

Badania możliwości pomiaru ciężaru zawieszonego na linie wyciągowej współpracującej z maszyną wyciągową w górniczym wyciągu szybowym Szybu Daniłowicz w Kopalni Soli „Wieliczka”

Data wpłynięcia do Redakcji: 03/2025
Data akceptacji przez Redakcję do publikacji: 03/2025

2025, volume 14, issue 1, pp. 31-40

Tomasz Rokita
AGH w Krakowie , Poland

Rafał Pasek
AGH w Krakowie , Poland

Krzysztof Rozwadowski
AGH w Krakowie , Poland

Karol Szczepaniec
MWM Electro Sp. z o.o., Poland



Streszczenie: W artykule poruszono problematykę pomiaru ciężaru zawieszonego na linie wyciągowej współpracującej z maszyną wyciągową w górniczych wyciągach szybowych. Szyb oraz jego wyposażenie stanowi jeden z najważniejszych elementów infrastruktury technicznej zakładu górniczego, pełni m.in.: funkcję komunikacyjną (transport ludzi i materiałów), wentylacyjną (przewietrzanie wyrobisk) oraz technologiczną (transport mediów), staje się wyzwaniem do ciągłego dążenia do opracowanie jak najbardziej efektywnego systemu transportu pionowego. W artykule przedstawiono metodę pomiaru ciężaru zawieszonego na linie wyciągowej wykorzystującej pomiar naprężeń występujących w stojakach hamulców maszyny wyciągowej. Badania realizowano na stanowisku badawczym zabudowanym w górniczym wyciągu szybowym szybu Daniłowicza w Kopalni Soli „Wieliczka”. Zastosowanie metody pomiaru ciężaru, a w konsekwencji pomiaru sił w linach może być wykorzystany przy prowadzeniu ruchu w celu wyeliminowania zaburzeń dynamicznych występujących w trakcie pracy maszyn wyciągowych. Dodatkowo dane pomiarowe mogą być wykorzystane jako dodatkowy element systemu bezpieczeństwa – do przełączania hamulca w dwuwariantowym hamowaniu. System może również wykrywać nadwagę przy uruchomieniu maszyny wyciągowej. A zatem innowacyjna metoda pomiaru ciężaru zawieszonego na linie, może mieć szerokie zastosowanie w zakresie układów sterowania maszyn wyciągowych.

Słowa kluczowe: maszyna wyciągowa, naczynie wyciągowe, transport pionowy

WPROWADZENIE

Podczas prowadzenia prac badawczo-rozwojowych w firmie MWM Elektro pojawiała się potrzeba pomiaru masy umieszczonej w naczyniach maszyn wyciągowych. Dotychczas informację o masie w naczyniu można było odczytać pośrednio po ustabilizowaniu się jazdy maszyny odczytując prąd silnika. Informacja o masie umieszczonej w naczyniu w chwili przed odhamowaniem maszyny dałaby możliwość wprowadzenia momentu wstępnego silnika napędowego, co ułatwiło by odpowiednie wysterowanie maszyny w chwili odhamowania i zapobiegło niepożądanym ruchom maszyny w kierunku

przeciwnym do zadanego lub zbyt gwałtownych przyspieszeń maszyny w kierunku zadanym. W celu potwierdzenia osiągniętych wyników w laboratorium, podjęto decyzję o sprawdzeniu metody na eksploatowanym w ruchu obiekcie przemysłowym. Badanie wykonano na górniczym wyciągu szybowym szybu Daniłowicz w Kopalni Soli „Wieliczka”.

GÓRNICZY WYCIĄG SZYBOWY SZYBU DANIŁOWICZ

Szyb „Daniłowicz” jest obiektem zabytkowym i jest wpisany do rejestru zabytków Kopalni Soli „Wieliczka” S.A. Jest to szyb wdechowy, w którym pracuje górniczy wyciąg szybowy: klatka z przeciwcieżarem napędzany maszyną wyciągową typu BB-2500/AC (Ekspertyza techniczna dla szybu Daniłowicz).

Jest to dwubębnowa maszyna wyciągowa z możliwości wzajemnego przestawiania bębnow nawojowych. Stosowana jest w dwunaczyniowym górniczym wyciągu szybowym bez liny wyrównawczej. Jeden bęben nawojowy zamocowany jest do wału głównego na stałe i nazywany jest bębniem stałym. Drugi bęben nawojowy, nazywany bębniem luźnym, osadzony jest na wale poprzez łożyska ślizgowe i połączony jest z wałem poprzez sprzęgło zębate (wyprężane hydraulicznie).

Sterowanie ruchem maszyny wyciągowej prowadzone jest ręcznie z pulpitu sterowniczego maszyny wyciągowej lub automatycznie w trybie zdalnego uruchamiania.

Maszyna wyposażona jest w dwa napędy elektryczne:

- główny z silnikiem o mocy 160 kW umożliwiający ruch z prędkością 4 m/s;
- dodatkowy z silnikiem o mocy 22 kW uruchamianym tylko w przypadku niesprawności głównego napędu, który umożliwia ruch wyciągu z maksymalną prędkością $V = 0,5$ m/s.

Głównymi elementami części mechanicznej maszyny wyciągowej BB-2500/AC-4 m/s są:

- zestaw wału głównego który podtrzymywany jest w dwóch łożyskach tocznych, z dwoma bębnami nawojowymi, wyposażonymi w wykładzinę firmy LEBUS dostosowaną do liny wyciągowej nośnej o średnicy nominalnej 28 mm, z możliwością wyprężania tzw. Bębna luźnego i wzajemnego ich przestawiania,
- sprzęgło zębate firmy SIEMENS łączące wał główny maszyny z wałem wolnobieżnym walcowej przekładni zębatej,
- walcowa przekładnia zębata firmy FLENDER o przełożeniu 16,
- silnik prądu zmiennego firmy ABB wraz z podatnym sprzęgłem firmy SIEMENS, łączącym wał wirnika silnika z wałem szybkobieżnym walcowej przekładni zębatej, które razem stanowią napęd główny maszyny wyciągowej,
- hamulec tarczowy, w którego skład wchodzi odwodzone hydrauliczne 4 pary siłowników typu BSFG 405, zamocowane na dwóch stojakach, sterowane dwu-agregatowym elektrohydraulicznym zespołem sterowniczo zasilającym

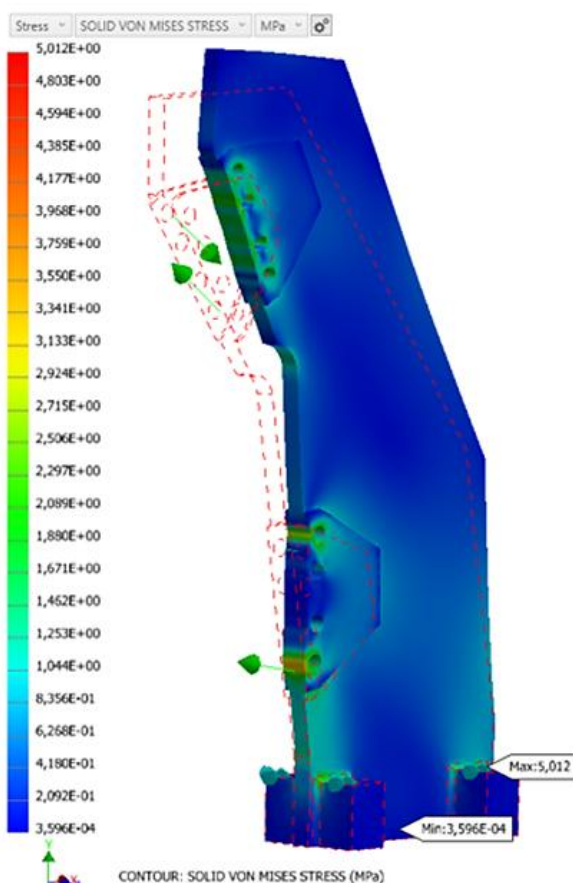
H-C MWM-6 realizującym dwuwariantowe hamowanie bezpieczeństwa oraz urządzenie wymuszenia dodatkowego spływu oleju UWDSO.

Głównymi elementami części elektrycznej maszyny wyciągowej BB-2500/AC-4 m/s (MWM Elektro; Dodatek nr 8 do Dokumentacji Górniczego Wyciągu Szybowego) są:

- silnik prądu zmiennego typu M3BP 355MLB 12 firmy ABB o mocy 160 kW wchodzący w skład napędu głównego maszyny wyciągowej,
- przemiennik częstotliwości ACS 800-17-0260-5 zasilający silnik napędu głównego, umożliwiający pracę silnikową lub generatorową,
- przemiennik częstotliwości ACS 800-37-0260-5 z chopperem i rezystorami zwalniania wykorzystywany przy zasilaniu silnika napędu głównego maszyny wyciągowej z agregatu prądotwórczego (zastosowany przemiennik częstotliwości umożliwia skuteczne zwalnianie napędu bez oddawania energii do sieci, co jest istotnie przy zasilaniu napędu z agregatu prądotwórczego, który nie ma możliwości przyjęcia energii z sieci),
- silnik prądu zmiennego LG180ZLB4E firmy SIEMENS o mocy 22 kW wchodzący w skład napędu dodatkowego maszyny wyciągowej,
- przemiennik częstotliwości ACS 800-11-0025-5 zasilający silnik napędu dodatkowego,
- rozdzielnica 500 V +E1 posiadająca dwa zasilania z istniejących transformatorów TZE 250/3 o mocy 250 kVA GN 3000 V DN 525 V oraz dodatkowe trzecie zasilanie z agregatu prądotwórczego IVECO typu I.400 o mocy 400 kVA 3x 500V,
- układy sterowania, regulacji i zabezpieczeń maszyny wyciągowej,
- układy rejestracji i sygnalizacji informatycznej stanów pracy poszczególnych podzespołów maszyny wyciągowej i elementów górniczego wyciągu szybowego.

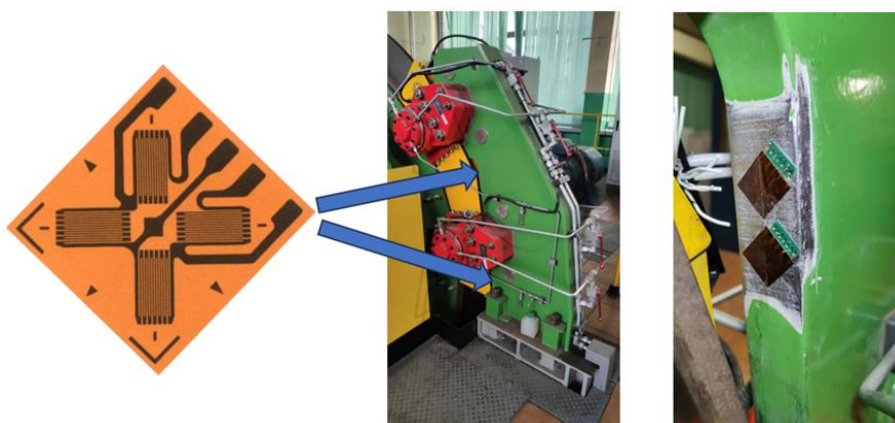
METODYKA BADAŃ

Zostały wytypowane miejsca maszyny wyciągowej w których naklejenie rozet tensometrycznych pozwoliłoby na pomiar ciężaru. Takie miejsca to między innymi: podpory konstrukcyjne łożysk kół linowych, miejsca zawieszenia naczynia a także stojaki hamulcowe. Ze względów na stosunkową łatwość montażu i brak problemów z komunikacją (jakie mogą wystąpić w szybie) wybrano lokalizację tensometrów na stojakach hamulcowych. Na modelach stojaków za pomocą metody elementów skończonych zostały przeprowadzone obliczenia naprężeń oraz zostały wybrane punkty, gdzie można spodziewać się największych odkształceń. Na rysunku 1 przedstawiono rozkład naprężeń w stojaku hamulca. Naklejenie tensometrów w tych punktach miało przełożyć się na większa rozdzielczość mierzonych wartości.



Rys. 1 Rozkład naprężeń w stojakach hamulca maszyny wyciągowej szybu Daniłowicz

Do naklejenia w uprzednio wybranych miejscach wytypowano rozetę tensometryczną składającą się z 4 tensometrów elektrooporowych o rezystancji 120 om każdy. Rozeta została naklejona w osi stojaka tak że dwa tensometry położone są na kierunku mierzonych naprężeń, natomiast 2 kolejne pod kątem 90° i są to tensometry kompensujące rozszerzalność cieplną materiału. Na rysunku 2 przedstawione sposób montażu czujników pomiarowych.

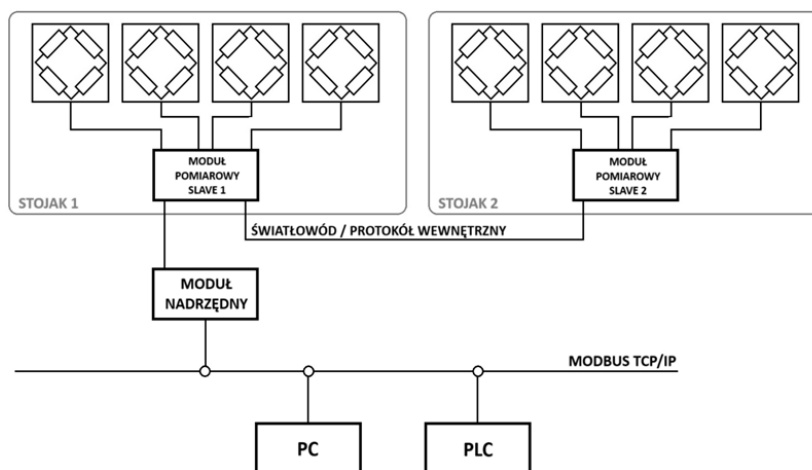


Rys. 2 Rozeta tensometryczna oraz miejsca na stojakach, w których została ona naklejona

Do odczytu wartości został skonstruowany autorski system pomiarowy składający się z modułu nadrzędnego znajdującego się docelowo w szafie

sterowniczej maszyny wyciągowej oraz modułów podrzędnych które montowane są na każdym ze stojaków hamulcowych. Każdy moduł podrzędny może obsłużyć 4 rozety tensometryczne, umiejscowienie modułów na bezpośrednio na stojakach miało na celu skrócenie analogowego toru pomiarowego. Moduł posiada 4 zintegrowane układy wzmacniacza i 24-bitowego przetwornika analogowo-cyfrowego. Moduły slave na stojakach digitalizują dane które przesyłane są wewnętrznym protokołem za pomocą światłowodu do modułu Master. Moduł nadrzędny ma zadanie odbierać dane z modułów slave i prowadzić ich analizę. Może on przekazywać dane za pomocą magistrali modbus TCP/IP do komputera PC gdzie za pomocą autorskiego oprogramowania mogą być one wizualizowane, a także do sterowników PLC gdzie mogą brać udział w sterowaniu maszyną wyciągową (MWM Elektro, Centrum Badawczo-Rozwojowe 2022).

Na rysunku 3 przedstawiono schemat strukturalny układu pomiarowego.



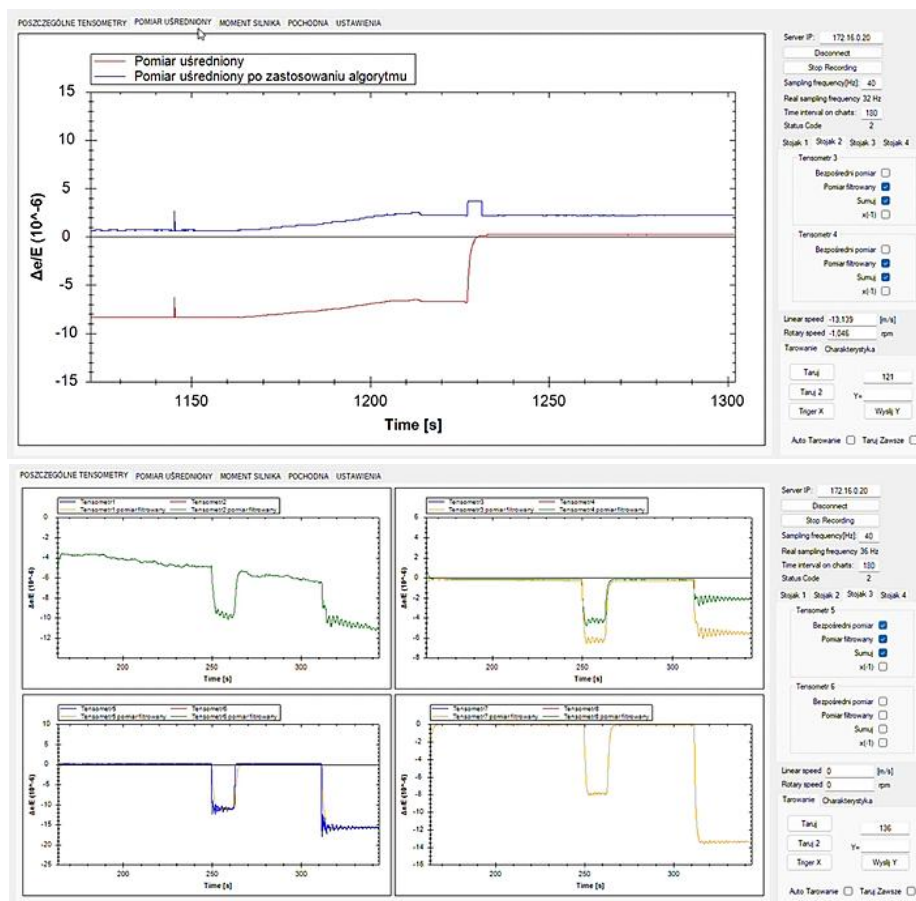
Rys. 3 Schemat strukturalny systemu kontroli naprężeń

Sposób montażu i zabudowy urządzeń na stojaku hamulca maszyny wyciągowej zaprezentowano na rysunku nr 4.



Rys. 4 Moduł nadrzędny z widoczną wewnątrz elektroniką zainstalowany w szafie sterowniczej (z lewej) i moduł podrzędny zainstalowany na stojaku hamulcowym (z prawej)

Oprogramowanie do wizualizacji rysuje wykresy w czasie rzeczywistym dla każdego z zainstalowanych tensometrów a także może je archiwizować. Za jego pomocą można konfigurować parametry filtrów, parametry funkcji aproksymujących i algorytmów modułu master. Na rysunku 5 zaprezentowano przykładowe wyniki badań w trakcie pracy górniczego wyciągu szybowego.

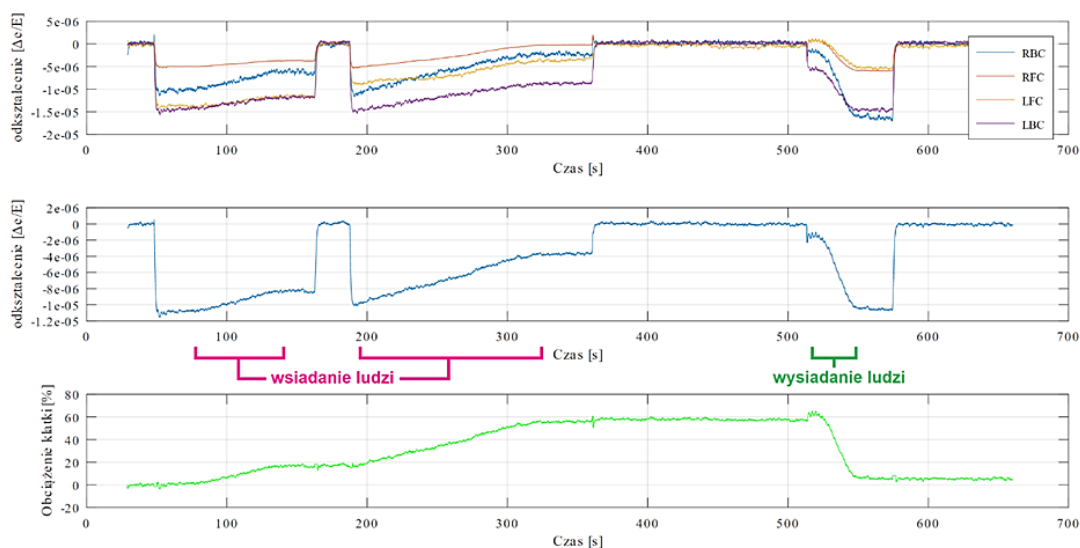


Rys. 5 Przykładowe zrzuty ekranów przedstawiające oprogramowanie do wizualizacji pomiarów

Podczas badań wykazano, że pomiar bezwzględny nie nadaje się do przeliczania na użyteczne dane takie jak: ciężar umieszczony w klatce, czy też moment wstępny silnika, ponieważ po złapaniu przez zaciski tarczy hamulcowej, do stojaków wprowadzane są naprężenia „wstępne” które nie zależą od ciężaru umieszczonego w klatce. Do obliczeń ciężaru umieszczonego w naczyniu potrzebny jest algorytm analizujący w czasie rzeczywistym przebieg uśrednionego pomiaru z poszczególnych tensometrów biorąc do dalszych obliczeń tylko zmiany naprężenia na stojakach hamulcowych w momentach, kiedy maszyna jest już zahamowana. Algorytm usuwa skoki naprężenia, które powstają podczas złapania, a także puszczenia przez zaciski hamulca tarczy hamulcowej. Po odpowiednim przefiltrowaniu i obróbce danych można skalibrować urządzenie wprowadzając do naczynia obciążenie testowe i wyznaczyć od kilku do kilkudziesięciu punktów dzięki którym można później

aproxymować funkcję liniową bądź wielomianową przybliżającą pomiar w jednostkach których oczekujemy (procent momentu silnika, masa zawieszona w naczyniu).

Parametry wyznaczonej funkcji możemy wpisać do systemu za pomocą oprogramowania wizualizacji (MWM Elektro. Centrum Badawczo-Rozwojowe 2022). Przykładowy przebieg wskazań tensometrów w odniesieniu do ilości osób w naczyniu przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 5 Wykresy przedstawiające działanie algorytmu zastosowanego w systemie

WNIOSKI

Pomiar ciężaru jaki ma być wytransportowany z podziemnej części kopalni na powierzchnię jest niezmiernie ważnym elementem w zakresie układu napędowego i sterowania maszyn górniczych lub urządzeń transportu specjalnego. Zgodnie z wymaganiami obowiązujących przepisów, urządzenia transportowe muszą być zaprojektowane, wykonane i zainstalowane w taki sposób, aby w przypadku przekroczenia udźwigu nominalnego uruchomienie było niemożliwe (Prawo geologiczne i górnicze, Rozporządzenie Ministra Energii). Dodatkowo, winda obciążona udźwgiem nominalnym przy maksymalnej prędkości musi być w stanie zatrzymać kabinę bez wywoływania opóźnienia, szkodliwego dla użytkowników. Większość współcześnie produkowanych wind wyposażone jest w czujniki pomiaru udźwigu. Współpracują one z systemem bezpieczeństwa, który uniemożliwia ruszenie windy, jeżeli jej udźwig nominalny zostanie przekroczony (Rozporządzenia Ministra Rozwoju z 3 czerwca 2016).

W przemyśle stosowane różne technologie w zakresie pomiaru ciężaru w windzie wykorzystujące następujące rodzaje czujników:

- czujniki tensometryczne mierzą odkształcenia elementu konstrukcyjnego pod wpływem obciążenia i przekazują informację do systemu sterowania,

- czujniki piezoelektryczne które wykorzystują właściwości materiałów piezoelektrycznych, które generują napięcie elektryczne pod wpływem siły. Są one w stanie mierzyć zmiany w ciężarze szybko i dokładnie,
- czujniki indukcyjne – działają na zasadzie zmiany indukcyjności cewki w zależności od odkształcenia elementu,
- czujniki ciśnienia – Wykorzystują zmianę ciśnienia w układzie hydraulicznym lub pneumatycznym windy do określenia obciążenia. Są stosowane głównie w windach hydraulicznych.

Nowoczesne windy wykorzystują zaawansowane oprogramowania, które analizują dane z różnych czujników w czasie rzeczywistym, aby monitorować ciężar i zapobiegać przeciążeniom. Dzięki zaawansowanym technologiom pomiaru ciężaru, windy mogą działać bezpiecznie i efektywnie, minimalizując ryzyko wypadków spowodowanych przeciążeniem.

Podczas prowadzenia prac badawczych, jednym z elementów wpływających na system transportu pionowego był pomiar masy umieszczonej w naczyniu wyciągowym. W chwili obecnej informację o masie w naczyniu można było odczytać poprzez wielkości pośrednie podczas stabilnego ruchu maszyny. Pomiar bezpośredni w pełnym zakresie czasu maszyny wyciągowej mogą posłużyć do:

- optymalizacji sposobu sterowania napędem maszyny wyciągowej,
- optymalizacji sposobu sterowania hamulcem maszyny wyciągowej,
- pozyskania szczegółowych danych związanych z wydobyciem prowadzonym przez opomiarowaną maszynę wyciągową.

Zastosowanie systemu kontroli naprężeń w algorytmach sterowania maszyny wyciągowej może mieć pozytywny wpływ na pracę napędu, ze względu na prawidłowy wybór kierunku zadanego momentu silnika. System pozwala wykrywać wielkość nadwagi przed uruchomieniem, co można wykorzystać do ograniczenia niekontrolowanych przesunięć naczynia maszyny wyciągowej. Również prawidłowe określenie nadwagi wpłynie na ograniczenie zużycia okładzin ciernych hamulców oraz tarcz bębna. Równolegle prowadzone są prace w zakresie udoskonalenia algorytmu filtracji i obróbki sygnału w celu wykorzystania danych pomiarowych do innych zastosowań m.in.: do pomiaru masy znajdującego się w naczyniu wyciągowym (Rozporządzenie Rady Ministrów).

LITERATURA

- Ekspertyza techniczna dla szybu „Daniłowicz” w Kopalni Soli „Wieliczka” S.A., nr B/17/0062 KGHM Cuprum – Centrum Badawczo-Rozwojowe, Wrocław 2017r,
- MWM Elektro. (2011). Dodatek nr 8 do Dokumentacji Górniczego Wyciągu Szybowego, Trzebinia.
- MWM Elektro. Centrum Badawczo-Rozwojowe (2022). Efekty prac Centrum Badawczo-Rozwojowego MWM Elektro wdrażane w górniczych wyciągach szybowych, Trzebinia
- Kopalnia Soli Wieliczka S.A. (2020). Dodatek nr 10 do Dokumentacji Górniczego Wyciągu Szybowego, Wieliczka

Prawo Geologiczne i Górnicze. (2011). Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 Dz.U. 2011 nr 163 poz. 981.

Rozporządzenia Ministra Rozwoju z 3 czerwca 2016 r. w sprawie wymagań dla dźwigów i elementów bezpieczeństwa do dźwigów

Rozporządzenie Ministra Energii. (2016). Z dnia 23 listopada 2016 roku w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych, Dz. U. z 2017 nr 1118.

Rozporządzenie Rady Ministrów. (2004). Z dnia 30 kwietnia 2004 r. w sprawie dopuszczania wyrobów do stosowania w zakładach górniczych, Dz. U. 2004 nr 99 poz. 1003.

Investigations into the possibility of measuring the weight suspended on the hoisting rope cooperating with the hoisting machine in the mine shaft hoist of the Daniłowicz shaft in the “Wieliczka” Salt Mine

Abstract: The article you've mentioned discusses the issue of measuring the suspended weight on the hoisting rope in mining shafts. The shaft and its equipment are essential components of the technical infrastructure of a mining facility, serving various functions such as transportation of people and materials, ventilation of mining workings, and the transport of fluids. Designing an efficient vertical transport system is a continuous challenge. The article presents a method for measuring the weight suspended on the hoisting rope by utilizing measurements of the stresses occurring in the brake stands of the hoisting machine. This research was conducted at a testing station located in the Daniłowicza shaft of the Wieliczka Salt Mine. The use of this weight measurement method, and subsequently, the measurement of forces in the ropes, can be employed in the operation of the hoisting machinery to eliminate dynamic disturbances that occur during their operation. Additionally, the measurement data can be used as an additional element of the safety system, particularly for two-step braking. The system can also detect overweight conditions during the startup of the hoisting machinery. Therefore, this innovative method for two-step braking. The system can also detect overweight conditions during the startup of the hoisting machinery. Therefore, this innovative method for measuring the suspended weight on the hoisting rope can have a wide range of applications in the control systems of hoisting machines

Keywords: hoisting machinery, hoisting conveyance, hoisting conveyance

Tomasz Rokita

AGH University of Krakow
Faculty of Mechanical Engineering and Robotics
Department of Machinery Engineering and Transport
A. Mickiewicza Av. 30, 30-059 Krakow, Poland
e-mail: rokitom@agh.edu.pl

Rafał Pasek

AGH University of Krakow
Faculty of Mechanical Engineering and Robotics
A. Mickiewicza Av. 30, 30-059 Krakow, Poland
e-mail: rpasek@interia.pl

Krzysztof Rozwadowski

AGH University of Krakow
Faculty of Mechanical Engineering and Robotics
A. Mickiewicza Av. 30, 30-059 Krakow, Poland

Karol Szczepaniec

MWM Electro Sp. z o.o.