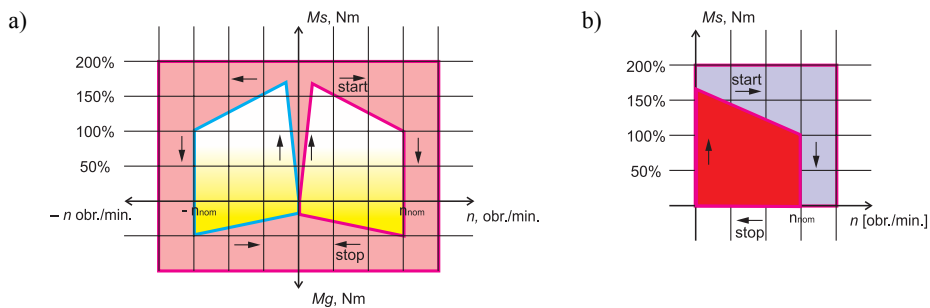


Zbigniew Kasztelewicz*, Ryszard Reizer**,
Jerzy Szymański***, Jerzy Świdorski****

PRZEMIENNIKI CZĘSTOTLIWOŚCI W NAPĘDACH JAZDY GAŚNIENICOWYCH MASZYN GÓRNICZYCH I WĘGLOWYCH PRZENOŚNIKÓW TAŚMOWYCH O REGULOWANEJ PRĘDKOŚCI TAŚMY

1. Napęd z silnikami klatkowymi o regulowanej prędkości

Cyfrowe sterowanie silników asynchronicznych nie ma zasadniczo alternatywy, gdy wymagana jest regulowana prędkość i moment silnika. W nowych projektach napędów przemysłowych silniki klatkowe sterowane cyfrowo wyparły już całkowicie klasyczne układy napędowe [1, 2]. Wykorzystywane do sterowania koparkami lub zwałowarkami statyczne charakterystyki mechaniczne silnika asynchronicznego przedstawia rysunek 1a — napęd 4-cwiartkowy.



Rys. 1. Obszar położenia charakterystyk mechanicznych silnika klatkowego sterowanego cyfrowo:
a) koparka lub zwałowarka; b) stacja zasilania przenośnika taśmowego

* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków
** Instytut Technologii Eksploatacji, Państwowy Instytut Badawczy, Radom
*** Instytut Systemów Transportowych, Politechnika Radomska, CEAI Elpol, Radom
**** KWB „Konin” w Kleczewie SA

Do napędu taśmy w stacji zasilania przenośnika taśmowego wykorzystywany jest napęd 1-ćwiartkowy umożliwiający wytworzenie dużego momentu napędowego silnika przy zerowej prędkości wału (rys. 1b). Zastosowanie sterowania cyfrowego silnika umożliwia płynną regulację prędkości i momentu silnika zarówno w stanie pracy generatorowej, jak i silnikowej.

Podstawowe równania silnika jako obiektu regulacji częstotliwościowej opisują jego moment (1) i prędkość obrotową. Z równań tych wynika, że możliwe jest niezależne sterowanie prędkości i momentu silnika

$$M_N = \frac{P_N}{\Omega_N} \text{ [N} \cdot \text{m]} \text{ oraz } \Omega_N = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \approx 0,1 \cdot n \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] \quad (1)$$

gdzie:

P_N — moc nominalna silnika indukcyjnego klatkowego, W;

n — prędkość nominalna silnika indukcyjnego klatkowego, obr./min.

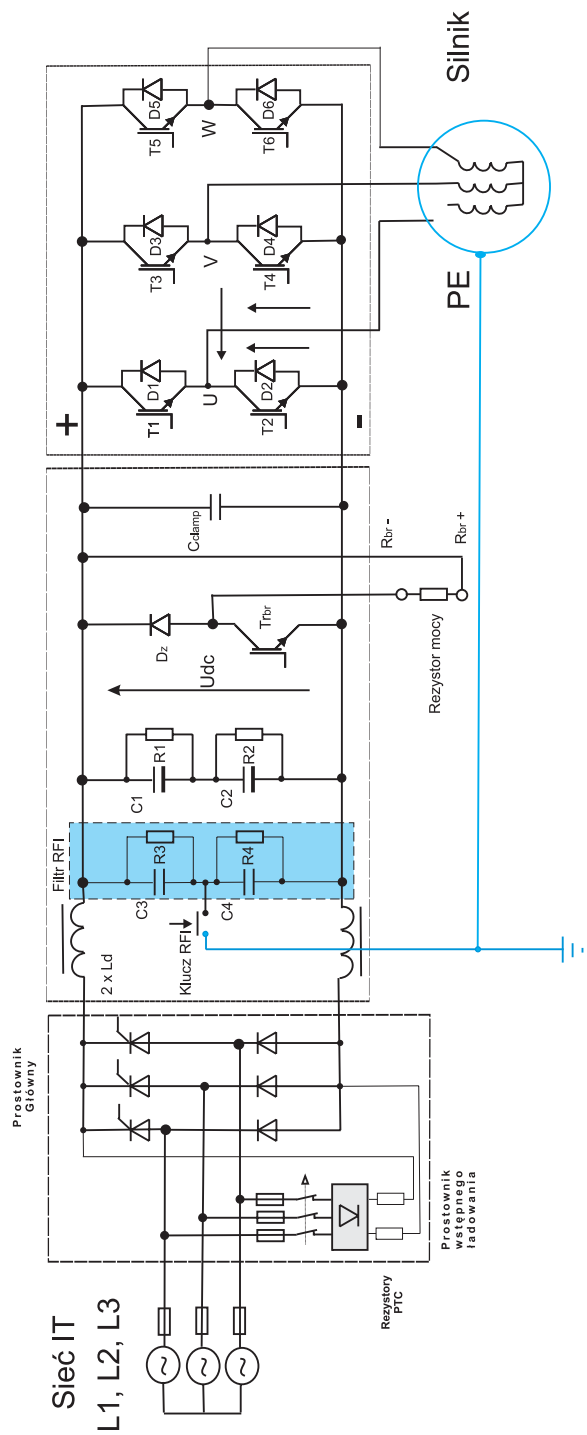
Dla $u/f = \text{const.}$ moment silnika $M_s = \text{const.}$ w funkcji prędkości obrotowej wału silnika.

Klasyczne układy napędowe nie umożliwiają odpowiednio precyzyjnego energooszczędnego sterowania silnikami w stanach pracy dynamicznej i statycznej. Rozwiązania napędów z maszyn górniczych oparte na silnikach prądu stałego (koparki, zwałowarki) czy pierścieniowych (transportery taśmociągowe) były szeroko stosowane w latach 70. ubiegłego wieku. Przy obecnym tempie rozwoju napędowych przekształtników energoelektronicznych wszystkie takie rozwiązania można uznać za historyczne.

2. Własności napędowych przemienników częstotliwości średnich mocy

W przemysłowych napędach, o mocach pojedynczych silników do ok. 1,2 MW, z regulowaną prędkością wału silnika stosuje się obecnie silniki klatkowe zasilane niskonapięciowymi przemiennikami częstotliwości (rys. 2).

Synchronizację pracy zespołów wielosilnikowych uzyskuje się poprzez stosowanie konfiguracji typu master-slave przemienników częstotliwości. Przemiennik częstotliwości pełniący funkcję master steruje prędkością silnika, natomiast przemienniki częstotliwości pełniące funkcję slave sterują momentem napędowym silników. Wartość momentu napędowego wytwarzanego przez silniki zasilane przemiennikami częstotliwości pełniącymi funkcję slave jest zadawana z przemiennika pełniącego funkcję master. W takim rozwiązaniu o osiągnięciu wielosilnikowego układu napędowego decydują własności zastosowanych przemienników częstotliwości.



Rys. 2. Napięciowy przetwornik częstotliwości zasilany siecią IT w napędzie silnika klatkowego

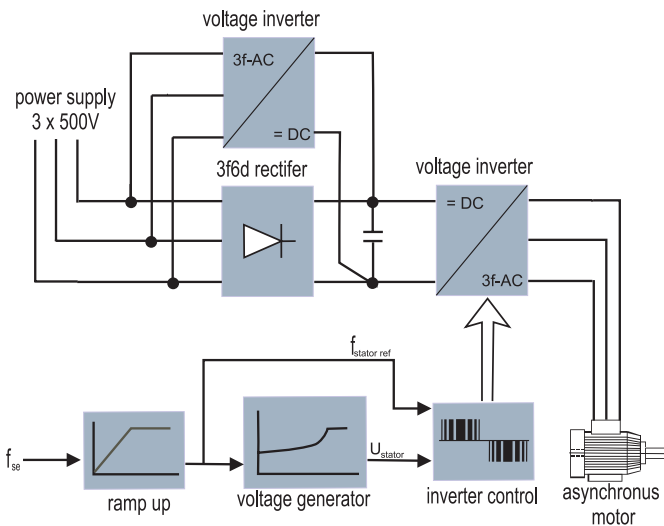
Do napędu silników maszyn górniczych stosowane są obecnie dwa rodzaje przemienników VVC i FVC umożliwiające:

- 1) sterowanie prędkości wału silnika niezależnie od jego obciążenia w trybie zamkniętej/otwartej pętli sprzężenia prędkościowego — VVC (*Vector Voltage Control*);
- 2) sterowanie prędkością wału silnika w określonym przedziale, w funkcji zadanego maksymalnego momentu obciążenia — FVC (*Flux Vector Control*).

Dla zapewnienia zamkniętego trybu sterowania prędkością silnika wykorzystywany jest wewnętrzny regulator PID przmiennika częstotliwości. Przy stosowaniu przmienników FVC silniki wyposaża się w szybkie enkodery inkrementalne do precyzyjnego określenia prędkości wału i łączy bezpośrednio do przmienników częstotliwości.

Do budowy zsynchronizowanego wielosilnikowego napędu należy przeprowadzić analizę potrzeby zastosowania:

- typu przmiennika: VVC czy FVC,
- wspólnej szyny DC przmienników,
- układu odzysku energii (rys. 3),
- filtra stopnia pośredniego przy pracy z siecią IT [5].



Rys. 3. Zasada sterowania cyfrowego silnika asynchronicznego napięciowym przmiennikiem częstotliwości z falownikiem odzyskowym dla pracy generatorowej

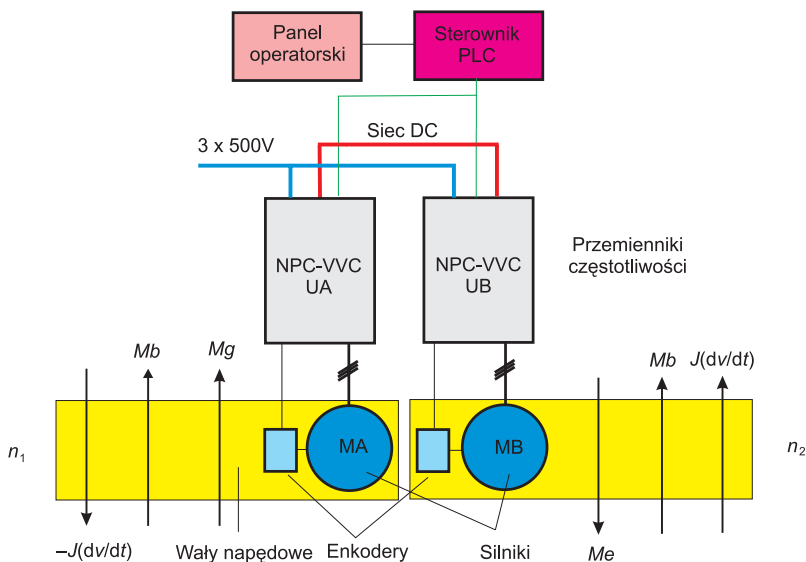
Przy skomputeryzowanym sterowaniu pracą układu napędowego funkcja dwukierunkowej transmisji danych między przmiennikiem częstotliwości i komputerem sterującym ma podstawowe znaczenie dla niezawodności i bezpieczeństwa eksploatacyjnego maszyny.

Napędowe urządzenia energoelektroniczne, tutaj napięciowe przemienniki częstotliwości, zapewniają oprócz funkcji precyzyjnego sterowania silnikami także funkcje zabezpieczające silniki i funkcje ochrony przeciwporażeniowej.

3. Przemienne układy napędu jazdy gąsienicowych koparek i zwałowarek

Napęd jazdy koparki czy zwałowarki jest złożonym funkcjonalnie układem wielosilnikowym pracującym w czterech ćwiartkach układu współrzędnych: prędkość – moment, (rys. 1a). Duża masa maszyny roboczej, sprężystość konstrukcji, duże chwilowe zmiany obciążeń poszczególnych gąsienic wymuszają napęd jazdy o wysokich wymaganiach tak dynamicznych i statycznych.

Dla zrealizowania tych zadań stosowane są napięciowe przemienniki częstotliwości komunikujące się z zarządzającym sterownikiem PLC wg standardu komunikacji szeregowej Profibus DP. Standard komunikacyjny Profibus DP jest obecnie powszechnie stosowany dla zapewnienia dużej szybkości dwukierunkowej transmisji danych w przemysłowych układach napędowych. Dla zapewnienia możliwości długotrwałej pracy generatorowej części silników, przy jeździe skrętnej pojazdu z gąsienicami sztywno zamocowanymi do konstrukcji nośnej maszyny, stosowany jest wspólny obwód DC przemienników częstotliwości (rys. 4).



Rys. 4. Typowy schemat zasilania silników napięciowymi przemiennikami częstotliwości w napędzie wałów napędowych lewej i prawej gąsienicy przy skręcie – $n_1 \neq n_2$

Zastosowanie wspólnego obwodu DC między przemiennikami częstotliwości wielosilnikowego napędu umożliwia przesyłanie energii od przemienników częstotliwości utrzymujących pracę generatorową silników (hamowanie silnikami) do przemienników częstotliwości utrzymujących silniki w stanie pracy silnikowej. W czasie skrętu pojazdu silniki zewnętrzne układu jazdy (względem środka promienia skrętu) są w stanie pracy silnikowej, a wewnętrzne w stanie pracy generatorowej. Przy zjazdach pojazdu na prostych odcinkach wszystkie silniki pracują generatorowo i wówczas niezbędne jest stosowanie układów odzysku lub szybkiego rozpraszania tej energii. Dla zapewnienia energooszczędności i skuteczności hamowania koparki stosowane są układy odzysku energii hamowania współpracujące z napięciowymi przemiennikami częstotliwości i siecią zasilania.

Jeśli koparka czy zwałowarka posiada część gąsienic skrętnych, to nie zmienia to zasadniczo konfiguracji napędu, lecz trzeba to uwzględnić przy wyznaczaniu prędkości poszczególnych gąsienic w czasie skręcania maszyny. Inne są środki promieni skrętu gąsienic skrętnych i nieskrętnych pojazdu.

Występujące luzy gąsienic umożliwiają zastosowanie przemienników typu VVC w układzie otwartego sterowania prędkościowego, gdyż moment napędowy silników w chwili startu maszyny nie osiąga wartości nominalnych przemiennika. Takie rozwiązania są powszechnie stosowane w jednosilnikowych napędach przemysłowych. W układach wielosilnikowych napędów jazdy maszyn gąsienicowych trzeba stosować dodatkowo funkcje kompensacyjne obciążenia i poślizgu silnika, które powinien realizować przemiennik częstotliwości lub sterownik PLC.

Na podstawie omówionej koncepcji cyfrowego sterowania silnikami klatkowymi napięciowymi przemiennikami częstotliwości VVC opracowano już kilka konfiguracji wielosilnikowych napędów jazdy zwałowarek i koparek gąsienicowych. Maszyny te pracują od kilku lat w KWB Bełchatów (zwałowarka z gąsienicami nieskrętnymi, koparka z grupą gąsienic nieskrętnych i grupą gąsienic skrętnych — projektowana) i KWB „Konin” (koparka z gąsienicami nieskrętnymi, zwałowarka z grupą gąsienic nieskrętnych i grupą gąsienic skrętnych).

3.1. Konfiguracja układu napędowego koparki

Obecnie modernizacji podlega napęd jazdy jednej z największych koparek wyprodukowanych przez firmę niemiecką Krupp, typu SchRs 4600, o masie 7200 ton, pracującej w KWB w Bełchatowie i będącej 2 razy większą od innych typu maszyn górniczych. Jej napęd jazdy jest zbudowany z 8 nieskrętnych i 4 skrętnych gąsienic umocowanych do sztywnej konstrukcji maszyny. Każda gąsienica zasilana jest jednym silnikiem. Pierwotnie, tj. wg rozwiązania z lat 70., każda gąsienica koparki posiadała jeden silnik napędowy i był to silnik DC o mocy 130 kW / 1000 obr./min. Hamowanie elektryczne koparki przy zjazdach po pochylni (maksymalny spadek 1,5%) było realizowane przy zastosowaniu tyrystorowego mostka prostownikowego przy kącieysterowania 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:

- silniki DC 130 kW / 1000 obr./min — drogie i duże są ich koszty eksploatacyjne;
- bardzo ograniczone możliwości manewrowe koparki i jej dynamika;
- brak możliwości zautomatyzowania sterowania i monitoringu napędu jazdy koparki według obecnych standardów.

Dla zwiększenia dynamiki koparki zwiększono moment napędowy silników i zastosowano silniki klatkowe o mocy 160 kW / 1000 obr./min. Silniki te mają mniejszą masę i objętość w porównaniu do stosowanych dotychczas silników DC 130 kW / 1000 obr./min. Do sterowania tymi silnikami zastosowano przemysłowe napięciowe przemienniki częstotliwości typu VVC o mocy 160 kW z możliwością przeciążenia 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, gdyż wtedy może wystąpić znaczący udział składowej dynamicznej momentu silnika. Wartość składowej dynamicznej momentu zależy od szybkości zmian prędkości wału silnika — $d\omega/dt$, co opisane jest równaniem

$$M_s = M_b + J \frac{d\omega}{dt} \quad (2)$$

gdzie:

- M_b — statyczny moment oporowy koparki,
- J — moment bezwładności koparki,
- $J(d\omega/dt)$ — dynamiczny moment oporowy koparki.

Moment bezwładności silnika J można wyznaczyć metodą hamowania wybiegiem od prędkości roboczej wału Ω z zależności [6]

$$P_{su} = -\frac{dE_k}{dt} = -\frac{d}{dt} \left[J \frac{\Omega^2}{2} \right] = -J\Omega \frac{d\Omega}{dt} \quad (3)$$

gdzie P_{su} — moc pobierana przez silnik w czasie pracy z prędkością roboczą wału Ω

$$J [\text{Nms}^2] = \frac{P_{su}}{\Omega \frac{d\Omega}{dt}} \approx \frac{P_{su}}{\Omega \frac{\Delta\Omega}{\Delta t}} \quad \text{oraz} \quad \Omega = \frac{2\pi \cdot n [\text{obr./min}]}{60} \quad (4)$$

gdzie Δt — czas zatrzymania się silnika od roboczej prędkości obrotowej wału Ω

Przy roboczej prędkości jazdy koparki $v_{rob} = 6$ m/min prędkość średnia prędkość wału silnika o prędkości synchronicznej 1000 obr./min wynosi 750 obr./min.

Baterie kondensatorowe obwodów pośrednich przemienników częstotliwości podłączono do wspólnej szyny napięcia stałego dla zapewnienia możliwości wymiany energii między przemiennikami. Wspólna szyna DC przemienników w tym rozwiązaniu zapewnia:

- zwiększenie energooszczędności napędu przy jednoczesnym zmniejszeniu promienia skrętu maszyny poprzez wykorzystywanie energii silników pracujących generatorowo;
- zwiększenie niezawodności przemienników pracujących przy chwilowych dużych odkształconych napięciach zasilania, co jest częstym zjawiskiem w górniczych sieciach zasilania typu IT [5];
- zwiększenie energooszczędności napędu poprzez zastosowanie przekształtnika energoelektronicznego do odzysku energii z obwodu DC przemienników częstotliwości. Urządzenia odzyskowe zamieniają napięcie stałe na napięcie przemiennie i zasilają tym napięciem sieć zasilania. Konieczność odzyskiwania energii występuje w czasie zjazdu koparki po pochylni. Wszystkie silniki muszą wtedy hamować pojazd. Silniki pracują generatorowo zamieniając energię kinetyczną pojazdu na energię elektryczną. Energia ta jest akumulowana w baterii kondensatorów przemienników częstotliwości i po przetworzeniu jest oddawana do sieci zasilania.

3.2. Dobór przemiennika częstotliwości i przekształtnika odzyskowego

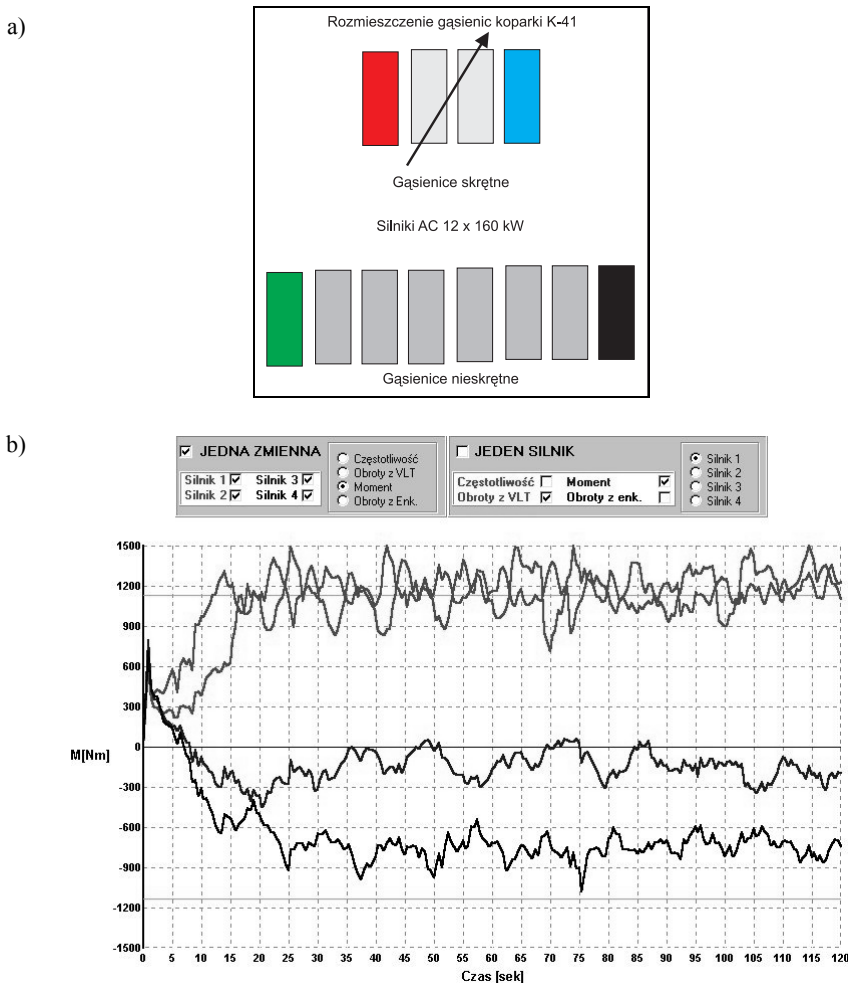
Do sterowania napędem jazdy koparki zastosowano napięciowe przemienniki częstotliwości typu VVC, sterujące pracą silników bez pomiaru rzeczywistej prędkości wału. Praca przemiennika VVC w tym układzie nie zapewnia możliwości wytworzenia momentu startowego o wartości nominalnej silnika, tj. przy zerowej prędkości jego wału, moment ten osiąga wartości mniejsze, do około 60% M_n .

Ze względu na wybieranie luzów przy napinaniu gąsienic pojazdu początkowe obciążenie silników nie jest duże, co umożliwia ich prawidłowy rozruch. Obciążenie pojedynczej gąsienicy w czasie jazdy może gwałtownie się zmieniać zależnie od podłoża i pozycji poszczególnych płyt gąsienicy (rys. 5). Dla zapewnienia jazdy koparki po zadanym torze trzeba zapewnić ściśle określoną prędkość poszczególnych gąsienic. Przemysłowe przemienniki częstotliwości VVC, pracujące w otwartej pętli prędkościowej, zapewniają precyzyjne utrzymywanie zadanej prędkości wału silnika przy dużych chwilowych wahaniami momentu po zastosowaniu kompensacji napięciowej obciążenia i poślizgu [4].

Prędkości poszczególnych gąsienic są wyznaczone teoretycznie. Przy ich określaniu należy uwzględnić inny promień skrętu gąsienic nieskrętnych, tj. sztywno osadzonych w głównej konstrukcji maszyny, i inny promień skrętu gąsienic skrętnych, których położenie sterowane jest wychyleniem belki skręcającej. Mimo precyzyjnego wyznaczenia prędkości poszczególnych gąsienic dla jazdy w czasie skrętu koparki należy przewidzieć funkcje korekcji tych prędkości, jeśli dojdzie do nadmiernego przeciążania lub niedociążenia któregoś z silników napędzających gąsienice. Ponieważ praktycznie prędkość wału silnika klatko-

wego zależy liniowo od częstotliwości napięcia zasilania (1), to korekcie prędkości można zadawać nie stosując skomplikowanych procedur obliczeniowych.

Pokonanie momentu bezwładności J [Nms²] w czasie przyspieszania koparki nie powoduje konieczności znacznego przewymiarowania silników i przemienników częstotliwości, gdyż czas jej przyspieszenia wynosi ok. 15 sekund dla uzyskania roboczej prędkości jazdy 6 m/min. Składowa dynamiczna momentu obciążenia silnika jest tu pomijalna (2). Do napędu silników zastosowano przemienniki częstotliwości VVC o mocach 160 kW z możliwością ich 1-minutowego przeciążenia do 150% P_n , a więc znacznie dłuższym niż rozruch technologiczny koparki.



Rys. 5. Rozkład gąsienic napędowych koparki ze skrętą grupą gąsienic (a) i typowy przebieg momentów dwóch zewnętrznych i dwóch wewnętrznych silników przy skręcie koparki po suchym podłożu (b)

W celu zwrotu energii elektrycznej do sieci zasilania, która jest odzyskiwana w czasie hamowania zjeżdżającej koparki, zastosowano przemysłowe przekształtniki odzyskowe, dedykowane do współpracy z siecią DC przemienników częstotliwości zasilanych z sieci izolowanej — IT. Dołączono 2 przekształtniki DC/AC, każdy mocy 200 kW.

Stosowanie w górnictwie izolowanej sieci zasilania IT wymusza zastosowanie przemienników częstotliwości i przekształtników odzyskowych dostosowanych do pracy z taką siecią w szczególności powinny one mieć takie cechy jak:

- wejściowe filtry RFI(EMC) bez połączenia z uziemieniem instalacji,
- filtry obwodu pośredniego przemienników częstotliwości dostosowane do przejmowania wysokoczęstotliwościowych prądów upływu doziemnego od silnika i ekranowanego kabla silnikowego [5],
- zabezpieczenie przemienników częstotliwości przed wzrostem napięcia w obwodzie DC przy wystąpieniu pojedynczego doziemienia napięcia zasilania.

Wspólny obwód DC przemienników częstotliwości umożliwia zbudowanie energooszczędnego 4-ćwiartkowego układu napędowego. Jednak dołączanie do tego obwodu jednocześnie 12 napięciowych przemienników częstotliwości powoduje problemy techniczne. Właściwe rozwiązanie techniczne jednoczesnego lub sekwencyjnego dołączenia tych przemienników ma duże znaczenie dla ich niezawodności.

4. Konfiguracja układu napędowego stacji zasilania przenośnika taśmowego o regulowanej prędkości

Przy napędzie wału przenośnika taśmowego dla spełnienia postawionych warunków sterowania silnikami zastosowano układ master–slave i przemienniki umożliwiające wymienną realizację funkcji:

- zamkniętej regulacji prędkości wału silnika VVC — przemiennik master (tryb pracy prędkościowej),
- sterowanie momentem silnika z zadanym przedzialem prędkości FVC — przemienniki slave (tryb pracy momentowej).

Dla zapewnienia zamkniętego trybu sterowania prędkością silnika zastosowano wewnętrzny regulator PID przemiennika częstotliwości — master. Silniki wyposażono w enkodery inkrementalne do precyzyjnego określenia prędkości wału i podłączono je bezpośrednio do przemienników częstotliwości. Enkodery są niezbędnym wyposażeniem silników pracujących z przemiennikami FVC pracujących w trybie momentowym.

Wykorzystywany sterownik PLC komunikuje się z przemiennikami protokołem Profibus DP. Pełni on głównie funkcje monitorujące pracę napędu przenośnika taśmowego oraz podaje jedynie podstawowe sygnały sterowania.

Dla wypracowania głównych funkcji sterujących silnikami wykorzystano nastawy programowe przemienników częstotliwości. Takie rozwiązanie sterowania zapewnia szybszą reakcję przemiennika na zmiany prędkości wału silnika i zapewnia możliwość pracy napędu nawet przy uszkodzonym sterowniku PLC.

W KWB Konin dla potrzeb ciągu węglowego nowej odkrywki Drzewce wykonano siedem stacji sterowania przenośnikami taśmowymi. Stacje wyposażono w napędy przemiennikowe: taśmy, napinania taśmy i jazdy stacją [3]. Silniki napędu taśmy mają moce 315 kW i są zasilane przemiennikami częstotliwości o mocy 350 kW / 160% P_n z możliwością wyboru trybu pracy VVC lub FVC.

Odkrywka Drzewce jest w eksploatacji już ponad rok i zastosowane rozwiązanie napędów taśmociągów zmniejszyło zużycie energii o około 50% w stosunku do rozwiązań tradycyjnych, tj. stacji pracujących ze stałą prędkością z silnikami pierścieniowymi.

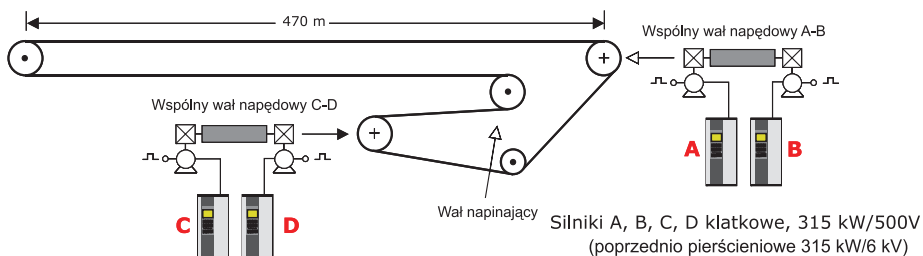
4.1. Równomierne obciążenie dwóch silników napędzających wał napędowy taśmy przenośnika

Zasilanie sztywnego wału napędowego maszyny roboczej o dużym momencie bezwładności układem wielosilnikowym stanowi dzisiaj poważne wyzwanie (rys. 6). W takim przypadku trzeba zapewnić wytworzenie dużego momentu rozruchowego silników przy zerowej prędkości ich wirników. Problem jest jeszcze bardziej złożony, gdy obciążenie wału maszyny roboczej cechuje się skokowymi zmianami w czasie [7].



Rys. 6. Układ połączeń dwóch silników na wspólny wał napędowy taśmy przenośnika taśmowego

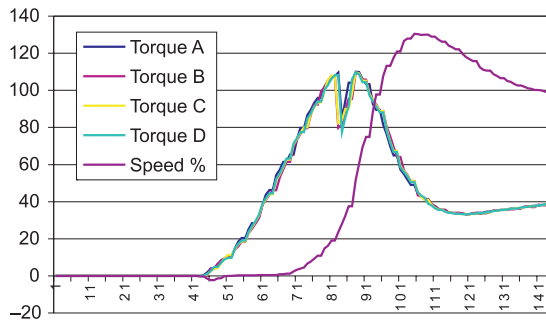
Przeprowadzono szereg badań w poszukiwaniu właściwej metody sterowania silnikami napędowymi wału napędu taśmy powierzchniowego przenośnika taśmowego (rys. 7).



Rys. 7. Schemat układu napędu powierzchniowego przenośnika taśmowego

Najkorzystniejsze rezultaty uzyskano przy pracy w trybie zamkniętej regulacji prędkościowej jednego silnika (master) i zamkniętej regulacji momentowej drugiego silnika (slave). Przemiennek częstotliwości — master, wysłała jako wartość zadana do kolejnych przemienników częstotliwości — slaves, informacje o aktualnie osiąganym momencie.

Kolejne silniki automatycznie dążą do osiągnięcia tej samej wartości momentu. Uzyskane rezultaty sterownia prędkością 2 sztywnych belek napędowych przenośnika taśmowego z widocznym efektem sprężystości taśmy przedstawia rysunek 8.



Rys. 8. Rozruch przenośnika obciążonego momentem około 40%

Poprawne rozwiązanie tego problemu jest możliwe przy użyciu przemienników częstotliwości umożliwiających pracę w trybie sterowania momentem — FVC. Zaawansowane technicznie przemienniki częstotliwości umożliwiają wymienne sterowanie silników w zamkniętym układzie regulacji prędkości lub regulacji momentu i umożliwiają dwukierunkową komunikację ze sterownikiem PLC, np. wg standardu Profibus DP.

4.2. Synchroniczne sterowanie prędkością i momentem napędowym silników napędu taśmy

Wyrównanie obciążeń silników zarówno w czasie rozruchu, jak i przy prędkości ustalonej taśmy ma tutaj podstawowe znaczenie. Dodatkowo należy szybko redukować moment napędowy silników po osiągnięciu zadanej prędkości taśmy, tak aby nie wprowadzić żadnego silnika w zakres pracy nadsynchronicznej.

Ruszanie załadowanego przenośnika taśmowego wymaga spełnienia trzech podstawowych warunków:

- 1) wytworzenie maksymalnie dużych momentów napędowych, np. 150% M_n w każdym silniku w czasie rozruchu taśmy;
- 2) szybka znaczna redukcja momentu napędowego we wszystkich silnikach po osiągnięciu zadanej prędkości;
- 3) wyrównanie momentów napędowych wszystkich silników zarówno w czasie rozruchu, jak i w stanie pracy ustalonej przenośnika taśmowego.

W stacji zasilania z czterema silnikami napędu taśmy, po dwa na każdym wale (rys. 7) uwidacznia się dodatkowo efekt sprężystości taśmy, co przy niewłaściwie dobranej metodzie sterowania wprowadza silniki w stan pracy nadsynchronicznej i powoduje jego awaryjne zatrzymywanie. Taka sytuacja jest szczególnie niepożądana, gdyż prowadzi do konieczności natychmiastowego awaryjnego zatrzymania całego ciągu węglowego i ponownego jego rozruchu.

Prawidłowe sterowanie zsynchronizowane zespołu silników napędu taśmy uzyskano stosując konfigurację master–slave, w której wartość momentu obciążenia silnika — master jest przekazywane do silników — slave. Silnik — master zasilany jest z przemiennika częstotliwości pracującego w trybie VVC z zamkniętą pętlą prędkościową. Zadany czas rozruchu przenośnika taśmowego — np. 60 s, wymusza przemiennik — master. Przy wystąpieniu przeciążenia przenośnika czas ten jest automatycznie wydłużany. Wtedy utrzymywany jest nominalny poślizg silnika przy zmiennych prędkościach wału, przez co maksymalizowany jest rozruchowy moment napędowy.

Z rysunku 8 można wnioskować, że sprężystość taśmy powoduje ponad 20% przeregulowanie prędkości taśmy. Przeregulowanie to można ograniczyć poprzez wprowadzanie korekcji powodującej zmniejszanie momentu napędowego silników jeszcze przed osiągnięciem przez taśmę zadanej prędkości. Przemiennik — master może zredukować moment napędowy zadawany do przemienników — slave, np. o 30% po osiągnięciu 90% zadanej prędkości taśmy.

Duża wartość dynamicznego momentu napędowego (2) $J(d\omega/dt)$ pustego przenośnika taśmowego powoduje, że masa taśmy ma duże znaczenie dla rozruchu, zarówno pustego, jak i załadowanego przenośnika. Przebieg momentu napędowego silników przy rozruchu przenośnika taśmowego w obu przypadkach jest podobny.

Uzależnienie prędkości taśmy od stanu obciążenia prowadzi do dużego zredukowania energii zasilania. Szczególnie w przenośnikach taśmowych pracujących bez lub przy niewielkim obciążeniu, np. przy ograniczonej wydajności złoża węgla, wystąpią duże oszczędności energii, co wynika z równania (1).

Sterowanie pracą całego ciągu węglowego musi uwzględniać kolejność włączania do pracy i wyłączania z pracy poszczególnych przenośników taśmowych. Trzeba założyć, że może zachodzić zatrzymywanie i rozruch technologiczny załadowanych przenośników taśmowych i nie można dopuścić do ich wzajemnego zasypywania.

5. Podsumowanie

5.1. Modernizacje napędów koparek i zwalowarek

Zaproponowane rozwiązanie cyfrowego układu napędowego silników gąsienic jezdnych ciężkiego pojazdu górniczego jest rozwiązaniem nowoczesnym i energooszczędnym. Uzyskuje się tu dobrą synchronizację pracy silników napędowych poszczególnych gąsienic, sterowanych niezależnie dzięki zaawansowanym funkcjom programowym przemienników częstotliwości. Wykorzystanie przemienników napięciowych VVC sterujących silnikami bez

pomiarowego sprzężenia prędkościowego z wałem silnika upraszcza budowę mechaniczną napędu i zwiększa jego niezawodność. Przemiennek częstotliwości ze skalarnym sterowaniem napięcia wyjściowego typu VVC jest powszechnie stosowany w napędach przemysłowych.

Zwałowarki jako maszyny o mniejszych wymaganiach regulacyjnych napędu jazdy w porównaniu z koparkami zwykle nie posiadają wspólnej sieci DC dla wymiany energii między przemiennikami w czasie jazdy skrętnej. Wykorzystywane są tutaj przemienniki wyposażone w rezystancyjne układy rozpraszania energii pracy generatorowej silników, tj. układ przerywacza prądu z rezystorem (*chopper*).

W koparkach stosuje się wspólną szynę DC i dodatkowo układy rozpraszania rezystancyjnego lub przekształtniki odzyskowe. Zastosowanie przekształtnika odzyskowego umożliwia zastosowanie przemienników w rozwiązaniu uproszczonym, tj. bez układu przerywacza prądu i dużej mocy rezystorów hamowania. Rezystory te są kosztowne i ich gabaryty są duże, co powoduje konieczność wydzielenia dla nich znacznej przestrzeni montażowej na koparce.

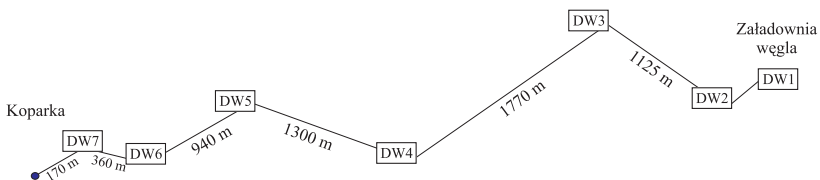
W artykule nie omówiono problematyki wykonania oprogramowania sterownika PLC zarządzającego pracą przemienników częstotliwości, które pełni tu zasadniczą rolę dla zapewnienia właściwego prowadzenia jazdy zwałowarki czy koparki. Zagadnienia są przedmiotem oddzielnych prac [3].

W części 3 artykułu omawiano część silnoprądową układu napędowego koparek głównie na podstawie rozwiązania dla koparki typu SchRs 4600, które jest już w końcowej fazie projektowania, a jej uruchomienie planowane jest na rok 2009.

5.2. Modernizację napędów stacji zasilania przenośników taśmowych z regulowaną prędkością taśmy

Dobłą synchronizację momentów napędowych dwóch silników napędzających wał napędowy taśmy przenośnika powierzchniowego uzyskano dzięki zaawansowanym funkcjom programowym zastosowanych przemienników częstotliwości pracujących jako VVC i FVC.

Zastosowanie konfiguracji master – slave dla silników napędu taśmy zapewniło możliwość zbudowania energooszczędnego napędu przenośników taśmowych całego ciągu węglowego i włączenie go do systemu automatycznego sterowania i monitoringu w marcu 2006 roku w KWB w Koninie.



Rys. 9. Schemat technologiczny przenośników na O/Drzewce

Ciąg węglowy O/Drzewce składa się z siedmiu przenośników taśmowych o różnych długościach (rys. 9). Po oddaniu do eksploatacji nowej odkrywki Drzewce, z przemiennikowymi napędami sterującymi prędkością taśmy przenośników taśmowych ciągu węglowego, monitorowana jest energochłonność tego ciągu. Zbiornicze wyniki pomiarów za okres maj 2006 — marzec 2007 przedstawia tabela 1.

TABELA 1

Energochłonność ciągów węglowych KWB „Konin” za 11 miesięcy (V 2006–III 2007)

Odkrywka	Prędkość ciągu, m/s	Długość ciągu, km	Zużycie energii, kWh	Wydobycie węgla, t	Wskaźnik energochłonności, kWh/tkm
Kazimierz	5,24	3,897	5902431	3486294	0,434
Józwin	5,24	9,326	9352128	1612415	0,622
Drzewce	3,0 przez 8 miesięcy v. 06 XII 06	5,867	3328782	2323101	0,244
	2,5 przez 3 miesiące I 07–III 07				

Napędy przenośników taśmowych w ciągach węglowych na odkrywkach Kazimierz i Józwin mają rozwiązania tradycyjne, tj. oparte na silnikach pierścieniowych z nieregulowaną prędkością taśmy o stałej wartości 5,24 m/s.

Z przedstawionych danych wynika, że po uśrednieniu do długości i przeniesionej masy węgla przez taśmowe ciągi węglowe odkrywek Kazimierz i Józwin energochłonność ciągu węglowego odkrywki Drzewce pracującego ze zmniejszoną prędkością taśm wszystkich przenośników do wartości 2,5÷3 m/s jest o ponad 50% mniejsza.

Kopania eksploatuje przenośniki taśmowe o łącznej długości około 50 km. Na transport nadkładu i węgla zużywa około 70% pobieranej energii elektrycznej. Długość przenośników taśmowych o regulowanej prędkości taśmy w ciągu węglowym odkrywki Drzewce stanowi 12% całkowitej długości wszystkich eksploatowanych przenośników taśmowych.

Z przedstawionych danych wynika, że zastosowanie obniżonej prędkości taśm w przenośnikach taśmowych (2,5÷3 m/s) w ciągu węglowym odkrywki Drzewce spowodowało zmniejszenie zużycia energii przez ciągi węglowe w skali zakładu o ok. 4,2%.

LITERATURA

- [1] Krzemiński Z.: Cyfrowe sterowanie maszynami asynchronicznymi. WPG, 2001
- [2] Bimal K. Bose: Modern Power Electronics and AC Drives. Prentice Hall, 2002
- [3] Projekt celowy nr 10 T12 022 2000 C/5273 „Modernizacja układu jezdnych koparek eksploatowanych w kopalniach węgla brunatnego (serii SRs 1200). 2001.06.18
- [4] DTR VLT5000 Danfoss. MG51A149 (www.danfoss.com)

- [5] *Szymański J.*: Zagrożenia bezpieczeństwa w instalacjach napędowych z napięciowymi przemiennikami częstotliwości w sieciach IT. *Elektroinfo*, 1–2/2007
- [6] *Przybylski J. i in.*: Laboratorium napędu elektrycznego w robotyce. OWPW, 1995
- [7] *Szymański B., Szymański J.*: Przemienniki częstotliwości w dwusilnikowym napędzie wału przenoszenia taśmy przenośnika taśmowego. III Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna LOGITRANS, Szczyrk, 2006