

TOMASZ BUDNIOK
BERNARD KRAKOWCZYK
ANDRZEJ TOR
WOJCIECH ZASADNI
LESZEK ŻYREK

Nowoczesne środki transportu dołowego – efekty techniczne i ekonomiczne oraz korzyści dla środowiska pracy wynikające z eksploatacji podwieszonych ciągników akumulatorowych typu VOLTER

Środki transportu z napędem akumulatorowym znajdują coraz większe zastosowanie w górnictwie podziemnym. W artykule scharakteryzowano podwieszony ciągnik akumulatorowy typu VOLTER, który jest przeznaczony do transportu urządzeń, materiałów oraz do przewozu ludzi. Przedstawiono efekty techniczne i ekonomiczne eksploatacji tego innowacyjnego rozwiązania w porównaniu z ciągnikami spalinowymi, między innymi pod względem kosztów energii (paliwa) i czasu czynności konserwacyjnych. W artykule opisano również korzyści dla środowiska pracy związane ze stosowaniem ciągników akumulatorowych, wynikające z braku emisji spalin i istotnego zmniejszenia generowanego hałasu i ciepła, co wpływa na poprawę warunków klimatycznych w porównaniu z ciągnikami spalinowymi.

Słowa kluczowe: transport podwieszony, ciągnik akumulatorowy, koszty energii, koszty eksploatacyjne, środowisko pracy, warunki klimatyczne

1. WSTĘP

Producenci wyposażenia górniczego opracowują i coraz powszechniej wdrażają maszyny z napędem akumulatorowym. Lokomotywy, ciągniki podwieszane, wozy odstawcze i transportowe oraz inne maszyny świadczą o rozwoju elektromobilności pod ziemią. Nowa generacja baterii akumulatorów z ogniwami litowymi przyczynia się do wzrostu efektów technicznych i ekonomicznych oraz korzyści dla środowiska pracy napędów elektrycznych w porównaniu ze spalinowymi.

Szczególnie systemy transportu z napędem akumulatorowym znajdują coraz większe zastosowanie

w górnictwie podziemnym. Są one między innymi odpowiedziami na wyzwania związane z:

- wydłużeniem dróg transportu i dojścia załogi,
- wzrostem mocy zainstalowanych maszyn i urządzeń,
- coraz bardziej rygorystycznymi wymaganiami dotyczącymi środowiska pracy,
- potrzebą ograniczenia śladu węglowego i emisji gazów cieplarnianych,
- koniecznością optymalizacji kosztów produkcji.

Flagowym produktem firmy Becker-Warkop Sp. z o.o. w tym obszarze jest podwieszony ciągnik akumulatorowy typu VOLTER [1].

2. OPIS CIĄGNIKA AKUMULATOROWEGO TYPU VOLTER

Ciągnik akumulatorowy typu VOLTER z napędem ciernym służy do transportu ludzi, materiałów i urządzeń podczas prac transportowych, m.in. instalacji i likwidacji wyposażenia ścian. Ciągnik w konfiguracji bez kabin operatora jest wykorzystywany wyłącznie do transportu ładunków.

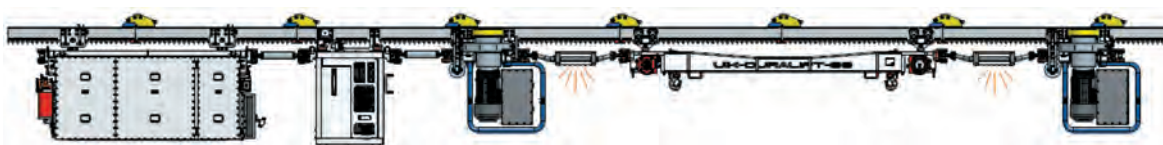
Ciągnik akumulatorowy typu VOLTER/X/Y (gdzie: X – liczba napędów, Y – liczba kabin operatora) prze-

znaczony jest do pracy w podziemnych zakładach górniczych w polach niemetanowych i metanowych, w wyrobiskach zaliczonych do stopnia „a”, „b” lub „c” niebezpieczeństwa wybuchu metanu oraz w wyrobiskach zaliczonych do klasy A lub B zagrożenia wybuchem pyłu węglowego.

Na rysunku 1 została przedstawiona podstawowa budowa ciągnika VOLTER z kabinami operatora. Urządzenie może także pracować bez kabin jako ciągnik manewrowy (rys. 2).



Rys. 1. Podstawowa konfiguracja ciągnika typu VOLTER/4/2



Rys. 2. Manewrowy ciągnik typu VOLTER/2/0 wyposażony w belkę transportową i mobilne oświetlenie stacji materiałowych

2.1. Układ napędowy i hamulcowy

Każda jednostka napędowa zbudowana jest z dwóch napędów elektrycznych (silnik z falownikiem), przekładni oraz kół napędowych ciernych. Przeniesienie napędu następuje dzięki sprzężeniu ciernemu kół napędowych z szyną. Docisk kół napędowych odbywa się za pomocą siłownika hydraulicznego, który poprzez dźwignię dociska wahacz w kierunku do osi toru. Do wahacza zamocowana jest przekładnia połączona z napędem elektrycznym oraz kołem napędowym ciernym. Rysunek 3 przedstawia pojedynczy napęd elektryczny typu BWNE.

Układ hamulcowy pełni funkcję hamulca postojowego oraz awaryjnego. Odhamowanie następuje po podaniu ciśnienia na siłownik odhamowania, który powoduje odsunięcie szczęk hamulcowych od szyny. W skład jednostki pomocniczej wchodzi napęd elektryczny (silnik z falownikiem), napędzający pompę hydrauliczną zasilającą elementy sterowania hydraulicznego ciągnika.



Rys. 3. Napęd elektryczny typu BWNE

2.2. Sterowanie

Sterowanie pracą ciągnika odbywa się za pomocą kasyety sterowniczej BWKS (w wersji manewrowej ciągnika) lub stanowiska sterowania w kabinie operatora.

Opcjonalnie ciągnik akumulatorowy może być rozbudowany o układ bezprzewodowego sterowania i komunikacji radiowej oraz mobilne oświetlenie stacji osobowych i stacji materiałowych.

2.3. Zespół akumulatora

Zespół akumulatora typu VOLTER wykonany jest jako urządzenie przeciwybuchowe w osłonie ognioszczelnej. Akumulator litowy typu VOLTER służy do zasilania napędów ciągnika. W zespole akumulatora są zabudowane układy przeznaczone do kontroli i zabezpieczania poszczególnych urządzeń ciągnika, nadzoru nad nimi i sterowania nimi. W komorze akumulatorowej znajdują się ogniwa litowe pogrupowane w 20 kasetach. W każdej kasecie umieszczono 8 ogniw, które nadzorowane są napięciowo i temperaturowo za pośrednictwem indywidualnych modułów kontrolnych.

Moduły kontrolne komunikują się z częścią nadzorczą znajdującą się w komorze aparaturowej i odpowiadają również za proces ładowania ogniw oraz za przekazywanie parametrów pracy do układu sterowania.

Zaletą akumulatora typu VOLTER jest zintegrowana z nim ładowarka (zabudowana w komorze obudowy akumulatora), umożliwiająca ładowanie ogniw bezpośrednio z kopalnianej sieci elektroenergetycznej o napięciu trójfazowym 500 V lub 1000 V. Podłączenie do sieci zapewnia znajdujące się w osłonie ognioszczelnej szybkozłącze, co znacznie przyspiesza proces podłączenia/odłączenia. Czas ładowania wynosi maksymalnie do 4 godzin. Układ napędowy ciągnika VOLTER umożliwia pracę z rekuperacją energii, tj. odzyskiem energii z powrotem do akumulatora podczas jazdy po upadzie lub podczas hamowania [1].

W tabeli 1 przedstawiono podstawowe parametry techniczne ciągnika akumulatorowego typu VOLTER [1].

Tabela 1

Podstawowe parametry techniczne ciągnika akumulatorowego typu VOLTER

| Parametr | Wartość |
|--|--|
| Siła uciągu | maks. 25 kN (dla pojedynczego napędu ciernego) maks. 100 kN (dla czterech napędów ciernych) |
| Prędkość maksymalna | 2,0 m/s |
| Minimalny promień skrętu w poziomie | 4 m |
| Minimalny promień skrętu w pionie | 8 m |
| Maksymalne nachylenie toru jezdnego | ±30° |
| Dopuszczalne profile szyn toru jezdnego | typ I155 (I140E), I140V95, I250 lub inne kompatybilne typu dopuszczonego |
| Znamionowe napięcie ładowania (bezpośrednio z sieci zasilającej) | 500 V, 1000 V |
| Typ akumulatora (VOLTER) | litowy |
| Energia akumulatora | 143,5 kWh |
| Moc jednego silnika napędowego | 11 kW |
| Moc ciągnika z 4 napędami ciernymi (dwusilnikowymi) | 88 kW |
| Statyczna siła hamowania | min. 1,5 × siła uciągu |
| Wymiary ciągnika z 4 napędami (wysokość × szerokość × długość) | 1275 mm × 800 mm × 15 340 mm |
| Masa własna ciągnika wersja z kabinami i 4 napędami | 11 310 kg (4 napędy cierne) |

3. EFEKTY TECHNICZNE I EKONOMICZNE EKSPLOATACJI CIĄGNIKÓW AKUMULATOROWYCH TYPU VOLTER

W celu zobrazowania korzyści wynikających z eksploatacji ciągników akumulatorowych typu VOLTER porównano koszty eksploatacji oraz czas czynności konserwacyjnych ciągnika akumulatorowego oraz ciągnika spalinowego. Analizę oparto na danych z pracy ciągników w kopalniach Budryk i Szczygłowice. Wyniki analizy przedstawiono w tabelach 2 i 3 oraz na rysunku 4.

Z przytoczonych danych wynika, że:

- koszt energii elektrycznej/paliwa w przeliczeniu na 1 km jest o 20,21 zł większy w przypadku ciągnika spalinowego,
- roczny koszt eksploatacyjny ciągnika spalinowego (w analizowanych grupach kosztów) przewyższa sześciokrotnie koszt eksploatacji ciągnika akumulatorowego,
- roczny czas czynności konserwacyjnych jest o 308 roboczogodzin krótszy w przypadku ciągnika akumulatorowego.

Tabela 2

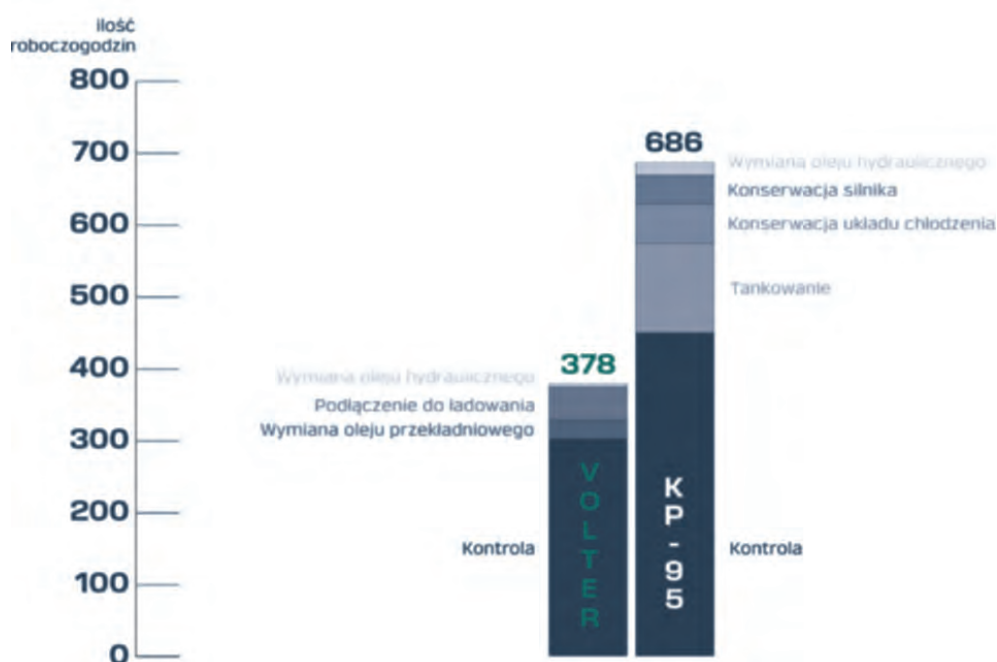
Porównanie kosztów energii (paliwa) ciągnika akumulatorowego VOLTER z ciągnikiem spalinowym

| Parametr | Ciągnik spalinowy | Ciągnik akumulatorowy | Porównanie |
|---|--|---|--|
| Średnie zużycie paliwa/energii w przeliczeniu na 1 km | 3,75 l | 4,9 kWh (Szczygłowice) 5,63 kWh (Budryk) | – |
| Koszt paliwa/energii w przeliczeniu na 1 km | $3,75 \text{ l} \times 6,38 \text{ zł} = 23,93 \text{ zł}$ | $4,9 \text{ kWh} \times 0,66 \text{ zł} = 3,23 \text{ zł}$ $5,63 \text{ kWh} \times 0,66 \text{ zł} = 3,72 \text{ zł}$ | 20,70 zł (Szczygłowice) 20,21 zł (Budryk) |

Tabela 3

Porównanie wybranych rocznych kosztów eksploatacji podwieszanego ciągnika akumulatorowego VOLTER z ciągnikiem spalinowym

| Parametr | Ciągnik spalinowy | Ciągnik akumulatorowy |
|---|---|--|
| Paliwo/energia miesięcznie (przeliczeń dokonano, przyjmując 415 km/miesiąc) | $415 \text{ km} \times 3,75 \text{ l} \times 6,38 \text{ zł/l} = 9928,88 \text{ zł}$ | $415 \text{ km} \times 5,62 \text{ kWh} \times 0,66 \text{ zł} = 1539,32 \text{ zł}$ |
| Paliwo/energia rocznie (przeliczeń dokonano, przyjmując 4980 km/rok) | $12 \times 9928,88 \text{ zł} = 119 146,50 \text{ zł}$ Występują również dodatkowe koszty związane z transportem paliwa z powierzchni i jego dystrybucją w podziemiach kopalni | $12 \times 1539,32 = 18 471,82 \text{ zł}$ Możliwość ładowania w każdym miejscu na dole kopalni |
| Filtry i inne części | Filtry powietrza, paliwa, oleju hydraulicznego i silnikowego, wtryskiwacze, paski klinowe: 9510,66 zł | Filtr w układzie hydraulicznym: 873,00 zł |
| Oleje | Olej hydrauliczny i silnikowy: 2474,90 zł | Olej hydrauliczny i przekładniowy: 1994,14 zł |
| Pozostałe media eksploatacyjne | Płyn chłodniczy i ładunek gaśniczy: 2923,70 zł | Brak |
| Suma rocznych kosztów | 134 055,76 zł | 21 338,96 zł |



Rys. 4. Porównanie czasu niezbędnych czynności konserwacyjnych ciągnika akumulatorowego i ciągnika spalinowego w ciągu roku

4. KORZYŚCI DLA ŚRODOWISKA PRACY WYNIKAJĄCE ZE STOSOWANIA CIĄGNIKÓW Z NAPĘDEM AKUMULATOROWYM

Stosowanie maszyn z napędem akumulatorowym przynosi następujące korzyści dla środowiska pracy:

- Eliminacja gazów spalinowych. Dzięki temu uzyskuje się zmniejszenie ilości powietrza koniecznej do ich rozrzedzenia. Przyjmuje się, że w przypadku stosowania maszyn z napędem spalinowym wymagane jest od 0,06 do 0,08 m³/s wydatku powietrza na 1 kW zainstalowanej mocy do rozrzedzenia gazów spalinowych (wg The Southern African Institute of Mining and Metallurgy).
- Mniejszy hałas i wibracje. Dzięki temu poprawia się komfort pracy osób obsługujących ciągnik oraz transportowanej załogi.
- Praca ciągników nie zakłóca działania systemów bezpieczeństwa przeciwpożarowego (czujników CO).
- Zmniejszenie emisji ciepła w porównaniu z ciągnikami spalinowymi. Czynnikiem ten ma istotny wpływ na poprawę warunków klimatycznych w wyrobiskach. Zagadnienie to w sposób bardziej szczegółowy przedstawiono w dalszej części artykułu.

4.1. Wpływ pracy maszyn napędzanych silnikami spalinowymi na warunki klimatyczne w wyrobiskach

W silnikach spalinowych zachodzi proces wewnętrznego spalania paliwa i moc przekazana do napędu jest równa wartości opałowej paliwa kilkakrotnie większej od mocy użytecznej silnika. Maszyny napędzane silnikami Diesla przekazują do otoczenia około trzy razy więcej ciepła niż maszyny napędzane silnikami elektrycznymi o takiej samej mocy użytecznej [2].

Wartość opałowa oleju napędowego, który jest paliwem w silnikach spalinowych maszyn dołowych, wynosi 45,6 MJ/kg. Zużycie paliwa w silnikach Diesla ciągników kolejek wynosi około 0,229 kg na godzinę pracy i na 1 kW mocy silnika. W związku z tym, jak wynika z poniższego obliczenia, na 1 kW mocy silnika zużywa się 2,9 kW mocy wynikającej z energii chemicznej paliwa:

$$\frac{0,229 \cdot 45,6 \cdot 1000}{3600} =$$

$$= 2,9 \text{ kW paliwo/1 kW silnik} \quad (1)$$

Około 1/3 obliczonej powyżej ilości energii zamieniane jest na pracę użyteczną maszyny, a 2/3 obliczonej ilości energii zamieniane jest na ciepło. Około 1/3 ciepła wydziela się z rozgrzanego silnika, a około 1/3 ze spalin. Ciepło powstałe w wyniku spalania przekazane jest do powietrza w postaci jawnej (wzrost temperatury) oraz w postaci utajonej (wzrost wilgotności). W wyniku spalania 1 litra oleju napędowego wydziela się około 1,1 litra pary wodnej. Można przyjąć, że 10–25% emitowanego ciepła powoduje przyrost temperatury, a 75–90% zwiększa wilgotność powietrza [2]. Przyrost temperatury i zawartości wilgoci oblicza się według poniższych wzorów:

$$\Delta t = \frac{(0,1-0,25) \cdot \Delta Q}{V \cdot \rho \cdot c_p} \quad (2)$$

$$\Delta X = \frac{(0,75-0,90) \cdot \Delta Q}{V \cdot \rho \cdot r_w} \quad (3)$$

gdzie:

- Δt – przyrost temperatury powietrza [°C],
- ΔX – przyrost zawartości wilgoci powietrza [g/kg p.s.],
- ΔQ – strumień energii zamieniany na ciepło w urządzeniu napędzanym silnikiem Diesla [kW],
- V – objętościowy wydatek powietrza w wyrobisku [m³/s],
- ρ – gęstość powietrza [kg/m³],
- c_p – ciepło właściwe powietrza [kJ/kg · K] $c_p = 1,005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$,
- r_w – ciepło parowania wody w temperaturze t [kJ/g]
 $r_w = (2502,5 - t \cdot 2,386) \cdot 10^{-3} \text{ kJ/g}$.

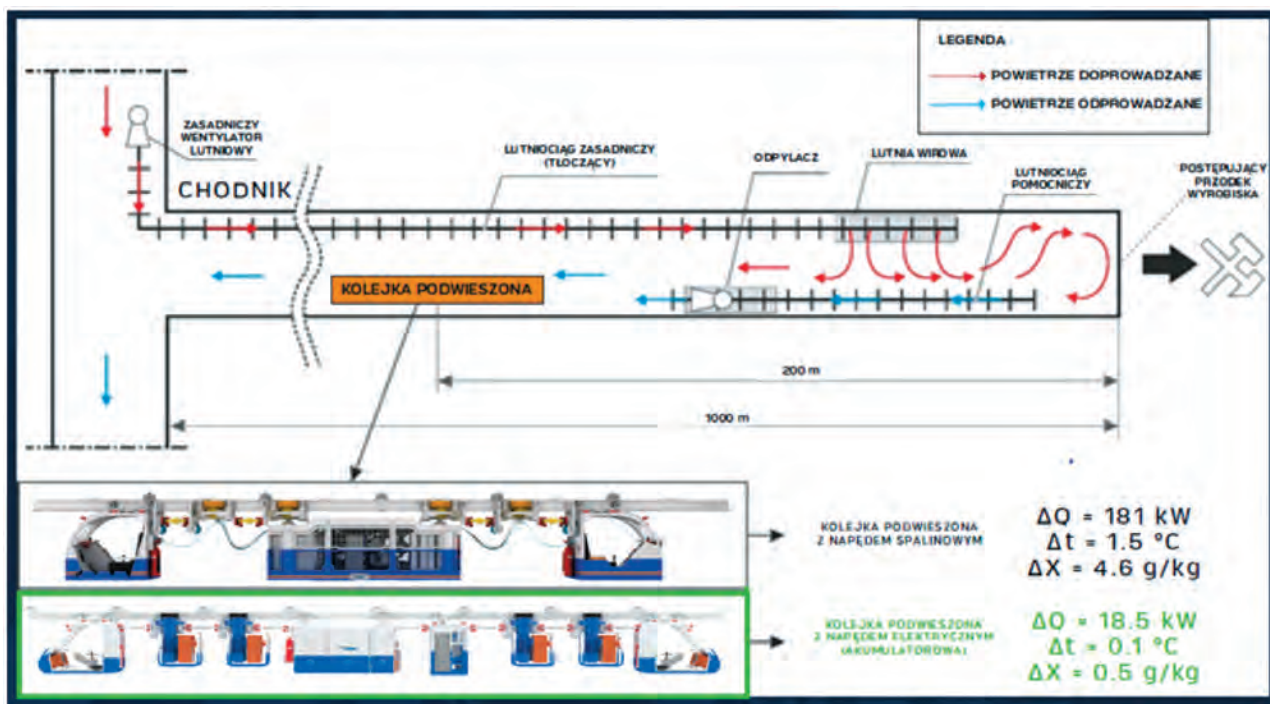
Wysoka sprawność napędów elektrycznych powoduje, że wydzielają one zdecydowanie mniejszą ilość ciepła do wyrobiska w porównaniu z kolejkami spalinowymi. Przeprowadzona analiza porównawcza przyrostu ciepła dla 1000 m drążonego wyrobiska chodnikowego (rys. 5), w którym bez pracy kolejki zapewnione jest 28°C na całej jego długości, wykazała, że przyrost temperatury na wylocie z wyrobiska związany z pracą kolejki spalinowej wyniósł 1,5°C. W przypadku kolejki elektrycznej jest to około 0,1°C. Natomiast wzrost zawartości wilgoci powietrza wynosi odpowiednio 4,6 g/kg i 0,5 g/kg [3].

W obliczeniach uwzględniono ciągłą pracę kolejki w wyrobisku. Założono, że 20% ciepła wytwarzanego przez maszynę jest przekazywane do powietrza w postaci jawnej, a 80% w postaci utajonej. Założono do-

datkowo, że ciepło powstałe w czasie pracy kolejki nie jest wynoszone z wyrobiska wraz z urobkiem, czyli uwzględniono maksymalny możliwy przyrost ciepła w wyrobisku. Całkowity przyrost ciepła (jawnego i utajonego) w analizowanym wyrobisku chodnikowym wyniósł odpowiednio dla kolejki spalinowej i elektrycznej 181,0 kW i 18,5 kW [3]. Aby zneutralizować przyrost ciepła (jawnego i utajonego), w przypadku zastosowania kolejki z napędem spalinowym potrzebna jest moc chłodnicza ponad 180 kW.

Jedną z niekwestionowanych zalet kolejek elektrycznych jest brak wydzielania pary wodnej, która zwiększa zawartość wilgoci w powietrzu.

W przypadku konieczności stosowania chłodzenia powietrza w wyrobiskach jego wilgotność ma kluczowe znaczenie. Kiedy jest ona wysoka, większa część mocy chłodniczej zabudowanych chłodnic układu klimatyzacji jest przeznaczana na obniżenie wilgotności powietrza (osuszanie powietrza) niż na obniżenie temperatury.



Rys. 5. Porównanie oddziaływania ciągników spalinowych i ciągników akumulatorowych na warunki klimatyczne w wyrobiskach

5. PODSUMOWANIE

W porównaniu z ciągnikami spalinowymi zastosowanie podwieszonych ciągników akumulatorowych typu VOLTER przynosi następujące korzyści techniczne i ekonomiczne oraz dla środowiska pracy:

- brak emisji spalin,
- niewielkie ilości emitowanego ciepła,
- cichsza praca napędu w porównaniu z napędem spalinowym,
- praca ciągników niezakłócająca działania systemów bezpieczeństwa przeciwpożarowego (czujników CO),
- uniknięcie kosztownej logistyki i infrastruktury do tankowania olejem napędowym w kopalni,
- mniejsze koszty eksploatacji,

- krótszy czas niezbędnych czynności konserwacyjnych,
- możliwość ładowania akumulatora w wyrobiskach, w których mogą pracować urządzenia elektryczne w obudowie przeciwybuchowej,
- możliwość ładowania bezpośrednio z kopalnianej sieci elektroenergetycznej o napięciu trójfazowym 500 V lub 1000 V,
- zwrot energii podczas jazdy po upadzie i w czasie hamowania,
- monitoring parametrów pracy i zabezpieczeń,
- zdalne sterowanie i transmisja danych,
- możliwość sterowania radiowego.

Ciągniki podwieszane z napędem akumulatorowym, ze względu na ich zalety, będą w najbliższych latach stopniowo zastępować ciągniki spalinowe.

Literatura

- [1] Instrukcja Obsługi – DTR Ciągnik akumulatorowy typu VOLTER [niepublikowane].
- [2] Waclawik J.: *Wentylacja kopalń*, t. 2. Wydawnictwa AGH, Kraków 2010: 80–84.
- [3] Szlązak N., Korzec M.: *Stosowanie kolejek podwieszonych o napędzie akumulatorowym w podziemnych kopalniach węgla kamiennego w aspekcie poprawy warunków pracy w wyrobiskach*. 11. Szkoła Aerologii Górniczej, Materiały Konferencyjne, Białka Tatrzańska, marzec 2022.

mgr inż. TOMASZ BUDNIOK
mgr inż. BERNARD KRAKOWCZYK
dr inż. ANDRZEJ TOR
dr inż. WOJCIECH ZASADNI
inż. LESZEK ŻYREK
Becker-Warkop Sp. z o.o
ul. Przemysłowa 11, 44-266 Świerklany
{t.budniok, b.krakowczyk, a.tor, w.zasadni,
l.zyrek}@becker-mining.com.pl