

INKLINOMETR STRUNOWY

*W artykule omówiono zasadę działania i niektóre wady
i zalety nowej konstrukcji inklinometru strunowego.
Przytoczono skrót obliczeń, które wykonano podczas pro-
jektowania i krótko opisano wstępne wyniki badań modelu.*

Obok inklinometrów służących do pomiaru przebiegu głębokich otworów wiertniczych (głównie w górnictwie naftowym) wyposażonych najczęściej w układ żyroskopowy lub układ z igłą magnetyczną, zapewniające orientację przyrządu względem kierunku północnego, są produkowane prostsze inklinometry służące do pomiaru przesunięć i odkształceń w gruntach, przemieszczania pochyłości i przecięć ścian budowli, wykopów budowlanych i skał.

Pomiarów tych dokonuje się opuszczając inklinometr w rurze żłobkowanej lub w innej odkształcalnej prowadnicy zapewniającej orientację przyrządu, przechodzącej przez badane warstwy gruntu, wzdłuż badanej ściany budowli itp., określając na podstawie wskazań inklinometru kąt jego odchylenia od pionu na różnych znanych głębokościach i azymuty położenia półpłaszczyzn pionowych, w których te odchylenia zachodzą.

Znając kąt odchylenia i jego azymut na kolejnych głębokościach, można wyznaczyć przebieg bądź zmiany przebiegu prowadnicy, wynikające bezpośrednio z przemieszczeń warstw gruntu, zmian pochyłości i przecięć ścian budowli itp. Inklinometr musi być związany z prowadnicą za pomocą kółek bądź płóz, w sposób umożliwiający jego przesuwanie równolegle do prowadnicy lecz uniemożliwiający jego obrót.

W zespołach pomiarowych inklinometrów wykorzystuje się często strunową technikę pomiarów. Inklinometry działające na podstawie metody strunowej produkują trzy renomowane firmy zachodnie: AG Maihak - RFN, Geonor - Norwegia i Telemac - Francja.

Wymienione w prospektach dane metrologiczne i techniczne tych inklinometrów zawiera tablica 1. Typowy strunowy czujnik do pomiaru kąta odchylenia od pionu, który można również stosować w inklinometrach, przedstawia schematycznie rys.1.

Odchylenie czujnika od pionu o pewien kąt wywołuje proporcjonalną zmianę naprężenia struny, którą można określić na podstawie pomiarów zmian częstotliwości drgań własnych struny, ze znanej zależności

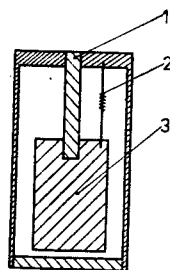
$$\sigma = 4\rho l^2 f^2 \quad 1/1$$

gdzie:

σ - naprężenie struny,

ρ - ciężar właściwy materiału struny,

l – długość struny,
f – częstotliwość drgań własnych struny



Rys.1. Schemat typowego czujnika strunowego do pomiaru kąta odchylenia od pionu;
1–zawieszka albo element sprężysty, 2–struna pomiarowa, 3–obciążnik pomiarowy

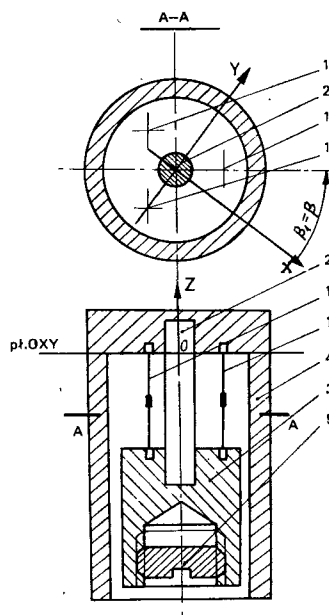
Tablica 1

Przegląd inklinometrów strunowych

Typ inklinometru Producent	MDS 83 A.G. Maihak, RFN	P-600 Geonor, Norwegia		MPF Telemac, Francja
Zakresy pomiarowe [°]	$\pm 30, \pm 15, \pm 6, \pm 3$	± 45	± 6	± 15
Zdolność rozdzielacza	0,02 % zakresu pomiarowego z miernikiem MDS 910			
Powtarzalność wskazań	$\pm 0,5\%$ zakresu pomiarowego (w warunkach wzorcowania)			
Błąd		$\pm 0,25^\circ$	$\pm 0,03^\circ$	
Wymiary [mm]	Podwójny czujnik nachyleń $\varnothing 45$, l = 300. Długość wózka 1046	$\varnothing 32$ l = 700	$\varnothing 63$ l = 795	
Ciężar				12 kG
Opis części pomiarowej inklinometru	Dwa dwustrunowe czujniki kąta pracujące w układzie różnicowym odwrócone względem siebie o 90°	Dwustrunowy czujnik różnicowy z płaskim elementem sprężystym	Cztery struny pracujące prawdopodobnie jak w MDS 83	
Wymiary rur pomiarowych i materiał	$\varnothing$ zewnętrzne 90 $\varnothing$ wewnętrzne 76 PVC	$\square 50$ l = 1500 stop aluminium		
Urządzenia wchodzące w skład kompletu pomiarowego	Podwójny czujnik odchylenia, sanie pomiarowe, wózek do transportu i opuszczania inklinometru	Czujnik odchylenia z rolkami, bęben z kablem, krążek do opuszczania czujnika		
Cena	12500 DM (komplet)			

W strunowych inklinometrach i czujnikach kąta obciążnik pomiarowy najczęściej jest mocowany na płaskim elemencie sprężystym. W takiej konstrukcji sygnał pomiarowy pochodzi od składowej ciężaru obciążnika prostopadłej do powierzchni elementu sprężystego. Dwie pozostałe składowe i ich zmiany, zależne od położenia czujnika, stanowią obciążenie wywołujące błędy pomiarowe, które częściowo można wyeliminować przez zastosowanie dwóch strun pracujących w układzie różnicowym. Ponieważ czujnik z płaskim elementem sprężystym mierzy tylko składową kąta odchylenia w płaszczyźnie pionowej prostopadłej do powierzchni elementu sprężystego, w celu uzyskania pełnych danych o odchyleniu czujnika stosuje się jednocześnie dwa wyżej opisane układy pomiarowe obrócone względem siebie o 90° .

W celu umożliwienia pełnego określenia kąta odchylenia czujnika przy zastosowaniu jednego elementu sprężystego i eliminacji błędów wynikających z niekorzystnego obciążenia płaskich elementów sprężystych, przy polepszeniu technologiczności kształtu elementu sprężystego, zaprojektowano inklinometr z elementem sprężystym w kształcie wałka i układem trzech strun pomiarowych.



Rys.2. Schemat części pomiarowej inklinometru trzystrunowego; 1—struny pomiarowe, 2—element sprężysty, 3—obciążnik pomiarowy, 4—korpus czujnika, 5—przesuwany obciążnik pomiarowy.

Część pomiarowa inklinometru jest schematycznie przedstawiona na rys.2. Struny pomiarowe są rozmieszczone co 120° na jednakowym promieniu wokół elementu sprężystego i wstępnie napięte pomiędzy obciążnikiem pomiarowym a korpusem czujnika. Obciążnik pomiarowy jest przymocowany do korpusu czujnika poprzez element sprężysty w kształcie wałka. Odchylenie korpusu czujnika od pionu wywołuje zmianę położenia obciążnika pomiarowego, a tym samym zmianę naprężenia poszczególnych strun pomiarowych i bezpośrednio z nią związane zmiany częstotliwości ich drgań poprzecznych, które są przekształcone przez przetworniki elektromagnetyczne na sygnały

elektryczne. Na podstawie częstotliwości tych sygnałów można określić odchylenie korpusu od pionu i azymut pionowej płaszczyzny, w której to odchylenie zachodzi.

Do regulacji czułości czujnika służy przesuwany obciążnik pomiarowy. Dla potrzeb obliczeń konstrukcyjnych przyjęto układ współrzędnych prostokątnych usytuowany jak na rys.2, przy tym w ten sposób, że ugięcie elementu sprężystego zachodzi w płaszczyźnie OXZ, oś OZ jest osią symetrii czujnika. Kąt ugięcia elementu sprężystego przyjęto za dodatni jeżeli obciążnik pomiarowy odchyła się w kierunku dodatnim osi OX.

Kąty pomiędzy płaszczyzną ugięcia elementu sprężystego OXZ, a płaszczyznami wyznaczonymi przez oś OZ i górne zamocowania strun, wynoszą dla pierwszej struny $\beta_1 = \beta$ dla drugiej struny $\beta_2 = \beta + 120^\circ$, dla trzeciej struny $\beta_3 = \beta + 240^\circ$.

Rozpatrując rzut płaszczyzny wyznaczonej przez i-tą strunę na płaszczyznę OXZ można wyprowadzić zależność wiążącą zmianę długości struny Δl_i z kątem ugięcia elementu sprężystego γ i kątem β_i :

$$\Delta l_i = -\gamma \cdot r \cdot \cos \beta_i \quad /2/$$

gdzie r oznacza odległość strun od osi elementu sprężystego.

Odształcenie struny o Δl_i pociąga za sobą zmianę częstotliwości jej drgań własnych zgodnie z wzorem:

$$\frac{\Delta l_i}{l_0} = k_i \left(f_{ki}^2 - f_{0i}^2 \right) \quad /3/$$

gdzie:

l_0 - początkowa długość struny,

k_i - stała struny,

f_{ki} - częstotliwość drgań własnych struny odształconej,

f_{0i} - częstotliwość drgań własnych struny nieodształconej (tzw. częstotliwość początkowa) zmierzona przy $\alpha = 0$.

Jednocześnie wiadomo, że kąt ugięcia elementu sprężystego jest proporcjonalny do sinusa kąta odchylenia inklinometru od pionu zgodnie z wzorem:

$$\gamma = k_\alpha \cdot \sin \alpha \quad /4/$$

gdzie:

α - kąt odchylenia inklinometru od pionu,

k_α - stała.

Z połączenia wyżej podanych wzorów wynika, że:

$$-k_\alpha \cdot \sin \alpha \cdot r \cdot \cos \beta_i = l_0 \cdot k_i \left(f_{ki}^2 - f_{0i}^2 \right) \quad /5/$$

Oznaczając:

$$\frac{L_0 \cdot k_i}{k_\alpha \cdot r} = c_i \quad /6/$$

otrzymujemy dla trzech strun ($i=1,2,3$) układ trzech równań:

$$\sin \alpha \cos \beta = -c_1 \left(f_{k1}^2 - f_{01}^2 \right) \quad /7/$$

$$\sin \alpha \cos(\beta + 120^\circ) = -c_2 \left(f_{k2}^2 - f_{02}^2 \right)$$

$$\sin \alpha \cos(\beta + 240^\circ) = -c_3 \left(f_{k3}^2 - f_{03}^2 \right)$$

Z tego układu równań wynikają trzy grupy zależności:

$$\sum_{i=1}^3 c_i \left(f_{ki}^2 - f_{0i}^2 \right) = 0 \quad /8/$$

$$\operatorname{tg} \beta_{1,2} = -\frac{2\sqrt{3}}{3} \left(\frac{c_2 (f_{k2}^2 - f_{02}^2)}{c_1 (f_{k1}^2 - f_{01}^2)} + 0,5 \right) \quad /9/$$

$$\operatorname{tg} \beta_{1,3} = \frac{2\sqrt{3}}{3} \left(\frac{c_3 (f_{k3}^2 - f_{03}^2)}{c_1 (f_{k1}^2 - f_{01}^2)} + 0,5 \right)$$

$$\operatorname{tg} \beta_{2,3} = \frac{2\sqrt{3}}{3} \left(\frac{c_2 (f_{k2}^2 - f_{02}^2)}{c_2 (f_{k2}^2 - f_{02}^2) + c_3 (f_{k3}^2 - f_{03}^2)} - 0,5 \right),$$

$$\operatorname{tg} \beta_{1,2,3} = -\frac{2\sqrt{3}}{3} \left(\frac{c_1 (f_{k1}^2 - f_{01}^2) + c_3 (f_{k3}^2 - f_{03}^2)}{c_2 (f_{k2}^2 - f_{02}^2) + c_3 (f_{k3}^2 - f_{03}^2)} + 0,5 \right)$$

$$\sin \alpha_{2,3/i,j}(k) = -\left[c_2 (f_{k2}^2 - f_{02}^2) + c_3 (f_{k3}^2 - f_{03}^2) \right] \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \beta_{i,j}(k)} \quad /10/$$

$$\sin \alpha_{1/i,j}(k) = c_1 (f_{k1}^2 - f_{01}^2) \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \beta_{i,j}(k)}.$$

Indeksy przy $\operatorname{tg} \beta$ i $\sin \alpha$ oznaczają numery strun, których wskazania zostały wykorzystane we wzorze. Dla idealnego czujnika wzory te są sobie równoważne, w praktyce różnice nie powinny przekraczać błędów wynikających z klasy czujnika.

Na podstawie dowolnych zależności z grup /9/ i /10/, znając wyniki wzorcowania inklinometru (stałe c_1, c_2, c_3 i częstotliwości początkowe f_{01}, f_{02}, f_{03}) i położenie katowe poszczególnych strun względem prowadnicy, w której jest opuszczony inklinometr, można na podstawie pomiarów częstotliwości f_{k1}, f_{k2}, f_{k3} obliczyć położenie katowe płaszczyzny pionowej (kąt β), w której zachodzi ugięcie prowadnicy oraz wielkość tego ugięcia (kąt α) na danej głębokości.

Wyrażenie /8/ oznacza, że suma algebraiczna przyrostów długości strun jest równa zero dla dowolnego (w granicach zakresu pomiarowego) położenia inklinometru. W praktyce wartość wyrażenia /8/ jest bliska 0. Wartość wyrażenia:

$$\Delta = \frac{\sum_{i=1}^3 c_i \left(f_{k1}^2 - f_{0i}^2 \right)}{\sum_{i=1}^3 c_i \left| f_{ki}^2 - f_{0i}^2 \right|} \quad /11/$$

można traktować jako jedno z kryteriów poprawności działania czujnika.

Wykonano model czujnika. W trakcie badań wartość Δ nie przekraczała na ogół 0,04, a błędy pomiaru 1% zakresu pomiarowego.

Badania modelu potwierdziły słuszność wyprowadzonych powyżej wzorów i opartych na nich obliczeń konstrukcyjnych.

Okazało się jednak, że ze względu na dokładność $\sin \alpha$ należy obliczać ze wzorów na $\sin \alpha_{2,3/2,3}$ $\sin \alpha_{1/1,2}$, $\sin \alpha_{1/1,3}$, a więc z tych, w których mianownik ułamka we wzorze na odpowiedni $\tan \beta$ ulega skróceniu.

Wzorcowanie i badanie przeprowadzono przy pomocy statywu, umożliwiającego obrót czujnika o znany kąt wokół własnej osi, przymocowanego do liniału sinusowego, płytek wzorcowych i wy poziomowanej płyty traserskiej. Stałe czujnika (c_i) wyznaczono z równań. /7/.

Dosyć kłopotliwe jest obliczanie kąta odchylenia i azymutu. Uzyskane wyniki pozwalają przewidywać, po poprawieniu symetrii osiowej czujnika, możliwość uzyskania dokładności pomiaru odchylenia rzędu 0,5 % i dokładności pomiaru azymutu rzędu 2°.

Linearyzacja wskazań wyżej opisanego inklinometru jest możliwa na drodze cyfrowej. Opracowywany w MERA-PIAP miernik cyfrowy SMCL-10 linearyzujący wskazania czujników strunowych znacznie ułatwi pomiary wykonywane przy pomocy tego inklinometru.