

WOJCIECH BEBLO
JAN HANKUS
ADAM LIPOWCZAN
PIOTR SZOŁTYSIK
GŁÓWNY INSTYTUT GÓRNICZTWA
KATOWICE

PRÓBA OCENY POSTĘPUJĄCEGO OSŁABIENIA NOŚNYCH
LIN WYCIĄGOWYCH METODAMI WIBROAKUSTYCZNYMI

W referacie omówiono założenia metody wibroakustycznej określania postępującego osłabienia lin wyciągowych. Przytoczono wyniki badań laboratoryjnych, na podstawie których stwierdzono, że wyznaczone zaproponowaną metodą wskaźniki: częstotliwość drgań własnych i tłumienie, wykazują zależność od postępującego zmęczenia liny.

1. Wstęp

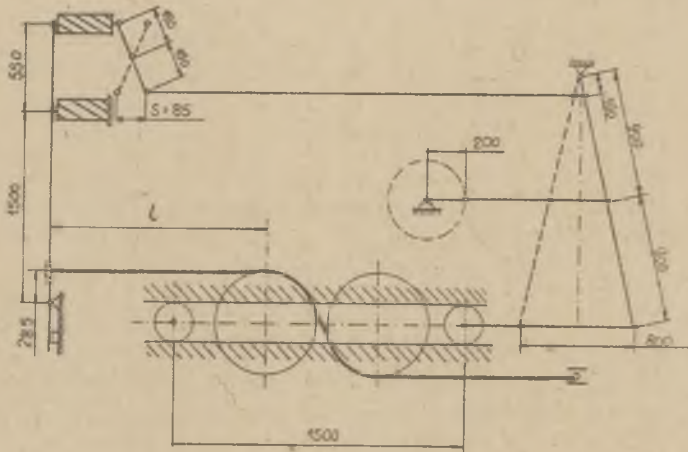
Badania zmęczeniowe lin wyciągowych, prowadzone w Głównym Instytucie Górnictwa od przeszło dwudziestu lat, wykazały, że postępujący proces osłabienia lin wyciągowych oceniać można w oparciu o wskaźniki opracowane na podstawie wykresu narastania liczby pęknięć zmęczeniowych lub wykresu wydłużania się liny [4, 6].

W pracy Hansla [5] wykazano, że wskaźników takich może być więcej, jak np. wskazania zapisu defektografów magnetycznych /MD-6, MD-8/ lub wskazania integratorów defektografów. Powiązanie zmian wartości tych wskaźników, zachodzących w miarę upływu czasu pracy ze zmianą siły zrywającej linę, prowadzi do budowy niezawodnościowego modelu osłabienia liny [5].

W GIG-u podjęto próbę wykorzystania również metod wibroakustycznych do oceny postępującego osłabienia liny badanej w maszynie zmęczeniowej. W badaniach posłużono się rutynową metodą pomiaru drgań na drodze magnetofonowej rejestracji przesunięcia. Metoda pomiarów i analizy wyników została opisana w pracach [1, 3]. Dotychczas metodę stosowano do badań diagnostycznych maszyn i budowli górniczych [1].

2. Badania zmęczeniowe liny

Badania przeprowadzono w maszynie zmęczeniowej typu P4-GIG 3 /rys. 1/. Odcinek liny badany w maszynie P4-GIG3 podlega dwustronnemu przeginaniu i zmiennym obciążeniom rozciągającym, a ponadto dodatkowo lina obracana jest dookoła własnej osi. Obrót ten zapewnia równomierne zmęczenie i ścieranie się drutów we wszystkich splotkach liny.



Rys. 1. Schemat kinematyczny maszyny zmęczeniowej P4-GIG3 do badania liny $\phi 10 + 20$ mm

Badano linę o liniowym styku drutów typu Seale i następujących danych

Średnica liny	$d = 16$ mm
Przekrój nośny	$F = 105$ mm ²
Przybliżona masa	$q = 1,00$ kg/m
Konstrukcja	6 / 1 x 1,50 + 9 x 0,75 + 9 x 1,30 / + A ₀
Prawa przeciwwzłata wykonana według normy PN-70/M-80222 w II klasie jakości	
Druty ocynkowane o wytrzymałości na rozciąganie	$R_m = 1670$ N/mm ²
Nominalna siła zrywająca linę P_0	$= 175,35$ kN
Wyznaczona siła zrywająca linę P_w	$= 132,0$ kN
Długość skoku skręcenia splotek w linie h	$= 114$ mm.

2.1. Warunki badania

Badanie zmęczeniowe prowadzono w następujących warunkach:

Średnica koła zginającego	$D = 510$ mm
Liczba cykli na minutę	26
Kąt opasania na kole zginającym	$\alpha = 68^\circ$

Stosunek średnicy koła do średnicy liny	$D/d = 31,8$
Stosunek średnicy koła do średnicy zewnętrznych drutów	$D/\delta = 392,3$
Statyczne obciążenie liny	$P_{st} = 340 \text{ kN}$
Pulsacje obciążenia	$P_p = 1,5 P_{st}$
Statyczny współczynnik bezpieczeństwa	$m = 5$
Długość odcinka między uchwytami	$L_o = 2710 \text{ mm}$
Długość przeginanego odcinka liny	$L_p = 1350 \text{ mm}$

2.2. Wyniki badania zmęczeniowego

Trwałość zmęczeniowa badanej liny wynosiła $N = 20953$ cykli. Przy tej liczbie cykli nastąpiło zerwanie dwóch splotek w środku odcinka liny. Podczas badania prowadzono rejestrację narastania liczby pęknięć drutów i wydłużanie się liny.

Pierwsze pęknięcia drutów wystąpiły przy liczbie cykli 12000 /tabl. 1/, co stanowi ok. 57% całkowitej liczby cykli, aż do zerwania. W zależności od kierunku zginania i liczby przegięć każdego cyklu, przeginany odcinek liny L_p podzielić można na trzy części:

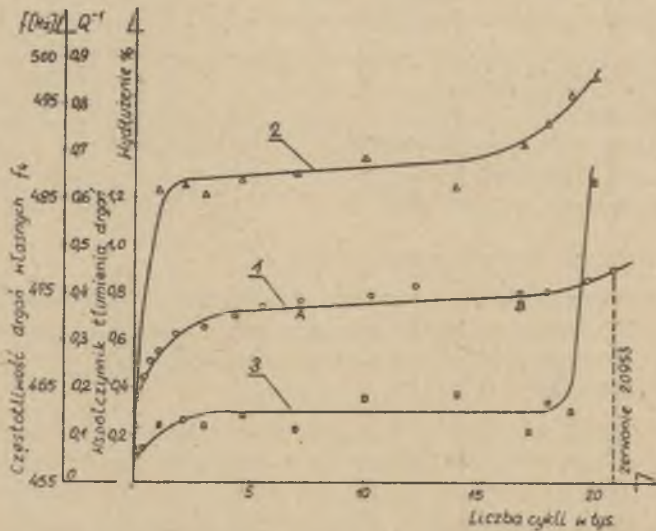
- część środkowa S o długości 220 mm /1,93 h/ dwustronnie przeginana, która podlega czterem umownym przegięciom,
- część dolna D i górna G odcinka L_p o długości 570 mm /5 h/ jednostronnie przeginane i podlegające dwóm umownym przegięciom. Na części środkowej S występuje też największa liczba pęknięć drutów,

W tabelicy 1 zestawiono liczbę pękniętych drutów oraz procentowy ubytek przekroju liny na całym przeginanym odcinku L_p oraz na odcinku środkowym S w miarę postępującego zmęczenia.

Tabela 1

Lp.	Liczba cykli zmęczeniowych N_1	Liczba pękniętych drutów zewnętrznych n_1 na		Ubytek przekroju nośnego liny F. %	
		całym odcinku przeginanym L_p	odcinku środkowym S	na odcinku L_p	na odcinku S
1.	12000	14	5	17,7	6,32
2.	13000	19	10	24,0	12,64
3.	14000	23	10	29,0	12,64
4.	15000	28	12	35,4	15,20
5.	17000	29	12	36,7	15,20
6.	18000	49	26	61,9	32,87
7.	19000	53	26	67,0	32,87
8.	20000	57	29	72,0	36,7

Przebieg wydłużania się liny podczas badania zmęczeniowego przedstawiono na rys. 2 /krzywa 1/. Przebieg wydłużania podzielić można na trzy okresy:



Rys. 2. Przebieg zmiany wydłużenia /1/, czwartej częstotliwości drgań własnych /2/ i współczynnika tłumienia /3/ liny podczas badania zmęczeniowego

- pierwszy okres wydłużania nieustalonego, w którym początkowa duża prędkość wydłużania zmalała do minimalnej w punkcie A po wykonaniu przez linę ok. 7000 cykli /33% całkowitej liczby cykli/,
- drugi okres wydłużania zawarty między punktami A i B, to wydłużanie ustalone, charakteryzujące się stałą prędkością wydłużania,
- trzeci okres wydłużania począwszy od punktu B, w którym prędkość wydłużania wzrasta aż do zerwania liny.

Trzeci okres wydłużania rozpoczął się przy ok. 18000 cykli /85% całkowitej liczby cykli/ po wystąpieniu dodatkowych 14 pęknięć drutów /tablica 1/. Całkowite wydłużenie tuż przed zerwaniem liny wyniosło ok. 0,9% początkowej długości liny.

3. Wibroakustyczna metoda oceny postępującego osłabienia liny

3.1. Wprowadzenie

Analiza drgań liny nośnej podczas ruchu urządzeń wyciągowych oraz wyniki badań laboratoryjnych zmian postaci jej drgań poprzecznych w funkcji naciągu pozwoliły na wybranie prostego modelu zastępczego i opracowanie sposobu zmierzenia wpływu naprężenia na postaci drgań liny. Stwierdzono, że zależność częstotliwości drgań poprzecznych liny zamocowanej na końcach od wielkości naprężenia ma charakter wykładniczy. Względna odległość wartości częstotliwości własnych na osi częstotliwości nie zależy od naprężenia. Jako model zastępczy układu drgającego wybrano napiętą strunę /5/, uzyskując dobrą zgodność wyników obliczeń wykonanych dla modelu z wynikami badań wybrane-

go odcinka liny.

Równanie ruchu liny napiętej pomiędzy lewym punktem zamocowania i kołem maszyny zmęczeniowej ma postać

$$\mu \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = T \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}. \quad (1)$$

Częstotliwości własne modelu są dane z zależności

$$f_n = \frac{n}{2l} \cdot \sqrt{\frac{T}{\mu}}, \quad (2)$$

gdzie:

x, y - współrzędne opisujące drgania poprzeczne liny,

μ - masa jednostki długości liny /kg · m⁻¹/,

l - długość badanego odcinka liny /m/,

T - naciąg liny /N/,

t - czas,

f_n - częstotliwość drgań własnych,

n - numer drgania własnego.

Każde z drgań własnych jest tłumione w inny sposób. Ma to istotny skutek w rozkładzie wartości częstotliwości; zjawisko to tłumaczy związek (3)

$$f'_n = f_n \sqrt{\left(1 - \frac{Q_n^{-1}}{2}\right)^2}, \quad (3)$$

gdzie:

f'_n - częstotliwość tłumionych drgań własnych,

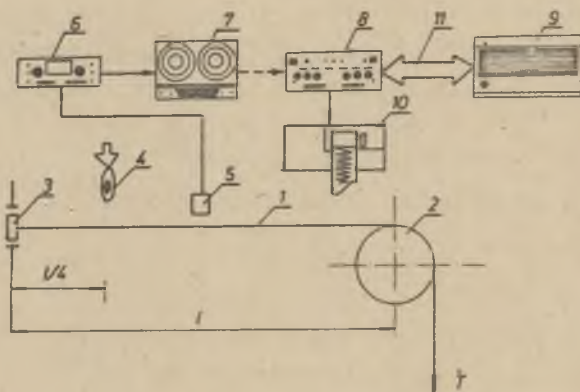
Q_n^{-1} - współczynnik tłumienia n -tego drgania własnego.

Model ten wykorzystano w badaniach postępującego zmęczenia liny podczas jej cyklicznego przeginania, ustalając geometryczne warunki mocowania przetwornika i miejsca przyłożenia wymuszenia. Warunkiem dokładnego wykonania badania jest ustalenie wartości T i l dla całego programu badań, co zrealizowano przez wykorzystanie maszyny zmęczeniowej, wyposażonej w kompensat naciągu. Długości odcinka l ustalano przez przesunięcie wózka z kołami w krańcowe położenie.

3.2. Metoda badań

Badania wykonano za pomocą standardowego układu pomiarowego [4], którego schemat przedstawiono na rys. 3.

Przetwornik przesunięcia drgań mocowano na ramie maszyny zmęczeniowej w odległości 5 mm od liny. Punkt zamocowania przetwornika umieszczono w połowie długości swobodnego odcinka liny, pomiędzy nohytem a kołem. Drgania poprzeczne liny wymuszano udarowo za pomocą



Rys. 3. Układ pomiaru i analizy drgań własnych liny

1 - lina, 2 - koło, 3 - zamocowanie liny, 4 - młotek gumowy, 5 - przetwornik przesunięcia drgań, typu MM 0020 prod. firmy Brüel and Kjaer, 6 - wzmacniacz pomiarowy, typu 2606 firmy Brüel and Kjaer, 7 - magnetofon pomiarowy typu Nagra 4.2. firmy Kudelski S.A., 8 - rejestrator cyfrowy typu 7502 prod. firmy Brüel and Kjaer, 9 - maszyna cyfrowa typu Varian/Brüel and Kjaer, 10 - woltomierz rejestrujący typu 2307 prod. firmy Brüel and Kjaer, 11 - wyjście/wejście cyfrowe z rejestratora 7502 pracującego jako odwracalny przetwornik analogowo-cyfrowy

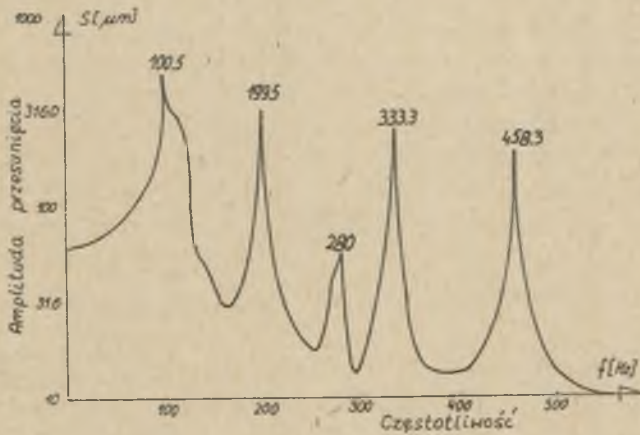
młotka gumowego o masie 1 kg, opuszczanego swobodnie na linę w $1/4$ jej długości z wysokości 0,3 m. Pomiaru wykonywano równocześnie z badaniami stanu liny, rozpoczynając od stanu "0 cykli" i kończąc na serii przed zerwaniem /20000/.

Dla każdego tysiąca cykli zmęczenia dokonywano rejestracji pięciu drgań swobodnych liny. Sygnały elektryczne odpowiadające przesunięciu drgań liny rejestrowano na taśmie magnetofonu pomiarowego.

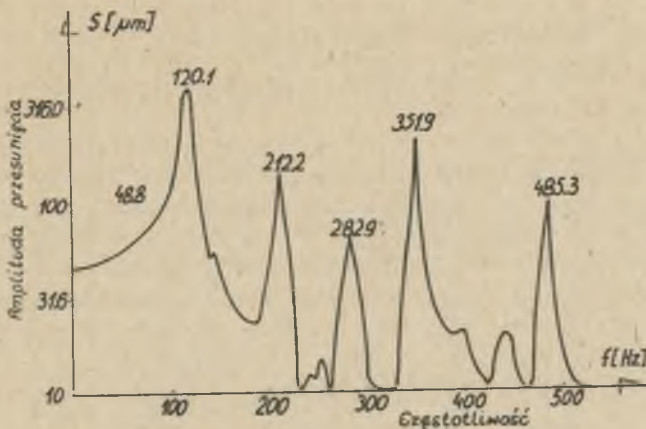
W wyniku realizacji programu badań otrzymano serię nagrań drgań swobodnych, w której poszczególnym grupom odpowiadały stany mechaniczne liny przed uruchomieniem maszyny zmęczeniowej i po każdym tysiącu cykli do momentu zerwania. Nagrania magnetofonowe poddano analizie metodą szybkiej transformacji Fouriera, otrzymując wykresy widm przesunięcia drgań i zapisy czasowe zaniku drgań.

3.3. Wyniki badań

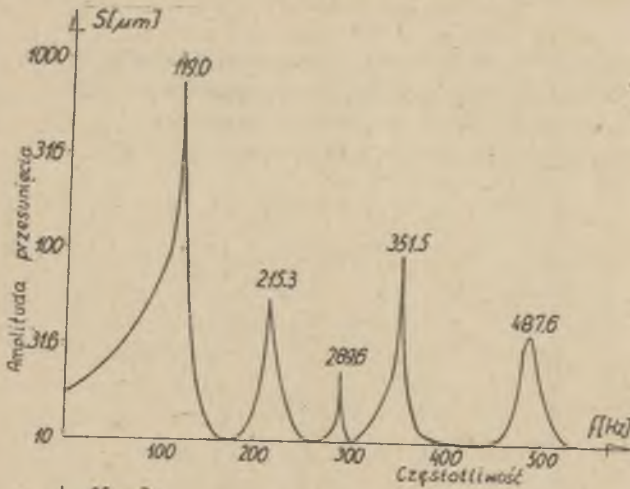
Jako materiał ilustracyjny do niniejszego referatu wybrano wyniki badań odpowiadające stanowi liny tuż po jej napięciu; po 1000 cyklach, po 7000 cykli /punkt A/ i po 18000 cyklach /punkt B/, tablica 2. Widma przesunięcia odpowiadające tym stanom przedstawiono na rysunkach 4, 5, 6 i 7.



Rys. 4. Widmo przesunięcia drgań liny bezpośrednio po jej napięciu w maszynie zęczeniowej

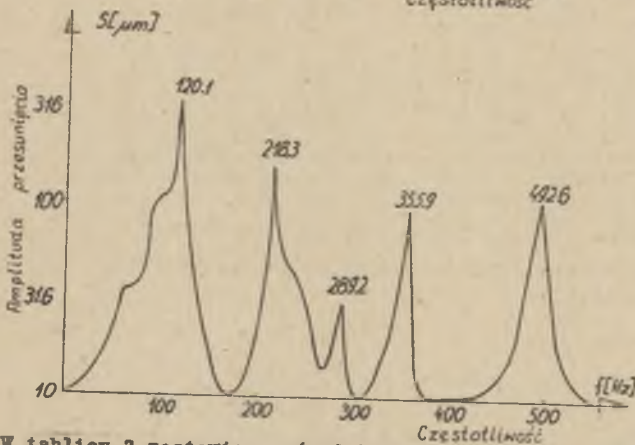


Rys. 5. Widmo przesunięcia drgań liny po 1000 cyklach zęczeniowych



Rys. 6.

Widmo przesunięcia
drgań liny po 7000
cykli zmęczeniowych
/punkt A na rys. 2/



Rys. 7.

Widmo przesunięcia
drgań liny po 18000
cykli zmęczeniowych
/punkt B na rys. 2/

W tabelicy 2 zestawiono uśrednione wyniki analiz dla charakterystycznych punktów zmian stanu liny.

Tabelica 2

Wyniki analiz sygnałów przesunięcia drgań

Lp.	Liczba cykli zmęczeniowych N_1	Częstotliwości /Hz/ drgań własnych				Dobroć mechaniczna liny Q
		I	II	III	IV	
1.	Bezpośrednio po napięciu	100,5	199,5	333,3	458,3	16,67
2.	1000	120,1	212,2	351,2	485,4	8,33
3.	7000 /A/	119	215,3	351,5	487,6	10,0
4.	18000 /B/	120,1	218,3	355,9	492,6	6,25
5.	20000	130,5	228,4	359,6	497,5	1,59

Na rys. 2 zaznaczone punkty odpowiadające średnim zmianom IV częstotliwości drgań własnych /krzywa 2/ i współczynnika tłumienia /krzywa 3/ obliczane jako odwrotność dobroci mechanicznej liny; otrzymane podczas realizacji pełnego badania. Zauważono bowiem, że IV częstotliwość drgań własnych wykazuje największe zmiany w miarę postępującego osłabienia.

Porównując wyniki analizy widmowej z wynikami obserwacji stanu liny /wydłużenie, liczba pęknięć/ stwierdzono podobieństwo zmian częstotliwości drgań własnych i współczynnika tłumienia drgań do przebiegu narastającego wydłużenia liny. W przebiegu zmian częstotliwości obserwowano ponadto zakłócenia w "gładkości" towarzyszące wzrostowi pęknięć drutów, a w pobliżu liczby cykli poprzedzającej zerwanie liny, obserwowano gwałtowne zmiany częstotliwości i tłumienia. Zmiany w sygnale akustycznym należy przypisać takim czynnikom, jak:

- zmiana czynnej długości liny i równocześnie zmiana przekroju przejmującego naciąg T we wzorze /2/ /rys. 2 i tabl. 1/,
- zmiana dobroci mechanicznej na skutek zmian struktury liny wywołanych pęknięciami drutów.

Obecnie prowadzi się badania mające na celu przypisanie zmianom stanu liny, zmian w sygnale akustycznym.

Q - dobroć mechaniczna liny. Jeżeli Q ma wartość skończoną wtedy drgania po pewnym czasie zostaną wytłumione /zanikną/. Jeżeli $Q = \infty$ to drgania utrzymują się w nieograniczonym czasie. Jeżeli Q $\rightarrow 0$ to mamy do czynienia z ruchem aperiodycznym.

5. Wnioski

1. W miarę postępującego osłabienia liny stalowej, oprócz zmiany jej przekroju nośnego i wydłużenia zmieniają się; częstotliwość drgań swobodnych i współczynnik tłumienia.
2. Zależność pomiędzy zmianami przekroju nośnego i wydłużenia w linie a zmianami w sygnale wibroakustycznym pozwala na wykorzystanie metody wibroakustycznej do określenia stopnia zużycia liny. Oprócz dotychczas stosowanych wskaźników zmęczenia lin /pękanie drutów i wydłużenie/ możliwe jest wprowadzenie nowych wskaźników określanych metodami wibroakustycznymi.
3. Prostota pomiaru postępującego procesu zużycia liny metodami wibroakustycznymi pozwala na zastosowanie tych metod; zarówno w badaniach laboratoryjnych a w przyszłości także przemysłowych.

LITERATURA

- [1] Beblo W.: Wpływ drgań maszyn na drgania konstrukcji żelazobetonowej wieży wyciągowej. - Przegląd Górniczy nr 8/78.

- [2] Egle D.M.: The Influence of Changing and Conditions on the Resonant Response of Beams and Plates. NASA Contractor Report 1971.
- [3] Hagel R.: Miernictwo dynamiczne, WNT, Warszawa 1975.
- [4] Hankus J.: Instrukcja określania stanu bezpieczeństwa pracującej liny wyciągowej na podstawie wskaźników GIG. Wyd. GIG, 1965.
- [5] Hansel J.: Podstawy teoretyczne prognozowania czasu pracy lin stalowych. Zeszyty naukowe AGH. Elektryfikacja i Mechanizacja Górnictwa i Hutnictwa z. 84/1977.
- [6] Kowalczyk J., Hankus J.: Wskaźniki stanu bezpieczeństwa górniczej liny wyciągowej. Prace Głównego Instytutu Górnictwa Komunikat nr 390, Katowice 1966.

ПОПЫТКА ОЦЕНКИ ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ОСЛАБЛЕНИЯ
ГРУЗОПОДЪЕМНОСТИ ПОДЪЕМНОГО КАНАТА
ВИБРОАКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ.

Резюме

В статье обсуждается задание виброакустического метода определить поступательное ослабление подъемных канатов. Даются результаты лабораторных исследований на основании которых определено, что назначаемые предложенным методом показатели: частота собственных колебаний и гашение зависят от поступательной усталости каната.

AN ATTEMPT TO ASSESS
THE PROGRESSIVE FATIGUE OF HOISTING ROPES
DUE TO VIBROACOUSTICAL METHODS

Summary

The paper outlines the assumptions of a vibro - acoustical method which enables to determine progressive fatigue of hoisting ropes. The presented results of laboratory tests led to conclusions that the indices in the form of free vibration frequency and damping obtained by the proposed method are dependent on progressive fatigue in ropes.