

*Eugeniusz Matras\*, Ryszard Reizer\*, Wojciech Umiński\**

## MODERNIZACJA NAPĘDÓW JAZDY I ŚRUBY SKRĘTU KOPAREK SchRs 4600 W KWB „BEŁCHATÓW”. ZAŁOŻENIA I PROJEKT TECHNICZNY

---

### 1. Wstęp

Napęd jazdy koparki serii SchRs 4600 jest złożonym funkcjonalnie układem wielosilnikowym. W koparce SchRs 4600-K41 jest to 12 silników napędzających indywidualnie 8 gaśnien nieskrętnych osadzonych sztywno w głównej konstrukcji maszyny (wahacze 2 i 3) i 4 gaśniące skrętne (wahacz 1), których położenie jest zmieniane poprzez wychylenie belki skręcającej za pomocą silnika skrętu. W koparkach SchRs 4600-K42 i K43 układ jazdy składa się z 6 silników napędzających indywidualnie 2 gaśniące nieskrętne (wahacz 3) osadzonych sztywno w głównej konstrukcji maszyny i 4 gaśniące skrętne (wahacze 1 i 2), których położenie jest również zmieniane poprzez wychylenie belki skręcającej za pomocą silnika skrętu. Na rysunku 1 przedstawiono układ gaśnien obydwu typów koparek.

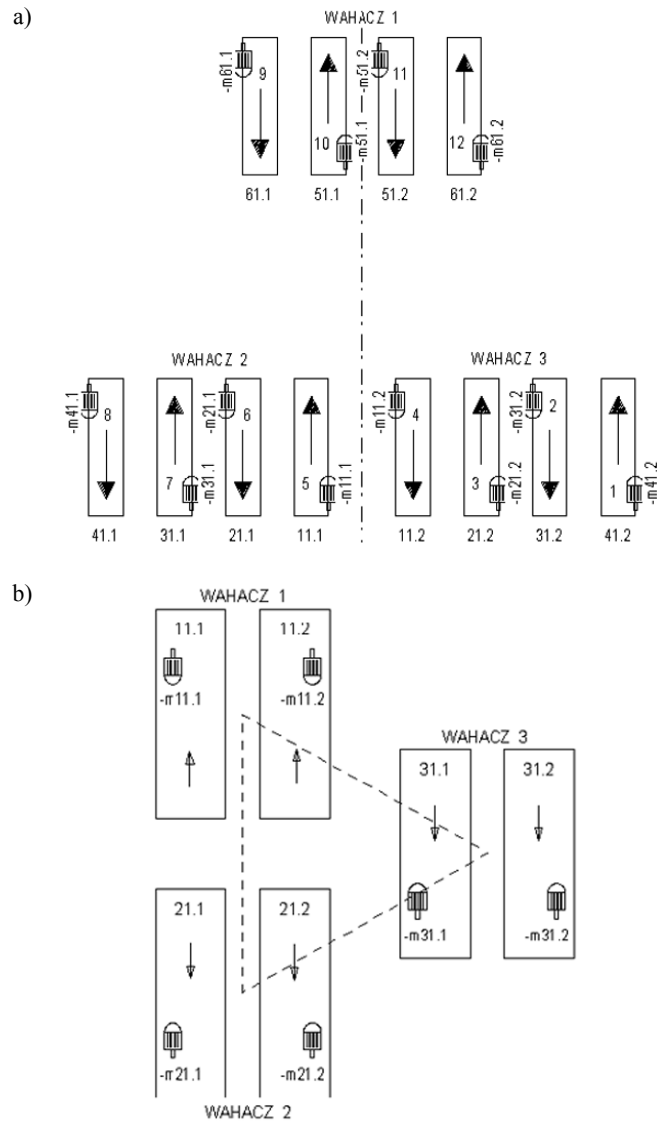
Gaśniące w wyprodukowanych w latach 70 przez niemiecką firmę Krupp koparkach serii SchRs 4600 napędzane były silnikami prądu stałego o mocy 130 kW i obrotach znamionowych 1000 [1/min]. Hamowanie elektryczne koparki, przy zjazdach po pochylni (maksymalne pochylenie 3,5°) było realizowane przy zastosowaniu tyrystorowego mostka prostownikowego przy kącie wysterowania tyrystorów równym 130°. Takie rozwiązanie wymagało zastosowania przełączenia wzbudzenia silników dla zmiany kierunku przepływu energii, tj. wytworzenia momentu hamującego.

Stosowane przed ponad 30 laty rozwiązanie ma wiele cech uniemożliwiających dalsze jego stosowanie. Do podstawowych wad, które trzeba wyeliminować w nowym rozwiązaniu należą:

- wysoka cena i duże koszty eksploatacji silników DC 130 kW/1000 obr./min,
- bardzo ograniczone możliwości manewrowe koparki i jej dynamika,
- brak możliwości zautomatyzowania sterowania i monitoringu napędu jazdy koparki według obecnych standardów.

---

\* Instytut Technologii Eksploatacji, Państwowy Instytut Badawczy, Radom



**Rys. 1.** Układ gąsienic koparek SchRs 4600, a) koparka K41, b) koparki K42 i K43

Do napędu śruby skreću stosowano silnik indukcyjny trójfazowy pierścieniowy wraz z rezystorowym obwodem rozruchowym. Przy obecnym tempie rozwoju napędowych przekształtników energoelektronicznych wszystkie takie rozwiązania można uznać za historyczne. Po kilkudziesięcioletnim okresie eksploatacji tych koparek Kopalnia Węgla Brunatnego „Belchatów” podjęła decyzję o konieczności modernizacji napędów jazdy i śruby skreću tych maszyn.

## 2. Założenia projektowe do modernizacji napędów jazdy koparek K41, K42, K43

Przy doborze parametrów zmodernizowanego układu napędowego jazdy koparki wzięto pod uwagę konieczność spełnienia następujących wymagań funkcjonalnych i technicznych:

- płynna regulacja prędkości jazdy koparki;
- indywidualny, niezależny napęd każdej gaśienicy;
- maksymalna prędkość jazdy — 10 m/min.;
- minimalny promień skrętu — 120 m;
- możliwość osiągnięcia, w sytuacjach awaryjnych, na wale silnika momentu większego od momentu nominalnego silników stosowanych dotychczas;
- możliwość jazdy koparki przy awarii jednego (koparki K42 i K43) lub dwóch napędów (koparka K41);
- możliwość wyhamowania koparki za pomocą silników przy zjeździe po pochylni;
- możliwość kontroli przekroczenia dopuszczalnej prędkości jazdy;
- rodzaj napędów — silniki asynchroniczne zasilane z przetwornic częstotliwości;
- ilość i moc napędów —  $12 \times 160$  kW (koparka K41),  $6 \times 160$  kW (koparki K42 i K43);
- zasilanie układów napędowych — 500 V, 50 Hz;
- napięcie napędów pomocniczych — 500 V, 50 Hz;
- napięcie sterownicze — 220 V, 50 Hz.

Modernizacja układu jazdy koparki dotyczyła zastąpienia silników prądu stałego napędzających gaśienice koparki przez trójfazowe asynchroniczne silniki klatkowe. Każdy z silników posiada indywidualne zasilanie z przetwornicy częstotliwości [1].

Modernizacja napędu śruby skrętu koparki dotyczyła zastąpienia silnika indukcyjnego trójfazowego pierścieniowego i jego rezystorowego obwodu rozruchowego trójfazowym asynchronicznym silnikiem klatkowym zasilanym z przetwornicy częstotliwości.

Zastosowanie przetwornic częstotliwości zapewnia:

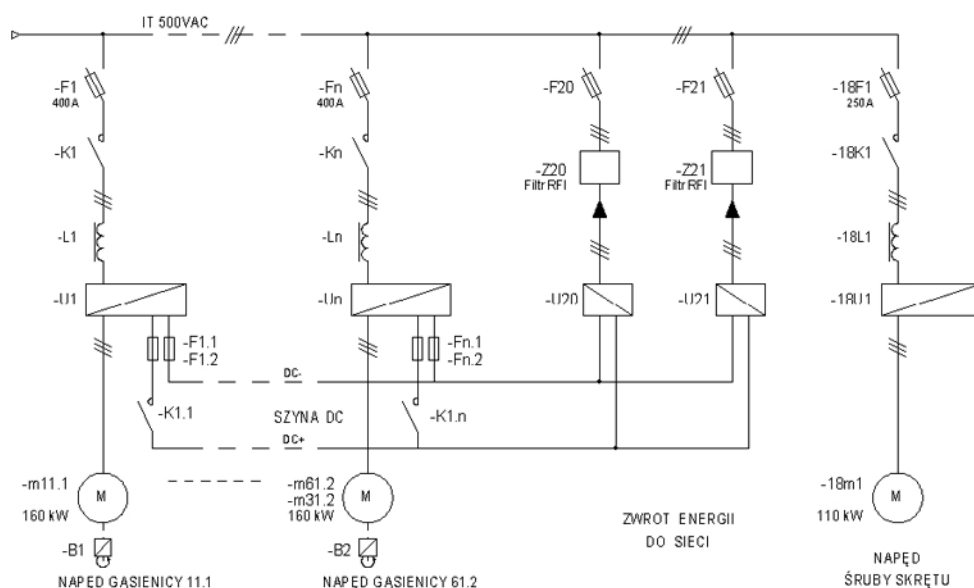
- niezależną regulację prędkości obrotowej każdego z silników i zmianę kierunku obrotów,
- optymalne dobranie prędkości liniowej każdej gaśienicy w trakcie jazdy koparki po łuku,
- utrzymywanie zadanej prędkości obrotowej z dokładnością do 1%,
- kontrolę momentu obrotowego silnika i jego prądu oraz ograniczenie ich do zadanej wartości,
- kontrolę obwodów zasilania silnika (doziemienie, zwarcie, przerwy w obwodach, przeciążenie),
- zabezpieczenie silnika przed przegrzaniem.

Projekt modernizacji napędów jazdy oraz napędu śruby skrętu koparki nie przewiduje żadnych zmian funkcjonalnych w aspekcie sterowania jazdą i skrętem koparki przez ope-

ratora, tzn. załączanie napędów oraz regulacja prędkości odbywać się będzie jak dotychczas z kabiny operatora. Kontrolę i sterowanie pracą układów jazdy oraz śruby skrętu koparki zrealizowano za pomocą sterownika PLC eliminując dotychczasowe sterowanie przekaźnikowe.

### 3. Obwody zasilania

Asynchroniczne klatkowe silniki jazdy ( $m11.1, \dots$ ) o mocy 160 kW i obrotach znamionowych 1000 [1/min] są zasilane z sieci IT o napięciu 500 V za pośrednictwem przetwornic częstotliwości (U1, Un) serii FC300 firmy Danfoss [2]. Przetwornice te mogą być przeciążane przez czas 1 min. o 150%, co umożliwia wytworzenie zwiększonego momentu napędowego i generatorowego silnika przy krótkotrwałych przeciążeniach. Potrzeba krótkotrwałego przeciążenia silników może wystąpić głównie przy przyspieszaniu i zwalnianiu koparki, oraz przy jeździe maszyny w trudnych warunkach terenowych, gdyż wtedy może wystąpić znaczący udział składowej dynamicznej momentu silnika. Rozdział mocy w obwodzie zasilania napędów jazdy został przedstawiony na rysunku 2.



**Rys. 2.** Obwód rozdziału mocy napędów jazdy i śruby skrętu koparek SchRs 4600,  
 $n$  — liczba napędów

Między przetwornicami częstotliwości zastosowano wspólny obwód DC łączący za pośrednictwem bezpieczników  $F1.1, \dots, Fn.2$  baterie kondensatorowe obwodów pośredniczących przetwornic [3]. Szyna DC+ każdej przetwornicy jest dołączana do wspólnego po-

tencjału DC+ za pośrednictwem stycznika ( $K1.1, \dots, K1.n$ ) załączanego i kontrolowanego przez sterownik PLC. Pozwala to odłączyć obwód pośredni DC przetwornicy w przypadku, gdy jest ona wyłączona w trybie pracy awaryjnej. W trakcie jazdy koparki po łuku (skręcania) obwód DC umożliwia przepływ energii z silników gaśnic wewnętrznych, pracujących w trybie generatorowym, do silników napędzających gaśnice zewnętrzne. Obwód DC jest również wykorzystywany do odzyskiwania energii w czasie zjazdu koparki po pochylni. Wszystkie silniki muszą wtedy hamować pojazd. Silniki pracują generatorowo i energia kinetyczna pojazdu jest zamieniana na energię elektryczną. Energia ta jest akumulowana w baterii kondensatorów przetwornic częstotliwości i po przetworzeniu przez urządzenie odzyskowe ( $U20, U21$ ), zamieniające napięcie stałe na napięcie przemiennie, jest oddawana do sieci zasilającej [4].

#### 4. Sterowanie jazdą koparki

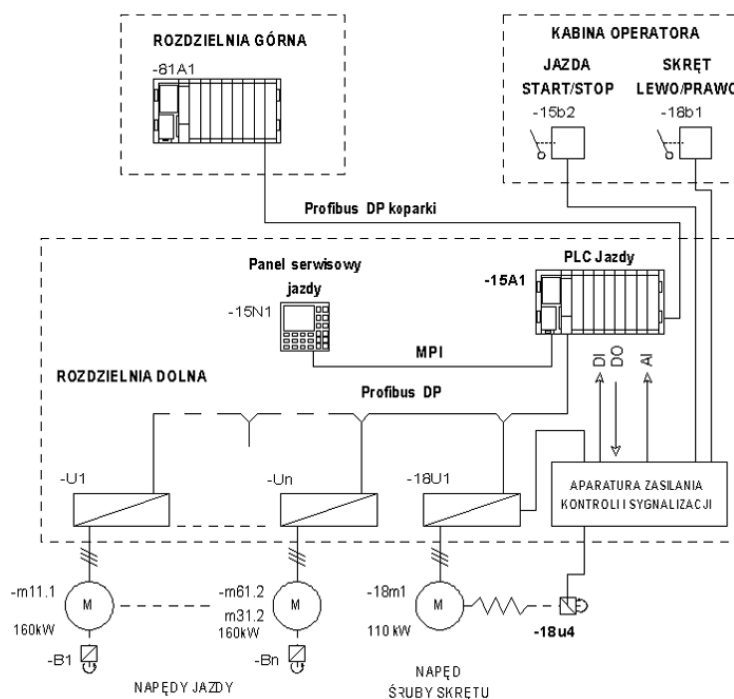
Sterowanie jazdą koparki jest zrealizowane w oparciu o sterownik **PLC Jazdy** typ Simatic S7-300 firmy SIEMENS wyposażony w jednostkę centralną CPU 315-2DP [5].

Sterownik PLC-J koparki — jako *master* — komunikuje się z przetwornicami częstotliwości silników gaśnic koparki za pośrednictwem magistrali Profibus DP dołączonej do gniazda jednostki centralnej CPU sterownika. Wymiana danych pomiędzy sterownikiem a panelem serwisowym 15N1 jest realizowana za pośrednictwem magistrali MPI dołączonej jednostki centralnej CPU sterownika. Sterownik PLC-J został dołączony za pośrednictwem modułu komunikacyjnego do istniejącej na koparce sieci obiektowej Profibus DP (akwizycja danych). Na rysunku 3 przedstawiono system sterowania napędami jazdy i skrętu koparek SchRs 4600.

Załączanie napędów oraz regulacja prędkości jazdy odbywa się za pomocą „nastawnika — zadajnika” jazdy 15b2 w kabinie operatora po spełnieniu wszystkich koniecznych warunków w układzie zasilania i sterowania jazdą koparki kontrolowanych przez sterownik PLC Jazdy. Sterownik odczytuje informację o wychyleniu dźwigni nastawnika 15b2 „w przód” lub „w tył” i wyłącza stycznik grzałek antykondensacyjnych, załącza na czas  $t_{SA}$  sygnalizację akustyczną uruchomienia jazdy koparki, załącza wentylatory silników jazdy, a po czasie  $t_{SA}$  poprzez magistralę Profibus DP załącza START przetwornic częstotliwości. Następuje uruchomienie silników jazdy z czasem rozruchu  $t_R$  zapisanym w metryczce pojazdów oraz kierunkiem wirowania i prędkością docelową wyznaczonymi przez odpowiednio znak i wartość prądu określonego przez kierunek i wielkość odchylenia od położenia zerowego dźwigni zadajnika jazdy 15b2. Sygnał prądowy jest czytany przez wejście analogowe sterownika PLC-J i poprzez magistralę Profibus DP informacja ta, jako WARTOŚĆ ZADANA prędkości, jest przesyłana do przetwornic częstotliwości. Przy jeździe na wprost WARTOŚĆ ZADANA jest jednakowa dla wszystkich napędów, natomiast przy jeździe po łuku jest ona odpowiednio różnicowana.

W trakcie rozruchu napędów jazdy sterownik PLC-J, za pośrednictwem przetwornic częstotliwości, kontroluje wartość momentu na wałach silników jazdy i po osiągnięciu

zadanego progu momentów przez wszystkie czynne silniki załącza zwalniające hamulcowe silników jazdy. Jeżeli zwalniające zostały podniesione rozruch koparki jest kontynuowany do prędkości jazdy wyznaczonej przez kąt wychylenia dźwigni zadajnika 15b2. W przypadku przeciwnym następuje zatrzymanie napędów jazdy.



Rys. 3. System sterowania napędami jazdy i skrętu koparek SchRs 4600

Prędkość jazdy koparki określana jest na podstawie aktualnych prędkości obrotowych silników wyliczonej jako średnia arytmetyczna ze wskazań enkoderów  $B1$ , ...,  $BN$  zamontowanych na wałach silników. Sterownik PLC-J poprzez moduł komunikacyjny wystawia informację o prędkości koparki w sieci Profibus DP koparki (monitoring i odczyt prędkości koparki przez operatora).

Zatrzymanie napędów następuje albo przez operatora po przesunięciu dźwigni nastawnika jazdy 15b2 do położenia zerowego albo wskutek pojawienia się sygnału blokady jazdy. Sterownik PLC-J poprzez magistralę Profibus DP załącza STOP przetwornic częstotliwości i rozpoczyna się proces hamowania silników jazdy z czasem hamowania  $t_H$  zapisanym w metryczce pojazdów. Po obniżeniu się prędkości jazdy poniżej WARTOŚCI PROGOWEJ hamowania następuje opuszczenie zwalniających, a po upływie określonego czasu od momentu zatrzymania koparki zostają wyłączone wentylatory silników jazdy i załączane grzałki antykondensacyjne.

Jeżeli prędkość jazdy koparki, kontrolowana przez sterownik PLC-J z wykorzystaniem enkoderów zamontowanych na wałach silników, osiągnie wartość NADOBROTÓW I-go STOPNIA to sterownik poprzez magistralę Profibus DP uruchamia zatrzymanie napędów jazdy przez załączenie w przetwornicach trybu SZYBKIEGO ZATRZYMANIA (QUICK STOP) i opuszczenie zwalniaików hamulcowych.

## 5. Skręt koparki i jazda „po łuku”

Załączanie napędu śruby skreću odbywa się za pomocą dźwigni skreću 18b1 w kabinie operatora po spełnieniu wszystkich niezbędnych warunków kontrolowanych przez PLC-J. Jednym z warunków jest odpowiednia minimalna prędkość jazdy koparki. Jeśli w czasie jazdy koparki prędkość przekroczy wartość  $V_{SK}$  ( $V_{SK}$  — prędkość odblokowania skreću koparki) to sterownik PLC-J automatycznie zdejmie blokadę skreću koparki.

Przy wychyleniu dźwigni 18b1 w położenie „w lewo” lub „w prawo” zostaje załączona przetwornica 18u1 i w konsekwencji silnik 18m1 z obrotami wału w kierunku „skreću w lewo” lub „skreću w prawo”. Następuje skrećanie gąsienic skrećnych do jazdy w „lewo” lub „w prawo”, aż do przesunięcia dźwigni 18b1 w położenie zerowe lub uruchomienia jednej z blokad skreću. Informacja o załączeniu skreću jest odczytywana przez sterownik PLC-J. Sterownik uruchamia algorytm wspomaganie skreću polegający na dodatkowej korekcji WARTOŚCI ZADANEJ prędkości poszczególnych gąsienic. WARTOŚĆ ZADANA prędkości jazdy, określona na podstawie kąta wychylenia dźwigni zadajnika jazdy 15b2, jest traktowana przez sterownik jako zadana prędkość środka geometrycznego pojazdów ( $WZ_K$ ).

Jeżeli sterownik PLC-J detekuje, na podstawie odczytu prądu enkodera 18u4, że jazda koparki odbywa się „po łuku” to w sterowniku zostaje uruchomiony algorytm wspomaganie jazdy polegający na korekcji WARTOŚCI ZADANEJ prędkości poszczególnych gąsienic. Wartości zadane prędkości jazdy dla poszczególnych gąsienic ( $WZ_{Gm,n}$ ) są wyliczane na podstawie następującego algorytmu:

- na podstawie odczytu położenia nakrećki śruby skreću określany jest promień skreću  $R$  i jego kierunek,
- wyliczane są promienie skreću każdej gąsienicy ( $R_{11,2}, \dots, R_{31,2}$ ),
- wartości zadane prędkości jazdy gąsienic są wyliczane z zależności  $WZ_{Gm,n} = (R_{m,n}/R) \cdot WZ_K$ .

Rozruch silnika 18m1 śruby skreću następuje z czasem rozruchu  $t_{RS}$ , zapisanym w pamięci przetwornicy 18u1, wraz z kontrolą przez przetwornicę momentu na wale silnika. Pozwala to wyeliminować powstawanie naprężeń w mechanizmie skreću koparki mogących spowodować jego uszkodzenie. Sterownik PLC-J odczytuje informację o załączeniu przetwornicy i wyłącza grzałkę antykondensacyjną silnika śruby skreću oraz załącza jego wentylator.

Pomiar promienia skrętu koparki jest realizowany za pomocą enkodera absolutnego 18u4 zamocowanego na śrubie skrętu koparki. Sygnał prądowy o zakresie  $4\div 20$  mA generowany przez enkoder, proporcjonalny do położenia nakrętki na śrubie skrętu jest odczytywany przez sterownik PLC-J. Informacja o wartości promienia skrętu jest dostępna w sieci obiektowej Profibus DP koparki.

## 6. Panel serwisowy 15N1 napędów jazdy

Informacje o stanie układu sterowania oraz wartościach parametrów związanych z jazdą i skrętem koparki są dostępne w panelu serwisowym jazdy 15N1 (Siemens OP 170B). Informacje te są dostępne na stronach wywoływanych na ekran panela za pomocą przycisków funkcyjnych.

Strona główna panela 15N1 zawiera następujące informacje:

- stan napędów jazdy (Blokada Uruchomienia, Gotowy, Jazda),
- praca awaryjna (wyłączony 1 lub 2 napędy jazdy),
- prędkość jazdy w [m/min], kierunek jazdy (przód, tył),
- promień skrętu w [m], kierunek skrętu (lewo, prawo).

Na oddzielnych stronach można odczytać informacje o parametrach stanu silników jazdy:

- prędkości obrotowej silnika [rpm],
- moment [Nm],
- prąd silnika [A],
- napięcie DC [V].
- czas rozruchu [s],
- czas hamowania [s],

oraz parametry opisujące działanie aparatury i urządzeń związanych z jazdą koparki:

- czas pracy wentylatorów silników po wyłączeniu napędów [min],
- czasy na podniesienie i opuszczenie zwalniaków hamulcowych [s],
- czas trwania sygnału ostrzegawczego [s],
- napięcie  $U_{DC}$  zezwolenia na załączenie styczników liniowych [V],
- napięcie  $U_{DC}$  zezwolenia na załączenie styczników DC [V],
- moment zezwalający na podniesienie zwalniaków [%  $N_{ZN}$ ],
- prędkość jazdy koparki na opuszczenie zwalniaków [m/min],
- prędkość jazdy koparki na zwolnienia układu kierowania [m/min].

Na stronie awarii i alarmów są wyświetlane komunikaty o aktualnych stanach awaryjnych. Komunikaty o awariach powstałych podczas postoju kasują się automatycznie po



usunięciu przyczyny, a komunikaty o awariach powodujących zatrzymanie pojazdów mogą być skasowane po usunięciu przyczyny i naciśnięciu przycisku kwitowania awarii albo przyciskami kasowania zakłóceń w kabinie operatora w części górnej koparki lub w rozdzielni dolnej. Stany awaryjne powodujące zatrzymanie pojazdów są wpisywane do historii awarii, którą można odczytać na oddzielnej stronie. Podobnie komunikaty o rodzaju alarmów i ostrzeżeń z przetwornic częstotliwości mogą być odczytane na stronie zawierającej informacje o przetwornicach.

Za pomocą panela serwisowego jazdy 15N1 może być wprowadzony tryb pracy awaryjnej jazdy koparki. Praca awaryjna (a właściwie tryb pracy awaryjnej) polega na pracy z wyłączonym 1 lub 2 napędami jazdy (dla koparek K42 i K43 z wyłączonym tylko 1 napędem). Zezwolenie na wprowadzenie do sterownika PLC-J trybu pracy awaryjnej jest możliwe po załączeniu przełącznika „BLOKADA ZMIANY PARAMETRÓW JAZDY”. Stan przełącznika jest czytany przez PLC-J. Zezwolenie jest wyłączane po wyłączeniu przełącznika lub przez sterownik po czasie 10 min od momentu załączenia tego przełącznika. Przełączenie układu jazdy koparki w ten tryb odbywa się poprzez panel operatorski 15N1 przez podanie numeru napędu wyłączonego. Sterownik sprawdza warunki, odłącza zasilanie 500 VAC wybranej przetwornicy częstotliwości poprzez wyłączenie właściwego stycznika liniowego i odłącza przetwornicę od szyny DC poprzez wyłączenie właściwego stycznika DC oraz dezaktywuje komunikację Profibus DP. Tryb pracy awaryjnej można włączyć lub wyłączyć na przypisanej temu trybowi stronie. Wyłączenie napędu następuje po wpisaniu do okienka przy symbolu przetwornicy liczby „0” i zatwierdzeniu wyboru. Ponowne załączenie wymaga wpisania liczby „1”.

## 7. Podsumowanie

Projekt i pełna dokumentacja techniczna zmodernizowanych napędów jazdy i śruby skrzętu koparek SchRs 4600 wraz z układami sterowania zostały wykonane w ITE-PIB w Radomiu i są zatwierdzone przez inwestora KWB „Bełchatów” SA do realizacji i wdrożenia, które powinno nastąpić w latach 2010–2011. Obwody sterowania jazdą i skrzętem zostały włączone, tam gdzie to jest konieczne, do obwodów sterowania i kontroli innych bloków funkcjonalnych koparki. Sterownik PLC Jazdy, poza swoim podstawowym przeznaczeniem, przejął również sygnały stanu aparatury w rozdzielni dolnej koparki przeznaczone do monitoringu w kabinie operatora koparki i w punkcie dostępowym systemu wydobywczego. Dodatkowo dla koparek K42 i K43, na wniosek inwestora, został wykonany projekt całkowitej modernizacji rozdzielni dolnej, w której jest zlokalizowana — między innymi — aparatura i urządzenie elektryczne jazdy i skrzętu koparki.

### LITERATURA

- [1] *Matras E., Reizer R., Umiński W.*: Zastosowanie nowoczesnych napędów w modernizacji maszyn. *Inżynieria & Utrzymanie Ruchu*, 10, 2006
- [2] *Danfoss*: Zalecenia projektowe dla urządzeń FC300. MG.33.B8.49-VLT.pdf

- [3] *Gospodarczyk A., Matras E., Reizer R., Umiński W.*: Znaczenie wspólnej szyny DC w wielogąsienicowych układach jazdy. *Problemy Eksploatacji*, 3, 2002, 233–238
- [4] Power-Feedback-Enit REVCON. Strona internetowa:  
[www.elmabv.nl/categorie/sales/Revcon/downloads/SVCDS%20e%2012\\_04\\_100%25\\_dutycycle.pdf](http://www.elmabv.nl/categorie/sales/Revcon/downloads/SVCDS%20e%2012_04_100%25_dutycycle.pdf)
- [5] *Matras E., Reizer R., Umiński W.*: Mikroprocesorowy system sterowania układu jazdy ciężkich maszyn roboczych. *Problemy Eksploatacji*, 3, 2003, 199–207