

Jan GALIŃSKI, Andrzej KLEWSKI, Henryk KOWALSKI
Politechnika Warszawska

LASEROWY SYSTEM ZABEZPIECZENIA BUDOWLI INŻYNIERSKICH PRZED SZKODAMI GÓRNICZYMI, DZIAŁAJĄCY WEDŁUG METODY RÓŻNICZKOWEJ ZE WSPOMAGANIEM KOMPUTEROWYM.

Streszczenie. W artykule autorzy zaprezentowali system badania odkształceń, działający według metody różniczkowej. Przez szczegółowe omówienie teoretycznych podstaw systemu, ze szczególnym uwzględnieniem algorytmu przetwarzania informacji pomiarowej, wyjaśniona została metodyka pomiaru odkształceń budowli inżynierskich przy użyciu prezentowanego systemu.

LASER SYSTEM PROTECTING ENGINEERING BUILDINGS AGAINST MINING SUBSIDENCE WORKING ACCORDING TO DIFFERENTIAL METHOD WITH COMPUTER ASSISTANCE

Summary. In the paper authors present an accurate method and system to investigate of displacement method of surveying working accordingly to differential method with computer assistance. Particularly theoretical background of the system has been discussed. Algorithm of transformation of measurement signal has been explained according to displacement method of surveying presented in the system.

1. POJĘCIA PODSTAWOWE I OKREŚLENIE TEMATU

Budowla inżynierska w rozumieniu niniejszego opracowania zdefiniowana jest jako obiekt, któremu można przyporządkować zbiór charakterystyk ciągłych — w takim rozumieniu będą

to belki, kratownice, płyty, całe budynki, elektrownie, zapory wodne, górników. Parametry charakterystyk przestrzennych budowli inżynierskiej mogą być wyznaczone przez pomiary względne łącznie z odniesieniem do pomiarów bezwzględnych. Zagadnienie kontroli i nadzoru stanu technicznego budowli inżynierskich związane jest bezpośrednio z warunkami eksploatacyjnymi oraz uwarunkowaniami środowiskowymi. W zależności od charakteru oddziaływań zewnętrznych, jakim poddawana jest budowla inżynierska, występować mogą różnego typu zagrożenia dla samej budowli, jak również dla infrastruktury z nią związanej. W rejonach, w których usytuowane są kopalnie, występują zagrożenia dla całej infrastruktury znajdującej się bezpośrednio nad wyrobiskami górnymi, związane z zachwianiem równowagi statycznej gruntów. W celu wcześniejszego wykrycia i określenia zagrożeń (np. tapnięcie) konieczne jest prowadzenie okresowego, a najlepiej ciągłego nadzoru wybranych budowli inżynierskich, oraz określanie ich charakterystyk przestrzennych, pozwalające na ustalenie stanów alarmowych. W ramach współcześnie stosowanych metod kontroli stanu technicznego budowli inżynierskich, charakterystyki przestrzenne wyznacza się poprzez wielokrotny pomiar współrzędnych wybranych punktów budowli, w pewnych ustalonych interwałach czasowych.

Obecnie stosowane są następujące metody pomiarowe:

- a) Metody fotogrametryczne, w których współrzędne wybranych punktów budowli uzyskiwane są na podstawie obróbki zdjęć fotograficznych. Przy użyciu tej metody możliwe jest przeprowadzenie kontroli dowolnie wybranych punktów budowli z wysoką dokładnością (przy użyciu zdjęć wielkoskalowych uzyskuje się dokładności pomiaru współrzędnych rzędu 1 mm). Ograniczeniem stosowalności metody fotogrametrycznej jest jej czasochłonność oraz konieczność powtarzania procesu obróbki fotograficznej dla każdego wybranego interwału czasowego. Ponadto metoda ta nie zapewnia ciągłej kontroli charakterystyk przestrzennych budowli.
- b) Metoda satelitarna GPS, w której współrzędne wybranych punktów obiektu mierzone są poprzez pomiar sygnałów radiowych emitowanych za pośrednictwem sztucznych satelitów. System GPS daje możliwość ciągłej w czasie i przestrzeni obserwacji satelitów, czyli ciągłego wyznaczania współrzędnych wybranych punktów. Jest to konsekwencją zaprojektowania położenia przestrzennego konstelacji 24 satelitów i dużych wysokości, na których się znajdują ($4 \sim 2 \cdot 10^4$ km). Niewątpliwą niedogodnością dla użytkownika GPS jest jego uzależnienie od dwóch spośród trzech części składowych systemu — elementu kosmicznego (satelity) oraz elementu naziemnego, które są pod kontrolą ośrodka sterowania lotami kosmicznymi.
- c) Klasyczne metody geodezyjne, w których współrzędne poziome wybranych punktów budowli uzyskiwane są na podstawie pomiarów kąto-łiniowych, natomiast współrzędne pionowe wyznaczone są poprzez pomiar przewyższeń.

Metody te, jako metody kontrolne, traktowane być mogą jako uzupełniające. Znajdują natomiast zastosowanie przy dowiązywaniu pomiarów względnych do globalnych układów współrzędnych. Obok wymienionych metod stosowane są również metody termalne, w których charakterystyki przestrzenne budowli kontrolowane są poprzez badanie regularności rozkładu termalnego. W ramach metod termalnych badane są relacje pomiędzy zmianami geometrycznymi elementów budowli a dynamiką jego mapy termalnej. Badania termalne jakkolwiek umożliwiają globalną kontrolę wybranej budowli, to jednak nie pozwalają na wypracowanie skutecznych procedur alarmowych. Z uwagi na wymogi bezpieczeństwa, dla budowli inżynierskich narażonych na silne oddziaływania zewnętrzne najbardziej pożądane byłoby zastosowanie takiej metody kontroli i nadzoru, która umożliwiałaby ciągłe wyznaczanie charakterystyk przestrzennych przy użyciu systemu na stałe zamontowanego na badanych budowlach. W prezentowanym artykule autorzy proponują nowe rozwiązanie takiego zagadnienia w postaci systemu działającego według metody różniczkowej, w którym ciągłe zbieranie i komputerowe przetwarzanie informacji pomiarowej pozwala na ciągłą w dowolnym interwale czasowym kontrolę charakterystyk przestrzennych budowli oraz na uzyskanie procedur alarmowych.

2. PODSTAWY TEORETYCZNE METODY

Dla proponowanego systemu pomiarowego wyróżnia się dwa etapy pracy:

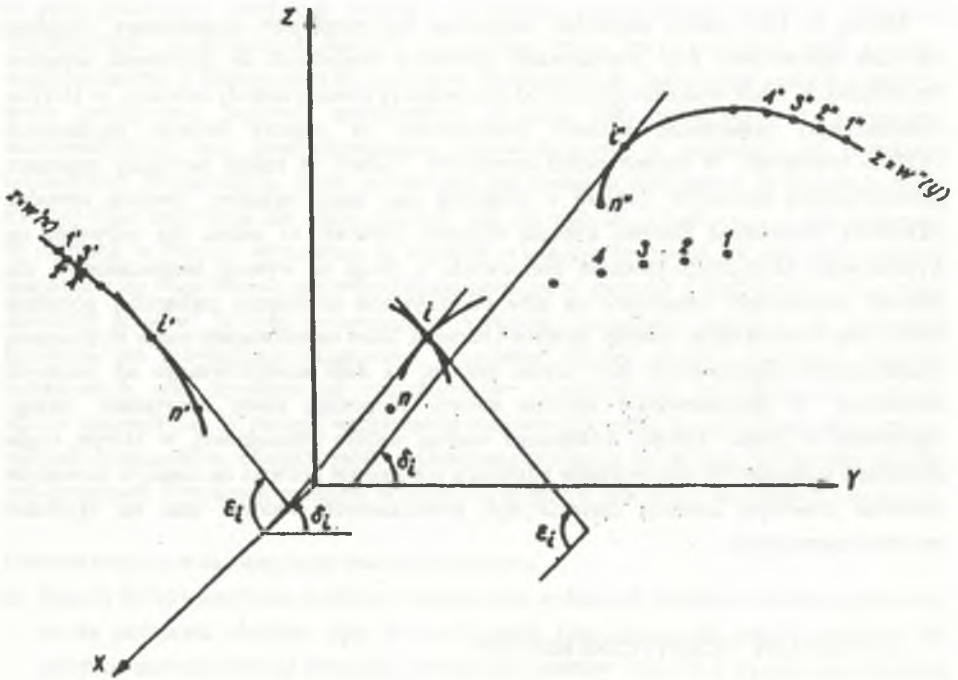
- pierwszy, polegający na wyposażeniu badanej budowli inżynierskiej w głowice pomiarowe rozmieszczone w punktach budowli wybranych tak, że punkty te leżą na wybranej powierzchni aproksymującej budowlę i mają określone współrzędne przestrzenne nawiązane do sieci geodezyjnej,
- drugi, polegający na zbieraniu i przetwarzaniu informacji pomiarowych pochodzących z głowic pomiarowych.

Informacje pomiarowe zbierane są według określonego algorytmu i opracowywane przez komputer. Nakłada się następujące ograniczenia dla systemu:

- parametry charakterystyk budowli mierzone są z jednakową dokładnością,
- spełniony jest warunek $[pvv] = \text{minimum}$.

2. 1. Ujęcie formalne

Przyjmując zorientowany układ współrzędnych prostokątnych x, y, z dla punktów P_i budowli (rys.1) wyznacza się wielomian aproksymujący n -tego stopnia względem argumentu x i k -tego stopnia względem argumentu y , a $u_0 \ u_1 \ u_2 \dots u_n$ są parametrami tego wielomianu.



Rys. 1. Widok w rzucie aksonometrycznym szeregu punktów aproksymujących badaną powierzchnię

Fig. 1. Axonometrical projection of approximation points for engineering object

Postać ogólną wielomianu aproksymującego przedstawia równanie macierzowe (1)

$$z = W(x, y) = \begin{pmatrix} x^0 \\ x^1 \\ x^2 \\ \vdots \\ x^n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{01} & u_{11} & \cdot & u_{k1} \\ u_{02} & u_{12} & \cdot & u_{k2} \\ u_{03} & u_{13} & \cdot & u_{k3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{0n} & u_{1n} & \cdot & u_{kn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y^0 \\ y^1 \\ y^2 \\ \vdots \\ y^k \end{pmatrix} \quad (1)$$

Przez punkty P_i budowli przeprowadzamy szereg przekrojów dających w rzucie siatkę prostokątną i otrzymujemy zbiory krzywych aproksymacyjnych.

$Z = W'(x)$ w rzucie na płaszczyznę XZ

$Z = W''(y)$ w rzucie na płaszczyznę YZ

Postacie wielomianów $W(x)$ i $W(y)$ określa się ze wzorów Lagrange'a stosując pojęcia charakterystyki wprowadzonej przez Hausbrandta.

$$\frac{W'(x)}{x^*} + \frac{W'(x_0)}{x_0^*} + \frac{W'(x_1)}{x_1^*} + \dots + \frac{W'(x_n)}{x_n^*} = 0$$

gdzie: $x^* = (x - x_0)(x - x_1)(x - x_2) \dots (x - x_n)$

(2)

$$\frac{W''(y)}{y^*} + \frac{W''(y_0)}{y_0^*} + \frac{W''(y_1)}{y_1^*} + \dots + \frac{W''(y_n)}{y_n^*}$$

gdzie: $y^* = (y - y_0)(y - y_1)(y - y_2) \dots (y - y_n)$

Stopnie wielomianów (2) ustalane są stosownie do rodzaju obiektu i spodziewanych odkształceń. Dla arbitralnie wybranej chwili t_0 wyznacza się współrzędne przestrzenne x, y, z dla punktów P_i rozmieszczonych na budowlu. Wyznaczanie współrzędnych odbywa się na drodze pomiarów geodezyjnych i rachunku wyrównania. Zbiór ten traktuje się jako stan pierwotny obiektu [1].

2. 2. Równania obserwacyjne dla stanu pierwotnego budowli

Zgodnie z zasadami rachunku wyrównania, można traktować wielkości charakteryzujące stan pierwotny obiektu jako obarczone odpowiednimi błędami średnimi. Zależność funkcyjną pomiędzy zmiennymi a parametrami występującymi we wzorze (1) można zapisać w postaci ogólnej:

$$Z = W(x, y) = W(x, y, u_0, u_1, \dots, u_n) \tag{3}$$

Wprowadzając oznaczenia x_i, y_i, z_i dla najbardziej prawdopodobnych wartości współrzędnych przestrzennych punktu P_i leżących na powierzchni $Z = W(x, y)$ można zapisać równania:

$$\begin{aligned} x_i &= x_i^{obs} + V_{x_i} \\ y_i &= y_i^{obs} + V_{y_i} \end{aligned} \tag{4}$$

gdzie: V_{x_i}, V_{y_i} — wartości poprawek

Postępując podobnie jak w poprzednim punkcie, tworzy się równania:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varepsilon_i^{\text{obser.}} + V_{\operatorname{tg} \varepsilon_i} &= \operatorname{tg} \varepsilon_i^{\text{przybl.}} + d \operatorname{tg} \varepsilon_i \\ \operatorname{tg} \delta_i^{\text{obser.}} + V_{\operatorname{tg} \delta_i} &= \operatorname{tg} \delta_i^{\text{przybl.}} + d \operatorname{tg} \delta_i \end{aligned} \quad (8)$$

i definiując wyrazy wolne jako:

$$\begin{aligned} l_{\operatorname{tg} \varepsilon_i} &= \operatorname{tg} \varepsilon_i^{\text{przybl.}} - \operatorname{tg} \varepsilon_i^{\text{obser.}} \\ l_{\operatorname{tg} \delta_i} &= \operatorname{tg} \delta_i^{\text{przybl.}} - \operatorname{tg} \delta_i^{\text{obser.}} \end{aligned} \quad (9)$$

otrzymamy układ:

$$\begin{aligned} d \operatorname{tg} \varepsilon_i &= V_{\operatorname{tg} \varepsilon_i} - l_{\operatorname{tg} \varepsilon_i} \\ d \operatorname{tg} \delta_i &= V_{\operatorname{tg} \delta_i} - l_{\operatorname{tg} \delta_i} \end{aligned} \quad (10)$$

Obliczając pochodne cząstkowe w punkcie P_i wielomianu $Z = W(x, y)$ i podstawiając wyznaczone z pomiarów wartości współrzędnych (x, y) punktów P_i oraz określone niżej przybliżone wartości parametrów $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$, otrzymujemy równania obserwacyjne dla wartości pomierzonych $\operatorname{tg} \delta_i$ i $\operatorname{tg} \varepsilon_i$:

$$V_{\operatorname{tg} \varepsilon_i} = \frac{\partial^2 W}{\partial x_i^2} V_{x_i} + \frac{\partial^2 W}{\partial x_i \partial y_i} V_{y_i} + \frac{\partial^2 W}{\partial x_i \partial \alpha_0} d\alpha_0 + \frac{\partial^2 W}{\partial x_i \partial \alpha_1} d\alpha_1 + \frac{\partial^2 W}{\partial x_i \partial \alpha_2} d\alpha_2 + \dots + \frac{\partial^2 W}{\partial x_i \partial \alpha_m} d\alpha_m + V_{\operatorname{tg} \varepsilon_i}, \dots \quad (11)$$

$$V_{\operatorname{tg} \delta_i} = \frac{\partial^2 W}{\partial x_i \partial y_i} V_{x_i} + \frac{\partial^2 W}{\partial y_i^2} V_{y_i} + \frac{\partial^2 W}{\partial y_i \partial \alpha_0} d\alpha_0 + \frac{\partial^2 W}{\partial y_i \partial \alpha_1} d\alpha_1 + \frac{\partial^2 W}{\partial y_i \partial \alpha_x} d\alpha_x + \dots + \frac{\partial^2 W}{\partial y_i \partial \alpha_m} d\alpha_m + V_{\operatorname{tg} \delta_i} \quad (12)$$

Rzędne Z_i punktów P_i określone są na drodze bezpośrednich pomiarów z dowiązaniem do punktów geodezyjnych.

Posługując się ogólnie przyjętymi oznaczeniami dla wielkości obserwowanych i przybliżonych, można zapisać:

$$\begin{aligned} Z_i &= Z_i^{\text{obser.}} + V_{Z_i} \\ Z_i^{\text{obser.}} + V_{Z_i} &= Z_i^{\text{przybl.}} + d Z_i \end{aligned} \quad (13)$$

Wprowadzając oznaczenie wyrazu wolnego

$$l_{z_i} = Z_i^{\text{przybl}} - Z_i^{\text{obser.}}$$

otrzymujemy:

$$d_{z_i} = V_{z_i} - l_{z_i} \quad (14)$$

Obliczając różniczkę zupełną wyrażenia (6) i wstawiając do wyrażenia (14) otrzymujemy równanie obserwacyjne dla pomierzonych rzędnych Z_i punktów P_i

$$V_{z_i} = \frac{\partial W}{\partial x_i} V_{x_i} + \frac{\partial W}{\partial y_i} V_{y_i} + \frac{\partial W}{\partial \alpha_0} d\alpha_0 + \frac{\partial W}{\partial \alpha_1} + \frac{\partial W}{\partial \alpha_2} d\alpha_2 + \dots + \frac{\partial W}{\partial \alpha_m} d\alpha_m + l_{z_i} \dots \quad (15)$$

z pominięciem drugich i wyższych potęg poprawek V_{x_i} , V_{y_i} oraz $d\alpha_0$, $d\alpha_1, \dots, d\alpha_m$ - przy założeniu, że wyrazy te są dostatecznie małe.

2.2.2. Pomiary odległości pomiędzy sąsiednimi punktami

Pomiary odległości pomiędzy sąsiednimi punktami pozwalają na ułożenie równań obserwacyjnych dla sieci w płaszczyźnie XY .

Wprowadzając oznaczenia sąsiednich punktów przez P_i i P_k , zapisujemy odległość między nimi poprzez wyrażenie:

$$L_{i-k} = \sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2 + (z_k - z_i)^2} = \sqrt{(\Delta X_{i-k})^2 + (\Delta Y_{i-k})^2 + (\Delta Z_{i-k})^2} \quad (16)$$

Stosując tak jak poprzednio procedury dla wielkości obserwowanych i przybliżonych, otrzymujemy równania obserwacyjne dla dowolnego punktu P_i w postaci:

$$\begin{aligned} W_{i1} &= a_{x1} V_{x1} + a_{y1} V_{y1} + a_{z1} V_{z1} + A_{i1} d\alpha_0 + B_{i1} d\alpha_1 + \dots + M_{i1} d\alpha_M - \omega_{i1} = 0 \\ W_{i2} &= b_{x1} V_{x1} + b_{y1} V_{y1} + b_{z1} V_{z1} + A_{i2} d\alpha_0 + B_{i2} d\alpha_1 + \dots + M_{i2} d\alpha_M - \omega_{i2} = 0 \\ W_{i3} &= c_{x1} V_{x1} + c_{y1} V_{y1} + c_{z1} V_{z1} + A_{i3} d\alpha_0 + B_{i3} d\alpha_1 + \dots + M_{i3} d\alpha_M - \omega_{i3} = 0 \quad (17) \\ W_{i4} &= d_{x1} V_{x1} + d_{y1} V_{y1} + d_{z1} V_{z1} + d_{xk} V_{xk} + d_{zk} V_{zk} + d_{L_i-k} V_{L_i-k} - \omega_{i4} = 0 \\ W_{i5} &= e_{x1} V_{x1} + e_{y1} V_{y1} + e_{z1} V_{z1} + e_{xm} V_{xm} + e_{ym} V_{ym} + e_{zm} V_{zm} + e_{L_i-m} V_{L_i-m} - \omega_{i5} = 0 \end{aligned}$$

gdzie:

$$a_{x_1} = \frac{\partial W}{\partial x_1}; a_{y_1} = \frac{\partial W}{\partial y_1}; d_{z_1} = -1; A_{1,1} = \frac{\partial W}{\partial \alpha_0}; B_{1,1} = \frac{\partial W}{\partial \alpha_1}; M_{1,1} = \frac{\partial W}{\partial \alpha_m}; \omega_{1,1} = -l_{z_1}$$

$$b_{x_1} = \frac{\partial^2 W}{\partial x_1^2}; b_{y_1} = \frac{\partial^2 W}{\partial y_1^2}; b_{1,ge2} = -1; A_{1,2} = \frac{\partial^2 W}{\partial x_1 \partial \alpha_0}; B_{1,2} = \frac{\partial^2 W}{\partial x_1 \partial \alpha_1}; M_{1,2} = \frac{\partial^2 W}{\partial x_1 \partial \alpha_m}; \omega_{1,2} = -l_{1,ge2}$$

$$c_{x_1} = \frac{\partial^2 W}{\partial x_1 \partial x_{y_1}}; c_{y_1} = \frac{\partial^2 W}{\partial y_1^2}; c_{1,ge3} = -1; A_{1,3} = \frac{\partial^2 W}{\partial y_1 \partial \alpha_0}; B_{1,3} = \frac{\partial^2 W}{\partial y_1 \partial \alpha_1}; M_{1,3} = \frac{\partial^2 W}{\partial y_1 \partial \alpha_m}; \omega_{1,3} = -l_{1,ge3}$$

$$d_{x_1} = \frac{\Delta X_{1-k}}{L_{1-k}}; d_{y_1} = \frac{\Delta Y_{1-k}}{L_{1-k}}; d_{z_1} = \frac{\Delta Z_{1-k}}{L_{1-k}}; d_{xk} = \frac{\Delta X_{1-k}}{L_{1-k}}$$

$$d_{y_k} = \frac{\Delta Y_{1-k}}{L_{1-k}}; d_{z_k} = \frac{\Delta Z_{1-k}}{L_{1-k}}; d_{1,4} = -1; \omega_{1,4} = -l_{1-k}$$

$$e_{x_1} = -\frac{\Delta Y_{1-m}}{L_{1-m}}; e_{y_1} = \frac{\Delta Y_{1-m}}{L_{1-m}}; e_{z_1} = \frac{\Delta Z_{1-m}}{L_{1-m}}; e_{x_m} = \frac{\Delta X_{1-m}}{L_{1-m}}$$

$$e_{y_m} = \frac{\Delta Y_{1-m}}{L_{1-m}}; e_{z_m} = \frac{\Delta Z_{1-m}}{L_{1-m}}; e_{1,5} = -1; \omega_{1,5} = -l_{1-m}$$

Liczba równań obserwacyjnych dla poszczególnych punktów uzależniona jest od ilości parametrów obserwowanych w danym punkcie.

Według założeń systemu w każdym punkcie wyposażonym w głowicę pomiarową można określić następujące parametry:

- rzędne Z_i punktów P_i w nawiązaniu do sieci geodezyjnej,
- odległości l_i punktu P_i do punktów sąsiednich,
- kąty nachylenia ϵ_i i δ_i nachylenia stycznej w punkcie P_i ,

Pomiar każdego parametru umożliwia ułożenie jednego równania obserwacyjnego, zatem zastosowanie głowicy pomiarowej systemu pozwala na ułożenie siedmiu równań obserwacyjnych dla każdego punktu P_i .

2. 3. Równania obserwacyjne dla stanu wtórnego obiektu

Rozwinięcie metody polegające na ułożeniu równań poprawek przez korelaty i równania normalne prowadzi do ułożenia równań obserwacyjnych dla stanu wtórnego budowli inżynierskiej.

$$W_1 = a_1 V_1 + a_2 V_2 + \dots + a_N V_N + A_1 d\alpha_0 + B_1 d\alpha_1 + C_1 d\alpha_1 + \dots \\ \dots + M_1 d\alpha_M + N_1 dx_1 + O_1 dy_1 + \dots + V_1 dx_n + V_1 dy_n = \omega_1$$

$$W_2 = b_1 V_1 + b_2 V_2 + \dots + b_N V_N + A_2 d\alpha_0 + B_2 d\alpha_1 + C_2 d\alpha_2 + \dots \\ \dots + M_2 d\alpha_M + N_2 dx_1 + O_2 dy_1 + \dots + V_2 dx_n + V_2 dy_n = \omega_2$$

$$W_r = r_1 V_1 + r_2 V_2 + \dots + r_N V_N + A_r d\alpha_0 + B_r d\alpha_1 + C_r d\alpha_2 + \dots \\ \dots + M_r d\alpha_M + N_r dx_1 + O_r dy_1 + \dots + V_r dx_n + V_r dy_n = \omega_r \quad (18)$$

i dalej do układu równań normalnych korelat

$$\left[\frac{aa}{p} \right] k_1 + \left[\frac{ab}{p} \right] k_2 + \dots + \left[\frac{ar}{p} \right] k_r + A_1 d\alpha_0 + \dots + M_1 d\alpha_M + N_1 dx_1 + O_1 dy_1 + \dots \\ \dots + V_1 dx_n + V_1 dy_n = \omega_1 \quad (19)$$

$$\left[\frac{ab}{p} \right] k_1 + \left[\frac{bb}{p} \right] k_2 + \dots + \left[\frac{br}{p} \right] k_r + A_2 d\alpha_0 + \dots + M_2 d\alpha_M + N_2 dx_1 + O_2 dy_1 + \dots \\ \dots + V_2 dx_n + V_2 dy_n = \omega_2$$

$$\left[\frac{ar}{p} \right] k_1 + \left[\frac{br}{p} \right] k_2 + \dots + \left[\frac{rr}{p} \right] k_r + A_r d\alpha_0 + \dots + M_r d\alpha_M + N_r dx_1 + O_r dy_1 + \dots +$$

Dokładna charakterystyka przedstawionych równań znajduje się w pracy [1]. Łączne rozwiązanie równań prowadzi do wyznaczenia wszystkich niewiadomych, którymi są poprawki $d\alpha_0, d\alpha_1, \dots, d\alpha_M$ oraz korelaty k_1, \dots, k_M .

Obliczenia te prowadzą do wyznaczenia i sprawdzenia wielomianu aproksymującego stan wtórny budowli w punktach P_1 .

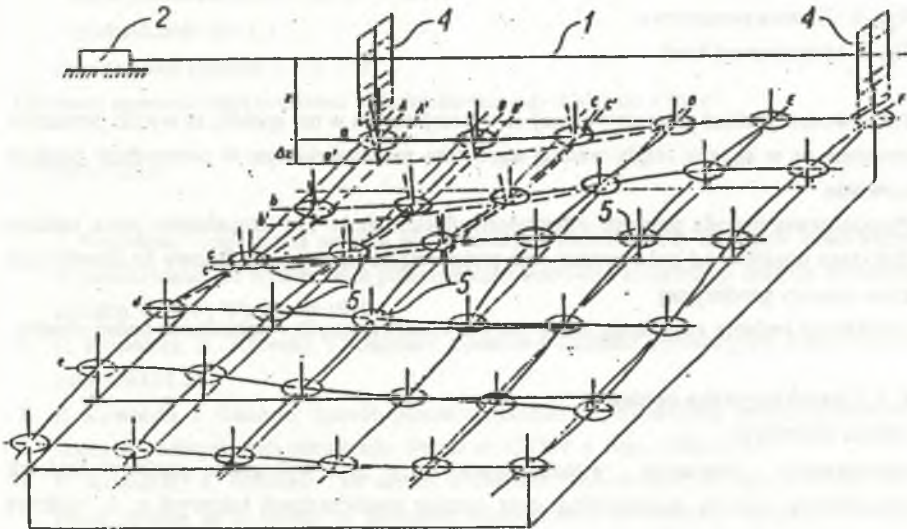
3. BUDOWA I KONFIGURACJA LASEROWEGO SYSTEMU POMIAROWEGO

Pomierzone dla stanu pierwotnego budowli inżynierskiej parametry:

- wyznaczone współrzędne x_i, y_i, z_i przestrzenne punktu P_i ,
- kąty ϵ_i, δ_i nachylenia stycznych w punktach P_i ,
- odległości punktu P_i od punktów sąsiednich,
- parametry wielomianu aproksymującego;

traktuje się w systemie jako wielkości przybliżone przy układaniu równań obserwacyjnych dla stanu wtórnego budowli. Przyjmując algorytm, według którego pomiary z głowicy pomiarowej w punkcie P_i w chwili t_0 są parametrami pierwotnymi dla następnych pomiarów dokonywanych w chwili $t_1 = t_0 + \Delta t$, można prowadzić ciągły opis stanu obiektu. Punkty pomiarowe P_i , w których umieszczone są głowice pomiarowe systemu, leżą w węzłach siatki utworzonej przez przecięcie badanej powierzchni płaszczyznami pionowymi, przechodzącymi przez krzywe aproksymujące.

Na rys. 2. przedstawiono siatkę profilów badanej powierzchni wraz z utworzonymi w jej węzłach punktami pomiarowymi. Odształcaną powierzchnię charakteryzuje siatka profili A, B, C, D, E, F oraz prostopadłych do niej profili a, b, c, d, e, f, które pokrywają całą powierzchnię podlegającą obciążeniu.

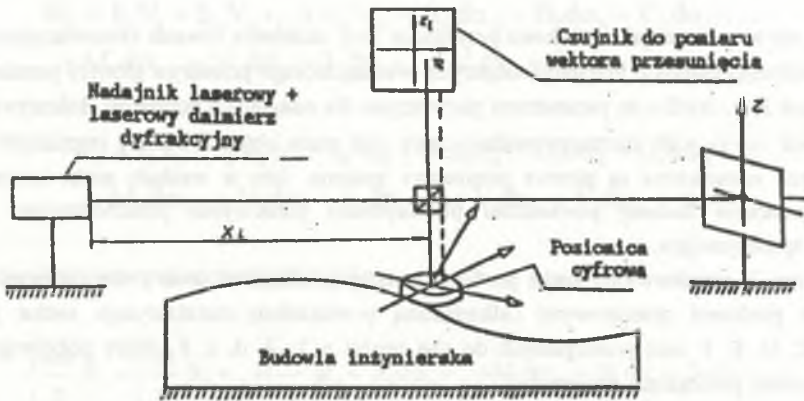


Rys. 2. Siatka profilów badanej powierzchni

Fig. 2. Grating of sections of investigated surface

Wzdłuż obrzeży znajdują się linie wiązek laserowych (1) emitowane przez półprzewodnikowy nadajnik laserowy sprzężony z laserowym dalmierzem dyfrakcyjnym (2)[2][3] i padające na czujniki do pomiaru wektora przesunięcia (4).

W wybranych węzłach siatki profili, w których mogą występować odkształcenia pod wpływem występujących obciążeń badanej powierzchni, są umieszczone poziomiccy cyfrowe (4) umożliwiające wyznaczanie kątów ϵ , δ , nachylenia stycznych w punktach węzłowych. Wzajemna konfiguracja laserowego dalmierza dyfrakcyjnego, czujnika do pomiaru przemieszczeń oraz poziomiccy cyfrowej przedstawiona jest na rys. 3.



Rys. 3. Głowica pomiarowa

Fig. 3. Measurement head

Tak utworzony układ pomiarowy łączy się z komputerem w ten sposób, że wyniki pomiarów przetwarzane są w sposób ciągły według algorytmu przedstawionego w poprzednim punkcie opracowania.

Proponowana metoda pomiaru odkształceń obiektu może być uzupełniona przez badanie uchylenia ciągu punktów od stałej prostej oraz przez wcięcia kątowe lub liniowe do określonych punktów osnowy geodezyjnej.

Dodatkowe badania zwiększają liczbę danych obserwacyjnych i dokładność badań obiektu.

4. 1. Charakterystyka ogólna

System umożliwia:

- wykonywanie pomiarów współrzędnych x , y , z wybranych punktów budowli inżynierskiej metodą bezwzględną oraz pomiar współrzędnych kątowych ϵ , δ , wektora płaszczyzny w punkcie P_1 ,
- określanie odkształceń elementów budowli na podstawie wykonanych pomiarów,

- prezentowanie wyników pomiarów w postaci cyfrowej, analogowej lub graficznej,
- wykonywanie pomiarów w sposób ciągły lub w zadanych interwałach czasowych,
- wyznaczenie charakterystyk budowli:
 - czasowych
 - obciążeniowych, statycznych i dynamicznych.

System jest całkowicie zautomatyzowany i nadzorowany komputerowo według określonych algorytmów.

4. 2. Charakterystyka techniczna systemu

Półprzewodnikowy nadajnik laserowy

- długość linii celowej od 0 do kilku km

Laserowy dalmierz dyfrakcyjny

- zakres pomiaru współrzędnej x_i od 0 do 1,5 km
- dokładność pomiaru $\delta x = \pm 10^{-5}$

Czujnik przemieszczeń wektora przesunięcia

- zakres pomiaru współrzędnych $y_i, z_i = \pm 10$ cm
- rozdzielczość $\Delta = \pm 0,01$ mm

Cyfrowa poziomica

- zakres pomiaru błędów α_i i δ_i $|\alpha_i| = \pm 10^\circ$
- rozdzielczość $\Delta = \pm 1'$
- (na specjalne życzenie $\Delta = \pm 1''$)

Elementy systemu mogą pracować w komputerach od -30°C do $+70^\circ\text{C}$.

LITERATURA

1. J. Rogowski: Uogólniona metoda aproksymacji wielomianowej szeregów obserwacyjnych w zastosowaniu do wyznaczania przemieszczeń budowli i konstrukcji oraz do określania ich kształtu. SGGW, Warszawa 1970.
2. H. Kowalski, A. Klewski, J. Galiński: Laserowy dalmierz dyfrakcyjny, Patent nr 297466 z dn.1993.01.26.
3. H. Kowalski, J. Galiński: Sposób pomiaru odkształceń powierzchni, zwłaszcza powierzchni nośnych podlegających obciążeniu, Patent nr 156799 z dnia 1988.01.15.
4. H. Kowalski, A. Klewski: The use of diffraction phenomenon of light wave on acoustic phase grating as a means of precision measurement of distance, Journal of Technical Physics, Vol.XXXIV nr 1, Warszawa 1993, p. 29-35.

Abstract

In the paper authors present an accurate method and system to investigate of displacement method of surveying working accordingly to differential method with computer assistance. Particullary teoretical basegrund of the system has been discscued. Algorytm of transformation of measurement signal has been eksplained according to displacement method of surveying presented in the system. Authors has presented the general and technical characteristics of the transformers mentioned in article (the translocator measuring sensor, digital level, laser transmitter with diffractiional range finder), which together create the measurement head of the system.



The diagram illustrates the measurement head of the system, showing the connection between the digital level, the translocator measuring sensor, and the laser transmitter with diffractiional range finder. The text below the diagram describes the technical characteristics and the algorithm of the system, detailing how the measurement signals are transformed and processed by the computer assistance.