

Innowacyjny ścianowy przenośnik zgrzeblowy z płynną regulacją prędkości

Piotr Gospodarczyk, Paweł Mendiya, Grzegorz Stopka, Andrzej Mazurczyk

Współczesne wysoko wydajne kombajnowe węglowe kompleksy ścianowe równocześnie realizują procesy urabiania, ładowania i odstawy węgla kamiennego oraz zabezpieczenia wyrobiska ścianowego. Ze względu na bardzo trudne warunki pracy, jedynymi urządzeniami mogącymi efektywnie realizować proces odstawy urobku są ścianowe przenośniki zgrzeblowe. Współcześnie obserwuje się trendy polegające na ograniczeniu ilości ścian wydobywczych i zwiększaniu ich wydajności; powoduje to konieczność ciągłego zwiększania mocy napędów przenośników zgrzeblowych – w przypadku kompleksów kombajnowych w polskich kopalniach węgla kamiennego napędy te mają zwykle moc rzędu kilkuset kilowatów, natomiast w przypadku kopalń zagranicznych o dużych miąższościach pokładów węglowych moc przenośników często przekracza jeden megawat.



Rys. 1. Ścianowy przenośnik zgrzeblowy jako element kombajnowego kompleksu wydobywczego

Mimo inwestowania dużych nakładów finansowych i technologicznych proces automatyzacji kompleksów kombajnowych przebiega stosunkowo powoli, w odróżnieniu od wysoko zautomatyzowanych kompleksów strugowych. Jedną z przyczyn tego stanu rzeczy są bardzo trudne warunki górniczo-geologiczne występujące w polskich kopalniach węgla kamiennego, takie jak: nierównomierność pokładu węglowego, obecność przerostów i wtrąceń skały płonnej czy obecność uskoków w strukturze złoża. Czynniki te, w połączeniu ze skomplikowaną technologią pracy kompleksu wydobywczego oraz licznymi problemami techniczno-ruchowymi spotykanymi w trakcie eksploatacji, powodują, iż cykl wydobywania nie przebiega płynnie; częstokroć przez znaczną część czasu eksploatacji wyrobiska ścianowego kombajn urabiający jest zatrzymany, gdyż aktualnie trwają inne, technologiczne lub manewrowe prace towarzyszące. Przez

Streszczenie: W artykule opisano innowacyjny projekt ścianowego przenośnika zgrzeblowego wyposażonego w przekształtniki częstotliwości, umożliwiające płynną regulację prędkości zgrzebeł. Przedstawiono zaprojektowany układ sterowania oraz wskazano możliwe do implementacji algorytmy sterujące. W artykule przedstawiono również wyniki testów stanowiskowych systemu oraz krótko wskazano dalsze plany rozwoju, związane z przeprowadzeniem prób w podziemnej kopalni węgla kamiennego.

🇬🇧 INNOVATIVE ARMoured SCRAPER CONVEYOR WITH FLUENT SPEED REGULATION

Abstract: The paper describes the innovative project of long-wall armoured scraper conveyor equipped with frequency inverters, which allows to fluently control scrapers speed. Designed control system was presented as well as special algorithms, suitable to implementation in this system, were described. Paper also presents the results of system field tests and briefly describes further development plans, which includes tests in underground coal mine.

większość czasu eksploatacji przenośnik zgrzeblowy pracuje z nominalną, wysoką prędkością ruchu zgrzebeł, co nie znajduje uzasadnienia ani ze względów wydajnościowych (nominalna wydajność odstawy urobku przez przenośnik jest wyższa od chwilowej, realnie generowanego strumienia urobku), ani ze względu na trwałość urządzenia (szybsze zużycie elementów przenośnika). Niezwykle istotnym czynnikiem jest również strata znacznych ilości energii, generowana w momencie jałowej pracy przenośnika zgrzeblowego.

Zarówno w środowisku akademickim, jak i w opiniach producentów i odbiorców maszyn górniczych panuje powszechne przekonanie, iż większość tych problemów mogłaby zostać z powodzeniem rozwiązana poprzez zastosowanie przemienników częstotliwości zintegrowanych z silnikami przenośników zgrzeblowych. Dotychczas główną przeszkodą w stosowaniu tego rozwiązania były trudności w konstrukcji tego typu urządzeń – z jednej strony ze względu na konieczność sterowania napędami o wysokich mocach i znacznych obciążeniach (w tym również obciążeniach statycznych, np. w momencie rozruchu przenośnika), z drugiej strony ze względu na wysokie wymagania dotyczące bezpieczeństwa stawiane urządzeniom wykorzystywanym w kopalniach podziemnych. Jednym z pierwszych

fizycznie wykonanych rozwiązań tego typu jest wspólny projekt Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie i firm Kopex Machinery oraz Elgór+Hansen SA pt. „Energooszczędny system sterowania prędkością przenośników odstawy urobku zwiększający ich trwałość”. W pierwszej, badawczej fazie projektu wykonano dwa przekształtniki częstotliwości przystosowane do pracy w warunkach podziemnej kopalni węgla kamiennego oraz stanowisko testowe, złożone z przenośnika zgrzeblowego wraz z napędami i odpowiedniego systemu sterowania. Druga faza projektu, aktualnie w realizacji, obejmuje testy wdrożeniowe systemu w warunkach kopalnianych.

Struktura stanowiska badawczego

Stanowisko badawcze, wykonane w ramach projektu, składało się z zespołu rynien przenośnika zgrzeblowego o łącznej długości 80 m, dwóch napędów elektrycznych o mocy nominalnej 315 kW każdy, sań kombajnu ścianowego imitujących obciążenie przenośnika, dwóch przekształtników częstotliwości do sterowania silnikami napędów, odpowiedniego układu chłodzącego zarówno silniki, jak i przekształtniki oraz odpowiednich sterowników nadrzędnych i lokalnych.

Zasadniczym elementem stanowiska badawczego był fragment przemysłowego, pełnowymiarowego przenośnika zgrzeblowego; jedyną różnicą w stosunku do przenośników kopalnianych było skrócenie długości do ok. 80 m. Aby symulować obciążenie przenośnika, po trasie poruszały się sanie kombajnu ścianowego, sztywno połączone z łańcuchem zgrzeblowym. Sanie te były wyposażone w dwa koła trakowe przemieszczające się po segmentach drabinkowych; koła te połączone były z silnikami hydraulicznymi. Z racji sztywnego połączenia sani kombajnowych z łańcuchem przenośnika silniki hydrauliczne pracowały jako pompy, co przy zastosowaniu zmiennego ciśnienia umożliwiała w pewnym zakresie zwiększanie lub zmniejszanie obciążenia przenośnika. Widok testowego przenośnika zgrzeblowego został przedstawiony na rysunku 1.

Głównym elementem stanowiska badawczego były dwa dwubiegowe silniki elektryczne o mocy nominalnej 105 kW



Rys. 2. Trasa testowego przenośnika zgrzeblowego



Rys. 3. Silnik napędowy przenośnika zgrzeblowego



Rys. 4. Jeden z przekształtników częstotliwości zastosowanych na stanowisku badawczym

na biegu wolnym oraz 315 kW na biegu szybkim; nominalne napięcie zasilania wynosiło 1 kV. Silniki te były zasilane poprzez odpowiednie przekształtniki częstotliwości, umożliwiające zmiany częstotliwości zasilania w zakresie od 3 do 100 Hz. Z racji wydzielania się dużych ilości ciepła na silnikach i przekształtnikach układ został wyposażony również w specjalny system chłodzący, chroniący te elementy przed przegrzaniem. Na rysunku 2 przedstawiono widok silnika napędowego przenośnika, natomiast na rysunku 3 – sterujący nim przekształtnik częstotliwości.

Układ sterujący napędami sterownika ma strukturę hierarchiczną. Kluczowym elementem systemu jest sterownik nadrzędny bądź to wykonujący polecenia operatora, bądź realizujący zadany układ automatycznego sterowania prędkością ruchu przenośnika. Sterownik ten ma również możliwość komunikacji z innymi elementami kompleksu ścianowego poprzez odpowiednie interfejsy komunikacyjne, co pozwala m.in. na pobranie informacji o aktualnym położeniu kombajnu w wyrobisku ścianowym. Oprócz sterownika nadrzędnego, przy każdym z napędów umieszczone zostały dodatkowo sterowniki lokalne – pełnią one głównie funkcje komunikacyjne, poprzez

zbieranie i wysyłanie odpowiednich sygnałów do silnika i przekształtnika częstotliwości oraz komunikację poprzez protokół komunikacyjny ze sterownikiem nadrzędnym.

Algorytm sterujący prędkością przenośnika

Analizując możliwe do implementacji algorytmy sterujące, można wyodrębnić cztery podstawowe metody sterowania prędkością ścianowego przenośnika zgrzeblowego:

- sterowanie przez operatora (ręczne);
- algorytmy korekcji prędkości związanej z aktualną fazą urabiania;
- algorytmy stabilizacji strugi urobku;
- algorytmy wielokryterialne.

Pierwsza, najprostsza metoda sterowania opiera się na ręcznej korekcji prędkości ruchu przenośnika. Zastosowanie przekształtników częstotliwości w takim układzie nie tylko umożliwia płynną zmianę prędkości przenośnika, ale również może zapewnić łagodny rozruch i hamowanie. Taki sposób sterowania daje największe możliwości korekcji pracy układu przez operatora, jest jednak w swojej istocie dość absorbujący; dodatkowo operator, znajdując się w jednym miejscu wyrobiska ścianowego, nie posiada informacji o stanie całego przenośnika, przez co trudno jest mu oszacować optymalną prędkość zgrzebla.

Druga grupa algorytmów polega na arbitralnym wyznaczeniu kilku prędkości odpowiednich dla określonej fazy urabiania i płynnym przełączaniu się pomiędzy nimi, zależnie od aktualnej sytuacji. Do realizacji odpowiedniego układu przełączającego niezbędna jest synteza automatu stanu, dla którego sygnałem wejściowym byłaby informacja o aktualnym położeniu kombajnu, a sygnałem wyjściowym – optymalna prędkość przenośnika. Przykładowo podczas cyklu zawrębiania wydajność odstawy urobku, a zatem prędkość przenośnika, może być mniejsza niż w fazie urabiania calizny węglowej, ze względu na liczne czynności manewrowe kombajnu; informacją o trwaniu fazy zawrębiania może być sygnał określający położenie kombajnu w pobliżu początku lub końca wyrobiska ścianowego. Wadą tego typu podejścia jest nieuwzględnianie chwilowego zapotrzebowania na zwiększoną wydajność odstawy urobku przez przenośnik, np. w momencie odspojenia się znacznego fragmentu calizny węglowej.

Algorytmy stabilizujące strugę urobku nie posiadają wyżej wymienionej wady, dostosowując się do chwilowo wymaganej wydajności przenośnika zgrzeblowego. Działają one na zasadzie nadążania prędkości zgrzebel przenośnika (np. poprzez realizację algorytmu PID) za sygnałem proporcjonalnym do aktualnie generowanej strugi urobku. Tego typu sterowanie minimalizuje zużycie energii przez przenośnik zgrzeblowy, generuje w przybliżeniu stałą strugę urobku oraz prowadzi do możliwie dużego ograniczenia zużycia elementów przenośnika. Problemem w praktycznej realizacji tego typu algorytmu jest trudność w identyfikacji i akwizycji sygnału sterującego; przykładowo, jeśli za miarę obciążenia przenośnika przyjmie się napięcie cięgna zgrzeblowego, wszelkie uszkodzenia zgrzebel czy lokalne zablokowanie urobku będą skutkowały gwałtownym wzrostem prędkości przenośnika, nie przynosząc wcale zmniejszenia się wartości sygnału sterującego. Wręcz przeciwnie, może mieć

miejsce zwiększenie obciążenia cięgna, wywołując dodatnie sprzężenie zwrotne. Bezpośredni pomiar stanu załadowania przenośnika urobkiem, np. poprzez umieszczenie wzdłuż trasy przenośnika szeregu czujników tensometrycznych, jest zagadnieniem metrologicznie trudnym, niezwykle kosztownym i podatnym na awarie.

Ostatnia grupa algorytmów jest ideowo bardzo zbliżona do algorytmów związanych ze stabilizacją strugi odstawanego urobku, jednak do generacji sygnału sterującego uwzględnia więcej niż jeden sygnał sterujący, analizując np. aktualną pozycję i prędkość kombajnu, nierównomierność obciążenia napędów, napięcie cięgna łańcuchowego, aktualną fazę urabiania czy lokalną wartość obciążenia przenośnika urobkiem. Układ taki jest w swojej strukturze redundantny, przez co uzyskuje się znacznie większą pewność poprawności sygnału sterującego niż w przypadku sterowania opartego o jeden wybrany sygnał. Trudność w implementacji tego typu układu wynika z jego złożoności, a przez to skomplikowanej syntezy. Dodatkowo, w przypadku wykorzystania kilku sygnałów pośrednio sterujących prędkością przenośnika, trudno jest przewidzieć i przetestować wszelkie kombinacje sygnałów oraz możliwe do wystąpienia zjawiska (np. awarię jednego z czujników). Poza tym koszt tego typu układów oraz ich podatność na awarie są znacznie wyższe niż w przypadku wcześniej omawianych algorytmów sterowania.

Testy badanego układu

W procedurze testowej przedstawionego układu przebadano trzy rodzaje sterowania: ręczne, sterowanie z automatyczną korekcją prędkości przenośnika w odpowiedniej fazie urabiania i sterowanie oparte o zewnętrzny sygnał określający wymaganą prędkość (dla potrzeb testów sygnał ten został opracowany teoretycznie i podany do sterownika z komputera PC). Na potrzeby testów w środowisku labVIEW został opracowany specjalny symulator kombajnu ścianowego, umożliwiający przetestowanie różnego typu sytuacji występujących w realnym wyrobisku ścianowym. Widok okna diagnostycznego tego symulatora został przedstawiony na rys. 5.

Testy ręcznego sterowania prędkością przenośnika wykonano przy pomocy standardowego pilota sterującego kombajnem ścianowym z odpowiednio zaprogramowanymi dodatkowymi funkcjami. Podczas testów zbadano przebieg łagodnego rozruchu i hamowania przenośnika, możliwości dynamicznej zmiany prędkości ruchu zgrzebel oraz określono minimalną i maksymalną do uzyskania prędkość ruchu. Podczas przebiegu testów nie stwierdzono żadnych problemów z realizacją odpowiednich poleceń sterujących. Maksymalna uzyskana prędkość przenośnika nieobciążonego była ok. dwukrotnie większa w stosunku do prędkości nominalnej, przy czym zaobserwowano znaczny spadek momentu generowanego przez napędy, natomiast minimalna możliwa do uzyskania prędkość stanowiła ok. 5% prędkości nominalnej.

Testy sterowania z korekcją prędkości w zależności od etapu urabiania przeprowadzono w oparciu o odpowiednio zaprojektowany automat stanu współpracujący ze sterownikiem nadrzędnym. Automat ten pobierał z symulatora kombajnu wszelkie niezbędne do sterowania sygnały oraz przesyłał wartość



Rys. 5. Okno symulatora kombajnu ścianowego

wymaganej prędkości przenośnika do sterownika nadrzędnego. Przy założeniu pewnej tolerancji podczas przejścia pomiędzy fazami urabiania (np. faza zawrębenia może odbywać się na dłuższym lub krótszym odcinku) algorytm sterujący sprawował się bez zarzutu, płynnie przełączając prędkość stosownie do danej fazy pracy kombajnu. Testy zostały przeprowadzone zarówno dla urabiania dwu-, jak i jednokierunkowego.

Ostatnim etapem testów było zbadanie odpowiedzi układu na zewnętrzny sygnał określający wymaganą prędkość przenośnika – w tym przypadku sygnał ten został opracowany na bazie teoretycznej analizy pracy kombajnu ścianowego, a następnie odpowiedni algorytm został zaimplementowany w sterowniku nadrzędnym. Dla uproszczenia przyjęto, iż urabiany pokład ma stałą wysokość i jednorodny charakter. Algorytm działał w pełni poprawnie, na bieżąco reagując na symulowane nietypowe sytuacje, takie jak np. symulowana konieczność zmniejszenia intensywności urabiania, spowodowana napotkaniem przestu skalnego w caliznie węglowej.

Podsumowanie przeprowadzonych badań i dalsze perspektywy rozwoju projektu

Zarówno testy fizycznej struktury systemu, jak i testy algorytmów sterujących jasno pokazały, że przyjęta struktura układu płynnego sterowania prędkością przenośnika zgrzeblowego jest strukturą poprawną, nadającą się do dalszych badań w warunkach przemysłowych. Badania takie będą stanowić następną fazę projektu; podczas ich realizacji wybrane algorytmy sterujące przetestowane zostaną w istniejącym wyrobisku ścianowym. Wyniki tych badań jasno określą obszar przydatności tego typu rozwiązania, wskażą wszelkie trudności możliwe do napotkania podczas standardowej eksploatacji oraz ujawnią rzeczywistą skalę korzyści płynących z zastosowania omawianych rozwiązań.

Jak wykazały testy stanowiskowe, stosunkowo łatwymi do implementacji algorytmami sterującymi prędkością ruchu zgrzebel przenośnika są algorytmy ręcznego zadawania prędkości, algorytmy korekcji prędkości na podstawie aktualnej fazy urabiania oraz algorytmy stabilizacji strugi urobku. Algorytmy wielokryterialne wymagają opracowania szczegółowego, złożonego systemu sterującego, który z uwagi na tę złożoność jak i duży potencjalny koszt nie będzie implementowany w warunkach testów podziemnych. Wszystkie pozostałe algorytmy zostaną przetestowane zarówno w trakcie prób symulujących różnorakie sytuacje eksploatacyjne, jak również w trakcie normalnej pracy kompleksu ścianowego.

Przewidywanymi pozytywnymi rezultatami zastosowania przekształtników częstotliwości do zasilania napędów przenośnika zgrzeblowego są: mniejsze zużycie energii elektrycznej, wolniejsze zużycie elementów przenośnika, mniejsze generowanie hałasu oraz zmniejszone wydzielanie ciepła do przestrzeni wyrobiska. Z racji stosunkowo łatwego porównawczego pomiaru użytkowanej energii elektrycznej, w trakcie prób podziemnych zostanie zmierzony zużycie energii w wypadku pracy przenośnika podczas eksploatacji ściany ze stałą, nominalną prędkością ruchu zgrzebel oraz przy zastosowaniu wybranych algorytmów sterujących, korygujących prędkość przenośnika. Da to z jednej strony jasny obraz o skali oszczędzanej energii, jak również pośrednio pozwoli oszacować, o ile mniej ciepła (głównej formy rozpraszania energii w tego typu układach) jest generowane do przestrzeni wyrobiska. Przy porównaniu tych wartości do kosztów inwestycyjnych, związanych z zakupem i instalacją przekształtników częstotliwości i układów sterujących, określona zostanie również zasadność ekonomiczna stosowania tego typu rozwiązań.

Literatura

- [1] ANTONIAK J., SUCHOŃ J.: *Górnictwo przenośniki zgrzeblowe*. Wyd. „Śląsk”, Katowice 1983.
- [2] ANTONIAK J., SUCHOŃ J.: *Wymagania techniczne stawiane wysoko wydajnym ścianowym przenośnikom zgrzeblowym*. „Maszyny Górnicze” 2/1992.
- [3] DOLIPSKI M.: *Dynamika przenośników łańcuchowych*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1997.
- [4] GOSPODARCZYK P.: *Analiza struktury i parametrów układów napędowych przenośników zgrzeblowych w aspekcie ich wpływu na wielkość wydobycia kompleksów ścianowych*. „Maszyny Górnicze” 2/1992.

Publikacja powstała w ramach projektu NCBIR INNOTECH-K1/IN1/65/158914/NCBR/12 pt. *Energooszczędny system sterowania prędkością przenośników odstawy urobku zwiększający ich trwałość*.

✉ Piotr Gospodarczyk, Paweł Mendiya, Grzegorz Stopka – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza;
Andrzej Mazurczyk – Elgór+Hansen SA