

Jan Hankus

ZINTEGROWANE METODY BADAŃ I OCENY STANU BEZPIECZEŃSTWA LIN STALOWYCH

Streszczenie

Liny stalowe są istotnymi elementami nośnymi urządzeń wyciągowych, kolei linowych, wyciągów narciarskich i urządzeń dźwigowych. Pracują najczęściej w trudnych warunkach obciążeń cyklicznie zmiennych, w środowisku korozyjnym itp. Z tego też powodu ulegają znacznie szybciej zużyciu od innych elementów maszyn i urządzeń. Ich stan techniczny ma decydujący wpływ na ciągłą bezawaryjną pracę, a przede wszystkim na bezpieczeństwo ludzi korzystających z urządzeń lub obsługujących urządzenia. Dlatego też bardzo ważnym zagadnieniem są metody badań i oceny stanu bezpieczeństwa pracujących liny stalowych. Biorąc pod uwagę teorię niezawodności, pracujące liny są elementami nieodnawialnymi i w miarę upływu czasu eksploatacji wystąpić mogą różne zagrożenia.

W artykule podano charakterystykę możliwych zagrożeń i metody ich identyfikacji. Przedstawiono wizualną i magnetyczną metodę badań lin wyciągowych w warunkach ruchowych. Pomiar i badania na tej samej linie i w różnych miejscach są powtarzane w określonych odstępach czasu (na przykład co tydzień, miesiąc, kwartał), przez co gromadzone są powiększające się zbiory wyników wymagające obiektywnej analizy i wiarygodnej oceny. W pracy przedstawiono opracowane w GIG probabilistyczne metody analizy wyników wizualnych badań lin, w których wykorzystano typowe programy komputerowe. Metody pozwalają po każdym przeprowadzonym badaniu w kopalni, porównywać kolejne serie wyników badań, określać zmiany w funkcji czasu pojedynczych parametrów, a także oceniać osłabienie pracującej liny wywołane zmianami właściwości kilku parametrów.

Prowadzone są również badania magnetyczne, których celem jest wykazanie miejscowych zewnętrznych i wewnętrznych pęknięć drutów, a także ubytków przekroju liny wywołanego korozją lub starciem drutów. Wyniki badań magnetycznych rejestrowane są analogowo na taśmie termicznej i cyfrowo na karcie PCMCIA, co pozwala na komputerowe ich opracowanie. Metody badań wizualnych i magnetycznych uzupełniają się wzajemnie, dając pełny obraz stanu zużycia liny. Wdrożenie bardziej obiektywnych analitycznych metod analizy osłabienia lin, z wykorzystaniem techniki komputerowej, przyczyni się do lepszego wykorzystania lin, przy zachowaniu wymaganego poziomu bezpieczeństwa.

Integrated testing and assessment methods of the safety state of steel ropes

Abstract

Steel ropes constitute essential bearing elements of winding plants, cable railways, ski lifts and hoisting cranes. They work most often in difficult conditions of serially changeable loadings, in corrosive environment, etc. Therefore they are considerably more promptly subject to wear than other elements of machines and devices. Their technical state has decisive impact on continuous failure-free work, and first of all on the safety of people taking advantage of devices, or operating those devices. Therefore a very important problem constitute testing and assessment methods relating to the safety state of steel ropes being in operation. Taking into consideration the reliability theory, the ropes in operation are non-renewable elements, and after the lapse of several years of exploitation different hazards may occur.

The article presents the characterization of possible hazards and methods of their identification. The visual and magnetic methods of testing of hoisting ropes in operational conditions were shown. The measurements and tests regarding the same rope and different sites are repeated at determined time intervals, for example every day, month, quarter, causing the collection of increasing sets of results, which require objective analysis and reliable assessment. The article presents the developed at the Central Mining Institute probabilistic methods of analysis of visual test results of ropes, where typical computer programs were used. These methods allow to compare subsequent series of test results after each test carried out in the mine, to determine changes in the function of time of individual parameters, as well as to assess the weakening of ropes being in operation, caused by changes of properties of several parameters.

There are also conducted magnetic tests, which aim at the indication of external and internal cracks of wires, as well as losses of rope cross-cut caused by wire corrosion or abrasion. The results of magnetic tests are recorded analogously on a thermal tape and digitally on a PCMCIA card, what allows their computer-based elaboration. The methods of visual and magnetic tests complement one another, giving a full picture of the rope wear state. The implementation of more objective analytical analysis methods of rope weakening, with the use of computer technique, will contribute to better rope exploitation, maintaining the required safety level.

1. WSTĘP

Liny stalowe są istotnymi elementami nośnymi urządzeń wyciągowych, kolei linowych, wyciągów narciarskich, leśnych urządzeń transportowych i urządzeń dźwigowych. Pracują najczęściej w trudnych warunkach obciążeń cyklicznie zmiennych, w środowisku korozyjnym itp. Z tego też powodu ulegają znacznie szybciej zużyciu od innych elementów maszyn i urządzeń. Ich stan techniczny ma decydujący wpływ na ciągłą bezawaryjną pracę, a przede wszystkim na bezpieczeństwo ludzi biorących udział w procesach produkcyjnych lub obsługujących urządzenia. Z uwagi na teorię niezawodności, pracujące liny są elementami nieodnawialnymi i w miarę upływu czasu eksploatacji wystąpić mogą różne zagrożenia. Dlatego też bardzo ważnym zagadnieniem są badania stanu bezpieczeństwa liny przy wykorzystaniu bardziej obiektywnych analitycznych metod oceny ich wyników. Jest to szczególnie istotne w przypadku wdrażania nowych lub udoskonalonych konstrukcji lin, dla których nie ma jeszcze ściśle określonych kryteriów dopuszczalnego zużycia w warunkach ruchowych.

2. CHARAKTERYSTYKA ZAGROZEŃ I METODY ICH IDENTYFIKACJI

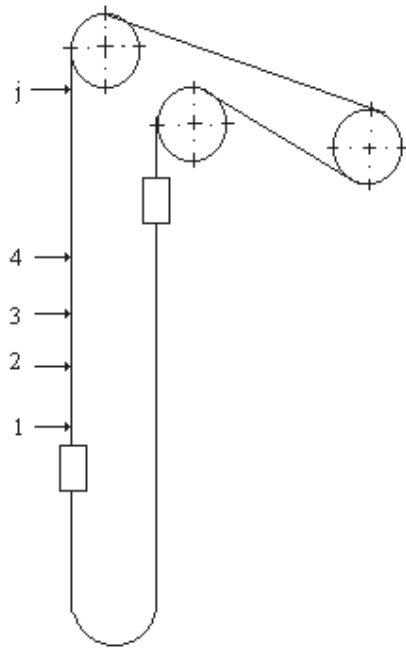
Zagrożeniem jest każdy czynnik mogący spowodować straty materialne, utratę zdrowia lub życia. W określonych sytuacjach może występować jedno lub więcej zagrożeń. Wyłączając przypadki katastroficzne, które zdarzają się bardzo rzadko, zmniejszenie lub wyeliminowanie zagrożenia bezpieczeństwa lin stalowych, pracujących w różnych warunkach, wywołane mogą być przez różne czynniki postępującego zużycia (osłabienia). Ich identyfikacja i wartościowanie wymaga użycia różnych metod badań i różnych metod ilościowej oceny. Ogólną charakterystykę zagrożeń i metody ich identyfikacji podano w tablicy 1.

Tablica 1. Charakterystyka zagrożeń bezpieczeństwa pracy lin stalowych i metody ich identyfikacji

Określenie zagrożenia	Metody identyfikacji i badań
pękanie zmęczeniowe drutów zewnętrznych w części liny przeginanej na tarczy pędnej, bębnie i kołach linowych	badania wizualne i magnetyczne w czasie ruchu liny z góry w dół i zatrzymaniu liny
skupienia pęknięć na krótkim odcinku liny	badania wizualne przy zatrzymanej linie
pęknięcia wewnętrznych drutów	badania magnetyczne i wizualne, częściowe rozkręcanie liny
pękanie drutów w zawiesiach	przesuwanie liny w zawiesiu
starcie drutów zewnętrznych	badania wizualne, wycinanie drutów zewnętrznych, badania magnetyczne
korozja drutów	badania wizualne, wycinanie drutów zewnętrznych, rozkręcanie liny, badania magnetyczne
rozluźnienie drutów zewnętrznych	badania wizualne
zmiany parametrów geometrycznych – średnica i skok liny	pomiary w czasie badań wizualnych
zmiany własności sprężystych – wydłużenie i statyczny moduł sprężystości	pomiary wydłużenia liny podczas napełniania naczyń
deformacje śrubowe (tzw. korkociągi) i pętlowe (tzw. kobyły)	badania wizualne
zmiany własności dynamicznych – dynamiczny moduł sprężystości, współczynnik tłumienia	pomiary wzdłużnych drgań, badania magnetyczne
zmiany własności mechanicznych drutów odcinków pobranych z liny pracującej	badania w warunkach laboratoryjnych
zmiana przekroju i siły zrywającej	badania magnetyczne, badania laboratoryjne

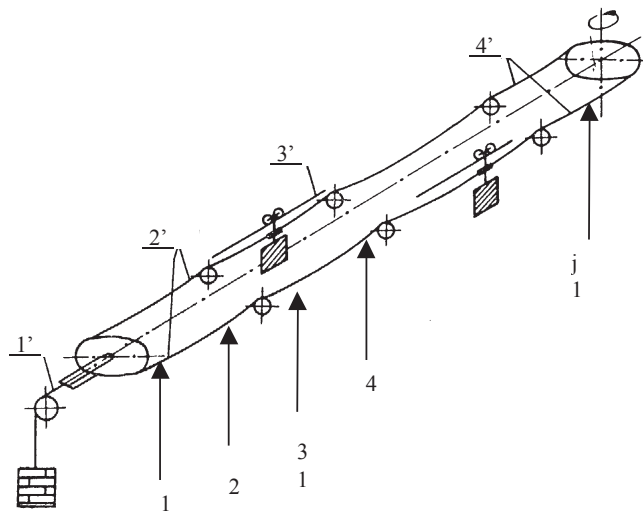
3. BADANIA WIZUALNE LIN PRACUJĄCYCH

Badania wizualne stanu bezpieczeństwa lin pracujących w różnych urządzeniach transportowych prowadzone są podczas ich ruchu z małą prędkością ($v \leq 1$ m/s). W badaniach tych zwraca się szczególną uwagę czy lina nie ma deformacji, przewężenia, zmiany w układzie drutów w splotkach, rozluźnień i pęknięć drutów, oznak korozji oraz innych uszkodzeń, stosując metody identyfikacji podane w tablicy 1. Pomiary parametrów geometrycznych, jak średnica i długość skoku liny, prowadzone są po zatrzymaniu urządzenia w określonych miejscach 1, 2j (rys. 1 i 2). Wyniki pomiarów zapisuje się w tablicy 2, po wcześniejszym jej przygotowaniu dla konkretnego urządzenia i lin z uwzględnieniem specyfiki badań (górnictwo wyciągi szybowe, koleje linowe różnych typów, wyciągi narciarskie itp.) i liczbą mierzonych parametrów. Pomiary i badania tej samej liny, wykonywane w różnych miejscach (rys. 1 i 2) są powtarzane w określonych odstępach czasu (np. co miesiąc, kwartał), przez co gromadzone są powiększające się zbiory wyników (tabl. 2), wymagające obiektywnej analizy i wiarygodnej oceny.



Rys. 1. Schemat górniczego wyciągu szybowego: 1 ... j – miejsca pomiarów

Fig. 1. Scheme of mine shaft hoist: 1 ... j – measurement points



Rys. 2. Schemat kolei dwulinowej o ruchu wahadłowym: 1' – lina napinająca, 2' – lina odciążona, 3' – lina nośna, 4' – lina ciągnąca, 1, 2, 3, 4 ... j – miejsca pomiarów

Fig. 2. Scheme of bicable ropeway with backward and forward motion: 1' – tightening rope, 2' – lightened rope, 3' – carrying rope, 4' – draw rope, 1, 2, 3, 4 ... j – measurement points

Tablica 2. Sposób zapisywania wyników badań analizowanych parametrów lin

Numer i data badania	Nazwa urządzenia				
	Nazwa parametru				
	Miejsce pomiaru				
	1	2	3	.....	j
1	x_{11}	x_{21}	x_{31}	.....	x_{j1}
2	x_{12}	x_{22}	x_{32}	.....	x_{j2}
3	x_{13}	x_{23}	x_{33}	.....	x_{j3}
4	x_{14}	x_{24}	x_{34}	.....	x_{j4}
.
I	x_{i1}	x_{i2}	x_{i3}	.....	x_{ij}

4. METODY ANALIZY WYNIKÓW WIZUALNYCH BADAŃ LIN PRACUJĄCYCH

Po każdym badaniu w warunkach laboratoryjnych i ruchowych nasuwa się pytanie, czy stwierdzone różnice wartości analizowanych parametrów są istotne i wywołane zostały zmianami właściwości liny [2] (np. z powodu postępującego zużycia i zmęczenia), czy też są nieznaczne i wywołane przez czynniki przypadkowe (losowe), towarzyszące badaniom.

Dlatego też uzyskane zbiory wyników badań analizować należy metodami statystyki matematycznej i rachunku prawdopodobieństwa (metody probabilistyczne) [1, 3, 4, 5]. Oprócz metod statystycznych elementarnych (wyliczanie ręczne średniej i odchylenia standardowego za pomocą kalkulatora) wprowadzać należy bardziej zaawansowane metody statystycznej analizy danych, wykorzystując programy komputerowe Statistica PL, Mathcad PL itp.

4.1. Metoda porównania kolejnych serii wyników badań

Ocenę wyników dwóch serii badań tych samych parametrów liny (próby powiązane) prowadzi się w podanej niżej kolejności:

1. Wyznaczanie wartości średniej arytmetycznej X_i i szacunkowego odchylenia standardowego S_i oraz wariancji S_i^2 ,
2. Wykorzystując kryterium Fishera sprawdza się, czy analizowane kolejne serie wyników badań uważać można za jednakowo dokładne. W tym celu wyznaczamy wartość statystyki

$$F' = \frac{S_1^2}{S_2^2} (S_1 > S_2) \quad (1)$$

i porównuje z wartością tablicową F odczytaną przy liczbach stopni swobody $f_1 = n_1 - 1$ i $f_2 = n_2 - 1$ i poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Jeżeli F' jest mniejsza od

wartości tablicowej F , to obydwie serie badań uważać można za jednakowo dokładne.

3. Za pomocą kryterium Studenta sprawdza się, czy różnica między wartościami średnimi kolejnych zbiorów pomiarów $|\bar{X}_1 - \bar{X}_{i2}|$ jest istotna, przy liczbie stopni swobody $n_1 + n_2 - 2$ i poziomie istotności $\alpha = 0,05$, co zapisuje się w formie

$$|\bar{X}_1 - \bar{X}_2| < t_\alpha S_D \quad (2)$$

gdzie S_D jest odchyleniem kwadratowym obliczanym ze wzoru

$$S_D = \sqrt{\frac{S_1^2 + S_2^2}{n}} \quad (\text{dla } n_1 = n_2 = n) \quad (3)$$

Jeżeli zależność (2) nie jest spełniona, to różnica między średnimi jest istotna. Wymaga to dalszej szczegółowej analizy i ustalenia przyczyny.

W probabilistycznej metodzie analizy wyników badań wykorzystać można programy komputerowe, na przykład Statistical lub Mathcad, w których wyniki te zestawia się w formie macierzowej. Pozwala to w sposób łatwy łączyć narastające liczby wyników pomiarów i powtarzać analizy na liczniejszych zbiorach. Ze wzrostem liczebności zbiorów wyników badań, maleją graniczne wartości statystyk t i F (kryteria oceny są coraz ostrzejsze), co jeszcze bardziej zwiększa wiarygodność oceny zmian analizowanych parametrów.

4.1.1. Ocena własności mechanicznych drutów lin pracujących

Własności mechaniczne drutów, takie jak siła zrywająca, liczba przegięć i liczba skręceń określają również w pewnym stopniu stan postępującego osłabienia pracującej liny wyciągowej. Dlatego przepisy bezpieczeństwa [7] wymagają okresowego odcinania z nad zawiesia odcinka pracującej liny nośnej, wyciągu bębnowego i przeprowadzenia badań własności mechanicznych wszystkich drutów. Własności drutów są zmiennymi losowymi o rozkładzie normalnym [3], dlatego też uzyskane zbiory wyników badań analizuje się metodami probabilistycznymi w sposób przedstawiony w punkcie 2.

Poniżej dla przykładu przedstawiono analizę wyników badań liczby przegięć drutów o średnicy 1,21 mm liny nośnej wyciągu bębnowego przeprowadzonych w odstępach 12 miesięcy. Zbiory uzyskanych wyników o liczebnościach $n_1 = n_2 = 36$ prezentują macierze A i B.

$$A := \begin{bmatrix} 13 & 12 & 12 & 13 & 13 & 13 \\ 11 & 15 & 13 & 11 & 16 & 12 \\ 11 & 15 & 12 & 13 & 14 & 13 \\ 10 & 13 & 14 & 10 & 14 & 12 \\ 12 & 10 & 13 & 17 & 15 & 14 \\ 14 & 12 & 13 & 12 & 14 & 12 \end{bmatrix} \quad B := \begin{bmatrix} 12 & 9 & 9 & 12 & 12 & 9 \\ 12 & 11 & 8 & 13 & 8 & 8 \\ 10 & 10 & 10 & 9 & 13 & 10 \\ 10 & 11 & 8 & 12 & 9 & 11 \\ 9 & 8 & 10 & 9 & 10 & 10 \\ 6 & 11 & 8 & 8 & 9 & 8 \end{bmatrix}$$

Graniczne wartości statystyk t – Studenta $t_\alpha = 2,00$ i Fishera $F = 1,74$.

W wyniku obliczeń otrzymuje się: $\bar{X}_1 = 12,861$; $\bar{X}_2 = 9,778$; $S_1^2 = 2,673$; $S_2^2 = 2,508$; $S_D = 0,379$ oraz zgodnie z zależnościami (1) i (2)

$$F' = 1,066 < 1,74 ; |\bar{X}_1 - \bar{X}_2| = 3,083 > 0,759.$$

Oznacza to, że kolejne serie badań wykonane zostały z jednakową dokładnością, natomiast istotna różnica występuje pomiędzy wartościami średnimi liczby przegięć. Lina uległa zmęczeniowemu zużyciu, po 12 miesiącach eksploatacji, co zmniejszyło odporność drutów na przeginięcie.

4.1.2. Ocena pomiarów zmian jednego parametru pracującej liny

Poniżej dla przykładu przedstawiono analizę zbiorów wyników pomiarów ruchomych jednomiesięcznych, dwumiesięcznych i kwartalnych średnicy liny wyciągowej nośnej o średnicy nominalnej $\varnothing 46$ mm typu WS 6x36+NF i powierzchniowym styku drutów.

Przyjęto oznaczenia:

A, B, C – zbiory wyników miesięcznych,

AB, BC – zbiory wyników dwumiesięcznych,

ABC – zbiór wyników kwartalnych.

W celu sprawdzenia czułości metody do analizy wybrano zbiory pomiarów średnicy liny podsiębiernej wykonanych w III kwartale 1994 roku i IV kwartale 2000 roku (tabl. 3). Z danych tablicy 3 wynika, że w przypadku badań miesięcznych wykonanych w analizowanym kwartale nie występuje istotna różnica wartości średnich arytmetycznych średnic lin. Istotne różnice średnich wartości średnic występują natomiast przy porównaniu zbiorów wyników badań dwumiesięcznych i kwartalnych (tabl. 3, wartości pogrubione), przy równoczesnym spełnieniu kryterium F (jednakowej dokładności pomiarów).

Tablica 3. Wyniki analizy badań ruchomych średnicy podsiębiernej liny wyciągowej WS 6x36+NF o powierzchniowym styku drutów (III kw. 1994 i IV kw. 2000)

Zbiory wyników badań	Parametry statystyczne	Badania comiesięczne						$t_\alpha S_D$		$|\bar{d}_1 - \bar{d}_2|$		F	
		VII	VIII	IX	X	XI	XII						
		Zbiory wyników						A-B	D-E	A-B	D-E	A-B	D-E
		A	B	C	D	E	F						

miesięczne	\bar{d} , mm	45,527	45,817	45,190	44,413	44,487	44,823	0,899	0,517	0,29 < 0,899	0,074 <0,517	2,275 <19	4,167 <19
	S_l^2	0,091	0,04	0,0083	0,035	0,0084	0,026						
dwumiesięczne	\bar{d} , mm	45,672			44,45			AB-DE		AB-DE		AB-DE	
	S_l^2	0,086			0,023			0,301		1,222 > 0,301		3,739 < 5,05	
kwartalne	\bar{d} , mm	45,511			44,574			(ABC)-(DEF)		(ABC)-(DEF)		(ABC)-(DEF)	
	S_l^2	0,112			0,055			0,289		0,937 > 0,289		2,036 < 3,44	

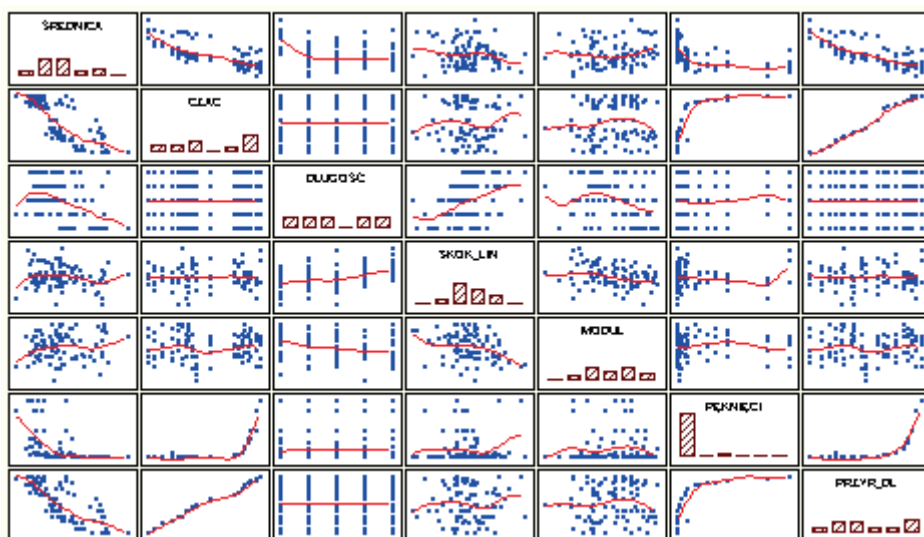
Świadczy to o możliwości wykorzystania przedstawionej metody analitycznej w praktyce do określania zmian własności mechanicznych drutów i lin przy ocenie stanu bezpieczeństwa lin w warunkach ruchowych.

4.2. Ocena osłabienia wywołanego zmianami właściwości kilku parametrów pracującej liny

Stan bezpieczeństwa pracującej liny zależy może od zmiany w czasie kilku parametrów równocześnie i w różnych miejscach liny. Należy bowiem pamiętać, że długość liny wynosić może kilkaset lub więcej metrów, ale o zagrożeniu decyduje maksymalne osłabienie w jednym miejscu (przekroju) liny. Dlatego trzeba być zorientowanym, które z czynników postępującego osłabienia są najważniejsze, a także jakie jest sumaryczne osłabienie. Odpowiednią metodą, która pomoże rozwiązać to zagadnienie nazywa się regresją i korelacją wielokrotną. Zawsze, gdy w modelu regresji ma się do czynienia z co najmniej dwoma zmiennymi niezależnymi (objaśniającymi), mówi się o regresji wielokrotnej. Powiększające się z upływem czasu eksploatacji liny zbiory wyników pomiarów wielu parametrów oceniać należy z zastosowaniem bardziej zaawansowanych metod statystycznej analizy danych, z wykorzystaniem programów komputerowych [8, 10].

Proponuje się następującą kolejność postępowania:

- Sporządzenie macierzowych wykresów rozrzutu, które służą do zbiorczego przedstawienia współzależności pomiędzy wieloma zmiennymi w postaci macierzy zwykłych X-Y. Przykład macierzowego wykresu rozrzutu dla wybranych siedmiu zmiennych (analizowanych parametrów liny) przedstawia rysunek 3. Dla każdej pary zmiennych pokazane są wykresy rozrzutu, podobnie na wykresie rozrzutu pokazany jest wykres regresji liniowej lub nieliniowej. Gdy ma się do czynienia z macierzą kwadratową, wówczas na głównej przekątnej macierzy wykresów rozrzutu przedstawiony jest rodzaj rozkładu zmiennych w postaci histogramu.
- Przeprowadzenie wzrokowej oceny wykresów rozrzutu, która umożliwia wstępne określenie siły i rodzaju zależności i ułatwia prowadzenie dalszej analizy.



Rys. 3. Macierzowy wykres rozrzutu zmian siedmiu parametrów pracującej liny

Fig. 3. Matrix scatter diagram of changes of seven parameters of working rope

4.2.1. Analiza korelacyjna

Siłę współzależności liniowej między dwoma zmiennymi X i Y określa współczynnik korelacji liniowej r_{xy} Pearsona, przyjmujący wartości z przedziału $[-1, 1]$. Znak współczynnika informuje o kierunku korelacji (dodatniej lub ujemnej), natomiast bezwzględna wartość – o sile związku. W tabelicy 4 zestawiono przykładowo wartości r_{xy} dla siedmiu zmiennych badanych parametrów pracującej liny wyciągowej nośnej. Wartości pogrubione oznaczają, że współczynniki korelacji są istotne przy poziomie istotności $\alpha \leq 0,05$. Uwzględniając przyjmowaną w analizie statystycznej [1, 8] skalę korelacji, podać można wstępnie następujące wnioski:

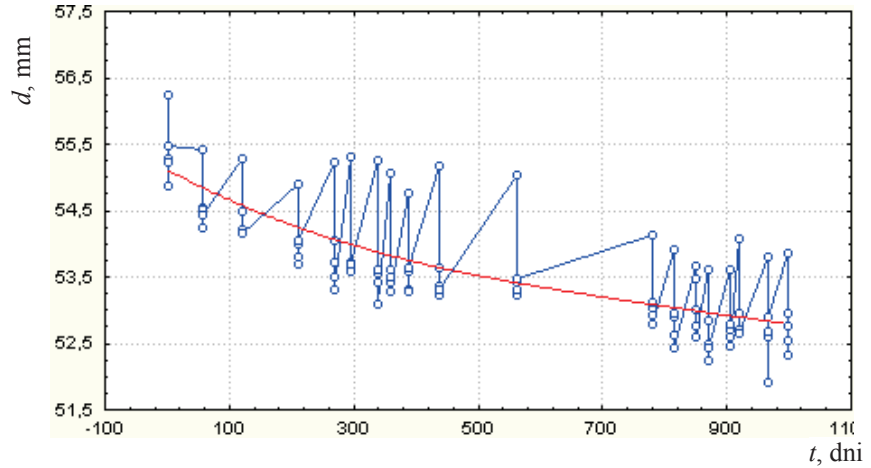
Tabela 4. Korelacja pomiędzy parametrami pracującej liny

Parametr liny	Średnica liny	Czas pracy	Długość liny	Skok liny	Moduł sprężystości	Pęknięcia drutów	Wydłużenie liny
średnica liny	1	-0,74	-0,42	-0,15	0,12	-0,47	-0,75
czas pracy	-0,74	1	-0,00	0,03	0,04	0,68	0,99
długość liny	-0,42	-0,00	1	0,42	-0,25	0,03	0,00
skok liny	-0,15	0,03	0,42	1	-0,28	0,10	0,03
moduł sprężystości	0,12	0,04	-0,25	-0,28	1	0,00	0,02
pęknięcia drutów	-0,47	0,68	0,03	0,10	0,00	1	0,72
wydłużenie liny	-0,75	0,99	0,00	0,03	0,02	0,72	1

- istnieje wysoka współzależność między czasem pracy liny a zmianami średnicy, narastaniem pęknięć drutów i wydłużaniem, natomiast słaba korelacja zachodzi w odniesieniu do zmian statycznego modułu sprężystości,

- między długością liny (miejscami pomiarów) a zmianami średnicy istnieje przeciętna korelacja ujemna ($r_{xy} = -0,42$) oraz podobna korelacja dodatnia ($r_{xy} = 0,42$) między zmianami skoku.

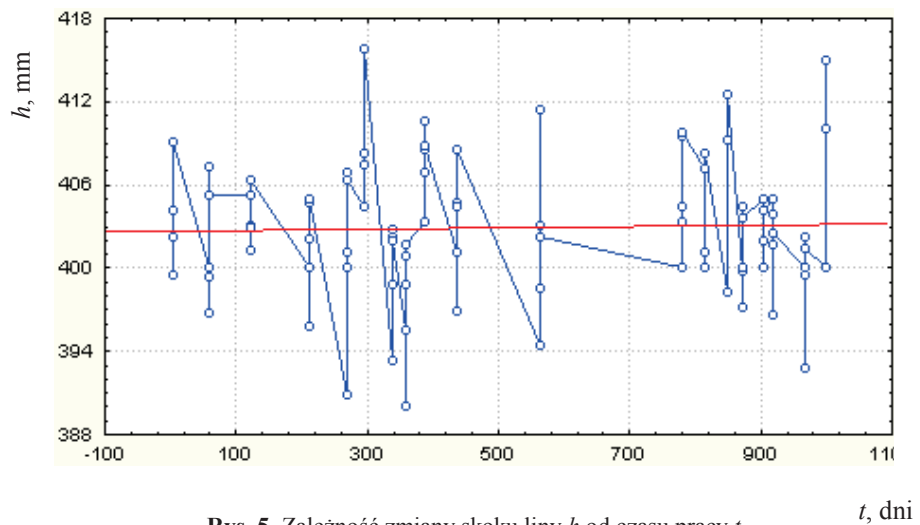
Prowadząc dalszą szczegółową analizę, sporządza się wykresy rozrzutu wraz z linią regresji dla wybranych par zmiennych zależnych. Rysunki 4 i 5 przedstawiają wykresy zmiany średnicy i skoku liny w funkcji czasu pracy.



Rys. 4. Zależność zmiany średnicy liny d od czasu pracy t

Fig. 4. Dependence of change of rope diameter d on worktime t

Z rysunku 4 wynika, że z upływem czasu eksploatacji zmniejsza się średnica liny, co ma merytoryczne uzasadnienie i potwierdza wnioski podane w punkcie 4.1.2.



Rys. 5. Zależność zmiany skoku liny h od czasu pracy t

Fig. 5. Dependence of change of rope slip h on worktime t

4.2.2. Analiza regresyjna

Analiza regresji pojedynczej lub wielorakiej jest metodą umożliwiającą określenie analitycznego związku między zmienną zależną, będącą wynikiem badanego zjawiska a innymi zmiennymi, które mają istotne znaczenie dla przebiegu tego zjawiska. Związek taki zwany jest funkcją (modelem) regresji. Wyboru analitycznej postaci funkcji regresji (liniowa, nieliniowa) dokonuje się na podstawie analizy korelacyjnej, wykresów rozrzutu oraz posiadanej wiedzy z zakresu badania lin.

Wyniki badań mogą być analizowane w układzie płaskim X-Y, co umożliwia ocenę zmiany parametrów tylko wzdłuż długości lin lub funkcji czasu pracy (rys. 4 i 5) albo w układzie trójwymiarowym X-Y-Z, co pozwala na ocenę zmian własności trzech parametrów.

Przebieg zmiany skoku z upływem czasu eksploatacji zbliżony był do linii prostej równoległej do osi x. Oznacza to, że po ustaleniu się rozkładu długości h wzdłuż długości liny, długość skoku w okresie pracy zmieniała się nieznacznie.

Opracowane modele regresyjne są pomocne przy prognozowaniu dopuszczalnego czasu pracy lin.

Sporządzać można również różne trójwymiarowe wykresy rozrzutu wraz z wykresem powierzchniowym dla wybranych trójek zmiennych. Rysunki 6 i 7 przedstawiają geometryczny obraz zmian średnicy d i skoku h liny od długości i czasu eksploatacji.

Przyjmując oznaczenia:

z – zmienna zależna (badany parametr jak średnica d , długość skoku liny h , moduł sprężystości itp.);

$x = t$ – czas pracy liny, dni;

$y = l$ – długość liny (miejsce pomiaru), m,

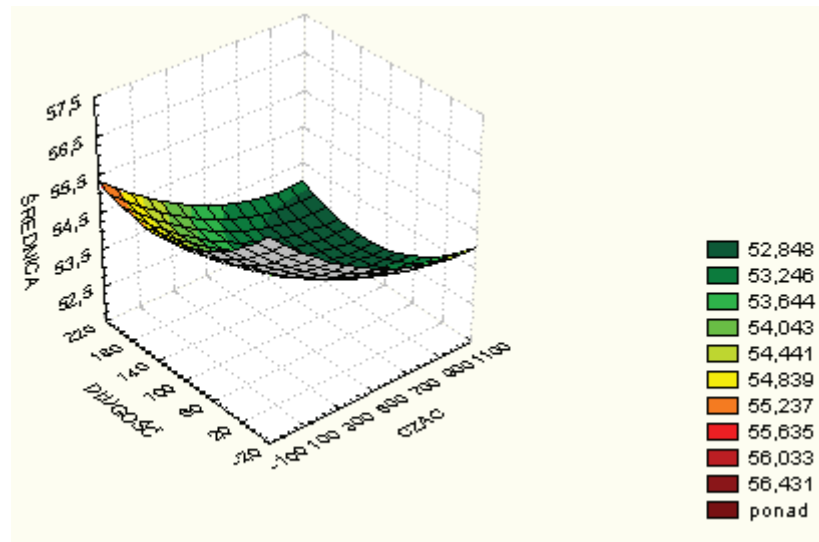
otrzymujemy przykładowo funkcje regresji $z = f(x, y)$ określające zmianę:

– średnicy liny

$$z = 55,973 - 0,004x - 0,002y + 1,87 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 + 1,267 \cdot 10^{-6} \cdot xy + 6,84 \cdot 10^{-5} \cdot y^2 \quad (4)$$

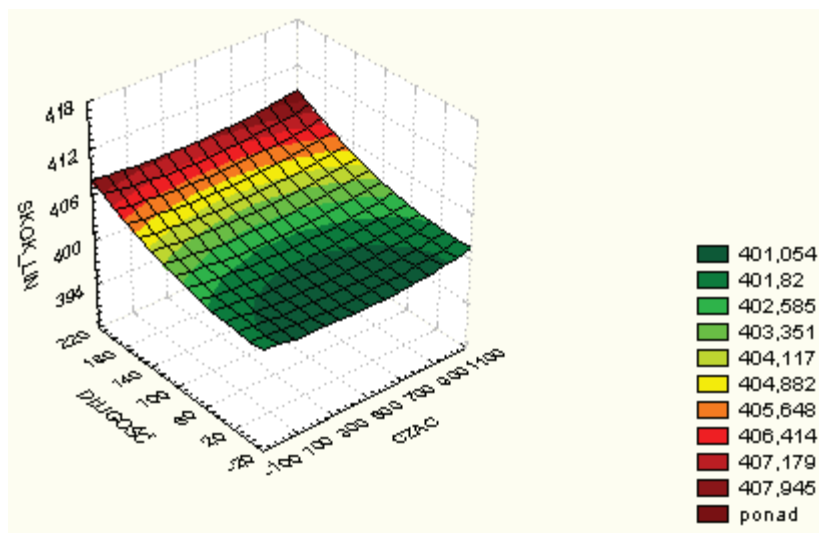
– skoku liny

$$z = 401,00 - 0,003x + 0,002y + 3,145 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 + 1,313 \cdot 10^{-6} \cdot xy + 1,31 \cdot 10^{-4} \cdot y^2 \quad (5)$$



Rys. 6. Zależność średnicy liny d od długości l i czasu pracy liny t

Fig. 6. Dependence of rope diameter d on rope length l and worktime t



Rys. 7. Zależność skoku liny h od długości l i czasu pracy liny t

Fig. 7. Dependence of rope slip h on rope length l and worktime t

Jeżeli bryły na rysunkach 6 i 7 przecinane będą płaszczyzną pionową i równoległą do osi x w odstępach wybranej długości liny ($l = \text{const}$), to otrzyma się zbiory punktów układających się według krzywych regresji (6) i (7). Przykładowo dla $l = 100$ m i po wprowadzeniu właściwych oznaczeń, funkcje regresji przyjmują prostą postać

$$d = 54,657 - 3,873 \cdot 10^{-3}t + 1,869 \cdot 10^{-6}t^2 \quad (6)$$

$$h = 402,51 - 2,869 \cdot 10^{-3}t + 3,145 \cdot 10^{-6}t^2 \quad (7)$$

Jeśli natomiast bryły przecinane będą płaszczyzną pionową równoległą osi y w ustalonych odstępach czasu ($t = \text{const}$), to określać się będzie zmiany parametrów wzdłuż długości liny. Funkcje regresji dla $t = 400$ dni i uwzględnieniu właściwych oznaczeń przyjmują postać:

$$d = 54,672 - 0,0195 \cdot l + 6,839 \cdot 10^{-5} \cdot l^2 \quad (8)$$

$$h = 400,30 + 5,252 \cdot 10^{-4}l + 1,31 \cdot 10^{-4}l^2 \quad (9)$$

Z zależności (9) wynika, że wraz z długością opuszczanej do szybu gałęzi liny wydłuża się skok wskutek cyklicznego rozkręcania i dokręcania się liny. Jest to zjawisko typowe w przypadku górniczych lin wyciągowych.

Podobnie analizuje się zmiany pozostałych parametrów badań wizualnych, takich jak moduł sprężystości, narastanie pęknięć drutów i wydłużanie się liny, a uzyskane funkcje regresji wykorzystuje się do oceny aktualnego stanu bezpieczeństwa lin pracujących.

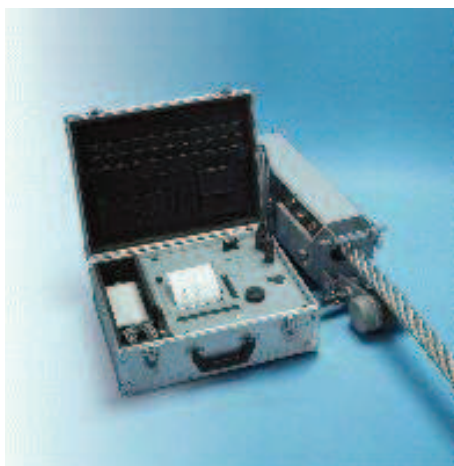
Przedstawiona metoda analizy regresyjnej pozwala na odtwarzanie i porównywanie wyników badań wykonanych w interesujących nas odstępach czasu.

5. BADANIA MAGNETYCZNE LIN WYCIĄGOWYCH W WARUNKACH RUCHOWYCH

W roku 1999 rozpoczęto w GIG badania magnetyczne, których celem było wykazanie miejscowych zewnętrznych i wewnętrznych pęknięć drutów oraz ubytków korozyjnych metalicznego przekroju liny [6, 9]. Metody badań wizualnych i magnetycznych uzupełniają się wzajemnie dając pełny obraz stanu zużycia lin. Metoda magnetyczna opracowana została przez pracowników Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie [6, 9].

Pomiar z zastosowaniem tej metody przeprowadza się w następujący sposób: Badany odcinek liny za pomocą głowicy pomiarowej jest wprowadzany w stan bliski nasyceniu magnetycznemu. Sygnały o zmianach rozkładu pola magnetycznego są dostarczane do rejestratora (rys. 8). Głowica wyposażona jest w czujnik indukcyjny wewnętrzny, służący do wykrywania miejscowych ubytków na przykład spowodowanych pękniętymi drutami i wżerami korozyjnymi, czujnik indukcyjny zewnętrzny do szacowania głębokości, na której znajduje się uszkodzenie, czujnik hallotronowy do wykrywania dłuższych, rozłożonych ubytków metalicznego pola przekroju poprzecznego spowodowanych korozją i starciami.

W celu pomiaru bieżącej długości liny, prędkości względnego ruchu oraz synchronizacji wysuwu taśmy wykresowej z przemieszczeniem liny głowice, wyposażone są w specjalny czujnik ruchu. Defektograf wraz z głowicą pokazano na zdjęciu 1.



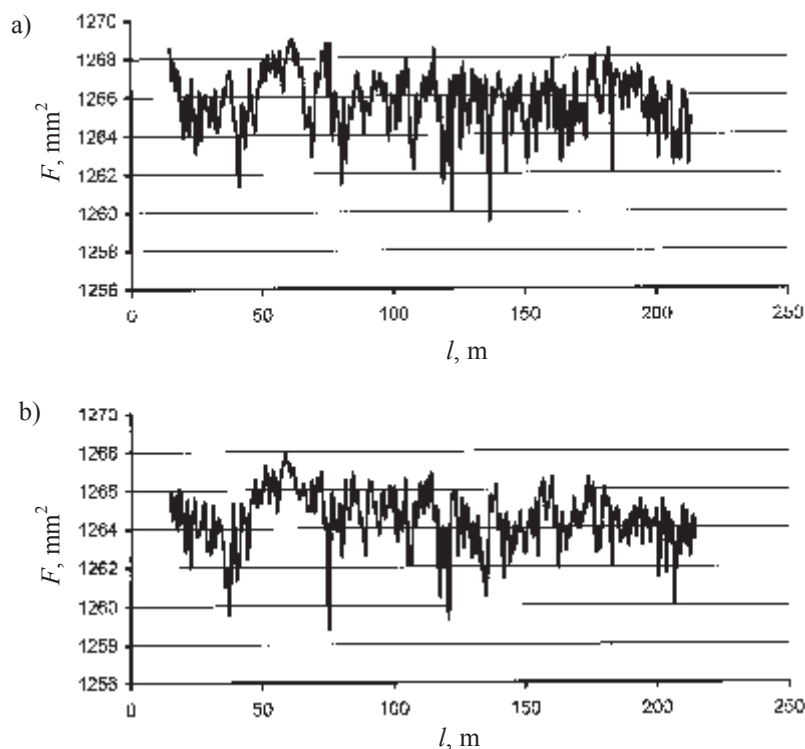
Fot. 1. Rejestrator i głowica magnetyczna do nieniszczących badań lin

Photo 1. Recorder and magnetic head for non-destructive rope testing

Badania prowadzone są ze zrzębu szybu na opuszczonych klapach, odpowiednio zabezpieczonych. Głowica zamocowana na linie powinna być dodatkowo zabezpieczona przed ewentualnym nieprawidłowym kierunkiem przemieszczania się liny. Po zainstalowaniu aparatury za pomocą pręta kalibracyjnego o przekroju poprzecznym 20 mm^2 dokonuje się kalibracji urządzenia. Kalibracja polega na ustawieniu rejestracji w funkcji czasu, po czym, pomiędzy głowicę magnetyczną i linę wsuwa się i wysuwa pręt kalibracyjny. Na wykresach defektoskopowych widać wielkość zmian, jakie wywołał pręt o przekroju 20 mm^2 .

Badania magnetyczne stanu liny rejestruje się analogowo na taśmie termicznej i cyfrowo w karcie PCMCIA. Podczas każdego badania uzyskuje się typowy wykres defektoskopowy, na którym można zaobserwować miejsca z pękniętymi drutami, starciem, wżery korozyjne itp.

Zarejestrowane dane w karcie PCMCIA przeniesiono do stacjonarnego komputera klasy PC, gdzie za pomocą oprogramowania JW_CARD i BROWSER_102 dokonano konwersji plików binarnych na postać decymalną. Stworzono dodatkowe oprogramowanie, które automatycznie dokonywało porównania wyników badań z kalibracją, określając tym samym ubytki przekroju metalicznego. Wyniki takiej analizy przedstawiono na rysunkach 8a i 8b.



Rys. 8. Zmiany przekroju poprzecznego liny WS 6x52+NF podsiębiernej: a – badania po 815 dniach pracy, b – badania po 1084 dniach pracy, l – długość liny, F – przekrój nośny liny

6. WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE

1. W miarę upływu czasu pracy zmieniają się własności mechaniczne drutów z odcinków pobranych z lin pracujących, a także parametry geometryczne takie jak średnica i długości skoku liny oraz procesy narastania pęknięć drutów i wydłużania się liny.
2. Analizę i opracowywanie gromadzonych zbiorów wyników badań zaleca się prowadzić z wykorzystaniem metod probabilistycznych, co pozwoli na bieżące (po każdym badaniu) dokonywanie obiektywnej i wiarygodnej oceny zmian parametrów wpływających na stan bezpieczeństwa liny.
3. Stwierdzono, że metody badań wizualnych i magnetycznych uzupełniają się wzajemnie dając pełny obraz stanu zużycia lin. Najlepsze rezultaty osiąga się, gdy zintegrowane metody badań (badania magnetyczne i wizualne) prowadzone są przez ten sam zespół ludzi.
4. Wdrożenie bardziej obiektywnych, analitycznych zintegrowanych metod analizy osłabienia lin stalowych z wykorzystaniem bardzo rozpowszechnionej już techniki

komputerowej, przyczyni się do lepszego wykorzystania lin, przy zachowaniu wymaganego poziomu bezpieczeństwa.

Literatura

1. Bobrowski D.: *Probabilistyka w zastosowaniach technicznych*. Warszawa, WNT 1980.
2. Hankus J.: *O doborze konstrukcji i badaniu stanu bezpieczeństwa górniczych lin wyciągowych*. Bezpieczeństwo Pracy w Górnictwie 1974 nr 3.
3. Hankus J.: *Budowa i własności mechaniczne lin stalowych*. Katowice, Główny Instytut Górnictwa 2000.
4. Hankus J.: *Probabilistyczne metody analizy zmęczenia lin stalowych*. Maszyny Górnicze 2002 nr 1.
5. Hankus J. i inni: *Opracowanie zintegrowanej metody wizualnych i magnetycznych badań udoskonalonych lin wyciągowych*. Dokumentacja GIG nr 131 1000 1-181. Katowice 2001 (nieopublikowana).
6. Hansel J., Kwaśniewski J., Lankosz L., Tytko A.: *Badania magnetyczne lin stalowych*. Skrypty Uczelniane nr 1188. Kraków, Wydaw. AGH 1990.
7. *Przepisy dla podziemnych zakładów górniczych*. Załączniki nr 1-21. Katowice, Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Górnictwa 1998.
8. Stanisław A.: *Przystępny kurs statystyki w oparciu o program STATISTICA PL na przykładach medycznych*. Kraków, Stat Soft Polska Sp. z o.o. T. I i II 1998 i Tom II 2000
9. Tytko A.: *Modelowanie zużycia zmęczeniowego i diagnostyka lin stalowych*. Rozprawy Monograficzne 65. Kraków, Wydaw. AGH 1998.
10. Żero A.: *Mathcad 7.0*. Warszawa, Wydaw. EXIT.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Kazimierz Rułka