

Nowoczesne napędy falownikowe dźwignic

Eugeniusz Grabowski, Andrzej Morawski

Napęd rozumiany jako źródło mocy mechanicznej w dowolnej maszynie czy urządzeniu jest częścią jego układu napędowego, zawierającego zawsze jeszcze pewien określony mechanizm (zespół przeniesienia mocy), którego człon końcowy (wykonawczy) jest odbiornikiem tejże mocy. W dźwignicach najbardziej rozpowszechnione są napędy elektryczne, wśród których za najnowocześniejsze (i najszybciej rozwijane) niewątpliwie należy uznać napędy z tzw. przemiennikami częstotliwości, zwane dalej skrótowo napędami falownikowymi. Możliwości i osiągalne charakterystyki tych napędów w wielu przypadkach pozwalają znacznie uprościć strukturę układów napędowych i sterowania dźwignic, w tym także konstrukcyjne rozwiązania mechanicznych elementów i zespołów przeniesienia mocy (mechanizmów) do ich końcowych członów wykonawczych (odbiorników mocy).

Specyfika napędów dźwignicowych

Wynika ona przede wszystkim ze znamiennej dla dźwignic pracy przerywanej o bardzo zróżnicowanej intensywności (zarówno pod względem wielkości, jak i częstości występowania zewnętrznych obciążeń o charakterze losowym), zależnej od klasy (grupy natężenia pracy) dźwignicy oraz od rodzaju napędzanego mechanizmu. Z przerywaną pracą dźwignic nieodłącznie związane jest częste zwiększanie i zmniejszanie energii kinetycznej ich mas własnych oraz transportowanych ładunków (okresy nieustalonych ruchów roboczych – rozruchy i hamowania występujące wielokrotnie w każdym cyklu transportowym), co zwłaszcza w dźwi-

gnicach należących do najwyższych klas (grup natężenia pracy) decyduje o dynamice ich napędów, wymagającej odpowiednich metod i rozwiązań układów sterowania.

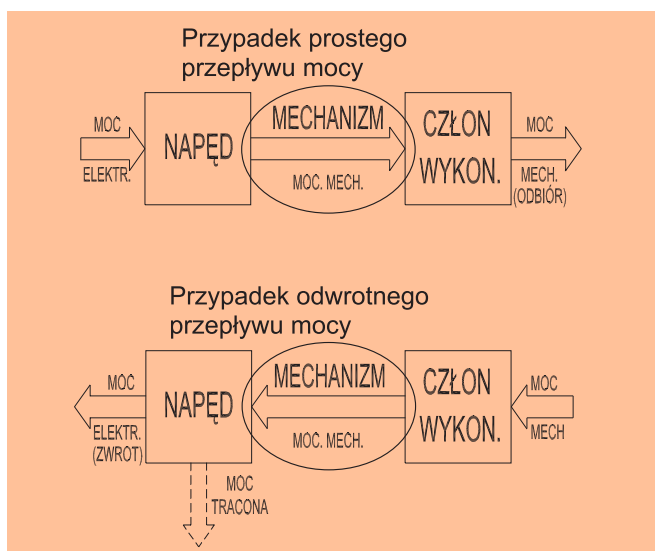
Specyfika ta jest także determinowana podstawowymi cechami konstrukcyjnymi poszczególnych mechanizmów dźwignic, z którymi napędy są zwykle nierozłącznie związane za pośrednictwem elementów o sztywności niezależnej od kierunku przepływu mocy (w mechanizmach jazdy, obrotu czy zmiany wysięgu) lub są związane poprzez elementy będące w tym znaczeniu jednokierunkowo sztywne (ciągnia linowe i łańcuchowe w mechanizmach podnoszenia). Dlatego w mechanizmach dźwignic możliwy jest odwrotny przepływ mocy (rys.1), nie tylko w okresach ich hamowania, ale także w przypadkach, gdy na końcowe człony wykonawcze tych mechanizmów działają obciążenia mogące powodować ich ruch (siły ciężkości przenoszonych ładunków i poruszanych części dźwignic, siły parcia wiatru itp.).

W warunkach działania zarówno biernych, jak i czynnych obciążeń końcowych członów mechanizmów dźwignic ich napędy muszą umożliwiać:

- przeprowadzanie rozruchów i hamowań tych mechanizmów pod pełnym obciążeniem;
- dokonywanie w szerokim zakresie zmian prędkości ruchów roboczych (poprzez realizację tzw. stałomomentowej oraz stałomocowej regulacji – korzystnej z punktu widzenia sprawności mechanicznych podzespołów przeniesienia napędu i ogólnej efektywności wykorzystania energii przez dźwignicę o określonej wydajności);
- łatwą zmianę kierunku ruchów roboczych dźwignic (rewersyjność pracy napędów), a także muszą nadawać się do współpracy w zautomatyzowanych systemach sterowania dźwignic zapewniających pozycjonowanie ich końcowych członów wykonawczych (regulacja położenia) i szybkie wygaszanie wahań ładunków zawieszonych naciągach.

Ponadto napędy dźwignicowe muszą charakteryzować się wysoką niezawodnością pracy w warunkach działania różnych czynników zewnętrznych, począwszy od skrajnie zmiennych temperatur otoczenia, poprzez wilgoć i korozję, aż do atmosfery zagrażającej wybuchem (w przypadku dźwignic w wykonaniu przeciwybuchowym).

Wśród napędów dźwignicowych napędy mechanizmów podnoszenia wyróżniają się pod względem stawianych im wymagań dotyczących głębokości regulacji prędkości i położenia oraz przeprowadzania rozruchów w warunkach działania czynnych obciążeń (dążących do zmiany kierunku zamierzonego ruchu, jak to ma miejsce w przypadku rozruchu podnoszenia ładunku uprzednio już uniesionego), w sposób wykluczający możliwość nawet chwilowego



Rys.1 Przypadki prostego i odwrotnego przepływu mocy w mechanizmach dźwignic

odwrócenia kierunku przepływu mocy (chwilowe opadnięcie ładunku przy rozruchu jego podnoszenia). Występuje tu problem, różnie rozwiązywany w praktyce, przejścia przez silnik w początkowej fazie rozruchu momentu od ciężaru podnoszonego ładunku, obciążającego hamulec mechaniczny przed jego zlurowaniem.

W napędach mechanizmów jazdy zwłaszcza dźwignice o dużych rozpiętościach ustrojów nośnych (suwnice pomostowe i bramowe z indywidualnymi napędami każdej z czołownic czy podpór) oprócz regulacji prędkości i położenia istnieje potrzeba kontroli momentu celem zapobieżenia poślizgowi kół odciążonej strony podczas rozruchu.

Krótką charakterystyka współczesnych napędów falownikowych

Typowy napęd falownikowy składa się z silnika indukcyjnego klatkowego oraz przemiennika częstotliwości. Silnik klatkowy to najprostszy powszechnie stosowany przetwornik energii elektrycznej na mechaniczną (i odwrotnie), którego regulacja prędkości obrotowej oparta jest na zastosowaniu źródła energii elektrycznej prądu przemiennego o zmiennej częstotliwości. Takim źródłem jest obecnie powszechnie stosowany pośredni przemiennik częstotliwości, złożony z prostownika, zasilanego z dostępnej sieci prądu przemiennego, pośredniego obwodu prądu stałego i falownika. Falownik kształtuje przebieg napięcia i prądu o regulowanej amplitudzie, częstotliwości i fazie.

Silnik klatkowy zasilany z takiego źródła energii nabiera nowych cech użytkowych, charakterystyki mechaniczne silnika są kształtowane przez układ sterowania przemiennika w obszarze warunków dopuszczalnych dla silnika, tj. wartości napięcia, prądu, mocy, energii cieplnej, momentu mechanicznego i prędkości maksymalnej. Właściwości dynamiczne napędu są zależne od sposobu kształtowania zjawisk elektromagnetycznych w silniku, a przede wszystkim od sterowania jego momentem elektromagnetycznym.

Początkowo falowniki budowane w latach siedemdziesiątych ub. wieku umożliwiały jedynie zmianę amplitudy i częstotliwości napięcia wyjściowego, bez możliwości kontrolowania stanów przejściowych w napędzie. Wraz z rozwojem energoelektroniki i wprowadzeniem falowników tranzystorowych tak zwane sterowanie skalarnie tych falowników zostało zastąpione przez sterowanie wektorowe. Falowniki z modulacją szerokości impulsów (ang. PWM)

i tzw. sterowaniem wektorowym, wprowadzone do powszechnego użytku w latach osiemdziesiątych ubiegłego wieku, regulują strumień magnetyczny w silniku oraz moment mechaniczny na jego wale, co zbliża właściwości takiego napędu do napędu z silnikiem prądu stałego, uznawanego za wzorcowy pod względem wspomnianych możliwości regulacyjnych.

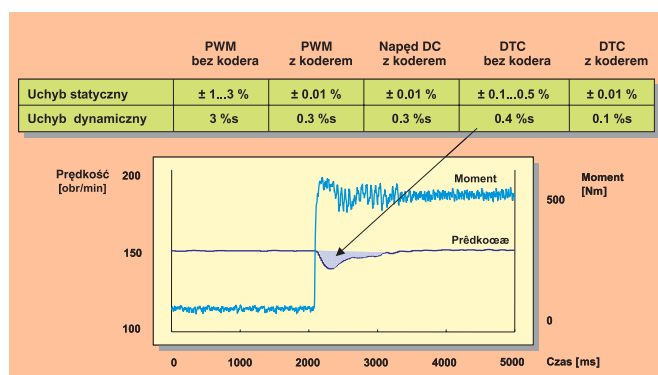
Wprowadzona w połowie lat dziewięćdziesiątych technika bezpośredniego sterowania momentem w napędach falownikowych DTC (ang. Direct Torque Control) udoskonaliła sterowanie wektorowe silnikiem klatkowym, zwiększając dynamikę napędu i dokładność regulacji momentu oraz prędkości także w układzie bez sprzężeń zwrotnych od wału silnika. W zaawansowanych rozwiązaniach układ sterowania przemiennika DTC przeprowadza identyfikację parametrów silnika oraz maszyny roboczej w trakcie pracy i steruje precyzyjnie silnikiem, optymalnie wykorzystując możliwości maszyny. Porównanie dokładności statycznej i dynamicznej regulacji prędkości napędu ze sterowaniem wektorowym (PWM), napędu prądu stałego (DC) oraz napędu ze sterowaniem DTC bez - i ze sprzężeniem prędkościowym (bez koderem i z koderem), przedstawione jest na rys. 2 udostępnionym przez ABB.

W porównaniu tym wyraźnie uwidoczniają się zalety napędów falownikowych z najnowszymi technikami sterowania wektorowego, przede wszystkim z techniką DTC. Przy porównywalnej jakości regulacji z napędami prądu stałego, napęd falownikowy zawiera znacznie prostszy, tańszy, praktycznie nie wymagający konserwacji silnik klatkowy mogący pracować bez dodatkowych sprzężeń w typowym zakresie regulacji prędkości.

Przemienniki częstotliwości są obecnie budowane jako autonomiczne układy przetwarzania energii, wyposażone w złożone układy sterowania o bogatych funkcjach automatyki (często z możliwością swobodnego programowania typu PLC), układy zwrotu energii do oporników hamowania lub do sieci zasilającej, układy sterowania hamulcami mechanicznymi, dławiki i filtry ograniczające szkodliwe oddziaływanie elektryczne i elektromagnetyczne, układy komunikacji z innymi falownikami i urządzeniami automatyki w wielu typowych standardach przemysłowych. Zależnie od wykonania, przemienniki umożliwiają pracę dwu- lub cztero-kwadrantową napędów.

Różnice pomiędzy produkowanymi przemiennikami o określonym przeznaczeniu polegają głównie na specjalnym oprogramowaniu w przemienniku i przystosowaniu układów wejść i wyjść do specyficznych dla danego zastosowania sprzężeń.

Napędy falownikowe zwykle są przystosowane do różnych połączeń w układach sterowania, które mogą zapewniać np. koordynację ruchów z odpowiednimi wówczas funkcjami zabezpieczenia (np. przed nadmiernym wahaniami podwieszonoego ładunku czy omijaniem zakazanych obszarów pracy), oraz wielokrotnego automatycznego powrotu do zadanych pozycji. Układ regulacji prędkości w trakcie rozruchu i hamowania może realizować różne krzywe typu „S”, dobierane indywidualnie dla danego napędu. Kształt zadanej krzywej zmiany prędkości w czasie tzw. rampy, decyduje o wartościach wyższych pochodnych położenia po czasie w trakcie ruchu (ograniczenie war-



Rys. 2 Porównanie jakości regulacji prędkości w napędach o różnym sterowaniu

tości przyspieszeń wyższego rzędu), które mają znaczenie dla obciążeń dynamicznych w mechanicznym układzie przeniesienia napędu i sił bezwładności poruszanych mas.

Możliwości zastosowań napędów falownikowych w dźwignicach

Przedstawione powyżej właściwości i możliwości regulacyjne napędów falownikowych z pewnością nie ograniczają zakresu możliwych zastosowań w napędach dźwignic i pozwalają znacząco podnieść ich parametry techniczno-eksploatacyjne.

Przy ciągłej regulacji prędkości i położenia wykonawczych członów dźwignic wyraźnie zmniejszone (lub wręcz wyeliminowane) zostają ich obciążenia dynamiczne, które występują przy skokowej regulacji prędkości tradycyjnych napędów mechanizmów dźwignic z asynchronicznymi silnikami pierścieniowymi. Także do niezbędnego minimum zostaje sprowadzona liczba dodatkowych włączników falownikowych napędów tych mechanizmów przy pozycjonowaniu dźwignic w poszczególnych cyklach transportowych (niższa, korzystniejsza klasa pozycjonowania dźwignicy wg norm PN-ISO –4301:1998 i prEN 13001-3:1998), co w połączeniu z możliwościami zwiększania prędkości ruchów roboczych nieobciążonych dźwignic w tych cyklach pozwala znacznie skrócić ich czasy, a więc znacznie zwiększyć wydajność dźwignic.

We wszystkich przypadkach odwrotnego (rys.1) przepływu mocy (hamowania zatrzymującego lub wstrzymującego w ruchu ustalonym) w mechanizmach dźwignic ich falownikowe napędy – realizujące hamowanie elektryczne (praca generatorowa) – umożliwiają zamianę energii kinetycznej hamowanych mas i pracy zewnętrznych sił czynnych na energię elektryczną, która może być zwracana do zewnętrznej sieci (po odpowiednim „oczyszczeniu”) lub być wykorzystywana w wewnętrznej instalacji elektrycznej dźwignicy do zasilania napędów falownikowych jej innych mechanizmów (np. wykorzystanie zmiany energii potencjalnej opuszczanego ładunku przy zasilaniu napędu mechanizmu obrotu żurawia).

W porównaniu z silnikami pierścieniowymi ze skokową regulacją prędkości, silniki klatkowe w falownikowych napędach mechanizmów dźwignic o niezbyt dużym stopniu trudności rozruchu (mech. podnoszenia i jazdy wciągarek) i średnio intensywnej eksploatacji (umiarkowanej liczbie włączeń na godzinę) mogą być dobierane bez specjalnie większego zapasu mocy na nagrzewanie się, dzięki wspomnianemu ograniczeniu liczby dodatkowych włączeń (przy ciągłej regulacji prędkości) i pod warunkiem właściwego określenia wymaganej mocy napędu odpowiednio do przewidywanych cykli zmian prędkości i obciążeń. Także w przypadkach mechanizmów dźwignic o dużym stopniu trudności rozruchu (mech. jazdy ciężkich suwnic pomostowych, bramowych i żurawi, mechanizmy obrotu i zmiany wysięgu żurawi portowych) i dużej liczbie włączeń na godzinę ich napędy falownikowe mogą mieć silniki klatkowe z obcym chłodzeniem (odpowiednio dobrane i obliczeniowo sprawdzone na granie) tej samej mocy co silniki pierścieniowe.

Mniejsze niż w silnikach pierścieniowych oraz silnikach prądu stałego momenty rozruchowe w napędach falownikowych

(ograniczone do 150-200% momentu znamionowego) są w pełni kontrolowane podczas rozruchów, dzięki czemu nie powodują wydłużenia ich czasów mogących wpływać na czasy cykli roboczych, a więc i na wydajność dźwignicy. Wspomniany zysk czasowy wynika ze zminimalizowania liczby dodatkowych włączeń napędów falownikowych w tych cyklach, pozwala również kompensować wpływ dużego pochylenia odpowiednich odcinków rampy częstotliwościowej falownika (ukształtowanej w trójkąt). Występujące wówczas obciążenie cieplne silnika klatkowego wymaga jednak zapewnienia mu obcego chłodzenia. Jedynie w przypadkach potrzeb rozwijania przez silnik momentów przekraczających od 1,5 do 2 razy momenty ruchu ustalonego uzasadnione jest dobieranie napędu falownikowego o większej mocy, która przy danych prędkościach zapewni uzyskanie odpowiednio dużych momentów na wale silnika klatkowego.

W dźwignicach portowych, tj. żurawiach hakowych i chwytakowych, mostowcach przeładunkowych, chwytakowych suwnicach nabrzeżnych, o znacznych udźwigach, dużych prędkościach ruchów roboczych i wysokościach podnoszenia, napędy falownikowe z odpowiednio ukształtowanymi rampami częstotliwościowymi, wyposażone w odpowiednie moduły przetwarzania energii i sterowania w funkcji położenia wybranych członów mechanizmów, umożliwiają szybkie wygaszanie wahań ładunku wiszącego na długich ciągnach oraz wspomniane już wykorzystanie zmian jego (i innych mas własnych dźwignicy) energii kinetycznej i potencjalnej do zasilania napędów innych mechanizmów.

W zautomatyzowanych dźwignicach (np. kontenerowe suwnice nabrzeżne, bramowe stertujące, układnice magazynowe) napędy z silnikami prądu stałego mogą z powodzeniem być zastąpione przez współczesne napędy falownikowe, które przy odpowiednim wyposażeniu i skonfigurowaniu zapewniają uproszczenie układów sterowania dźwignic, dzięki możliwości realizacji wielu ich funkcji (regulacja prędkości i położenia) na poziomie przemienników częstotliwości szeroko obecnie przystosowanych do współpracy z różnego rodzaju sterownikami PLC odpowiednio oprogramowanymi.

W różnego rodzaju wyciągach pionowych (dźwigach osobowych i towarowych) o dużych prędkościach i udźwigach napędy z silnikami prądu stałego są wypierane przez napędy falownikowe z odpowiednimi modułami sterowania i czujnikami położenia końcowego członu mechanizmu podnoszenia kabiny, zapewniające wymaganą głębokość regulacji jej prędkości, przyspieszeń i opóźnień oraz dokładność pozycjonowania.

Także w akumulatorowych wózkach podnośnikowych o średnich udźwigach do 5t napędy falownikowe jazdy i hydraulicznego układu podnoszenia wideł okazują się być bardziej efektywne od napędów z silnikami prądu stałego pod względem energochłonności (wielkości zużycia energii elektrycznej) na cykl transportowy przy jednoczesnym zwiększeniu prędkości ruchów roboczych (tym samym skróceniu czasów cykli transportowych, a więc zwiększeniu wydajności) i zwiększeniu żywotności baterii akumulatorowych oraz oczywiście obniżeniu kosztów eksploatacji i konserwacji (silniki klatkowe nie mają komutatów i szczotek).

Falownikowe napędy ze sterowaniem wektorowym i odpowiednim wyposażeniem mogą obecnie spełnić praktycznie wszystkie, wcześniej omówione wymagania wynikające ze specyfiki budowy i pracy różnych mechanizmów dźwignic, przy czym napędy falownikowe oparte na technice sterowania DTC bez sprzężeń zwrotnych (bez koderów) umożliwiają w wielu przypadkach uproszczenie odpowiednich instalacji na dźwignicy, zapewniając dokładność regulacji porównywalną z uzyskiwaną w falownikowych napędach wektorowych z koderami (rys. 2).

Dobór wersji wykonania napędu

Dobór zalecanej wersji wykonania i sterowania przemiennika wynika z funkcji napędu. Dla napędów jazdy suwnic pomostowych i bramowych o dużych rozpiętościach najwłaściwsze jest sterowanie wektorowe z możliwością koordynacji ruchu poszczególnych napędów. Zależnie od wymaganej dynamiki, sterowanie wektorowe lub DTC umożliwia także skrócenie czasu cykli transportowych dźwignic, w których ruchy powrotne bez ładunków mogą być wykonywane z większymi prędkościami i przyspieszeniami. W przypadkach ciężkich rozruchów najefektywniejsze jest forsowanie momentu napędu oparte na technice sterowania DTC.

Koordinacja ruchu indywidualnych napędów falownikowych jazdy dźwignic może być realizowana już na poziomie tych napędów poprzez połączenie ich układów sterowania do współpracy i wykorzystanie funkcji oprogramowania typu master-slave (master-follower), dostępnej w falownikach ze sterowaniem wektorowych i DTC.

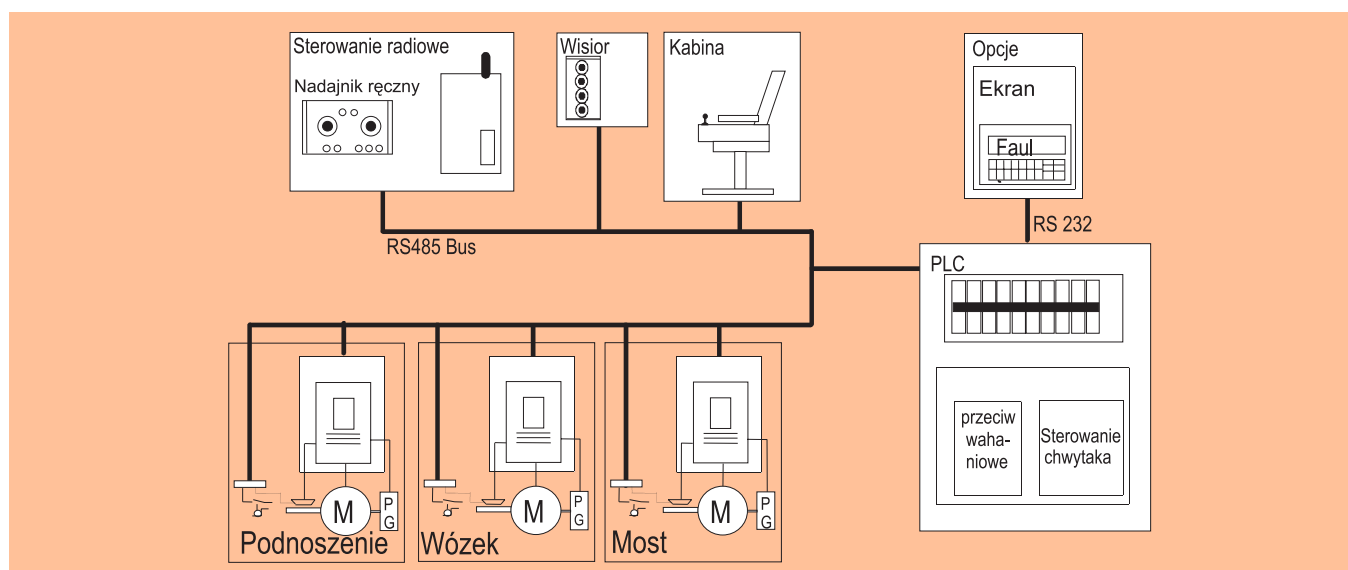
Szczególne wymagania – wynikające z omówionej wcześniej specyfiki ciężkowych mechanizmów podnoszenia ciężkich dźwignic (głęboka regulacja prędkości i położenia oraz sterowanie hamulcem mechanicznym) – uzasadniają stosowanie w ich napędach falownikowych sprzężenia prędkościowego i położeniowego (enkoder), które umożliwia płynną regulację prędkości od zera, przy pełnym momencie silnika, bez szarpnięć przy starcie i zatrzymaniu. Sterowanie hamulcem mechanicznym przez falownik zapobiega zwol-

nieniu hamulca przed rozwinieniem przez silnik wymaganego momentu przy rozruchu podnoszenia ładunku uprzednio już uniesionego.

Niektórzy producenci oferują falowniki uniwersalne w wersji wyposażenia sprzętowego i oprogramowania właściwego dla napędów dźwignic. Dodatkowe wyposażenie stanowią wówczas wejścia i wyjścia do sterowania przy użyciu joysticków, radia, łączności komunikacyjnych, sterowanie hamulcem (sprawdzanie momentu silnika, sprawdzanie obciążenia), optymalizacja mocy – obliczanie prędkości maksymalnej w drugiej strefie pracy ze względu na wymagany moment silnika, sterowanie chwytkiem, sprawdzanie luźnej liny, sterowanie ruchem z jazdy z ograniczeniem wahań ładunku podwieszonoego, sterowanie z omijaniem zakazanych stref ruchu i powtarzaniem ruchu do zapamiętanych położeń, automatyzacja procesu załadunku i wyładunku (na przykład falowniki serii ACC produkcji ABB). W złożonych układach napędowych dźwignic stosuje się sterowniki PLC, koordynujące pracę napędów, pozwalające na sterowanie z wielu miejsc oraz na współpracę z innymi urządzeniami we wspólnym układzie sterowania. Do napędów podnoszenia zalecany jest falownik ze zwrotem energii do sieci.

Dla każdego z napędów dobór mocy i prędkości silnika oraz wyposażenia falownika wynika z dokładnego określenia cykli pracy napędu w czasie. Dobór mocy silnika w napędzie falownikowym jest wynikiem obliczeń cieplnych i ograniczeń prądowych, a pomocą w doborze są specjalistyczne programy obliczeniowe. Z przewidywanych i założonych cykli pracy napędu wynika wybór wersji silnika z chłodzeniem własnym lub obcym.

Sprawdzenie warunków cieplnych pracy silnika jest niezbędne przy wymianie starszych napędów z silnikami pierścieniowym lub prądu stałego na napęd falownikowy. Wówczas możliwe jest niekiedy nawet obniżenie mocy znamionowej silnika klatkowego w stosunku do silnika wymienianego, ze względu na wyższą sprawność, zdolność forsowania momentu w fazie rozruchu i hamowania oraz ograniczenie niekontrolowanych przeciążeń napędu falownikowego w różnych stanach pracy, w których jest on wszechstronnie zabezpieczony.



Rys. 3 Przykład układu sterowania falownikowymi napędami dźwignicy (udostępniony przez ABB)

Podsumowanie i uwagi końcowe

Napędy falownikowe niewątpliwie umożliwiają zapewnienie odpowiednio wysokich parametrów techniczno-eksploatacyjnych dźwignic i są swoistym wyznacznikiem poziomu ich nowoczesności.

Specyfika napędów dźwignicowych wymaga zindywidualizowanego podejścia przy dobieraniu silników i falowników do napędu poszczególnych mechanizmów w każdej dźwignicy. Dobór ten musi być oparty nie tylko na znajomości budowy i działania danej dźwignicy oraz warunków jej pracy, ale także na znajomości zjawisk towarzyszących procesom przepływu mocy między silnikami a końcowymi członami jej mechanizmów. Niezbędna kontrola przebiegu tych zjawisk wymaga stosowania odpowiednich metod i technik sterowania, które w falownikowych napędach dźwignicowych mogą być realizowane już na poziomie samych przemienników częstotliwości zamiast na różnych wyższych poziomach układu sterowania dźwignicy (opartego na tradycyjnych rozwiązaniach), mającego wówczas dużo prostszą strukturę.

Występujące w przerywanej (cyklicznej) pracy dźwignic zmiany energii kinetycznej i potencjalnej ich mas własnych oraz transportowanych ładunków mogą być wykorzystywane przez napędy falownikowe do efektywnego obniżania energochłonności dźwignic (zużycia energii doprowadzanej z zewnątrz), co jest ważne przede wszystkim w dźwignicach bardziej intensywnie eksploatowanych (należących do wyższych klas). ■

Literatura

- [1] Vas P.: *Sensorless vector and direct torque control*, Oxford University Press, 1998.
- [2] Scheffler M.: *Grundlagen der Fördertechnik*, Vieweg Braunschweig, 1994.
- [3] *Katalogi i instrukcje do przemienników serii ACS600 i ACS800 ABB.*
- [4] *Materiały informacyjne firm: ABB, SIEMENS, DEMAG, KONE, CLARK.*

*dr inż. Eugeniusz Grabowski
Zakład Inżynierii Maszyn Roboczych
i Pojazdów Przemysłowych IKEM Politechniki Wrocławskiej
dr inż. Andrzej Morawski
Biuro Inżynierskie Automatyki Przemysłowej BIAP Wrocław*

*recenzował
prof. nadzw. dr hab. inż. Piotr Dudziński
Zakład Inżynierii Maszyn Roboczych
i Pojazdów Przemysłowych IKEM Politechniki Wrocławskiej*