

Innowacyjne urządzenia transportowe z elektrycznym napędem akumulatorowym

Streszczenie

W urządzeniach transportowych stosowanych w podziemiach kopalń węgla mają zastosowanie głównie napędy spalinowe. Posiadają one wady związane z emitowaniem ciepła oraz toksycznych spalin. Mając na uwadze potrzebę poprawy warunków pracy w podziemiach kopalń w ITG KOMAG opracowano elektryczne maszyny transportowe PCA-1 oraz GAD-1, poruszające się po trasie podwieszanej. Maszyny te są napędzane z baterii akumulatorów składającej się z ogniw litowo-jonowych, o względnie dużej gęstości energii. W artykule omówiono rozwiązania techniczne tych maszyn, omówiono aspekty energetyczne, zagadnienie rekuperacji energii i warunki jakie powinny być spełnione w celu zapewnienia bezpieczeństwa eksploatacji ogniw litowo-jonowych.

Summary

Diesel drives are mainly used in transportation machines operating in coal mines' undergrounds. They have disadvantages associated with emission of heat and toxic exhaust gases. Taking into account the need to improve the work conditions in mines' undergrounds, PCA-1 and GAD-1 electric transportation machines, which move on a suspended track, were developed at the KOMAG Institute of Mining Technology. These machines are driven by a pack of batteries, which consists of lithium-ion cells, of relatively high energy density. Technical solutions of these machines, energy aspects, energy recuperation and conditions that should be met to ensure safe use of lithium-ion cells are discussed.

Słowa kluczowe: kolejka podwieszana, ciągnik podwieszany, napęd elektryczny, bateria akumulatorów, układ BMS, transport kopalniany, zero-emisyjny

Keywords: suspended monorail, suspended drivetrain, electric drive, pack of batteries, BMS system, mine transportation, zero-emission

1. Wprowadzenie

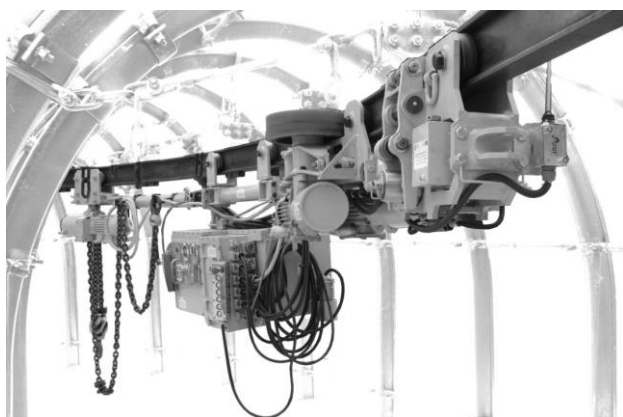
Stosowanie napędów spalinowych w kolejkach podwieszonych i spągowych transportu poziomego, powoduje, że pracownicy odczuwają znaczny dyskomfort pracy związany z dużym stężeniem spalin i emitowanym ciepłem. Przyczyny te skłoniły specjalistów ITG KOMAG do podjęcia prac rozwojowych nad ciągnikami z własnym, akumulatorowym źródłem zasilania. Ich efektem są ciągniki akumulatorowe GAD-1 i PCA-1. W zakresie możliwości technicznych GAD-1 jest odpowiednikiem spalinowych kolejek podwieszonych o nominalnej mocy silnika spalinowego 80 kW. PCA-1 to akronim Podwieszanego Ciągnika Akumulatorowego, który jest przeznaczony do transportu pomocniczego na niewielkich odległościach. Prace studialne nad napędami akumulatorowymi zakładały, że ciągnikom należy zapewnić co najmniej 8 godzinną pracę bez wymiany lub ładowania baterii ogniw, przy zachowaniu ich jak najmniejszej masy. Kryterium to spowodowało konieczność zastosowania nowej generacji ogniw litowych oraz odzyskiwania energii podczas prowadzenia transportu po upadzie, gdy silniki elektryczne pracują generatorowo, spełniając rolę hamulców.

Takie podejście stworzyło jednak szereg problemów związanych z procesem certyfikowania urządzeń w świetle obowiązujących przepisów. Baterie litowe nie mogą być bowiem przeladowywane ani nadmiernie rozładowane, w granicach 20% ich pojemności. Problemy z ich stosowaniem rozwiązano w urządzeniach codziennego użytku jakimi są telefony komórkowe, laptopy, kamery itd. W urządzeniach tych pracą ogniw sterują specjalne układy elektroniczne BMS (Battery Management System), czuwające nad ich poziomem naładowania i rozładowania. W rozwiązaniach przeznaczonych dla podziemi kopalń koniecznym jest stosowanie układów BMS o dużej pewności działania. Należy uwzględnić fakt, że gdyby pierwsza jazda ciągnika z naładowaną baterią, miała odbywać się po upadzie, nie byłoby możliwości hamowania silnikami, ponieważ bateria nie byłaby w stanie przyjąć dodatkowej ilości energii z procesu rekuperacji. W związku z tym, w takich przypadkach należało uwzględnić konieczność utrzymywania pewnego zapasu pojemności akumulatorów na gromadzenie dodatkowej ilości energii. Dotyczyło to głównie ciągnika GAD-1 (rys. 1), który jest przeznaczony do pracy na nachyleniach do 30°.



Rys. 1. Ciągnik GAD-1 pracujący w wyrobisku korytarzowym [8]

Ciągnik PCA-1 (rys. 2) przeznaczony głównie do pracy na trasie poziomej lub nieznacznie nachylonej, i nie dotyczy wyżej opisanej sytuacji. Ewentualne nadwyżki energii zostają bowiem kompensowane oporami ruchu i sprawnością układu odzysku energii.

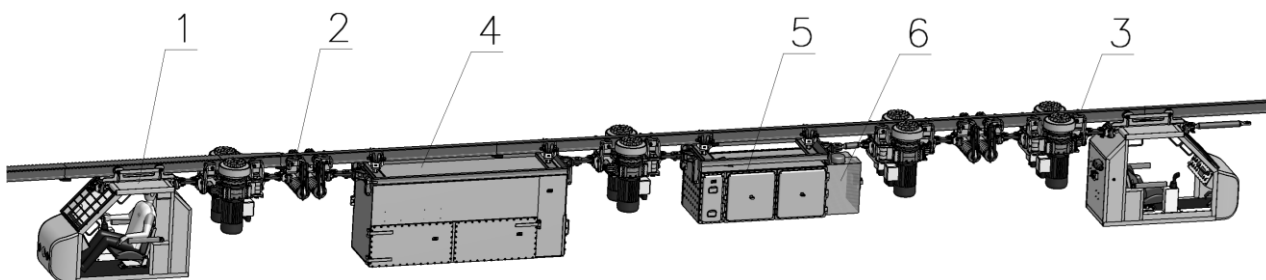


Rys. 2. Ciągnik PCA-1 na stanowisku prób [1]

2. Podwieszony ciągnik akumulatorowy GAD-1

Akronim ciągnika GAD-1 pochodzi od angielskiego określenia Gentle Accumulator Drive, co w zamierzeniu twórców miało charakteryzować, łagodny, akumulatorowy napęd. W rozwiązaniu GAD-1, staraniem kilku zaangażowanych w to przedsięwzięcie firm, zastosowano wiele innowacyjnych rozwiązań tj.: ogniwa akumulatorowe, dynamiczną zmianę systemu napędowego z ciernego na zębatkowy, układu sterowania, energoelektronikę oraz silniki elektryczne z magnesami trwałymi.

Zdolność do dynamicznej zmiany systemu napędowego z ciernego na zębatkowy została umożliwiona dzięki zaawansowanemu technicznie układowi sterowania, który może zmieniać prędkości obrotowe silników napędowych. Ogólną budowę ciągnika pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Widok ogólny ciągnika GAD-1 [4]

Głównymi podzespołami ciągnika GAD-1 są dwie kabiny operatora (1), dwa zespoły hamulcowe (2), cztery wózki napędowe (3) wyposażone w dwa, identyczne, dociskane do siebie zespoły napędowe, skrzynia akumulatorowa (4), skrzynia z aparaturą energoelektroniczną i układem sterowania (5) oraz zespół hydrauliczny do zasilania wózków hamulcowych i obsługi belek transportowych (6).

W zależności od rodzaju trasy jezdnej, która może być tradycyjna, na bazie dwuteownika I155, lub dodatkowo wyposażona w zębatkę, zintegrowaną z górną półką dwuteownika, wózki napędowe (3) mogą pracować ciernie lub zębatkowo. Podczas pracy cierniej, koła cierne są dociskane do bieżni trasy (środek dwuteownika) za pomocą siłownika, natomiast podczas jazdy zębatkowej koła zębate nie są dociskane, ale ich wzajemna odległość, gwarantująca właściwą współpracę z zębatkami, jest ograniczona mechanicznie. Zmiana systemu napędowego z ciernego na zębatkowy stosowana jest głównie w rejonie zmiany nachylenia wyrobiska z mniejszego na większe. Dynamiczny sposób zmiany napędu oznacza, że przy czterech wózkach napędowych, każdy z nich zmienia kolejno system napędowy a w miejscu zmiany część wózków może pracować ciernie, a część zębatkowo. Wiąże się to z różnymi prędkościami silników elektrycznych w poszczególnych wózkach, co stwarza konieczność nadzorowania zmiany trybu napędowego przez układ sterowania, w oparciu o odpowiedni algorytm. 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 przez określone miejsce układ sterowania otrzymuje dwa sygnały, które uruchamiają odpowiednie procedury mające swoje przełożenie na układ hydrauliczny oraz energoelektroniczny. Następuje przesterowanie rozdzielaczy elektrohydraulicznych oraz dopasowanie prędkości obrotowych w silnikach poszczególnych wózków, aż do chwili zakończenia procedury zmiany systemu napędowego. Zagadnienia związane z opracowaniem dynamicznej zmiany systemu napędowego były następujące:

- zmiana dokonywana jest „w ruchu”, kolejno przez cztery wózki napędowe,
- podczas pracy cierniej musi być realizowany docisk kół ciernych,
- podczas pracy zębatkowej docisk jest zbędny,
- wózek napędowy zmieniający system napędu nie generuje siły pociągowej,
- istnieje możliwość spotkania się wierzchołków zębów koła zębatego i zębarki.

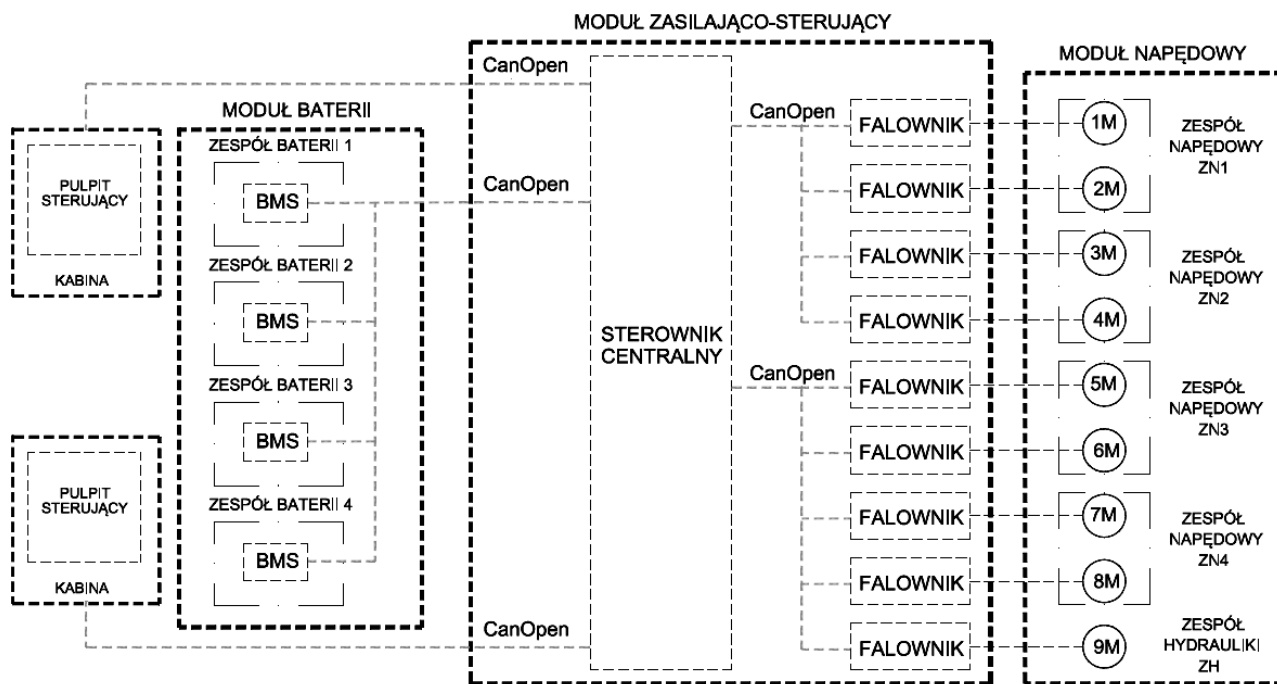
Dynamiczna zmiana systemu napędowego przez silniki elektryczne jest nadzorowana przez sterownik ciągnika, a jej dokonanie wymaga:

- ograniczenia prędkości najazdu w miejscu zmiany systemu napędowego,
- zastosowania znaczników w trasie i układu identyfikacji w wózku napędowym,
- zastosowania klinowej listwy rozbiegowej ze zmniejszonymi pierwszymi zębami,
- przesunięcia początku zębów po jednej i drugiej stronie zębarki,
- wyprzedzającego dostosowywanie prędkości obrotowej silników elektrycznych,
- zwiększenia siły pociągowej przez aktywne trzy napędy o 30%,
- zwolnienia docisku zespołów napędowych w miejscu zmiany systemu napędowego.

Ciągnik wyposażono w dwa zespoły hamulca awaryjno-postojowego (2), którego zadaniem jest zahamowanie ciągnika w miejscu postoju, oraz awaryjne hamowanie w sytuacji awaryjnej. Hamulce są sterowane sterownikiem mikroprocesorowym. Dodatkowo, w celu zwiększenia poziomu bezpieczeństwa w kabinach, zabudowano ręczne zawory hydrauliczne, służące do zahamowania hamulców awaryjno-postojowych. Operator może ręcznie wyzwolić ich działanie w sytuacji zagrożenia lub w sytuacji awarii układu elektronicznego nadzoru pracy ciągnika.

W celu zapewnienia możliwości elastycznego sterowania napędami ciągnika oraz rekuperacji energii przyjęto, że w napędach zostaną zastosowane silniki elektryczne zasilane prądem przemiennym za pośrednictwem elektroenergetycznych przekształtników energii. Silniki elektryczne z magnesami trwałymi, specjalnie dla tego rozwiązania wykonała firma KOMEL. Wykonanie z magnesami trwałymi skutkuje większą sprawnością silników, w porównaniu do tradycyjnych rozwiązań.

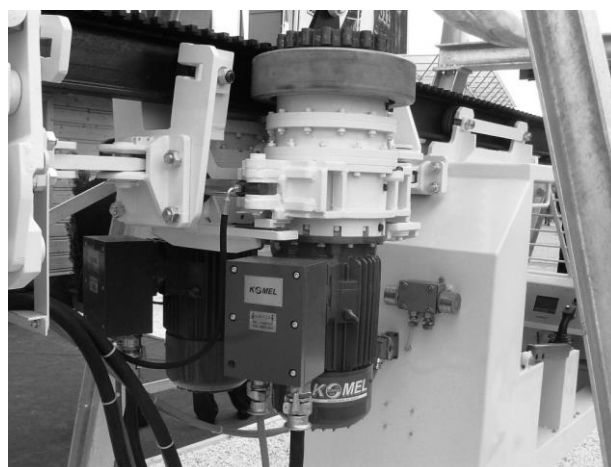
Głównym założeniem, stawianym na etapie tworzenia wyposażenia elektrycznego ciągnika GAD-1, była niezależność źródła zasilania oraz układu napędowego. Dzięki takiemu podejściu, opracowana maszyna może bezpiecznie pracować nawet w sytuacjach awaryjnych. Cel ten uzyskano poprzez zastosowanie czterech niezależnych układów napędowych, wyposażonych w dwa nowoczesne silniki synchroniczne z magnesami trwałymi. Silniki napędowe są sterowane indywidualnie z własnych przekształtników energoelektronicznych. Nad całością logiki sterowania ciągnika GAD-1 czuwa sterownik centralny. Sterownik wyposażony został w szereg modułów I/O, które zbierają informacje, umożliwiając w ten sposób odpowiednie reagowanie sterownika na zmiany zachodzące w trakcie pracy maszyny. Na rysunku 4 pokazano ogólny zarys wyposażenia elektrycznego ciągnika.



Rys. 4. Widok ogólny wyposażenia elektrycznego ciągnika GAD-1 [7]

Źródłem zasilania ciągnika podwieszanego GAD-1 są cztery niezależne zespoły baterii, składające się każda z grupy 72 ogniów, szeregowo połączonych ze sobą. Każdy z czterech zespołów baterii posiada napięcie znamionowe 266 V DC, oraz energię około 40 kWh, co sumarycznie daje 160 kWh dla całego modułu baterii akumulatorów [4]. Zespoły baterii umieszczone są w specjalnej komorze w osłonie ognioszczelnej. Każdy z czterech zestawów bateryjnych stanowi źródło zasilania dla jednego wózka napędowego. Dodatkowo, jeden z zespołów baterii, poza zasilaniem wózka napędowego, służy również do zasilania silnika indukcyjnego pompy hydraulicznej. Energia z każdego z zespołów baterii, poprzez złącza ognioszczelne, dostarczana jest przewodami do modułu zasilająco-sterującego, w którym za pośrednictwem ośmiu falowników uzyskuje się napięcie 3-fazowe o regulowanej częstotliwości i amplitudzie dla każdego z ośmiu silników napędowych. W wózkach napędowych zastosowano bezszczotkowe silniki synchroniczne z magnesami trwałymi (rys. 5).

Zastosowane silniki elektryczne zasilane są napięciem elektrycznym o wartości 150 V AC, każdy z nich generuje moc znamionową 9 kW oraz prędkość obrotową 740 obr/min. Silniki napędowe cechują się wysoką sprawnością (powyżej 90%). Dzięki zastosowanemu sterowaniu wektorem momentu, możliwa jest precyzyjna praca każdego z poszczególnych silników [5].



Rys. 5. Zespół napędowy z bezszczotkowymi silnikami synchronicznymi z magnesami trwałymi typu SMwsPA132M61 [6]

Zespół aparatury energoelektronicznej wyposażono ponadto w dziewięć falownik służący do zasilania silnika indukcyjnego pompy hydraulicznej. Silnik ten zasilany jest napięciem elektrycznym o wartości 188 V AC i częstotliwości 50 Hz. Sterownik centralny, umiejscowiony również w skrzyni aparatury elektrycznej wraz z układami zabezpieczeń, zasilany jest poprzez przetwornicę DC/DC napięciem pomocniczym o wartości 24 V DC. Wszystkie urządzenia iskrobezpieczne, takie jak: lampy diodowe, pulpity sterownicze czy rozdzielacze elektrohydrauliczne zasilane są napięciem 12 V. Cały proces sterowania odbywa się z pulpitu

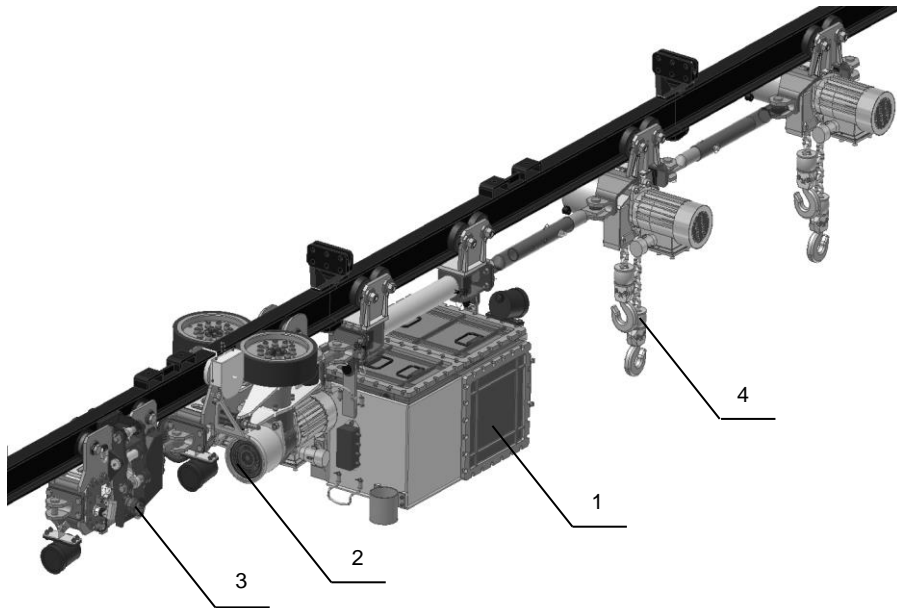
sterowniczego umieszczonego w jednej z kabin (w zależności od kierunku jazdy), po wcześniejszym jej upoważnieniu przez operatora maszyny. Podwieszony ciągnik akumulatorowy GAD-1 wyposażono ponadto w możliwość zdalnego sterowania za pośrednictwem pilota radiowego. Sterowanie takie przewidziano na potrzeby prac manewrowych. Nadrzędny system sterowania ciągnikiem GAD-1 zbudowano w oparciu o strukturę rozproszoną, łączącą ze sobą wszystkie elementy układu sterowania za pośrednictwem magistrali CanOpen. Cyfrowa magistrala dzięki przesyłaniu danych w postaci napięciowego sygnału różnicowego, cechuje się wysoką odpornością na zakłócenia docierające z urządzeń peryferyjnych, a co za tym idzie dużą, niezawodnością [5]. Do tej pory protokół ten nie znajdował dużego zastosowania w przemyśle górniczym. Stosowany jest natomiast powszechnie w branży motoryzacyjnej, skąd też zaczerpnięto pomysł na koncepcję sterowania ciągnikiem podwieszonym GAD-1. Uniwersalność zastosowanego protokołu CanOpen pozwala na komunikowanie się podzespołów różnych producentów oraz umożliwia przełączanie pomiędzy aplikacjami do diagnozowania i konfiguracji magistrali komunikacyjnej. Inteligentne sterowanie, dzięki zastosowanemu wektorowemu sterowaniu układem wielosilnikowym umożliwia precyzyjne zarządzanie rozplływem mocy, w zależności od aktualnego stanu pracy maszyny. Dużym atutem podwieszoności ciągnika GAD-1 jest możliwość zwrotu energii do baterii akumulatorów podczas hamowania elektrycznego. Każdy z silników napędowych w trakcie hamowania pracuje jako prądnica. Generowany przez nie prąd, poprzez falownik jest kierowany do akumulatora. Wynika stąd konieczność utrzymywania pewnego zapasu pojemności akumulatorów na gromadzenie dodatkowej ilości energii. Z problemem tym wiąże się ściśle bilans energetyczny związany z kierunkiem transportu ładunków po wzniosie i nachyleniu, o czym szerzej napisano w rozdziale 4 niniejszego artykułu. Za poprawność działania baterii akumulatorów, zarówno w czasie pracy, jak i podczas ładowania ogniw, odpowiada inteligentny system nadzoru nad zespołem baterii – BMS z ang. battery management system [4]. System ten służy do ciągłego monitoringu parametrów zespołu baterii, a także każdego ogniwa indywidualnie. Decyduje on o równomiernym rozplwywie energii pomiędzy poszczególnymi ogniwami podczas hamowania elektrycznego z odzyskiem energii. Dodatkowo BMS pełni rolę inteligentnego zabezpieczenia, zarówno programowego jak i sprzętowego, przed niepożądanymi zdarzeniami, takimi jak np. przeładowanie, czy nadmierne rozładowanie. Odpowiedni dobór parametrów komponentów współpracujących z zespołem baterii oraz opracowanie algorytmów bezpieczeństwa przyczyniło się znacząco do stworzenia maszyny górniczej przeznaczonej do pracy w warunkach zagrożeń skojarzonych (zagrożenie wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego, pożarowe, wodne).

3. Podwieszony ciągnik akumulatorowy PCA-1

Podwieszony ciągnik akumulatorowy PCA-1 jest urządzeniem dostosowanym do poruszania się po podwieszonych trasach jezdnych na bazie profilu dwuteowego I155. Urządzenie przewidziane jest do prac manewrowych prowadzonych w wyrobiskach zagrożonych atmosferą wybuchową, w szczególności gazu i/lub pyłu węglowego. Rozwiązania konstrukcyjne zastosowane w ciągniku PCA-1 pozwalają na eksploatację urządzenia, między innymi w: koksowniach, rafineriach, fabrykach farb i lakierów oraz w kopalniach soli, rud i węgla.

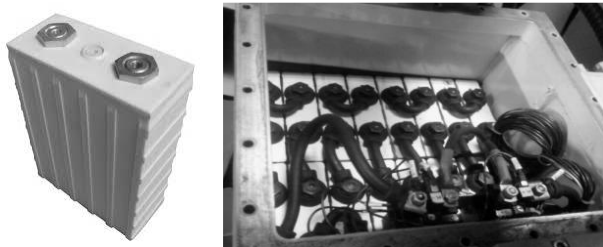
Przemieszczanie zestawu transportowego po jezdni podwieszonych realizowane jest za pomocą wózka napędowego (2) wyposażonego w dwa napędy cierne z zabudowanymi silnikami elektrycznymi. Silniki elektryczne zasilane są z baterii akumulatorów zabudowanych w zespole zasilania (1). W przypadku stosowania ciągnika na nachyleniach trasy jezdnej powyżej 4°, może być on dodatkowo wyposażony w niezależny wózek awaryjnego hamowania (3). Konstrukcja układu zasilania i sterowania umożliwia doładowanie baterii akumulatorowych poprzez podłączenie, z wykorzystaniem przyłącza ognioszczelnego, do źródła zasilania. Zastosowane rozwiązania techniczne pozwalają na ładowanie baterii również w przestrzeniach zagrożonych atmosferą wybuchową. Zmiana prędkości jazdy oraz hamowanie manewrowe w ciągniku realizowane jest przez zmianę prędkości obrotowej silników napędowych przez odpowiednie wystawienie falownika. Konstrukcja ciągnika umożliwia elastyczne dostosowanie do wymagań użytkowników, między innymi, poprzez współpracę z zestawem transportowym (4) z wciągnikami z napędem ręcznym lub z wciągnikami z napędem elektrycznym EWŁ-3 [2].

W przypadku zastosowania dwóch wciągników z napędem elektrycznym cała aparatura elektryczna wciągnika umieszczona jest w skrzyni aparaturowej (zintegrowane zasilanie oraz sterowanie). Podnoszenie i opuszczanie ładunku odbywa się dla każdego wciągnika osobno i jest sterowane z kasety połączonej przewodowo ze skrzynią aparaturową. Z kasety można awaryjnie wyłączyć zasilanie wciągników, co powoduje wyłączenie obu silników i ich samoczynne zahamowanie. Ciągnik PCA-1 przystosowany jest do sterowania przewodowego lub radiowego. Podstawowym elementem ciągnika PCA-1 jest moduł zasilania MZ-1. Wewnętrzna część tego modułu składa się z trzech komór: przyłączowej, aparaturowej i akumulatorowej. Komora przyłączowa, w której znajdują się listwy zaciskowe połączona jest za pomocą izolatorów przepustowych z komorą aparaturową, w skład której wchodzi wszystkie elementy wyposażenia elektrycznego [3]. Z kolei komora aparaturowa połączona jest za pomocą izolatorów przepustowych z komorą akumula-



Rys. 6. Podwieszony ciągnik PCA-1/ZT [1]

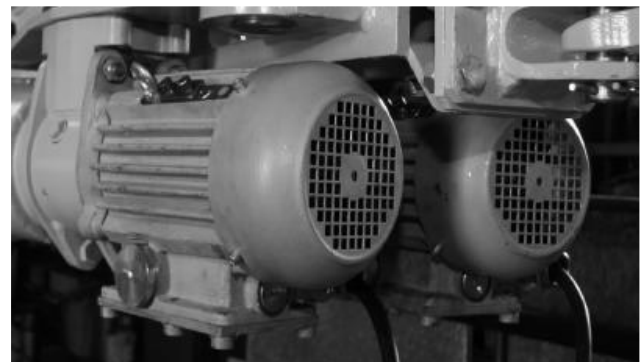
torową. Zastosowanie ciągnika PCA-1 w zdecydowany sposób może poprawić warunki klimatyczne, przyczyniając się do zwiększenia komfortu pracy. Możliwość ładowania baterii ciągnika w miejscu pracy eliminuje stratę czasu związaną z przejazdem urządzenia do zajezdni w celu jej doładowania. Źródłem zasilania w ciągniku PCA-1 są nowoczesne ogniwa litowo-jonowe typu LiFePO₄ (rys. 7) o napięciu znamionowym 3,2 V oraz pojemności znamionowej 100 Ah.



Rys. 7. Widok pojedynczego ogniwa oraz całej baterii zastosowanej w ciągniku PCA - 1 [3]

Bateria akumulatorów, zbudowana z ww. ogniw umożliwia zasilanie napięciem elektrycznym o wartości 48 V DC (piętnaście ogniw połączonych szeregowo), o łącznej energii 4,8 kWh. Układ napędowy podwieszonoakumulatorowego ciągnika PCA-1 składa się z dwóch silników elektrycznych, podłączonych wspólnie do jednego falownika. Zastosowany falownik typu FNTGpca-2-48-KG posiada funkcję ładowania akumulatorów. W celu naładowania baterii akumulatorów należy w ciągniku PCA-1 przestawić przełącznik w pozycję ładowania.

Spowoduje to przejście do pracy z ładowaniem akumulatorów z sieci, po uprzednim podłączeniu złącza ZW-40 do zespołu transformatorowego. W stanie pracy ładowania nie jest możliwe uruchomienie żadnego z silników ciągnika. Zastosowane silniki indukcyjne (rys. 8) mają moc 1,1 kW.



Rys. 8. Silnik górniczy samohamowny o mocy 1,1 kW typu SGK80-4Hp [3]

Napięcie znamionowe silników to 3x230 V, zaś ich nominalna prędkość obrotowa wynosi 1348 obr/min. Silnik wyposażono w tarczowy hamulec, który włączany jest sprężynowo po wyłączeniu napięcia zasilającego. Znamionowy moment hamujący wynosi 20 Nm. Urządzenie posiada możliwość rekuperacji energii w trakcie hamowania elektrycznego, co dodatkowo poprawia właściwości energetyczne opracowanego rozwiązania. Ważną rolę w wyposażeniu elektrycznego ciągnika PCA-1 pełni system kontrolno-zabezpieczający baterii akumulatorów (BMS). System

ten jest kluczowym komponentem baterii składających się z większej ilości ogniw. Poprzez pomiary i kontrolę głównych parametrów ogniw, monitoruje on ich stan, zapewniając tym samym bezpieczeństwo. Ciągnik wyposażono w układ monitoringu stanu naładowania baterii akumulatorów, który połączono z zespołem sygnalizacyjnym. W zespole sygnalizacyjnym znajdują się cztery diody LED, oznaczone jako "10%, 40%, 70% i 100%", informujące o aktualnym stanie naładowania baterii akumulatorów. Zasada działania układu do monitoringu stanu naładowania baterii akumulatorów polega na ciągłym pomiarze prądu pobieranego przez układ napędowy i podczas ładowania oraz na pomiarze napięcia na zaciskach wyjściowych baterii akumulatorów. Aby odpowiednio skonfigurować układ monitoringu stanu naładowania, należało wyznaczyć charakterystykę rozładowania baterii akumulatorów. Na podstawie charakterystyki rozładowania powstała charakterystyka stanu naładowania, która jest programowo zapisywana do pamięci układu monitoringu stanu naładowania baterii akumulatorów [3].

4. Zagadnienia energetyczne i warunki bezpiecznego stosowania napędów akumulatorowych

W przypadku ciągnika PCA-1, który jest przeznaczony do niewielkich nachyleń, maksymalnie do 12°, nie istnieje możliwość wystąpienia dodatniego bilansu energii z procesu rekuperacji. Ciągnik GAD-1 poruszający się w wyrobiskach nachylonych do 30°, winien dysponować zapasem energii do wykonania prac w ciągu jednej zmiany. Taki warunek uznano za konieczny, aby ciągnik był akceptowalny przez użytkowników. Bilans zmianowej pracy akumulatorowego ciągnika podwieszono jest zależny od bilansu energii poszczególnych cykli pracy. Zwykle są to cykle powtarzalne, odbywające się pomiędzy miejscami załadunku i rozładunku. Miejsca te mogą znajdować się na różnych wysokościach. Bilans energii jest zatem uzależniony od różnicy wysokości, długości i nachylenia odcinków trasy, sprawności mechanicznej i elektrycznej napędów w pracy silnikowej oraz sprawności układu odzysku energii podczas pracy generatorowej silników. Przed rozpoczęciem transportu, w sytuacji gdy pierwszy transport lub jazda ciągnika po ładunek będzie się odbywał po upadzie, poziom naładowania akumulatora przed rozpoczęciem pracy będzie musiał uwzględniać zapas pojemności do gromadzenia energii, jaka powstaje w procesie hamowania silnikami. Poziom naładowania powinien być skalkulowany w oparciu o następujące czynniki bilansu energii:

- przyrost lub redukcja energii potencjalnej ładunku i/lub ciągnika,

- straty energii na pokonanie oporów ruchu, na poszczególnych odcinkach trasy,
- straty energii w pracy silnikowej, proporcjonalnej do iloczynu sprawności urządzeń mechanicznych i elektrycznych ciągnika,
- straty energii w pracy generatorowej, proporcjonalnej do iloczynu sprawności urządzeń mechanicznych i elektrycznych.

W celu zilustrowania czynników bilansu energii, można przeanalizować hipotetyczną sytuację, gdy transport będzie odbywał się na odcinku drogi o długości 1 km na nachyleniu 20° (różnica wysokości $h=342$ m). Transportowany ładunek to sekcja obudowy o masie 12 ton, a masa ciągnika 12 ton. Transport obudowy odbywa się po upadzie, a powrót ciągnika realizowany jest tą samą trasą, po wzniosie.

W wyżej omówionej sytuacji, różnica energii potencjalnej na początku i końcu drogi transportu wynosi 80,5 MJ.

Gdyby nie istniały opory ruchu, a wszystkie sprawności układów mechanicznych i elektrycznych ciągnika wystąpiłyby w 100%, to obliczona energia zwiększyłaby stopień naładowania baterii akumulatorów, (zestaw transportowy byłby hamowany silnikami). Podczas drogi powrotnej ciągnik zużywałby tylko 50% tej energii, zatem bilans energii w baterii akumulatorów byłby dodatni i wynosiłby 40,25 MJ. Uwzględniając pozostałe czynniki bilansu energii, można założyć, że opory ruchu (czynnik nr 2) wyrażone siłą potrzebną do ich pokonania wynoszą, 5000 N. Wówczas energia do pokonania oporów ruchu wynosi 5 MJ.

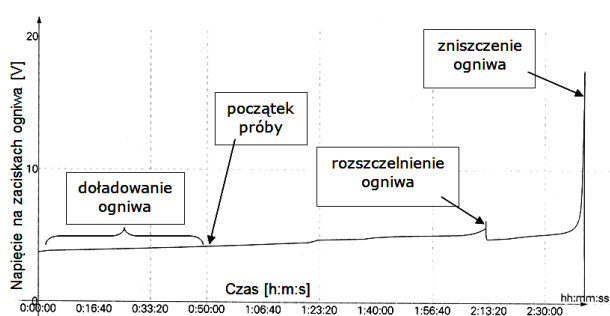
Ponieważ w drodze powrotnej na pokonanie oporów ruchu również potrzebna ok 5 MJ energii, to całkowita strata energii w dwu kierunkach wyniesie 10 MJ. Bilans energii akumulatora byłby zatem dodatni i wynosiłby 30,25 MJ.

Zakładając, że podczas pracy silnikowej i generatorowej sumaryczne sprawności mechaniczne i elektryczne są jednakowe i kształtują się na poziomie 0,7 można oszacować bilans energetyczny, uwzględniając czynniki 3 oraz 4. Przyrost energii akumulatora po dostarczeniu sekcji obudowy i po wykonaniu transportu po upadzie wyniesie 52,85 MJ natomiast zużycie energii na drogę powrotną wyniesie 65,00 MJ.

Zatem dla rozpatrywanego przypadku, przyrost energii w akumulatorze będzie ujemny (-12,15 MJ), nie zachodzi obawa o możliwość utraty zdolności gromadzenia energii w baterii akumulatorów. Przeprowadzone obliczenia wykazały, że z powodu określonych sprawności układu mechaniczno-elektrycznego, przypadek dodatniego bilansu energetycznego w powtarzalnym ruchu wahadłowym po tej samej trasie, nie jest możliwy. Należy jednak zawsze mieć na

uwadze fakt, że w przypadku zaplanowanej, pierwszej jazdy po upadzie, w baterii akumulatorów powinien być zapas na przyjęcie energii z procesu rekuperacji. W odniesieniu do omawianego przypadku, należałoby w akumulatorze pozostawić zdolność gromadzenia energii w ilości 52,85 MJ. Sytuację taką można zawsze przewidzieć i doładować baterię w takim stopniu, aby zagwarantować zrealizowanie wszystkich funkcji ciągnika, w konkretnej sytuacji planowanego transportu.

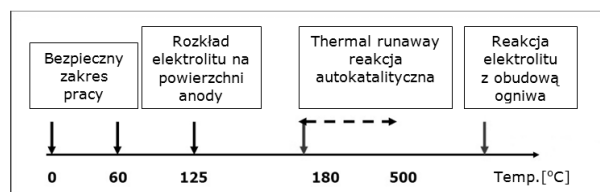
Zastosowanie jako źródła energii ogniw litowo-jonowych wymaga stosowania układów nadzoru pracy tak zwanych układów BMS (Battery Management System). Ogniwa bez takich systemów, w sytuacji przeładowania mogą być niebezpieczne. Na rysunku 9 przedstawiono przebieg i efekt eksperymentu nadmiernej ładowania ogniwa.



Rys. 9. Przebieg napięcia na zaciskach ogniwa podczas próby przeładowania aż do fizycznego zniszczenia badanego ogniwa [7]

Od rozpoczęcia przeładowania do momentu rozszczelnienia ogniwa napięcie bardzo powoli stale narasta. Po rozszczelnieniu, które wystąpiło przy napięciu 6,2 V następuje spadek napięcia na zaciskach do wartości 4,8 V, od tego momentu napięcie na zaciskach ogniwa ponownie narasta. Po wzroście napięcia do wartości około 7 V następuje proces powodujący poza wzrostem temperatury (thermal runaway), gwałtowny wzrost napięcia do wartości około 17 V, po którym następuje zapłon i zniszczenie. Wszystkie opisane zjawiska wynikają ze wzrostu temperatury jaki towarzyszy przeładowaniu ogniwa. Jak wynika z rysunku 10 ogniwo pracuje bezpiecznie przy temperaturze nie przekraczającej 100°C. Przy około 125°C zaczyna się proces rozkładu elektrolitu na powierzchni anody. Proces ten zewnętrznie można zidentyfikować na podstawie ciągłego wzrostu temperatury ogniwa, w stosunkowo krótkim czasie. W tym momencie można jeszcze przerwać reakcję poprzez zaprzestanie ładowania ogniwa. W przeciwnym przypadku, gdy temperatura we wnętrzu ogniwa osiągnie wartość około 180°C nastąpi proces niekontrolowanego gwałtownego wzrostu temperatury, który już jest nie do zatrzymania. Proces ten jest procesem autokatalitycznym. W momencie gdy temperatura osiągnie wartość powyżej 500°C

pozostałości wygotowanego elektrolitu zaczną reagować z obudową ogniwa, powodując przeważnie jej zapalenie, o ile wcześniej żaden z gazów znajdujących się we wnętrzu ogniwa nie zapalił się [7].



Rys. 10. Zjawiska towarzyszące przeładowaniu ogniwa w funkcji temperatury [7]

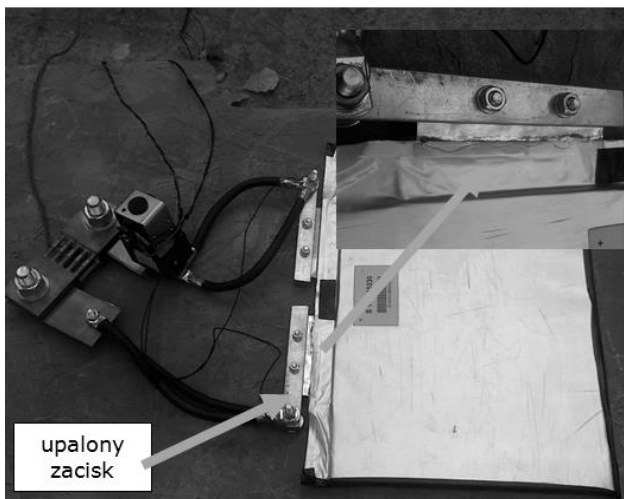
W ciągniku GAD-1, za bezpieczeństwo pracy baterii ogniw litowych odpowiada wspomniany system BMS, który jest odpowiedzialny za:

- ochronę baterii przed uszkodzeniem,
- przedłużenie żywotności baterii,
- utrzymanie pożądanego stanu naładowania baterii,
- współdziałanie z oprogramowaniem zewnętrznym.

Istotną funkcją BMS jest monitorowanie i kontrola ogniw przed działaniem w niesprzyjających warunkach. Jest to szczególnie istotne ze względu na bezpieczeństwo eksploatacji. Ciągłe monitorowanie pojedynczych ogniw sprawia, że są one chronione przed uszkodzeniami spowodowanymi, przeładowaniem lub niedoładowaniem tak, aby ich żywotność nie została zmniejszona (ograniczona). System zarządzania bateriami zapewnia optymalny algorytm ładowania, dzięki czemu wszystkie ogniwa pozostają na pożądanym poziomie.

Poza systemem BMS, ciągnik akumulatorowy GAD-1, wyposażony jest w szereg zabezpieczeń, przeciwko zwarciom, przepięciom, czy też wysokiej temperaturze. Są to niezależne urządzenia działające w układzie redundantnym. Poza aparaturą zabezpieczeniową, technologia ogniwa jest realizowana w sposób zabezpieczający przed zwarciami. Jedną z elektrod ogniwa wykonana jest z aluminium, zaś druga z niklu. W trakcie wystąpienia zwarcia na ogniwie, elektroda aluminiowa ulega przepaleniu, przerywając tym samym przepływ prądu zwarcia i zabezpiecza ogniwo przed konsekwencjami wzrostu temperatury, o których była mowa wcześniej. Na rysunku 11 pokazano widok ogniwa poddanego próbie zwarcia metalicznego.

Z punktu widzenia bezpieczeństwa, można stwierdzić, że zastosowana w ciągniku GAD-1 bateria jest bezpieczna, ponieważ jej praca jest nadzorowana, a analiza możliwych konfiguracji tras wykazała, że w praktyce nie jest możliwe osiągnięcie wartości parametrów elektrycznych jakie zadawano podczas próby przeładowania ogniwa. Pomimo tych wszystkich zabezpieczeń, w ciągniku GAD-1 postanowiono



Rys. 11. Widok ogniwa po przeprowadzonej próbie zwarcia metalicznego [7]

pozostawić pewien bufor pojemności, na wypadek zaistnienia sytuacji, podczas której ciągnik z pełni naładowaną baterią oraz obciążeniem zaczyna pracę jadąc po upadzie, generując prąd, który będzie doładowywał baterię.

5. Podsumowanie

Tendencje rozwojowe systemów transportowych w podziemnych zakładach górniczych wskazują na duże zainteresowanie napędami akumulatorowymi. Zastosowanie najnowocześniejszych ogniw litowych znacznie wpłynęło na efektywność, bezpieczeństwo i komfort pracy. Ciągnik GAD-1 od czasu wdrożenia pracuje już w kilku kopalniach. W opinii pracowników kopalń jest to rozwiązanie przyjazne dla ludzi i środowiska. Pomimo wysokiej ceny na dzień dzisiejszy (wynikającej w znaczącym stopniu z kosztów nowoczesnej technologii baterii akumulatorów) ciągnik ten jest zdecydowanie tańszy w trakcie eksploatacji. Ponadto na podstawie komentarzy obsługujących ciągnik GAD-1 górników, maszyna ta jest praktycznie bezawaryjna, a źródło zasilania wystarcza na dłużej niż ma to miejsce w innych maszynach akumulatorowych. Ciągnik PCA-1 cieszy się ogromnym zainteresowaniem ze strony kopalń. Na dzień dzisiejszy maszyna przeszła wszystkie wymagane badania związane z procesem certyfikacji i oczekuje na wdrożenie. Wdrożenie innowacyjnego ciągnika PCA-1 zmniejszy uciążliwość prac manewrowych związanych z dostawą elementów na odcinkach od dworców materiałowych do przodków chodnikowych. Dzięki zastosowaniu innowacyjnego systemu aktywnego balansowania

ogniw, wpłynęło na poprawę bezpieczeństwa pracy maszyny oraz żywotność zastosowanych ogniw litowych. Udowodnienie bezpieczeństwa proponowanych rozwiązań z zasilaniem akumulatorowym, zwłaszcza z uwagi na brak dotychczas tego typu maszyn oraz brak przepisów umożliwiających stosowanie tych ogniw w warunkach potencjalnie zagrożonych wybuchem, było ogromnym wyzwaniem, zakończonym w efekcie znaczącym sukcesem firm tworzących konsorcjum naukowo-przemysłowe.

Literatura

1. Budzyński Z., Kaczmarczyk K., Pieczora E.: Akumulatory nowej generacji w górniczych systemach transportowych na przykładzie ciągnika PCA-1. Napędy Sterowanie. 2012 nr 2 s. 108-111.
2. Kaczmarczyk K., Budzyński Z.: Ciągnik akumulatorowy PCA-1 do prac transportowych w wyrobiskach korytarzowych. Maszyn Górnicze 2011 nr 3 s. 48-52.
3. Konsek R.: Nowoczesny napęd akumulatorowy ciągnika PCA-1 jako alternatywa dla obecnie stosowanych napędów w ciągnikach transportowych. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne nr 2/2012 s. 1-5.
4. Mróz J., Skupień K., Drwięga A., Budzyński Z., Polnik B., Czerniak D., Dukalski P., Brymora L.: Gentle accumulator drive (GAD) - new directions of development for the mining industry. Przegląd Elektrotechniczny 2013 nr 6 s. 205-209.
5. Drwięga A., Budzyński Z., Polnik B., Czerniak D., Skupień K.: „Akumulatorowy ciągnik podwieszany GAD-1 jako alternatywa rozwiązań z napędem spalinowym”. Innowacyjne techniki i technologie dla górnictwa. Konferencja KOMTECH 2011.
6. Polnik B.: Silnik PMSM jako nowoczesny napęd w górniczych systemach transportowych. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne 2012 nr 94 s. 81-86.
7. Prace własne ITG KOMAG – materiały nie publikowane.
8. Materiały reklamowe firmy NAFRA Sp. z o.o.

Artykuł wpłynął do redakcji w lipcu 2015 r.