

ELEMENTY STEROWANIA NAPĘDAMI MECHANIZMU JAZDY PODWOZIA KOPARKI K42 KWB BEŁCHATÓW

STEERING ELEMENTS OF CHASSIS TRAVERSING GEAR DRIVE IN K42 EXCAVATOR IN BEŁCHATÓW BROWN COAL MINE

Maciej Wachowicz - Partner Serwis Sp. z o.o., Łódź

Grzegorz Drabik - Siemens Sp. z o.o., Katowice

W pracy opisano zmodernizowany napęd jazdy koparki K42 z omówieniem wybranych części algorytmu sterowania łącznie z próbą wspomaganie napędu śruby skreću. Rozważania zostały poparte i zweryfikowane wykonaniem pomiarów momentów obrotowych silników na poszczególnych napędach. W powyższych pracach wykorzystano wieloletnie doświadczenia w programowaniu przekształtników prądu zmiennego niskiego napięcia, komunikacji przemysłowej i sterowników PLC, w szczególności w sterowaniu maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego węgla brunatnego.

The text below describes modernized drive of bucket excavator K42. Chosen parts of algorithm and attempts to supporting of the turn drive are described. Considerations are supported and verified by measurements of the torques of every drive. Many years of experience in parameterization of frequency converters, programming of PLC and industrial communication in particular in control of machines for opencast mining, have been used.

Wstęp

W pierwszej połowie 2011 roku został wykonany remont koparki K42 należącej do KWB Bełchatów. Modernizacji podlegały między innymi napędy jazdy pojazdów tejże koparki. Istniejące napędy prądu stałego zostały zastąpione nowoczesnymi napędami prądu zmiennego, zbudowanymi w oparciu o przemienniki częstotliwości SINAMICS produkcji firmy Siemens.

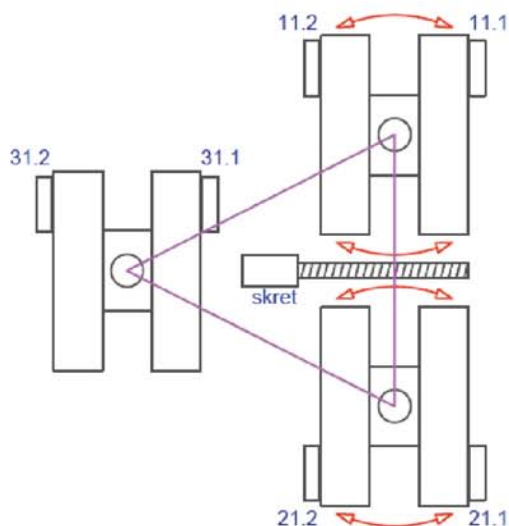
Opis układu

Układ jezdny koparki składa się z trzech wahaczy, z których każdy wyposażony jest w dwie gaśienice (rys. 1.). Jeden wahacz jest nieruchomy względem podstawy (wahacz 3), a dwa są skretne. umożliwiając w ten sposób dokonywanie manewrów

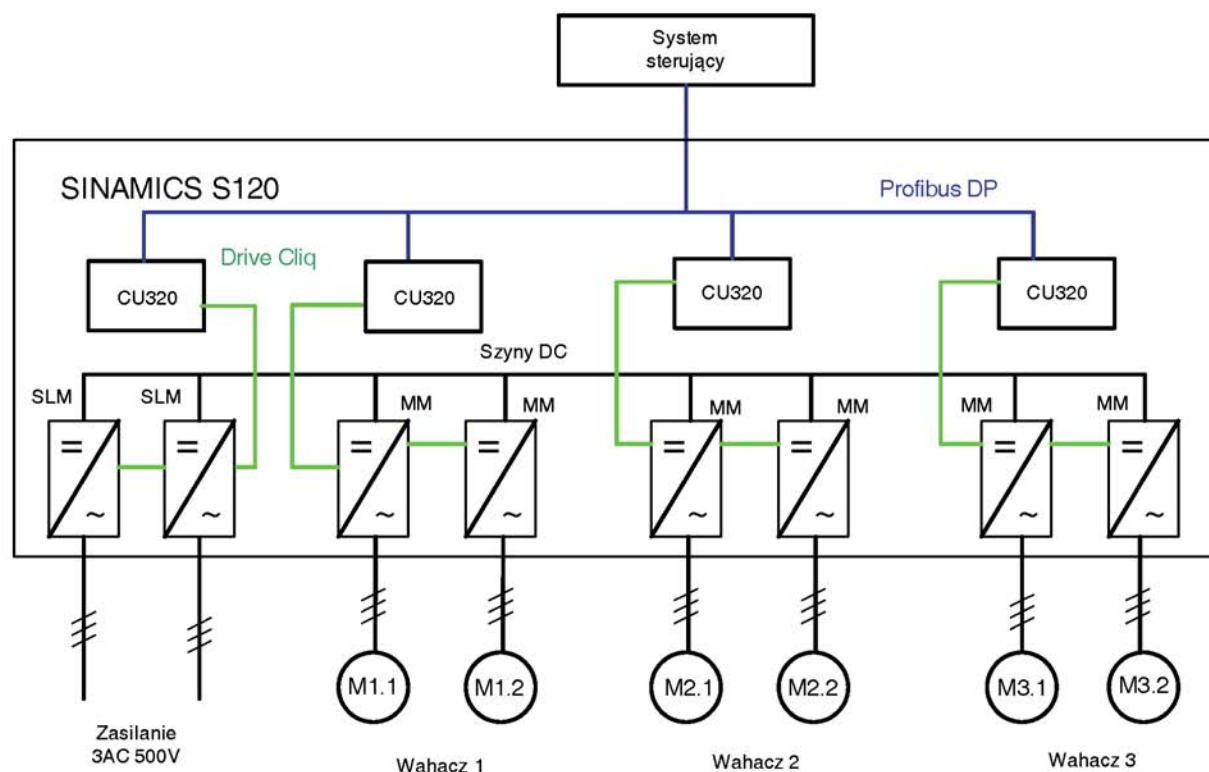
koparką podczas jazdy. Każda z gaśienic napędzana jest osobnym silnikiem. Skręt realizowany jest za pomocą śruby skreću napędzanej również asynchronicznym silnikiem klatkowym. W pierwotnym rozwiązaniu napęd śruby skreću realizowany był w oparciu o silnik pierścieniowy.

Silniki gaśienic zasilane są z przemiennika częstotliwości typu SINAMICS S120. Przemienniki tej serii zostały skonstruowane z myślą o dynamicznych i wymagających układach napędowych. Duża precyzja sterowania w połączeniu z modułową budową pozwoliła na skonfigurowanie przemiennika dokładnie spełniającego wymagania stawiane w tej aplikacji. Topologia przemiennika częstotliwości została przedstawiona na rysunku 2.

Każdy silnik zasilany jest z osobnego falownika – MM (Motor Module). Falowniki zasilane są poprzez wspólne szyny prądu stałego z dwóch równolegle połączonych prostowników – SLM (Smart Line Module). Zastosowane prostowniki posiadają możliwość zwrotu energii do sieci zasilającej – co umożliwia realizowanie hamowania elektrycznego przy jeździe w dół po pochylni bez konieczności stosowania rezystorów hamowania, które są elementami o dużych gabarytach i wydzielają znaczne ilości ciepła. Moduły SLM zbudowane są z tranzystorów IGBT. W związku z tym, że są to podzespoły w pełni sterowane, nie występuje w nich ryzyko uszkodzenia elementów mocy lub bezpieczników podczas pracy ze zwrotem energii w momencie gdy wyłączone zostaje napięcie zasilania. Zjawisko to było spotykane w starszych (tyrystorowych) konstrukcjach czterokwadrantowych prostowników. Przemiennik częstotliwości został tak dobrany, by umożliwić ciągłą pracę ze 150% obciążeniem silników. Doliczając możliwość przeciążeń (150% przez 60s w cyklu 300s) cały układ może pracować w pobliżu momentu krytycznego silników. Może to pozwolić na manewrowanie koparką nawet w najcięższych warunkach w ramach możliwości termicznych silników. Równoległe połączenie prostowników pozwala na zapewnienie odpowiedniej mocy oraz pozwala na pracę układu z pełnym obciążeniem z



Rys. 1. Układ podwozia koparki K42



Rys 2. Topologia przemiennika częstotliwości zasilającego silniki gąsienic

jednym prostownikiem.

Przemiennik częstotliwości pracuje w trybie sterowania wektorowego z pomiarem prędkości obrotowej za pomocą enkodera inkrementalnego. Algorytm ten pozwala na zachowanie bardzo dużej dokładności regulacji oraz wytwarzanie dużych momentów napędowych przy niskich prędkościach obrotowych.

Przemienniki częstotliwości SINAMICS S120 posiadają wydzieloną jednostkę sterowania (CU320) umożliwiającą sterowanie kilkoma falownikami i prostownikami. W przedstawionym rozwiązaniu jedna jednostka steruje parą gąsienic na jednym wahaczu. Takie rozwiązanie pozwoliło na bardzo szybkie i dokładne sterowanie każdą parą gąsienic, tak aby dążyć do wyrównywania momentów na silnikach. Algorytmy związane z wyrównywaniem momentów realizowane są w jednostce sterującej bez konieczności angażowania nadrzędnego sterownika. Jednostki CU320 są w stanie dużo szybciej reagować na zmiany parametrów napędowych niż robiłby to sterownik nadrzędny. Jednostki CU320 połączone są z modułami mocy poprzez szybki (100 Mbit/s) dedykowany protokół Driver Cliq.

Układ jazdy sterowany jest z nadrzędnego sterownika, który przekazuje do napędów min. wartości zadane prędkości.

Napęd śruby skřętu zrealizowany został na osobnym przemienniku tego samego typu (SINAMICS S120). Dla śruby, ze względu na brak konieczności hamowania elektrycznego (śruba skřętu jest samohamowna), zastosowano prostownik bez zwrotu energii do sieci: typu BLM (Basic Line Module). Ze względu na brak potrzeby dokładnej regulacji prędkości obrotowej zrezygnowano z pomiaru prędkości za pomocą enkodera inkrementalnego. Zastosowanie przemiennika częstotliwości pozwoliło na pomiar i ograniczenie momentu napędowego silnika śruby oraz umożliwia wykonywanie algorytmów wspo-

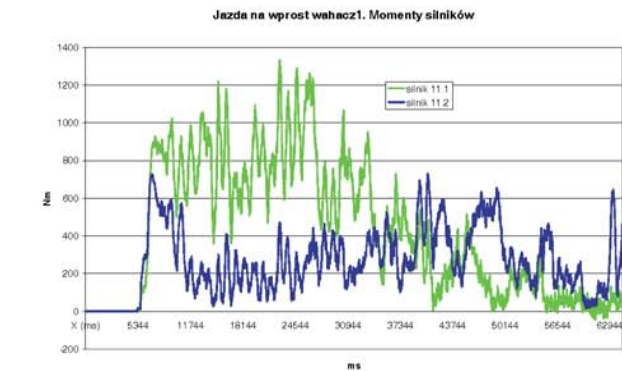
magających skřęt.

Prędkości zadane jazdy obliczane są przez nadrzędny sterownik kontrolujący jazdę koparki, a w przypadku jazdy w skřęcie prędkości dla poszczególnych silników przeliczane są na podstawie pomiaru kąta skřętu gąsienic. W celu zabezpieczenia układów mechanicznych napędu jazdy wprowadzono ograniczenia momentów napędowych, których kontrolą zajmuje się również sterownik nadrzędny.

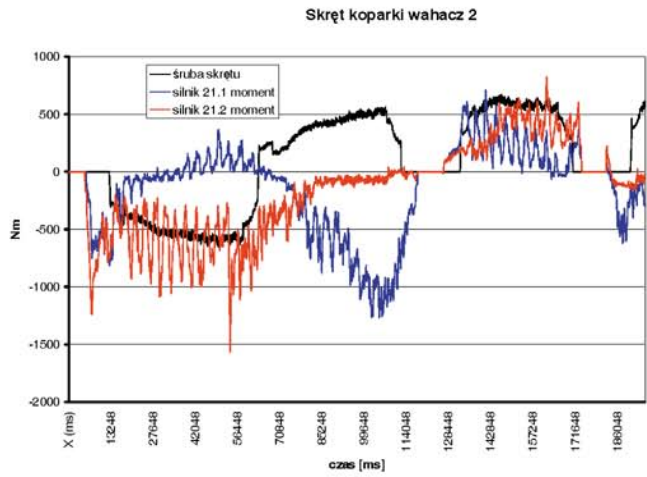
Badania i regulacje

Przy zastosowanym trybie sterownia przekształtnik częstotliwości regulujący prędkość obrotową silników napędowych dąży do uzyskania jak najmniejszego uchybu między wartościami prędkości zadanej oraz prędkości aktualnej. Powoduje to bardzo duże „uszywnienie” układu i pozbawia silnik naturalnej charakterystyki jaką posiada będąc zasilany z sieci. Tak sztywny układ napędowy w połączeniu charakterystyką mechaniczną koparki (sprężenie przez podłoże, luz w układzie) powodował, że gąsienice nie obciążały się równomiernie. Niektóre gąsienice przejmowały rolę napędową podczas gdy inne z kolei hamowały lub były wleczone. Role te są przyjmowane w zależności od podłoża po którym porusza się dana gąsienica, nachylenia terenu, wstępnego napięcia gąsienicy, kierunku jazdy i innych czynników, których charakter może być losowy. Najgorsze przypadki to te, w których na jednym wahaczu jedna z gąsienic napędza a druga hamuje. Prowadzi to do powstawania naprężeń w układzie mechanicznym oraz może powodować przeskok gwiazdy napędzającej gąsienice.

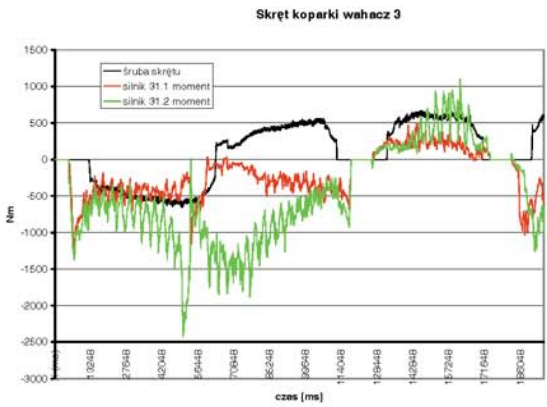
Na rysunku 3 przedstawione zostały przykładowe wykresy momentu napędowego silników gąsienic dla jazdy na wprost, podczas gdy na rysunku 4 przedstawiono momenty silników gąsienic przy jeździe w skřęcie. Pomiary wykonano wykorzystując funkcję „trace” w przemiennikach SINAMICS S120. Funkcja ta



Rys 3. Wykres momentów silników gąsienic – jazda na wprost

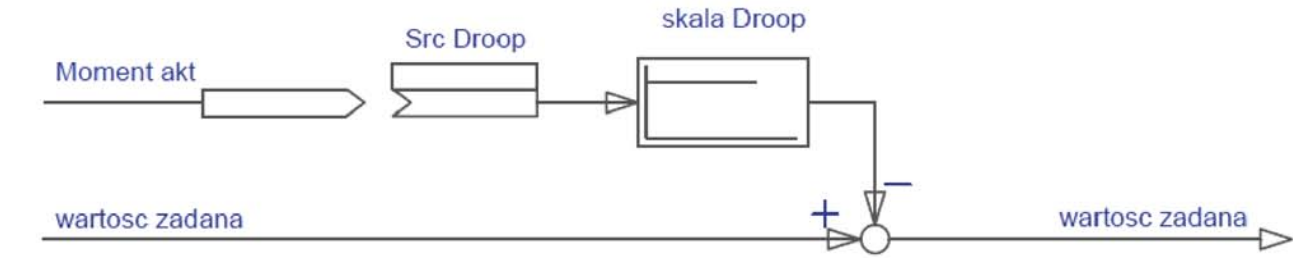


Rys 4. Wykres momentów silników gąsienic – jazda w skrajnie



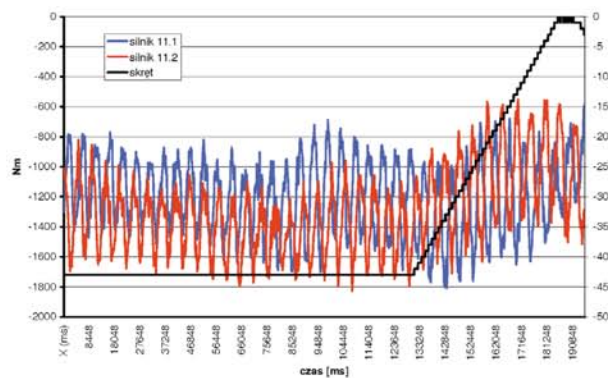
umożliwia rejestrację kilkudziesięciu parametrów napędu. Jak widać z przykładowych wykresów sytuacja jest dużo gorsza podczas jazdy w skrajnie, kiedy to może dochodzić do obciążania się silników jednej pary gąsienic momentami przeciwnymi. Na rysunku 4 przedstawiono dodatkowo wykres, moment silnika śruby skrętu dla zobrazowania, w którym momencie następuje skręt (dodatnia i ujemna wartość momentu, to skręt w przeciwnie strony). Aby wyeliminować nadmierną sztywność napędu zdecydowano o zastosowaniu funkcji *Droop*, która w zależności od wielkości momentu napędowego wytwarzanego na wale silnika wprowadza stosowną korektę w torze wartości zadanej w algorytmie regulacji prędkości zadanej silnika. W zależności od wielkości współczynnika regulującego wpływ tej funkcji na wartość zadaną obserwowano różne zachowania się poszczególnych układów napędowych zarówno w parach, jak i dla

wszystkich 6-ciu gąsienic. Pożądane efekty uzyskano dopiero przy zastosowaniu dość wysokiej wartości współczynnika. Zastosowanie funkcji *Droop* pozwoliło również na zmniejszenie uderzeń momentu napędowego podczas przełamywania płyt gąsienic. Efekt zmniejszania uderzeń momentu był wyraźnie widoczny. Po zastosowaniu funkcji „Droop” układ dalej wykazywał (choć w mniejszym stopniu) w pewnych sytuacjach tendencje do obciążania gąsienic momentami o przeciwnych wartościach. Wprowadzenie dodatkowej funkcji, zwiększającej prędkość nieobciążonych gąsienic pozwolił na wyeliminowanie tego niekorzystnego zjawiska. Na rysunku 5 przedstawiony został wykres momentów silników gąsienic podczas jazdy w skrajnie. Na rysunku tym przedstawiono dodatkowo (kolorem czarnym) wartość proporcjonalną do kąta skrętu wahaczy skrętnych. Wartość 0 odpowiada zerowemu kątowi skrętu.

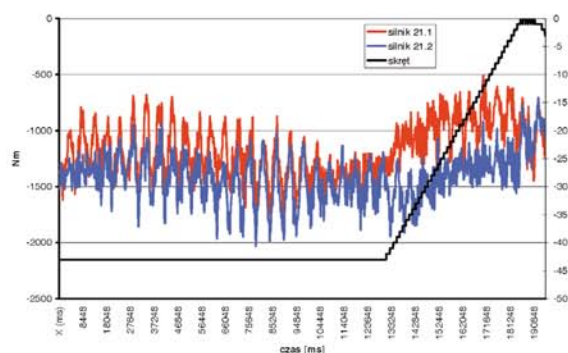


Rys 4. Schemat działania funkcji *Droop*

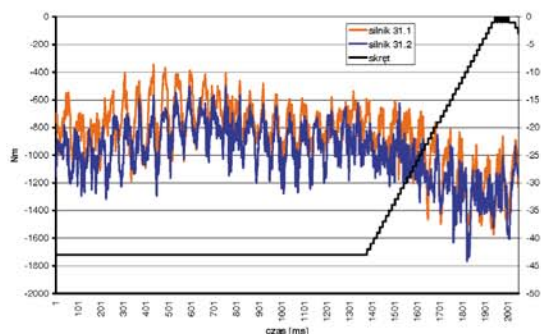
Skret koparki wahacz 1



Skret koparki wahacz 2



Skret koparki wahacz 3

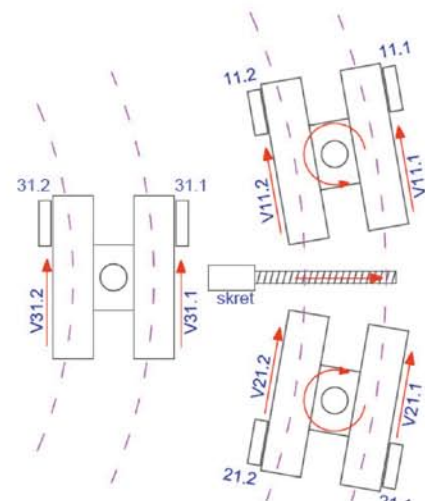


Rys 5. Wykres momentów silników gąsienic – jazda w skręcie po zastosowaniu funkcji „droop” oraz mechanizmu dopędzania nieobciążonych gąsienic.

Przeprowadzono kilka prób mających na celu zmniejszenie występujących obciążeń na śrubie skrętu, podczas których wykonano różne modyfikacje prędkości zadanej gąsienic. Algorytm sterowania jazdą koparki realizowany w sterowniku nadrzędnym zakładał różnicowanie prędkości gąsienic w zależności od kąta skrętu, czyli od wielkości łuku po którym w danej chwili porusza się koparka. Sytuacja ta jest zobrazowana na rysunku 6, na którym zaznaczone są trajektorie gąsienic. Jak widać dla jazdy po łuku dla poszczególnych gąsienic wyznaczone są 4 różne prędkości jazdy zależnie od położenia gąsienicy. Takie zróżnicowanie prędkości wspomaga jazdę po łuku, natomiast przeciwdziała pogłębianiu skrętu dla tylnego względem kierunku jazdy wahacza skrętnego.

Na wstępie dla zrealizowania wspomaganie skrętu zdecydowano się na modyfikację wartości zadanych prędkości dla gąsienic podwozi skrętnych adekwatnie do kierunku jazdy koparki oraz kierunku wykonywania skrętu, czyli kierunku

kierunek jazdy



Rys 6. Schemat jazdy w skręcie - różnicowanie prędkości

pracy śruby skrętu. Należy zauważyć, że w przypadku pogłębiania skrętu różnicowanie prędkości powoduje, iż podwozie skrętne znajdujące się z tyłu względem kierunku jazdy, ma tendencję do skrętu w przeciwnym kierunku do tego, który jest realizowany przez śrubę skrętu. Zmiana proporcji prędkości gąsienicy „zewnątrznej” i „wewnętrznej” lub wręcz zamiana wartości zadanych dla tych gąsienic w mniejszym lub większym stopniu powinna wspomagać wykonanie skrętu. Wstępne pomiary i obserwacje, w tym obserwacje momentu aktualnego napędu śruby skrętu, wykazały jednak, iż zastosowanie tego rodzaju algorytmu prowadzi do powstania większych naprężeń w konstrukcji podwozia. Z uwagi na ograniczoną ilość czasu oraz ograniczoną dostępność koparki zrezygnowano z dalszych prób i zrezygnowano z wyżej opisanych algorytmów wspomaganie skrętu.

Wnioski

Układ napędowy jazdy koparki węgla brunatnego, pomimo iż wygląda na niezależny jeśli chodzi o sprzężenia mechaniczne pomiędzy poszczególnymi silnikami, wykazuje wiele cech układu, w którym dwa napędy są sprzęgnięte sztywno. Sprzężenie takie uwidacznia się nie tylko pomiędzy parami gąsienic jednego podwozia, ale również występuje pomiędzy różnymi podwoziami. Sprzężenie to daje efekt „przeciągania się” gąsienic i w przypadku stosowania tak sztywnego i dynamicznego układu regulatora prędkości ze sprzężeniem zwrotnym powoduje duże naprężenia mechaniczne zarówno w segmentach gąsienic jak i w konstrukcji podwozia. Efekt ten można niwelować poprzez „zmiękczenie” sztywnej charakterystyki nadanej przez napęd przekształtnikowy z enkoderem za pomocą funkcji *Droop*. Dodatkowe poprawienie działania układu napędowego jazdy uzyskuje się poprzez nieznaczne zwiększanie prędkości napędów gąsienic, które wykazują najmniejsze obciążenie.

Z uwagi na ograniczony czas prób wykonano jedynie wstępne próby wspomaganie napędu śruby przy skręcie odpowiednim sterowaniem napędów wahaczy, co spowodowało zwiększanie naprężeń w konstrukcji podwozia. Na wykonanie prób należałoby poświęcić więcej czasu. Zastosowanie przemiennika pozwala jednak kontrolować i mierzyć moment silnika śruby skrętu.