

Jarosław Mróz, Vacat, Rybnik
Krystian Skupień, Nafra, Wilków
Andrzej Drwięga, Zdzisław Budzyński, Bartosz Polnik, Dariusz Czerniak
ITG KOMAG, Gliwice
Piotr Dukalski, Leszek Brymora, BOBRME KOMEL, Katowice

AKUMULATOROWY CIĄGNIK PODWIESZANY GAD-1 Z INNOWACYJNYM NAPĘDEM JAKO ALTERNATYWA ROZWIĄZAŃ Z NAPĘDEM SPALINOWYM

SUSPENDED BATTERY LOCOMOTIVE GAD-1 WITH AN INNOVATIVE DRIVE AS AN ALTERNATIVE SOLUTION OF A COMBUSTION ENGINE

Abstract: GAD-1 suspended locomotive with battery electric drive equipped with the batteries of new generation can be advantageous alternative to diesel transportation machines. It can significantly improve air quality in underground mine workings, where in the result of increasing number of diesel drives in suspended monorails and floor-mounted railways the workers are exposed to high concentration of exhaust gases and generated heat. The locomotive can also generate pulling force in rack-and-pinion and friction drive system. Design of GAD-1 battery locomotive together with electric system as well as the method of drive replacement are discussed.

1. Wstęp

Wzrastająca liczba napędów spalinowych w podziemiach kopalń węgla stwarza znaczny dyskomfort pracy związany ze stężeniem spalin i emitowanym ciepłem. Prezentowany w artykule ciągnik podwieszony o napędzie akumulatorowym GAD-1, wyposażony w ogniwa najnowszej generacji, może być korzystną alternatywą w stosunku do urządzeń transportowych o napędzie spalinowym. Napęd ciągnika oferuje wiele nowoczesnych rozwiązań, które znakomicie sprawdzają się w napędach oraz urządzeniach wywodzących się z różnych gałęzi przemysłu. Głównym pomysłem jaki został zaadoptowany (po raz pierwszy w górnictwie!) jest źródło zasilania ciągnika w postaci baterii litowo-jonowych.

Pod względem siły uciążu GAD-1 jest porównywalny do ciągnika spalinowego o mocy silnika 80 kW. Może przyczynić się do poprawy jakości powietrza w podziemnych wyrobiskach kopalń węgla i zwiększenia komfortu pracy. Prototyp ciągnika zaprezentowano na Międzynarodowych Targach Górnictwa Energetyki i Metalurgii w Katowicach w 2011r. Była to okazja nie tylko do zobaczenia wykonanej kolejki górniczej, ale również okazja by zasiąść za sterami GAD'a i wykonać jazdę próbną ponieważ funkcjonujący ciągnik został zawieszony

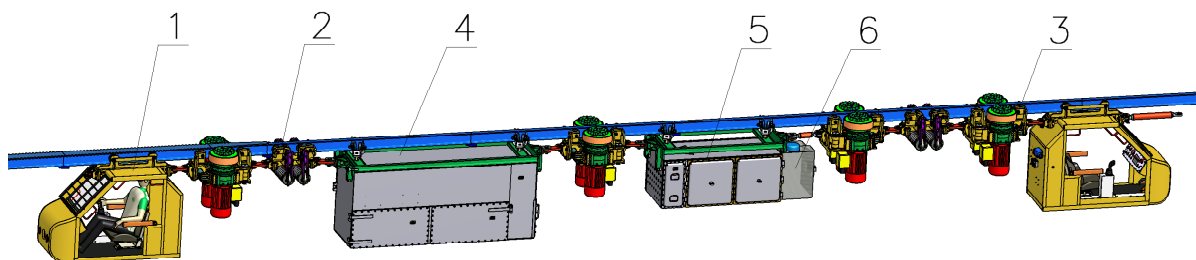
na specjalnie zmontowanym na rzecz targów torze (Rysunek 1). Nazwa ciągnika GAD-1 jest skrótem z angielskiego *Gentle Accumulator Drive*. Słowo *gentle* w tym przypadku można rozumieć jako cichy, łagodny z uwagi na stosunkowo bezgłośny charakter pracy w stosunku do rozwiązań napędów spalinowych. Można było się o tym przekonać podczas targów, porównując pracę opisywanego napędu z rozwiązaniami innych firm.

Innowacyjny napęd górniczy do pracy w strefach zagrożonych wybuchem pyłu oraz metanu cieszył się podczas targów dużym zainteresowaniem reprezentantów firm związanych z przemysłem górniczym, jak i kopalń zarówno z Polski, jak i z zagranicy. Zainteresowanie GAD'em ciągle rośnie.

Pionierskie prace związane z nowym rozwiązaniem realizowane są przez ITG KOMAG, wspólnie z firmą NAFRA oraz VACAT, w ramach projektu celowego dofinansowywanego przez Naczelną Organizację Techniczną. W przedsięwzięciu bierze udział kilka innych firm związanych z technologią baterii litowo-jonowych, sterowaniem nowoczesnych napędów oraz produkcją urządzeń górniczych.



Rys.1. Ciągnik GAD-1 eksponowany na targach w Katowicach



Rys.2. Widok ogólny ciągnika GAD-1

W projekt zaangażowany jest również instytut BOBRME KOMELI, który zaprojektował i wykonał nowoczesne silniki z magnesami trwałymi w wykonaniu specjalnym, dedykowanym do pracy w napędzie ciągnika kopalni w strefach zagrożonych wybuchem pyłu węglowego oraz metanu.

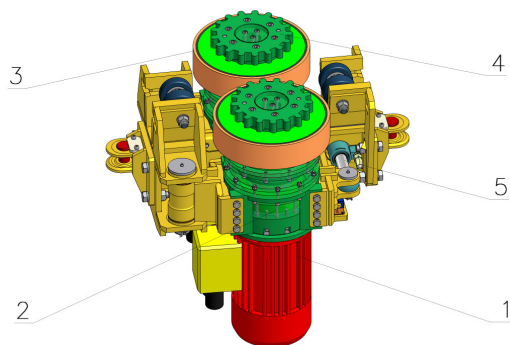
Jedną z głównych zalet proponowanego rozwiązania układu napędowego jest również odzyskiwanie energii podczas hamowania dzięki czemu wydłuża się czas eksploatacji do kolejnego ładowania baterii akumulatorów. Bardzo istotną zaletą rozwiązania jest zapewnienie możliwości generowania siły pociągowej w klasycznym systemie ciernym, jak również w systemie zębatkowym. Przejście z jednego systemu napędowego na drugi odbywa się dynamicznie, bez potrzeby zatrzymywania.

Prace studialne nad napędem wykazały, że warunkiem sukcesu we wdrożeniu ciągnika z za-

silaniem akumulatorowym będzie zapewnienie co najmniej 8-godzinnej pracy bez wymiany baterii akumulatorów, przy zachowaniu jak najmniejszej masy ciągnika. Z uwagi na niekorzystny wskaźnik gęstości energii tradycyjnych, kwasowych ogniw akumulatorowych, jedynym sposobem osiągnięcia założonego celu, jest zastosowanie nowej generacji ogniw i doładowywanie akumulatorów w czasie hamowania oraz zastosowanie silników z magnesami trwałymi, charakteryzującymi się znacznie wyższymi sprawnościami, w czasie pracy silnikowej i generatorowej. W niniejszym opracowaniu omówiono budowę ciągnika, wraz z jego układem elektrycznym oraz sposób realizacji zmiany systemu napędowego.

2. Układ zasilania, sterowania i zabezpieczeń

Budowę ciągnika GAD-1 pokazano na rys.2. Składa się on z dwóch kabin operatora (1), dwóch podwójnych zespołów hamulcowych (2), czterech wózków napędowych (3), zespołu baterii akumulatorów (4), modułu zasilania, czyli zespołu aparatury energoelektronicznej i układu sterowania (5), zespołu hydraulicznego do zasilania wózków hamulcowych oraz obsługi belek transportowych (6).



Rys.3. Budowa wózka napędowego

Każdy z czterech wózków napędowych rys.3. wyposażony jest w dwa (identyczne) zespoły napędowe złożone z silnika (1), przekładni (2), koła ciernego (3) i koła zębatego (4). W zależności od rodzaju trasy jezdnej, która może być tradycyjna, wykonana tylko na bazie dwuteownika I 155, lub dodatkowo wyposażona w zębatkę, zintegrowaną z górną półką dwuteownika, wózek może pracować ciernie lub zębatkowo. Podczas pracy cierniej, koła cierne są dociskane do bieżni trasy (średnik dwuteownika) za pomocą siłownika (5), natomiast podczas jazdy zębatkowej koła zębate nie są w ogóle dociskane.

Zmiana systemu napędowego z ciernego na zębatkowy stosowana będzie głównie w rejonie zmiany nachylenia wyrobiska z mniejszego na większe. Na przykład do 15° będzie stosowany system cierny, a powyżej tego nachylenia system zębatkowy.

Dotychczasowe rozwiązania maszyn transportu poziomego zasilanych z baterii akumulatorowej dotyczyły wyłącznie lokomotyw spągowych, gdzie zaletą jest możliwość zastosowania ogniw o dużej masie, z uwagi na konieczność zapewnienia sprzężenia ciernego kół z szynami. W przypadku ciągnika podwieszanego duża masa ogniw jest wadą nie do przyjęcia. Ciągnik podwieszony GAD-1, wymagał zastoso-

wania bardziej wydajnych ogniw, o większej gęstości energii. W celu rozwiązania problemu, sięgnięto po nowoczesne ogniwa litowe (rys. 4), które do tej pory nie były stosowane w górnictwie, jednak z coraz większym powodzeniem znajdują zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym na całym świecie. Przykładem mogą być napędy pojazdów elektrycznych produkowanych przez BOBRME KOMEL jak np. samochód Re-Volt, paralotnia elektryczna, quad elektryczny oraz nowo opracowywany napęd z silnikiem BLDC z przełączalną liczbą zwojów. Baterie litowo - jonowe jakie zostały zastosowane w kolejce z dużym powodzeniem sprawdzają się w wyżej wymienionych napędach oraz zapowiadają doskonale perspektywy rozwoju tej technologii w przyszłości. Dzięki zastosowaniu ogniw z pierwiastkiem litu można znacząco poprawić parametry elektryczne ogniw, przy jednoczesnym obniżeniu masy.

Źródłem zasilania ciągnika podwieszanego GAD-1 są cztery zespoły baterii, składające się z grupy 68 ogniw (Rys.4) szeregowo połączonych ze sobą, tworzących baterie o napięciu 250V DC. Zespoły baterii o łącznej energii 150 kWh umieszczone są w jednej z komór ognioszczelnych we wnętrzu specjalnej skrzyni. Każdy z czterech zestawów bateryjnych stanowi niezależne źródło zasilania dla jednego wózka napędowego. Dodatkowo, jeden z zespołów baterii służy do zasilania silnika indukcyjnego pompy hydraulicznej [1] oraz obwodów kontrolno-pomiarowych ciągnika.



Rys. 4. Zastosowane ogniwo litowe wraz z jego parametrami znamionowymi

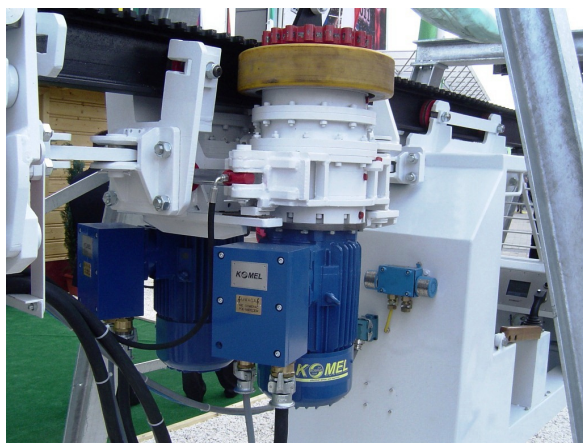
Tab. 1.
Parametry ogniwa litowego baterii zasilającej

Pojemność	150 Ah
Napięcie znamionowe	3,7 V
Napięcie rozładowania	3 V
Max. napięcie naładowania	4,15 V
Max. ciągły prąd ładowania	150 A
Max. ciągły prąd rozładowania	300 A
Masa	3,2 kg

Energia z każdego z zespołów baterii, poprzez złącza ognioszczelne, dostarczana jest przewodami do skrzyni aparatury elektrycznej (moduł zasilania), w której, 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).

Wyzwaniem dla konstruktorów silnika było zaprojektowanie maszyny, której parametry pozwoliłyby jej spełniać wymagania napędu przy zachowaniu jak najmniejszych gabarytów oraz mogący również spełnić wymogi górnicze silników przystosowanych do pracy w strefach kopalni zagrożonych wybuchem.

Silniki o mocy 9 kW zaprojektowane i wyprodukowane w BOBRME KOMEL są silnikami synchronicznymi z magnesami trwałymi wykonanymi w obudowie ognioszczelnej. Maszyna posiada cechę budowy przeciwwybuchowej IM2ExdIMb.



Rys. 5. Zespół napędowy z bezszczotkowymi silnikami synchronicznymi z magnesami trwałymi typu SMwsPA132M6 produkcji BOBRME KOMEL

Tab.2.
Parametry silnika zastosowanego w napędzie GAD-1

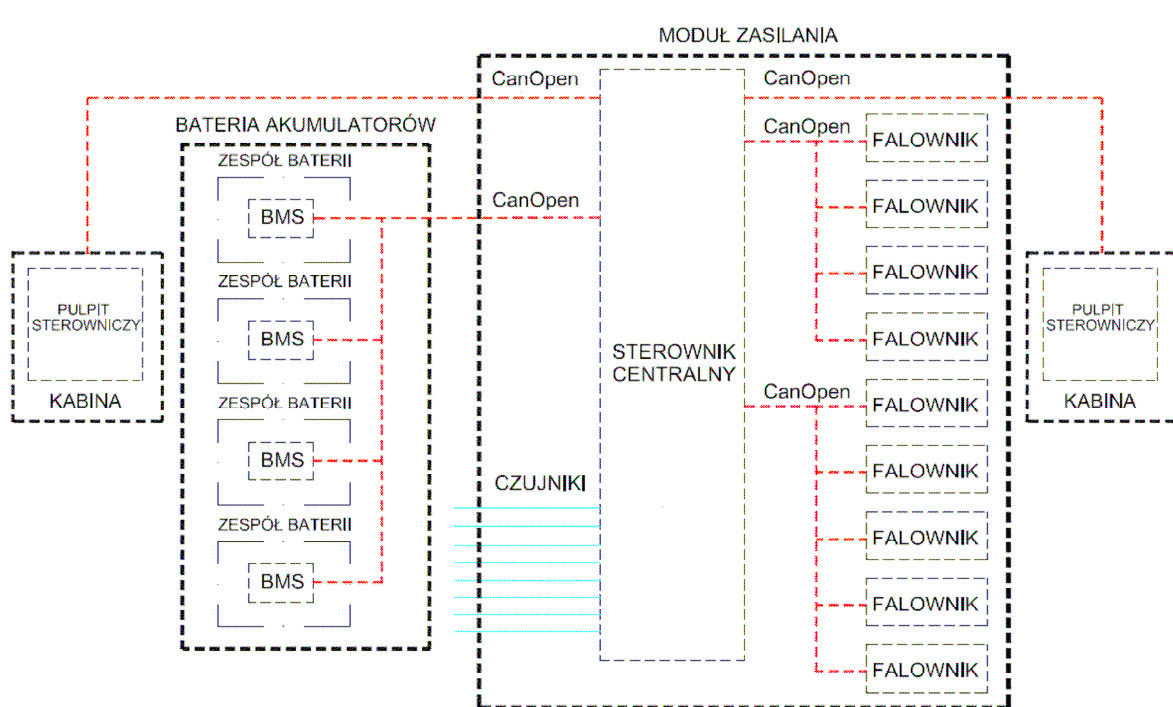
Moc znamionowa	9 kW
Napięcie znamionowe	150 V
Prąd znamionowy	45 A
Moment znamionowy	116 Nm
Prędkość obrotowa	740 obr/min
Sprawność	90 %

Tego typu silnik z uwagi na swoje zalety oraz możliwości pracy jako generator oddający energię do baterii oferuje nowe możliwości w przemyśle górniczym.

Silniki z magnesami trwałymi cechują się wysoką sprawnością, w porównaniu z silnikami indukcyjnymi, a sterowanie wektorem momentu wszystkimi ośmioma silnikami napędowymi jest precyzyjne. Zespół aparatury energoelektronicznej wyposażony jest ponadto w dziewięć falownik służący do zasilania silnika indukcyjnego pompy hydraulicznej o napięciu 188 V 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 24V DC. Natomiast wszystkie urządzenia iskrobezpieczne takie jak: lampy diodowe, pulpity sterownicze czy rozdzielacze elektrohydrauliczne zasilane są napięciem 12V DC.

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.

Nadrzędny system sterowania ciągnikiem GAD-1 (rys.6) zbudowano w oparciu o strukturę rozproszoną, łączącą ze sobą wszystkie elementy układu sterowania za pośrednictwem magistrali CAN. Cyfrowa magistrala CAN (połączona szeregowo), 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. Do tej pory protokół CAN nie znajdował dużego zastosowania w przemyśle górniczym. Stosowany jest powszechnie w pojazdach samochodowych, skąd zaczerpnięto koncepcję sterowania.



Rys. 6. Schemat blokowy nadzrędnego systemu sterowania ciągnikiem GAD-1

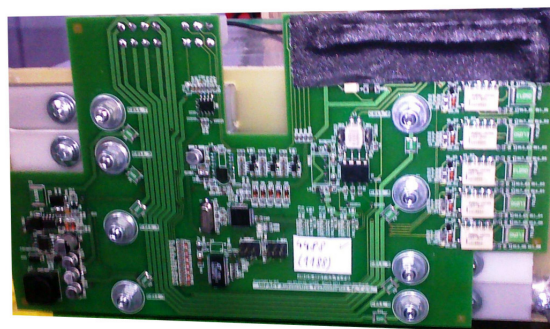
Uniwersalność zastosowanego protokołu CanOpen pozwala na komunikowanie się podzespołów różnych producentów oraz umożliwia przełączanie pomiędzy aplikacjami do diagnozowania i konfiguracji magistrali CAN. Inteligentne sterowanie, dzięki zastosowanemu wektorowemu sterowaniu układem wielosilnikowym umożliwia precyzyjne zarządzanie rozplływem mocy w zależności od aktualnego stanu pracy maszyny.

Dużym atutem podwieszonoego ciągnika GAD-1 jest możliwość zwrotu energii do baterii akumulatorów podczas hamowania.

Każdy z silników napędowych w trakcie hamowania pracuje jako prądnicą. 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. Mało realna, ale nie wykluczona będzie sytuacja, gdy bilans energetyczny podczas prowadzenia transportu będzie dodatni. Taki przypadek może mieć miejsce, gdy transport z dużymi ładunkami na dużym nachyleniu będzie się odbywał po upadzie, a powrót ciągnika bez ładunku po wzniosie. Za poprawność działania

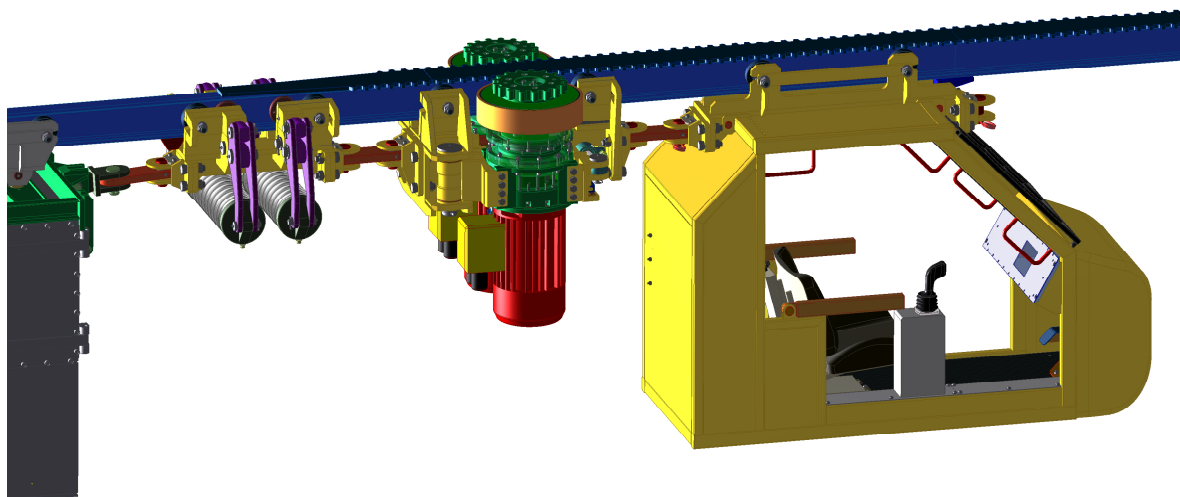
przepływu energii i niedopuszczenie do wyżej opisaney sytuacji odpowiada inteligentny system nadzoru nad zespołem baterii – BMS (rys. 7).

System BMS służy do ciągłego monitoringu parametrów zespołu baterii, a także każdego ogniwa indywidualnie. System ten decyduje o równomiernym rozplwyie energii pomiędzy poszczególnymi ogniwami podczas hamowania odzyskowego.



Rys. 7. System nadzoru baterii (BMS) wykorzystywany w ciągniku podwieszonym GAD-1

Dodatkowo BMS pełni rolę inteligentnego zabezpieczenia, zarówno programowego, jak i sprzętowego, przed niepożądanymi zdarzeniami takimi jak np. przeładowanie, czy nadmierne rozładowanie.



Rys. 8. Widok fragmentu ciągnika z wózkiem napędowym

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).

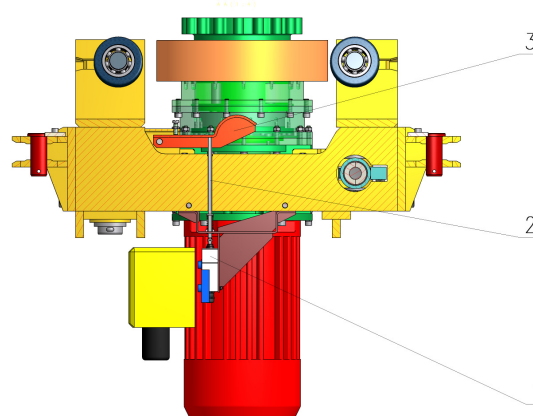
Głównym wyzwaniem jeśli chodzi o układ sterowania, było rozwiązanie problemu, związanego z sekwencyjną zmianą trybu napędowego z ciernego na zębaty lub odwrotnie, kolejno przez poszczególne wózki.

3. Zagadnienia związane ze zmianą systemu napędowego

Na rys. 8. pokazano fragment ciągnika, umownie poruszającego się od prawej do lewej strony, z wózkiem napędowym, który będzie zmieniał zębathy system napędowy na cierny, to znaczy, w kolejności określonej symbolicznie $Z \rightarrow C$. Widoczny jest początek listwy zębathy nad wózkiem hamulcowym. Aby mogło dojść do zmiany systemu napędowego, układ sterowania musi odpowiednio zareagować i wysterować pracę silników elektrycznych. Do układu sterowania doprowadzone są sygnały z wózków napędowych, informujące o dojechaniu do miejsca trasy, gdzie dla danego wózka nastąpi zmiana napędu.

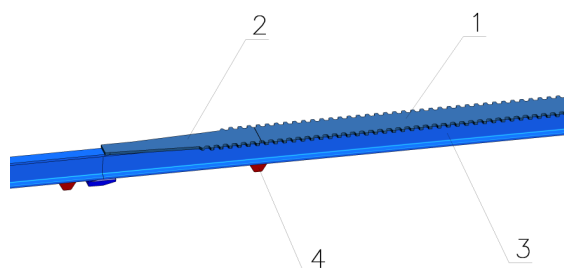
Każdy z wózków napędowych (rys.9.) wyposażono w łącznik ILM (1), popychacz (2) i uchylne ramię (3), które poprzez popychacz może wywierać nacisk na łącznik ILM. Uruchomienie ramienia następuje dzięki znaczni-

kom umieszczonym w trasie, w odpowiednich miejscach.



Rys. 9. Lokalizacja łącznika ILM wraz z popychaczem i dźwignią

Widok trasy w miejscu zmiany systemu napędowego przedstawiono na rys. 10. Na górnej półce dwuteownika znajduje się dwustronna listwa zębathy (1) i klinowa, nabiegowa listwa (2). Uruchomienie dźwigni wózka napędowego następuje od znaczników (4) umieszczonych pod dolną półką dwuteownika (3).



Rys. 10. Widok trasy w miejscu zmiany systemu napędowego

Funkcją klinowej listwy „nabiegowej” (2) jest współpraca z kołami zębatymi napędów w czasie naprowadzania kół zębatych na zębatkę 1, jak również łagodzenie efektu zjazdu z zębatki. Podczas zmiany napędu w kolejności C→Z, w zależności od stopnia zużycia koła ciernego, koło zębate będzie wchodziło w kontakt z listwą nabiegową w różnych miejscach. Dla zużytego koła będzie to jej początek, a dla nowego - jej środkowa część.

Podczas zmiany napędu każdego wózka, układ sterowania będzie otrzymywał dwa sygnały od znaczników trasy. Sygnały te będą uruchamiać odpowiednie procedury, mające swoje przełożenie na układ energoelektroniczny oraz układ hydrauliczny. Zadaniem układu energoelektronicznego będzie sterowanie przeciążalnością silników elektrycznych i dopasowywanie prędkości obrotowej do wartości aktualnie wymaganej.

Z uwagi na różnicę promieni koła ciernego R_c i zębatkowego R_z , w przypadku zmiany napędu C→Z, silniki napędowe wózka zmieniającego napęd powinny zwiększyć swoją prędkość przed zazębieniem o wartość R_c/R_z , a w przypadku zmiany Z→C silniki powinny zmniejszyć prędkość obrotową o wartość R_z/R_c . Dopasowywanie prędkości obrotowych silników ma na celu łagodzenie zjawisk dynamicznych podczas zmiany napędu oraz łagodny i efektywny sposób zmiany napędu. Należy też pamiętać, że koła cierne w trakcie eksploatacji podlegają zużyciu, a ich promień może ulec zmniejszeniu nawet o 10mm. Dlatego precyzyjna regulacja prędkości obrotowej nie będzie do końca możliwa, bez dodatkowego rozbudowania algorytmu i układu sterowania. W tej sytuacji zrezygnowano z uwzględniania wpływu zużycia kół ciernych, gdyż maksymalna różnica wymaganej prędkości obrotowej w stosunku do prędkości uzyskanej przez regulację, wyniesie zaledwie 5% i nie będzie miała istotnego wpływu na proces zazębienia.

Sterowanie przeciążalnością silników wynika z konieczności kompensacji ubytku siły pociągowej podczas zmiany systemu napędowego w kolejności C→Z. Należy pamiętać, że zmiana taka będzie dokonywana podczas jazdy po wzniosie, na przykład, gdy trasa zmienia nachylenie z 15° na większe. Ubytek siły pociągowej może spowodować w takiej sytuacji utknięcie ciągnika. Dlatego niezbędne jest, aby silniki pozostałych wózków pokryły ubytek siły napędowej i mogły pracować z przeciążalnością

1,3, podczas gdy poza zmianą systemu napędowego możliwość przeciążania silników jest zablokowana.

Zadaniem układu hydraulicznego jest wywołanie docisku kół ciernych podczas cierniej pracy napędu i zwalnianie docisku podczas pracy zębatkowej.

4. Podsumowanie

GAD-1 stanowi innowacyjny ciągnik wyposażony w nowoczesny napęd zasilany dzięki ogniom akumulatorowym nowej generacji. Układ napędowy wraz z inteligentnym układem sterowania umożliwiają pracę systemu odzysku energii podczas hamowania. Jest to rozwiązanie zgodne z ekologicznymi trendami oraz pozwalające na wielogodzinną pracę ciągnika, bez potrzeby doładowania akumulatorów z zewnętrznego źródła.

W artykule zostały przedstawione niektóre rozwiązania oraz pomysły wykorzystane w napędzie GAD'a, zastosowane z myślą o jego niezawodności, trwałości i konkurencyjności.

Ciągnik ma możliwość jazdy cierniej lub zębatkowej, co było dotychczas rzadkością, nawet w konwencjonalnych rozwiązaniach z napędem spalinowym. Wynika to w głównej mierze z wielu zasygnalizowanych problemów, które należy rozwiązać dla umożliwienia korzystania z podwójnego systemu napędowego. Zaawansowany technicznie układ sterowania ciągnika GAD-1 to umożliwia.

Z uwagi na bezemisijną pracę, niski poziom wydzielanego ciepła oraz stosunkowo cichą pracę, proponowane rozwiązanie będzie bardzo konkurencyjne w stosunku do urządzeń z napędem spalinowym. Dzięki wyeliminowaniu emisji spalin zwiększy się komfort pracy załóg górniczych.

Dzięki zastosowaniu baterii litowo-jonowych, nowoczesnego układu sterowania, silników górniczych z magnesami trwałymi, podwójnego systemu napędowego (cierny i zębatkowy) oraz zaangażowaniu wielu firm powstał projekt, a następnie prototyp ciągnika górniczego nowego typu produkcji firm Nafra oraz Vacat.

Innowacyjny charakter ciągnika GAD-1 oraz duże zainteresowanie podczas międzynarodowych targów górniczych sugeruje, że ten polskiej produkcji napęd górniczy może wkrótce wspomóc prace transportowe w kopalniach, zarówno w kraju, jak również w innych częściach świata.

Literatura

[1]. „Opracowanie i wdrożenie podwieszono-
gnika elektrycznego z własnym źródłem zasilania do
pracy w wyrobiskach zagrożonych wybuchem” -
Projekt Celowy Nr ROW-III-106/2010.

Autorzy

Vacat: Jarosław Mróz

j.mroz@vacat.pl

Nafra: Krystian Skupień

k.skupien@nafra.pl

Komag: Andrzej Drwięga,

adrwiega@komag.eu

Zdzisław Budzyński,

zbudzynski@komag.eu

Bartosz Polnik,

bpolnik@komag.eu

Dariusz Czerniak

dczerniak@komag.eu

Komel: Piotr Dukalski,

p.dukalski@komel.katowice.pl

Leszek Brymora

l.brymora@komel.katowice.pl



VACAT

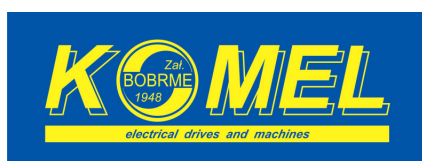
www.vacat.pl



www.nafra.pl



www.komag.eu



www.komel.katowice.pl/