

**Marek Trajdos, Wojciech Roman**  
T-System Projekt Sp. z o.o., Łódź  
Zbigniew Niczyporuk, PGE KWB Turów S.A.

## **NOWOCZESNE UKŁADY NAPĘDOWE PRĄDU ZMIENNEGO MASZYN GÓRNICICTWA ODKRYWKOWEGO WĘGLA BRUNATNEGO - ZAGADNIENIA WYBRANE**

### **MODERN AC DRIVE SYSTEMS OF THE OPEN COAL BROWN MINING MACHINERY - SELECTED ISSUES**

**Abstract:** This paper describes selected issues of using modern ac drive systems in the open coal brown mining machinery. Problems concerning selection of algorithms of steering of selected drives of opencast mining machines.

#### **1. Wstęp**

W pracy przedstawiono wybrane zagadnienia z dziedziny nowoczesnych układów napędowych stosowanych w maszynach górnictwa odkrywkowego węgla brunatnego. Rozważania ograniczono do napędu prądu przemiennego, jako bardziej rozwojowej tendencji we współczesnej technice napędowej oraz do aplikacji złożonych z napędów współpracujących ze sobą w układach typu Master-Slave lub w inny sposób. Przedstawiono rozwiązania sterowania układami napędowymi optymalizowane dla stanów dynamicznych lub quasi-stacjonarnych.

Pewną uwagę poświęcono również specyfice napędu maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego węgla brunatnego, które są urządzeniami samojezdnymi o bardzo dużych momentach bezwładności. Układy napędowe tych maszyn charakteryzują się generalnie zastosowaniem przekładni o dużych przełożeniach, znacznymi luzami i występowaniem chwilowych obciążeń o charakterze impulsowym.

Technologia napędu górniczego wymaga też uwzględnienia problematyki niezawodności, a w szczególności możliwości modyfikacji algorytmów pracy dla potrzeb pracy układów złożonych w sytuacji awarii pewnych komponentów. Układy napędowe posiadają też rozbudowaną płaszczyznę komunikacji, zarówno wzajemnej, jak i z nadrzędnym układem sterowania.

Przedstawione rozważania oparto całkowicie o istniejące aplikacje maszynowe, których algorytmy pracy były wypracowywane w oparciu o wiedzę i doświadczenie specjalistów z wielu dziedzin oraz osób zajmujących się eksploatacją zgodną z zasadami sztuki górnictwa.

#### **2. Technika redukcji luzu w układach napędów łańcuchowych**

Maszyny stosowane w górnictwie odkrywkowym ze względu na swoje gabaryty i masę poruszają się na łańcuchach. Moment napędowy potrzebny do napędzania łańcuchów przekazywany jest z wału silnika asynchronicznego za pomocą wielostopniowej przekładni mechanicznej – o przełożeniu sięgającym kilkuset.

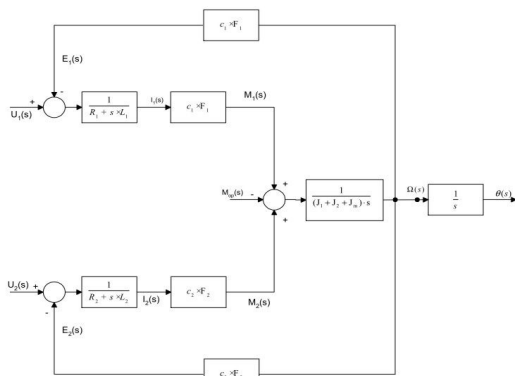
Za przekładnią mechaniczną znajduje się gwiazda. Pomiędzy gwiazdą a ogniwami łańcuchowymi praktycznie zawsze występuje pewien luz. Wynika on z samej natury i budowy łańcuchowej. Ze względu na niedokładność wykonania oraz ze względu na zużycie eksploatacyjne luz ten jest różny dla różnych położень łańcuchowych.

Najprostszym napędem łańcuchowym jest napęd oparty na dwóch łańcuchach. Sterowanie jazdą odbywa się poprzez zadawanie prędkości każdej z łańcuchów. Jazda na wprost ma miejsce wtedy, kiedy oba napędy mają jednakową prędkość. Napędów tych nie można traktować jako niezależnych, gdyż występuje pomiędzy nimi sprzężenie poprzez podłoże na którym się znajduje pojazd. Sprzężenie to jest tym sztywniejsze im większy jest stosunek długości łańcuchów do ich odległości od siebie.

W najgorszym przypadku można przyjąć, że napędy zachowują się tak jakby były połączone za przekładnią wałem sztywnym. Sterowanie czysto prędkościowe takich napędów zdałoby egzamin gdyby to połączenie było idealne. Jednak ze względu na budowę łańcuchów oraz przekładni występują luzy. Kilku – kilkunastostopniowe luzy po stronie wyjściowej przekładni multiplikowane są poprzez jej przełożenie na

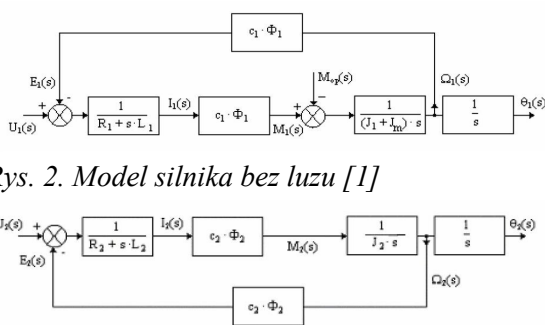
stronę silnika i mogą wynosić przykładowo 6 obrotów silnika lub nawet więcej. Bardzo często w takiej sytuacji okazuje się, że jeden z silników przejmuje na siebie całe obciążenie maszyny, natomiast drugi względu na występujący luz oraz już ustaloną pracę pracuje bez obciążenia. Sytuacja taka jest niedopuszczalna ze względu na niesymetryczne obciążenie konstrukcji maszyny oraz nieplanowane przeciążenie silników i przekładni prowadzące do ich przedwczesnego zużycia.

Luz jest właściwością układu, która znika skokowo podczas normalnej pracy układu napędowego. Wynika z tego, że próba doboru nastaw regulatora prędkości dla uzyskania właściwej odpowiedzi napędu nie przyniesie rezultatu jeżeli nie zastosujemy układu, który będzie rozróżniał pracę z luzem od pracy kiedy ten luz zostaje wybrany. Na rysunku 1 przedstawiono schemat połączenia sztywnego dwóch silników obcowzbudnych pracujących na wspólny wał.



Rys. 1. Model układu dwóch silników obcowzbudnych prądu stałego pracujących na wspólny wał [1]

Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono sytuację dwóch silników: Na pierwszy działa moment bezwładności obciążenia, na drugi nie.

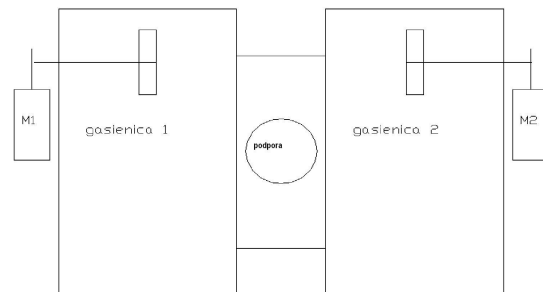


Rys. 2. Model silnika bez luzu [1]

Rys. 3. Model silnika z luzem [1]

Przedstawiony model został zaczerpnięty z pracy [1] i tamże jest szczegółowo omówiony. Widzimy więc, że dla układu napędowego z dwoma silnikami muszą być zastosowane liniowe regulatory prędkości oraz nieliniowy algorytm przełączania pomiędzy pracą normalną a pracą kiedy wybierany jest luz. Jednym z najprostszych sposobów wybierania luzu jest niewielkie zróżnicowanie prędkości podczas rozruchu układu napędowego aż do momentu, kiedy występujący luz zostanie wybrany.

Rozpatrzmy ten problem na przykładzie napędów jazdy podpory mostu zwałowarki. Schemat układu mechanicznego przedstawiony jest na rysunku 4.



Rys. 4. Szkic układu napędowego podpory mostu zwałowarki

Jest to napęd oparty na dwóch gasienicach ustawionych równolegle w niewielkiej odległości w porównaniu z ich rozmiarami. Napęd przenoszony jest za pomocą przekładni ślimakowo-planetarnej (stopień ślimakowy i dwa planetarne). Sprzężenie pomiędzy napędami występuje poprzez tarcie podłoża. Obydwa silniki sterowane są za pomocą falowników. Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono wykresy obciążenia silników podczas jazdy na wprost.



Rys. 5. Układ napędowy podpory mostu jazda na wprost w obu kierunkach

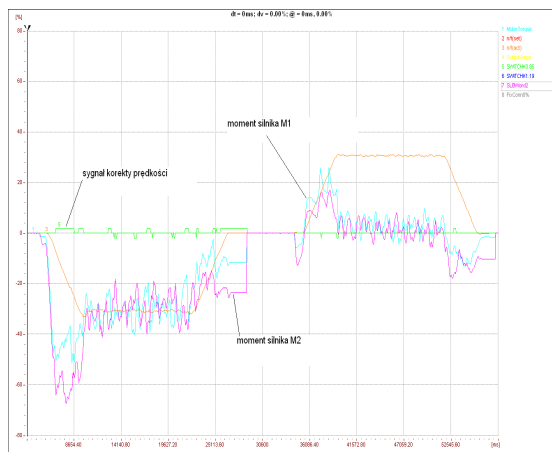
Można zauważyć nierównomierne obciążenie silników. W jednym kierunku obciążony jest napęd M1, natomiast w drugim napęd M2.



Rys. 6. Układ napędowy podpory mostu jazda na wprost w obu kierunkach

Na rysunku 6 widoczne jest zróżnicowanie obciążeń w jednym kierunku jazdy, natomiast w drugim obciążenia są porównywalne.

Występujący luz zależy od aktualnego ułożenia poszczególnych ogniów gaśienicy a także dokładności ich wykonania. W pracy [1] przedstawiono metodę sterowania układem dwusilnikowym z luzem dla przypadku kiedy luz występujący w układzie ma stałą, powtarzalną wartość (np. luz na sprzęgle, zębach, itp.). W przypadku napędu gaśienicowego luz jest wielkością zmienną, zatem algorytm sterowania powinien być na takie zmiany odporny. Podstawową ideą zaproponowanego algorytmu sterowania był algorytm różnicujący w niewielkim stopniu prędkości gaśienic na podstawie różnicy momentów wytwarzanych przez silniki. Uzyskany efekt jest widoczny na rysunku 7. Nierównomierne obciążenie jest zauważalne tylko podczas startu i zatrzymania napędów aż do chwili w której luz zostanie wybrany.

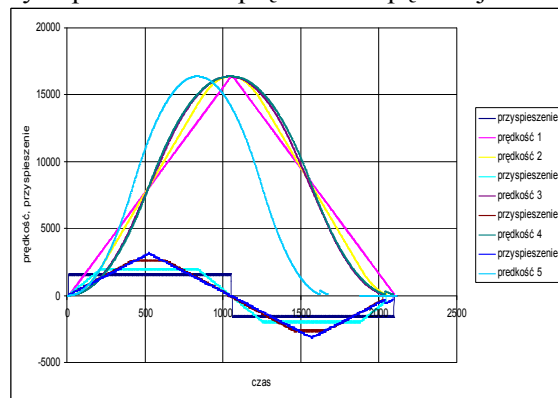


Rys. 7. Praca napędów podpory mostu z algorytmem wybierania luzu

### 3. Znaczenie dynamiki wartości zadanej w redukcji chaotycznych zachowań wysięgników nadwozia

Maszyny górnicze należą do największych urządzeń budowanych przez człowieka, przy czym wykorzystywane są w ich konstrukcji elementy kratownic poruszanych napędami wyposażonymi przekładnie o znacznych wartościach przełożeń i luzów. W konstrukcjach tych powstają w czasie ruchów dynamicznych w wyniku działania sił bezwładności naprężenia o znacznych wartościach, kumulujące energię sprężystości. Ze względu na gabaryty mechaniczne układów kratownic należy liczyć się z również powstawaniem zjawisk falowych związanych z naprężeniami. Ogólnie mówiąc analiza tak złożonych układów mechanicznych jest trudna, jak również realizacja optymalnych układów sterowania nimi.

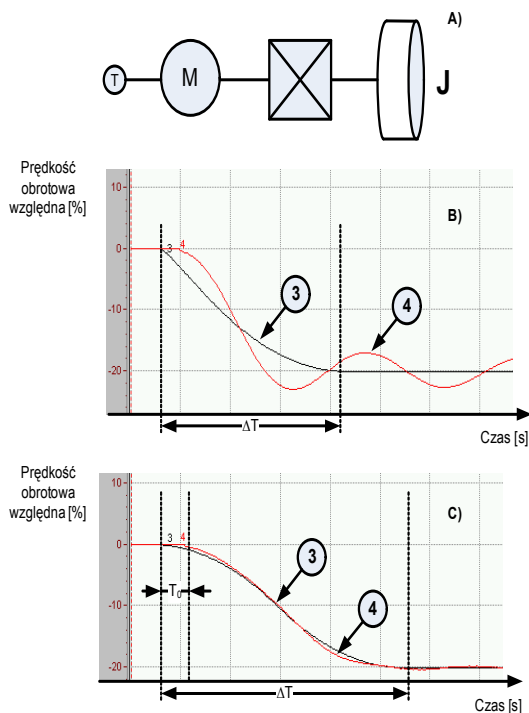
Nasuwa się zatem pytanie: Czy lepiej rozwiązywać w sterowaniu zagadnienie gaszenia naprężeń, czy zapobiegać ich powstawaniu? Logiczne jest rozważenie likwidacji przyczyny, a nie skutku. Trzeba zatem rozważyć generowanie ruchów maszyny w sposób „płynny”, który zapobiegnie gromadzeniu energii sprężystości. Najprostszym sposobem wydaje się kształtowanie dynamiki wartości zadanej w sposób „gładki”, czyli z kontrolą wyższych pochodnych położenia lub prędkości napędowej.



Rys. 8. Dynamika wartości zadanej. Przykłady kształtowania charakterystyki prędkości i przyspieszenia

Na rysunku 8 przedstawiono możliwości kształtowania charakterystyki wartości zadanej (w tym wypadku prędkości) dla napędu Master Drives VC. W najprostszym przypadku możemy zastosować trapezoidalny przebieg prędkości oraz prostokątny przebieg przyspieszenia. W najbardziej zaawansowa-

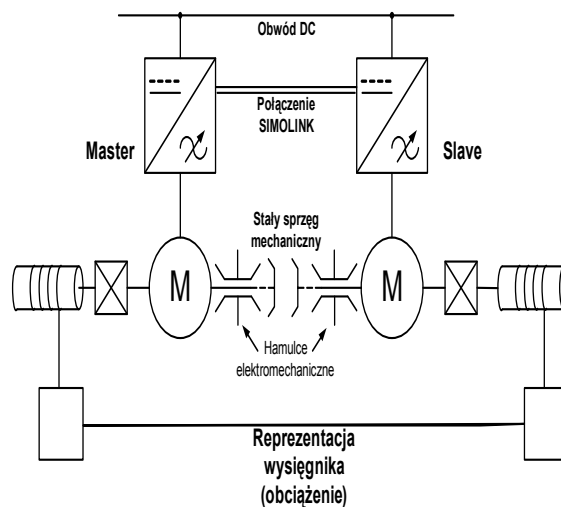
nym wartość zadana prędkości składa się z funkcji kwadratowych przy trapezoidalnym przebiegu przyspieszenia.



Rys. 9. Zachowanie się napędu obciążonego momentem bezwładności  $J$  (momentem dynamicznym), przy małej samohamowności (wartości momentu statycznego). A) Schemat ogólny (tachometr, silnik, przekładnia, obciążenie), B) Wykresy czasowe względnej prędkości obrotowej dla niewłaściwie dobranych nastaw generatora zbocza: 3- wartość zadana, 4- wartość mierzona tachometrem,  $\Delta T = 38$  sek. C) Wykresy czasowe względnej prędkości obrotowej dla właściwie dobranych nastaw generatora zbocza: 3- wartość zadana, 4- wartość mierzona tachometrem,  $\Delta T = 50$  sek.  $T_0$  – czas wynikający z zastosowania zaokrąglenia początkowego (ok. 50% wartości P469), postrzegany przez operatora jako opóźnienie zadziałania napędu.

Na rysunku 9 został pokazany wpływ dynamiki wartości zadanej na zachowanie się obiektu przedstawiającego sobą praktycznie czysty moment bezwładności z niewielkim tłumieniem. Wysięgnik nadwozia zwałowarki przy pominięciu wiatru zachowuje się bardzo podobnie. Dodatkowo, ze względu na dużą długość wysięgnika mogą powstać drgania poprzeczne, które mogłyby doprowadzić do katastrofy.

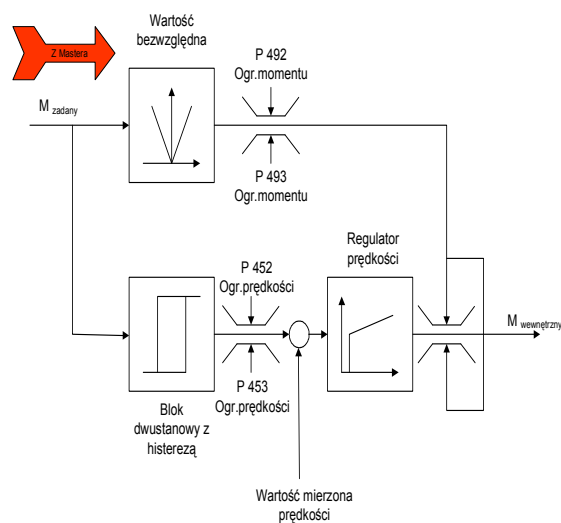
#### 4. Dynamika wypracowywania wartości momentu dla napędów wciągarek współpracujących z luzownikami



Rys. 10. Schemat blokowy układu napędowego wciągarki wysięgnika

Na rysunku 10 pokazano ogólny schemat blokowy dwusilnikowego układu napędowego stosowanego w sterowaniu podnoszeniem wysięgników głównych maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego.

Na uwagę zasługuje fakt istnienia stałego połączenia mechanicznego wałów napędowych silników oraz połączenia sieciowego wymiany danych pomiędzy falownikami. Taka konfiguracja pozwala na realizację układu sterowania typu Master-Slave z wyrównaniem momentu, co opisano poniżej.

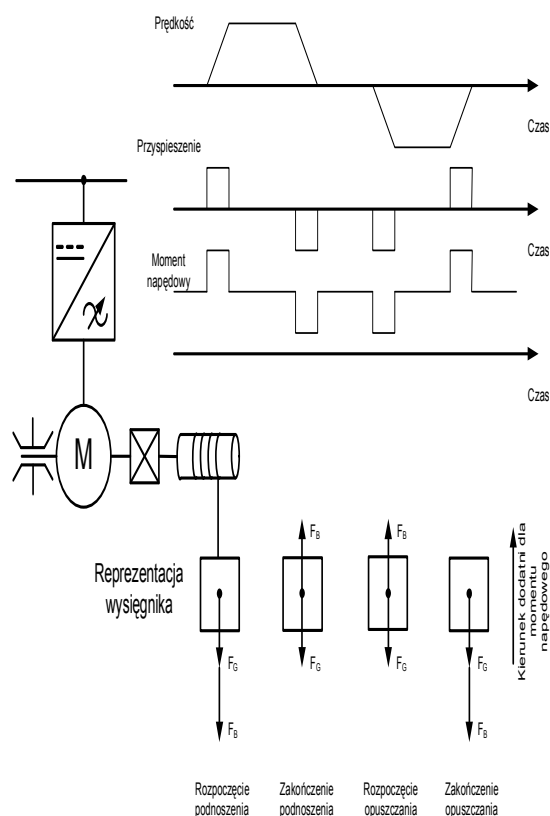


Rys. 11. Zasada generowania tzw. momentu wewnętrznego napędu Slave w przekształtniku częstotliwości Master Drives Vector Control.

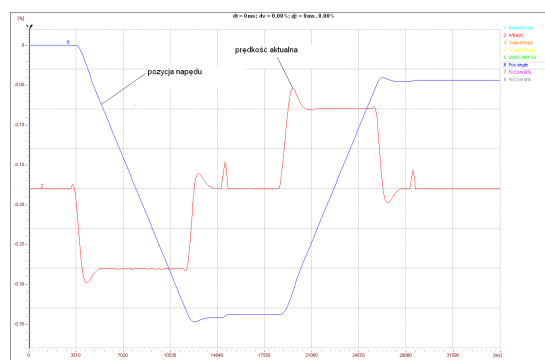
W przekształtnikach częstotliwości stosuje się powszechnie kaskadowy układ regulatorów, w którym na wyjściu regulatora prędkości typu PI wypracowywany jest sygnał wartości momentu stanowiący daną wejściową dla układu regulatorów prądu będących kolejnym ogniwem kaskady. Wartość momentu jest wprowadzana w ograniczenia, których wartości mogą być dowolnie kształtowane w zakresie od 0 do 200% wartości znamionowego momentu sterowanego silnika. W typowym przypadku sterowania (zwanym sterowaniem Master) regulator prędkości otrzymuje sygnał różnicy zadanej wartości prędkości i prędkości mierzonej przez enkoder silnika, którego obecność jest tutaj wymagana. Ze względów praktycznych wartość zadana prędkości jest również poddana ograniczeniom (rys.11.).

W układzie Slave wartość momentu aktualnie wytwarzanego przez napęd Master jest przekazywana siecią do układu Slave i tu wprowadzana niezależnie do dwu bloków funkcyjnych: obliczającego wartość bezwzględną wykorzystywaną do generacji symetrycznego ograniczenia momentu wyjściowego i dwustanowego z histerezą wytwarzającego jedną z dwu możliwych wartości zadanych dla regulatora prędkości. Wartość zadana prędkości jest ograniczana zgodnie w wymogami technologicznymi i zmienia się skokowo, czyli jej obraz czasowy jest ciągiem impulsów prostokątnych o polaryzacji dwubiegunowej.

Tak generowany moment zwany wewnętrznym ma na celu realizację dynamiczną identycznej wartości momentu wyjściowego przez obydwu napędy - Master i Slave. Pozwala to na praktyczną realizację zagadnienia sterowania układem dwu (lub więcej napędów) pracujących na wspólne obciążenie, czyli sztywno sprzężonych mechanicznie. W ogólnym przypadku można oczywiście opisaną metodą wytworzyć dowolną wartość momentu napędowego w napędzie typu Slave, nie tylko identyczną z Masterem, ale w przypadku pracy wielu napędów na wspólne obciążenie nie jest to celowe. Narzucenie różnych wartości momentów jest przydatne przy regulacji naprężenia, co jest wykorzystywane w sterowaniu procesów produkcji ciągłej na przykład w hutnictwie, ale w reguły nie przydatne w maszynach górniczych.



Rys. 12. Układ sił ciężkości i bezwładności w różnych stanach pracy występujących w napędzie podnoszenia



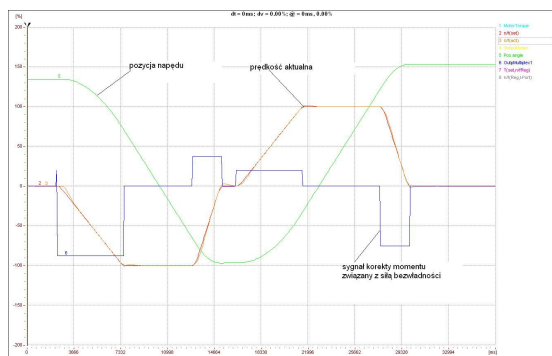
Rys 13. Praca napędu wciągarki przed optymalizacją

Odrębny problem stanowi kwestia zsynchronizowania momentu czasowego otwarcie hamulców elektromechanicznych i rozpoczęcia ruchu wysięgnika oraz momentu zamknięcia hamulców w chwili zakończenia ruchu.

Przykładowe zachowanie napędu zwodzenia zostało przedstawione na rysunkach 13 oraz 14. W pierwszym przypadku mamy do czynienia z nie zoptymalizowanym układem napędowym (brak kompensacji sił bezwładności oraz nie uwzględnione czasy zapadania ha-



mulców). Rysunek 14 przedstawia pracę wciągarki oddanej do eksploatacji.



Rys. 14. Praca napędu wciągarki po optymalizacji

W praktycznych układach, ze względu na wymagania bezpieczeństwa stosowane są oczywiście układy dwu hamulców, tzw. ruchowych i bezpieczeństwa. Ze względów merytorycznych w niniejszej pracy skoncentrowano się jedynie na opisie zasady włączenia w układ sterowania hamulców ruchowych.

## 5. Podsumowanie

Zastosowanie w maszynach górnictwa odkrywkowego nowoczesnych napędów opartych o silniki asynchroniczne i falowniki w znaczny sposób poszerza możliwości optymalnego sterowania pracą tych wyjątkowych ze względu na swoje gabaryty i specyfikę maszyn.

Okazuje się, że uruchomienie napędów falownikowych nie jest zwykłą procedurą, gdzie główne algorytmy zaszyte są w układach sterowania nadrzędnego. Algorytm sterowania napędami staje się tak naprawdę aplikacją napędową i zaczyna wręcz wymagać odrębnego projektu, uzgodnień z obsługą i służbami kopalni. A funkcją celu może zostać zdefiniowana jako przewidywalne dla obsługi zachowanie maszyny, wieloletnia bezawaryjna praca oraz bezpieczeństwo.

## 6. Literatura

- [1]. Adamczyk, P.: Analiza i sterowanie układem dwusilnikowym z luzem. Rozprawa doktorska na Wydziale Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki Politechniki Łódzkiej.
- [3]. G. Wilczek, M. Trajdos „Zastosowania napędów prądu przemiennego w maszynach górnictwa odkrywkowego”, materiały I Konferencji Naukowo-Technicznej ELGOR 2006 „Napędy urządzeń górnictwa odkrywkowego”, Wołbórz 2006.
- [4]. Z. Borczyk, M. Trajdos „Sterowanie jazdą maszyn górniczych. Regulacja prędkości z korekcją

momentu.”, materiały II Konferencji Naukowo-Technicznej ELGOR 2007 „Napędy urządzeń górnictwa odkrywkowego”, Bełchatów 2007.

[5]. M. Trajdos, W. Roman, „Sterowanie napędu podnoszenia i obrotu z wykorzystaniem przekształtników AC w wybranych maszynach górnictwa odkrywkowego”, materiały II Konferencji Naukowo-Technicznej ELGOR 2007 „Napędy urządzeń górnictwa odkrywkowego”, Bełchatów 2007.

[6]. W. Roman „Wybrane problemy związane z rozruchem napędów elektrycznych maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego”, Górnictwo Odkrywkowe nr 6/2008.

[7]. „Simovert Master Drives Compendium”, Siemens 2005.

[8]. „Sinamics S 120 Control Units and additional system components. Equipment Manual.”, Siemens 3/2007.