

# Pakiet innowacyjności w ciągniku podwieszonym GAD-1

Andrzej Drwięga, Zdzisław Budzyński, Dariusz Czerniak, Bartosz Polnik

**Ciągnik akumulatorowy GAD-1, którego prototyp powstał w firmach NAFRA oraz VACAT i został zaprezentowany na ostatnich Targach Górnictwa Energetyki i Metalurgii w Katowicach, może radykalnie przyczynić się do poprawy jakości powietrza w podziemnych wyrobiskach kopalń węgla. Wprowadzanie coraz większej liczby napędów spalinowych w kolejkach podwieszonych i spągowych, pracownicy odczuwają znaczny dyskomfort pracy związany z dużym stężeniem spalin i emitowanym ciepłem.**

Nazwa ciągnika GAD pochodzi od angielskiego: *Gentle Accumulator Drive*, co tłumaczy się jako cichy, łagodny, napęd akumulatorowy. W rozwiązaniu GAD-1, staraniem kilku zaangażowanych w to przedsięwzięcie firm, 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. Wykonanie ciągnika GAD-1 umożliwia jego stosowanie w pomieszczeniach zagrożonych wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego.

## Zagadnienie bilansu energetycznego

Prace studialne nad napędem, realizowane w ITG KOMAG, wykazały, że warunkiem sukcesu we wdrożeniu ciągnika z zasilaniem akumulatorowym będzie zapewnienie co najmniej 8-godzinnej pracy bez wymiany baterii ogni, przy zachowaniu jak najmniejszej masy samego ciągnika. Z uwagi na ogra-



Rys. 1. Prototyp ciągnika akumulatorowego GAD-1

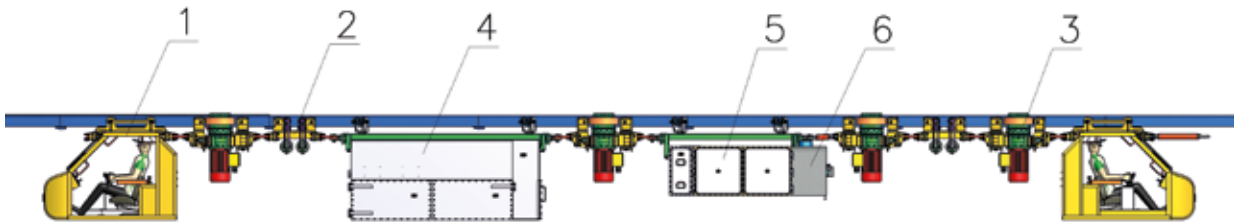
[Źródło: foto KOMAG]

**Streszczenie:** Wprowadzanie do eksploatacji w podziemiach kopalń węgla coraz większej liczby napędów spalinowych stwarza znaczny dyskomfort pracy załóg górniczych, związany ze stężeniem spalin i emitowanym ciepłem. Bezemisyjny ciągnik podwieszony GAD-1 o napędzie akumulatorowym, wyposażony w ogniwa najnowszej generacji, może stanowić korzystną alternatywę w odniesieniu do urządzeń transportowych o napędzie spalinowym. Dodatkowym atutem proponowanego rozwiązania jest odzyskiwanie energii podczas hamowania i możliwość generowania siły pociągowej w klasycznym systemie ciernym lub zębatkowym. W niniejszym artykule omówiono najważniejsze zagadnienia związane z bilansem energii, budową ciągnika, układem elektrycznym i zmianą systemu napędowego.

**Abstract:** Introduction of growing number of diesel drives to mine undergrounds creates a significant discomfort of work associated with concentration of exhaust gases and with generated heat. Emission-free GAD-1 suspended locomotive with electric drive, equipped with state-of-the-art batteries, can be an alternative design or can be a completion to diesel transportation machines. Another advantage of this design is recovery of energy during braking and a possibility of generation of pulling force in a classic frictional and rack-and-pinion system. Main problems associated with energy balance, control system and change of driving system are discussed.

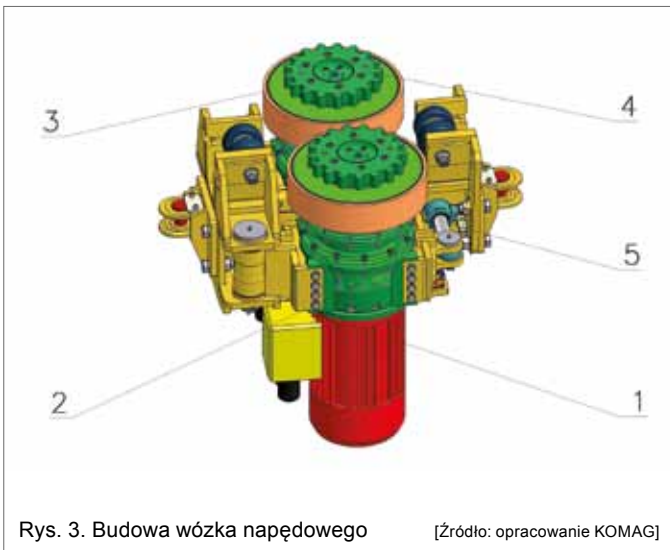
niczoną gęstość energii tradycyjnych, kwasowych ogni akumulatorowych jedynym sposobem osiągnięcia założonego celu było zastosowanie nowej generacji ogni i odzyskiwanie energii podczas prowadzenia transportu w wyrobisku nachylonym, w kierunku upadu, gdy silniki elektryczne pracują generatorowo, spełniając rolę hamulców. Generowany przez silniki prąd poprzez przemienniki częstotliwości jest kierowany do akumulatora. Wynika stąd konieczność utrzymywania pewnego zapasu pojemności akumulatorów na gromadzenie dodatkowej ilości energii. Z problemem tym ściśle wiąże się bilans energetyczny związany z kierunkiem transportu ładunków po wzniosie i nachyleniu. Szacowanie bilansu energii wymaga zatem znajomości następujących danych:

- jak transportowane ładunki z miejsca załadowania do miejsca rozładowania będą zmieniały poziom położenia;
- jak duże masy będą transportowane;
- jak długie będą poszczególne odcinki trasy i jakie będą miały nachylenie;
- jaka będzie sprawność napędu podczas pracy silnikowej;



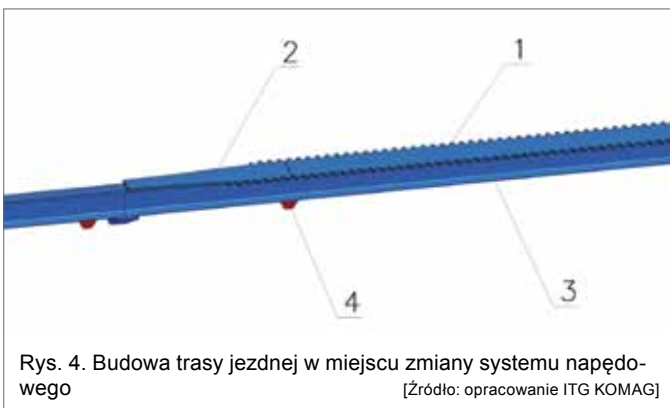
Rys. 2. Widok ogólny ciągnika GAD-1

[Źródło: opracowanie KOMAG]



Rys. 3. Budowa wózka napędowego

[Źródło: opracowanie KOMAG]



Rys. 4. Budowa trasy jezdnej w miejscu zmiany systemu napędowego

[Źródło: opracowanie ITG KOMAG]

mów, na dystansie około 500 m, to z hamowania odzyskowego podczas jazdy z ładunkiem po upadzie układ rekuperacji może przekazać do akumulatora około 19 MJ energii, natomiast w drodze powrotnej nieobciążonego ciągnika o masie 13 t zużytych zostanie około 15 MJ energii. W takim przypadku wymiana akumulatora będzie zbędna, ponieważ bilans energii będzie dodatni i wyniesie +4 MJ. Dla porównania ilości energii w wyżej przytoczonym przykładzie akumulatory ciągnika GAD-1 zdolne są do gromadzenia 570 MJ energii.

### Budowa ciągnika i sposób zmiany napędu

Ciągnik GAD-1 pokazano na rys. 2. Składa się on z dwóch kabin operatora (1), dwóch podwójnych zespołów hamulcowych (2), czterech wózków napędowych (3), skrzyni akumulatorowej (4), skrzyni z aparaturą energoelektroniczną i układem sterowania (5), zespołu hydraulicznego do zasilania wózków hamulcowych oraz obsługi belek transportowych (6).

Każdy z czterech wózków napędowych (patrz: 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. Budowę trasy jezdnej w miejscu zmiany napędu przedstawiono na rys. 4.

W miejscu zmiany systemu napędowego, przed listwą zębatą (1) (rys. 4) znajduje się gładka, zukosowana listwa nabiegowa (2), która w kontakcie z kołami zębatymi powoduje odchylenie się zespołów napędowych, w efekcie czego zanika styk kół ciernych, a koła zębate są naprowadzane na zębatkę. Zmiana odwrotna będzie miała miejsce w sytuacji zjazdu i zmiany nachylenia z większego na mniejsze. Pod dolną półką dwuteownika trasy (3) znajdują się dwa znaczniki (4), dzięki którym układ sterowania identyfikuje miejsce zmiany systemu napędowego. Dynamiczny sposób zmiany napędu oznacza, że przy czterech wózkach napędowych każdy z nich kolejno zmienia system napędowy i w miejscu zmiany część wózków będzie 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.

- jaka będzie sprawność odzysku energii z hamowania podczas pracy generatorowej.

W oparciu o te dane można określać dopuszczalny poziom naładowania akumulatora wynikający z:

- przyrostu lub redukcji energii potencjalnej ładunku i ciągnika;
- strat energii na pokonanie oporów ruchu na poszczególnych odcinkach trasy, strat energii będącej wynikiem sprawności urządzeń mechanicznych;
- strat energii będącej wynikiem sprawności urządzeń elektrycznych.

Niewykluczona jest zatem sytuacja, że bilans energetyczny podczas prowadzenia transportu będzie dodatni. Taki przypadek może mieć miejsce, gdy transport z ładunkiem na dużym nachyleniu będzie się odbywał po upadzie, a jego powrót bez ładunku po wzniosie. Przykładowo, jeżeli ciągnik z ładunkiem o łącznej masie 25 t, będzie pokonywał 100 m różnicę pozio-

## Układ zasilania, sterowania i zabezpieczeń

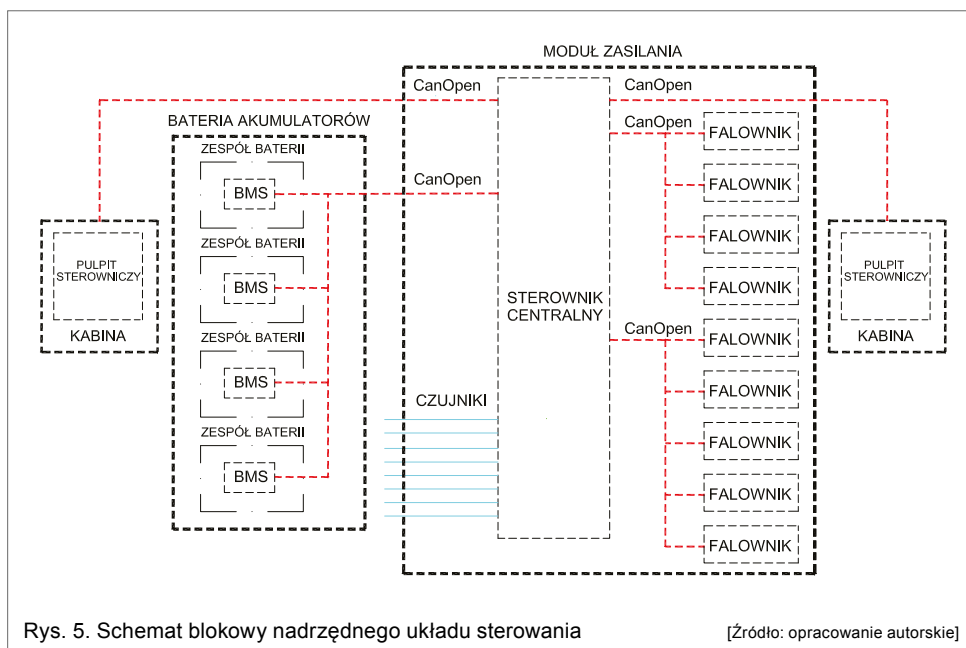
Źródłem zasilania wózków napędowych ciągnika jest bateria akumulatorów o napięciu 250 V DC, składająca się z trzech zespołów ogniw litowych o pojemności 150 Ah i jednego o pojemności 200 Ah. Każdy zespół stanowi źródło zasilania dla napędu jednego wózka. Z zespołu o pojemności 200 Ah zasilany jest dodatkowo 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. Dziewięć falowników o napięciu 188 V i częstotliwości 50 Hz, służy do zasilania silnika indukcyjnego pompy hydraulicznej. Podczas hamowania silniki generują energię, która poprzez te same falowniki trafia do zespołu akumulatorowego. Układ sterowania czuwa nad tym, aby akumulatory zawsze posiadały zapas pojemności pozwalający na zwrot energii z hamowania.

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

Sterowanie ciągnikiem odbywa się z pulpitu, który uruchamiany jest kluczykiem w stacyjce przez operatora. Nadrzędny układ sterowania ciągnika wg schematu blokowego (rys. 5) posiada strukturę rozproszoną, połączoną szeregową, cyfrową magistralą CAN.

Charakteryzuje się ona dużą odpornością na zakłócenia i niezawodnością, co uzyskuje się przez nadawanie danych w postaci napięciowego sygnału różnicowego oraz przez sprzętową obsługę 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 umożliwi przyłączenie aplikacji przeznaczonej do diagnozowania i konfigurowania magistrali CAN.

Zarządzanie rozdziałem mocy w różnych fazach ruchu (ruch, 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 (rys. 4). Podczas przejazdu w tym miejscu 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.

## Podsumowanie

W ciągniku GAD-1 zastosowano szereg innowacyjnych rozwiązań, które powinny mieć pozytywne przełożenie na jego niezawodność i konkurencyjność. Są to przede wszystkim: ogniwa nowej generacji, silniki z magnesami trwałymi, układ sterowania i rekuperacja energii. Ciągnik ma również możliwość jazdy cierniej lub zębatkowej, co dotychczas jest rzadkością nawet w konwencjonalnych, spalinowych rozwiązaniach. Z uwagi na bezemisijną pracę proponowane rozwiązanie będzie przydatne zwłaszcza tam, gdzie już jest stosowana duża liczba napędów spalinowych, które stwarzają problemy zanieczyszczenia powietrza.

dr inż. Andrzej Drwięga, mgr inż. Zdzisław Budzyński,  
mgr inż. Dariusz Czerniak, mgr inż. Bartosz Polnik  
– Instytut Techniki Górniczej KOMAG