



<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMTECH2021.3>

## **Analiza pomiarów zmian naprężeń ramy kabiny i wybranych elementów zbrojenia szybowego instalacji dźwigowej zabudowanej w szybie górniczym „Regis” w Kopalni Soli Wieliczka**

**Krzysztof Rozwadowski** - Kopalnia Soli „Wieliczka” S.A., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

**Artur Konewecki** - Elektrometal S.A., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

**Szymon Molski** - AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

**Rafał Pasek** - Kopalnia Soli „Wieliczka” S.A., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

**Streszczenie:** W szybie zabytkowej Kopalni Soli „Wieliczka” do transportu turystów został zaprojektowany i zabudowany układ dwóch dźwigów. Każde z tych urządzeń może transportować niezależnie 21 osób. Nominalny udźwig to 1600 kg. Z obserwacji służb utrzymania ruchu wynika, że konstrukcja ramy oraz elementy wsporcze układu prowadnic są niezwykle sztywne i nie wykazują tendencji do odkształceń w zakresie sprężystym nawet pod maksymalnym obciążeniem. Jeden ze znaczących masowo elementów składowych dźwigu to jego rama. W celu weryfikacji zasadności zabudowy zwartej i sztywnej konstrukcji ramy oraz wsporników dźwigów przeprowadzono szereg pomiarów naprężeń w tych konstrukcjach podczas zmiennych warunków eksploatacyjnych. Analiza wyników pomiarów wykazała bardzo niewielkie przyrosty naprężeń w ramie dźwigu i zbrojeniu szybowym.

Słowa kluczowe: pomiary, dźwig, szyb górniczy, naprężenia, zbrojenie, rama kabiny

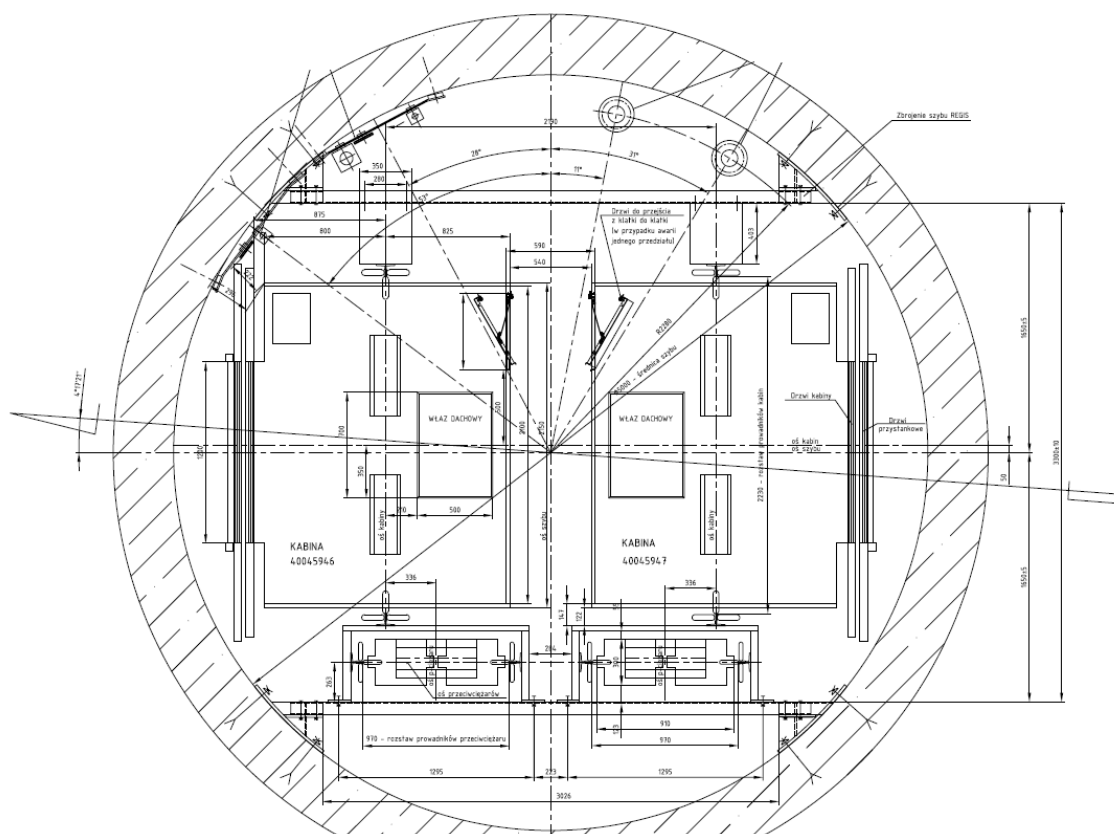
## **Analysis of the results of measurements of changes in the stresses of the cabin frame and selected elements of the shaft reinforcement of the lift implemented in the "Regis" mining shaft in the Wieliczka Salt Mine**

**Abstract:** In the shaft of the historic "Wieliczka" Salt Mine, a system of two personal (lifts) was designed and built-in for the transport of tourists. Each of these devices can transport 21 people independently. The nominal load capacity is 1600 kg. The observations of maintenance services show that the frame structure and supporting elements of the guide system are extremely rigid and do not show a tendency for deformation, even under the maximum load. One of the mass-significant components of the crane is its frame. In order to verify the legitimacy of the compact and rigid structure of the frame and crane supports, a number of stress measurements were carried out in these structures during variable operating conditions. Analysis of the measurement results showed very small stress increases in the crane frame and shaft reinforcement.

Keywords: measurements, crane (lift), mining shaft, stresses, reinforcement, cabin frame

### **1. Charakterystyka dźwigów**

Dźwigi zabudowane w szybie „Regis” pracują od 2012. Są to urządzenia o udźwigu 1600 kg oraz prędkości jazdy 4 m/s. Usytuowane w tarczy szybu zajmują znaczną część przekroju (rys. 1), mocowane do uprzednio zabudowanych dźwigarów zbrojenie, które można określić jako znacznie przewymiarowane w stosunku do obecnych obciążeń eksploatacyjnych.



Rys. 1. Tarcza szybu „Regis” z zabudowanymi urządzeniami [1]

Dźwigi zostały wyposażone we wciągarki bez reduktorowe z kołem ciernym o średnicy 690 mm, zabudowane w maszynowni kabiny prowadzonej w szybie po dwóch przewodnikach sztywnych z pośrednictwem przewodnic tocnych. Przeciwwaga została wykonana w układzie bocznym. Układ napędowy jest wyposażony w 6 lin nośnych o średnicy 13 mm oraz 7 lin wyrównawczych o średnicy 16 mm. Badaniom pomiarowym zmian naprężeń została poddana metalowa rama dźwigająca kabinę połączona cięgłami [2] oraz metalowe wsporniki trzymające przewodnice, które zapewniają prowadzenie ram kabinowych [2].

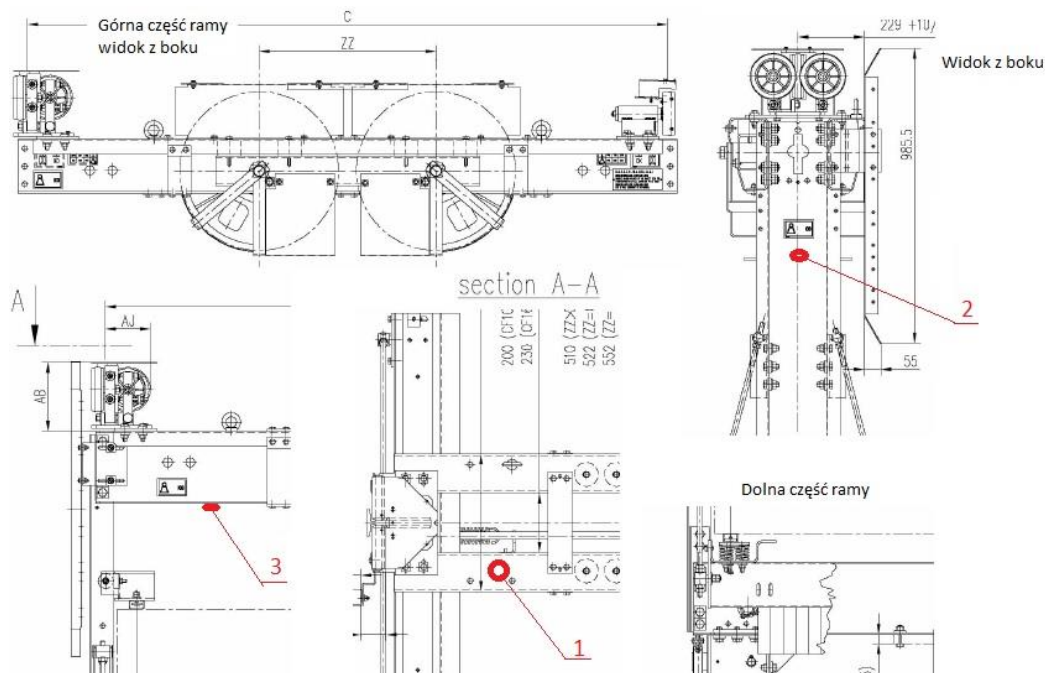
## 2. Układ pomiarowy

Wybrany sposób przeprowadzania badań został oparty o zjawisko tensooporowe, które polega na zmianie rezystancji cienkiego drutu metalowego poddanego działaniu odkształceń liniowych. Zmiana rezystancji drutu, w granicach sprężystości, jest proporcjonalna do jego odkształcenia liniowego [3].

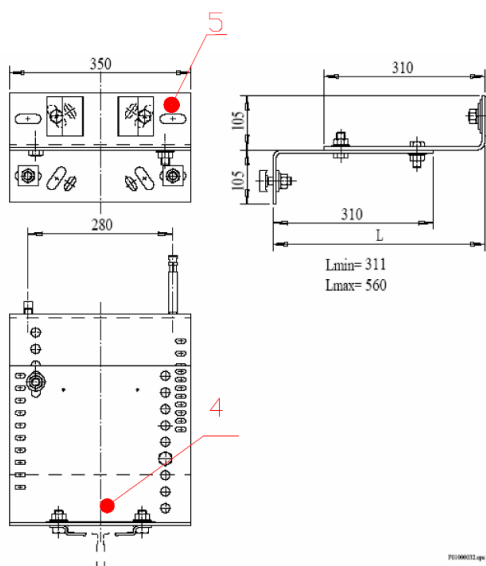
Zabudowany w szybie układ pomiarowy został opracowany na bazie rejestratora CL460 w wersji 1.51. Rejestrator ten jest przeznaczony do jednoczesnego i precyzyjnego pomiaru i rejestracji wielkości fizycznych, przetwarzanych na sygnały elektryczne za pomocą mostków tensometrycznych, tensometrów w układzie ćwierćmostka, przetworników z wyjściem prądowym w zakresie od 4 do 20 mA lub czujników potencjometrycznych, w wielu kanałach. Do analizy danych wykorzystywany jest dedykowany program do rejestracji i wizualizacji przebiegów. Urządzenie posiada 16 kanałów analogowych, do których można wpiąć 16 adapterów ćwierćmostków tensometrycznych. Rozdzielczość

pomiarowa w układzie ćwierćmostka wynosi  $1 \mu\text{m/m}$ , co pozwala odnotować nawet minimalne zmiany naprężeń w [4].

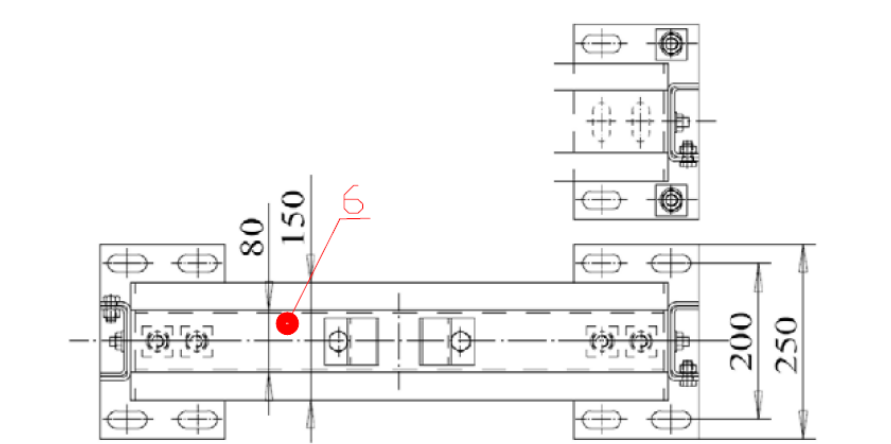
Rama, która została zastosowana to model CF25(TP) z dwoma kołami linowymi. Pierwsza lokalizacja, w której przyklejono układ tensometrów to belka górna ramy kabiny (poz. 1 z rys. 2). Przewidziano układ trzech tensometrów w rozstawie  $120^\circ$ . W tym miejscu zarejestrowano wzrosty naprężeń pochodzące od siły grawitacji, ciężaru własnego ramy kabiny wraz z osprzętem oraz siły pochodzące od masy lin. Drugi punkt pomiarowy usytuowano na cięgle ramy (poz. 2 z rys. 2). Trzeci punkt pomiarowy na ramie to belka dolna (poz. 3 z rysunku 2) ramy kabiny. Tabela 1 zawiera nazwy tensometrów w celu weryfikacji ich położenia na obiekcie badanym.



Rys. 2. Lokalizacja punktów pomiarowych na ramie kabiny model CF25(TP) [4]



Rys. 3. Lokalizacja punktów pomiarowych na wsporniku wschodnim [4]



Rys. 4. Lokalizacja punktów pomiarowych na wsporniku zachodnim [4]

Układ pomiarowy został przetestowany w warunkach zmiennej prędkości, czyli jazdy rewizyjnej dźwigu (0,4 m/s) i jazdy z pełną prędkością (4 m/s), jak i przy zmiennym obciążeniu, czyli przy pustej kabinie dźwigu i przy pełnym obciążeniu. Analiza wyników pomiarów wykazała, że oczekiwane naprężenia w założonym punkcie pomiarowym pokrywają się z założeniami, które wyspecyfikowano podczas wstępnych rozważań teoretycznych. Próby zostały również przeprowadzone przy hamowaniu awaryjnym napędem przy pełnej prędkości i częściowym obciążeniu kabiny podczas jazdy kabiny dźwigu w górę.

Takie założenie – jazda kabiny w górę podczas hamowania awaryjnym napędem - wynikała z tego, że jej hamowanie przy jeździe w dół, mogło spowodować wyzwolenie układu chwytacza, co skutkowałoby uszkodzeniem powierzchni prowadnic kabinowych przez zaciskane kliny hamujące i konieczności czasowego wyłączenia dźwigu z eksploatacji. Na tym etapie badań zaniechano wykonywanie takich prób. Próby, które zostały przeprowadzone podczas hamowania awaryjnym napędem podczas jazdy kabiny w górę, mogą być podstawą do wyciągnięcia stosownych wniosków.

### 3. Wyniki pomiarów naprężeń ramy kabinowej

W planowanym eksperymencie pomiarowym założono cztery etapy badania. Każdy z etapów badania był odmienny co do zasady funkcjonowania dźwigu.

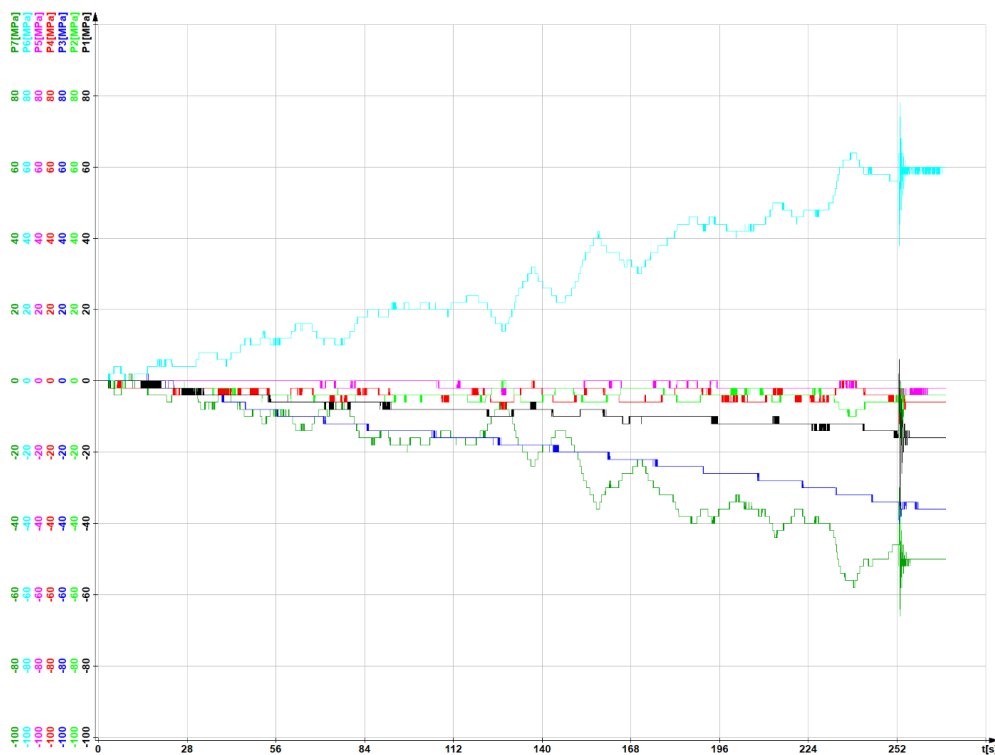
Pierwsza seria badań to badania podczas przejazdu rewizyjnego kabiny dźwigu w dół. Jazda rewizyjna dźwigu odbywa się z prędkością 0,3 m/s. Na rysunku 5 przedstawiono przyrost naprężeń odnotowany na poszczególnych tensometrach podczas jazdy od przystanku 1 na poziomie 0 do poz. -135 m. Można zauważyć, że proporcjonalnie do głębokości przyrastają naprężenia rejestrowane tensometrami P6 i P7, aż do zatrzymania na poziomie końcowym, gdzie ich wartości stabilizują się na poziomie odpowiednio 60 MPa oraz 50 MPa. Tensometry te pokazują odkształcenia w zakresie sprężystym belki dolnej ramy kabinowej. Zauważalne przyrosty naprężeń, choć mniejsze od wskazywanych tensometrami P6 i P7 można zauważyć na tensometrze P3. Na tym tensometrze po ustabilizowaniu można również zauważyć przyrost naprężeń w granicach 36 MPa. Tensometr P4, który rejestruje naprężenia rozciągające w ciągle nie odnotowuje przyrostów naprężenia - maksymalne naprężenia jakie na nim odnotowano w chwili zatrzymania to 14 MPa. Po ustabilizowaniu układu badawczego przeprowadzono tarowanie wskaźników tensometrów i powtórzono pomiary jazdą z dołu do góry, zmiany naprężeń pokazano na rysunku 6. Sytuacja jaką można zaobserwować na rysunku 6 obrazuje odwrotne zmiany naprężeń w stosunku do tych odnotowanych podczas jazdy w dół.

Tym samym naprężenia odnotowane na tensometrach P6 i P7 posiadają odwrotny znak, oraz graniczne wartości odpowiednio 60 MPa i 48 MPa po zatrzymaniu. Natomiast większe naprężenia zginające pojawiły się na ramie górnej, co obrazuje wskazanie tensometru P3 i sięgają one 98 MPa. Analizując zatem faktyczne przyrosty naprężeń na ramie można mówić o zginaniu i skręcaniu belki dolnej oraz zginaniu belki górnej. Należy zwrócić uwagę na fakt, iż podczas jazdy w górę zginanie belki górnej zwiększa się, co spowodowane jest zwiększaniem masy lin wyrównawczych, a tym samym zwiększaniem transportowanej masy w zakresie od zawieszenia lin do koła zwrotnego w podszybiu dźwigu. Częstotliwość próbkowania w przeprowadzonych badaniach wynosiła 50Hz.

#### Oznaczenia tensometrów zabudowanych na ramie kabiny

Tabela 1.

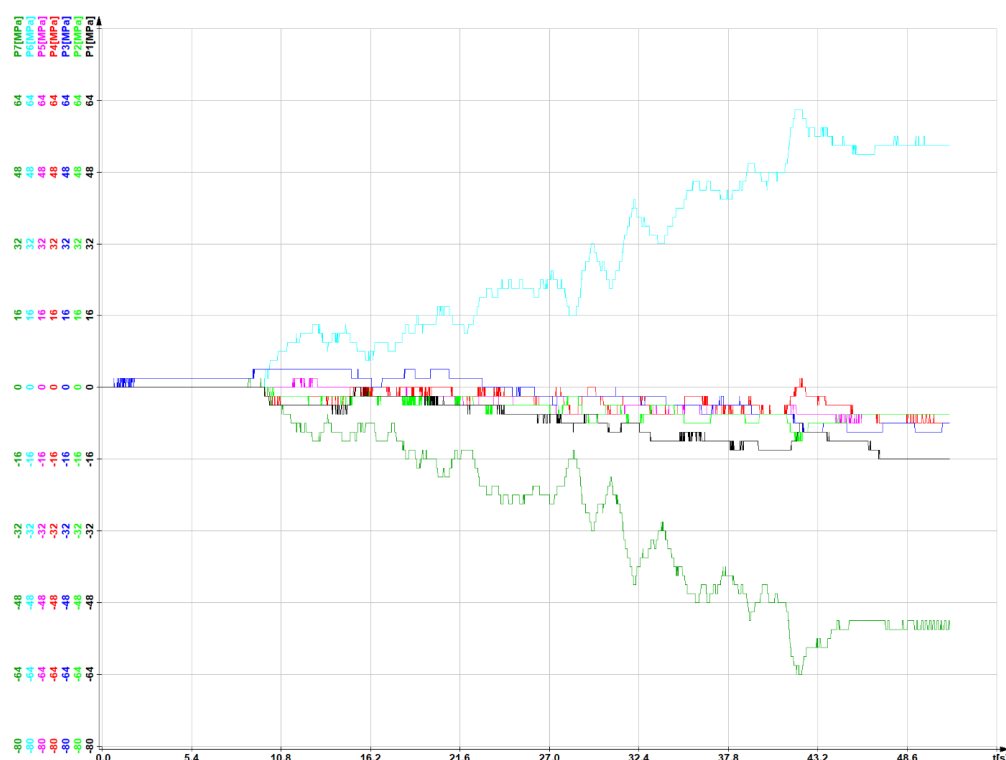
Oznaczenie	Nazwa	Obszar
P1	Tensometr 1	Belka Górna [patrz poz. 1 rys. 2]
P2	Tensometr 2	
P3	Tensometr 3	
P4	Tensometr 4	Cięgło [patrz poz. 2 rys. 2]
P5	Tensometr 5	Belka Dolna [patrz poz. 3 rys. 2]
P6	Tensometr 6	
P7	Tensometr 7	

Rys. 5. Jazda kabiny w dół  $V = 0,3$  m/s,  $Q = 0$  kg



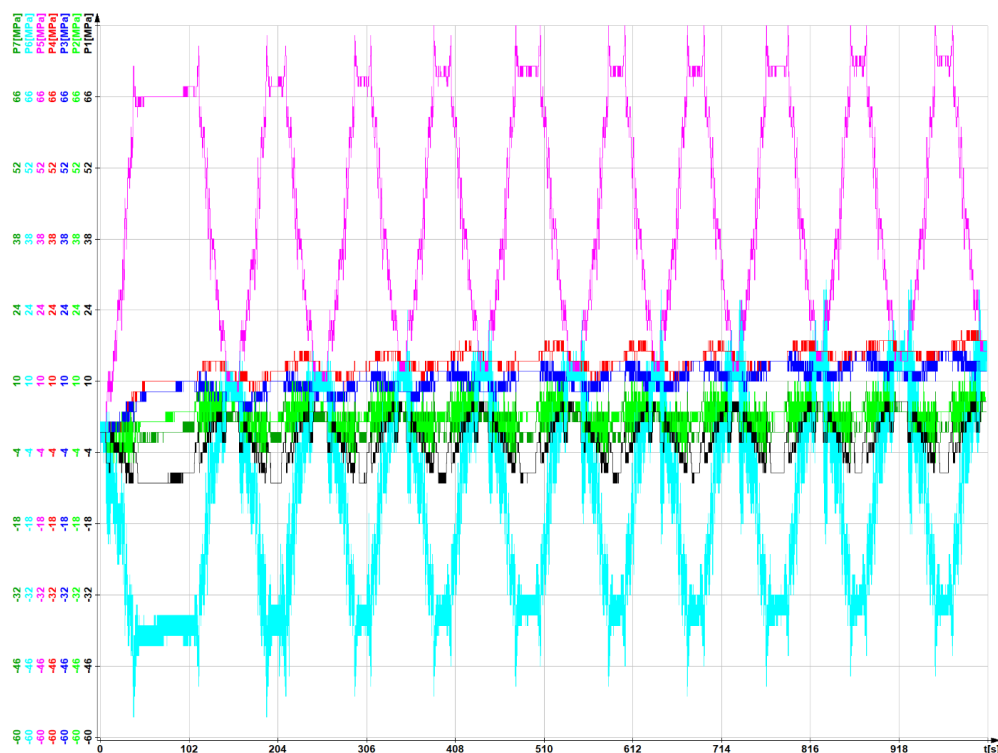
Rys. 6. Jazda kabiny w górę  $V = 0,3$  m/s,  $Q = 0$  kg

Druga seria badań dotyczyła przejazdu z prędkością nominalną kabiny. Jazda normalna dźwigu odbywa się z prędkością 4 m/s. Na rysunku 7 przedstawiono przyrost naprężeń odnotowany na poszczególnych tensometrach podczas jazdy od przystanku 1 na poziomie 0 do poz. -135 m. Przez okres pierwszy 9 sekund można zauważyć niewielkie zmiany naprężeń zarejestrowane przez tensometr P3. Dotyczą one okresu otwierania i zamykania drzwi kabinowych oraz przystankowych urządzenia. Po tym czasie następuje uruchomienie dźwigu. Kabina dźwigu jedzie w dół. Podczas jazdy wraz z pokonywanymi metrami następuje zwiększanie naprężeń w szczególności na tensometrach P6 i P7. Zmiany naprężeń w tych tensometrach są pochodną zmiany obciążenia wywołanego linami wyrównawczymi. Belka dolna ulega nieznacznemu zginaniu oraz skręcaniu. Siły oraz momenty, które wywołują to zjawisko pochodzą od zmiany masy lin wyrównawczych oraz od ruchu tych lin. Zmiany te odpowiadają zmianom jakie zarejestrowano podczas badań przeprowadzanych z prędkością rewizyjną. Pomiędzy 43 sekundą a 47 następuje etap wyhamowania kabiny urządzenia dźwigowego. Natomiast czas od 47 do 49 sekundy to otwarcie drzwi kabinowych. Dalszej części wykresu nie należy rozpatrywać, ponieważ są to zakłócenia wynikające z wchodzenia do kabiny obsługi.



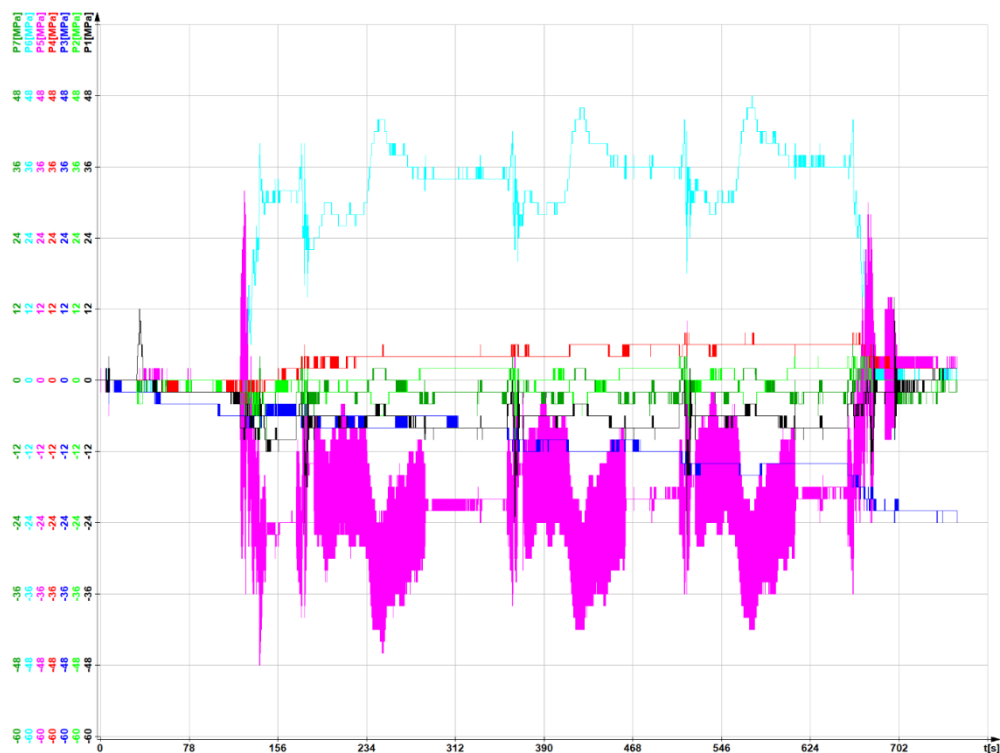
Rys. 7. Jazda kabiny w dół  $V = 4$  m/s,  $Q = 0$  kg

Trzecia seria badań to jazda kabiny dźwigu z maksymalnym obciążeniem tj. 1600 kg w trybie jazdy normalnej z prędkością 4 m/s. Na rysunku 8 przedstawiono 10 cykli jazdy z maksymalnymi parametrami pracy przewidzianymi dla tego urządzenia. Należy zwrócić uwagę, że maksymalne przyrosty naprężeń w układzie ponownie odnotowano na tensometrach zabudowanych na ramie dolnej, w szczególności na tensometrach P5 i P7. Świadczy to o występowaniu momentów skręcających pochodzących od lin wyrównawczych oraz sił zginających belkę pochodzących od obciążenia w kabinie dźwigu. Oscylacyjny charakter maksymalnych przyrostów naprężeń świadczy o wpływie dynamiki układu na ich zmianę. Podczas zatrzymywania urządzenia widać efekt zmniejszania się naprężeń, aż do chwilowej zmiany znaku w końcowym etapie hamowania układu. Częstotliwość próbkowania w przeprowadzonych badaniach wynosiła 50Hz.

Rys. 8. Jazda kabiny 10 cykli  $V = 4$  m/s,  $Q = 1600$  kg

Ostatnia - czwarta seria badań do jazda kabiny dźwigu z 80% obciążeniem i awaryjne hamowanie wyzwolone podczas maksymalnej prędkości 4 m/s. Pomiary przeprowadzono podczas jazdy kabiny w górę. Na rysunku 9, który obrazuje proces hamowania można zauważyć trzy momenty, w których następuje proces awaryjnego zatrzymania dźwigu poruszającego się z maksymalną prędkością. Pierwszy rozruch dźwigu obserwujemy od 170 sekundy do około 610 sekundy. Pozostałe fragmenty wykresu to dojazd zamykanie windy i załączanie oraz wyłączanie aparatury pomiarowej. Pierwsze hamowanie można zaobserwować na wykresie w okolicy 234 sekundy, gdzie następuje skokowy wzrost naprężeń w ramie dolnej, co przedstawia wykres dla tensometrów P5 i P6. Układ w czasie około 40 sekund wytłumia skokowy wzrost naprężeń. Należy zwrócić uwagę, iż każdy kolejny proces hamowania w funkcji czasu uległ nieznacznemu wydłużeniu, ze względu na rozgrzanie pary kinematycznej koła napędowego i liny. Przyrosty naprężeń zginających i skręcających w belkach dolnych ramy podczas hamowania nie przekraczały 48 MPa, wraz ze wzrostem wysokości podnoszenie nieznacznie zwiększały się naprężenia zginające w górnej belce co obrazuje wykres z tensometru P3. Wzrosty naprężeń w tensometrze P3 mają charakter liniowy w funkcji wysokości podnoszenia.

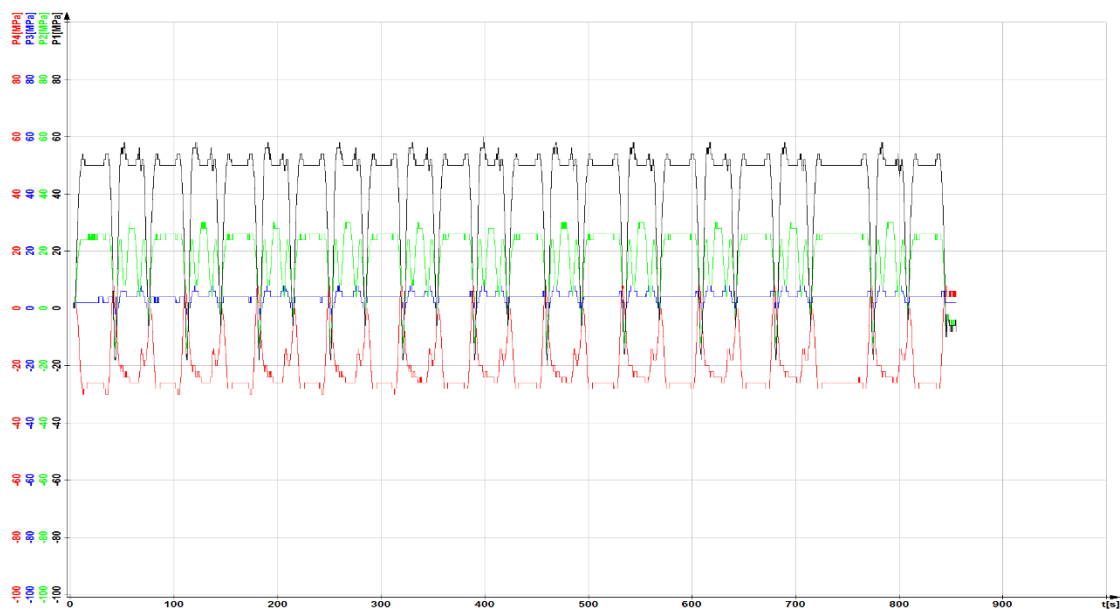




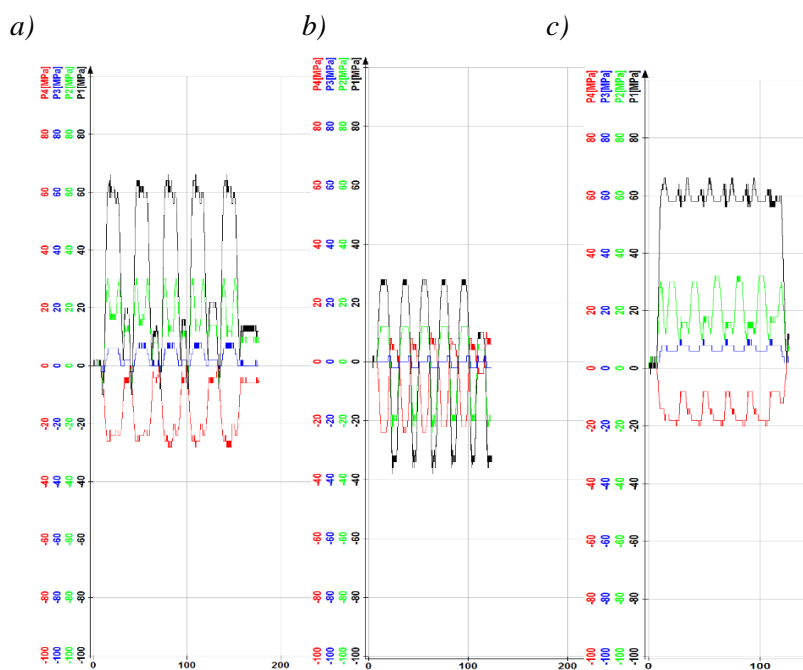
Rys. 9. Jazda kabiny  $V = 4 \text{ m/s}$ ,  $Q = 1280 \text{ kg}$  - hamowanie awaryjne

#### 4. Wyniki pomiarów elementów wsporczych

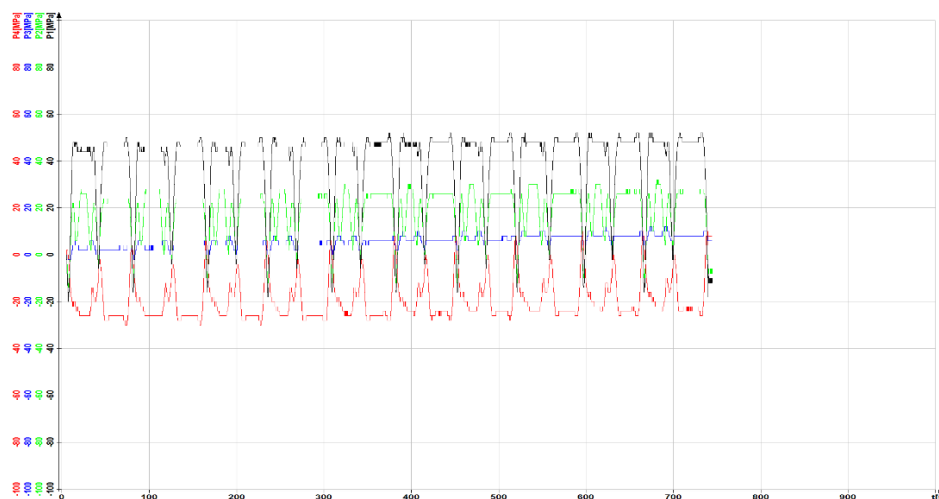
Na wykresach 5 do 9 przedstawiono wybrane wyniki zarejestrowanych pomiarów. Wykresy te obrazują zmianę naprężeń w badanych elementach konstrukcyjnych zbrojenia szybowego i dotyczą tensometrów zamontowanych w lokalizacji 4 i 5 z rysunku nr 3 czyli dla wspornika wschodniego, gdzie w lokalizacji 4 mamy zabudowane trzy tensometry w układzie rozety tensometrów w rozstawie  $120^\circ$  a w lokalizacji 5 jeden tensometr. Dla lokalizacji 6 z rysunku nr 4 czyli wspornika zachodniego, mamy zabudowane trzy tensometry w układzie rozety tensometrów w rozstawie  $120^\circ$ .



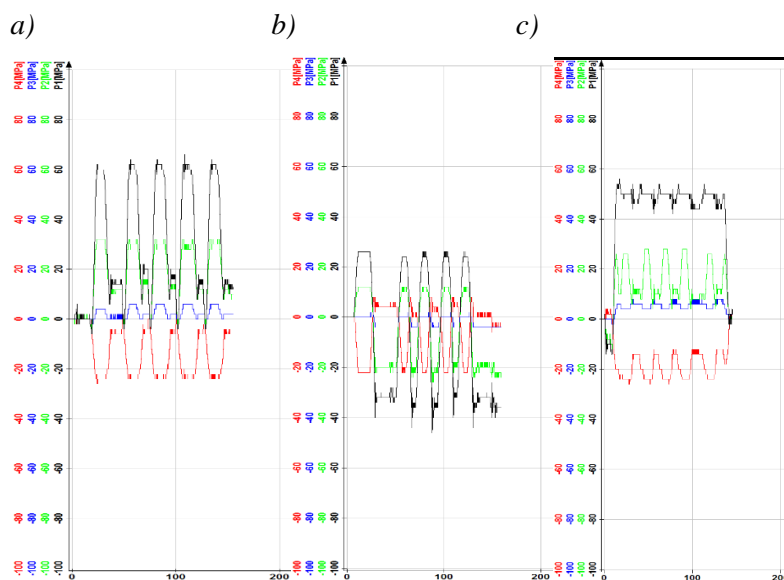
Rys. 10. Jazda kabiny 10 cykli  $V = 4$  m/s,  $Q = 1600$  kg wyniki dla wspornika wschodniego



Rys. 11. Jazda kabiny  $V = 0,4$  m/s,  $Q = 1600$  kg zmiana naprężeń dla:  
a) zrzut dla górnego wózka prowadników toczy przy jeździe w dół i zrzut dla dolnego wózka prowadników toczy przy jeździe w górę, b) zrzut dla górnego wózka prowadników toczy przy jeździe w górę, c) zrzut dla górnego wózka prowadników toczy przy jeździe w górę



Rys. 12. Jazda kabiny  $V = 0,4$  m/s,  $Q = 0$  kg, zmiany naprężeń na wsporniku wschodnim przy przejeździe z prędkością rewizyjną bez obciążenia



Rys. 13. Jazda kabiny  $V = 0,4$  m/s,  $Q = 0$  kg, zmiana naprężeń dla:  
a) zrzut dla górnego wózka prowadników tocnych przy jeździe w dół i zrzut dla dolnego wózka prowadników tocnych przy jeździe w górę, b) zrzut dla górnego wózka prowadników tocnych przy jeździe w górę, c) zrzut dla górnego wózka prowadników tocnych przy jeździe w górę

Na rysunkach od 10 do 13 przedstawiono przykładowe przebiegi zmian naprężeń w funkcji czasu zarejestrowane podczas jazd testowych kabiny dźwigu z prędkością rewizyjną i symulowanych zdarzeniem polegającym na natychmiastowym zatrzymaniu dźwigu przy najeździe na opomiarowany wspornik, górnym wózkiem lub dolnym wózkiem prowadnic tocnych kabiny, czy też przejeździe przez strefę pomiaru bez zatrzymania. Przedstawione wyniki sugerują o słuszności przyjętego kierunku prowadzonych pomiarów i potwierdzają założenia dotyczące przewymiarowania elementów wsporczych prowadzenia dźwigu. Maksymalne zmiany naprężeń przy symulowanym natychmiastowym zatrzymaniu, swobodnym przejeździe zarówno bez obciążenia, jak i z obciążeniem są na niskim poziomie, czyli około 60 MPa, co stanowi około 15% wytrzymałości na rozciąganie zastosowanego materiału, a fakt obciążania kabiny nie wpływa znacząco na wzrost rejestrowanych naprężeń.



## 6. Wnioski

Przedstawione wyniki pomiarów wskazują na nieznaczne przyrosty naprężeń w badanych elementach instalacji dźwigowej. Przyrosty naprężeń w ramie dźwigu w jednym przypadku sięgają 98 MPa. Przypadek ten występuje podczas jazdy kabiny przez cały szyb z prędkością rewizyjną. W większości przypadków pracy mieszanej urządzenia dźwigowego, naprężenia w konstrukcji kabiny nie przekraczają 60 MPa w kierunku zginania i skręcania konstrukcji. Należy zwrócić uwagę na fakt, wykonania konstrukcji ramy z materiału S235JR, dla której minimalny wskaźnik wytrzymałości na rozciąganie dla grubości do 16 mm to 340 MPa wg normy PN-EN-10025 Wyroby walcowane na gorąco z niestopowych stali konstrukcyjnych [5]. Z wstępnej analizy MES przedstawionej w publikacji [4] wykazano, iż naprężenia zredukowane według hipotezy wyężeniowej von Misesa nie przekraczają 50 MPa. Jedynie lokalne wzrosty naprężeń w gniazdach śrub generują większe naprężenia wywołane naciskami, które producent zredukował poprzez zastosowanie dodatkowych podkładek. Wsporniki ciągów przewodniczych również wykonano z tego samego materiału, zabezpieczonego antykorozyjnie przez cynkowanie. Jak wskazano na wykresach przyrosty naprężeń w kierunku zginania nie przekraczają 60 MPa przy przejeździe i zatrzymaniu się w ich bezpośredniej bliskości. Naprężeń wstępnych we wspornikach w zasadzie nie ma poza tymi od masy własnej wynikających z momentu zamocowania oraz pochodzące od masy częściowej przewodnic toru jezdnego. Na ewentualny efekt znacznych przyrostów naprężeń w elementach wsporczych ma prostoliniowość ciągów przewodniczych kabiny i należy ten parametr w ocenie aspektów wytrzymałościowych wziąć pod uwagę.

Konkludując analizę omówionych wyników przeprowadzonych badań wysnuto spostrzeżenia, że zastosowana rama i wsporniki wykazują dużą sztywność, a tym samym wytrzymałość całego układu jest bardzo wysoka, co wprost przekłada się na masę wszystkich elementów. Przyjmując znaczne przewymiarowanie konstrukcji i tym samym całego układu transportowego efekt ekonomiczny przedsięwzięcia najprawdopodobniej mógł być nieoptymalny. Dla potwierdzenia tych wniosków należy przeprowadzić dogłębne analizy modelowe ramy oraz wsporników z uwzględnieniem maksymalnych sił działających w układzie. Wykorzystanie metod numerycznych do optymalizacji konstrukcji znacząco przyczynia się do poprawy kryterium ekonomiczności oraz bezpieczeństwa [6].

## Literatura

1. Krupa P.: „Dokumentacja odbiorcza Urzędzeń transportowych specjalnych w obiekcie Szyb Regis - Kopalnia Soli Wieliczka" 2012 (praca nieopublikowana)
2. Kwaśniewski J.: Dźwigi osobowe i towarowe budowa i eksploatacja, nr ISBN 83-7464-070-7, 2006
3. Styburski W.: Przetworniki tensometryczne. Konstrukcja projektowanie użytkowanie, Warszawa 1976
4. Rozwadowski K. i in.: Aspekty metrologiczne procesów pomiarowych wybranych elementów instalacji dźwigowej zaimplementowanej w szybie górniczym, Innowacyjne techniki i technologie dla górnictwa, s.93-110, nr ISBN 978-83-65593-22-1, 2020
5. PN-EN 10025:2002 Wyroby walcowane na gorąco z niestopowych stali konstrukcyjnych - Warunki techniczne dostawy
6. Lonkwic S. M. P.: Zastosowanie numerycznej metody wykorzystującej punkty aktywne w obliczeniach naprężeń spawalniczych, Kwartalnik Naukowo-Techniczny Obróbka metalu, 2019