

# ALGORYTMY STEROWANIA NAPĘDAMI NA MODERNIZOWANYCH KOPARKACH

## ALGORITHM OF CONVEYOR DRIVE CONTROL IN MODERNIZED EXCAVATORS

**Leszek Hertel, Henryk Nowacki - PGE Górnictwo i Energetyka Konwencjonalna SA,  
Oddział KWB Belchatów, Rogowiec**

*Artykuł jest próbą ukazania algorytmów sterowania mających wpływ na eksploatację koparek: ERs710, SRs2000, SchRs4600, SchRs4000 pracujących w Kopalni Węgla Brunatnego Belchatów.*

**Słowa kluczowe:** algorytmy sterowania, modernizacja koparek

*The main aim of the paper is to present steering algorithms influencing exploitation of ERs 710, SRs 2000, SchRs 4600, SchRs 4000 excavators operating in Belchatów Opencast Mine.*

**Key words:** steering algorithm, excavators' modernization

Na maszynach budowanych w latach 70-tych ubiegłego wieku zastosowane układy sterowania i regulacji cechowała prostota i przejrzystość. Zastosowane algorytmy sterowania wykorzystywały w dużym stopniu zależności między wielkościami fizycznymi elementów układu napędowego i dopuszczały pracę silników z prędkościami różnymi od prędkości zadanej. Przy wzroście obciążenia napęd pracował z prędkością mniejszą od prędkości zadanej. Parametry układów regulacji typu: wzmocnienia, stałe czasowe, czy też opóźnienia były realizowane poprzez układy elektroniczne, a w wielu miejscach poprzez maszyny elektryczne, dlatego też musiały być dobierane bardzo precyzyjnie do dynamiki poszczególnych elementów koparki.

Przy prowadzonej modernizacji układu elektrycznego koparek często wymieniane są napędy prądu stałego na napędy prądu przemiennego. Zastosowane algorytmy sterowania nie odtwarzają, w zmodernizowanych napędach, poprzednich walorów użytkowych maszyn. Autorzy modernizacji próbują utrzymać prędkość obrotową silników bliską wartości zadanej. Ze względu na zmienne warunki pracy oraz występujące zakłócenia, stabilizacja prędkości jest trudna do uzyskania i może doprowadzić do znacznego zwiększenia awaryjności oraz pogorszenia stanu konstrukcji i podzespołów mechanicznych maszyn.

Pracujące koparki powinny umożliwić wydobywanie urobku z założoną wydajnością. Aby uzyskać założoną i stałą w czasie wydajność koparki, obsługa górnicza musi odpowiednio ustawić grubość wióra oraz wysokość urabianego tarasu. Następnie, w ślad za zmieniającymi się warunkami urabiania, operator koparki musi odpowiednio zmieniać prędkość obrotnicy głównej.

Z powyższych przyczyn, mechanizmy obrotnicy głównej i jazdy koparki zostały wyposażone w regulowane napędy na wszystkich koparkach pracujących w kopalni Belchatów. Koparki te były budowane na przełomie lat siedemdziesiątych i osiemdziesiątych ubiegłego wieku. Do napędzania obrotnicy głównej i jazdy koparki wykorzystano silniki obcowzbudne prądu stałego. Silniki te, zasilane przez tyrystorowe przekształtniki prostownikowe lub generatory pracujące w układzie Leonarda, zapewniały płynną regulację napędzanych mechanizmów.

Układy zasilania tych silników, dzięki zastosowanym sposobom sterowania i regulacji, zapewniły równomierne przemieszczanie się napędzanych mechanizmów w zmiennych warunkach pracy. Zmienne warunki pracy napędu jazdy koparki wynikają głównie ze zmienności ukształtowania terenu i nośności gruntu. Dodatkowo wpływ na pracę napędu jazdy mają cyklicznie występujące wzrosty obciążenia, właściwe dla napędów gąsienicowych. Zmienne warunki pracy napędu obrotnicy głównej pochodzą głównie z napędu zespołu urabiającego, tj. napędu koła lub łańcucha urabiającego. Zmienność sił oddziaływania zespołu urabiającego na napęd obrotnicy wynika z przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych oraz ze zmienności warunków urabiania. Bardzo duży wpływ ma twardość (wytrzymałość) urabianego węgla lub nadkładu.

W kopalni Belchatów prowadzone są sukcesywnie modernizacje układu elektrycznego koparek, ze względu na wysoki stopień wyeksploatowania podzespołów wyposażenia elektrycznego. Po przeprowadzonych modernizacjach na koparkach pojawiły się, wcześniej nie występujące, problemy eksploatacyjne i awarie.

W poszukiwaniu możliwych przyczyn wystąpienia awarii, przeprowadzono analizę porównawczą doboru napędów i zastosowanych algorytmów sterowania na koparkach, przed i po modernizacji. Stwierdzono, że na wszystkich koparkach w trakcie prowadzonych modernizacji zostały zmienione algorytmy sterowania.

Na przykładzie napędów obrotnicy i wciągarki głównej zostaną omówione zmiany w zastosowanych algorytmach sterowania, jakie zostały wprowadzone i które mogą mieć wpływ na walory eksploatacyjne koparek lub na trwałość podzespołów mechanicznych.

### Napęd obrotnicy głównej na przykładzie koparek ERs 710 i SRs 2000

W kopalni Bełchatów pracują koparki z zespołem urabiającym w postaci łańcucha lub koła czerpakowego, z przyjętym nazewnictwem, koparki łańcuchowe i kołowe.

Na koparkach łańcuchowych napęd obrotnicy pracował bez sprzężenia prędkościowego, natomiast na wszystkich koparkach kołowych z zamkniętą pętlą sprzężenia prędkościowego, a dokładniej ze sprzężeniem napięciowym. Do pomiaru prędkości rzeczywistej wykorzystywano pomiar napięcia występującego na wyjściu prostownika tyrystorowego, nawet wtedy, gdy koparka wyposażona była w przetwornik pomiaru prędkości rzeczywistej silników tego napędu, np. na koparce SchRs 4000.

Na wszystkich koparkach płaszczyzna pionowa symetrii wysięgnika nie jest równoległa do powierzchni koła, co sprawia, że podczas urabiania obciążenie obrotnicy nie jest symetryczne przy zmianie kierunku obrotu nadwozia. Siły reakcji, pochodzące od obracającego się koła w ścianie urobku, przenoszone są na napęd obrotnicy. Moment pochodzący od tej siły ma kierunek zgodny z momentem napędowym obrotnicy przy obrocie w prawą stronę, a przeciwny przy obrocie w lewą stronę. Wartość tej siły rośnie wraz ze wzrostem twardości (wytrzymałości) urobku i wraz ze stopniem wyeksploatowania zespołu urabiającego.

Na wszystkich koparkach kołowych obrotnicę napędzały silniki prądu stałego, zasilane z regulowanych prostowników tyrystorowych. W napędach tych, przełączenie z napędzania na hamowanie (i na odwrót) następowało dopiero wtedy, gdy moment zadany zmienił znak i gdy przekroczył nastawioną wartość progową. Czas przełączania trwał od 20 ms do 300 ms i zależał głównie

od wykonania przekształtnika oraz wielkości przełączanego prądu. W czasie przełączania napęd był blokowany. Mechanizmy wynikające z użycia sprzężenia napięciowego oraz zwłoka w reakcji układu wynikająca z blokowania regulatora prądu przy przełączaniu między napędzaniem i hamowaniem powodowały, że napęd był mało wrażliwy na krótkotrwałe zmiany obciążenia. Reakcje układu były stosunkowo łagodne.

### Koparka łańcuchowa ERs 710

Obrotnicę główną na koparkach ERs710 napędzały dwa silniki obcowzbudne prądu stałego. Prąd wzbudzenia tych silników miał stałą wartość, a jego kierunek był zmieniany przy zmianie kierunku pracy obrotnicy. Tworniki tych silników połączone szeregowo, były zasilane z generatora pracującego w **układzie Leonarda bez sprzężenia prędkościowego**. Operator zadając wartość prędkości obrotu, faktycznie ustawiał prąd magnesujący generatora. Szybkość zmian prądu magnesującego ograniczała maszyna tłumiąca. Tym samym operator zmieniał wartość siły elektromotorycznej generatora, regulując odpowiednio prędkość obrotnicy. Na tej koparce, przy ustawionej przez operatora stałej wartości napięcia zasilającego silniki, prędkość obrotnicy głównej była zmienna i zależała od oporów ruchu (warunków urabiania). Wraz ze wzrostem twardości (wytrzymałości) kopanego urobku zwiększały się opory ruchu, rósł prąd tworników i malała prędkość. Aby utrzymać wymaganą wydajność operator musiał zwiększyć wartość zadanego prądu magnesującego prądnicę. Przy pracy bez ingerencji operatora prędkość obrotnicy malała lub rosła w ślad za zmieniającymi się warunkami urabiania.

Wpływ wartości prądu twornika na zmiany prędkości opisuje zależność:

$$E_g = C \cdot I_w \cdot (n_{s1} + n_{s2}) + I_t \cdot \Sigma R$$

gdzie:

$E_g$  – siła elektromotoryczna generatora,

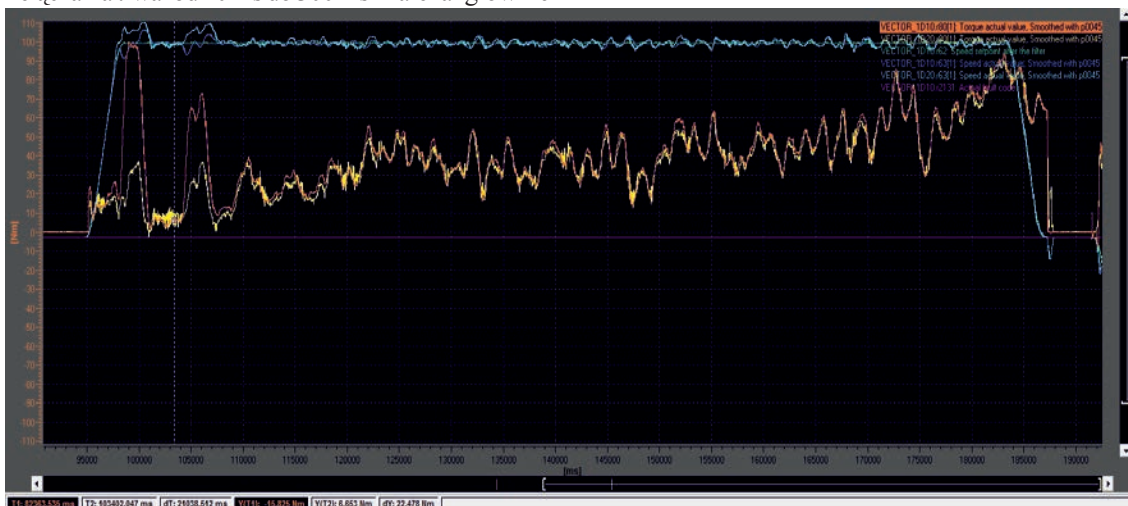
$n_{s1}$ ,  $n_{s2}$  – prędkości obrotowe silników,

$I_w$ ,  $I_t$  – prądy wzbudzenia i twornika,

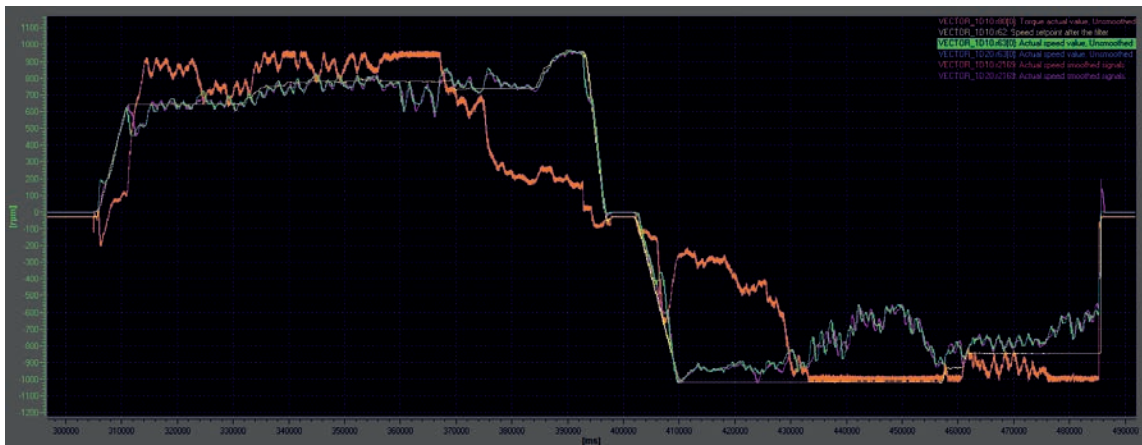
$\Sigma R$  – suma rezystancji wewnętrznej generatora,

silnika 1 i silnika 2 oraz rezystancji przewodów łączeniowych.

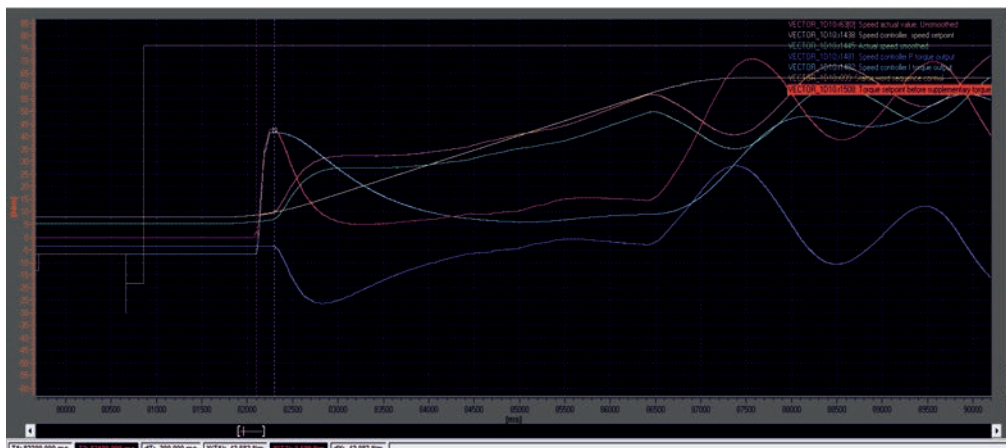
$C$  - stała wynikająca z konstrukcji silnika



Rys. 1. Regulacja prędkości obrotu na koparce ERs 710 po modernizacji



Rys. 2. Napięd obrotu koparki ERS 710 pracujący w ograniczeniu momentu



Rys. 3. Zarejestrowane błędy w zachowaniu regulatora obrotów napędu obrotnicy

Obydwa silniki wytwarzały taki sam moment napędowy. Układ sterowania kontrolował równomierność rozkładu napięcia na obu silnikach. Po wystąpieniu na silnikach różnicy napięć powyżej progu 15% napięcia znamionowego, układ sterowania wyłączał napęd awaryjnie. Dodatkowo, w napędzie zastosowano zabezpieczenie przeciążeniowe, które awaryjnie wyłączało przeciążony napęd, ale dopuszczało do krótkotrwałych wzrostów prądu (momentu napędowego).

Po modernizacji obrotnicę napędzają dwa silniki prądu przemiennego, zasilane przez własne przekształtniki falownikowe. Każdy napęd posiada swój układ regulacji prędkości. Prędkość rzeczywista podawana na regulator prędkości wyliczana jest przez przekształtnik z modelu silnika. Układ napędu obrotu po modernizacji został dobrany z dość dużym zapasem momentu, przez co był w stanie, niezależnie od obciążenia, bardzo dokładnie utrzymać prędkość silników na wartości zadanej.

Po rozpoczęciu eksploatacji urobku o dużej wytrzymałości koparką ze zmodernizowanym napędem obrotu okazało się, że sprzęgła zabezpieczające szybko się zużywają i zachodzi konieczność ograniczenia momentu. Dodatkowo, przy równej prędkości obrotu obu silników powstają duże różnice momentów wytwarzanych przez te silniki. Wprowadzono więc mechanizm wyrównywania momentów, poprzez poprawienie zadanej wartości prędkości jednego z napędów. Zabezpieczono także napęd obrotnicy, wyłączając go przy zbyt dużej różnicy momentów. Niestety ucierpiało na tym jakość regulacji.

Po wprowadzeniu ograniczenia momentu, przekształtniki bardzo często generowały błędy „utyku”. Szukając przyczyn powtarzających się wyłączeń napędu obrotnicy, wykryto nie-

prawidłową pracę regulatora obrotów w napędzie przekształtnikowym. Regulator ten wykazywał błędy w zachowaniu części całkującej, co powodowało generowanie nieuzasadnionych wzrostów momentu i oscylacje układu w całym zakresie regulacji prędkości. Konieczna była wymiana *firmware-u* w urządzeniu.

Aktualnie, w wyniku wprowadzonych rozwiązań i przyjętych parametrów regulatora obrotów, napęd obrotnicy podczas urabiania niezbyt twardego urobku pracuje z zadaną prędkością. Przy zmieniającym się obciążeniu, generuje cykliczne wzrosty momentu w chwili „wchodzenia w ścianę” kolejnych czerpaków. Natomiast podczas urabiania twardego urobku pracuje z ograniczeniem momentów, a wartość prędkości znacznie różni się od wartości zadanej.

Powstaje pytanie... Czy warto precyzyjnie utrzymywać prędkość obrotnicy na wartości zadanej przy urabianiu tylko pokładów o małej wytrzymałości, kosztem cyklicznego generowania pików wzrostu momentu napędowego?

### Koparka kołowa SRs 2000

Przed modernizacją, obrotnicę główną koparki SRs 2000 napędzały trzy silniki obcowzbudne prądu stałego, z szeregowo połączonymi twornikami. Obwody wzbudzenia silników były zasilane z mostka diodowego i połączone równolegle. Tworniki silników były zasilane poprzez sterowany mostek tyrystorowy. Zmiana kierunku obrotów oraz przełączenie z napędzania na hamowanie realizowane było przez styczniki kierunkowe, które przełączały kierunek prądu tworników. Podczas przełączania styczników kierunkowych bloko-

wany był regulator prądu na czas około 0,2 s. W układzie regulacji jako wartość prędkości rzeczywistej wykorzystano pomiar napięcia występującego na wyjściu prostownika tyrystorowego.

Zastosowane sprzężenie napięciowe powodowało, że reakcja układu na chwilowe zmiany obciążenia była łagodniejsza od tej, która wystąpiłaby przy sprzężeniu prędkościowym. Sprzężenie napięciowe uwzględnia wartość płynącego prądu.

Wartość napięcia sprzężenia napięciowego opisuje zależność:

$$U = C \cdot I_w \cdot \sum n_{si} + I_t \cdot \sum R_i$$

gdzie:

$U$  – napięcie sprzężenia zwrotnego,

$n_{si}$  – prędkości obrotowe silników ( $i$  - tego silnika)

$I_w, I_t$  – prądy wzbudzenia i twornika

$\sum R_i$  – suma rezystancji wewnętrznej silników oraz rezystancji przewodów łączeniowych ( $i$  - tego silnika)

$C$  – stała wynikająca z konstrukcji silnika.

W trakcie modernizacji pozostawiono pracujące silniki, a wymieniono, już wyeksploatowane, jednokierunkowe prostowniki tyrystorowe, na nowoczesne nawrotne prostowniki tyrystorowe Simoreg DC Master. Do układu regulacji wprowadzono sprzężenie prędkościowe, a do pomiaru prędkości wykorzystano zabudowane na silnikach enkodery. Po rozpoczęciu urabiania pokładów węgla, bardzo szybko okazało się, że pomimo całej finezji rozwiązań informatycznych, szybkości pracy, techniki BICO itd., napęd obrotowy pracował bardzo nierównomiernie przy obrocie w lewą stronę. Zamiast płynnego przesuwu koła czerpakowego w zabierce, zatrzymywało się ono, a następnie rozpędzało i uderzało w ścianę. Takie przemieszczanie się koła w zabierce występowało przy stabilnej pracy silników, które pracowały z prędkością bliską wartości zadanej. Wykonawca modernizacji podejmował kolejne próby optymalizacji pracy napędu obrotu, które polegały na stabilizacji prędkości silników, ale nie powodowały poprawy zachowania się koła podczas kopania.

Po zastąpieniu sprzężenia prędkościowego sprzężeniem napięciowym oraz po zmianie parametrów regulatora obrotu (zmniejszono wzmocnienie i zwiększono stałą czasową), mechanizm obrotowy zaczął pracować w miarę stabilnie przy obrocie w lewo podczas kopania urobku. Po tych zmianach wzrosły natomiast nieznacznie różnice prędkości przy obrocie w prawo, które przez obsługę maszyny są w pełni akceptowane.

Przy przeprowadzonej modernizacji nie uwzględniono wpływu momentu pochodzącego od pracującego koła. Jego wartość jest na tyle duża, że przy obrocie w lewo, moment ten, potrafi napędzać mechanizm obrotowy. Po chwilowych wzrostach tego momentu (cykliczne wzrosty występujące przy „wchodzeniu w ścianę” kolejnych czerpaków) układ napędu obrotowy przełączał się na hamowanie. W trakcie każdego takiego przełączenia, w mechanizmie przenoszenia momentu wybierane były luzy międzyzębne. Dodatkowo odprężał się niezbyt sztywny wysięgnik.

Po wprowadzeniu przez pracowników Kopalni zmian, które w znacznej części odwzorowały algorytm sterowania przed modernizacją, znacznie poprawiła się praca mechanizmu obrotu. Okazało się, że istotna jest stabilność pracy napędzanego mechanizmu, a nie dokładność realizacji zadanej trajektorii prędkości silników.

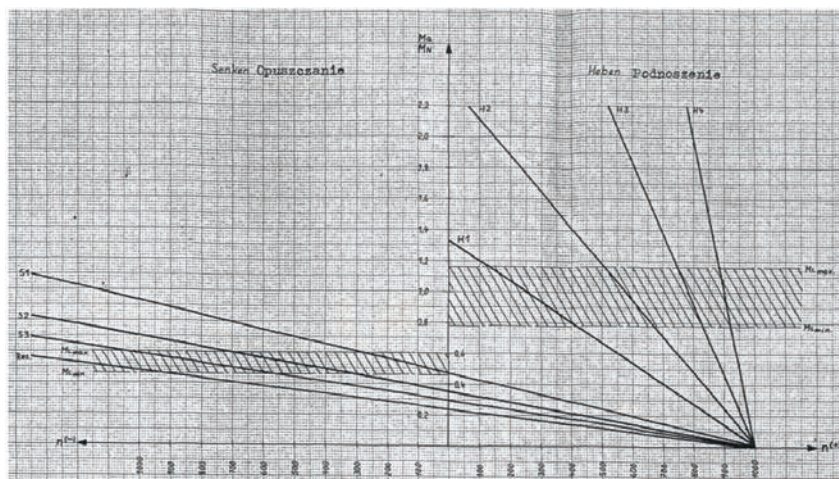
## Napęd wciągarki na koparkach SchRs 4600 i SchRs 4000

### SchRs 4600

Napęd wciągarki koparek SchRs 4600 jest zbudowany w oparciu o dwa silniki asynchroniczne pierścieniowe z nastawianiem prędkości i momentu za pomocą oporów włączanych szeregowo w obwód wirnika. Bardzo prosty układ sterowania zapewnia możliwość pracy z różnymi prędkościami i spełnia podstawowe wymagania stawiane napędem wciągarek na koparkach wielonaczyniowych. Do dnia dzisiejszego, pod wieloma względami, jest to rozwiązanie, które można stawiać za wzór pracy wciągarki.

Układ sterowania daje możliwość uzyskania czterech stopni prędkości do góry i trzech stopni prędkości w dół. Napęd wciągarki działa bez żadnego sprzężenia zwrotnego.

Przy spełnieniu warunków gotowości do uruchomienia, po wychyleniu nastawnika napędu wciągarki w dowolnym kierunku załączany jest stycznik główny silników ze zwartym pierwszym stopniem podnoszenia. Razem z nim podnoszone są hamulce postojowe, a po otrzymaniu potwierdzenia płynącego prądu w stojanach obu silników wciągarki podnoszone są luzowniki robocze. Potwierdzenie płynięcia prądu otrzymujemy z dwóch niezależnych przetworników. Moment napędowy potrzebny do utrzymania wysięgnika w pozycji równowagi uzyskiwany jest w silniku zanim zostaną zwolnione hamulce robocze.



Rys. 4. Charakterystyki mechaniczne napędu wciągarki koparki SchRs 4600

Zadawanie prędkości polega na skokowej zmianie wartości rezystorów w obwodzie wirnika (przełączanie kolejnych stopni rozruchowych) zależnie od kąta wychylenia zadajnika.

Hamowanie napędu zaczyna się po ustawieniu przez operatora zadajnika w pozycji neutralnej. Napęd hamuje na tym samym stopniu na którym startował (pierwszy stopień podnoszenia). Po zadany czasie wyłączany jest stycznik główny napędu, a hamulce robocze zapadają kiedy prąd spadnie poniżej nastawionej wartości. Hamulce postojowe zapadają po określonym czasie zwłoki po hamulcach roboczych.

Napęd ten nie posiada układu regulacji prędkości. Prędkość wciągarki, zgodnie z charakterystyką, wynika tylko z wartości załączonego rezystora i z momentu obciążenia.

### **SchRs 4000**

Na kopalni SchRs 4000, przed modernizacją, wciągarkę główną napędzały dwa silniki obcowzbudne prądu stałego. Uzwojenia wzbudzenia zasilane były z niesterowanego mostka diodowego. Napęd ten był w pełni regulowanym napędem ze sprzężeniem prędkościowym.

Uruchamianie napędu wciągarki odbywało się według następującego algorytmu sterowania:

- po wychyleniu przez operatora manipulatora następowało wybranie: zadanego kierunku podnoszenia, zależnego od kierunku wychylenia zadanej prędkości jazdy, proporcjonalnej do wielkości kąta wychylenia,
- wybrany kierunek jazdy - załączony przekaźnik kierunkowy załączał prąd wzbudzenia,
- po otrzymaniu potwierdzenia, że wartość płynącego prądu wzbudzenia jest powyżej nastawionego progu, następowało załączenie prądu twornika (prądu wstępnego); prąd wstępny miał stałą wartość i stały kierunek, które zapewniały zrównoważenie ciężaru wysięgnika (momentu obciążenia),
- po otrzymaniu potwierdzenia wzrostu prądu twornika (wstępnego) powyżej nastawionego progu, następowało: odblokowanie integratora i regulatora obrotów oraz załączenie stycznika podającego napięcie na luzowniki hamulców roboczych (były one podnoszone).
- po czasie zwłoki, wynikającym z czasu potrzebnego na załączenie kolejno dwóch styczników, następowało załączenie stycznika podającego napięcie na luzowniki hamulców trzymających.

Działanie układu regulacji (regulator obrotów łącznie z generatorem rampy) polegało na zwiększaniu prądu twornika przy podnoszeniu oraz na zmniejszaniu prądu twornika przy opuszczaniu wciągarki.

Po modernizacji napęd wciągarki został wyposażony w dwa falowniki z odpowiednio dobranymi silnikami. Nadal jest to układ z regulowaną prędkością ze sprzężeniem prędkościowym. W dalszym ciągu jest to typowy układ master – slave. Zmiany jakie nastąpiły w trakcie modernizacji dotyczą dynamiki nape-

du, jak również zmienił się algorytm sterowania.

W zakresie algorytmu sterowania zmiana dotyczy filozofii startu napędu. Nie było tu prądu wstępnego, który równoważyłby ciężar wysięgnika. Wysięgnik był „łapano w locie”. Przyjęte nastawy regulatora obrotów w zakresie niskich prędkości umożliwiające „łapanie w locie” opadający wysięgnik mogą generować duże zmiany momentu w odpowiedzi na pojawiające się zakłócenia lub zmieniające się warunki pracy, np. podczas pracy napędu wciągarki podczas kopania urobku.

### **Podsumowanie**

Należy założyć, że konstruktorzy maszyn mieli wieloletnie doświadczenie. Przy projektowaniu i doborze poszczególnych elementów układów napędowych uwzględnili występujące wzajemne oddziaływania zabudowanych napędów. Przyjęli prawidłowe rozwiązania konstrukcyjne oraz odpowiednio dobrali wszystkie elementy układów napędowych.

W trakcie prowadzonych modernizacji części elektrycznej koparek wymieniane są układy napędowe - często na większe. Dodatkowo napędy prądu stałego wymieniane są na napędy prądu przemiennego, które są zasilane z przekształtników falownikowych. W regulowanych napędach prądu przemiennego nie występuje blokowanie napędu przy przełączaniu między napędzaniem a hamowaniem oraz brak jest progu nieczułości momentu zadanego, powyżej którego następowało przełączenie.

Przeprowadzone modernizacje maszyn wprowadziły zmiany w algorytmach sterowania. Sterowanie całymi mechanizmami maszyny zastąpiono sterowaniem poszczególnych silników – co może generować występowanie dużych uderów momentowych.

Po przeprowadzeniu analizy porównawczej rozwiązań z minionej epoki i projektów współczesnych nasuwa się pytanie: czy projektanci dzisiaj mają równie duże doświadczenie w eksploatacji maszyn górniczych co ich poprzednicy?

### **Wnioski**

Przed przystąpieniem do modernizacji maszyny należy dokładnie przeanalizować funkcjonujący algorytm sterowania oraz dobrane parametry regulacji. W trakcie modernizacji należy powyższy algorytm odwzorować, a dopiero w dalszej kolejności próbować wdrażać nowatorskie rozwiązania, wykorzystując możliwości nowoczesnego sprzętu.

Wpływ wprowadzanych zmian w sterowaniu powinien być wszechstronnie przeanalizowany i skontrolowany po wdrożeniu.

W pracach modernizacyjnych algorytm sterowania powinien być uzgodniony przez wszystkie zaangażowane firmy projektowe.