

MIECZYŚLAW SMOŁKA

Koncepcja rozwiązania układu geometrycznego i kinematycznego teodolitu

Zarys treści. Przeprowadzona analiza układu geometrycznego i kinematycznego klasycznego teodolitu prowadzi do wniosku, że punkt przecięcia się trzech jego podstawowych osi, pokrywający się z wierzchołkami mierzonych i wyznaczanych kątów, powinien być nieruchomy zarówno w czasie pionowania teodolitu na stanowisku pomiarowym, jak i w czasie prowadzonych pomiarów.

Druga część pracy poświęcona jest nowemu układowi, w którym punkt przecięcia się trzech podstawowych osi instrumentalnych stał się nieruchomym i centralnym punktem układu kinematycznego teodolitu.

Porównanie układów klasycznego i nowego wykazuje, że na drodze nowych rozwiązań konstrukcyjnych teodolitu można uzyskać znaczną poprawę jego dokładności, funkcjonalności i sprawności.

1. Wstęp

1.1. Pojęcia podstawowe i określenie tematu

Jakość teodolitu, tak jak każdego innego urządzenia, jest uzależniona od bardzo wielu warunków, które muszą być spełnione zarówno w okresie projektowania, wykonania, jak i użytkowania tego instrumentu. Przy projektowaniu teodolitu niezmiernie ważne jest ustalenie jego optymalnego układu geometrycznego i kinematycznego. Geometria i kinematyka tego układu wynika z geodezyjnych warunków pomiarowych i ma największy wpływ na ukształtowanie konfiguracji teodolitu oraz na ustalenie jego funkcjonalności, sprawności i dokładności.

Układem geometrycznym teodolitu nazywany jest przez autora taki układ charakterystycznych linii, odcinków i punktów instrumentu, które mają bezpośredni związek zarówno z układami sieci pomiarowych, jak i z konstrukcją teodolitu.

Układem kinematycznym teodolitu nazywany jest w niniejszym opracowaniu układ torów (trajektorii), po których poruszają się charakterystyczne punkty układu geometrycznego tego instrumentu.

Głównym tematem artykułu jest przedstawienie nowej koncepcji podstawowego układu geometrycznego i kinematycznego teodolitu opracowanego z punktu widzenia wymagań pomiarów geodezyjnych.

1.2. Stan wiedzy

Budowie teodolitów, ich zastosowaniu oraz błędom instrumentalnym poświęcono bardzo wiele publikacji. W rozdziale tym uwzględniono jedynie te opracowania, które w jakimś stopniu wiążą się z tematem pracy.

Pominięto natomiast wiele niewątpliwie interesujących publikacji, których związek z problematyką poruszaną w tej pracy jest luźny.

Wiele opracowań [1, 6, 9] poświęconych ogólnej charakterystyce przyrządów pomiarowych, w tym również geodezyjnych, uwzględnia między innymi różnorodne problemy związane z budową i stosowaniem teodolitów. W opracowaniach tych prezentowane są rozwiązania konstrukcyjne różnych teodolitów. Podaje się w nich także takie sposoby regulacji (rektyfikacji) instrumentów, jakie powinien przeprowadzać użytkownik bądź też wyszkolony konserwator. Prace te omawiają również błędy instrumentalne oraz ich wpływ na dokładność pomiarów. Podobną problematykę, w części poświęconej teodolitom, porusza większość podręczników i skryptów uczelnianych [4].

Odrębną grupę [2, 3, 5, 7, 8] stanowią prace poświęcone szczegółowej analizie konstrukcji różnych zespołów teodolitów bądź też wybranym problemom związanym z budową tych instrumentów.

Fiałowski L. w swej pracy [2] określił wpływ ścisłej wartości sumarycznych błędów osiowych na dokładność wyznaczania kierunków.

Haller R. w jednej ze swych publikacji [3] omówił konstrukcje łożysk pionowych i poziomych stosowanych w teodolitach. Najwięcej uwagi poświęcił łożysku pionowemu skonstruowanemu w firmie Kern dla teodolitów serii DK. Autor udowadnia, że łożyska firmy Kern zapewniają dużą stabilizację osi obrotu alidady.

Scheufele H. w swej rozprawie [5], poświęconej głównie badaniu cylindrycznego łożyska pionowego z tocznym stożkowym wieńcem oporowym, wskazuje na zależność pomiędzy dokładnością działania tego łożyska a dokładnością osi obrotu alidady.

W opracowaniach poświęconych układom osiowym przedmiotem analiz są na ogół błędy jakie powodują te układy lub omawia się konstrukcje zespołów osiowych.

W niniejszym opracowaniu poddano analizie podstawowy układ geometryczny i kinematyczny teodolitu zarówno z punktu widzenia użytkownika, jak i konstruktora:

1.3. Cel pracy

Dokładność pomiarów geodezyjnych uzależniona jest od wielu czynników, w tym również od stałego położenia wierzchołków mierzonych i wyznaczanych kątów. Ponieważ wierzchołki tych kątów pokrywają się z punktem przecięcia się trzech podstawowych osi instrumentalnych — osi celowej, osi obrotu lunety i osi obrotu alidady — to unieruchomienie omawianego punktu na stanowisku pomiarowym zapewni stałość położenia wierzchołków mierzonych i wyznaczanych kątów.

Głównym więc celem pracy jest poszukiwanie takiego układu geometrycznego i kinematycznego teodolitu, w którym punkt przecięcia się trzech podstawowych osi instrumentalnych nie zmienia swego położenia względem podstawy instrumentu, zarówno w czasie pionowania teodolitu, jak i w czasie pomiaru oraz wyznaczania kątów ¹⁾.

2. Geometria i kinematyka podstawowych układów osiowych teodolitu klasycznego ²⁾

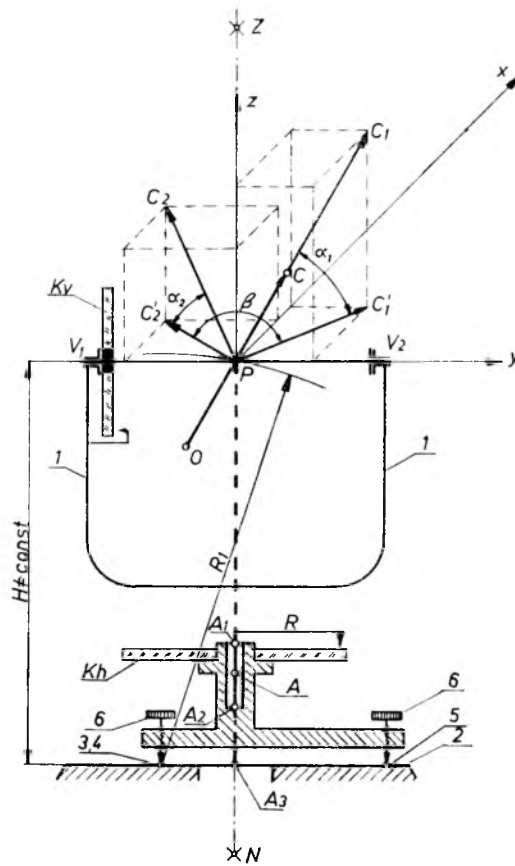
Jak już wspomniano podstawowy układ geometryczny i kinematyczny teodolitu wyznaczają trzy jego osie — oś celowa, pozioma oś obrotu lunety i oś obrotu alidady. Osie te pełnią różne funkcje w pomiarach geodezyjnych i mają różne znaczenie w konstrukcji teodolitu. Oś celowa przy każdym swoim położeniu, przechodzi przez dwa punkty — punkt P leżący na pionowej linii nadir-zenit oraz przez punkt celu np. C_1 (rys. 1). Pozostałe dwie osie, pozioma oś obrotu lunety oraz pionowa oś obrotu alidady, służą do nakierowania osi celowej na dowolny punkt w przestrzeni w celu określenia wartości kątów pionowych α i poziomych β . Oś celowa w czasie tego nakierowania jest obracana wokół punktu P ; który jest punktem przecięcia się trzech omawianych osi i jednocześnie jest wierzchołkiem mierzonych i wyznaczanych kątów pionowych i poziomych.

Rozpatrując z punktu widzenia konstruktora geometrię trzech podstawowych osi instrumentalnych teodolitu, wystarczy rozpatrzyć odcinki proste wyznaczające te osie.

Instrumentalną oś celową wyznacza odcinek OC (rys. 1) łączący środek siatki pomiarowej O z optycznym środkiem obiektywu C . Poziomą oś obrotu lunety wyznacza odcinek $V_1 V_2$ łączący środki dwóch poziomych łożysk osadzonych w dźwigarkach 1. Obydwie te osie są wyznaczone przez rzeczywiste odcinki w konstrukcji teodolitu, bowiem przez punkty O i C przebiega oś optyczna lunety pokrywająca się z pomiarową osią celową, natomiast przez punkty V_1 i V_2 przechodzi oś symetrii dwóch czopów podtrzymujących lunetę. Odcinki $V_1 V_2$ i OC przecinające się w punkcie P sprzężone są ze sobą na stałe, natomiast z dźwigarkami 1 są połączone obrotowo. Żaden z dwóch wyżej wymienionych odcinków nie łączy się bezpośrednio z odcinkiem wyznaczającym trzecią oś geometrycz-

¹⁾ Artykuł jest opracowany na podstawie pracy doktorskiej pt. „Koncepcja nowego rozwiązania układu kinematycznego teodolitu z punktu widzenia wymagań pomiarów geodezyjnych” [7].

²⁾ Określenie teodolit klasyczny odnosi się do najczęściej spotykanej konfiguracji teodolitu wspartego na trzech śrubach poziomujących.



Rys. 1. Schemat układu geometrycznego i kinematycznego teodolitu klasycznego: N — punkt pomiarowy nadir, Z — punkt pomiarowy zenit, P — punkt przecięcia się trzech podstawowych osi teodolitu, O — środek optyczny obiektywu, OC — odcinek wyznaczający oś celową, V_1V_2 — odcinek wyznaczający oś obrotu lunety, A_1A_2 — odcinek wyznaczający oś obrotu alidady, A — środek geometryczny łożyska pionowego, $PA_3 = H$ — odległość punktu P od podstawy teodolitu, Kh — kątomierz poziomy, Kv — kątomierz pionowy, R — promień podziału kątomierza poziomego, R_1 — promień krzywizny, po której przemieszcza się punkt P , xyz — przestrzenny układ współrzędnych prostokątnych, PC_1 , PC_2 — celowe, α_1 , α_2 — kąty pionowe, β — kąt poziomy, 1 — dźwigarki, 2 — podstawa teodolitu, 3, 4, 5 — punkty styku teodolitu z jego podstawą, 6 — śruby poziomujące

ną teodolitu — oś obrotu alidady. Tę trzecią oś stanowi linia prosta pokrywająca się z chwilową osią obrotu łożyska pionowego.

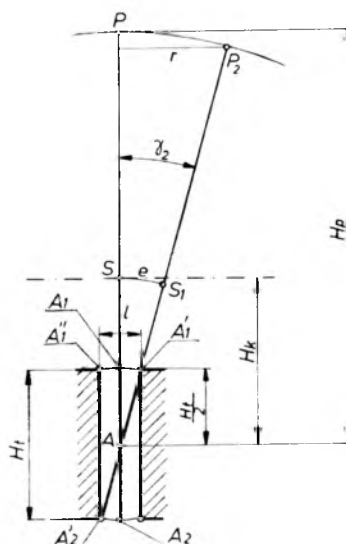
O ile dwa pierwsze odcinki są określone przez jednoznaczne położenie ich punktów początkowych i końcowych, o tyle położenia trzeciego odcinka, wyznaczającego oś obrotu alidady, nie można ustalić jednoznacznie w takim samym stopniu.

Cała długość odcinka PA_3 , z którym powinna pokrywać się oś obrotu

alidady, składa się bowiem z trzech kolejnych odcinków: PA_1 , A_1A_2 i A_2A_3 . Spośród wymienionych trzech odcinków tylko jeden odcinek A_1A_2 wyznacza oś obrotu alidady, a jego długość decyduje w dużej mierze o stabilności tej osi obrotu. Odcinek A_1A_2 obraca się w nieruchomym otworze cylindrycznym i połączony z dźwigarkami 1, podtrzymuje układ osi wyznaczony przez odcinki OC i V_1V_2 . Dwa pozostałe odcinki osi pionowej bezpośrednio nie spełniają istotnych funkcji w teodolicie, a ich położenie jest uzależnione zarówno od położenia odcinka A_1A_2 , jak i od położenia śrub poziomujących.

Stabilność całego odcinka PA_3 można rozważać w dwóch fazach pracy teodolitu: w czasie ustawiania teodolitu i w czasie wykonywania pomiarów.

W czasie ustawiania teodolitu na podstawie 2 w punktach 3, 4 i 5 cały odcinek PA_3 , łącznie z odcinkami OC i V_1V_2 , jest przesuwany i nachylany. W czasie pomiarów odcinek A_2A_3 nie zmienia swego położenia,



Rys. 2. Schemat cylindrycznego łożyska pionowego teodolitu: S — środek geometryczny kątomierza poziomego, γ_2 — maksymalny kąt wychylenia osi obrotu alidady, l — luz pomiędzy czopem i tuleją łożyska pionowego, r — mimośród punktu P , e — mimośród kątomierza pionowego, H_t — czynna długość tulei łożyska pionowego, H_k — odległość pomiędzy środkami geometrycznymi kątomierza poziomego i łożyska pionowego, $H_p = PA$ — odległość punktu P od środka geometrycznego łożyska pionowego

a odcinki A_1A_2 i A_1P mogą się nachylać w granicach luzu $A_1'A_1''$ tego łożyska powodując jednocześnie zmianę położenia punktu P do położenia P_2 (rys. 1 i 2). Graniczna wielkość kąta nachylania się odcinka A_1A_2 do

położenia $A_1' A_2'$ uwarunkowana jest zarówno wielkością luzu $A_1' A_1''$, jak również długością odcinka $A_1 A_2$. Należy zauważyć, że przy granicznym nachyleniu odcinka $A_1 A_2$ wykonuje on obrót wokół punktu A leżącego w połowie długości tego odcinka. Punkt A dzieli więc dodatkowo cały odcinek PA_3 na dwa inne odcinki PA i AA_3 , z których tylko odcinek PA będzie miał istotne znaczenie w dalszych rozważaniach.

Jak wynika z przedstawionego opisu cały odcinek PA_3 można podzielić na kilka różnych odcinków. Dla celów niniejszej pracy najistotniejsze są trzy odcinki:

PA_3 — odległość od punktu przecięcia się trzech podstawowych osi geometrycznych do podstawy teodolitu,

$A_1 A_2$ — długość osi czopa łożyska pionowego,

PA — odległość od punktu przecięcia się trzech podstawowych osi geometrycznych teodolitu do środka geometrycznego łożyska pionowego.

Rozpatrując kinematykę układu odcinków wyznaczających trzy podstawowe osie teodolitu wystarczy przeanalizować ruch ich charakterystycznych punktów, które można podzielić na dwie zasadnicze grupy.

Do pierwszej grupy zalicza się punkty O i C oraz V_1 i V_2 , których ruch po zadanych torach, łącznie z ruchem kątomierzy, jest użyteczny w pomiarach. Drogi katowe tych punktów odpowiadają wartościom mierzonych lub wyznaczanych kątów — pionowych i poziomych.

Do drugiej grupy punktów omawianego układu należą te wszystkie punkty charakterystyczne, które w czasie ruchu odcinków OC i $V_1 V_2$ powinny zachować niezmiennosc swego położenia. W grupie tej znajdują się przede wszystkim punkty P , A , A_1 i A_2 .

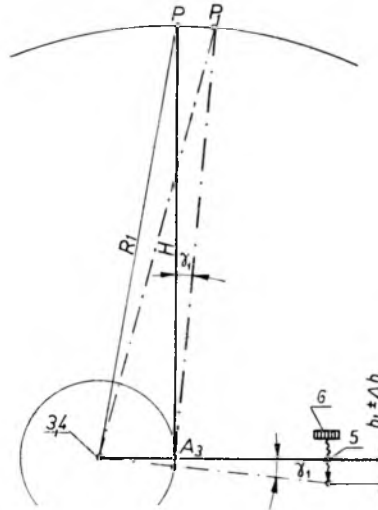
Położenie charakterystycznych odcinków i punktów układu osiowego teodolitu na tle elementów geometrycznych geodezyjnej sieci pomiarowej przedstawiono na rysunku 1. Cały odcinek PA_3 pokrywa się z pionową linią wychodzącą ze środka znaku pomiarowego N (nadir) lub Z (zenit). Drugi odcinek $V_1 V_2$ jest prostopadły do linii $N—Z$. Trzeci odcinek OC wyznaczający oś celową leży na prostej pokrywającej się z celową PC_1 , stanowiącą jednocześnie ramię mierzonego lub wyznaczanego kąta pionowego α_1 . Drugim ramieniem tego kąta jest rzut prostokątny celowej PC_1 na poziomą płaszczyznę xPy .

Poziomy kąt β zawarty jest pomiędzy rzutami prostokątnymi dwóch celowych PC_1 i PC_2 na poziomą płaszczyznę xPy . Powyższe określenie kąta poziomego nie koliduje z przyjętą ogólnie definicją kąta poziomego jako kąta dwuściennego zawartego pomiędzy dwoma płaszczyznami kolicymyjnymi, natomiast uściśla w układzie geometrycznym teodolitu funkcję odcinka OC .

Omówiony układ odcinków wyznaczających trzy podstawowe osie

geometryczne klasycznego teodolitu teoretycznie spełnia warunek niezmiennego położenia w jednym punkcie wszystkich wierzchołków mierzonych i wyznaczanych kątów. W praktyce warunek ten nie jest spełniony, bowiem stosuje się rozpowszechniony sposób usuwania błędu kolimacji polegający na przesuwaniu środka siatki pomiarowej O . Przy niezmiennym położeniu środka optycznego C obiektywu zabieg ten prowadzi do oddalenia osi celowej od punktu przecięcia się pozostałych dwóch osi — osi obrotu lunety i osi obrotu alidady. Jeżeli oś celowa nie przechodzi przez punkt P , to i wierzchołki mierzonych lub wyznaczanych kątów nie pokrywają się z tym punktem lecz leżą w wielu punktach rozmieszczonych w przestrzeni wokół punktu P .

W większości produkowanych teodolitów nie jest również spełniony warunek stałego położenia punktu P względem podstawy instrumentu. W czasie ustawiania teodolitu na stanowisku pomiarowym instrument ten jest na ogół przesuwany po górnej powierzchni 2 głowicy statywu i jednocześnie doprowadzany do pionowego położenia obrotem śrub poziomujących 6 (rys. 1 i 3). W czasie pionowania teodolitu za pomocą jednej śruby, przy nieruchomych pozostałych dwóch śrubach, teodolit



Rys. 3. Schemat pochycenia osi obrotu alidady w czasie pionowania teodolitu: γ_1 — kąt nachylenia teodolitu, h_1 — poprawka pionowania, Δh — dokładność nastawienia śruby poziomującej

nachyla się wokół linii wyznaczonej przez punkty styku nieruchomych śrub z powierzchnią głowicy statywu. Podczas tej czynności punkt P zamiast pozostać w miejscu przesuwany się po łuku zakreślonym promieniem R_1 i zmienia swoje położenie, zarówno względem podstawy in-

strumentu, jak i względem pionowej linii $N-Z$. Zatem każde „poprawienie pionowości” teodolitu pociąga za sobą zmianę położenia wierzchołków kątów mierzonych lub wyznaczanych na jednym stanowisku.

Zarówno „poprawianie pionowości”, jak i niedokładność pionowania teodolitu, czyli niemożliwość wielokrotnego doprowadzania do tego samego położenia pionowego odcinka PA_3 , powoduje trojaki rodzaj błędy.

— nachylenie całego układu geometrycznego i kinematycznego teodolitu,

— oddalanie punktu P (wierzchołków mierzonych i wyznaczanych kątów) od pionowej linii $N-Z$,

— zmianę wysokości punktu P względem podstawy teodolitu.

Omawiane nachylenie pionowej osi obrotu alidady, a razem z nią nachylenie dwóch pozostałych osi, wyniesie:

$$\gamma_1'' = \frac{2(h_1 \pm \Delta h) \varrho''}{a\sqrt{3}} \quad (1)$$

gdzie a — odległość pomiędzy śrubami poziomującymi spodarki,

h_1 — zmiana długości śruby ustawczej spowodowana „poprawianiem pionowości teodolitu”,

Δh — dokładność nastawienia śruby poziomującej.

Poziome przesunięcie punktu P do położenia P_1 wyniesie

$$PP_1 = \frac{2(h_1 \pm \Delta h)}{3} \cdot \sqrt{\frac{3H^2}{a^2} + 1} \quad (2)$$

gdzie H — odległość punktu P od podstawy teodolitu.

Zmiana wysokości punktu P , względem podstawy teodolitu, spowodowana błędem nachylenia γ_1 , może być w dalszych rozważaniach pominięta, ponieważ wielokrotnie większe pionowe przesunięcie tego punktu jest spowodowane wkręcaniem lub wykręcaniem wszystkich trzech śrub ustawczych w czasie pionowania teodolitu.

Najpoważniejszym i trudnym do usunięcia źródłem błędów w układzie geometrycznym i kinematycznym teodolitu jest jego pionowe łożysko, które podtrzymuje układ osi celowej i poziomej osi obrotu lunety oraz zapewnia obrót alidady wokół jej osi pionowej. Dodatkową ważną funkcją tego łożyska jest zapewnienie stałego położenia osi obrotu kątomierza poziomego Kh , którego oś obrotu powinna zawsze pokrywać się z osią obrotu alidady.

W większości klasycznych teodolitów pionowe łożysko zbudowane jest w postaci cylindrycznego czopa osadzonego w tulei. Czop ten jest podparty od dołu lub podwieszony za pomocą kołnierza oporowego. Podparcie czopa ma na celu przenoszenie ciężaru alidady, a o stabilności położenia

nia jej osi obrotu decyduje wyłącznie obrotowe połączenie czopa z tuleją. Podwieszenie czopa za pomocą kołnierza oporowego nie tylko przenosi ciężar alidady, ale ma również wpływ na stałość położenia jej osi obrotu. Do rozważań w niniejszej pracy przyjęto łożysko z cylindrycznym czopem podpartym w jednym punkcie. Na przykładzie takiego łożyska najłatwiej jest bowiem wykazać szkodliwy wpływ luzu jaki występuje pomiędzy czopem a tuleją.

W zakresie luzu pomiędzy tuleją a czopem odcinek PA (rys. 2) może doznawać, w dowolnym kierunku, przemieszczenia promieniowego lub może się nachylać o maksymalną wartość γ_2 . Uwzględniając warstwę smaru wypełniającą przestrzeń pomiędzy czopem a tuleją można przyjąć, że promieniowe przemieszczenie czopa jest znacznie mniejsze od wartości luzu l i nie ma praktycznego wpływu zarówno na zmianę położenia punktu P , jak również na zmianę położenia osi obrotu łożyska pionowego względem środka S układu mierniczego kątomierza. Natomiast nachylenie osi obrotu łożyska o kąt γ_2 powoduje trojakiemu rodzaju błędy:

- błąd pomiaru kąta pionowego,
- przemieszczenie punktu P ,
- przemieszczenie osi obrotu kątomierza poziomego względem środka jego układu mierniczego, co z kolei może powodować błąd pomiaru kąta poziomego, przy niektórych konstrukcjach kątomierzy.

Oś czopa, a tym samym odcinek PA , może się nachylać w granicach luzu $l = A_1' A_1''$. Maksymalne nachylenie odcinka PA o kąt γ_2 wystąpi wtedy, kiedy powierzchnia czopa zetknie się z dolną i górną krawędzią tulei. Wartość tego kąta wyrażona w sekundach będzie wynosiła:

$$\gamma_2'' = \frac{l \cdot \rho''}{H_t} \quad (3)$$

gdzie γ_2'' — kąt nachylenia osi czopa wyrażony w sekundach,

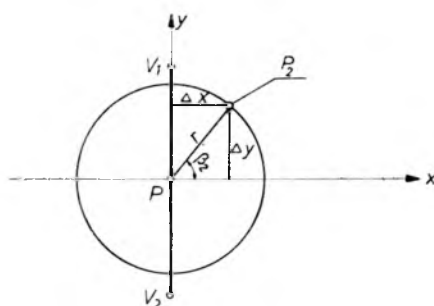
$l = A_1' A_1''$ — całkowity luz pomiędzy tuleją a czopem,

H_t — wysokość tulei.

Wpływ pochylenia odcinka PA na dokładność pomiaru kąta pionowego jest zależny nie tylko od wielkości tego nachylenia, ale również od kierunku jego nachylenia. Jeżeli nachylenie wystąpi w płaszczyźnie kolimacyjnej, to cała jego wartość powiększy błąd pomiaru kąta pionowego. Jeżeli nachylenie wystąpi w innej płaszczyźnie przechodzącej przez odcinek PA i odchylonej od płaszczyzny kolimacyjnej o kąt β_2 (rys. 4) to wielkość błędu obarczającego wartość mierzonego kąta pionowego będzie wynosiła

$$\gamma_3'' = \frac{l \cdot \rho'' \cdot \cos \beta_2}{H_t} \quad (4)$$

gdzie γ_3 — błąd obarczający wartość mierzonego kąta pionowego,
 β_2 — kąt zawarty pomiędzy płaszczyzną kolimacyjną a płaszczyzną, w której występuje nachylenie odcinka PA .



Rys. 4. Kierunek nachylenia osi obrotu alidady: xPy — układ współrzędnych prostokątnych w płaszczyźnie prostopadłej do osi obrotu alidady, Δx , Δy — współrzędne punktu P_2 , β_2 — odchylenie mimosrodu r od płaszczyzny kolimacyjnej

Warto raz jeszcze podkreślić, że przy zastosowaniu tego rodzaju łożyska błąd nachylenia osi obrotu alidady, zwany także błędem chwiania się tej osi, zależy wyłącznie od wielkości luzu i od czynnej długości czopa. Punkt podparcia czopa nie ma żadnego wpływu na stabilność osi obrotu alidady i przenosi jedynie jej ciężar.

W czasie maksymalnego nachylenia odcinka $A_1 A_2$ o kąt γ_2 odcinek PA wykonuje obrót wokół punktu A , leżącego w połowie czynnej długości tulei łożyska pionowego, natomiast punkt P przemieszcza się po powierzchni sferycznej w zakresie koła określonego promieniem r (rys. 2). Dla małych kątów można przyjąć, z pewnym uproszczeniem, że rozważana powierzchnia sferyczna jest płaską powierzchnią kołową.

Maksymalne oddalenie punktu P_2 od pionowego położenia odcinka PA będzie wynosiło

$$r = \frac{l \cdot H_p}{H_t} \quad (5)$$

gdzie r — maksymalne oddalenie punktu P_2 od pionowego położenia odcinka PA ,

H_p — odległość punktu P od geometrycznego środka tulei łożyska pionowego.

Błąd ten, tak samo jak błąd pochylenia osi obrotu alidady, ma swoje źródło w łożysku pionowym, a wielkość tego błędu uzależniona jest zarówno od kąta nachylenia odcinka PA , jak i od jego długości.

Jak wspomniano pochylenie odcinka PA powoduje również przemieszczanie osi obrotu kątomierza względem środka jego układu mierniczego. Wielkość tego przemieszczenia wynosi

$$e = \frac{l \cdot H_k}{H_t} \quad (6)$$

gdzie e — mimośród kątomierza spowodowany nachyleniem odcinka AP ,
 H_k — odległość płaszczyzny mierniczej kątomierza od środka geometrycznego tulei.

Wiadomo z literatury [1], że wartość e można określić wyrażeniem

$$e = \frac{R \cdot \Delta\beta}{\varrho''} \quad (7)$$

gdzie R — promień kręgu podziałowego optycznego kątomierza poziomego,

$\Delta\beta$ — maksymalny błąd pomiaru kąta poziomego spowodowany mimośrodem e zawartym pomiędzy osią obrotu alidady a środkiem kątomierza.

Porównując ze sobą wartości e z wzorów (6) i (7) można znaleźć zależność pomiędzy luzem pasowania omawianego łożyska i maksymalnym błędem pomiaru kąta poziomego. Zależność ta wyrazi się wzorem

$$l = \frac{R \cdot H_t \cdot \Delta\beta}{\varrho'' \cdot H_k} \quad (8)$$

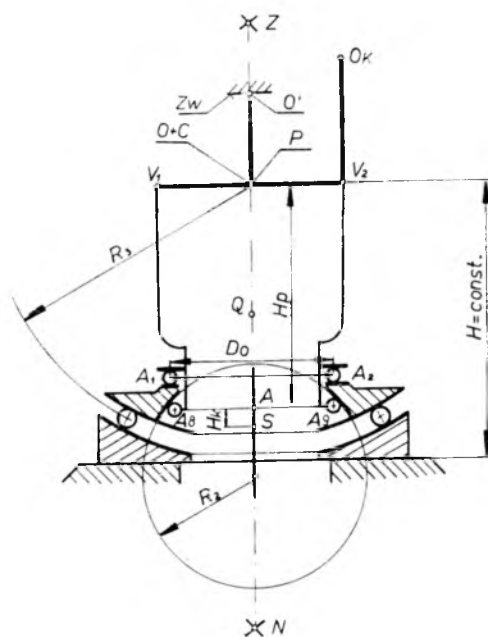
lub

$$\Delta\beta = \frac{l \cdot H_k \cdot \varrho''}{R \cdot H_t} \quad (9)$$

Oceniając podstawowy układ geometryczny i kinematyczny teodolitu klasycznego w świetle analiz przeprowadzonych w niniejszej pracy należy stwierdzić, że punkt przecięcia się trzech podstawowych osi, pokrywający się z wierzchołkami mierzonych i wyznaczanych kątów, zmienia swoje położenie względem podstawy teodolitu, zarówno w czasie pomiaru kątów, jak i w czasie pionowania instrumentu.

3. Koncepcja nowego rozwiązania układu geometrycznego i kinematycznego teodolitu

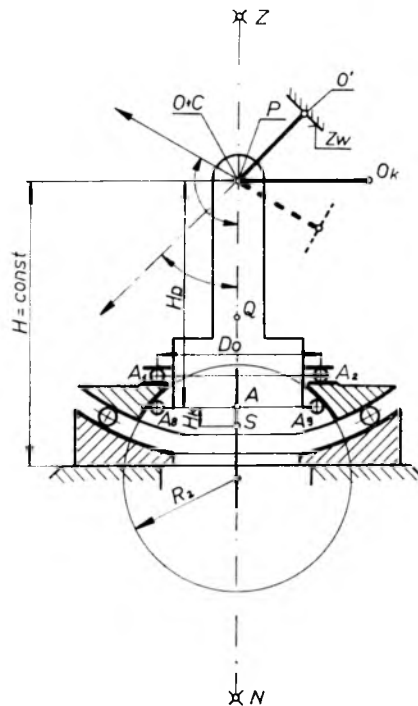
Nowy układ geometryczny i kinematyczny teodolitu został zaproponowany przez autora w opracowaniu wykonanym w Instytucie Geodezji i Kartografii. Konstrukcja tego układu nie narusza charakterystycznego dla teodolitów klasycznych układu trzech podstawowych osi geometrycznych, a zmienia jedynie konstrukcje i układ odcinków wyznaczających te osie. Oś celową wyznacza podwójny odcinek CO' i $O'O$, poziomą oś obrotu lunety wyznacza odcinek $V_1 V_2$, pionową osią obrotu alidady jest prosta prostopadła do powierzchni koła określonego średnicą $A_1 A_2$ i przechodząca przez punkt A (rys. 5, 6, 7).



Rys. 5. Schemat nowego układu geometrycznego i kinematycznego teodolitu z tocznym łożyskiem pionowym: CO' i $O'O$ — odcinki wyznaczające oś celową, Z_w — zwierciadło, O_k — okular, $A_1A_2 = D_o$ — średnica bieżni zespołu oporowego łożyska, R_2 — promień obrotu spodarki sferycznej, Q — środek ciężkości alidady, R_3 — promień powierzchni kulistej łożyska pionowego, A_3A_4 — odcinek stabilizujący położenie osi obrotu alidady w środku geometrycznym łożyska pionowego

Konfiguracja odcinków wyznaczających oś celową w nowym układzie różni się znacznie od układu odpowiednich odcinków w teodolicie klasycznym. Środek siatki pomiarowej O oraz środek optyczny obiektywu C sprowadzono do ich pokrycia się z punktem P . W takim układzie, przy zastosowaniu zwierciadła Z_w , oś celowa wyznaczana jest przez dwa pokrywające się ze sobą odcinki CO' i $O'O$ prostopadłe w punkcie P do poziomej osi obrotu lunety. Utworzony w punkcie O obraz obserwowanego celu przenoszony jest do okularu O_k wzdłuż odcinków OV_2 i V_2O_k . Odcinki $CO'O$ i V_2O_k mogą być niezależnie sprzęgane z poziomą osią obrotu lunety. Taki układ omawianych odcinków umożliwiłby skonstruowanie dwuczęściowej lunety, której część celownicza $CO'O$ może być obracana wokół poziomej osi obrotu lunety w zakresie 180° od kierunku nadir do kierunku zenit, przy jednoczesnym poziomym położeniu części okularowej. Można również obydwie części lunety obracać razem wokół poziomej osi w zakresie 360° .

Sprowadzenie środka optycznego obiektywu i środka siatki pomiarowej do pokrycia się z punktem P stwarza możliwości konstrukcyjne po-

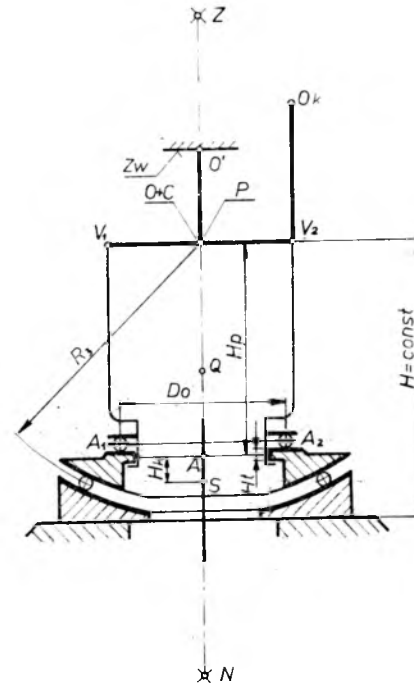


Rys. 6. Schemat nowego układu geometrycznego i kinematycznego teodolitu z tocznym łożyskiem pionowym

łączenia płytki ogniskowej z obiektywem. Taki zintegrowany zespół optyczny wykonany z jednorodnego materiału pozwala na dokładne ustawienie w czasie montażu punktów O i C w układzie geometrycznym i kinematycznym teodolitu i może mieć istotny wpływ na skrócenie tubusu lunety.

Pozioma oś obrotu lunety nowego teodolitu, wyznaczona przez odcinek $V_1 V_2$, w sensie geometrycznym nie różni się od analogicznej osi teodolitu klasycznego.

W układzie geometrycznym i kinematycznym nowego łożyska pionowego oś obrotu alidady stabilizowana jest przez dwa okręgi ustawione prostopadle do osi obrotu alidady (rys. 5 i 6). Okrąg o średnicy $A_1 A_2$, wyznaczany przez środki kulek umieszczonych pomiędzy dwiema biegniami płaskimi zabezpiecza oś obrotu alidady przed jej odchylem się od kierunku pionowego $N-Z$. W odróżnieniu od omówionego wcześniej klasycznego układu łożyska, w którym pionowy odcinek $A_1 A_2$ mógł się nachylać w granicach luzu pomiędzy czopem a tuleją, w nowym układzie przy poziomym położeniu odcinka $A_1 A_2$ wszelkie luzy są automatycznie



Rys. 7. Schemat nowego układu geometrycznego i kinematycznego teodolitu ze ślizgowo-tocznym łożyskiem pionowym

eliminowane pod wpływem działania ciężaru alidady, a nachylenie się osi obrotu alidady może być spowodowane jedynie niedokładnością wykonania kulek i bieżni. Błąd nachylenia osi obrotu łożyska — osi obrotu alidady wynosi:

$$\gamma_2'' = \frac{\Delta B \cdot \varrho''}{D_0} \quad (10)$$

gdzie ΔB — łączny maksymalny błąd niepłaskości obydwu bieżni łożyska,

D_0 — średnica bieżni zespołu oporowego łożyska.

Dzięki takiej konstrukcji łożyska zmniejsza się również w znacznym stopniu błąd położenia punktu P oraz błąd mimośrodowo-kątowego. Pierwszy błąd oblicza się z wzoru

$$r = \frac{\Delta B \cdot H_p}{D_0} \quad (11)$$

Natomiast maksymalny błąd mimośrodowo-kątowego z wzoru

$$e = \frac{\Delta B \cdot H_k}{D_0} \quad (12)$$

Przy pomiarze kąta z zastosowaniem odczytu z jednego miejsca powyższy mimośród może spowodować maksymalny błąd pomiaru kąta poziomego obliczony na podstawie wzoru

$$\Delta\beta = \frac{\Delta B \cdot H_k \cdot \varrho''}{R \cdot D_0} \quad (13)$$

Drugi okrąg o średnicy A_8A_9 , stykający się z powierzchnią kulistą o promieniu R_2 , utrzymuje oś obrotu alidady w punkcie A . Przy takim układzie geometrycznym łożyska pionowego osią obrotu alidady jest prosta prostopadła do powierzchni koła o średnicy A_1A_2 i przechodząca przez środek drugiego koła o średnicy A_3A_9 .

Konstrukcja omawianego łożyska nie ma żadnych luzów i znacznie zwiększa stabilność położenia osi obrotu alidady w porównaniu z omówionym klasycznym łożyskiem cylindrycznym.

Odmianą konstrukcyjną omawianego łożyska jest łożysko ślizgowo-toczne przedstawione na rysunku 7. Toczny zespół centrujący w postaci okręgu o średnicy A_8A_9 , stykającego się z powierzchnią sferyczną zastąpiony został krótkim czopem osadzonym w tulei H_t . Takie łożyska z krótkimi czopami o małej średnicy stosowane są z powodzeniem w teodolitach firmy Kern.

Opisane konstrukcje odcinków wyznaczających oś celową i oś obrotu alidady znacznie zwiększają, w porównaniu z układem klasycznym, jednoznaczne położenie wierzchołków mierzonych i wyznaczanych kątów względem układu geometrycznego i kinematycznego teodolitu.

Warunek niezmienności położenia punktu P względem podstawy instrumentu a tym samym względem odpowiednich punktów sieci pomiarowej na jednym stanowisku pomiarowym został osiągnięty dzięki opracowaniu nowej spodarki [8].

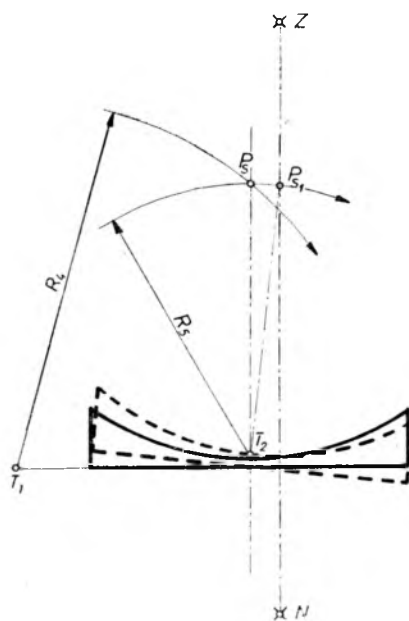
Nowa spodarka posiada kształt pierścienia, którego dolna płaska powierzchnia styka się z powierzchnią statywu, natomiast górna powierzchnia ukształtowana jest w postaci wklęsłej czaszy kulistej, w której osadzona jest alidada w postaci wypukłej czaszy kulistej. Początki promieni powierzchni kulistych zarówno spodarki, jak i alidady umieszczone są w punkcie P . Przy takim połączeniu tych dwóch zespołów teodolitu w czasie pionowania alidady dokonuje ona obrotu wokół punktu P , a więc wokół punktu, w którym znajdują się wierzchołki mierzonych lub wyznaczanych kątów. *W tym układzie punkt P stał się centralnym i nieruchomym punktem układu kinematycznego teodolitu i wobec tego nie zmienia swego położenia względem podstawy instrumentu.*

W proponowanym przez autora układzie kinematycznym teodolitu środek ciężkości Q alidady znajduje się poniżej punktu P . W omawianym rozwiązaniu wychylona alidada dąży zawsze, pod wpływem działania

grawitacji, do zajęcia pozycji pionowej tzn. takiej, w której punkty P i Q leżą na prostej pionowej. Jeżeli środek ciężkości Q leży jednocześnie na osi obrotu alidady to może on samoczynnie sprowadzać tę oś do położenia pionowego. Przy takiej konfiguracji układu geometrycznego i kinematycznego teodolit uzyskał cechy instrumentu samopionującego.

Po zaprojektowaniu w alidadzie i w spodarce odpowiednio dużych otworów współśrodkowych z osią obrotu alidady powstaje możliwość pomiaru kątów pionowych nie tylko w odniesieniu do płaszczyzny poziomej, ale również w odniesieniu do kierunku pionowego.

Istotną zaletą w nowym teodolicie jest oddzielenie funkcji pionowania od funkcji centrowania. Jak już wspomniano w czasie pionowania teodolitu, a właściwie w czasie pionowania alidady, punkt P nie zmienia swego położenia. Centrowanie nowego teodolitu sprowadza się w zasadzie do ustawienia w przestrzeni tylko jednego centralnego punktu P , który pokrywa się ze środkiem P_s powierzchni kulistej spodarki (rys. 8). W wypadku prowadzenia pomiarów kontrolnych, przy użyciu nowego teodolitu, wystarczy spodarkę ustawić na słupie obserwacyjnym, wyposażonym w odpowiednie elementy stabilizacyjne, aby centralny punkt P_s każdorazowo zajął to samo położenie. Jeżeli zachodzi potrzeba przesunięcia punktu P_s np. do położenia P_{s1} na pionowej linii $N-Z$, to można to osiągnąć



Rys. 8. Schemat centrowania spodarki: P_s — środek krzywizny spodarki, R_1, R_2 — promienie łuków, po których może się przesuwać punkt P_s , T_1, T_2 — przykładowe punkty obrotu spodarki

nać zarówno przez przesuwanie instrumentu po głowicy statywu, jak również przez nachylanie spodarki względem punktu np. T_1 lub T_2 . Kontrolowanie stanu centrowania odbywa się przy wykorzystaniu lunety, ustawionej pionowo. Środek siatki pomiarowej lunety powinien znajdować się wtedy na wprost punktu N lub Z . W ten sposób pionowe celowe PN lub PZ otrzymają taką samą rangę jaką posiadają wszystkie inne celowe.

Opisana konstrukcja teodolitu spełnia również rolę pionownika nadir — zenit. Nowy teodolit może mieć szczególne zastosowanie przy geodezyjnej obsłudze smukłych obiektów, takich jak: kominy, chłodnie kominowe itp. Centrowania teodolitu nad punktem N , na różnych wysokościach wznoszonej budowli, można dokonywać precyzyjnie w linii pionowej bez potrzeby używania pionowników.

4. Zestawienie wyników analiz i wnioski

W rozdziałach 2 i 3 podano wzory, na podstawie których można obliczyć teoretyczne wielkości podstawowych błędów instrumentalnych dla poszczególnych układów geometrycznych i kinematycznych teodolitu.

Tablica 1

Lp.	Rodzaj błędów instrumentalnych i ich oznaczenie	Wielkość błędów dla TK	Wielkość błędów dla TN	Współczynnik $\eta = \frac{TK}{TN}$
1	Błąd pochylenia osi obrotu alidady w czasie pionowania teodolitu (γ_1)	22,9	³⁾ 4,0	5,7
2	Błąd pochylenia osi obrotu alidady w czasie obrotu łożyska pionowego (γ_2)	9,17	1,5	6,1
3	Poprzeczne przesunięcie punktu P w czasie obrotu łożyska pionowego (r)	0,0059 mm	0,00096 mm	6,2
4	Mimośród kątomierza pionowego (e)	0,00089 mm	0,00015 mm	5,9
5	Błąd pomiaru kąta poziomego spowodowany mimośrodem e ($\Delta\beta$)	4,58	0,75	6,1

³⁾ Podwójna wartość błędu poziomicy alidady

W tablicy 1 zestawiono wielkości tych błędów w takim układzie by poszczególne błędy dla teodolitu konwencjonalnego — TK mogły być porównane z odpowiednimi błędami nowego teodolitu — TN. Wynik porównania podano w postaci współczynnika η , który przedstawia stosunek błędów TK do błędów TN. Wielkość błędów obliczono na podstawie danych, które odpowiadają realnym wartościom konstrukcyjnym.

Na podstawie oceny współczynnika η widać, że we wszystkich wypadkach teoretyczna dokładność nowego układu geometrycznego i kinematycznego teodolitu jest około sześciokrotnie większa od dokładności odpowiedniego układu teodolitu konwencjonalnego. Tak znaczna poprawa dokładności teodolitu jest możliwa do osiągnięcia przede wszystkim dzięki korzystniejszemu ukształtowaniu odcinków wyznaczających podstawowy układ osiowy i dzięki unieruchomieniu punktu przecięcia się tych osi.

Wyniki pracy wskazują, że rozszerzenia funkcjonalności i zwiększenia sprawności teodolitu należy szukać jedynie na drodze nowych rozwiązań konstrukcyjnych, natomiast podwyższenie dokładności działania teodolitu może być osiągnięte zarówno w wyniku nowych rozwiązań, jak również przez poprawę jakości jego części składowych i przez zwiększenie staranności ich montażu.

LITERATURA

- [1] Chalecki J.: *Przyrządy optyczne*. Konstrukcja mechanizmów. WNT, Warszawa 1979.
- [2] Fialovszky L.: *Wpływ błędu układu osiowego teodolitu na pomiar kątów poziomych*. Geodezja i Kartografia, T. III z. 4. 1954.
- [3] Haller R.: *Theodolite Axis Systems — Their Design, Manufacture, and Precision*. Surveying and Mapping. Vol. XXIII, No 4, 1963.
- [4] Odlanicki-Poczobutt M.: *Geodezja*. T. I. Skrypty uczelniane. Kraków AGH. 1979.
- [5] Scheufele H.: *Funktion und Genauigkeit der Bauelemente der Achssysteme von THEO 010A, THEO 020A und DAHLTA 010A*. Vermessungs Informationen Nr 30, 1975.
- [6] Szymoński J.: *Instrumentoznawstwo geodezyjne* tom I, II i III. Warszawa, PPWK 1954—1972.
- [7] Smółka M.: *Koncepcja nowego rozwiązania układu kinematycznego teodolitu z punktu widzenia wymagań pomiarów geodezyjnych*. Praca doktorska wykonana w Instytucie Geodezji i Kartografii, Warszawa, 1980.
- [8] Smółka M.: *Teodolit*. Zgłoszenie patentowe PRL nr P-212754.
- [9] Tatarczyk J.: *Wybrane zagadnienia z instrumentoznawstwa geodezyjnego*. Skrypty uczelniane AGH. Kraków 1978.

МЕЧИСЛАВ СМУЛКА

КОНЦЕПЦИЯ РЕШЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ
И КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ТЕОДОЛИТА

Резюме

Проведенный в работе анализ геометрической и кинематической системы теодолита сводится в принципе к анализу системы отрезков и точек, определяющих основную осевую систему теодолита. Полученные результаты указывают, что в классическом теодолите пункт пересечения трех инструментальных осей, а тем самым вершины измеряемых и определяемых углов, изменяют свое положение как во время вертикального проектирования теодолита, так и во время измерения и определения углов. Главными источниками этих изменений являются: трехконечник (трегер) и вертикальный подшипник.

В результате рассмотрения предложено новое решение геометрической и кинематической системы теодолита. Новая система дает теоретически в шесть раз меньше инструментальные ошибки по сравнению с анализируемой классической системой. Столь значительное повышение точности получено благодаря более выгодной системе отрезков, определяющих три основные инструментальные оси, а также благодаря блокировке (арретированию) точки пересечения этих трех осей.

В предлагаемом решении точка пересечения трех основных осей стала неподвижной и центральной точкой кинематической системы теодолита. Новое решение не только увеличивает точность теодолита, но также расширяет функциональность, и увеличивает эффективность этого инструмента. Новая геометрическая и кинематическая система теодолита, снабженная сферическим трегером, придала этому теодолиту черты инструмента с компенсатором.

Запроектирование в новом теодолите зрительной трубы, состоящей из двух частей, и больших отверстий в алидаде и в трегере, разрешает измерять вертикальные углы не только относительно горизонтальной плоскости, но также относительно вертикального направления. Такой теодолит может выполнять также роль проектира направления. Существенным достоинством нового решения, по сравнению с классическим решением, является отделение функции вертикального проектирования от функции центрирования.

Результаты работы показывают, что расширение функциональности и увеличение эффективности теодолита следует искать единственно путем новых конструкторских решений, а повышение точности действия теодолита может быть достигнуто как в результате новых решений, так и путем улучшения качества его составных частей, а также путем повышения тщательности их монтажа.

Перевод: Róża Tołstikowa

*MIECZYŚLAW SMÓŁKA*CONCEPT FOR THE SOLUTION OF GEOMETRIC AND KINEMATIC
SYSTEM OF A THEODOLITE

Summary

The analysis of geometric and kinematic system of theodolite, carried out in the elaboration, is in principle resolved to analysis of sections and points configuration, determining the fundamental axes system of the theodolite. The obtained results indicate, that in the classical theodolite the cross section of three instrumental axes, and thereby the vertices of measured and determined angles, change their location during the levelling of the instrument, as well as during the measurement and determination of angles. The main sources of these changes are: tripod levelling head and vertical bearing.

As the result of considerations, the new geometric and kinematic system of theodolite has been proposed. This new system, theoretically, gives six times less instrumental errors, comparing to the analyzed classical system. So high increase in accuracy has been obtained owing to more profitable system of sections determining the three basic axes of instrument and fixing the cross section of these three axes.

The cross section of the three fundamental axes of theodolite, has become the central and stable point of the kinematic system of the instrument, in the proposed solution. This solution not only increases the accuracy of theodolite, but also enlarges the functioning and efficiency of this instrument. The new geometric and kinematic system of theodolite, equipped with spherical levelling head, has given this theodolite the features of self-levelling instrument.

The designing of the two-part telescope in the new theodolite, as well as large holes in alidad and levelling head, allows to measure the vertical angles, referring not only to the horizontal plane, but also to the horizontal direction. Such theodolite can also work as a plumbing instrument.

Comparing to the classical solution, the substantial advantage of the new one, is separation of the levelling and centering functions.

The results of presented work indicate, that enlargement of functioning and efficiency of theodolite, can be reached only by elaboration of new solutions in construction, but the increase in accuracy of the theodolite can be realized by new solutions and by increase of quality of its parts and fitting up carefulness.

Translation: Jacek Domański