

Innowacyjne rozwiązania elektrycznych układów napędowych maszyn górniczych

Streszczenie

Zwiększenie koncentracji wydobycia na przestrzeni ostatnich 30 lat wymusił opracowanie nowych rozwiązań napędów elektrycznych. Wzrost zainstalowanej mocy w maszynach kompleksów ścianowych powyżej 1 MW spowodował konieczność zastosowania podwyższonego napięcia zasilania. Dynamiczny rozwój energoelektroniki oraz silników elektrycznych umożliwił opracowanie i wdrożenie nowej generacji napędów elektrycznych dla maszyn górniczych.

Summary

Increase of production concentration within last 30 years forced a development of new solutions for electric drives. Increased power in the machines of longwall systems above 1 MW caused the necessity of using the higher supply voltage. Dynamic development of energoelectronics and electric motors enabled development and implementation of electric drives of new generation for mining machines.

1. Wprowadzenie

Prace badawczo-rozwojowe KOMAG-u w zakresie maszyn urabiających ukierunkowane były w minionych latach na opracowanie, a następnie wdrożenie regulowanych elektrycznych napędów posuwu oraz wprowadzenie podwyższonego napięcia zasilania do kombajnów dużej mocy. W zakresie regulowanych elektrycznych napędów opracowano i wdrożono rozwiązania zasilane z sieci prądu przemiennego oraz stałego. Wdrożono również po raz pierwszy w górnictwie, silniki bezszczotkowe z magnesami trwałymi. Wymagało to opracowania wektorowego systemu sterowania przemiennikami częstotliwości dostosowanymi do napięć stosowanych w górnictwie.

2. Innowacyjne rozwiązania w wyposażeniu elektrycznym kombajnów ścianowych

2.1. Innowacyjne rozwiązanie w zakresie napędu posuwu

Od początku istnienia kombajnów ścianowych, rozwiązanie napędu posuwu realizowane było przez jeden ciągnik hydrauliczny ze sterowaniem ręcznym (C-27, C-36) lub automatycznym (CA-27, CA-36 i CH-3a) napędzany silnikiem elektrycznym. W latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku w kombajnach ścianowych w układzie napędu posuwu zastosowano obcowzbudne lub szeregowo silniki prądu stałego. Napędy takie wykonały firmy Joy w USA, Eickhoff w Niemczech oraz Anderson w Wielkiej Brytanii.

Pierwsze w Polsce rozwiązanie napędu posuwu na drodze elektrycznej powstało w KOMAG-u w roku 1984 i zostało wdrożone na kombajnie KGS-150 w kopalniach „Chwałowice” i „Dębieńsko”. Nowością ww.

rozwiązania był tyrystorowy napęd posuwu TZ-1, w skład którego wchodziły dwa zespoły napędowe, z których każdy składał się z dwubiegowego reduktora i silnika indukcyjnego klatkowego o mocy 22 kW. Zespoły te były usytuowane w chodnikach przyścianowych i mocowane do kadłuba przenośnika ścianowego. Zmianę prędkości i kierunku posuwu zapewniał przemiennik częstotliwości EZTR-1 produkcji czeskiej, z którego zasilane były silniki elektryczne napędu posuwu o napięciu regulowanym 0-500 V. Przemiennik częstotliwości typu prądowego, w układzie 3-fazowego mostka tyrystorowego, był sterowany skalarnie, według zależności $U/f = \text{const}$. Umożliwiało to płynną regulację prędkości obrotowej silników posuwu przy stałym momencie obrotowym w zakresie częstotliwości od 5 Hz do 50 Hz oraz przy stałej mocy w zakresie zmiany częstotliwości od 50 Hz do 70 Hz. Równocześnie prowadzono próby z regulacją posuwu za pomocą sprzęgieł elektromagnetycznych, w których poślizg regulowany był automatycznie prądem wzbudzenia, w zależności od obciążenia silników kombajnowych i posuwu.

System o nazwie WSP składał się z dwóch napędów mocowanych na kadłubie przenośnika ścianowego. Obydwa napędy wprawiały w ruch jeden łańcuch pociągowy, którego końce zamocowane były do kombajnu ścianowego K-103. Napęd składał się z silnika elektrycznego, reduktora, sprzęgła elektromagnetycznego i aparatury sterowniczej.

Częste awarie sprzęgieł oraz automatyki posuwu stały się powodem rezygnacji z systemu WSP, a dalsza praca kombajnu K-103 odbywała się ze sprawdzonym wcześniej systemem posuwu TZ-1. Prowadzono także próby z zastosowaniem przemienników produkcji chińskiej na bazie elementów

energoelektronicznych japońskiej firmy Toshiba w kombajnie KGS-300, w którym po raz pierwszy zabudowano silniki posuwu w kombajnie, dzięki czemu uniknięto stosowania ciężnego łańcuchowego. Przebiegnik częstotliwości typu napięciowego zasilat dwa silniki o mocy 22 kW, na napięciu 380 V.

Wszystkie następne rozwiązania kombajnów, począwszy od KSE-344 wyposażono w silniki posuwu o mocy 30 kW, zasilane oddzielnym przewodem z przebiegnika częstotliwości EZTR-1, usytuowanego w chodniku przyścianowym. W kombajnie KSE-344 zastosowano po raz pierwszy zasilanie całego kombajnu jednym przewodem 6-cio żyłowym produkcji krajowej. Po zakończeniu produkcji przebiegnika EZTR-1 z powodu niewystarczającej mocy, w kombajnach KSE-360 zastosowano od 1996 roku prądowe przebiegniki produkcji krajowej firmy Carboautomatyka na napięciu 500 V typu PPC-3 oraz PPC-1, w kombajnach typu KSE-500, z silnikami posuwu o mocy 2x45 kW. W kombajnach typu KSE-700 z silnikami posuwu 2x45 kW i KSE-700 W z silnikami posuwu 2x60 kW zastosowano przebiegnik częstotliwości Monovertor typu BbM200 na napięciu 1000 V i układ transmisji typu A880E firmy AEG w osłonie ognioszczelnej wykonanej przez Carboautomatykę.

W kombajnie KSE-800 oraz KSE-1000 zastosowano do zasilania silników posuwu o mocy 2x60 kW napięciowy przebiegnik częstotliwości SIMOVERT-P typu 8SF9623-0BK10 o mocy 130 kW, na napięciu 500 V firmy SIEMENS.

Wprowadzenie możliwości regulacji częstotliwości do 100 Hz do zasilania silników posuwu, pozwoliło na wyeliminowanie przekładni dwubiegowej w posuwie kombajnu. Przystosowanie silników posuwu do pracy z częstotliwością 100 Hz wymagało jednak wykonania wzmocnionych węzłów łożyskowych.

Z zagranicznych rozwiązań napędu posuwu kombajnu stosowanych w kraju wymienić należy kombajn ELECTRA LS, w którym zastosowano na kombajnie transformator firmy Brush o mocy 150 kVA i napięciu wtórnym 460 V, z którego zasilany jest silnik o mocy 75 kW do napędu pompy hydraulicznej oraz poprzez przebiegnik znajdujący się na maszynie dwa silniki posuwu o mocy po 40 kW każdy. Transformator i przebiegnik częstotliwości były chłodzone wodą.

W końcu lat 90-tych, w wyniku transformacji gospodarczych producenci maszyn górniczych zaczęli tworzyć własne biura konstrukcyjne, w których powstawały nowe rozwiązania kombajnów węglowych. W tym okresie KOMAG proponował napęd posuwu, w którym każdy silnik był sterowany z oddzielnego przebiegnika częstotliwości, zasilanego napięciem 1000 V ze skrzyni aparatury elektrycznej. W kombajnach dużej mocy, w których silniki do napędu organów urabiających są zasilane napięciem 3,3 kV,

zasilanie przebiegników częstotliwości napięciem 1000 V nastąpiło poprzez wspólny przewód sześciocyłowy z aparatury zasilającej znajdującej się w chodniku przyścianowym.

Równocześnie prowadzono w KOMAG-u prace badawcze nad konstrukcją silnika zintegrowanego z przebiegnikiem częstotliwości o mocy 45 kW.

W 2004 roku w ramach projektu celowego we współpracy z firmami ENEL Sp. z o.o. i ZRPME DAMEL opracowano i wykonano silnik zintegrowany z przebiegnikiem częstotliwości, budowy przeciwbuchowej, o mocy 60 kW i napięciu znamionowym 1000 V. Silnik SG3FB-200S-4A, dedykowany do napędu posuwu kombajnów ścianowych przedstawiono na rysunku 1.



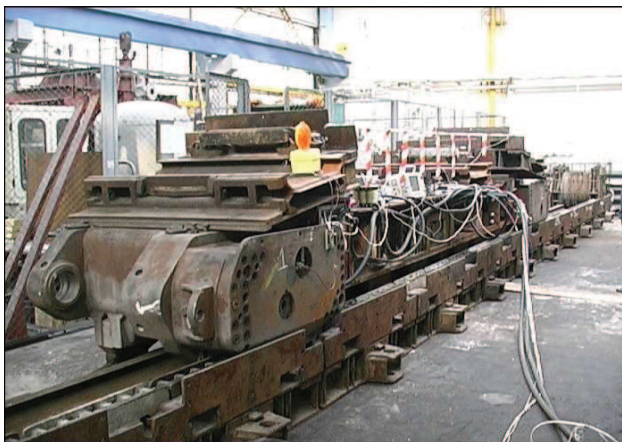
Rys.1. Silnik zintegrowany z przebiegnikiem częstotliwości SG3FB-200S-4A [12]

Badania silnika na stanowisku w KOMAG-u oraz badania typu przeprowadzone w DAMEL-u potwierdziły słuszność przyjętych założeń oraz prawidłowość działania. Na podstawie zdobytych doświadczeń opracowano nowy system posuwu dla kombajnów ścianowych, polegający na zastosowaniu dwóch ciągników, w których zabudowano silniki na napięciu 1000 V zasilanych z przebiegnika częstotliwości zintegrowanego z silnikiem. W 2007 roku na stanowisku badawczym KOMAG-u przeprowadzono badania nowego systemu posuwu na modelu kombajnu.

Celem badań było sprawdzenie poprawności działania oraz porównanie nowego rozwiązania napędu posuwu z dotychczasowym polegającym na zastosowaniu jednego wspólnego przebiegnika częstotliwości do zasilania silników dwóch ciągników.

Badania przeprowadzono na układzie zbliżonym do rzeczywistego. Na stanowisku badawczym (rys. 2) posadowiono trasę przesyłnika składającą się z 30 rynien, której konfiguracja odwzorowywała rzeczywisty stan w zakresie prostoliniowości trasy, przez odpowiednie usytuowanie rynien. Model odwzorowujący kombajn składał się z dwóch ciągników

połączonych mechanicznie, z zachowaniem rozstawu kół trakcyjnych, jak w kombajnie. Model dociążono dodatkową masą 7,5 t, tak aby masa modelu odpowiadała masie kombajnu. Opory skrawania i tarcia odwzorowano z użyciem kołowrotu hydraulicznego.



Rys.2. Stanowisko badawcze w ITG KOMAG [12]

Wyniki prób potwierdziły słuszność koncepcji polegającej na zastosowaniu do każdego silnika posuwu niezależnego przemiennika częstotliwości sterowanego z mikroprocesorowego sterownika. Program badań oraz wyniki zostały opublikowane w literaturze [1].

2.2. Zasilanie kombajnów ścianowych podwyższonym napięciem

Konieczność zastosowania podwyższonego napięcia zasilania wynikała z coraz większych mocy instalowanych w kombajnach ścianowych. Stosowanie dwóch przewodów oponowych do zasilania silników organów urabiających i trzeciego do zasilania silników posuwu było rozwiązaniem tymczasowym. Występujące spadki napięć wynikające z rozruchu silników dużej mocy wymagały usytuowania kilku transformatorów o maksymalnej mocy 1000 kVA bezpośrednio w pobliżu ściany.

Wdrożenie podwyższonego napięcia zasilania do kompleksów ścianowych poprzedziły prace wykonane przez KOMAG w 1993 r. w zakresie analizy sieci elektroenergetycznej i ustalenia optymalnego poziomu napięcia zasilania, zostały opublikowane w literaturze [11]. Określono wymagania i wykonano projekt techniczny na napięcie 6 kV. Ostatnim etapem był dobór aparatury, przewodów i osprzętu przeznaczonych do pracy pod napięciem 6 kV. W 1994 r. na podstawie dokumentacji KOMAG-u, wykonano w ZM ZAMET w Tarnowskich Górach kombajn ścianowy KSE-1000. Kombajn był zasilany ze stacji transformatorowej firmy BRUSH typu TEK1534 o mocy 2700 kVA na napięcie 6/6,3 kV poprzez wyłącznik zabezpieczeniowy firmy SAIT MINING typu K5000; 6kV; 400 A i wyłącznik kombajnowy K5000 wyposażony w dwa styczniki z których jeden spełniał rolę

zabezpieczeniowego, a drugi manewrowego. Zasilanie kombajnu odbywało się przewodem firmy SILEC typu HV-13x50+25+3x1,13/5 mm². Silniki napędu posuwu były zasilane napięciem 1000V z przemiennika częstotliwości firmy SIEMENS typu Simovert-P. Silnik pompy wodnej i hydraulicznej zasilany był z transformatora 6/1,05 kV o mocy 90 kVA zabudowanego na kombajnie. Organy kombajnu były napędzane silnikami typu SG7 o mocy 400 kW i napięciu 6 kV produkcji firmy DAMEL umieszczonymi w ramionach. Posuw kombajnu zapewniały dwa silniki elektryczne produkcji ZRPME DAMEL typu SGN-200S4-4A o mocy 60 kW i napięciu 500 V. Do napędu pompy hydraulicznej i wodnej zastosowano silnik produkcji ZRPME DAMEL typu SGN-200M-4 mocy 75 kW na napięciu 1000 V. Kombajn KSE-1000 wdrożono w kopalni „Ziemowit”, gdzie po wybraniu dwóch ścian został wycofany z eksploatacji. W trakcie pracy nie uległy uszkodzeniu żadne z głównych elementów wyposażenia elektrycznego kombajnu jak: przewód oponowy, przemiennik częstotliwości, wyłączniki, transformator zasilający itp. W następnych latach z uwagi na brak produkcji krajowego kombajnu dużej mocy zaczęto instalować kombajny zagraniczne zasilane prądem o napięciu 3,3 kV. W związku z ciągłym zapotrzebowaniem na kombajny dużej mocy krajowi producenci, wzorem zagranicznych producentów, rozpoczęli produkcję kombajnów na napięciu 3,3 kV. W roku 2004 podjęto próbę ponownego wdrożenia systemu zasilania kombajnu prądem o napięciu 6 kV.

Zaplanowano lokalizację w ścianach 20, 5, 31 w pokładzie 405/3 KWK Knurów, gdzie w wyniku przeprowadzonych analiz technicznych i ekonomicznych uzasadnione było zastosowanie napięcia zasilania podwyższone do 6 kV. Ze względów ekonomicznych nie podjęto produkcji nowego typu kombajnu. Rozwiązanie dotychczasowe polegające na zasilaniu maszyn napięciem 3,3 kV staje się powoli rozwiązaniem niewystarczającym.

3. Innowacyjne rozwiązanie napędu w lokomotywach elektrycznych

W kopalniach, oprócz lokomotyw elektrycznych, zasilanych z sieci trakcyjnej, rozpowszechniono lokomotywy elektryczne akumulatorowe, które wykonane jako przeciwwybuchowe znalazły zastosowanie przede wszystkim na drogach przewozowych, gdzie występuje zagrożenie wybuchem metanu lub pyłu węglowego. Do napędu lokomotyw stosowano silniki szeregowe prądu stałego, w których sterowanie prędkością uzyskano przez zmianę rezystancji włączonej w obwód silnika. W lokomotywie akumulatorowej system sterowania napędami, w postaci silników prądu stałego nie różni się od systemu w lokomotywie trakcyjnej, wymagał jedynie umieszczenia go w ognioszczelnych obudowach.

Powszechnie stosowane w Polsce lokomotywy akumulatorowe to lokomotywy małe, typu Ldag 05M oraz Lea BM-12, w różnych wersjach wykonania, posiadające ten sam silnik i konstrukcję mechaniczną. Obecnie prowadzone są prace nad systemami napędu z wykorzystaniem silników prądu przemiennego. Na Słowacji wyprodukowano lokomotywy akumulatorowe wyposażone w silniki indukcyjne prądu przemiennego, sterowane za pomocą tranzystorowych przekształtników energoelektronicznych.

Z analizy obecnego stanu w zakresie lokomotyw elektrycznych wynika, że istnieje potrzeba modernizacji zasilania i napędu tych maszyn, zwłaszcza w warunkach istniejących zagrożeń naturalnych, w tym zagrożenia metanowego, pyłowego, temperaturowego, wodnego i pożarowego.

3.1. Innowacyjne rozwiązanie napędu i sterowania dla lokomotyw trakcyjnych

Prace naukowo-badawcze nad rozwojem lokomotyw trakcyjnych prowadzono już w ZKMPW, a następnie w EMAG-u. W latach 90-tych wdrożono układ tyrystorowy typu TUSDELK firmy ELSTA, umożliwiający dynamiczne hamowanie silnikiem.

Lokomotywę trakcyjną Ld-31 modernizowano w KOMAG-u etapowo. W pierwszej kolejności zaprojektowano nowatorski system napędowy, polegający na zastosowaniu w miejsce dotychczasowych silników prądu stałego, bezszczotkowych silników z magnesami trwałymi, zasilanych z traktacji elektrycznej za pośrednictwem przekształtników energoelektronicznych.



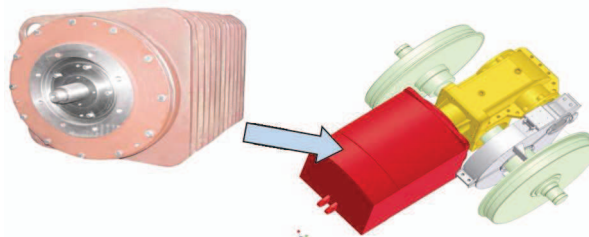
Rys.3. Lokomotywa Ld-31EM podczas prób ruchowych w KGHM Polska Miedź S.A. [12]

Opracowanie silnika bezszczotkowego z magnesami trwałymi i jego pierwsze wdrożenie w napędzie lokomotywy kopalnianej jest rozwiązaniem innowacyjnym w skali światowej.

Podstawowe, innowacyjne cechy silnika z magnesami trwałymi to:

- znacznie wyższa sprawność w stosunku do silników indukcyjnych i silników prądu stałego,

- większa gęstość mocy w stosunku do silników indukcyjnych i silników prądu stałego, co pozwala na zmniejszenie wymiarów i masy,
- wysoki współczynnik przeciążalności momentem, nawet do kilkakrotnej wielkości momentu znamionowego,
- wysoki współczynnik mocy $\cos \varphi$, w stosunku do silników indukcyjnych, dzięki ograniczeniu prądu magnesującego, pobieranego z sieci i magnesowaniu maszyny magnesami trwałymi,
- wysoka trwałość i niezawodność, zwłaszcza w porównaniu z silnikami prądu stałego, dzięki wyeliminowaniu komutatora mechanicznego, co spowodowało uproszczenie procedur eksploatacyjnych; skrócenie czasów przeglądów i remontów, obniżenie kosztów eksploatacji,
- doskonałe parametry regulacyjne i dynamiczne, liniowa zależność momentu na wale od prądu zasilania, możliwość uzyskania dużych przyspieszeń kątowych dzięki niskim momentom bezwładności i wysokiej przeciążalności momentem,
- możliwość pracy w układzie napędowym w funkcji hamulca elektromagnetycznego dynamicznego i statycznego.



Rys.4. Zespół napędowy z silnikiem z magnesami trwałymi PMPg-250L [7]

Napęd lokomotywy Ld-31EM składa się z dwóch zestawów kołowych (rys. 4), każdy napędzany silnikiem, zasilanym z przekształtnika energoelektronicznego. Zastosowany po raz pierwszy w lokomotywie trakcyjnej manipulator, w postaci joysticka (rys. 5), przeznaczony jest do sterowania prędkością lokomotywy i hamowania. Manipulator wyposażony jest w dwa przyciski. Pierwszy (usytuowany w górnej części) służy do nadawania sygnału ostrzegawczego. Drugi (usytuowany w środkowej części) spełnia rolę „czuwaka”.



Rys.5. Wnętrze lokomotywy Ld-31EM [7]

Lokomotywa Ld-31EM wyposażona jest w elektryczny hamulec manewrowy o działaniu proporcjonalnym, sprężynowy hamulec awaryjno-postojowy, jak również w system kontrolujący sprawność maszynisty, tzw. czuwak. W przypadku wykrycia przez system nieprawidłowości, następuje hamowanie awaryjne realizowane równocześnie za pomocą elektrycznego hamulca manewrowego i hamulca awaryjno-postojowego.

W celu dostosowania wyposażenia lokomotywy do obowiązujących przepisów i aktualnych norm zastosowano odbierak prądu z elektropneumatycznym układem podnoszenia oraz opuszczania.

Lokomotywa Ld-31EM testowana była w jednej z kopalń rud miedzi. W wyniku zdobytych doświadczeń przystąpiono do drugiego etapu modernizacji, który polegał na opracowaniu mikroprocesorowego systemu sterowania. W skład systemu wchodzi: specjalnie skonstruowany nowoczesny pulpit operatorski, z centralnym sterownikiem mikroprocesorowym oraz lokalne sterowniki (koncentratory sygnałów) znajdujące się w module zasilania, w pulpicie do obsługi elementów manipulacyjnych oraz w specjalnej obudowie do obsługi czujników znajdujących się w lokomotywie. Oba silniki napędowe są sterowane wektorowo. Sterownik centralny komunikuje się z sterownikami przekształtników energoelektronicznych, sterując prędkością i kierunkiem jazdy w obu napędach.

Na płycie czołowej pulpitu zabudowano: wyświetlacz (ekran) ciekłokrystaliczny (rys. 6), przyciski sterownicze, łączniki wyboru sterowania (lokalnego lub zdalnego), rodzaju sterowania (praca, holowanie, załadunek), podnoszenia i opuszczania pantografu oraz kierunku jazdy. Umieszczony na pulpicie przycisk do „jazdy wybiegiem” umożliwia opuszczenie odbieraka prądu i jazdę lokomotywy nagromadzoną energią kinetyczną. Umożliwia to przejazd lokomotywy przez strefy, w których występuje chwilowy brak sieci trakcyjnej oraz przejazd na rozjazdach, gdzie wymagane jest opuszczenie odbieraka prądu celem przejazdu przez zwrotnicę w wymaganym kierunku. Nowością jest również możliwość pracy lokomotywy przy obniżonym napięciu zasilania. Praca w tym trybie pozwala na jazdę lokomotywy w miejscach, gdzie napięcie trakcji jest niższe od wymaganego np. w zajezdni lub pod suwnicami. W celu szybkiej lokalizacji nieprawidłowości spowodowanych np: błędnymi ustawieniami łączników, wystąpieniem stanów przedawaryjnych lub awarii, niezbędne informacje są wyświetlane w postaci komunikatów na ekranie pulpitu (rys. 6).



Rys.6. Widok ekranu pulpitu sterowniczego [7]

Ekran ciekłokrystaliczny umożliwia wyświetlanie: komunikatów tekstowych, parametrów pracy lokomotywy, ciśnienia w układzie odbieraka prądu, hamulca i zbiornika oraz wartości pobieranych prądów i temperatury silników oraz przekształtników. Ponadto wyświetlana jest aktualna wartość napięcia i pobór prądu z akumulatora pomocniczego. Zastosowanie ekranu ciekłokrystalicznego wysokiej rozdzielczości umożliwia, w bardzo dobry i wygodny sposób, obserwację i analizę aktualnych parametrów ruchowych lokomotywy.



Rys.7. Nowoczesny pulpit sterowniczy MPS-1 zabudowany w kabinie lokomotywy [7]

W pulpicie sterowniczym MPS-1 (rys. 7) mikroprocesor zapisuje w pamięci wszystkie parametry pracy, w tym pomiary, wartości zadane oraz stany wewnętrznych zmiennych, poszczególnych podsystemów.

Zastosowano również nowy system sterowania, który pozwala na zwiększenie możliwości monitorowania parametrów ruchowych lokomotywy, znaczne zredukowanie liczby przewodów elektrycznych oraz wyeliminowanie z układu skrzynek rozgałęźnych.

Zastosowanie w pulpicie mikroprocesora zapisującego w pamięci wszystkie parametry pracy, pozwala na wgląd w historię pracy lokomotywy.

Po modernizacji, lokomotywa została wdrożona w jednej z kopalń węgla kamiennego.

3.2. Koncepcja rozwiązania napędu i sterowania dla lokomotywy akumulatorowych

Na głównych drogach transportowych podziemnych wyrobisk górniczych zagrożonych wybuchem metanu i pyłu węglowego do ciągnięcia składów pociągowych stosuje się lokomotywy elektryczne akumulatorowe typu Lea skonstruowane w latach 1970-1985. Lokomotywy stosuje się do przewozu ludzi, transportu urobku oraz materiałów związanych ze zbrojeniem, eksploatacją i likwidacją ścian. W eksploatacji znajdują się również małe lokomotywy typu Ldag 05M. Wszystkie wersje lokomotyw napędzane są silnikami prądu stałego w wykonaniu przeciwwybuchowym, zasilane z baterii akumulatorów w wykonaniu specjalnym. Regulacja prędkości w starszych wykonaniach odbywa się za pomocą rezystorów rozruchowych, w nowszych rozwiązaniach za pomocą łącznika tyrystorowego poprzez regulację prądu wzbudzenia silnika. Zmiana kierunku wirowania silnika realizowana jest za pomocą dwóch styczników zmieniających kierunek przepływu prądu w obwodzie wirnika.



Rys.8. Lokomotywa akumulatorowa Lea BM-12 [6]

Lokomotywa Lea BM-15 po próbach ruchowych nie weszła do produkcji seryjnej, a lokomotywy Lea BM-8 praktycznie zostały wyparte przez lokomotywy Lea BM-12 (rys. 8), które stanowią zdecydowaną większość całego taboru w kopalniach.

Przed przystąpieniem do prac nad nowym rozwiązaniem napędu i sterowania lokomotywy akumulatorowej, przeprowadzono analizę stosowanych napędów w dotychczasowych rozwiązaniach krajowych i zagranicznych oraz konsultacje z użytkownikami w zakresie:

- poziomu napięcia zasilania oraz czasu pracy bez wymiany baterii,

- monitoringu i rejestracji parametrów pracy,
- systemu ładowania baterii,
- charakteru pracy (cykli pracy) oraz konfiguracji tras transportowych,
- sposobu załadunku i wyładunku,
- przewożonych mas i maksymalnych prędkości.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że napięcie zasilania baterii akumulatorów należy pozostawić na dotychczasowym poziomie, z uwagi na obecną infrastrukturę ładowni i znajdujących się na ich wyposażeniu ładowarek. W zakresie czasu pracy baterii oczekiwania idą w kierunku wydłużenia czasu pracy. Jest to możliwe poprzez zwiększenie pojemności baterii akumulatorów i zwiększenie sprawności układu zasilania „przekształtnik-silnik” oraz maksymalne wykorzystanie energii hamowania elektrycznego do doładowania akumulatorów.

Z rozważań nad układem przeniesienia napędu wynika, że dotychczasowy układ, w postaci jednego silnika i przeniesienia napędu na dwie osie za pomocą wałów Kardana, jest awaryjny oraz mało funkcjonalny. Każdorazowa awaria układu napędowego powoduje unieruchomienie lokomotywy. W obecnych wykonaniach brak jest monitoringu i rejestracji wszystkich istotnych parametrów pracy lokomotywy.

W ramach projektu badawczego koordynowanego przez KOMAG, przeprowadzono komputerowe badania symulacyjne, a następnie stanowiskowe, układów napędowych w wykonaniu przeciwwybuchowym, składających się z silnika i przekształtnika energoelektronicznego, zasilanych z baterii akumulatorów. Rozważano trzy warianty jednostek napędowych:

- z silnikiem szeregowym prądu stałego, sterowanym tranzystorami mocy,
- z silnikiem indukcyjnym prądu przemiennego, sterowanym wektorowo z przekształtnika energoelektronicznego,
- z bezszczotkowym silnikiem z magnesami trwałymi, sterowanym wektorowo z przekształtnika energoelektronicznego.

Decyzja o wyborze optymalnego układu napędowego zapadła po badaniach symulacyjnych i na stanowisku badawczym, odwzorowującym wybrany cykl pracy w jednej z kopalń. W wyniku przeprowadzonych badań stanowiskowych napęd z silnikiem bezszczotkowym z magnesami trwałymi osiągnął najwyższe sprawności w zakresie pracy lokomotywy tj. w przedziale 0,4-1,0 mocy znamionowej oraz najwyższe sprawności w czasie hamowania z oddaniem energii do baterii akumulatorów. Rozwiązanie nowatorskie napędu w skali światowej, w postaci silnika z magnesami trwałymi w wykonaniu przeciwwybuchowym poddano próbom w lokomotywie Lea-12BM na torowisku jednej z kopalń. W wyniku pozytywnych wyników podjęto decyzję o wykonaniu

komercyjnym lokomotywy, w której obie jednostki napędowe będą zasilane z baterii akumulatorów o podwyższonej pojemności, lecz o napięciu na dotychczasowym poziomie tj. 144 V. Koncepcję rozwiązania napędu i sterowania przedstawiono na rysunku 9.

Aparatura elektryczna przystosowana będzie do pracy w pomieszczeniach zagrożonych wybuchem metanu i pyłu węglowego oraz będzie dostosowana do istniejącej infrastruktury ładowni akumulatorów.

Koncepcję systemu sterowania oparto na dwóch identycznych, iskrobezpiecznych pulpitych, umieszczonych w kabinach obsługiwanych po uprawnieniu jednego z nich przez maszynistę. Pulpit wyposażony będzie w mikroprocesorowy sterownik spełniający funkcję sterownika centralnego oraz w wyświetlacz ciekłokrystaliczny o wysokiej rozdzielczości, przyciski sterownicze, łączniki wyboru sterowania i kierunku jazdy, stacyjkę oraz diody sygnalizacyjne.

Wyświetlacz ciekłokrystaliczny umożliwi będzie wyświetlanie: komunikatów tekstowych, aktualnych parametrów jazdy, stanu baterii, pobieranych prądów przez silniki, ciśnienia w układzie hamulcowym oraz wybranego rodzaju światła. Do sterowania prędkością oraz hamowaniem przewiduje się zastosowanie, w każdej kabinie, manipulatora z funkcją „czuwaka” i z możliwością nadawania sygnałów ostrzegawczych. Całą aparaturę sterowniczą, wraz z zabezpieczeniami oraz przekształtnikiem energoelektronicznym, przewiduje się umieścić w specjalnej ognioszczelnej skrzyni, za fotelem maszynisty, w każdej z kabin. Sterownik centralny pulpitu będzie się komunikować ze sterownikami lokalnymi przekształtników, baterii akumulatorów oraz koncentratorami sygnałów obsługi-

jącym czujniki zabudowane na lokomotywie i będzie sterować wszystkimi funkcjami lokomotywy.

4. Koncepcja napędu i sterowania dla ciągników akumulatorowych

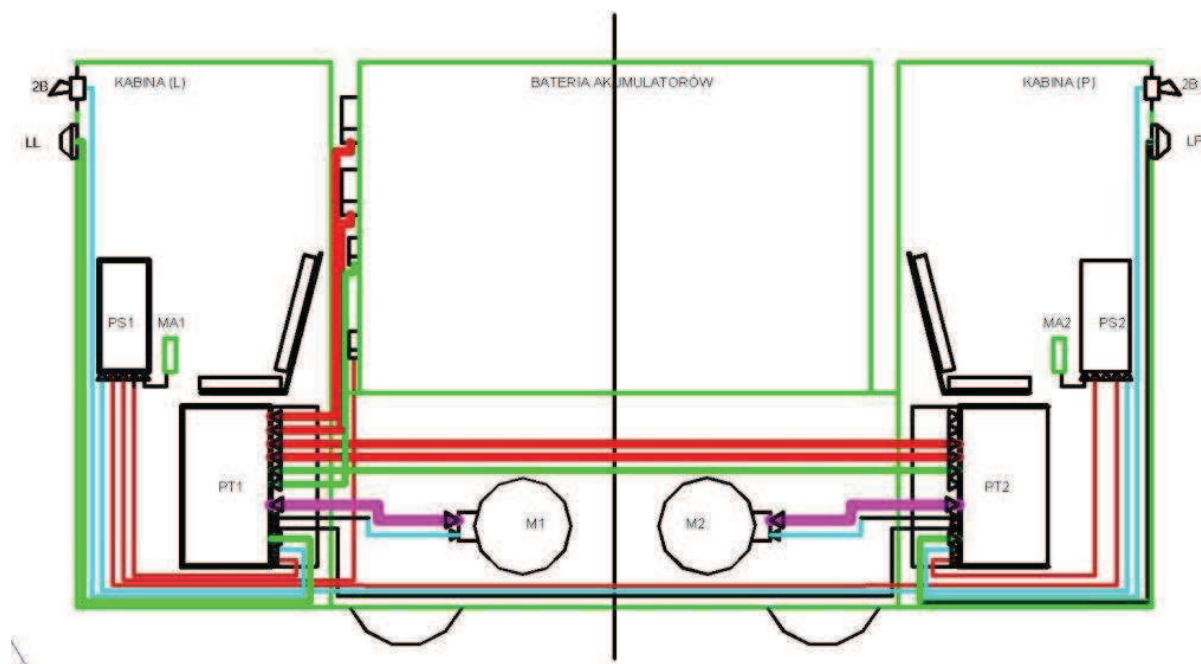
Rozwój ogniw elektrochemicznych w ostatnich latach, a w szczególności całej rodziny ogniw litowych o dużej pojemności charakteryzujących się najwyższym wskaźnikiem gęstości energii, stworzył możliwość zastosowania baterii zestawionej z tych ogniw do zasilania silników elektrycznych ciągników podwieszonych. W KOMAG-u, w roku 2011 powstało nowatorskie, na skalę światową, rozwiązanie zasilania i sterowania akumulatorowych ciągników podwieszonych typu PCA-1 i GAD-1 wyposażonych w ogniwa litowe nowej generacji.

4.1. Innowacyjne rozwiązanie napędu i sterowania ciągnika manewrowego PCA-1

Ciągnik manewrowy PCA-1 (rys. 10) jest nowoczesnym rozwiązaniem, polegającym na zastosowaniu baterii akumulatorów nowej generacji, jako źródła energii dla silników napędowych samohamownych w wykonaniu przeciwwybuchowym.

Układ zasilania i sterowania zaprojektowano w sposób umożliwiający doładowanie baterii akumulatorowych w czasie postoju, na stacjach załadunkowych, za pośrednictwem ogólnodostępnych i stosowanych do oświetlenia ognioszczelnych zespołów transformatorowych.

Za pośrednictwem przekształtnika energoelektronicznego (falownika) następuje zamiana prądu stałego



Rys.9. Koncepcja napędu i sterowania lokomotywy Lea BM-12 [6]

na trójfazowy przemienny o częstotliwości i napięciu regulowanym.



Rys.10. Podwieszony ciągnik akumulatorowy PCA-1 [12]

Zastosowanie mikroprocesorowego sterowania wektorem momentu w czterech ćwiartkach układu *moment-prędkość*, umożliwia pracę z rekuperacją energii w czasie hamowania elektrycznego, znacznie poprawiając sprawność całego ciągnika, co w przypadku napędów akumulatorowych jest bardzo dużą zaletą. W trakcie postoju wyłączone jest zasilanie silników napędowych, a rolę hamulca pełni hamulec elektromagnetyczny zabudowany w silniku elektrycznym.

Zmiana prędkości jazdy oraz hamowanie manewrowe w ciągniku realizowane jest przez zmianę prędkości obrotowej silnika uzyskaną przez odpowiednie wystereowanie falownika. Konstrukcja ciągnika umożliwia elastyczne dostosowanie do wymagań użytkowników, między innymi poprzez współpracę z zestawem transportowym z wciągnikami z napędem ręcznym lub z belką z dwoma wciągnikami z napędem elektrycznym EWŁ-3.

4.2. Innowacyjne rozwiązanie napędu i sterowania ciągnika GAD-1

W rozwiązaniu GAD-1, zastosowano wiele innowacyjnych rozwiązań z zakresu: silników elektrycznych

z magnesami trwałymi, ogniw akumulatorowych, energoelektroniki, układu sterowania oraz układów mechanicznych. Jedną z cech ciągnika jest zdolność dynamicznej zmiany systemu napędowego z ciernego na zębatkowy lub odwrotnie.

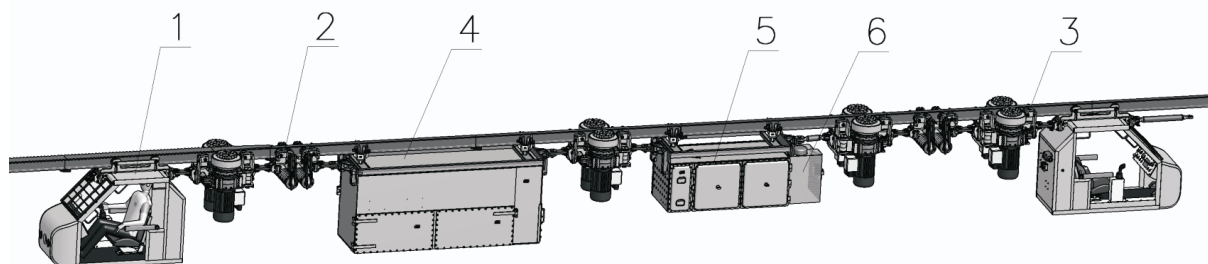
Ogólną budowę ciągnika pokazano na rysunku 11.

Ciągnik GAD-1 składa się z dwóch kabin operatora (1), dwóch podwójnych zespołów hamulcowych (2), czterech wózków napędowych (3), modułu baterii akumulatorów (4), modułu z aparaturą energoelektroniczną i układem sterowania (5), zespołu hydraulicznego do zasilania wózków hamulcowych oraz obsługi belek transportowych (6).

Źródłem zasilania silników wózków napędowych ciągnika jest bateria akumulatorów o napięciu 265 V DC, składająca się z czterech zespołów ogniw litowych o pojemności 150 Ah. Każdy zespół stanowi źródło zasilania dla napędu jednego wózka. Z zespołu czwartego zasilany jest dodatkowo silnik indukcyjny pompy hydraulicznej. Energia z zespołów baterii poprzez złącza ognioszczelne, przewodami dostarczona jest do modułu zasilania, w którym za pośrednictwem ośmiu falowników, uzyskuje się napięcie 3-fazowe o regulowanej częstotliwości i amplitudzie, zasilające osiem bezszczotkowych silników z magnesami trwałymi oraz z dziewiętego falownika o napięciu 188 V i częstotliwości 50 Hz, służącego do zasilania silnika indukcyjnego pompy hydraulicznej. Podczas hamowania silniki generują energię, która poprzez te same falowniki trafia do zespołu ogniw. Układ sterowania czuwa nad tym, aby akumulatory zawsze posiadały zapas pojemności pozwalający na zwrot energii z hamowania.

Urządzenia sterownicze i układy zabezpieczeń znajdujące się w osłonach ognioszczelnych zasilane są napięciem pomocniczym 24 V DC. Urządzenia iskrobezpieczne jak lampy z oświetleniem diodowym, pulpity, rozdzielacze elektrohydrauliczne oraz sygnalizacja ostrzegawcza zasilane są napięciem 12 V DC.

Sterowanie ciągnikiem odbywa się z pulpitu, który uruchomiany jest przez operatora kluczykiem umieszczonym w stacyjce. Układ sterowania ciągnika posiada strukturę rozproszoną, połączoną szeregową cyfrową magistralą CAN.



Rys.11. Widok ogólny ciągnika GAD-1 [10]

Charakteryzuje się ona dużą odpornością na zakłócenia i niezawodnością, co uzyskuje się przez nadawanie danych w postaci napięciowego sygnału różnicowego oraz sprzętowej obsłudze protokołu i kontroli błędów. Magistrale takie są powszechnie stosowane w samochodach, a obecnie coraz częściej znajdują zastosowanie w maszynach górniczych. W systemie zaimplementowany zostanie protokół komunikacyjny CanOpen, którego zaletą jest unifikacja magistrali. Daje to możliwość łączenia podzespołów różnych producentów oraz umożliwia przyłączenie aplikacji przeznaczonej do diagnozowania i konfiguracji magistrali CAN.

Zarządzanie rozdziałem mocy w różnych fazach ruchu (rozruch, jazda ze zmiennym obciążeniem, chwilowe przeciążenia, hamowanie z rekuperacją energii) i w warunkach zmiennego stanu naładowania baterii, wymaga zastosowania wektorowych technik sterowania wielosilnikowym układem napędowym oraz właściwego doboru parametrów komponentów, jak również opracowania algorytmów bezpieczeństwa w maszynie górniczej przeznaczonej do pracy w warunkach zagrożeń skojarzonych (zagrożenie wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego, pożarowe, wodne).

Zasadniczym wyzwaniem w aspekcie układu sterowania było rozwiązanie problemu, związanego z sekwencyjną zmianą trybu napędowego z ciernego na zębaty i odwrotnie, kolejno, przez poszczególne wózki. Każdy z wózków napędowych wyposażono w uchylne ramię, połączone z układem elektrycznym, współpracujące z dwoma znacznikami umieszczonymi na trasie w miejscu zmiany systemu napędowego. Podczas przejazdu układ sterowania otrzymuje dwa sygnały, które uruchamiają odpowiednie procedury mające swoje przełożenie na układ hydrauliczny oraz układ energoelektroniczny. Następuje przesterowanie rozdzielaczy elektrohydraulicznych oraz dopasowanie prędkości obrotowych w silnikach poszczególnych wózków, aż do chwili zakończenia procedury zmiany systemu napędowego.

5. Podsumowanie

Koncepcja KOMAG-u polegająca na zastosowaniu do każdego silnika posuwu w kombajnach ścianowych niezależnego przemiennika częstotliwości sterowanego z mikroprocesorowego sterownika, została przez niektórych producentów wykorzystana w nowych rozwiązaniach kombajnów.

Wzrost efektywności wydobywania wiąże się z koniecznością podnoszenia mocy zainstalowanych w kombajnach. W niedalekiej przyszłości należy zatem oczekiwać podniesienia napięcia zasilania do poziomu 6 kV.

Rozwój energoelektroniki oraz układów mikroprocesorowych pozwala na modernizację maszyn transportu dołowego, w tym lokomotyw elektrycznych. Dotychczasowe rozwiązania układów napędowych wykorzystujące do napędu silniki szeregowo-prądu stałego są nieefektywne i awaryjne. Sprawność silników prądu stałego jest gorsza od silników prądu przemiennego, a konieczność stosowania komutatora mechanicznego, zwiększa koszty wykonania oraz wymaga dodatkowej obsługi związanej z wymianą szczotek. Dodatkowo układ mechanicznego komutatora jest bardzo wrażliwy na przeciążenia i zanieczyszczenia pyłem, co staje się przyczyną awarii. Rozwój nowej generacji akumulatorów litowych o dużej pojemności, pozwala na konstruowanie ciągników podwieszonych będących alternatywą dla ciągników spalinowych charakteryzujących się niską sprawnością energetyczną, emisją hałasu, ciepła oraz toksycznych spalin do atmosfery kopalnianej.

Literatura

1. Budzyński Z., Deja P.: Badania stanowiskowe systemu posuwu kombajnu z dwoma silnikami zintegrowanymi z przemiennikami częstotliwości. *Maszyny elektryczne. Zeszyty problemowe* 2007, nr 76.
2. Budzyński Z., Deja P., Kaczmarczyk K., Suffner H., Pawlicki D.: Kopalniana lokomotywa trakcyjna napędzana nowoczesnymi silnikami z magnesami trwałymi. W: *Innowacyjne i bezpieczne maszyny i urządzenia dla górnictwa węgla kamiennego. KOMTECH 2007. CMG KOMAG, Gliwice 2007.*
3. Budzyński Z., Deja P.: Nowe rozwiązanie sterowania lokomotywy trakcyjnej Ld-31EM. W: *Nowoczesne, niezawodne i bezpieczne systemy mechanizacyjne dla górnictwa. KOMTECH 2008. CMG KOMAG, Gliwice 2008.*
4. Gierlotka S.: Rozwój napędu trakcji elektrycznej w kopalniach. *Przegląd Górniczy*. 2005 nr 2. s 44-48.
5. Hefczyk M., Daniłow J.: Lokomotywy kopalniane ognioszczelne akumulatorowe. Nowe rozwiązania układów sterowania napędem. *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*. 1994 nr 10 (292).
6. Budzyński Z., Polnik B.: Mechatroniczny układ sterowania i napędu akumulatorowych kolei szynowych przeznaczonych do pracy w atmosferze wybuchowej. *Maszyny Górnicze* 2011, nr 2 s. 45-51.
7. Budzyński Z.: Innowacyjne rozwiązania układów sterowania i napędów lokomotyw elektrycznych kopalnianych kolei szynowych. *Maszyny Górnicze* 2010 nr 3-4.
8. Budzyński Z., Czerniak D., Drwięga A., Polnik B., Skupień K.: Akumulatorowy ciągnik podwieszany

-
- GAD-1 jako alternatywa rozwiązań z napędem spalinowym. W: Innowacyjne techniki i technologie dla górnictwa. Bezpieczeństwo - Efektywność – Niezawodność. KOMTECH 2011. Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice 2011 s. 77-84.
9. Budzyński Z., Dobrzaniecki P., Heliński M., Kaczmarczyk K., Polnik B., Suffner H.: Podwieszony ciągnik akumulatorowy PCA-1 kierunkiem rozwoju nowoczesnych urządzeń transportowych. W: Innowacyjne techniki i technologie dla górnictwa. Bezpieczeństwo - Efektywność – Niezawodność. KOMTECH 2011. Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice 2011 s. 253-260.
10. Budzyński Z., Drwięga A., Kaczmarczyk K., Pieczora E.: Nowe rozwiązania urządzeń transportowych z napędem akumulatorowym. W: Materiały XXI Szkoły Eksploatacji Podziemnej 2012, Kraków, 20-24 lutego 2012 s. 444-454.
11. Miastkowska B., Sendrowicz-Muzyka Z., Szczurek A.: Analiza sieci elektroenergetycznych w celu ustalenia poziomu podwyższenia napięcia zasilania 3,3 lub 6 kV. Maszyny Górnicze 1993, nr 43.
12. Dokumentacja fotograficzna ITG KOMAG.

Artykuł wpłynął do redakcji w maju 2013 r.