokalnych z układu nadrzędnego SN .

Układ sterowania nadrzędnego wyposażony jest w port szeregowy umożliwiający przekazanie zadanej prędkości przesuwu taśmy do jednego, dowolnie wybranego sterownika lokalnego z możliwością odczytu parametrów pracy wszystkich napędów. Połączenie ze sterownikiem nadrzędnym zrealizowano z wykorzystaniem łącza RS-485 w wykonaniu iskrobezpiecznym.

Z założenia sterowanie pracą przenośnika powinno się odbywać także bez wykorzystania łączności z układem nadrzędnym. W takim przypadku prędkość przesuwu taśmy zadawana jest do dowolnie wybranego sterownika lokalnego poprzez łącze prądowe 4-20 mA. Sterowniki lokalne powinny samoczynnie dostosować się do aktualnego trybu zadawania prędkości.

Możliwość pracy z wykorzystaniem łącza prądowego w zastępstwie łącza szeregowego wprowadza znaczne ograniczenia w komunikacji szeregowej. W celu zapewnienia identycznej pracy układu sterowania, niezależnie od sposobu przekazywania prędkości posuwu taśmy, jedyną wartością przesyłaną z układu nadrzędnego do sterownika lokalnego poprzez łącze szeregowe może być zadana prędkość posuwu taśmy. W związku z tym sterownik lokalny wyposażono w jedno dwustanowe wejście cyfrowe, przez które układ nadrzędny przekazuje sygnał startu lub zatrzymania przenośnika oraz dwa wyjścia cyfrowe z informacją zwrotną. Jedno z wyjść służy do potwierdzenia stanu pracy lub zatrzymania napędu, drugie do sygnalizacji awarii układu napędowego.

Sterowniki lokalne komunikują się pomiędzy sobą za pomocą wydzielonej sieci transmisji szeregowej. Zarządzanie dostępem do łącza realizuje sterownik lokalny, który aktualnie otrzymuje zadaną wartość posuwu taśmy z układu nadrzędnego. Połączenie pomiędzy sterownikami lokalnymi zrealizowano w topologii pierścienia z wykorzystaniem łącz światłowodowych.

Każdy ze sterowników lokalnych komunikuje się także, poprzez łącze szeregowe, ze swoim falownikiem. W związku z umieszczeniem sterownika lokalnego wraz z falownikiem w jednej obudowie ognioszczelnej łącze to wykonano jako standardowe łącze RS-485.

4. SYSTEM ŁĄCZNOŚCI

Komunikacja pomiędzy sterownikiem lokalnym a układem nadrzędnym realizowana jest przez port szeregowy UART z wykorzystaniem protokołu

MODBUS na zasadzie dostępu typu master-slave. Urządzeniem master jest sterownik nadrzędny. Podobnie rozwiązano komunikację pomiędzy sterownikiem lokalnym a falownikiem, przy czym urządzeniem master jest w takim przypadku sterownik lokalny.

Komunikacja pomiędzy sterownikami lokalnymi wymagała opracowania specjalnego protokołu łączności wykorzystującego port UART, opartego o model dostępu typu multimaster z rywalizacją o dostęp do łącza.

Po inicjalizacji systemu realizowana jest procedura rywalizacji o dostęp do łącza. W jej wyniku jeden ze sterowników lokalnych przejmuje kontrolę nad zarządzaniem dostępem do łącza i zostaje wybrany urządzeniem typu master. Pozostałe sterowniki oznaczane są jako slave.

W przypadku przesłania ze sterownika nadrzędnego prędkości posuwu taśmy do jednego z urządzeń oznaczonych jako slave następuje ponowna inicjalizacja procedury rywalizacyjnej. Konstrukcja protokołu łączności zapewnia, że urządzeniem typu master zostanie urządzenie, które otrzymało wartość zadaną prędkości posuwu taśmy z systemu nadrzędnego.

Sterowniki lokalne zbudowano w oparciu o mikroprocesor jednocukładowy Hitachi H8/3048. Procesor wyposażony jest w dwa niezależne sprzętowe porty UART. W związku z tym, w celu implementacji trzech rozdzielnych systemów transmisji konieczne było podzielenie jednego z łączy szeregowych. Zdecydowano się na podział łącza obsługującego transmisję pomiędzy sterownikami lokalnymi oraz pomiędzy sterownikiem lokalnym a falownikiem. Łączność w podzielonym łączy zrealizowano na zasadzie wielodostępu z podziałem czasu, przy czym zarządzanie czasem dostępu realizowane jest przez aktualne urządzenie master na podstawie opracowanego protokołu łączności.

W przedstawionym rozwiązaniu należało uwzględnić również stany awaryjne polegające na pracy bez jednego, dowolnego z napędów. W przypadku awarii lub odłączenia zasilania jednego ze sterowników lokalnych, aktualny sterownik master wyklucza z procedur dostępu do łącza nieaktywny sterownik. Ma to na celu wyeliminowanie niepotrzebnych opóźnień związanych z realizacją komunikacji z nieaktywnym sterownikiem. Konieczna jest jednak możliwość wznowienia łączności z wykluczonym sterownikiem w celu przywrócenia do pracy odstawionego napędu. Procedury te realizowane są bezobsługowo poprzez opracowany protokół łączności.

5. STANY PRACY PRZENOŚNIKA

Układ sterowania przenośnikiem taśmowym różni kilka stanów pracy:

- stan gotowości: wszystkie silniki zatrzymane, układ gotowy do załączenia,
- stan pracy: silniki pracują, posuw taśmy z zadaną prędkością,
- stan zatrzymania technologicznego – silniki pracują, obniżanie prędkości napędów aż do zatrzymania,
- stan zatrzymania awaryjnego – natychmiastowe wyłączenie wszystkich napędów.

Dodatkowo, w zależności od przyczyny powodującej wyłączenie, dla stanu zatrzymania awaryjnego rozróżniono stany wyłączenia i awarii. Stan wyłączenia pozwala na ponowne uruchomienie przenośnika za pomocą standardowej procedury startowej, natomiast stan awarii wymaga ingerencji obsługi za pomocą specjalnego klucza umożliwiającego skasowanie stanu awaryjnego.

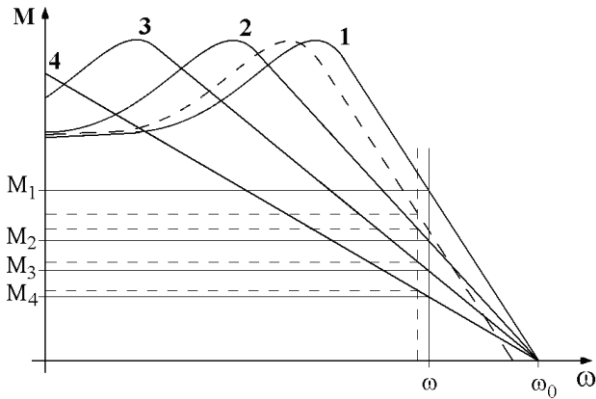
Wyłączenie napędów może być realizowane ze sterownika nadrzędnego w związku z procesem technologicznym, jak również z dowolnego sterownika lokalnego w efekcie zadziałania jakiegokolwiek zabezpieczenia awaryjnego. Niezależnie od sterownika, w którym zadziałało zabezpieczenie wyłączane są wszystkie silniki układu napędowego przenośnika. Na wyświetlaczu LCD każdego z przemienników wyświetlana jest informacja o przyczynie i miejscu wystąpienia awarii.

6. STEROWANIE PRĘDKOŚCI SILNIKÓW

Umieszczenie dwóch silników na wspólnym wale, jak również niewielka odległość pomiędzy obydwo- ma zespołami napędowymi skutkująca pomijalnie małą sprężystością taśmy nośnej przenośnika na tym odcinku, nawet przy niewielkich różnicach przebiegów charakterystyk silników prowadzi do nierównomiernego obciążenia momentem każdego z napędów. W skrajnym przypadku może doprowadzić do sytuacji, w której jedne z silników stają się silnikami napędowymi, a inne stanowią ich obciążenie.

Poprawna praca zespołu napędowego przenośnika wymaga niezależnego sterowania częstotliwością napięcia zasilającego każdy z silników, w zależności od chwilowego rozkładu momentów obciążenia w całym układzie napędowym.

W zrealizowanym rozwiązaniu sterownik lokalny otrzymując ze sterownika nadrzędnego zadaną wartość prędkości przesuwu taśmy zostaje urządzeniem typu master, przejmując zarządzanie zarówno systemem komunikacyjnym, jak i sterowaniem częstotli-



Rys. 3. Wyrównywanie momentów obciążenia silników zespołu napędowego przenośnika w trakcie pracy ustalonej

wością napięcia zasilania każdego z silników. Dzięki opracowanemu protokołowi łączności każdy ze sterowników lokalnych posiada pełne informacje o stanie pracy pozostałych napędów, jednak to aktualny sterownik master, na podstawie zadanej prędkości przesuwu taśmy oraz informacji o obciążeniu każdego z napędów decyduje o częstotliwości pracy każdego z przemienników.

Podczas rozruchu przenośnika realizowana jest procedura nadążnego zadawania częstotliwości przez aktualny sterownik master do każdego z napędów, począwszy od częstotliwości startowej do częstotliwości pracy ustalonej. W celu minimalizacji nierównomierności obciążeń poszczególnych napędów wynikających z nieidentycznych charakterystyk, zmiany częstotliwości zadanej mogą odbywać się z nastawialnym krokiem, a kolejny krok wykonywany jest po osiągnięciu przez wszystkie silniki zadanego progu.

W trakcie pracy przenośnika z prędkością ustaloną realizowane są procedury wyrównywania momentów obciążenia poszczególnych silników. Stan taki możliwy jest do uzyskania poprzez niewielkie, rzędu setnych części Hz, korekty częstotliwości napięć zasilających silniki.

Na rys. 3 przedstawiono ideę wyrównywania momentów obciążenia silników zespołu napędowego przenośnika w trakcie pracy z ustaloną prędkością przesuwu taśmy dla nieidentycznych charakterystyk każdego z silników.

W chwili zakończenia procedury rozruchu wszystkie napędy zasilane są napięciem o identycznej częstotliwości, w efekcie czego ich charakterystyki mechaniczne zbiegają się w punkcie o pulsacji ω_0 . Przyjmując, że prędkość posuwu taśmy odpowiada pulsacji ω poszczególne silniki zostaną obciążone momentami M1-M4, przy czym sumaryczny moment obciążenia wyniesie

$$M = \sum_{i=1}^n M_i \quad (1)$$

gdzie:

M – sumaryczny moment obciążenia,

M_i – moment rozwijany przez i -ty silnik,

n – liczba aktualnie pracujących silników.

Charakterystyki silników, pulsację ω oraz wartości momentów rozwijanych przez poszczególne silniki w chwili zakończenia procedury rozruchowej oznaczono na rys. 3 liniami ciągłymi.

Realizacja procedury wyrównywania momentów rozpoczyna się od wyznaczenia silnika, którego moment obciążenia odbiega najbardziej od wartości momentów rozwijanych przez pozostałe silniki na podstawie zależności

$$\Delta M_k = \max \left| \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{n} - M_i \right| \quad (2)$$

gdzie:

k – numer silnika o największej odchyłce momentu od średniej wartości momentów rozwijanych przez n pracujących silników.

Dla wyznaczonego w ten sposób silnika korygowana jest częstotliwość napięcia zasilania skutkująca przesunięciem jego charakterystyki mechanicznej o wartość

$$\Delta\omega_{0k} = \omega_0 - \omega_{0k}' \quad (3)$$

gdzie:

$\Delta\omega_{0k}$ – przesunięcie charakterystyki mechanicznej k -tego silnika związane ze zmianą częstotliwości napięcia zasilającego,

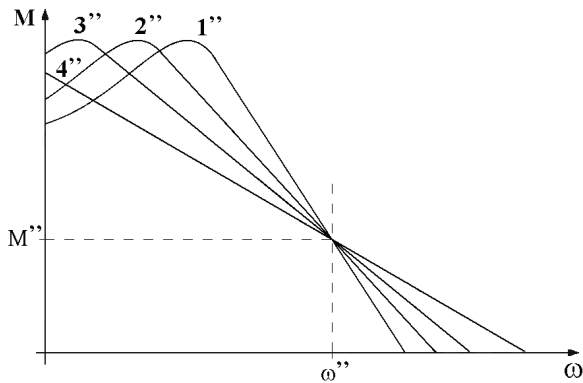
ω_{0k}' – nowa wartość pulsacji prędkości synchronicznej k -tego silnika.

Przesunięcie charakterystyki k -tego silnika, przy niezmienionym sumarycznym momencie obciążenia skutkuje zmianą rozkładu momentów poszczególnych silników, przy czym

$$\sum_{i=1}^n M_i = \sum_{i=1}^n M_i' \quad (4)$$

gdzie:

M_i' – moment rozwijany przez i -ty silnik po zmianie częstotliwości zasilania k -tego silnika, a prędkość posuwu taśmy zostanie ustalona na nowej wartości ω' .



Rys. 4. Wyidealizowany efekt działania procedury wyrównywania momentów obciążenia silników zespołu napędowego

Na rys. 3 zmiany stanu pracy zespołu napędowego wywołane zmianą częstotliwości zasilania silnika nr 1 przedstawiono za pomocą linii przerywanych.

W procedurze wyrównywania momentów obciążenia przyjęto krok zmiany częstotliwości napięcia zasilającego o wartości 0,01 Hz, powodujący praktycznie niezauważalne zmiany prędkości posuwu taśmy przenośnika. Taka wartość kroku zmian częstotliwości pozwala również na uzyskanie wystarczająco małych zmian rozkładu momentów obciążenia pozwalających uzyskać zbieżność algorytmu sterowania bez oscylacji. Wymaga jednak zastosowania falownika pozwalającego na zadawanie częstotliwości z taką rozdzielczością oraz stabilności częstotliwości wyjściowej z dokładnością co najmniej rzędu większą.

Na rys. 4 przedstawiono wyidealizowany efekt działania procedury wyrównywania momentów obciążenia silników zespołu napędowego dla przypadku, gdy

$$M'' = M_1 = M_2 = M_3 = M_4 \quad (5)$$

gdzie: M'' – moment rozwijany przez każdy z silników przy prędkości posuwu taśmy odpowiadającej pulsacji ω'' .

Teoretyczne wyznaczenie wartości korekcji częstotliwości zasilającej każdy z napędów możliwe jest przy dokładnej znajomości rzeczywistych charakterystyk każdego z silników. W układzie praktycznym nie jest jednak możliwe idealne wyznaczenie charakterystyk wraz z uwzględnieniem zmian spowodowanych np. nagrzewaniem się uzwojeń silników. Z tego względu zdecydowano się na realizację iteracyjnej procedury wyrównywania momentów obciążenia, a za stan równowagi obciążeń przyjęto stan, w którym żadna z wartości wyznaczonych na podstawie zależności (4) nie przekracza zadanego progu.

Na rys. 5 przedstawiono układ falownika PCO-1/500/c z zabudowanym sterownikiem lokalnym, zasilającego pojedynczy silnik zespołu napędowego przenośnika przystosowany do pracy w warunkach górnictwa podziemnego.

7. PODSUMOWANIE

Przedstawiony w artykule układ sterowania wielosilnikowym zespołem napędowym przenośnika taśmowego został uruchomiony i wdrożony w jednej z kopalń węgla kamiennego. Opracowany na potrzeby systemu sterowania protokół komunikacyjny wykorzystywany w procedurach łączności pomiędzy sterownikami lokalnymi pozwolił na pełną kontrolę nad wszystkimi elementami systemu napędowego oraz realizację procedur wyrównywania momentów obciążenia poszczególnych silników zespołu napędowego poprzez niezależne sterowanie częstotliwością napięcia zasilającego każdego z silników.



Rys. 5. Praktyczna realizacja falownika PCO-1/500/c zasilającego pojedynczy silnik zespołu

Lieratura

1. Antoniak J.: Budowa przenośników taśmowych zapewniająca energooszczędną odstawę urobku węglowego. Mechanizacja i Automatyza Górnictwa 2001, nr 11.
2. Antoniak J.: Górnicze przenośniki taśmowe o zmniejszonej energochłonności. Maszyny Dźwigowo-Transportowe 2001, nr 3.
3. Antoniak J.: Przenośniki taśmowe. Wprowadzenie do teorii i obliczenia. Gliwice 2007, Wyd. Pol. Śl.
4. Antoniak J.: Przenośniki taśmowe w górnictwie podziemnym i odkrywkowym. Gliwice 2004, Wyd. Pol. Śl.
5. Przemienik ognioszczelny typu PCO-315/1 – dokumentacja techniczno-ruchowa, Tychy 2005, PKiMSA Carboautomatyka.
6. Damel S.A.: Silniki indukcyjne trójfazowe budowy przeciwybuchowej SG1(2,3) 450M-4, Karta katalogowa K4-15-182. Dąbrowa Górnicza 2008, Dąbrowska Fabryka Maszyn Elektrycznych DAMEL S.A.
7. ENEL-PC: Falownik FNTKa-640/1000 500kW – dokumentacja techniczno-ruchowa. Gliwice 2008, Enel-PC.

Recenzent: dr hab. inż. Piotr Gawor, prof. nzw. Pol. Śl.