

JAN GOCAŁ
Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

**WYBRANE TECHNOLOGIE POMIARÓW INŻYNIERSKICH
OPARTE NA WYKORZYSTANIU INSTRUMENTÓW
ELEKTRONICZNYCH**

1. WPROWADZENIE

Niniejsze opracowanie jest formą potwierdzenia inspirującego wpływu opublikowanych prac Wojciecha Janusza na moją działalność badawczą. Stałe korzystanie z opracowań Profesora sprawia, że widzę Jubilata jako pasjonata nowoczesnych rozwiązań opartych w znacznym stopniu na wykorzystaniu urządzeń i instrumentów pomiarowych zarówno własnej konstrukcji, jak i tych produkowanych przez specjalistyczne firmy o światowej renomie. Treść przedstawianej pracy dotyczy właśnie tego typu rozwiązań różnych zagadnień inżynierskich.

Jeszcze w niezbyt odległej przeszłości stosowane w pomiarach inżynierskich instrumenty optomechaniczne nie zapewniały nawet częściowej automatyzacji procesów pomiarowych i nie gwarantowały uzyskania wymaganych dokładności ostatecznych rezultatów pomiarów. Te mankamenty prowadziły do rozbudowywania konstrukcji geometrycznych, znaczącego zwiększania obserwacji nadliczbowych, prowadzenia żmudnych i pracochłonnych obliczeń oraz angażowania dużych zespołów pracowników wykonujących pomiary i obliczenia.

Obecny rozwój technologii pomiarowych stosowanych w rozwiązywaniu zagadnień inżynierskich stymulowany jest bieżącymi osiągnięciami techniki pomiarowo-obliczeniowej. Elektroniczne instrumenty geodezyjne pozwalają dziś uzyskiwać wysokie dokładności pomiarów, zaś ich standardowe i aplikacyjne oprogramowanie wraz z bogatym oprzyrządowaniem informatycznym umożliwiają automatyzację etapów lub całych procesów pozyskiwania, przetwarzania, przechowywania i udostępniania informacji w dowolnej formie numerycznej lub graficznej.

Większość opracowanych nowych technologii pomiarów inżynierskich opiera się na wykorzystaniu niwelatorów kodowych, teodolitów i tachymetrów elektronicznych pracujących w trybie *off line* lub *on line*, a także odbiorników satelitarnych GPS, szczególnie tych wyposażonych w modemy

radiowe i zapewniających uzyskiwanie ostatecznych rezultatów pomiarów bezpośrednio w terenie, w czasie rzeczywistym.

W badaniach doświadczalnych, których celem była weryfikacja praktyczna prezentowanych poniżej nowych technologii pomiarów, korzystano z instrumentów firmy Leica.

2. TECHNOLOGIE OPARTE NA WYKORZYSTANIU SKOMPUTERYZOWANYCH SYSTEMÓW POMIAROWYCH

Najbardziej efektywne systemy pomiarowe tworzą instrumenty elektroniczne podłączone do wieloportowego komputera polowego wyposażonego w oprogramowanie umożliwiające: dwukierunkową transmisję informacji oraz gromadzenie, przetwarzanie i analizowanie uzyskiwanych wyników stosownie do konkretnych potrzeb. Połączenie instrumentów z komputerem sprawia, że operator wysyła polecenia do procesora instrumentu bezpośrednio z klawiatury komputera z pominięciem klawiatury instrumentu, zaś wszelkie wyniki obserwacji i obliczeń są rejestrowane bezpośrednio w pamięci komputera. Takie rozwiązanie podnosi efektywność i elastyczność systemu i umożliwia rozwiązywanie wielu zagadnień w czasie rzeczywistym, co jest szczególnie istotne podczas ustawiania i montażu urządzeń mechanicznych. Należy też zaznaczyć, że dwukierunkowa transmisja informacji umożliwia:

- zdalne sterowanie jednym lub kilkoma instrumentami,
- wykonywanie obserwacji według ustalanego na bieżąco planu,
- rejestrowanie wyników obserwacji w ilości nieograniczonej pamięcią procesora instrumentu,
- bieżące wykonywanie obliczeń i analiz według programów zainstalowanych w komputerze,
- bieżącą ocenę stanu geometrycznego obiektu i obliczanie odchyłek kształtu i położenia jego elementów konstrukcyjnych.

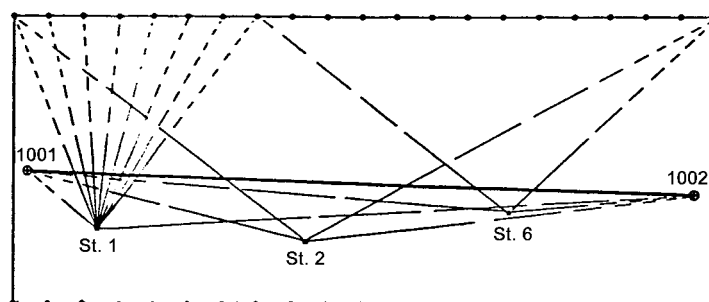
2.1. Wyznaczanie kształtu jezdni podsuwnicowych

Tradycyjne pomiary inwentaryzacyjne jezdni podsuwnicowych wykonuje się na ogół w dwóch oddzielnych fazach obejmujących pomiary sytuacyjne i wysokościowe. Nowa propozycja polega na użyciu do obserwacji szyn jezdni podsuwnicowych – metody biegunowej 3D. Ten sposób pomiaru stał się możliwy do praktycznego wdrożenia w momencie pojawienia się na rynku precyzyjnych tachymetrów elektronicznych, zapewniających prowadzenie pomiarów odległości z dokładnością ± 1 mm. W badaniach doświadczalnych stosowano tachymetr elektroniczny TC 2002 firmy Leica podłączony do komputera polowego. Wymieniony instrument posiada automatyczną kompensację błędów osi w dwu płaszczyznach, co pozwala osiągać

wysokie dokładności pomiaru kątów w trudnych warunkach hal przemysłowych. Analiza ogromnego zbioru obserwacji kątowych wykonanych w halach przemysłowych przy słabym oświetleniu, celowych o długościach do 150 m i kątach pionowych do 50 gradów wykazała, że błędy średnie pomiaru kątów nie przekraczają wartości $\pm 2,7''$, zaś błędy długości są rzędu $\pm 0,2$ mm. Tym samym spodziewany błąd średni pojedynczego wyznaczenia przestrzennego położenia punktów reprezentujących szyny jezdne nie powinien przekroczyć wartości $\pm 1,5$ mm. Wykonanie pomiarów w dwóch seriach zmniejsza ten błąd do wartości ± 1 mm.

Opracowana technologia pozwala na prowadzenie obserwacji szyn jezdnych ze stanowisk naziemnych nawiązywanych do lokalnej bazy usytuowanej w przybliżeniu równolegle do osi podłużnej hali (rys. 1). Punkty bazy sygnalizuje się pryzmatami dalmierzczymi rozmieszczonymi w taki sposób, aby były widoczne ze wszystkich stanowisk obserwacyjnych. W trudnych warunkach bazę stanowić może większa liczba punktów sygnalizowanych pryzmatami dalmierzczymi.

Na każdym stanowisku obserwacyjnym wykonuje się obserwacje punktów bazy oraz punktów wybranego fragmentu szyny, rejestrując kąty poziome, kąty pionowe i długości celowych. Punkty reprezentujące szyny sygnalizowane są celownikami dalmierzczymi osadzonym w uchwycie nożycowym, zapewniającym centryczne usytuowanie celownika nad szyną. Zgromadzone wyniki obserwacji są przetwarzane z wykorzystaniem pakietu programów komputerowych. Końcowym efektem tego przetwarzania są odchyłki osi szyn od: prostoliniowości, rozstawu, wysokości oraz wartości poprawek rektyfikacyjnych. Wyniki przedstawiane są w formie tabelarycznej i graficznej.



Rys.1

Przedstawiona technologia pomiaru jezdni podsuwnicowych zapewnia uzyskanie wymaganych dokładności przy znacznie obniżonych kosztach w porównaniu z pomiarami klasycznymi, a ponadto znacznie zwiększa bezpieczeństwo pracy. Przykładowo, dwuosobowy zespół wykonuje pomiar jezdni podsuwnicowej o długości 120 m, reprezentowanej przez 40 punktów,

w czasie 2 godzin. Przetworzenie obserwacji prowadzące do sporządzenia zestawień tabelarycznych, wykresów i wykazu poprawek rektyfikacyjnych może być dokonywane bezpośrednio w terenie.

2.2. Modelowanie kształtu czaszy radioteleskopu

System pomiarowy tachymetru TC 2002, połączonego *on-line* z komputerem polowym, oraz odpowiednio skonstruowane celowniki dalmiercze wykorzystano do finalnego ustawienia 336 paneli aluminiowych tworzących czaszę radioteleskopu RT-4 o średnicy 32 m, budowanego w Toruniu. Powierzchnia robocza czaszy powinna spełniać równanie paraboloidy obrotowej o postaci

$$Y = \frac{X^2}{4f} \quad (1)$$

gdzie: f – ogniskowa paraboloidy.

Przyjmuje się, że skuteczność przechwytywania energii fal radiowych przez antenę odbiorczą zależy od precyzji ukształtowania jej powierzchni roboczej. Dopuszczalne odchylenia powierzchni rzeczywistej od powierzchni projektowanej nie powinny przekraczać wielkości określonej wzorem:

$$m = \lambda/16 \quad (2)$$

gdzie: λ – długość fali.

Jeśli zatem dąży się do odbioru fal o długości $\lambda = 3$ mm, to wartości odchyłek określonych wzorem (2) nie powinny przekroczyć 0,2 mm.

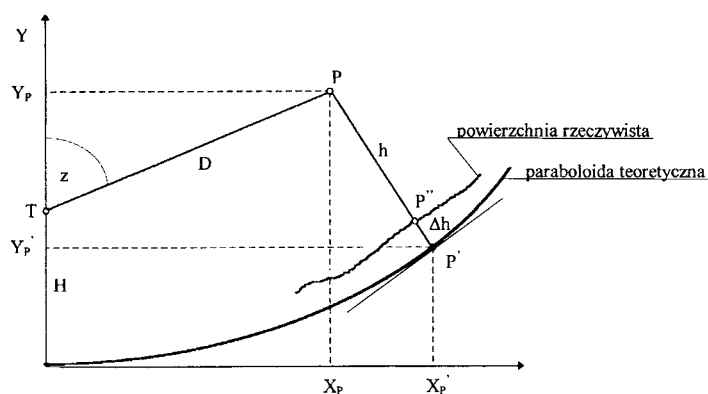
W celu spełnienia tak wysokich wymagań dokładnościowych każdy panel został odpowiednio wyprofilowany w wytwórni i sprawdzony metodami geodezyjnymi przed montażem. Następnie panele przymocowano do szkieletowej konstrukcji nośnej, ustawiając je wstępnie względem płozy pomiarowej specjalnego szablonu obrotowego.

Ostatecznej rektyfikacji kształtu czaszy radioteleskopu dokonano na podstawie pomiarów wykonanych przez Przedsiębiorstwo Usług Metrologicznych „Precyzja” z siedzibą w Katowicach według procedury opracowanej w Zakładzie Geodezji Inżynierskiej i Budownictwa AGH.

Obserwacje czterech punktów każdego panelu wykonano metodą biegunową 3D przy pionowym ustawieniu osi symetrii czaszy. W tym ustawieniu czasza została zablokowana przez jej przyspawanie do konstrukcji wsporczej w pobliżu łożysk i zahamowanie silnika. Następnie w otworze centralnym czaszy ustawiono tachymetr TC 2002, doprowadzając jego oś obrotu do pokrycia z pionową osią symetrii paraboloidy. Każdy obserwowany punkt zlokalizowany nad śrubą rektyfikacyjną był sygnalizowany pryzmatem

dalmierzem osadzonym na specjalnym stojaku. Na podstawie wykonanych obserwacji obliczono współrzędne punktu P'' (rys. 2), które po porównaniu ze współrzędnymi punktu teoretycznego P' wykorzystano do natychmiastowego obliczenia odchyłki Δh , usuwanej przez montażystów przy użyciu śrub rektyfikacyjnych. Proces obserwacji punktów, rejestrowania wyników obserwacji, obliczania poprawek rektyfikacyjnych i archiwizacji danych odbywał się w czasie rzeczywistym za pomocą programów zainstalowanych w komputerze polowym współpracującym *on-line* z tachymetrem TC 2002.

Po zakończeniu rektyfikacji całej czaszy wykonano pomiar kontrolny wszystkich 1344 punktów, wyznaczając ich odchyłki od powierzchni teoretycznej. Uzyskany zbiór odchylek poddano analizie statystycznej stwierdzając, że analizowane dane tworzą rozkład normalny, zaś odchylenie standardowe przyjmuje wartość $\pm 0,19$ mm.



Rys. 2

2.3. Obsługa montażu wielkogabarytowych obiektów i urządzeń mechanicznych

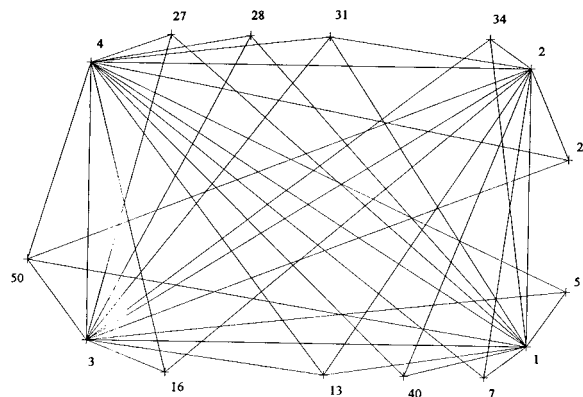
Skomputeryzowany system pomiarowy tachymetru TC 2002, pracujący w czasie rzeczywistym, zapewnia prawie pełną automatyzację pomiarów realizacyjnych prowadzonych przy montażu przestrzennych obiektów i urządzeń o dużych wymiarach. Właściwe, zgodne z projektem ustawienie w przestrzeni elementów montowanych osiąga się, stosując równocześnie swobodne stanowisko i metodę biegunową.

Metoda swobodnego stanowiska eliminuje błąd centrowania instrumentu nad punktem i umożliwia usytuowanie instrumentu w miejscu zapewniającym uzyskanie najkorzystniejszych warunków obserwacji obiektu oraz gwarantującym bezkolizyjność współpracy geodetów i montażystów. Współrzędne kolejnych stanowisk instrumentu określa się względem punktów osnowy geodezyjnej metodą: liniowego, liniowo-kątowego lub kątowego

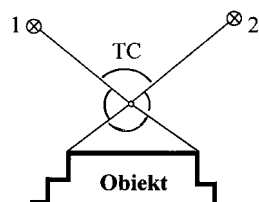
wcięcia wstecz, w zależności od rozmiarów obiektu i wymaganych dokładności jego montażu. Punkty osnowy geodezyjnej mogą być stabilizowane w sposób trwały, znakami zakładanymi na elementach konstrukcyjnych hali montażowej i wówczas ich współrzędne wyznacza się przed rozpoczęciem pomiarów realizacyjnych. Istnieje też możliwość korzystania z osnowy tymczasowej, zakładanej, obserwowanej i obliczanej w trakcie prowadzenia pomiarów realizacyjnych. Punkty stałej osnowy odniesienia mogą być sygnalizowane znakami umożliwiającymi prowadzenie obserwacji kątowych, liniowych lub kąto-liniowych z wykorzystaniem odpowiednio: celowników kreskowych, celowników dalmierzowych (pryzmaty, folie odbłaskowe) lub celowników kreskowo-dalmierzowych. Punkty osnowy tymczasowej sygnalizuje się celownikami kreskowo-dalmierzowymi, którymi z reguły są reflektory pryzmatyczne różnych rozmiarów wyposażone dodatkowo w tarcze celownicze.

W przestrzeni montażowej o niewielkich wymiarach (do 20 m) współrzędne punktów stałej osnowy odniesienia powinny być wyznaczane na podstawie obserwacji kątowych uzupełnionych pomiarem długości wybranych baz w celu zapewnienia właściwej skali sieci. Natomiast w większych halach powinno się korzystać z obserwacji liniowo-kątowych, a nawet tylko z obserwacji liniowych, z uwagi na przewagę dokładnościową pomiarów długości nad pomiarami kątowymi przy długich celowych.

Przykładową sieć kątową założoną w pomieszczeniu o wymiarach 24x15x7 m przedstawiono na rysunku 3. Obserwacje celowników kreskowych prowadzono metodą kątową ze stanowisk 1–4, przy czym pomiędzy tymi stanowiskami pomierzono odległości we wszystkich kombinacjach. Odchylenia standardowe współrzędnych punktów sieci uzyskane po jej wyrównaniu nie przekroczyły wartości 0,1 mm. Stąd też można oczekiwać, że po dowiązaniu swobodnego stanowiska do punktów takiej sieci położenie dowolnego punktu tycznego metodą biegunową określone zostanie z dokładnością rzędu 0,2 mm.

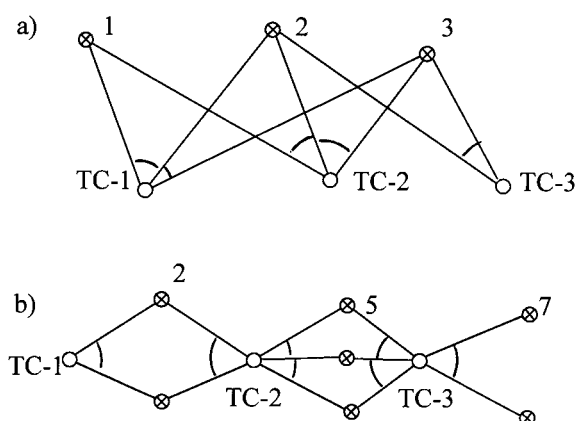


Rys. 3



Rys. 4

Tyczenie punktów prowadzone w nawiązaniu do stałej osnowy geodezyjnej wiąże się z potrzebą powiązania układu tej osnowy z układem współrzędnych przyjętym dla montowanego obiektu. Dlatego też współrzędne punktów osnowy transformuje się do układu własnego obiektu na podstawie parametrów transformacji wyznaczonych ze współrzędnych odpowiednio dobranych punktów dostosowania.



Rys.5

Podobne transformacje muszą być dokonywane przy korzystaniu z osnowy tymczasowej, przy czym w tym przypadku są one prowadzone na bieżąco, po każdej zmianie lokalizacji stanowiska obserwacyjnego. W najprostszym przypadku osnowę tymczasową mogą stanowić dwa punkty (rys. 4), których współrzędne w układzie obiektu oblicza się na podstawie obserwacji kątowno-liniowych wykonanych z dowolnego stanowiska obserwacyjnego do punktów obiektu i do punktów osnowy. Dla obiektów wydłużonych osnowa tymczasowa jest osnową sekwencyjną o przykładowych kształtach przedstawionych na rysunku 5.

2.4. Inwentaryzacja obiektów powłokowych

Celem pomiarów inwentaryzacyjnych obiektów powłokowych jest określenie ich aktualnego położenia w przyjętym układzie odniesienia oraz wyznaczenie wymiarów i położenia, a także odchyłeń powierzchni powłoki rzeczywistej względem powierzchni modelowej projektowanej lub wyaproksymowanej. Podstawę do prowadzenia określonych analiz geometrycznych stanowi odpowiednio liczny zbiór punktów reprezentujących badaną powłokę. Współrzędne tych punktów powinny być wyznaczone z najwyższą możliwą do osiągnięcia dokładnością na podstawie obserwacji terenowych wykonywanych metodą otaczających stycznych lub metodą przestrzennych wcięć kątowych. Pierwsza z wymienionych metod może być użyta głównie do obserwacji budowli wieżowych o powierzchniach obrotowych stopnia drugiego i na ogół nie gwarantuje ona uzyskania wysokiej dokładności pomiarów. Powodem tego są kłopoty z założeniem wielopunktowej osnowy wokół obiektu oraz trudności we właściwym rozlokowaniu punktów styczności na całej powierzchni powłoki. Stąd też metodą dominującą w badaniach położenia i kształtu budowli powłokowych jest metoda przestrzennych wcięć kątowych. Użyteczność praktyczna tej metody wyraźnie wzrosła dzięki możliwościom technicznym teodolitów elektronicznych automatyzujących proces prowadzenia obserwacji polowych, przetwarzanych następnie i analizowanych z wykorzystaniem programów komputerowych. Pomiary inwentaryzacyjne prowadzi się zazwyczaj przy użyciu dwóch teodolitów elektronicznych pracujących w trybie *off-line*, co nie przesądza o ewentualnym gromadzeniu wyników obserwacji w komputerze przyłączonym do tych teodolitów.

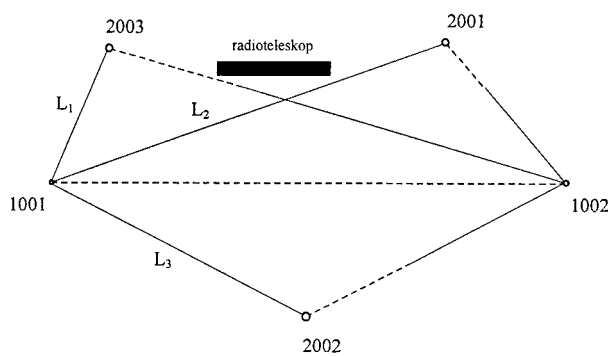
W omawianych pomiarach istotną niedogodnością było dotychczas sygnalizowanie punktów obserwowanych w sposób umożliwiający ich identyfikację przez obydwu obserwatorów. Wprowadzenie świetlnej sygnalizacji obserwowanych punktów wyraźnie zwiększyło zakres zastosowań metody wcięć przestrzennych. Szczególnie zastosowanie w jednym z dwóch teodolitów okularu wyposażonego w diodę laserową usprawniło procedurę doboru punktów obserwowanych i zwiększyło dokładność obserwacji plamki laserowej o niewielkich wymiarach i korygowanej jasności.

Metoda kątowych wcięć przestrzennych jest szeroko stosowana w pomiarach inwentaryzacyjnych powłokowych budowli wieżowych, takich jak: chłodnie hiperboloidalne, silosy walcowe, zbiorniki paliw, zbiorniki gazu. Jest również podstawową metodą stosowaną w badaniach kształtu powłok paraboloidalnych radioteleskopów, anten radarowych i anten satelitarnych.

Właśnie na podstawie pomiarów inwentaryzacyjnych, którymi objęto radioteleskop o średnicy 15 m, można stwierdzić wielorakie zalety stosowania skomputeryzowanego systemu dwóch teodolitów przyłączonych do komputera polowego. Wymieniony radioteleskop ustawiono w pozycji dogodnej do prowadzenia obserwacji z dwóch stanowisk naziemnych. Oznacza to, że oś obrotu paraboloidy znalazła się w przybliżeniu w poziomie. Na wewnętrznej

powierzchni czaszy utrwalono 7 znaczków celowniczych (3001–3007) utrwalających własny układ odniesienia czaszy. Przyjęcie takiego układu zabezpieczało późniejsze korygowanie wyników obserwacji obciążonych zniekształceniami powłoki wywołanymi zmiennym nasłonecznieniem. Porównywanie współrzędnych tych punktów, wyznaczanych w określonych odstępach czasu, umożliwiło ponadto ocenę zniekształceń termicznych badanej czaszy. Następnie założono sieć obserwacyjną (rys. 6) składającą się z trzech punktów odniesienia (2001–2003) i dwóch stanowisk obserwacyjnych (1001 i 1002). Punkty reprezentujące powłokę (naroża paneli) sygnalizowano przy użyciu okularu z diodą laserową.

Identyfikację stałości stanowisk teodolitów prowadzono na podstawie cyklicznie powtarzanych obserwacji punktów odniesienia, dokonując po każdej takiej obserwacji ponownego obliczenia współrzędnych stanowisk teodolitów. Równocześnie z obserwacjami punktów osnowy odniesienia prowadzono obserwacje punktów (3001–3007) utrwalających układ odniesienia czaszy. Na podstawie współrzędnych tych punktów obliczano współczynniki transformacji kolejnych układów odniesienia czaszy do jej układu pierwotnego i przeliczano współrzędne wszystkich etapowo obserwowanych punktów czaszy. Tym samym minimalizowano wpływ chwilowych deformacji i przemieszczeń czaszy na obliczane odchylenia powierzchni rzeczywistej od przyjętej powierzchni modelowej.



Rys. 6

Na podstawie obserwacji punktów reprezentujących powierzchnię czaszy radioteleskopu oraz punktów utrwalających terenowy układ odniesienia i własny układ odniesienia czaszy obliczono współrzędne punktów powłoki, a następnie wyaprosymowano parametry A_{ij} ogólnego równania powierzchni stopnia drugiego o równaniu:

$$f(x,y,z)=A_{11}x^2+A_{22}y^2+A_{33}z^2+2A_{12}xy+2A_{13}xz+2A_{23}yz+2A_{14}x+2A_{24}y+2A_{34}z+1=0 \quad (3)$$

Przekształcenie równania (3) na postać kanoniczną wymaga skręcenia i przesunięcia terenowego układu współrzędnych, co osiąga się dokonując prze-

kształcenia ortogonalnego formy kwadratowej (3). Po obliczeniu wartości własnych macierzy kwadratowej uzyskuje się równanie wyaprosymowanej paraboloidy obrotowej w postaci:

$$X^2 + Y^2 - 4fZ = 0 \quad (4)$$

W przypadku przedmiotowej czaszy radioteleskopu o średnicy 15 m reprezentowanej przez 454 punkty obserwowane uzyskano równanie paraboloidy wyrażone zależnością:

$$X^2 + Y^2 - 14,02467 Z = 0 \quad (5)$$

co oznacza, że długość ogniskowej tej paraboloidy ma wartość $f = 3,5062$ m.

Odchyłki rzeczywistej powierzchni czaszy od powierzchni wyaprosymowanej obliczono z zależności:

$$\delta_i = t_i \sqrt{N^2 x_i^2 + N^2 y_i^2 + N^2 z_i^2} \quad (6)$$

gdzie: Nx_i , Ny_i , Nz_i – wartości składowych wektorów normalnych do powierzchni modelowej w punkcie P_i , t_i – parametr obliczony z rozwiązania równania (3) po wstawieniu do niego wielkości:

$$\begin{aligned} x &= x_i + t_i Nx_i \\ y &= y_i + t_i Ny_i \\ z &= z_i + t_i Nz_i \end{aligned} \quad (7)$$

Wielkości odchyłek uzyskanych z obliczeń mieszczą się w przedziale od $-6,1$ do $+6,3$ mm, co świadczy o bardzo złym stanie powierzchni odbijającej.

Obiektem badań doświadczalnych była również satelitarna antena telewizyjna o średnicy 3,65 m i ogniskowej $f = 1499,0$ mm, usytuowana na dachu budynku. Powierzchnię roboczą tej anteny stanowi siatka rozpięta na ażurowej konstrukcji. Pomiar inwentaryzacyjny wykonano metodą wycięcia przestrzennego i dwukrotnie metodą stereofotogrametryczną z użyciem kamery UMK 10/1318. Na podstawie uzyskanych wyników wyżej wymienionych trzech pomiarów doświadczalnych stwierdzono, iż są one porównywalne w sensie uzyskiwanych dokładności. Z obliczeń otrzymano następujące wartości ogniskowych: pomiar geodezyjny – $f_g = 1467,0$ mm; pomiar fotogrametryczny I – $f_I = 1466,4$ mm; pomiar fotogrametryczny II – $f_{II} = 1469,0$ mm. Obliczone odchyłki powierzchni rzeczywistej od powierzchni wyaprosymowanej z pomiaru geodezyjnego i fotogrametrycznego różnią się między sobą prawie o 1mm, a jedynie w dwóch punktach różnią się o 2 mm i 3 mm. W podsumowaniu można więc stwierdzić, że metody fotogrametryczne mogą

również z powodzeniem być stosowane do inwentaryzacji unikalnych obiektów powłokowych.

Kolejną metodą godną polecenia do inwentaryzacji obiektów powłokowych jest metoda biegunowa 3D z wykorzystaniem tachymetrów bezzwierciadlanych: modułarnych typu DIOR 3012 i DIOR 3012S lub zintegrowanych TCR 303 i TCRM 1102. Dotychczasowe doświadczenia pozwalają uznać tę metodę za równorzędną dokładnościowo z metodą wcięć przestrzennych i znacznie od niej korzystniejszą ekonomicznie. Mankamentem tej metody jest ograniczony zasięg pomiaru odległości szczególnie w dni słoneczne.

3. TECHNOLOGIE OPARTE NA WYKORZYSTANIU TECHNIKI SATELITARNEJ GPS

W dotychczasowych rozwiązaniach technika satelitarna GPS stosowana jest głównie do wyznaczania współrzędnych punktów osnów geodezyjnych sposobami statycznymi. Wszelkie obliczenia prowadzone do wyznaczenia współrzędnych są tu prowadzone w biurze z wykorzystaniem firmowych programów komputerowych. Od momentu pojawienia się odbiorników satelitarnych wyposażonych w modemy radiowe, zapewniających łączność pomiędzy odbiornikami naziemnymi, wszelkie obliczenia prowadzone są bezpośrednio w terenie, co oznacza, że współrzędne punktów uzyskiwane są w czasie rzeczywistym. Do wykonania pomiarów potrzebne są przynajmniej dwa odbiorniki, przy czym jeden umieszczany jest na punkcie o znanych współrzędnych, a drugi jest przemieszczany na punkty tyczone lub inwentaryzowane. W pomiarach RTK (*Real Time Kinematic*) istnieje możliwość bieżącej kontroli jakości uzyskiwanych wyników charakteryzowanej współczynnikiem CQ (*Coordinate Quality*) lub odchyleniem standardowym wyznaczanych współrzędnych.

W pomiarach doświadczalnych wykorzystano zestaw aparatury satelitarnej Wild GPS System 300. Zestaw ten tworzą dwa odbiorniki Leica SR 399 wyposażone w modemy zapewniające łączność w zakresie do około 10 km. Do zestawu należą ponadto dwa kontrolery CR 344 i dwie anteny zewnętrzne AT 302.

3.1. Zakładanie sieci punktów odniesienia dla inwestycji powierzchniowo zwartych i wydłużonych

Pomiary związane z tyczeniem projektów zagospodarowania terenu prowadzono dotychczas w odniesieniu do wielorzędowych i wielopunktowych osnów realizacyjnych. Mankamentem tego typu sieci jest ich szybka dezaktualizacja spowodowana niszczeniem znaków oraz wyraźny spadek dokładności w osnowach zagęszczających. Możliwości obecnie produkowanych instrumentów elektronicznych i odbiorników satelitarnych pozwalają na sformułowanie nowych rozwiązań w zakresie pomiarów realizacyjnych zarówno

w odniesieniu do metod tyczenia punktów, jak i struktury sieci punktów odniesienia. Decydujący wpływ na kształtowanie struktury sieci punktów utrwalających układ odniesienia mają metody realizacji. Jeśli tyczenie będzie prowadzone przy użyciu odbiorników satelitarnych, to odległości pomiędzy nielicznymi punktami odniesienia powinny być tak dobrane, aby zapewnić łączność radiową odbiorników ruchomych z odbiornikiem stacjonarnym i uzyskać wymaganą dokładność tyczenia. Tego typu sieci odniesienia mogą jednak występować sporadycznie, głównie w rejonach niezabudowanych i wolnych od innych wysokich przeszkód terenowych. Za typowe rozwiązanie należy uznać układ pomiarowy utworzony przez punkty GPS usytuowane poza rejonem inwestycji i punkty ciągów poligonowych nawiązywanych do punktów GPS. Dalsze zagęszczanie punktów sieci odniesienia powinno być prowadzone doraźnie w celu wykonania konkretnego zadania, m.in. poprzez stosowanie swobodnych stanowisk.

Współrzędne punktów podstawowej osnowy odniesienia powinny być wyznaczone metodą statyczną GPS. Na podstawie wyników wielu pomiarów doświadczalnych wykonanych tą metodą można stwierdzić, że przy odległościach punktów odniesienia rzędu 3 km dokładność wyznaczenia ich współrzędnych charakteryzuje odchylenie standardowe ± 2 mm. Natomiast dokładność wyznaczenia współrzędnych punktów poligonowych zależy od długości ciągów, długości boków i precyzji wykonania obserwacji terenowych. Na podstawie pomiarów dwóch ciągów o długościach 800 m i 1700 m nawiązywanych do punktów GPS, wykonanych przy użyciu tachymetru TC 2002 w czterech niezależnych cyklach obserwacji, obliczono zgeneralizowane odchylenia standardowe wyznaczenia współrzędnych punktu, a uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Długości boków (m)	Ciąg 800 m			Ciąg 1700 m		
	odchylenia standardowe (mm)			odchylenia standardowe (mm)		
	σ_x	σ_y	σ_p	σ_x	σ_y	σ_p
200	2,4	0,8	2,5	3,5	1,9	4,0
100	2,1	1,8	2,8	2,2	1,8	2,8
50	6,5	1,8	6,7	–	–	–

W celu zbadania aktualnych możliwości dokładnościowych wyznaczania współrzędnych punktów wydłużonych osnow zinetgrowanych przygotowano obiekt doświadczalny wzdłuż 30 km odcinka linii kolejowej. Obiekt ten tworzą 152 punkty oddalone od siebie o 200–250 m. Część tych punktów tworzy osnowę podstawową składającą się z „gniazd”, w których znajdują się dwa lub trzy punkty, oddalonych od siebie mniej więcej o 2–3 km. Współrzędne punktów osnowy podstawowej wyznaczono metodą statyczną GPS, zaś współrzędne punktów pozostałych metodą poligonową z użyciem TC 2002. Pomiaru prowadzono w lipcu w upalne dni, przy dużej wibracji

i występowaniu refrakcji bocznej. Charakterystykę techniczną ciągów poligonowych i uzyskanych dokładności wyznaczenia współrzędnych punktów tych ciągów przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2

Nr ciągu	Liczba punktów	Długości boków	Długości ciągów	Średnie wartości odchyłeń standard.
	N	(m)	(m)	(mm)
1	8	220	2000	6,8
2	11	210	2600	10,8
3	12	220	2800	12,7
4	14	240	3600	16,7
5	13	200	2900	13,0
6	12	220	2900	11,8
7	13	230	3200	11,0
8	12	200	2700	11,3
9	13	170	2500	10,2
10	12	210	2800	12,3
Średnie		210	2800	11,9

Obydwa wymienione obiekty doświadczalne wykorzystano do zbadania rzeczywistej dokładności pozycjonowania punktów metodą RTK. W tym celu na punktach obiektu pierwszego wykonano kilka cykli obserwacji metodą RTK przed i po opadnięciu liści z drzew, wśród których przebiegały ciągi poligonowe. Natomiast na obiekcie drugim wyznaczanie metodą RTK współrzędnych punktów na odcinku 30 km przebiegało następująco. Na początkowym punkcie ciągu ustawiono odbiornik A, traktując go jako stacjonarny, natomiast drugi odbiornik B przemieszczano na kolejne punkty ciągu aż do zaniku łączności radiowej między obydwoimi odbiornikami. Wtedy odbiornik B przejmował funkcję odbiornika stacjonarnego, a odbiornik A był przenoszony aż do punktu granicznego. W ten sposób wyznaczono współrzędne 105 punktów w dowiązaniu do pierwszego punktu ciągu.

Następnie współrzędne punktów ciągów poligonowych pierwszego i drugiego obiektu porównywano ze współrzędnymi uzyskanymi z pomiarów klasycznych. Wyniki tego porównania dla obiektu pierwszego (35 pkt.) zestawiono w tabeli 3, a dla obiektu drugiego (105 pkt.) w tabeli 4.

Na podstawie wyników zestawionych w tabeli 3 można stwierdzić, że dokładność pozycjonowania punktów metodą RTK przy braku ulistnienia charakteryzuje odchylenia standardowe $\pm 6,1$ mm, a przy pełnym ulistnieniu drzew $\pm 10,0$ mm. Natomiast w oparciu o wyniki zestawione w ostatnim wierszu tabeli 4 można obliczyć odchylenie standardowe:

$$\sigma_{RTK} = \sqrt{\sigma_{TC-RTK}^2 - \sigma_{TC}^2} = \pm 9,9 \text{ mm.}$$

Zatem do wyznaczenia współrzędnych punktów tworzących sieć odniesienia stosowaną do rozwiązania wielu zagadnień inżynierskich można z powodzeniem stosować metodę RTK. Należy jednak wykazać szczególną dbałość przy wykonywaniu obserwacji tam, gdzie występują wysokie przeszkody terenowe, gdyż wówczas nie tylko zostaje obniżona dokładność pozycjonowania punktów, ale mogą też wystąpić obserwacje odstające. Na terenach trudnych powinno się wyznaczać współrzędne każdego punktu z dwóch niezależnych obserwacji, wykonanych przy ustawieniu odbiornika stacjonarnego na dwóch różnych punktach odniesienia.

Tabela 3

Pomiary przy braku ulistnienia drzew						
Odchylenia standardowe (mm)	AGH	AGH	101	103	105	Wartość średnia
σ_p	4,4	6,0	6,6	6,6	8,4	6,1
Pomiary przy pełnym ulistnieniu drzew						
σ_p	9,4	10,6	8,0	7,3	13,1	10,0

Tabela 4

Nr ciągu	Odchylenia standardowe (mm)			
	$\sigma_{x_{TC-RTK}}$	$\sigma_{y_{TC-RTK}}$	$\sigma_{p_{TC-RTK}}$	σ_{TC}
1	4,7	12,0	12,9	6,8
2	6,2	16,2	17,3	10,8
3	4,9	13,0	13,9	12,7
4	6,3	14,2	15,5	16,7
5	8,6	18,5	20,4	13,0
6	9,0	14,1	16,7	11,8
7	6,5	15,5	16,8	11,0
8	5,6	8,0	9,8	11,3
9	6,9	15,2	16,7	10,2
10	2,2	11,9	12,1	12,3
Średnie	6,4	14,1	15,5	11,9

3.2. Tyczenie obiektów w terenie

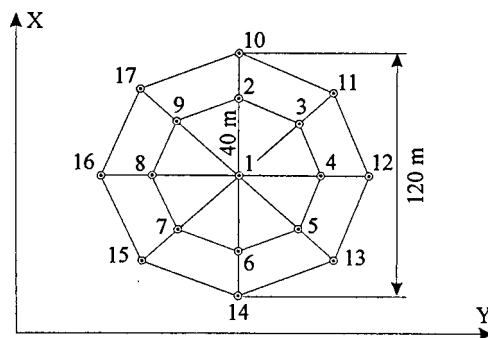
Wyznaczenie przez odbiornik satelitarny współrzędnych punktu bezpośrednio w terenie umożliwia przeprowadzenie tyczenia lokalizującego, które dotychczas było prowadzone tylko sposobami klasycznymi. Przedmiotem tyczenia są punkty, których współrzędne zostały określone w układzie WGS-84 lub w układzie lokalnym. Tyczenie w układzie lokalnym wymaga zdefiniowania współczynników transformacji z wykorzystaniem współrzędnych punktów dostosowania lub na podstawie parametrów: lokalnej elipsoidy,

zastosowanego odwzorowania kartograficznego i parametrów definiujących rodzaj transformacji.

Tyczenie punktów o określonych wcześniej współrzędnych wymaga użycia co najmniej dwóch odbiorników, z których jeden ustawia się nad punktem osnowy realizacyjnej (punktem odniesienia), zaś drugi po dokonaniu inicjalizacji służy do tyczenia punktów. W trakcie tyczenia można korzystać ze współrzędnych biegunowych lub prostokątnych. Po wybraniu z listy punktu tyczonego i podstawieniu go jako cel, na wyświetlaczu kontrolera pojawiają się obliczone różnice między współrzędnymi zadanymi a współrzędnymi aktualnej pozycji anteny odbiornika przemieszczanego. Wyświetlane różnice współrzędnych (prostokątnych lub biegunowych) oraz graficzny obraz wzajemnego położenia anteny i punktu tyczonego umożliwiają operatorowi szybkie zlokalizowanie punktu. W pomiarach dokładnych, na końcowym etapie lokalizowania punktu, antena odbiornika użytego do tyczenia powinna być ustawiana na statywie.

Weryfikację dokładnościową tyczenia punktów metodą RTK przeprowadzono na dwóch obiektach testowych w całkowicie odkrytym terenie. Współrzędne punktów reprezentujących obiekty wyznaczono w lokalnym układzie współrzędnych po wyrównaniu sieci liniowo-kątowej pomierzonej przy użyciu TC 2002. Współrzędne te wyznaczono z dokładnością ± 1 mm.

Pierwszy obiekt testowy (rys. 7) reprezentuje 17 punktów. Antenę odbiornika referencyjnego ustawiono w odległości 200 m od punktu 10 na kierunku 14–10. Tyczenie prowadzono przy ustawieniu anteny na statywie i przesuwaniu jej do momentu uzyskania współrzędnych projektowych. Następnie antenę zastępowano pionownikiem optycznym, wyznaczając odchyłki punktu wytyczonego względem punktu utrwalonego wcześniej w celu dokonania pomiarów przy użyciu tachymetru. Odchyłki te traktowano jako błędy prawdziwe i na ich podstawie obliczono odchylenia standardowe współrzędnych uzyskując: $\sigma_x = \pm 4,8$ mm, $\sigma_y = \pm 4,0$ mm, $\sigma_p = \pm 6,2$ mm. W celu sprawdzenia dokładności realizacji kształtu i wymiarów obiektu wytyczonego techniką RTK wpasowano go w punkty uzyskane z pomiarów klasycznych. Dokładność tego wpasowania charakteryzuje odchylenie standardowe ± 4 mm.

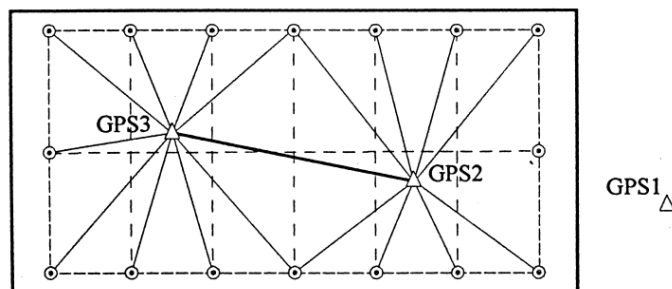


Rys. 7

Drugi obiekt testowy (60x80m) występujący w postaci siatki kwadratów (20x20m) założono podobnie jak pierwszy, wyznaczając współrzędne jego 20 punktów przy użyciu TC 2002. Tyczenie punktów o tak wyznaczonych współrzędnych (traktowanych jako współrzędne projektowe) wykonano metodą RTK przy trzech różnych punktach odniesienia oddalonych od obiektu tyczonego o 400 m, 850 m, 1200 m. W tym przypadku tyczenie prowadzono przy antenie zamocowanej na firmowym nośniku drążkowym wyposażonym w libelę pudełkową. Uzyskano następujące odchylenia standardowe położenia punktów: $\pm 6,4$ mm dla odległości 400 m, $\pm 8,4$ mm dla odległości 850 m i $\pm 10,0$ mm dla odległości 1200 m.

3.3. Obsługa budowy obiektów typu wieżowego

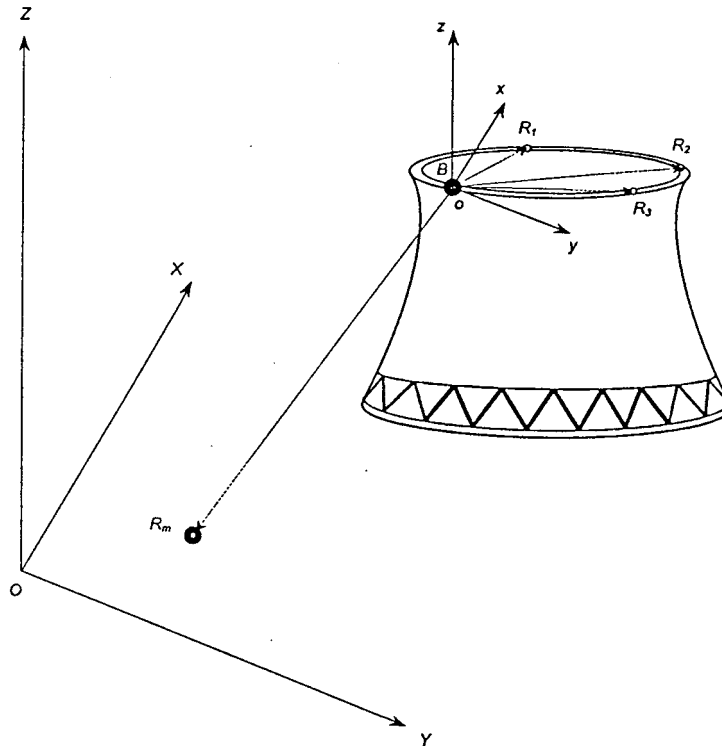
Jedną z podstawowych czynności wykonywanych przy wznoszeniu budynków wielokondygnacyjnych jest przenoszenie osi konstrukcyjnych na kolejne poziomy robocze. W postępowaniu klasycznym przenoszenie osi prowadzi się ze stanowisk naziemnych z wykorzystaniem osnowy budowlano-montażowej oraz metody prostej odniesienia i metody rzutowania. Wraz ze wzrostem wysokości wznoszonego obiektu pojawiają się trudności w przenoszeniu osi tymi sposobami, wynikające z ograniczonej przestrzeni obserwacyjnej. W takich przypadkach stosuje się osnowę wewnętrzną rozbudowaną na poziomie zerowym i przenoszoną na kolejne kondygnacje przy użyciu pionowników optycznych.



Rys. 8

Opisane sposoby wyznaczania osi konstrukcyjnych mogą być zastąpione uproszczoną procedurą postępowania przy wykorzystaniu techniki RTK, nie wymagającą w ogóle istnienia osnowy budowlano-montażowej (rys. 8). Funkcję takiej osnowy spełnia pojedynczy punkt odniesienia, na którym ustawia się odbiornik stacjonarny. Drugi odbiornik jest wykorzystywany do wyznaczania współrzędnych dwóch lub większej liczby punktów będących stanowiskami dla instrumentu klasycznego na danym poziomie. Z punktów takich prowadzi się tyczenie punktów osi konstrukcyjnych metodą biegunową. Można też zauważyć, że jeżeli tylko dokładność tycze-

nia punktów metodą RTK jest wystarczająca na potrzeby budowy przedmiotowego obiektu, to wszystkie punkty reprezentujące osie konstrukcyjne na danym poziomie mogą być tyczone przy użyciu techniki satelitarnej.



- $OXYZ$ – układ osnowy realizacyjnej,
- $oxyz$ – lokalny, autonomiczny układ inwentaryzowanego lub tyczonego poziomu,
- B – stacja bazowa,
- R_i – stacje ruchome tyczące / inwentaryzujące,
- R_m – stacja ruchoma monitorująca ruch układu lokalnego.

Rys. 9

System RTK GPS może być ponadto wykorzystany do pomiarów w autonomicznych lokalnych układach współrzędnych znajdujących się w ruchu o niewielkiej amplitudzie względem układu WGS-84 lub innego układu trwale związanego z powierzchnią Ziemi. Przykładem może być układ związany z wykonanym już poziomem obiektu wieżowego (rys. 9), wykonującym ruchy dobowe wywołane parciem wiatru lub nagrzewaniem przez słoń-

ce. Przedstawiony na rysunku 9 sposób geodezyjnej obsługi budowy zapewni więc zachowanie wymaganego kształtu ustawianych form w dowolnej porze dnia i w dowolnych warunkach atmosferycznych, a jednocześnie stacja naziemna R_m umieszczona poza obiektem pozwoli wyznaczyć ruchy układu autonomicznej stacji bazowej B w celu wprowadzenia nietranslacyjnych korekt wynikających z narzuconego projektem kształtu budowli.

LITERATURA

- [1] Janusz W. 1975: *Obsługa geodezyjna budowli i konstrukcji*. Warszawa PPWK.
- [2] Janusz W. i inni 1990, 1994: *Geodezja inżynierska*. Warszawa PPWK.
- [3] Janusz W. 1995: *Wyznaczanie trajektorii ruchu suwnicy i odchyłek toru podsuwnicowego ze stanowisk naziemnych*. Materiały II KNT, Warszawa.
- [4] Sprawozdania z realizacji projektów badawczych KBN: nr 9S60503403 (1995 r.) oraz 9T12E 00610 (1999 r.), kierownik – J. Gocał.

JAN GOCAŁ

WYBRANE TECHNOLOGIE POMIARÓW INŻYNIERSKICH OPARTE NA WYKORZYSTANIU INSTRUMENTÓW ELEKTRONICZNYCH

Streszczenie

Autor charakteryzuje i analizuje w pracy technologie pomiarowe oparte na wykorzystaniu instrumentów elektronicznych należących do dwóch grup:

- skomputeryzowane systemy pomiarowe;
- techniki satelitarne GPS.

Zaletą pierwszej grupy jest wysoka efektywność i elastyczność instrumentów oraz rozwiązywanie wielu zadań w czasie rzeczywistym. Ta ostatnia zaleta jest szczególnie pożyteczna w aspekcie ustawiania i montażu urządzeń mechanicznych. W pracy przedstawiono wykorzystanie instrumentów z tej grupy do następujących zadań: wyznaczanie kształtu jezdni podsuwnicowych, modelowanie kształtu czaszy radioteleskopu, obsługa montażu wielkogabarytowych obiektów i urządzeń mechanicznych oraz inwentaryzacja obiektów powłokowych.

Zastosowania instrumentów zaliczonych do drugiej grupy przedstawiono w aspekcie zadań następujących: zakładanie sieci punktów odniesienia dla inwestycji powierzchniowo zwartych i powierzchniowo wydłużonych, tyczenie obiektów w terenie oraz obsługa budowy obiektów typu wieżowego.

JAN GOCAŁ

THE SELECTED TECHNOLOGIES OF ENGINEERING MEASUREMENTS BASED ON USE OF ELECTRONIC INSTRUMENTS

A b s t r a c t

Author characterizes and analyses measurement technologies, based on using electronic instruments, which belong to two groups:

- computerized measurement systems;
- GPS satellite techniques

High efficiency and flexibility of instruments, as well as solution of many tasks in real time are the main advantage of first group. The last feature is particularly useful in setting and mounting mechanical devices. The following applications of instruments from first group were presented: determination of shape of crane floors, modeling of shape of radio telescope cup, service for mounting large objects and mechanical devices and inventory of coating objects.

Applications of instruments, which belong to the second category, were presented on the following examples: marking of net of reference points for compact and elongated investments, terrain ranging of objects and service of tower objects in the course of building.

Translation: Zbigniew Bochenek

ЯН ГОЦАЛ

ИЗБРАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ,
ОСНОВАННЫЕ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭЛЕКТРОННЫХ
ИНСТРУМЕНТОВ

Р е з ю м е

Автор характеризует и анализирует в работе измерительные технологии, основанные на использовании электронных инструментов, принадлежащих к двум группам:

- компьютерные измерительные системы;
- спутниковая техника GPS.

Достоинством первой группы является высокая эффективность и эластичность инструментов, а также решение многих задач в действительном времени. Это последнее достоинство особенно

полезно в аспекте установки и монтажа механического оборудования. В работе представлено применение инструментов этой группы для следующих задач: определение формы подкрановых путей, моделирования формы чаши радиотелескопа, обслуживание монтажа крупногабаритных объектов и механического оборудования, а также инвентаризации объектов.

Применение инструментов, зачисленных ко второй группе, представлено в аспекте следующих задач: заложение сети пунктов отнесения для инвестиций поверхностно сплошных и поверхностно удлинённых, разбивка объектов на местности и обслуживание строительства объектов башенного типа.

Перевод: Роза Толстикова