EDWARD PIECZORA
JAROSŁAW TOKARCZYK

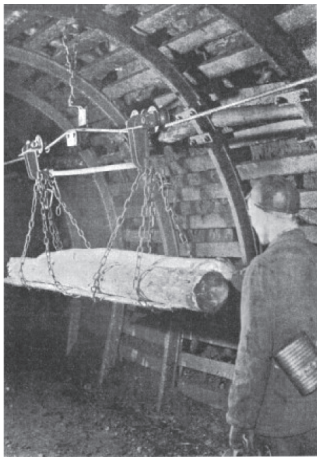
Rozwój transportu podziemnego wykorzystującego kolejki podwieszone

W artykule przedstawiono rozwój jednoszynowych kolejek podwieszonych, wskazując na ich zalety oraz ograniczenia stosowania. Zwrócono uwagę na pojawienie się w ostatnich latach kolejek z napędem akumulatorowym. Podano przykłady rozwiązań, w tym opracowanych w ITG KOMAG ciągników PCA-1 i GAD-1. Wskazano na rozwój narzędzi komputerowych wspomagających projektantów i użytkowników kolejek. Przedstawiono kierunki dalszego rozwoju transportu podwieszonego.

Słowa kluczowe: *górnicze kolejki podwieszone, napęd linowy, napęd spalinowy, akumulatorowy, wirtualne prototypowanie, kierunki rozwoju*

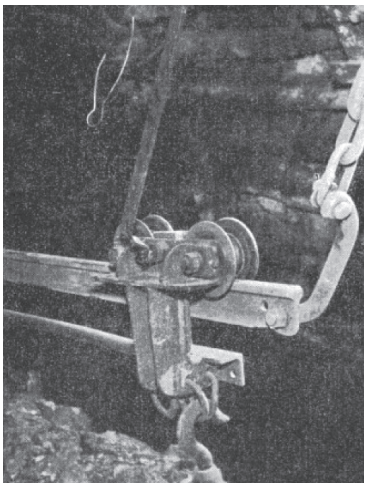
1. WSTĘP

Transport materiałów i urobku oraz przewóz ludzi jest jednym z najważniejszych ogniw procesu wydobywczego zakładu górniczego. O ile transport po spągu jest stosowany od początku rozwoju górnictwa, a pierwsze tory kopalniane pojawiły się w XVII wieku, to początek zastosowania transportu podwieszonego nastąpił dopiero w połowie XX wieku. Do jego rozwoju przyczyniło się opracowanie nowoczesnych kołowrotów linowych, z zastosowaniem zamontowanej pod stropem wyrobiska liny (rys. 1), po której ręcznie lub za pomocą wciągarek przemieszczano wózki transportowe.



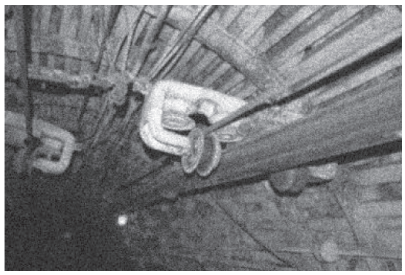
Rys. 1. Podwieszona kolej linowa [1]

W pierwszej połowie lat pięćdziesiątych XX wieku w Niemczech wprowadzono jako element nośny typową szynę kolei podziemnej (rys. 2), po której poruszały się wózki nośne ciągnięte przez linę, z masą ładunku dochodzącą do 1000 kg [2].



Rys. 2. Podwieszona kolej szynowa [1]

W 1956 roku niemiecka firma Scharf wdrożyła podwieszony dwuteownik jako element nośny toru do transportu z napędem linowym (rys. 3). Zestaw transportowy składał się z wózka ciągnącego, wózków transportowych z wciągnikami ręcznymi, kontenerów i wózka hamulcowego. System ten szybko rozpowszechnił się w kopalniach niemieckich, angielskich i francuskich [2].



Rys. 3. Podwieszona kolej szynowa (trasa dwuteownikowa) z napędem linowym [1]

Rozwój tego typu transportu w Europie Zachodniej był impulsem do podjęcia prac w tym zakresie również w KOMAG-u. Z początkiem lat sześćdziesiątych XX w. nawiązano współpracę KOMAG-u z FMG PIOMA, w wyniku której opracowano (na podstawie licencji firmy Becorit) i wdrożono do produkcji i stosowania w podziemiach kopalń kolejkę szynową z napędem linowym typu KSP-32 (przeznaczoną także do przewożenia ludzi), a następnie typu KSP-63. Stały się one szybko popularnymi dołowymi środkami transportu – przykładowo FMG PIOMA S.A. do 1992 r. wdrożyła 1200 kolejek typu KSP-32 [3]. Rozwój podwieszonych kolejek szynowych z napędem linowym skutkował zwiększeniem nośności i wytrzymałości jezdni szynowych oraz zespołów zestawu transportowego, a także zwiększeniem siły pociągowej napędów linowych. Doświadczenia eksploatacji kolejek z napędem linowym wskazały jednak na ich ograniczenia, tj.:

- możliwość prowadzenia transportu jedynie wzdłuż z góry wyznaczonej trasy,
- brak wizualnego kontaktu pracownika obsługującego napęd z zestawem transportowym,
- możliwość niekontrolowanego zerwania liny ciągnącej i stwarzającej zagrożenie wypadkowe,
- konieczne, stałe nakłady na konserwację liny oraz zespołów rolek prowadzących na trasie jezdnej.

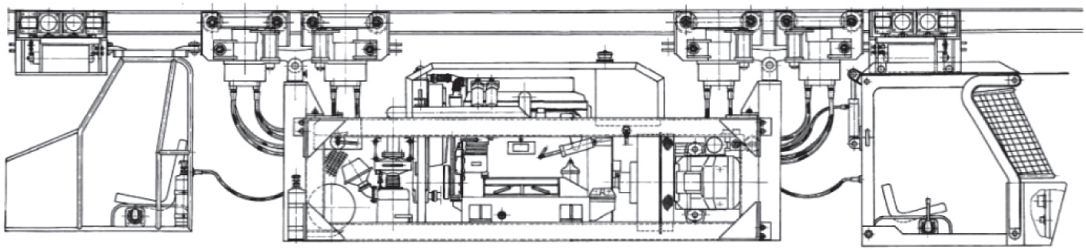
Pod koniec lat sześćdziesiątych rozwój podwieszonego transportu linowego w Europie Zachodniej praktycznie został zakończony, natomiast w polskich kopalniach (stan na 31.12.2016 r.), według wiedzy autorów, eksploatowanych jest jeszcze 48 kolejek podwieszonych z napędem linowym. Napęd linowy zastąpiono mobilnymi urządzeniami trakcyjnymi – podwieszony ciągnik (lokomotywę) z napędem spalinowym (wysokoprężnym). Pierwsze, prototypowe rozwiązania firm angielskich zademonstrowano w 1965 r. Rynkowe zastosowanie zapoczątkowała firma Ruhrthaler z Niemiec, wprowadzając w 1967 r. do kopalń niemieckich i francuskich dwukabinowy ciągnik typu HL 32H. Kolejnymi rozwiązaniami, które pojawiły się na rynku, były ciągniki (lokomotywy) firmy Scharf z Niemiec oraz Stephanoise z Francji (1970 r.). W 1967 r. prace nad tego typu rozwiązaniem rozpoczęto w Czechosłowacji w Prievidzy (Bansky Vyskumny Ustav).

Wraz z rozwojem ciągników (lokomotyw) doskonalono trasy podwieszone, zwiększając nośność oraz poprawiając połączenie i zawieszenia. Zamiast profilu I 120 zaczęto powszechnie stosować profil I 140 wg DIN (I 155 wg PN), a obecnie stosowany jest także profil I 250. Udoskonalono również rozwiązania wózków nośnych i hamulcowych oraz zestawów transportowych, w tym wciągników [2].

2. ROZWÓJ STOSOWANIA KOLEJEK PODWIESZONYCH Z NAPĘDEM SPALINOWYM W POLSKICH KOPALNIACH WĘGLA KAMIENNEGO

W 1976 roku w KOMAG-u opracowano pierwszą polską lokomotywę spalinową (ciągnik) Lps-80 do kolei podwieszonej, którą w 1979 r. wykonały Zakłady Urządzeń Naftowych i Gazowniczych w Krośnie. W latach 1979–1980 w KWK Ziemowit prowadzono jej próby doświadczalne, które pozwoliły na zebranie pierwszych doświadczeń eksploatacyjnych. Do napędu zastosowano silnik SW-400, wymagający okresowych regulacji ze względu na konieczność uzyskania wymaganej jakości (czystości) spalin. Silnik napędzał pompę RAUCHA o zmiennej wydajności (0–10 dm^3/min) i ciśnieniu 20 MPa, a ta silniki hydrauliczne SW-160 produkcji firmy HYDROSTER. Układ oczyszczania i chłodzenia spalin zapewniał utrzymanie wymaganej temperatury gazów wylotowych poniżej 70°C [4].

Na podstawie doświadczeń z próbnej eksploatacji lokomotywy (ciągnika) Lps-80, w 1980 roku opracowano dokumentację prototypu lokomotywy podwieszonej spalinowej (ciągnika) Lps-90D (rys. 4). Do napędu zastosowano również ww. silnik spalinowy oraz sprawdzony układ zabezpieczeń, gwarantujący uzyskanie wymaganej czystości spalin, a także ich temperatury wylotowej. Zastosowano pompę typu PAG AZP250 firmy Rexroth z zabudowanym regulatorem stałej mocy oraz zdalnie (hydraulicznie) sterowanym regulatorem wydajności i kierunkiem przepływu oraz zespołem dwóch pomp zębatych. Pompa napędzała



Rys. 4. Ciągnik podwieszony typu Lps-90D [4]

silniki hydrauliczne typu SOK-160K produkcji Hydroster. Wykonany w 1982 r. przez Zakład Naprawczy Taboru Samochodowego i Sprzętu w Brzesku (obecnie Małopolska Wytwórnia Maszyn Brzesko Sp. z o.o.) prototyp poddano próbom ruchowym w KWK Murcki, a następnie w KWK Piast, które potwierdziły poprawne działanie większości zespołów. Głównym mankamentem była niska trwałość wykładzin ciernych kół napędowych [4].

Powyższe doświadczenia wykorzystano podczas realizacji, w latach 1993–1996, wspólnie z FMG PIOMA S.A. (obecnie FAMUR S.A.), projektu celowego pt. „System transportu dołowego szynowymi kolejami podwieszonymi z napędem spalinowym". Opracowano, wykonano i przebadano, w warunkach stanowiskowych i ruchowych, lokomotywę (ciągnik spalinowy) o symbolu LPS-90 (rys. 5), przeznaczoną do napędu jednoszynowych kolei podwieszonych do transportu materiałów, elementów maszyn i urządzeń oraz do jazdy ludzi w podziemnych wyrobiskach górniczych potencjalnie zagrożonych wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego.

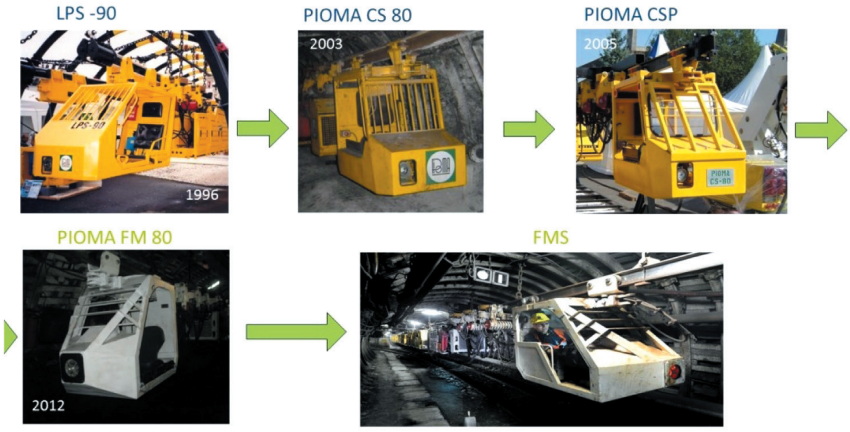
Wyniki projektu przyczyniły się do późniejszego rozwoju kolejek podwieszonych z napędem spalinowym w FMG PIOMA S.A. (FAMUR S.A.) – rysunek 6.

Wdrożenie kolei podwieszonych z napędem spalinowym w polskich kopalniach węgla kamiennego nastąpiło w pierwszej połowie lat dziewięćdziesiątych XX w. Na koniec 1995 r., w eksploatacji znajdowało się 35 tego typu urządzeń (KWK Ziemowit, KWK Piast, KWK Bogdanka – po 6 szt., KWK Mysłowice – 4 szt., KWK Wesoła, KWK Staszic – 3 szt., KWK Murcki, Czeczott – po 2 szt., KWK Brzeszcze, KWK Janina, KWK Andaluzja po 1 szt.). Były to kolejki firm: Ruhrthaler, Scharf, BVU Prievidza i ORTAS Pribram. Obecnie w polskich kopalniach (stan na 31.12.2016 r.), według wiedzy autorów, eksploatowanych jest 566 kolejek (ciągników) podwieszonych z napędem spalinowym. Głównymi ich dostawcami są firmy: BECKER-WARKOP Sp. z o.o., FAMUR S.A., SCHARF, BEVEX i FERRIT. Na rysunku 7 przedstawiono przykłady aktualnie oferowanych kolejek (ciągników) z napędem spalinowym, a w tabeli 1 ich podstawowe parametry.

Zastosowanie kolejek z napędem spalinowym wymagało opracowania i wdrożenia nowych tras jezdnych i ich zawiesi. Podstawowym wymogiem było przenoszenie siły wzdłużnej, skutkujące opracowaniem m.in. nowych rozwiązań połączenia szyn.

a) *b)*

Rys. 5. Lokomotywa (ciągnik) LPS-90: a) na targach KATOWICE' 95; b) w wyrobisku podziemnym [5]



Rys. 6. Rozwój kolei z napędem spalinowym w FMG PIOMA S.A./FAMUR S.A [5]

Rys. 7. Przykłady aktualnie oferowanych kolejek z napędem spalinowym [5]

Tabela 1
Podstawowe dane wybranych kolejek z napędem spalinowym [5]

Typ	Producent	Max. siła uciągu [kN]	Liczba wózków napędowych	Max. prędkość [m/s]	Max. nachylenie [°]	Moc silnika spalinowego [kW]	Producent silnika spalinowego
KP-95	Becker-Warkop	40–240	2–12	2,5	30	80–95	Deutz
KP-96	Becker-Warkop	40–240	2–12	2,5	30	96	Perkins
KP-148	Becker-Warkop	40–240	2–12	2,5	30	148	Deutz
FMS	Famur	85/105/120/140	4/5/6/7	2,5	30	81 lub 95	Deutz
CSZ	Famur	85/105/120/140	4/5/6/7	2,6	30	123	Deutz
DZ 80	Scharf	160	3–8	2	30	80	Liebherr
DZ 130	Scharf	160	3–8	2,5	30	130	Liebherr
DLZ 110F	Ferrit	60–140	4–7	2,0	30	81	Zetor
DLZ 210F	Ferrit	110–330	4–12	3,1	30	127–142	John Deere
LZH120D5.1	Ortas	80/100/120	4/5/6	2,0/1,7/1,4	30	81	Zetor
BEVEX 80	Bevex	60/80/100	3/4/5	2,0/1,8/1,5	25	81	–
BEVEX 90	Bevex	80/100/120	4/5/6	2,0/1,8/1,5	30	91	–

a) *b)*

Rys. 8. Przykładowe rozwiązania zestawów transportowych: a) do jazdy ludzi; b) do transportu kompletnych sekcji obudowy zmechanizowanej [5]

Wdrożono liczne rozwiązania zestawów transportowych, w tym do jazdy ludzi (rys. 8a), transportowania materiałów i urządzeń, wyposażenia przodków chodnikowych itd. Na szczególną uwagę zasługują zestawy do transportu kompletnych sekcji obudowy zmechanizowanej (rys. 8b), umożliwiające znaczne skrócenie czasu relokacji kompleksów ścianowych.

Główne zalety stosowania kolejek z napędem spalinowym to [6]:

- możliwość transportu po nieograniczonej długości i rozgałęzionej trasie,
- możliwość ciągłej obserwacji trasy przez maszynistę,
- łatwe i szybkie wydłużanie lub skracanie trasy,
- łatwy załadunek i wyładunek,
- łatwość podwieszania różnych nośników,
- zwiększenie efektywności transportu (przewożenie maszyn i urządzeń górniczych w całości) dzięki dużej sile uciągu,
- bezstopniowa zmiana prędkości jazdy lokomotywy,
- możliwość transportowania (w tym dowozu załogi) bezpośrednio do przodka,
- poprawa bezpieczeństwa pracy dzięki zastosowaniu elektronicznego systemu kontroli i blokad oraz przeciwwybuchowej instalacji elektrycznej.

Eksploatacja kolejek ujawniła również następujące zasadnicze niedogodności stosowania napędów spalinowych w podziemnych wyrobiskach kopalń węgla kamiennego [7]:

- emisja spalin i ciepła do otaczającej atmosfery kopalnianej,
- generowanie hałasu,
- konieczność transportu paliwa do podziemnych wyrobisk przy spełnieniu wysokich wymagań bezpieczeństwa, zwłaszcza podczas tankowania.

3. INNOWACYJNE ROZWIĄZANIA PODWIESZONYCH URZĄDZEŃ TRANSPORTOWYCH Z NAPĘDEM AKUMULATOROWYM

Wymienione w rozdziale 2 ograniczenia stosowania kolejek z napędem spalinowym przyczyniły się do podjęcia prac nad powstaniem napędu akumulatorowego.

Kryterialnym czynnikiem, stymulującym rozwój napędu akumulatorowego, było opracowanie i uruchomienie nowoczesnej aparatury energoelektronicznej spełniającej wymogi bezpiecznego stosowania w atmosferach potencjalnie wybuchowych oraz baterii akumulatorów. W 1997 r. firma Scharf opracowała pierwszą kolejkę podwieszoną (typu EMTS) z napędem akumulatorowym, przeznaczoną do przewozu osób i transportu materiałów w niezagrożonych wybuchem wyrobiskach kopalń rud.

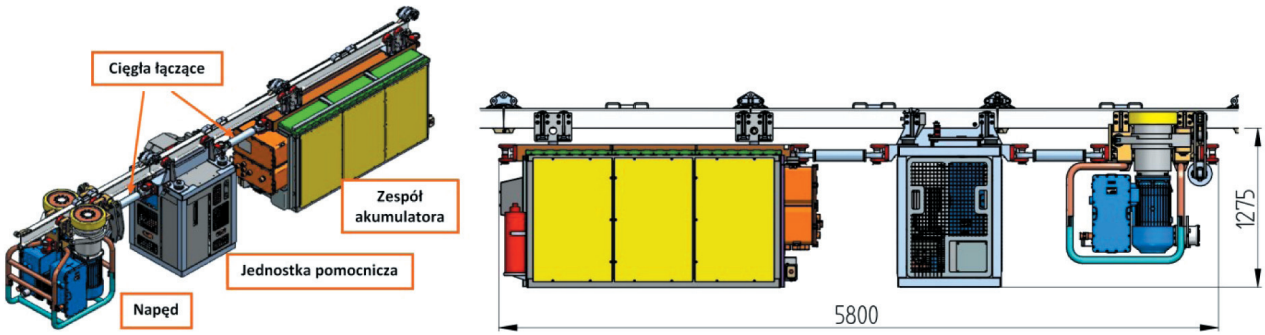
Korzystając z nabytych doświadczeń, opracowano ciągnik akumulatorowy typu BZ 45-2-40 (rys. 9) do kolejek podwieszonych eksploatowanych w podziemnych wyrobiskach kopalń węgla kamiennego.

Podobną kolejkę, typu DLZA 90F (rys. 10), zaoferowała firma Ferrit, zaś firma Becker – Warkop opracowała i wdrożyła podwieszony ciągnik akumulatorowy CMA-190 (rys. 11). W urządzeniach tych zastosowano baterie kwasowo-ołowiowe, których duża masa i wymiary (niska gęstość energii) ograniczają funkcjonalność wymienionych rozwiązań.

Również Instytut KOMAG, przy współpracy z innymi jednostkami oraz partnerami przemysłowymi, opracował innowacyjne rozwiązania podwieszonych urządzeń transportowych, zasilane z baterii akumulatorowych, przeznaczone do eksploatacji w podziemnych wyrobiskach górniczych potencjalnie zagrożonych wybuchem. Są to: *Ciągnik akumulatorowy GAD-1* i *Podwieszony ciągnik akumulatorowy PCA-1*.

Rys. 9. Kolejka akumulatorowa typu BZ 45-2-40 firmy Scharf [5]

Rys. 10. Kolejka akumulatorowa typu DLZA 90F firmy Ferrit [5]



Rys. 11. Ciągnik manewrowy akumulatorowy CMA-1 [5]

3.1. Podwieszony ciągnik akumulatorowy GAD-1

Ciągnik akumulatorowy GAD-1 (rys. 12), przeznaczony do kolejek podwieszonych, jest efektem realizacji, projektu celowego, którego beneficjentem była firma NAFRA Polska Sp. z o.o. (producent). Rozwiązanie powstało przy współpracy z Instytutem Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL oraz firmami IMPACT S.C., VACAT Sp. z o.o., SOMAR S.A. i ENEL-PC Sp. z o.o.

Do zasilania napędu ciągnika zastosowano ogniwa litowo-polimerowe, o dużej gęstości energii, niewykorzystywane do tej pory w górnictwie. Źródłem zasilania są cztery zespoły, każdy z szeregowo połączonych ze sobą 72 ogniw, tworzących baterię o napięciu 265 VDC. Baterię, o łącznej energii 160 kWh, umieszczono w osłonie ognioszczelnej.

W wózkach napędowych zastosowano bezszczotkowe silniki synchroniczne z magnesami trwałymi. Moment obrotowy z silników jest przenoszony na trasę jezdną w sposób cierny, a przy nachyleniach powyżej 10° – przez przełożenie zębate (po trasie zębatej). Sekwencyjna zmiana trybu napędowego z ciernego na zębaty i odwrotnie, kolejno, przez poszczególne

a)

b)

Rys. 12. Podwieszony ciągnik akumulatorowy GAD-1: a) na stanowisku producenta; b) w wyrobisku podziemnym [8]

wózki napędowe, realizowana jest automatycznie. Wymienione silniki cechuje wysoka sprawność (w porównaniu z silnikami indukcyjnymi) i bardzo precyzyjne sterowanie wektorem momentu.

Nadrzędny system sterowania ciągnikiem GAD-1 zbudowano na podstawie struktury rozproszonej, łączącej ze sobą wszystkie elementy układu sterowania za pośrednictwem magistrali CAN, cechującej się wysoką odpornością na zakłócenia.

Uniwersalność zastosowanego protokołu CanOpen pozwala na komunikowanie się podzespołów różnych producentów oraz umożliwia diagnozowanie magistrali.

Atutem podwieszonego ciągnika GAD-1 jest możliwość rekuperacji energii podczas hamowania silnikami. Za poprawność działania tego procesu odpowiada inteligentny system nadzoru zespołem baterii – BMS, który służy do ciągłego monitoringu parametrów zarówno całego zespołu baterii, jak i każdego ogniwa indywidualnie, decydując o równomiernym rozpływie energii pomiędzy poszczególnymi ogniwami. Dodatkowo, pełni funkcję zabezpieczenia, zarówno programowego, jak i sprzętowego, przed niepożądanymi zdarzeniami, takimi jak przeładowanie czy nadmierne rozładowanie baterii.

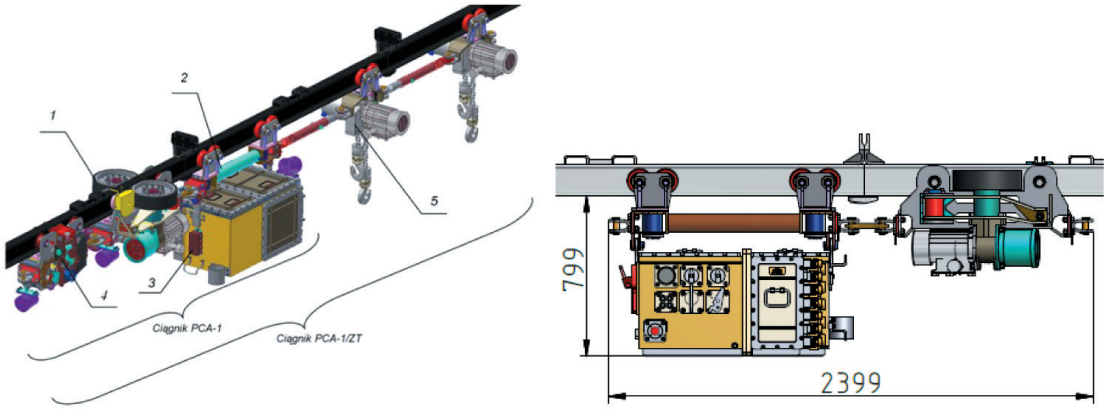
Odpowiedni dobór parametrów komponentów współpracujących z zespołem baterii oraz opracowane algorytmy bezpieczeństwa pozwoliły na opracowanie maszyny przeznaczonej do pracy w warunkach zagrożeń skojarzonych (zagrożenie wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego, pożarowe, wodne). Spełnienie wymagań unijnych potwierdzono wydaniem certyfikatów badania typu WE przez jednostkę notyfikowaną. Odrębne certyfikaty, obejmujące podstawowe moduły ciągnika, tj. baterii akumulatorów MB-1, moduł zasilająco-sterujący MZS-1 i moduł ładujący MŁ-1, pozwalają na ich niezależną implementację w innych urządzeniach przeznaczonych do eksploatacji w atmosferach potencjalnie wybuchowych.

3.2. Podwieszony ciągnik akumulatorowy PCA-1

Potrzeba mechanizacji prac związanych z przemieszczaniem ładunków lub elementów maszyn na stosunkowo krótkich odległościach (do 100 m), np. w drążonych przodkach chodnikowych, stanowiła podstawę opracowania podwieszonego ciągnika akumulatorowego PCA-1 (rys. 13). Może on być opcjonalnie wyposażony w zestaw transportowy z wciągnikami z napędem elektrycznym (rys. 13, poz. 5). Istnieje również możliwość zastosowania, w zestawie transportowym, wciągników z napędem ręcznym lub zasilanych innym medium, z zewnętrznego źródła.

Do przemieszczania zestawu transportowego po jezdni podwieszonej służy wózek napędowy (rys. 13, poz. 1), wyposażony w dwa zespoły napędu ciernego z silnikami elektrycznymi.

Zabudowane w nich tarczowe hamulce elektromagnetyczne pełnią funkcję hamulca postojowego i awaryjnego. Źródłem zasilania jest bateria o napięciu 48 VDC i pojemności 100 Ah, składająca się z połączonych szeregowo 15 wysokowydajnych ogniw litowo-żelazowo-fosfatowych (LiFePO4). Pracuje ona pod nadzorem systemu BMS oraz kontrolera stanu naładowania baterii UMA-1. Zamiana prądu stałego na prąd przemienny, o regulowanej częstotliwości, realizowana jest przez falownik wykonywany przez firmę ENEL Sp. z o.o. Wszystkie elementy wyposażenia



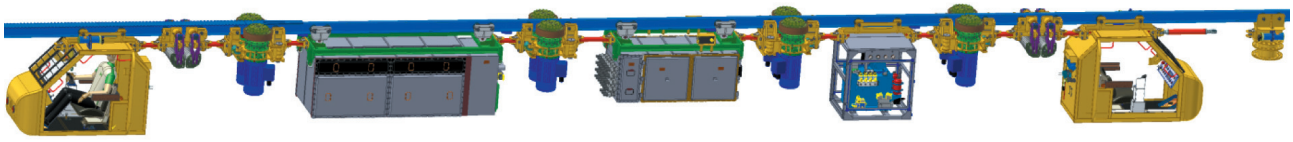
Rys. 13. Podwieszony ciągnik akumulatorowy PCA-1 (PCA-1 – wersja standardowa, PCA-1/ZT – wersja z zestawem transportowym): 1 – wózek napędowy, 2 – wózek aparaturowy, 3 – moduł zasilający, 4 – wózek hamujący, 5 – zestaw transportowy [8]

elektrycznego wraz z baterią ogniw i falownikiem zabudowano w module zasilającym MZ-1, składającym się z trzech komór: aparaturowej, akumulatorowej i przyłączeniowej. Kompaktowa konstrukcja pozwoliła na ograniczenie liczby elementów aparatury elektrycznej (zwłaszcza zabezpieczającej), a tym samym ograniczenie gabarytów modułu oraz jego masy. Przewidziano możliwość sterowania przewodowego, z kasety połączonej z modułem MZ-1, lub bezprzewodowego (radiowego). Mikroprocesorowe sterowanie wektorem momentu w czterech ćwiartkach układu moment – prędkość, umożliwia pracę z rekuperacją energii w czasie hamowania silnikami elektrycznymi, a także podczas opuszczania mas elektrycznymi wciągnikami. Kolejną, innowacyjną cechą rozwiązania jest możliwość doładowywania baterii w miejscu eksploatacji, z ogólnodostępnych zespołów transformatorowych, co eliminuje potrzebę przemieszczania ciągnika do zajezdni. Producentem ciągnika PCA-1 jest firma HELLFEIER Sp. z o.o.

4. KOMPUTEROWE NARZĘDZIA WSPOMAGAJĄCE PROJEKTANTÓW I UŻYTKOWNIKÓW TRANSPORTU PODWIESZONEGO

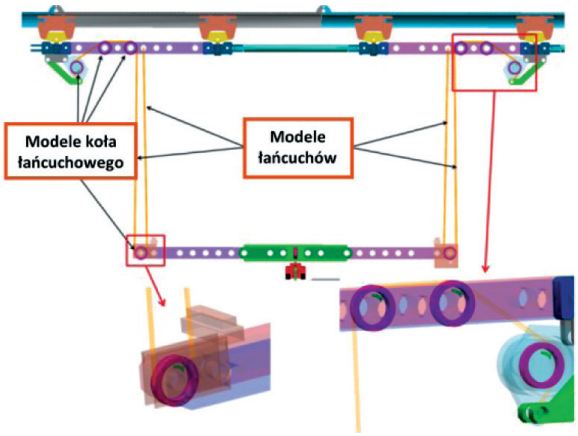
Od kilkunastu lat proces projektowania środków technicznych pomocniczego transportu górniczego, w tym kolejek podwieszonych z napędem własnym, jest realizowany wyłącznie w środowisku komputerowym. Proces projektowania rozpoczyna się od opracowywania przestrzennych modeli geometrycznych, obejmujących cały system transportowy za pomocą programów klasy CAD (*Computer Aided Design*). W skład systemu transportu podwieszonego wchodzi zespół transportowy oraz trasa podwieszona. Kompletny zespół transportowy w zależności od konfiguracji, jest najczęściej zbudowany z ciągnika, zestawu nośnego oraz układu wózków hamulcowych. Na tym etapie procesu projektowego weryfikowane są podstawowe założenia, takie jak: wymagane gabaryty zewnętrzne, masa oraz wykrywanie kolizyjności pomiędzy częściami i zespołami modelu przestrzennego. Przykład modelu geometrycznego ciągnika podwieszonego GAD-1 z napędem własnym (elektrycznym) przedstawiono na rysunku 14.

Do weryfikacji założonych i wymaganych parametrów technicznych przyszłego środka technicznego, w różnych stanach kryterialnych stosowana jest metoda analizy kinematyki i dynamiki układów wielocłonowych MBS (*Multi-Body System*), umożliwiająca obliczenie wartości sił dynamicznych podczas rozpędzania i hamowania, w tym hamowania awaryjnego, występujących zarówno w zespole transportowym, jak i w złączach i zawiesiach trasy podwieszonej. Jest to układ wielokrotnie, statycznie niewyznaczalny.



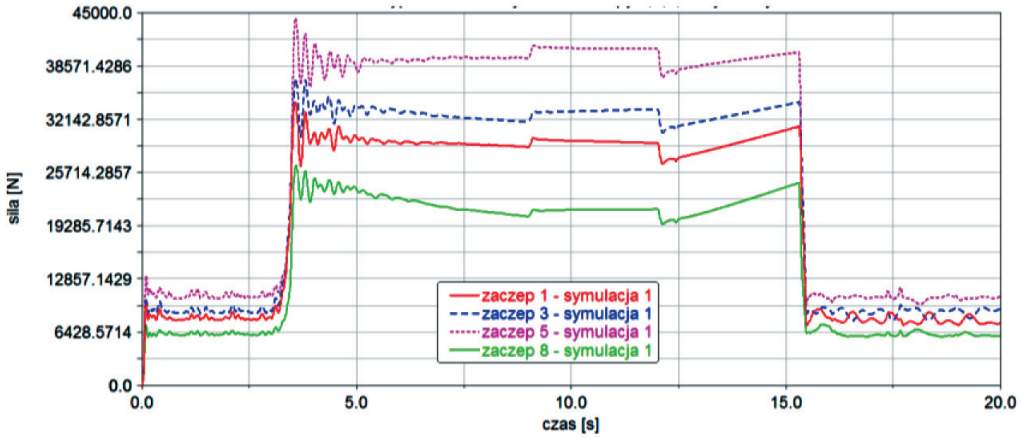
Rys. 14. Model geometryczny ciągnika górniczej kolejki podwieszonej opracowany w środowisku oprogramowania klasy CAD [8]

Wstępne modele geometryczne stanowią podstawę do opracowania modeli obliczeniowych, które składają się ze sztywnych lub podatnych brył, połączonych odpowiednimi więzami różnych klas, np. obrotowymi, cylindrycznymi, sferycznymi, przesuwnymi i utwierdzającymi. Oprócz więzów stosowane są modele kontaktów. Zaawansowane programy klasy MBS umożliwiają wprowadzenie do modeli obliczeniowych modeli innych podukładów przeniesienia napędu, np. przekładni łańcuchowej. Na rysunku 15 przedstawiono model obliczeniowy zestawu nośnego do transportu materiałów wielkogabarytowych z kompletnym układem podnoszenia trawers wzdłużnych, utworzony w środowisku programu MSC.Adams.



Rys. 15. Model obliczeniowy modułowego zestawu nośnego, utworzony w środowisku programu klasy MBS [9]

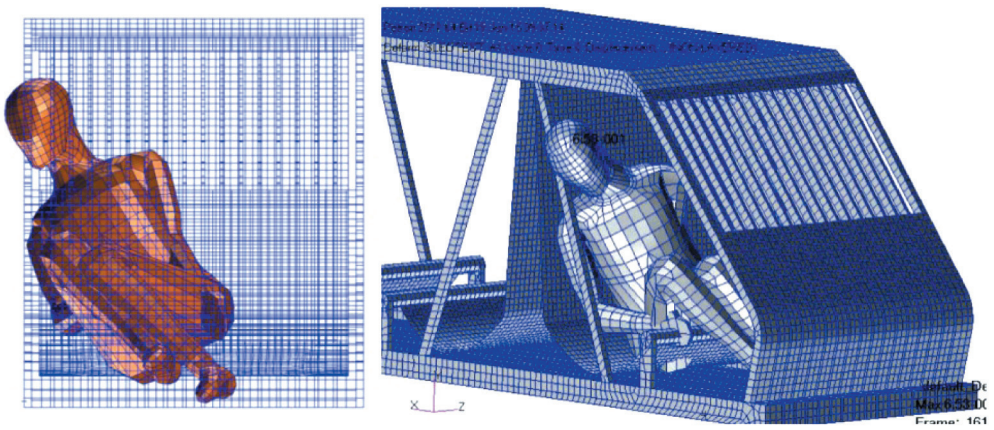
Modele obliczeniowe, w programach klasy MBS mogą być sprzęgane z programami, w których możliwe jest symulowanie układów sterowania. W ten sposób prowadzone są symulacje wielu faz procesu transportu. W przypadku zestawu nośnego może to być cykl: podnoszenie ładunku, przejazd i jego opuszczenie. Na rysunku 16 przedstawiono przykładowy przebieg sił w wybranych węzłach zestawu nośnego podczas podnoszenia ładunku, jego ustabilizowania się, a następnie opuszczenia na spąg. Wyznaczenie przebiegów sił daje możliwość identyfikacji wartości maksymalnych w zaczepach podczas manewrowania transportowanym ładunkiem.



Rys. 16. Przebieg sił w zestawie nośnym podczas podnoszenia i opuszczania ładunku wielkogabarytowego [9]

Wyniki symulacji typu MBS stanowią dane wejściowe do analiz numerycznych, wykorzystujących metodę elementów skończonych (*Finite Element Method*). Oprócz przedstawionych powyżej wyników (parametry siłowe), można uzyskać dane dotyczące wartości przyspieszeń i opóźnień działających na środek techniczny, a tym samym na operatora, w tzw. stanach awaryjnych. Stany awaryjne związane są zwykle z nieprawidłowym użytkowaniem środka transportu lub jego uszkodzeniem, np. jazdą z niedozwoloną prędkością, aktywacją hamulców w nieprawidłowej konfiguracji zespołu transportowego czy uderzeniem o przeszkodę. Gwałtowane zatrzymanie lub zmiana kierunku jazdy może spowodować uraz operatora lub pasażerów. Identyfikacja tego typu zagrożeń wymaga specjalistycznego oprogramowania do symulowania zjawisk szybkozmiennych. Modele obliczeniowe powinny zawierać cechy antropometryczne, umożliwiające obliczanie parametrów biomechanicznych. Są to wirtualne odpowiedniki manekinów stosowanych w testach zderzeń komunikacyjnych. Na rysunku 17 przedstawiono skutek jazdy kolejką podwieszoną, z prędkością 5 m/s na zakręcie o promieniu 4 m.

Wspomaganie komputerowe obejmuje nie tylko fazę projektowania, ale służy również użytkownikom kolejek podwieszonych. Zgodnie z *Rozporządzeniem*



Rys. 17. Zachowanie się wirtualnego modelu manekina Hybrid III podczas jazdy kabiną osobową na zakręcie z prędkością 5 m/s [10]

Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych, użytkownicy środków górniczego transportu podwieszonego zobowiązani są do dokonywania obliczeń trakcyjnych. W Instytucie KOMAG opracowano system STD (*Safe Trans Design*), który umożliwia odpowiedni dobór komponentów zespołu transportowego, np. ciągnika, wózków hamulcowych, zestawów nośnych, do konkretnych warunków prowadzenia transportu.

W przypadku transportu podwieszonego warunki te określone są przez nachylenie wyrobiska, w którym prowadzony jest transport, a także parametry trasy podwieszonej, takie jak długość, profil i typ szyn oraz nośność zawiesi. Wyniki obliczeń dostarczają informacji o maksymalnej masie netto transportowanego ładunku, drodze hamowania, opóźnieniu hamowania, rozkładzie sił wzdłużnych w cięgłach zespołu transportowego, a także umożliwiają analizę kolizyjności podczas transportu materiałów wielkogabarytowych.

System STD stanowi wsparcie służb kopalnianych w zakresie tworzenia dokumentacji układu transportu z zastosowaniem kolejek podwieszonych, dzięki minimalizacji błędów podczas konfigurowania kolejek podwieszonych i dokonywaniu obliczeń trakcyjnych, co przekłada się na poprawę bezpieczeństwa pracy.

5. PERSPEKTYWY ROZWOJU TRANSPORTU PODWIESZONEGO

Rozwój w dziedzinie kolejek podwieszonych w kopalniach węgla kamiennego należy rozważyć, uwzględniając następujące aspekty:

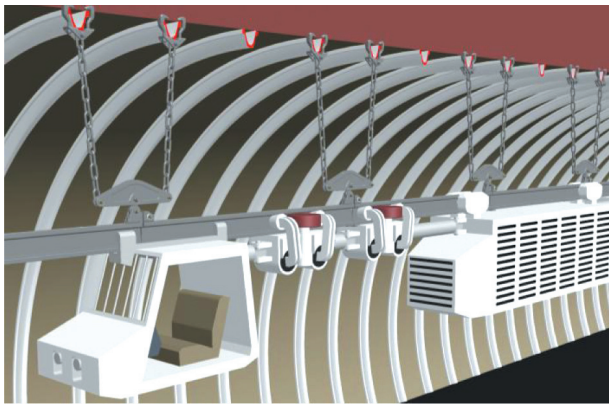
- warunki górniczo-geologiczne, w jakich są i będą wykonywane wyrobiska transportowe,
- parametry transportowanych ładunków (masy jednostkowe oraz wymiary),
- wymagany poziom bezpieczeństwa prowadzenia prac transportowych,
- aktualnie stosowane środki transportu, zwłaszcza w aspekcie ich efektywności,
- konkurencyjność przewidywanych nowych środków transportu,
- minimalizacja skutków oddziaływania na środowisko naturalne,
- uwarunkowania ekonomiczne – celowość i opłacalność zastosowania nowych środków transportu.

Mając na uwadze poczynione inwestycje, nie należy oczekiwać radykalnego zastąpienia napędów spalinowych napędami akumulatorowymi. W związku z tym należy w stosunkowo krótkim czasie oczekiwać:

- zmniejszenia emisji szkodliwych składników spalin,
- zmniejszenia emisji ciepła i hałasu ze spalinowej jednostki napędowej.

Przewiduje się, że warunki wentylacyjne wymuszą w perspektywie wprowadzenie napędów elektrycznych. Stąd należy spodziewać się rozwoju tych napędów, nie tylko akumulatorowych, ale także zasilanych zewnętrznie, np. z szynoprzewodu.

Dynamiczny rozwój napędów nie przełożył się na zwiększenie możliwości obciążania tras jezdnych, wynikających ze wskaźników wytrzymałościowych szyn, złącz szynowych oraz stosowanych sposobów podwieszenia trasy. Obciążenie nominalne zawiesi mocowanych do łuków obudowy podatnej ŁP z uwagi na wymagania obowiązujących przepisów ograniczone jest do 40 kN, co praktycznie wyklucza możliwość transportu maszyn i urządzeń o większych – skupionych masach z wykorzystaniem szynowych kolejek podwieszonych. Zwiększenie obciążenia złączy szynowych w kierunku zawieszenia jest możliwe np. w wyniku zastosowania trawersy wyrównującej obciążenie w zawiesiach (rys. 18).



Rys. 18. Podwieszenie toru jezdnego do łuków obudowy z wykorzystaniem trawersy wyrównującej obciążenie zawiesi (maksymalne obciążenie złącza szynowego w kierunku zawieszenia 80 kN) [11]

Do dziś nie opracowano metod obliczeń dynamicznych, np. podczas hamowania kolejki, a zwłaszcza hamowania awaryjnego. Opracowanie metod określających siły dynamiczne w elementach trasy jest bardzo oczekiwane zarówno przez projektantów, jak

i użytkowników, zwłaszcza w aspekcie analiz możliwości zwiększenia maksymalnej prędkości kolejek (obecnie 2 m/s). Specjaliści Instytutu KOMAG przeprowadzili zatem w podziemnym wyrobisku rejestrację sił w zawiesiach podczas hamowania, w tym hamowania awaryjnego – ze względów bezpieczeństwa, przy znacznie ograniczonych prędkościach.

Czwarta rewolucja przemysłowa (INDUSTRY 4.0) wprowadzi do powszechnej praktyki systemy automatyzacji, wizualizacji i monitoringu. Jeśli chodzi o kolejki podwieszone, należy przewidywać powszechne wdrożenie systemów kontroli ruchu umożliwiających bieżącą lokalizację kolejek w podziemiach kopalń. Przewiduje się również powszechne zastosowanie technologii RFID [12, 13]. Systemy te będą funkcjonować na podstawie bezprzewodowej transmisji danych informujących o lokalizacji środków transportowych, a także o ich stanie technicznym. Istotną częścią systemów stanie się oprogramowanie w celu ostrzegania i alarmowania w awaryjnych sytuacjach, co przyczyni się do poprawy bezpieczeństwa pracy na kopalnianych drogach transportowych.

Literatura

[1] Mitręga J. (red.): *Rozwój mechanizacji robót podziemnych w kopalniach węgla kamiennego w PRL*, Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1967.

[2] Kovalik M.: *Vykonnejsia viacdielna zavesna lokomotiva LZH-50. D.3*, „Spravodaj" 1988, 1: 11–20.

[3] Marciniak Z., Jałmużna J.: *Perspektywy rozwoju pomocniczego transportu podziemnego w świetle oferty FMG „PIOMA" S.A.*, „Miesięcznik WUG" 2002, 3: 30–34.

[4] Pieczora E.: *Prace prowadzone przez CMG KOMAG w zakresie dołowych i powierzchniowych wąskotorowych lokomotyw spalinowych*, Sympozjum nt. „Dołowe i powierzchniowe wąskotorowe lokomotywy spalinowe w kopalniach PW", CMG KOMAG, Gliwice 1990.

[5] Pieczora E., Suffner H.: *Rozwój napędów dołowych kolejek podwieszonych*, „Maszyny Górnicze" 2017, 3: 44–57.

[6] Fuksa D., Kęsek M., Ślósarz M., Bator A.: *Koncepcja zintegrowanego systemu transportu poziomego w kopalniach węgla kamiennego*, „Przegląd Górniczy" 2015, 8: 23–25.

[7] Pieczora E.: *Prognoza rozwoju szynowych systemów transportowych stosowanych w podziemiach kopalń węgla kamiennego,* „Gospodarka Surowcami Mineralnymi" 2008, 24, 1/2: 221–232.

[8] Pieczora E., Polnik B.: *Nowe rozwiązania napędów elektrycznych do górniczych maszyn transportowych*, „Cuprum" 2015, 3: 199–210.

[9] Szewerda K., Tokarczyk J., Turewicz A.: *Metoda wyznaczania sił dynamicznych w wysokoobciążalnych modułowych zestawach transportowych za pomocą analiz MBS*, ITG KOMAG 2014 [praca niepublikowana].

[10] Tokarczyk J.: *Wirtualne prototypowanie systemów mechanicznych w górnictwie*, ITG KOMAG 2014 [praca niepublikowana].

[11] Mrowiec H., Raszka W., Dyrda J.: *Zawiesia torów jezdnych szynowych kolejek podwieszonych*, Konferencja „Bezpieczeństwo pracy urządzeń transportowych w górnictwie", Centrum Badań i Dozoru Górnictwa Podziemnego, Ustroń 2010.

[12] Michalak D.: *Applying the Augmented Reality and RFID Technologies in the Maintenance of Mining Machines*, Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, San Francisco, USA 2012.

[13] Rogala-Rojek J., Jasiulek D., Latos M., Piecha A., Woszczyński M., Stankiewicz K.: *iRIS – System identyfikacji maszyn, urządzeń, środków trwałych oraz transportu*, ITG KOMAG 2012 [praca niepublikowana].

dr inż. EDWARD PIECZORA
dr inż. JAROSŁAW TOKARCZYK
Instytut Techniki Górniczej KOMAG
ul. Pszczyńska 37, 44-101 Gliwice
{epieczora, jtokarczyk}@komag.eu