

WOJCIECH JANUSZ

528.482

Zagadnienie automatycznego wyznaczania odkształceń budowli przy pomocy modelu konstrukcji geodezyjnej w postaci stałej instalacji zespołu urządzeń pomiarowych

SPIS TREŚCI

	str.
I. Wstęp	130
II. Osnowa geodezyjna w postaci zespołu różnych typów sieci geodezyjnych. Zależności funkcyjne, sposoby obliczania składowych przesunięć, elementy analizy dokładności	139
III. Idea urządzeń odtwarzających zmiany długości, warunki pracy urządzeń	158
IV. Idea zespołu urządzeń odtwarzających zmiany strzałek, warunki pracy urządzeń	168
V. Opis prototypu zespołu urządzeń odtwarzających zmiany strzałek i długości w ciągu poligonowym	173
VI. Urządzenia do pomiaru liniowych zmian położenia drutu lub kreski wskaźnika założonego na drut	181
VII. Idea urządzenia służącego do rejestracji liniowych zmian położenia drutu lub kreski wskaźnika	188
VIII. Opis wykonanych badań i analiza wyników	194
1. Badania dokładnościowe pomiaru zmian strzałek	
2. Badania dokładnościowe pomiaru zmian długości	
3. Badanie zmian długości drutów pod wpływem długotrwałego obciążenia	
4. Próby rejestracji liniowych zmian położenia drutu	
5. Próby zastosowania maszyny cyfrowej UMC-1 do obliczania składowych przesunięć punktów sieci kontrolnych	
6. Próby wyznaczania zmian długości boku poligonowego ds za pośrednictwem pomiaru zmian strzałki zwisu drutu o utwierdzonych końcach	
IX. Wnioski	228
Literatura	281

WYKAZ ZASTOSOWANYCH OZNACZEŃ

s — długość boku, długość cięciwy.

l — długość drutu, długość krzywej zwisu (lub ogólne oznaczenie wyniku obserwacji geodezyjnej)

dx, dy — składowe przesunięć przy błędnym dostosowaniu

$\underline{dx}, \underline{dy}$ — składowe przesunięć przy prawidłowym dostosowaniu

β — kierunek mierzony od kierunku osi OX w lewo (względnie od kierunku zerowego)

β — transformacyjny współczynnik zmiany skali $\frac{ds}{s}$

γ — kąt

h — strzałka (wysokość trójkąta)

f — strzałka zwisu drutu (f' — strzałka wyboczenia drutu)

q — ciężar 1 mb drutu w kG

H — siła naciągu drutu w kG

σ — naprężenie drutu w $\frac{kG}{mm^2}$

F — powierzchnia przekroju poprzecznego drutu w mm^2

G — ciężar właściwy w $\frac{G}{cm^3}$ (również graniczna wielokrotność błędu średniego przyjęta $G = 2$)

E — moduł sprężystości podłużnej w $\frac{kG}{mm^2}$

d — średnica drutu w mm

P — obciążenie podstawowe wiatrem $\frac{kG}{m^2}$

α — kąt między kierunkiem wiatru i drutu (lub wsp. rozszerz.)

α — transformacyjny współczynnik zmiany orientacji

R — promień zwoju drutu w cm

r — promień walca linii śrubowej w cm

q_1 — jednostkowe obciążenie drutu wiatrem $\frac{kG}{mb}$

V — szybkość wiatru w $\frac{m}{sek}$

Q — współczynnik względnego wydłużenia drutu w $\frac{1}{100 \text{ dni}}$

t — temperatura

T — moment czasu obserwacji lub rejestracji

δ — kąt obrotu

I. Wstęp

W miarę zwiększania się zakresu zastosowania geodezyjnych pomiarów odkształceń powstaje w tej dziedzinie coraz więcej problemów, które wymagają naświetlenia i rozwiązania. W niniejszej pracy pragnę zająć się bliżej niektórymi konkretnymi sposobami rozwiązania zadań technicznych, wynikających z następujących problemów:

1) Uniezależnienie możliwości wykonania pomiarów od warunków atmosferycznych.

2) Wyznaczanie odkształceń trudno dostępnych fragmentów budowli.

3) Możliwość zwiększenia szybkości wykonania pojedynczego cyklu pomiarowego.

4) Możliwość zwiększenia częstości powtarzania cykli pomiarowych.

5) Możliwość wykonania części prac pomiarowych przez personel niegeodezyjny.

Omówienie problemu pierwszego

Momenty rozpoczęcia poszczególnych cykli obserwacyjnych powinny być uzależnione od wymagań ustalonych z uwzględnieniem sposobu eksploatacji badanej budowli i okresów zachodzenia zjawisk wpływających na powstawanie odkształceń. Termin wykonania obserwacji nie może być przeto uzależniony od panujących aktualnie warunków atmosferycznych lub innych czynników np. natury organizacyjnej. Tym samym metody pomiaru winny być tak opracowane, aby można go było wykonać w dowolnym żądanym terminie bez zasadniczych różnic w wartościach wyników i w stopniu trudności pracy. Postulat ten jest — jak wiadomo — niezwykle trudny do zrealizowania. Interesujące może tu być dążenie do wykorzystania wnętrza badanej budowli dla pomieszczenia niektórych znaków pomiarowych osnowy kontrolnej¹⁾ i dla wykonania dużej części prac pomiarowych.

Omówienie problemu drugiego

Usytuowanie punktów osnowy kontrolnej na badanym obiekcie lub w jego wnętrzu winno zabezpieczać możliwość prawidłowej oceny ruchu całego obiektu za pośrednictwem wyznaczonych ruchów tych punktów. Zasady rozmieszczenia punktów osnowy kontrolnej są odrębne dla obiektów różnego typu i niewątpliwie są dotychczas ustalane jako wynik kompromisu pomiędzy potrzebami oceny ruchu budowli a możliwościami pomiarowymi. Metody geodezyjne powinny zabezpieczać możliwość wyznaczania ruchu punktów usytuowanych niekiedy w miejscach o bardzo utrudnionym dostępie. Czynniki ten w zasadniczy sposób wpływa na wybór metody geodezyjnej i związanej z nią konstrukcji osnowy kontrolnej.

Do chwili obecnej osiągnięto największy zasób doświadczenia w zakresie wykorzystania do pomiarów odkształceń metod geodezyjnych:

¹⁾ Przez osnowę kontrolną rozumiem tu zespół sieci geodezyjnych lub pojedynczą sieć, której znaki znajdują się na badanym obiekcie lub w jego wnętrzu (znaki o wyznaczanym ruchu) oraz poza obiektem (z których część musi pozostawać względem siebie nieruchoma). Od osnowy wymaga się, aby jej konstrukcja geometryczna umożliwiała wyznaczanie zmian wzajemnego położenia znaków pomiarowych na podstawie zaobserwowanych zmian wielkości mierzonych.

trygonometrycznej i uszeregowania punktów dla badania przesunięć poziomych oraz niwelacji geometrycznej dla wyznaczania osiadań. Ograniczając się w niniejszej pracy jedynie do problemów związanych z wyznaczaniem poziomych składowych odkształceń budowli powiemy, że z uwagi na występującą często konieczność wykonania pomiarów w miejscach niedostępnych dla metody trygonometrycznej i uszeregowania punktów, celowe jest wzięcie pod uwagę również metody poligonowej oraz nietypowych konstrukcji jak np. siatki liniowej i łańcucha trójkątów lub czworoboków.

Umieszczenie części znaków osnowy kontrolnej wewnątrz badanej budowli jest niekiedy jedynym możliwym rozwiązaniem (tunele, szyby i wszelkie inne budowle i urządzenia podziemne), zaś w innych przypadkach może się okazać bardzo korzystne. Na przykład przy badaniu odkształceń zapór wodnych dotychczas główny nacisk był kładziony na instalowanie znaków pomiarowych o wyznaczanym ruchu (w postaci celowników dla obserwacji trygonometrycznych) na zewnętrznej, odpowiedniej stronie muru zapory i na jej koronie, natomiast pomiary w sztolniach i szybach ograniczano do obserwacji służących do określania ruchów względnych (wahadła, szczelinomierze, klinometry). Należy podkreślić, że były wykonywane próby pomiaru ciągów poligonowych w sztolniach zapór, lecz jak dotychczas nie znalazły one większego uznania, prawdopodobnie wskutek występowania wpływów refrakcyjnych zniekształcających wyniki pomiarów optycznych oraz wskutek niezbyt dużego doświadczenia i umiejętności podejścia do interpretacji geodezyjnej osiąganych wyników. Ponadto odczuwa się brak sposobów kompleksowego wykorzystania takich ciągów w połączeniu z innymi — zewnętrznymi fragmentami osnowy kontrolnej.

Wydaje się, że umieszczenie części znaków osnowy kontrolnej wewnątrz budowli może posiadać w tym przypadku istotne walory również natury interpretacyjnej, bowiem ruch znaków zastabilizowanych na zewnętrznej powierzchni zapory jest zapewne spowodowany zarówno odkształceniem się jej korpusu pod wpływem zmiennych obciążeń jak i powierzchniowo działającym wpływem zmienności temperatury powietrza.

Omówienie problemu trzeciego

Pomiar odkształceń polega na wielokrotnym powtarzaniu cykli obserwacyjnych osnowy kontrolnej. Przez odkształcenia lub przesunięcia rozumie się zmiany położenia niektórych znaków osnowy kontrolnej, wynikające ze zmian położenia fragmentów budowli i warstw gruntu lub skał w których zostały zastabilizowane. Odpowiednie więc różnice wyników obserwacji wykonanych w poszczególnych cyklach umożliwiają określenie odkształceń obiektu. Teoretycznie należałoby wymagać, aby

pojedynczy cykl pomiarowy odbywał się w określonym momencie czasu, bowiem wtedy istniałaby pewność, że wyniki pomiaru nie są obciążone błędami spowodowanymi przez zmiany położenia poszczególnych znaków w czasie trwania cyklu. Wówczas też możliwe jest określenie wielkości odkształceń całego obiektu, jakie istniały w jednym określonym momencie.

W praktyce szybkość wykonania cyklu pomiarowego winna być tak dobrana, aby ewentualne ruchy znaków osnowy, zachodzące w czasie jego trwania, nie osiągały wielkości uchwytnie zwiększających błędy pomiaru w stosunku do wielkości błędów uzyskiwanych daną metodą pomiarową w warunkach całkowitej nieruchomości znaków. Trudność korzystania z takiej zasady polega na tym, że w większości przypadków nie potrafimy przewidzieć szybkości ruchu znaków a ponadto może ona być zmienna w zależności od zmienności czynników powodujących odkształcanie. Wynika stąd potrzeba bliższego poznania przebiegu zachodzenia odkształceń w funkcji czasu. Do tego celu konieczne byłoby dysponowanie metodami pomiarowymi przyspieszającymi cykl pomiarowy nieomal nieograniczenie.

Omówienie problemu czwartego

Poszczególne cykle pomiarowe — przy założeniu, że szybkość ich wykonania jest dobrana właściwie — pozwalają na wyznaczenie położeń znaków osnowy w średnim momencie okresu wykonania. Jeśli weźmiemy pod uwagę dwa porównywane cykle pomiarowe, to stwierdzone na ich podstawie różnice położeń znaków określają stan w momencie średnim cyklu aktualnego w stosunku do stanu w momencie średnim cyklu poprzedzającego. Oczywiście wielkości stwierdzonych przesunięć nie informują nas o tym, jakie ruchy znaków osnowy zachodziły w przedziale czasu pomiędzy średnimi momentami kolejnych cykli pomiarowych. W przypadku jednak, gdy przedział ten będzie dostatecznie mały i warunki środowiska nie będą się zmieniały w sposób gwałtowny, możemy na drodze interpolacji uzyskać wiarygodną informację o zachowaniu się znaków w okresach czasu pomiędzy cyklami pomiarowymi. Odstępy czasu między cyklami winny więc zależeć od przewidywanej szybkości ruchu znaków. Dla uzyskania ciągłego i jednocześnie wiarygodnego obrazu ruchu znaków w funkcji czasu należałoby stosować takie odstępy czasu między cyklami pomiarowymi, aby przy określonej szybkości ruchu znaków, wielkość tych ruchów we wspomnianych odstępach nie mogła zbyt- nio przekroczyć granicznych błędów wyznaczenia. Jednocześnie może się okazać niecelowe zbyt- nie zmniejszanie odstępów czasu między kolejnymi cyklami pomiarowymi, bowiem zachodzące wówczas ruchy mogą

być nieuchwytne co do wielkości (zmiana położenia w granicach dokładności wyznaczenia).

Korzystne byłoby dysponowanie metodami geodezyjnymi o bardzo krótkich cyklach pomiarowych, możliwych do bardzo częstego powtarzania. Przy wykorzystaniu takich metod możnaby doraźnie wyznaczyć dla danego obiektu najwłaściwszą szybkość i częstotliwość wykonania pomiarów i stosownie do tego określić najwłaściwszą metodę stałego badania obiektu.

Należy dodać, że w praktyce stosuje się dwa rodzaje geodezyjnego wyznaczania odkształceń. Można mianowicie wykonywać pomiary i opracowanie mające na celu wyznaczenia bezwzględnych wartości odkształceń (w odniesieniu do znaków nieruchomych względem siebie) lub też stosować program badań ograniczający się do wyznaczania ruchów względnych poszczególnych mniejszych lub większych fragmentów budowli. Najszerzej stosowany jest system częstego wykonywania pomiarów mających na celu wyznaczenie ruchów względnych w bardzo ograniczonym zakresie — charakteryzującym się zmianami wzajemnego położenia kilku punktów (wahadła, szczelinomierze, klinometry). Pomiary te mają na celu wczesną informację o nieoczekiwanym zachowaniu się budowli, wymagającym zabezpieczenia lub zmiany sposobu eksploatacji a także wykonania nadprogramowo pełnych cykli obserwacji hydrotechnicznych, geologicznych, geodezyjnych i innych. Taki sposób traktowania zagadnienia nie zabezpiecza przed pominięciem, (niedostrzeżeniem) pewnych niekorzystnych cech zachowania się obiektu jak np. równoległego przesunięcia całego fragmentu budowli wraz z podłożem. Należałoby rozważyć, czy nie jest możliwe bardzo częste wyznaczanie ruchów względnych całej budowli na podstawie częstego powtarzania pomiaru części osnowy kontrolnej pomieszczonej wewnątrz budowli. Moznaby tu opracować program częstego powtarzania obserwacji wewnętrznej części osnowy kontrolnej a w większych odstępach czasu wykonywać pełny cykl pomiarowy, uwzględniający również potrzebę nawiązania się do nieruchomych znaków osnowy czyli tak zwanych punktów stałych.

Z uwagi na charakter prac pomiarowych wykonywanych dla celów wyznaczania odkształceń — mających znaczenie informacyjne o ewentualnych stanach przedawaryjnych — celowe jest prócz opracowania metod pomiarowych o krótkich i często powtarzalnych cyklach, opracowanie metod szybkiego obliczania i przedstawiania wyników oraz podawania tych wyników do wiadomości kierownictw badanych obiektów.

Omówienie problemu piątego

Rozpatrując zagadnienia związane z potrzebą możliwie szybkiego i częstego wyznaczania odkształceń budowli stajemy przed problemem

znalezienia do tych prac odpowiednio dużej liczby wykwalifikowanych wykonawców.

Ze względów natury organizacyjnej należy się liczyć z faktem, że rozszerzenie zakresu pomiarów i ich częstotliwości nawet w przypadku znikomej pracochłonności poszczególnych cykli będzie wymagało częściowego przerzucenia ciężaru wykonania tych prac z wyspecjalizowanych jednostek służby geodezyjnej na załogi eksploatujące badane obiekty. Te czynniki wskazują na potrzebę opracowania metod i urządzeń pomiarowych umożliwiających szybkie i częste powtarzanie cykli pomiarowych przy jednoczesnym jak największym uproszczeniu tych czynności pozwalającym na osiąganie pełnowartościowych wyników nawet przez osoby nie posiadające doświadczenia w zakresie wykonywania pomiarów. Osoby te powinny wyróżniać się rzetelnością i poczuciem odpowiedzialności, co jest niezbędną cechą umożliwiającą wykonywanie jakichkolwiek prac pomiarowych.

Z powyższych, krótkich omówień wymienionych uprzednio problemów wynika potrzeba opracowania metod wyznaczania odkształceń, które mogą spełnić następujące postulaty:

1. Przeniesienie możliwie dużej części prac pomiarowych do wnętrza badanej budowli,
2. Możliwie jak najkrótsze w czasie cykle pomiarowe,
3. Wystarczająca dokładność wyznaczania odkształceń (w zasadzie nie mniejsza od możliwej do uzyskania przy wykorzystaniu metod obecnie stosowanych),
4. Możliwa do uzyskania wysoka częstotliwość pomiarów,
5. Możliwie jak najszybsze opracowanie wyników, licząc od momentu zakończenia każdego cyklu pomiarowego,
6. Możliwie jak najwyższa prostota wykonania prac pomiarowych.

Można postawić tezę, że dla całkowitego spełnienia powyższych postulatów konieczna jest automatyzacja wyznaczania odkształceń, zaś jej wprowadzenie wymaga:

- a) Opracowania projektu fizycznego modelu konstrukcji pomiarowej, działającego w sposób ciągły. Model ten posiada zadanie odtwarzania zachodzących zmian wielkości podlegających pomiarowi w sposób ciągły i jednocześnie wygodny dla pomiaru względnie rejestracji.
- b) Opracowania projektu urządzeń pomiarowych i rejestracyjnych dla zaobserwowania lub zarejestrowania odtworzonych wielkości i ich zmian.
- c) Opracowanie metod i programów umożliwiających obliczanie składowych przesunięć punktów osnowy z wykorzystaniem maszyny elektronicznej.

W praktyce spotyka się urządzenia odtwarzające, pracujące w sposób ciągły. Można tu wymienić np. wahadła stosowane do badania zmian pochylenia poszczególnych bloków zapory wodnej. Opracowanie modelu konstrukcji pomiarowej wymaga z jednej strony zbudowania urządzeń odtwarzających zmiany kątów, długości itp. zaś z drugiej strony — powiązania tych urządzeń w jednolitą całość, w sposób umożliwiający opracowanie wyników ich wskazań jako wielkości funkcyjnie ze sobą związanych i wyrażonych w jednolitym układzie współrzędnych.

Wydaje się, że opracowanie fizycznego modelu konstrukcji geodezyjnej jest w chwili obecnej zasadniczym zadaniem na drodze do automatyzacji wyznaczania odkształceń, natomiast zagadnienia urządzeń rejestrujących i liczących, jakkolwiek niełatwe i być może bardziej kosztowne — są zagadnieniami adaptacji urządzeń stosowanych do innych celów technicznych. Należy podkreślić, że samo zbudowanie modelu konstrukcji geodezyjnej pracującego w sposób ciągły (nawet z pominięciem dalszych czynników koniecznych do pełnej automatyzacji) może się w praktyce okazać korzystne, bowiem stanowi jakby „półautomatyzację” procesu wyznaczania odkształceń i może być wykorzystane dla obserwacji za pomocą urządzeń pomiarowych. Przy opracowaniu modelu konstrukcji pomiarowej należy przeto przewidzieć możliwość zastosowania zarówno urządzeń pomiarowych jak i rejestrujących. Należy ponadto brać pod uwagę przewidywane warunki pracy urządzeń odtwarzających. W tym miejscu podkreślę potrzebę współpracy z projektantem budowli mającą na celu wspólne ustalenie możliwości zrealizowania w projekcie pewnych wymagań jakie stawiają urządzenia pomiarowo-kontrolne, zaś z drugiej strony dostosowanie projektu urządzeń pomiarowo-kontrolnych do budowli już w fazie jej projektowania.

Zanim przystąpię do zasadniczego tematu niniejszego opracowania pragnę podkreślić kilka momentów posiadających poważne znaczenie dla dalszych wywodów.

1. Zasadniczą cechą pomiarów odkształceń, odróżniającą je od pomiarów geodezyjnych wykonywanych dla innych celów jest potrzeba wyznaczania zmian wielkości obserwowanych, odpowiadających zachodzącym odkształceniom, bez konieczności wyznaczania najbardziej prawdopodobnych wielkości obserwowanych. Jako przykład może tu posłużyć stosowana zasada pomiaru kierunków w każdej serii i każdym cyklu pomiarowym przy jednakowym ustawieniu limbusa i na tej samej części mikrometru. Takie postępowanie prowadzi każdorazowo do wyznaczania nieco zniekształconych wielkości kierunków (z uwagi na błędy podziału koła i mikrometru) lecz zmiany wielkości kierunków są wówczas wyznaczone dokładniej aniżeli przy normalnie sto-

sowanych sposobach pomiaru. Ta cecha może w poszczególnych przypadkach przyjmować jeszcze bardziej odrębny charakter, wyrażający się w możliwości zaniedbania wyznaczania wielkości a poprzestaniu na wyznaczaniu jedynie zmian wielkości. Na przykład, aby wyznaczyć wynikającą z odkształcenia zmianę odległości dwu bliskich siebie punktów zastabilizowanych na budowli, możemy zastosować przyrząd pomiarowy w postaci czujnika przymocowanego do pręta o długości w przybliżeniu równej wzajemnej odległości wspomnianych punktów. Przyrząd ustawia się w ten sposób, że jeden koniec pręta wspiera się jednoznacznie o jeden punkt zaś nóżka czujnika o drugi (przyrząd jest wstawiony pomiędzy badane punkty). O zmianie wzajemnej odległości punktów informują nas zmiany odczytu czujnika. Długość pręta nie musi być w tym przypadku wyznaczona dokładnie a jedynie z przybliżeniem umożliwiającym wstawienie przyrządu pomiędzy badane punkty i wykorzystanie zakresu pomiarowego czujnika. Należy podkreślić, że wzamian dokładnego pomiaru odległości (wielkości) zachodzi potrzeba posiadania gwarancji niezmienności stanu przyrządu pomiarowego lub posiadania informacji umożliwiających wprowadzenie odpowiednich redukcji. W konkretnym, omówionym przykładzie należy między innymi uwzględnić w postaci redukcji przewidywane zmiany długości pręta pod wpływem zmian temperatury, wygięcia itp.

2. Odkształcanie się budowli może polegać na jednocześnie występującym ruchu postępowym i obrotowym poszczególnych fragmentów budowli. O wielkości i charakterze ugięć i przesuwu poszczególnych fragmentów konstrukcji można sądzić na podstawie wyznaczonych składowych ruchu postępowego szeregu znaków geodezyjnych, zastabilizowanych w określonych miejscach konstrukcji. Wobec możliwości występowania obrotów konstrukcji i zastabilizowanych na niej znaków geodezyjnych, budowa tych ostatnich oraz urządzeń pomiarowych winna przewidywać potrzebę uzyskiwania informacji o wielkości ruchu postępowego bez zakłóceń wewnętrznej zgodności zaobserwowanych zmian w granicach praktycznie wyczuwalnych a spowodowanych obrotami. Wpływ drobnych obrotów znaków na konstrukcję urządzeń odtwarzających i pomiarowych będzie dalej szczegółowo rozważony.

3. Jak już uprzednio stwierdziliśmy — wyznaczanie odkształceń opiera się na analizie różnic wyników powtarzanych obserwacji wielkości określonych w terenie przez znaki osnowy kontrolnej. Należy dodać, że różnice wyników pomiarów są funkcją zmian wielkości mierzonej, zmian stanu przyrządów pomiarowych i warunków obserwacji oraz błędów pomiarowych. W związku z tym przy badaniu dokładnościowym metod po-

miarowych odróżniamy dwa rodzaje dokładności określanych zmian wyników:

- 1) Dokładność pozorna różnicy wyników pomiarów,
- 2) Dokładność faktyczna różnicy wyników pomiarów.

Dokładność pozorna wynika tylko z błędów pomiaru pierwotnego i aktualnego zaś faktyczna uwzględnia również wpływy zmiany stanu przyrządów pomiarowych lub zmiany wyników obserwacji spowodowane zmianami stanu warunków obserwacji. Na przykład przy badaniu dokładnościowym wyznaczania zmian kierunków należy pamiętać o wpływie zmian stanu teodolitu (szczególnie w przypadkach dokonywania konserwacji w okresie czasu pomiędzy pomiarami), wpływ różnego oświetlania celu przy każdej obserwacji, sposobu oświetlania kół podziałowych i mikrometru itp.

Naogół miarą dokładności pozornej są błędy średnie obliczone na podstawie wewnętrznej zgodności wyników na stanowisku pomiarowym (np. na podstawie zestawienia stacyjnego kierunków). Miarą dokładności faktycznej mogą być przy pracach badawczych błędy rzeczywiste różnic zaś przy pracach noszących charakter „produkcyjny” błędy średnie typowego spostrzeżenia, obliczone po wyrównaniu osnowy (w przypadku, gdy osnowa zawiera dostatecznie dużą liczbę obserwacji nadliczbowych aby można było uważać tak obliczone błędy za miarodajne dla oceny faktycznej dokładności wyznaczenia różnic wyników).

Opracowanie niniejsze poprzedzone zostało krótką publikacją opisującą pierwszy prototyp urządzeń do pomiaru zmian strzałek w ciągu poligonowym przy wykorzystaniu drutów oraz podającą wyniki pierwszej fazy przeprowadzonych badań dokładnościowych. Wspomniana publikacja pt. „Próby opracowania metody odkształceń wydłużonych budowli przy wykorzystaniu ciągów poligonowych i specjalnej aparatury pomiarowej” [30] wyprzedziła o niespełna pół roku publikację C. E. Marfenki pt. „Opyt vysokotocznych geodezических работ при монтаже протонного синхротрона” [31], zawierającą opis precyzyjnego pomiaru strzałek przy wykorzystaniu drutów. Porównanie wyników obu badań okazało się bardzo interesujące i utwierdziło autora w przekonaniu o możliwości uzyskania na rozpatrywanej drodze dokładniejszych wyników aniżeli przy wykorzystaniu metod optycznych. Również publikacja [32], która ukazała się w końcowym okresie opisanych tu badań stanowi pewne potwierdzenie celowości stosowania drutów pomiarowych dla określania zmian długości boków poligonowych, mających związek z wzajemnym przemieszczaniem się punktów.

Na tym miejscu pragnę gorąco podziękować prof. dr Tadeuszowi Lazzariniemu za zainteresowanie mnie problemami związanymi z geodezyjnym wyznaczaniem odkształceń oraz za sprawowaną nad moimi poczynaniami opiekę naukową oraz prof. dr Jerzemu Gomoliszewskiemu i prof. dr Stefanowi Hausbrandtowi za udzielone cenne rady i uwagi. Pragnę również podziękować Dyrektorowi doc. Stanisławowi Kryńskiemu za umożliwienie praktycznego przeprowadzenia badań oraz mgr inż. Igorowi Dejniczowi za udzielenie daleko idącej pomocy przy wykonaniu badań przeprowadzonych w Głównym Urzędzie Miar.

Ponadto pragnę podziękować Kolegom, którzy wnieśli poważny wkład w wykonanie niniejszej pracy a w szczególności inż. Stefanowi Zykubkowi za udział w żmudnych badaniach eksperymentalnych oraz inż. Mieczysławowi Smółce za udzielone konsultacje przy projektowaniu urządzeń, wykonanie dokumentacji konstrukcyjnej oraz kierowanie wykonaniem prototypów urządzeń.

II. Osnowa geodezyjna w postaci zespołu różnych typów sieci geodezyjnych. Zależności funkcyjne, sposoby obliczania składowych przesunięć, elementy analizy dokładności

Na podstawie wyznaczonych w drodze rejestracji lub obserwacji zmian wielkości geodezyjnych jak kąty, kierunki, długości itp. możemy wyznaczyć zmiany liniowe wzajemnego położenia punktów osnowy kontrolnej, wyrażone np. w układzie współrzędnych prostokątnych płaskich OXY. W tym celu korzystamy z następujących zależności między drobnymi (różniczkowymi) zmianami wielkości geodezyjnych — obserwowanych lub rejestrowanych — a zmianami składowych położenia punktów, określających te wielkości w terenie.

a) *Zależność między drobną zmianą wielkości kąta $d\gamma$ a zmianami współrzędnych: wierzchołka kąta C oraz końców jego ramion L, P (rys. 1).*

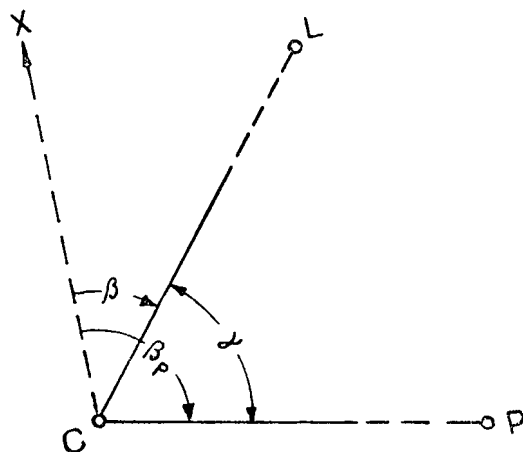
$$B_{CL} dx_L - A_{CL} dy_L - B_{CP} dx_P + A_{CP} dy_P - (B_{CL} - B_{CP}) dx_C + (A_{CL} - A_{CP}) dy_C = d\gamma \quad (1)$$

$$\text{gdzie: } A = \frac{\Delta x \cdot \varrho}{\Delta x^2 + \Delta y^2}, \quad B = \frac{\Delta y \cdot \varrho}{\Delta x^2 + \Delta y^2}$$

b) *Zależność między drobną zmianą wielkości strzałki dh a zmianami współrzędnych: początku strzałki C, końców cięciwy L, P.*

Wyprowadzenie tej zależności poprzedzę kilkoma wyjaśnieniami. Wielkości kątów i ich zmiany można wyznaczyć poprzez bezpośredni pomiar teodolitem lub też za pośrednictwem niektórych elementów linio-

wych w trójkącie zawierającym wspomniany kąt. W niektórych przypadkach, w zastosowaniu do pomiarów odkształceń, pomiar kątów jest korzystnie zastąpić pomiarem strzałek, to jest wysokości h trójkąta o wierzchołkach L, C, P , którego podstawą jest bok L, P . Sposób wyzna-



Rys. 1

czenia za pośrednictwem zmian strzałek jest korzystny szczególnie w przypadkach, gdy strzałka jest mała w stosunku do długości ramion kąta (gdy kąt wierzchołkowy trójkąta o wierzchołku w punkcie C jest zbliżony do 180°).

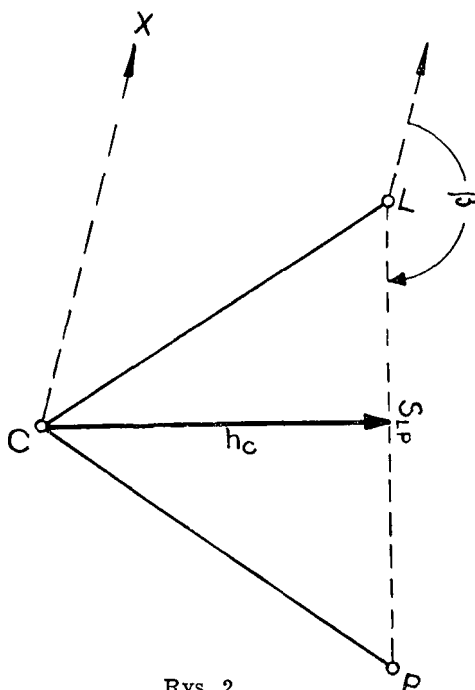
Jak wiadomo — pomiar strzałek jest stosowany w geodezji kolejowej dla celów regulacji torów [15]. Wykorzystanie pomiaru strzałek dla celów związanych z wyznaczaniem odkształceń budowli zaproponowałem w roku 1955 w [26]. W pracy tej nie wnikałem w możliwe do zastosowania sposoby pomiaru, poprzestając jedynie na opisanu jednego ze sposobów posługiwania się strzałkami i zaobserwowanymi ich zmianami dla wyznaczania odkształceń.

Należy podkreślić, że pomiar strzałek jak i sposób ich wykorzystania w pracach związanych z wyznaczaniem odkształceń różnią się zasadniczo od sposobów możliwych do wykorzystania w pracach dla celów regulacji torów kolejowych. Zasadnicza różnica polega tu na kilkudziesięciokrotnie (lub nawet kilkuset krotnie) większej wymaganej dokładności.

W obecnym opracowaniu pragnę między innymi rozwinąć postawione uprzednio zagadnienie do stanu umożliwiającego praktyczną realizację. W publikacji [27] podane zostało wyprowadzenie następującego wzoru,

pozwalającego na obliczenie wysokości h_C w trójkącie na podstawie danych współrzędnych jego wierzchołków L , C , P .

$$h_C = \frac{(x_L - x_C)(y_P - y_L) - (y_L - y_C)(x_P - x_L)}{\sqrt{(x_P - x_L)^2 + (y_P - y_L)^2}} \quad (3.2)$$



Rys. 2

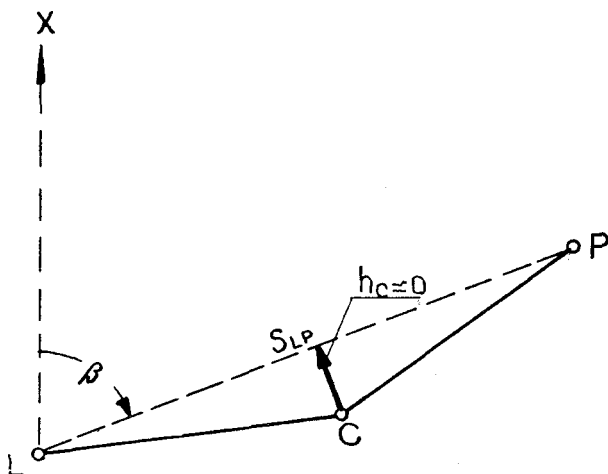
Różniczkując zależność (3.2) względem poszczególnych zmiennych otrzymujemy:

$$\begin{aligned} -\sin \beta dx_C + \cos \beta dy_C + \frac{y_P - y_C + h_C \cos \beta}{s_{LP}} dx_L + \frac{x_C - x_P + h_C \sin \beta}{s_{LP}} dy_L + \\ + \frac{y_C - y_L - h_C \cos \beta}{s_{LP}} dx_P + \frac{x_L - x_C - h_C \sin \beta}{s_{LP}} dy_P = dh_C \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie: β — kierunek LP zaś s_{LP} — długość LP .

W przypadku gdy ciąg jest w przybliżeniu prostoliniowy, to jest przy małych — pomijalnych wielkościach h_C można zależność powyższą uprościć do postaci:

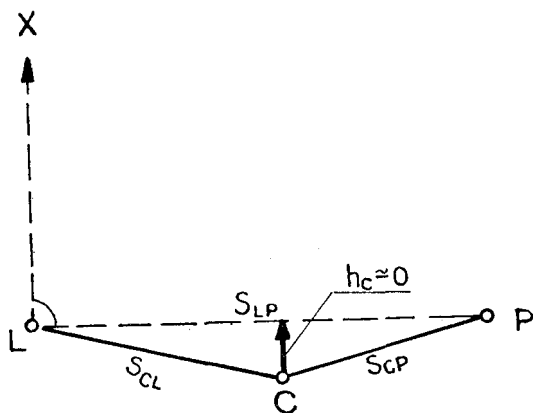
$$\begin{aligned} -\sin \beta dx_C + \cos \beta dy_C + \frac{y_P - y_C}{s_{LP}} dx_L - \frac{x_P - x_C}{s_{LP}} dy_L + \\ - \frac{y_L - y_C}{s_{LP}} dx_P + \frac{x_L - x_C}{s_{LP}} dy_P = dh_C \end{aligned} \quad (4.2)$$



Rys. 3

Dalsze uproszczenia wynikają przy zorientowaniu ciągu równoległe do osi OY układu współrzędnych:

$$-dx_C + \frac{s_{CP}}{s_{LP}} dx_L + \frac{s_{CL}}{s_{LP}} \cdot dx_P = dh_C \quad (5.2)$$



Rys. 4

W przypadku zachodzenia równobocznosci ciągu zorientowanego równoległe do osi OY układu współrzędnych zależność powyższa upraszcza się do postaci: $-dx_C + 0,5dx_L + 0,5dx_P = dh$ która pozwala łatwo dostrzec związek między zmianą różniczkową strzałki i kąta poligonowego: $d\gamma_C = \frac{2}{s} dh_C$, gdzie: s — długość boku poligonowego. Tę zależność wyko-

rzystamy dalej przy dokonywaniu wstępnej analizy dokładności ciągów poligonowych o pomierzonych strzałkach.

Wobec tego, że znaczna ilość badanych budowli i urządzeń posiada kształt w przybliżeniu prostoliniowy, oraz wobec zasady orientowania układu współrzędnych, w którym wyrażamy wyznaczane składowe przesunięć osią OY wzdłuż osi budowli, najbardziej użyteczną w praktyce będzie zależność o formie uproszczonej (5.2)

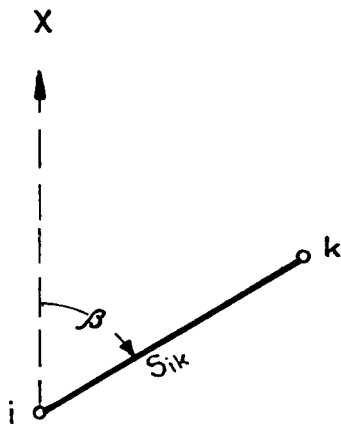
c) Zależność między drobną zmianą kierunku $d\beta$ a zmianami współrzędnych punktu „i” (stanowiska) oraz „k” (celu).

$$B_{ik} dx_i - A_{ik} dy_i - B_{ik} dx_k + A_{ik} dy_k = d\beta \quad (3)$$

Zmiana kierunku ik , oznaczona tu przez $d\beta$ jest związana z zaobserwowanymi kierunkami (przy założeniu bezbłędności obu obserwacji) wzorem: $d\beta = \beta' - \beta - dz_i$, gdzie dz_i — niewiadoma orientacyjna.

d) Zależność między drobną zmianą długości ds a zmianami współrzędnych początku „i” oraz końca „k” odcinka.

$$-\cos \beta dx_i - \sin \beta dy_i + \cos \beta dx_k + \sin \beta dy_k = ds \quad (4)$$



Rys. 5

e) Zależność między zmianą składowej położenia punktu, wyznaczoną z wyższorzędnej¹⁾ części osnowy kontrolnej a zmianą tej składowej otrzymaną następnie przy wyrównaniu niższorzędnej części osnowy kontrolnej.

$$\begin{aligned} dx &= dx \\ dy &= dy \end{aligned} \quad (5)$$

Praktyczne użycie tej zależności wymaga kilku wyjaśnień.

¹⁾ Wyższorzędna część osnowy kontrolnej winna zawierać punkty nieruchome względem siebie.

Zależność opiera się na koncepcji wyrównania sieci z odrzuceniem założenia bezbłędności punktów nawiazania, opracowanej przez Prof. dr St. Hausbrandta [6]. Użycie jej w zagadnieniach związanych z opracowaniem wyników pomiaru odkształceń stanowi pewnego rodzaju zastosowanie wspomnianej koncepcji dla odmiennych celów. Zależność (5) może być użyta w omawianych zagadnieniach dwojako, z uwzględnieniem dwu różnych celów:

1. Gdy osnowa kontrolna jest na tyle rozległa w sensie liczby punktów wyznaczanych, że celowe jest podzielenie jej na kilka rzędów. Wówczas należy dokonać najpierw wyrównania różnic obserwacji w części sieci zawierającej punkty stałe, zidentyfikować je oraz obliczyć składowe przesunięć pozostałych punktów. Następnie należy wyrównać różnice obserwacji w niższorzędnych częściach osnowy kontrolnej uwzględniając składowe przesunięć punktów dowiązania dx , dy wyznaczone przy rozwiązaniu wyższorzędnej części osnowy (traktując je jak wielkości obserwowane a nie uzyskane z wyrównania). Ten sposób wykorzystania zależności (5) znajdujemy w [26].

2. Wobec tego, że zidentyfikowanie nieruchomych punktów sieci na podstawie wyrównania różnic wyników obserwacji i dalszych czynności identyfikacyjnych odbywa się z pewną skończoną dokładnością, sam wynik identyfikacji nie jest na tyle pewny, aby można było mówić o całkowitej stwierdzonej nieruchomości punktów przyjmowanych dla dostosowania sieci i obliczenia ruchów pozostałych punktów. W tej sytuacji czynione są próby zmniejszenia błędów wyznaczenia przesunięć punktów poruszonych poprzez przyjęcie, że w drobnych granicach mogą zaistnieć ruchy punktów uznanych za stałe. Jednym ze sposobów rachunkowej realizacji takiego założenia jest dopisanie do układu równań poprawek różnic obserwacji równań ruchu punktów stałych wzdłuż odpowiednich osi układu współrzędnych oraz rozwiązanie go prowadzące do obliczenia składowych przesunięć wszystkich punktów osnowy kontrolnej.

Innym sposobem realizacji wymienionego założenia — stosowanym w dotychczasowej praktyce w szerszym zakresie — jest dostosowywanie sieci metodą transformacyjną do wszystkich punktów uznanych za stałe.

f) *Zależność między zmianami odczytów położenia drutu wahadła względem par prostopadłych do siebie skal, zastabilizowanych w punktach „i”, „k” a zmianami składowych położenia tych punktów.*

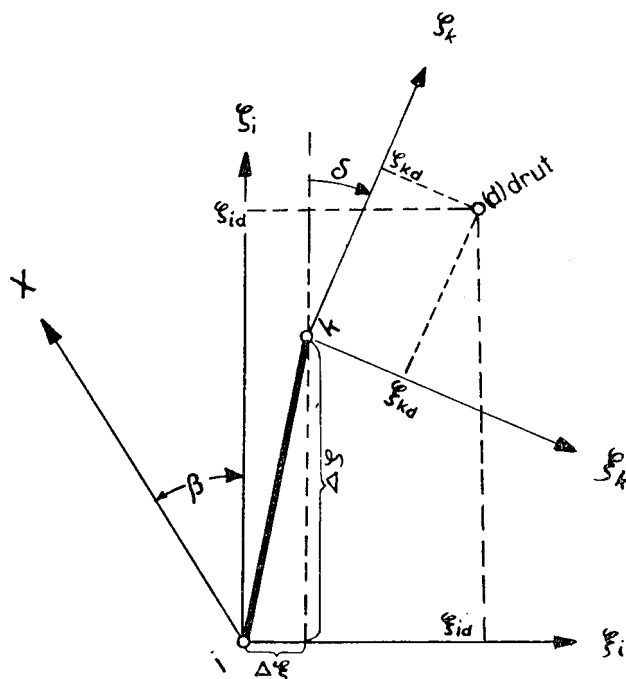
Określenie zmian wzajemnego położenia dwu punktów, znajdujących się na różnych poziomach, w przybliżeniu na jednej linii pionu we wspólnym szybie może być dokonane przy użyciu odczytów położenia drutu wahadła względem skal zamocowanych w obu punktach. Przyjmując, że punkt „i” jest wierzchołkiem lokalnego układu współrzędnych prostokąt-

nych o osiach ζ_i, ξ_i utworzonych przez zastabilizowane skale odczytowe, obróconego w stosunku do układu współrzędnych OXY o kąt β oraz, że punkt „k” na innym poziomie jest wierzchołkiem lokalnego układu współrzędnych prostokątnych o osiach ζ_k, ξ_k utworzonych przez zastabilizowane w nim skale odczytowe, obróconego w stosunku do układu OXY o kąt $\beta + \delta$ możemy posługiwać się następującymi zależnościami:

Jeśli na punkcie „i” wykonane zostały odczyty składowych położenia drutu wahadła ζ_{id}, ξ_{id} zaś na punkcie „k” odpowiednie odczyty położenia drutu tego samego wahadła ζ_{kd}, ξ_{kd} to możemy określić składowe $\Delta\zeta, \Delta\xi$ położenia punktu „k” względem punktu „i” w jego układzie współrzędnych:

$$\begin{aligned}\Delta\zeta &= \zeta_{id} - \zeta_{kd} \cdot \cos \delta + \xi_{kd} \cdot \sin \delta \\ \Delta\xi &= \xi_{id} - \xi_{kd} \cdot \cos \delta - \zeta_{kd} \cdot \sin \delta\end{aligned}\quad (6.2)$$

Założmy, że po pewnym czasie wskutek odkształcenia obiektu punkty „i”, „k” zmieniają swe wzajemne położenie na drodze równoległego prze-



Rys. 6

sunięcia. Zmieni względem nich swe położenie również punkt zawieszenia wahadła. Wówczas aktualne składowe wzajemnego położenia punktów

„i”, „k” wyrażone w układzie współrzędnych punktu „i” określone będą wzorami:

$$\begin{aligned}\Delta\zeta' &= \zeta'_{i_d} - \zeta'_{k_d} \cdot \cos \delta + \xi'_{k_d} \cdot \sin \delta \\ \Delta\xi' &= \xi'_{i_d} - \xi'_{k_d} \cdot \cos \delta - \zeta'_{k_d} \cdot \sin \delta\end{aligned}\quad (7.2)$$

Odejmując od siebie stronami odpowiednie równania (6.2) od (7.2) otrzymamy:

$$\begin{aligned}d\zeta &= (\zeta'_{i_d} - \zeta_{i_d}) - (\zeta'_{k_d} - \zeta_{k_d}) \cos \delta + (\xi'_{k_d} - \xi_{k_d}) \sin \delta \\ d\xi &= (\xi'_{i_d} - \xi_{i_d}) - (\xi'_{k_d} - \xi_{k_d}) \cos \delta - (\zeta'_{k_d} - \zeta_{k_d}) \sin \delta\end{aligned}\quad (8.2)$$

W przypadku, gdy kąt δ jest dostatecznie mały, równania powyższe można uprościć do postaci:

$$\begin{aligned}d\zeta &= (\zeta'_{i_d} - \zeta_{i_d}) - (\zeta'_{k_d} - \zeta_{k_d}) \\ d\xi &= (\xi'_{i_d} - \xi_{i_d}) - (\xi'_{k_d} - \xi_{k_d})\end{aligned}\quad (9.2)$$

W przypadku, gdy jednym ze znaków np. „k” jest sam uchwyt drutu wahadła, wielkości zmian składowych wzajemnego położenia punktów są równe wprost różnicom odczytów na skalach zastabilizowanych w punkcie „i”:

$$\begin{aligned}d\zeta &= \zeta'_{i_d} - \zeta_{i_d} \\ d\xi &= \xi'_{i_d} - \xi_{i_d}\end{aligned}\quad (10.2)$$

Uproszczenie zastosowane we wzorze (9.2) jest dopuszczalne przy niewielkich wartościach wzajemnych przesunięć punktów. Uznając np za pomijalne zniekształcenia wartości zmian $d\zeta$, $d\xi$ nie przekraczające 0,05 mm przy zakresie zachodzących zmian rzędu 10 mm dopuścimy stosowanie wzoru (9.2) przy $\delta < 20'$.

Miedzy drobnymi zmianami składowych wzajemnego położenia punktów „i”, „k” wyrażonymi w układzie współrzędnych punktu „i” a zmianami składowych wyrażonych w układzie OXY zachodzą związki:

$$\begin{aligned}-\cos \beta dx_i - \sin \beta dy_i + \cos \beta dx_k + \sin \beta dy_k &= d\zeta \\ \sin \beta dx_i - \cos \beta dy_i - \sin \beta dx_k + \cos \beta dy_k &= d\xi\end{aligned}\quad (11.2)$$

Zakładając, że $\beta = 0$ to jest orientując skale odczytowe przy ich zastabilizowaniu zgodnie z kierunkami osi układu współrzędnych OXY otrzymamy proste zależności:

$$\begin{aligned}-dx_i + dx_k &= d\zeta \\ -dy_i + dy_k &= d\xi\end{aligned}\quad (6)$$

Dokładność orientacji skal jak również wielkość ruchów obrotowych budowli, przy których zniekształcenia wyników opartych na powyższej

zależności nie odgrywają roli, są podobne jak określające stosowalność wzoru (9.2).

Wymienione wyżej oraz częściowo wyprowadzone zależności (b, f) między zmianami wielkości podlegających pomiarowi a zmianami współrzędnych prostokątnych płaskich stanowią podstawę do obliczania wzajemnych przesunięć punktów osnowy kontrolnej. Wszystkie zależności przedstawione są tu w postaci liniowej:

$$a \cdot dx + b \cdot dy + c \cdot dz + \dots = dl$$

gdzie: $a, b, c \dots$ — współczynniki przy niewiadomych o znanych wartościach, zależnych od kształtu i rozmiarów konstrukcji osnowy kontrolnej,

$dx, dy, dz \dots$ — niewiadome,

dl — wartości zmian wielkości obserwowanych.

Wartości dl wyznaczamy jako różnice wyników obserwacji pewnej wielkości w cyklu pierwotnym „ l ” i w cyklu aktualnym „ l' ” według wzoru: $dl = l' - l$. Ponieważ obserwacje l i l' , prowadzone są z błędami μ i μ' , przeto zakładając, że różnica tych wartości nie jest obciążona wpływem zmiany stanu przyrządu pomiarowego lub warunków obserwacji, możemy przyjąć, że dl wyznaczone jest z błędem średnim $m_{dl} = \sqrt{\mu^2 + \mu'^2}$.

Przestrzegając ogólnej zasady, że osnowa geodezyjna winna zawierać spostrzeżenia nadliczbowe, oraz pamiętając, że zmiany poszczególnych obserwowanych wielkości mogą być wyznaczone z różnymi co do wielkości błędami średnimi m_{dl} , możemy napisać układ równań poprawek zmian wartości zaobserwowanych wielkości. W układzie tym każde równanie będzie posiadało postać ogólną:

$$\frac{a}{m_{dl}} dx + \frac{b}{m_{dl}} dy + \frac{c}{m_{dl}} dz + \dots = \frac{dl}{m_{dl}} + \frac{v_{dl}}{m_{dl}} \quad (7)$$

Na podstawie rozwiązania metodą najmniejszych kwadratów układu równań zaobserwowanych zmian wielkości mierzonych można wyznaczyć najbardziej prawdopodobne wartości składowych wzajemnych przesunięć punktów osnowy kontrolnej. Aby to wykonać należy wprowadzić założenia stałości czyniące zadanie oznaczonym przy jednoczesnym zachowaniu zgodności wewnętrznej układu. Tak więc przy wyrównaniu różnic obserwacji w osnowie, w której mierzone były wyłącznie kąty lub kierunki należy założyć stałość dwu punktów zaś w przypadku pomiaru również długości — stałość jednego punktu i kierunku. Jeszcze inaczej rzecz się ma w przypadku, gdy osnowa zawiera obserwacje kierunków orientacyjnych na odległe cele. W przypadku, gdy zagwarantowana jest nie-

zmiennosć kierunku orientacyjnego, powstaje możliwość wyznaczania zmian orientacji całej osnowy i wówczas założenie stałości dotyczy 1 punktu i 1 długości (w przypadku obserwacji wyłącznie kątowych lub kierunkowych) oraz 1 punktu (w przypadku pomiaru długości).

Założenie stałości położenia punktu polega na przyjęciu, że składowe jego przesunięcia $dx = 0$, $dy = 0$.

Założenie stałości kierunku realizujemy w oparciu o warunek:

$$\frac{dy_k - dy_i}{dx_k - dx_i} = \operatorname{tg} \beta_{ik} \quad (8)$$

gdzie: dx_k , dy_k — składowe przesunięć punktu „ k ”

dx_i , dy_i — składowe przesunięć punktu „ i ”

β_{ik} — przyjęty jako niezmienny kierunek odcinka $i-k$.

Uwzględnienie powyższego warunku w formie (8) byłoby przy wyrównaniu uciążliwe i w związku z tym korzystnie jest założyć stałość jednego z końców odcinka, np. punktu „ i ”. Wówczas zależność (8) sprowadza się do prostej postaci:

$$dy_k = dx_k \cdot \operatorname{tg} \beta_{ik},$$

Zależność ta umożliwia eliminację jednej z niewiadomych z układu równań poprawek różnic obserwacji.

Założenie stałości długości odcinka polega na zrealizowaniu warunku:

$$\frac{dy_k - dy_i}{dx_k - dx_i} = - \operatorname{ctg} \beta_{ik} \quad (9)$$

Podobnie jak w zależności (8) korzystnie jest tu założyć stałość jednego z końców odcinka, np. „ i ”. Wówczas zależność (9) sprowadza się do prostej postaci:

$$dy_k = - dx_k \cdot \operatorname{ctg} \beta_{ik},$$

umożliwiającej eliminację jednej niewiadomej z układu równań poprawek różnic obserwacji.

W rezultacie wyrównania różnic wyników obserwacji osnowy kontrolnej, wykonanego przy wspomnianych wyżej założeniach stałości otrzymujemy składowe dx , dy przesunięć punktów sieci. Ponieważ założenia stałości jakie tu były konieczne dla realizacji rachunkowej, mogą się okazać niesłuszne (przyjęte punkty, kierunki i długości dostosowania mogą się okazać faktycznie zmienione co do wartości) zachodzi potrzeba przeliczenia uzyskanych składowych przesunięć przy uwzględnieniu nieruchomości punktów zidentyfikowanych jako stałe. Do tego celu wykorzystujemy metodę transformacji, opisaną i uzasadnioną szczegółowo w [14]. W podanych dalej przykładach obliczeń wykorzystano drogę postępowania

opisaną w [28], zawierającą pewne elementy rozwijające koncepcję opisaną w [14].

Aby w dalszej części opracowania uniknąć nieporozumień terminologicznych, nazwiemy punkty o założonej stałości punktami dostosowania, w odróżnieniu od punktów o faktycznie zachowanej niezmienności wzajemnego położenia, które wprost nazwiemy punktami stałymi. W szczególnych przypadkach, gdy początkowe założenia stałości, niezbędne przy wyrównaniu okażą się zgodne z rzeczywistością — punkty dostosowania będą jednocześnie stałymi.

Dla wyjaśnienia sposobu opracowania wyników obserwacji w osnowie kontrolnej, składającej się z różnych typów sieci geodezyjnych posłużę się przykładem liczbowym. Przykład ten ma również zilustrować koncepcję wzajemnego powiązania różnych fragmentów osnowy: na zewnątrz budowli (zawierającego między innymi punkty o niezmiennym wzajemnym położeniu) oraz wewnątrz budowli (zawierającego wyłącznie punkty o wyznaczanym ruchu). Oczywiście przykład ten nie ma na celu sztywnego narzucenia sposobu zaprojektowania osnowy kontrolnej w konkretnych przypadkach, różniących się sytuacją miejscową.

Zgodnie z rysunkiem 7 zawierającym szkic osnowy kontrolnej, dla wyznaczenia odkształceń tunelu przebiegającego w łuku (może to być również galeria wewnątrz zapory łukowej lub inna budowla) zastabilizowano w nim ciąg poligonowy składający się z siedmiu punktów Nr Nr 9-15. Ciąg ten stanowi „wewnętrzną” część osnowy kontrolnej. Na powierzchni terenu zastabilizowano osiem stanowisk z urządzeniami do mechanicznego centrowania teodolitu i tarcz sygnałowych Nr Nr 1-8. Trzy z tych stanowisk (Nr Nr 6, 7, 8) znajdują się nad wylotami szybów pionowych, łączących tunel (galerię zapory) z powierzchnią terenu (koroną zapory). Bezpośrednio pod tymi stanowiskami podwieszone są trzy wahadła, których druty mogą być obserwowane na tle skal zastabilizowanych na podszybiach w tunelu, w bezpośredniej bliskości punktów poligonowych Nr Nr 9, 12, 15.

W sieci trygonometrycznej na powierzchni, na stanowiskach Nr Nr 1-5 obserwowane są kierunki β zgodnie z numeracją podaną przy celowych na szkicu (1-26). Na stanowiskach 6-8 obserwowane są kąty γ (numery obserwacji 27-31). Na skalach odczytuje się składowe ζ_{9_d} , ξ_{9_d} , ζ_{12_d} , ξ_{12_d} , ζ_{15_d} , ξ_{15_d} , położenia drutów wahadeł (numery obserwacji 32-37). W ciągu poligonowym mierzone są strzałki (numery obserwacji 38-42) i wreszcie długości boków poligonowych (numery obserwacji 43-48).

Przyjmując, że punkty poligonowe Nr Nr 9, 12, 15 przesuwają się identycznie jak zastabilizowane w pobliżu nich skale odczytowe wahadeł uzyskujemy możliwość bezpośredniego powiązania ciągu poligonowego

Szkic osnowy kontrolnej

duże cyfry - numery punktów

małe cyfry - numery obserwacji

1-26 - kierunki

27-31 - kąty

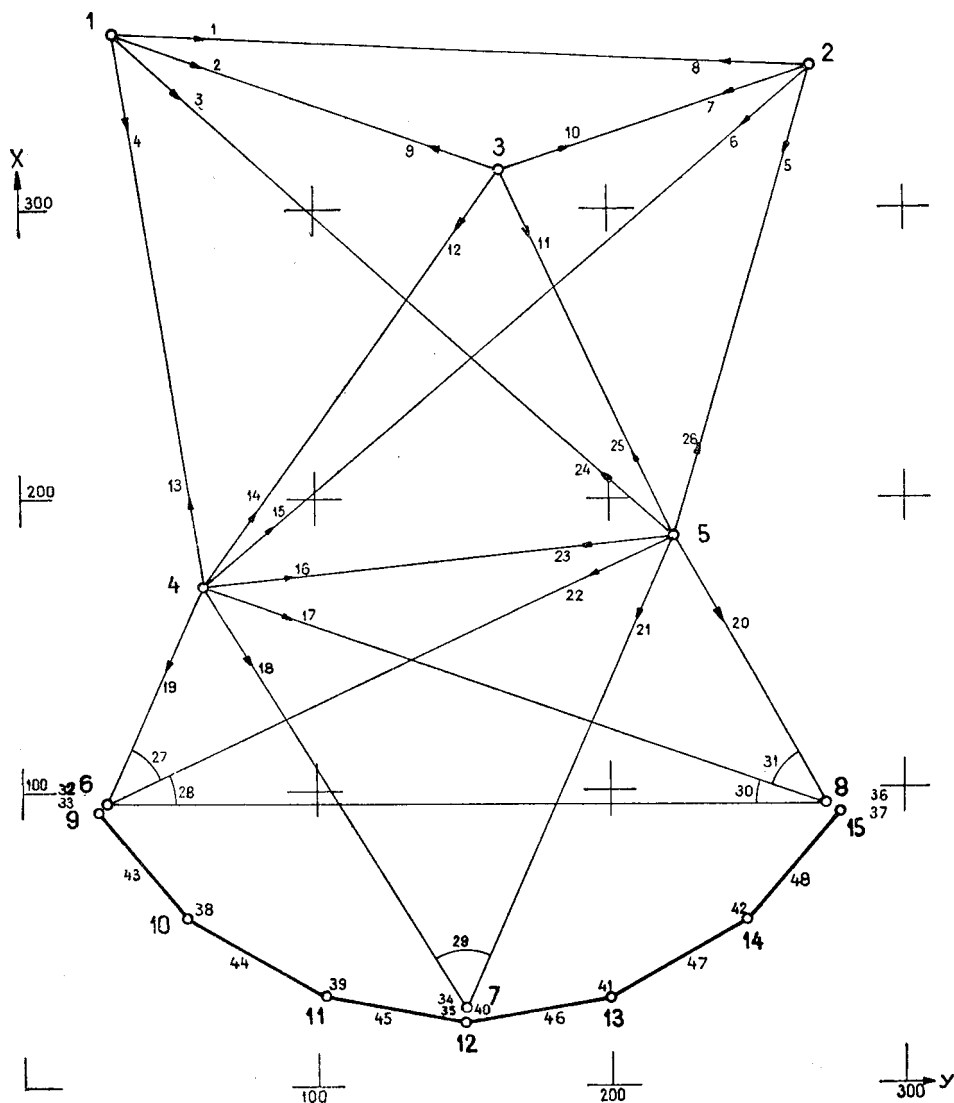
32-37 - wahadła

38-42 - strzałki

43-48 - długości

1-8 - punkty nazewnatrz budowli

9-15 - punkty wewnątrz budowli



Rys. 7

z punktami „zewnątrznej”, wyższej części osnowy kontrolnej. Wówczas bowiem odczytane na skalach zmiany położenia drutów wahadeł pozwalają wyznaczyć zmiany położenia punktów poligonowych Nr Nr 9, 12, 15 względem punktów sieci trygonometrycznej Nr Nr 6, 7, 8.

Dla zmian wartości obserwacji zestawiono układ równań poprawek, zrównoważony dokładnościowo (tablica 1). Współczynniki $\frac{a}{m_{dl}}, \frac{b}{m_{dl}}, \frac{c}{m_{dl}} \dots$

przy niewiadomych zostały obliczone na podstawie przybliżonych wartości kierunków, kątów i długości, wziętych graficznie ze szkicu sieci oraz przy przyjętych a priori następujących wartościach błędów średnich wyznaczania różnic obserwacji: $m_{d\beta} = 1^{\text{cc}}$, $m_{dy} = 1,5^{\text{cc}}$, $m_{dz} = m_{d\epsilon} = 0,05 \text{ mm}$, $m_{dh} = 0,02 \text{ mm}$, $m_{ds} = 0,1 \text{ mm}$.

Dalszy tok obliczeń podany został w dwu wariantach:

1. wyrównanie różnic obserwacji jednoczesne w całej osnowie,
2. wyrównanie dwurzędowe, oddzielne dla „zewnątrznej”, wyższej części osnowy i dla części „wewnętrznej”, niższej części.

Pierwszy wariant obliczenia objął wyrównanie dla całej osnowy przy dostosowaniu jej do punktu Nr 6 i kierunku 6-8 (wobec występowania w osnowie obserwacji zmian długości boków poligonowych). Wobec tego, że $\beta_{6-8} = 100^{\text{g}}$ uzyskano dalsze uproszczenia warunku (8) w związku z czym realizacja założeń stałości polegała tu na eliminacji współczynników przy niewiadomych dx_6, dy_6, dx_8 . Przy takich założeniach ułożono równania normalne (tablica 2) oraz rozwiązano je przy wykorzystaniu maszyny elektronowej UMC-1. W wyniku tego wyrównania otrzymano poprawki dz, dx, dy , których wartości podane są w tablicy 2. Uzyskane poprawki dx, dy wskazują, że przyjęty punkt i kierunek dostosowania nie są faktycznie stałe. W tej sytuacji — na podstawie uzyskanych poprawek dx, dy należy znaleźć wartości składowych punktów faktycznie poruszonych $\underline{dx}, \underline{dy}$, przy dostosowaniu osnowy do punktów faktycznie stałych. Do tego celu służy transformacyjna metoda identyfikacji punktów stałych i przeliczenia przesunięć punktów poruszonych, opracowana przez Prof. dr T. Lazzariniego.¹⁾ W naszym przykładzie wyszukujemy punkty stałe w grupie punktów osnowy znajdujących się poza badanym obiektem (Nr Nr 1-5). W tym celu wykonujemy wielokrotnie transformację poprawek dx, dy otrzymanych z wyrównania (z tablicy 2) przy dostosowaniu do kolejnych par punktów o zakładanej stałości położenia. W rezultacie takich transformacji otrzymujemy poprawki $\underline{dx}, \underline{dy}$ przesunięć pozostałych punktów. Jeśli przy jednej z kolejnych transformacji

¹⁾ Metoda ta opracowana dla identyfikacji punktów stałych w sieciach kątowych okazała się słuszna również w odniesieniu do sieci zawierających obserwacje linowe (por. [14] uwagi na str. 92 oraz [28]).

uzyskamy poprawki składowych przesunięć niektórych punktów bliskie zera, będzie to dowodziło zachowania niezmienności kształtu figury utworzonej przez te punkty i przez parę punktów dostosowania (w przypadku, gdy obserwowane są wyłącznie zmiany kątów lub kierunków w osnowie). W naszym przykładzie wobec tego, że poddano wyrównaniu również różnice obserwacji długości boków ciągu poligonowego, uzyskanie w wyniku jednej z kolejnych transformacji małych wartości $\underline{dx}$, $\underline{dy}$ dla niektórych punktów świadczy o zachowaniu przez figurę utworzoną z tych punktów zarówno kształtu jak i skali (por. [28]).

Jako kryterium stwierdzonej niezmienności położenia punktu przyjmujemy tu nieprzekroczenie przez poprawki $\underline{dx}$, $\underline{dy}$ wielkości granicznych błędów ich wyznaczenia przy dostosowaniu osnowy do danej pary punktów. Dla wielokrotnego stosowania tego kryterium przy identyfikowaniu punktów stałych po dokonaniu każdego cyklu pomiarowego, konieczne jest jednorazowe dla danej sieci obliczenie błędów średnich wyznaczenia składowych przesunięć wszystkich punktów, które mogą okazać się stałymi przy dostosowywaniu do różnych par tych punktów. Dokonane transformacje poszukiwawcze podane zostały w tablicy 3. W obliczeniach zastosowano wzory transformacyjne w postaci uproszczonej w stosunku do wzorów stosowanych w [14]. Zastosowane uproszczenia, wynikające z praktycznego wykorzystania reguł rachunkowych Bradis-Kryłowa, przy transformacji poprawek dx , dy o niewielkich wartościach nie powodują obniżenia jakości wyników, natomiast ułatwiają obliczenia. Zastosowane wzory przedstawiają się następująco:

$$\alpha = \frac{[Y_r \cdot dx_r - X_r \cdot dy_r]}{[X_r^2 + Y_r^2]}, \quad \beta = - \frac{[X_r \cdot dx_r + Y_r \cdot dy_r]}{[X_r^2 + Y_r^2]}$$

$$\underline{dx} = X_r \cdot \beta - Y_r \cdot \alpha + dx_r, \quad \underline{dy} = X_r \cdot \alpha + Y_r \cdot \beta + dy_r,$$

gdzie: r w dolnej frakcji oznacza, że współrzędna lub poprawka współrzędnej wyrażona jest w układzie współrzędnych o początku w miejscu określonym średnimi wartościami współrzędnych lub poprawek współrzędnych punktów dostosowania.

Pierwsza transformacja poszukiwawcza nie przyniosła pozytywnego efektu, bowiem uzyskane wielkości stosunków przetransformowanych składowych przesunięć do błędów średnich ich wyznaczenia dla poszczególnych punktów przekroczyły graniczne wielokrotności błędu średniego $G = 2$. W naszym przypadku — wobec tego, że wyrównana osnowa stanowiła sieć liniowo-kątową — można było poznać niesłuszność przyjęcia stałości punktów Nr 3, 4 również po uzyskanej znacznej wartości współczynnika transformacyjnego β (por. [28]).

Druga transformacja poszukiwawcza wykazała stałość wzajemnego położenia punktów Nr 1, 2 (przyjętych do dostosowania) oraz 3, 5 o ma-

Równania poprawek różnic obserwacji

Tablica 1

Nr obs	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5	$dx_1 dy_1$	$dx_2 dy_2$	$dx_3 dy_3$	$dx_4 dy_4$	$dx_5 dy_5$	$dx_6 dy_6$	$dx_7 dy_7$	$dx_8 dy_8$	$dx_9 dy_9$	$dx_{10} dy_{10}$	$dx_{11} dy_{11}$	$dx_{12} dy_{12}$	$dx_{13} dy_{13}$	$dx_{14} dy_{14}$	$dx_{15} dy_{15}$	ℓ
1	/					-2,68 - 0,08	2,68 0,08														0
2	/					-4,30 - 1,48		4,30 1,48													0,20
3	/					-1,87 - 1,64				1,87 1,64											-0,40
4	/					-0,52 - 3,28			0,52 3,28												11,90
5	/	/					1,00 - 3,68			-1,00 3,68											0
6	/	/					1,76 - 1,54		-1,76 1,54												3,20
7	/	/					5,35 - 2,12	5,35 2,12													0,10
8	/	/				-2,68 - 0,08	2,68 0,08														0
9		/	/			-4,30 - 1,48		4,30 1,48													0
10		/	/				5,35 - 2,12	5,35 2,12													-0,20
11		/	/					-1,97 - 4,20		1,97 4,20											0,30
12		/	/					2,10 - 3,00	-2,10 3,00												7,90
13			/	/		-0,52 - 3,28			0,52 3,28												0
14			/	/				2,10 - 3,00	-2,10 3,00												-4,00
15			/	/			1,76 - 1,54		-1,76 1,54												-8,50
16			/	/					-3,90 0,44	3,90 - 0,44											-15,00
17			/	/					-2,69 - 0,92				2,69 0,92								-20,20
18			/	/					-2,03 - 3,20			2,03 3,20									-14,00
19			/	/					3,23 - 7,15	-3,23 7,15											-33,30
20			/	/	/				-2,90 - 5,23			2,90 5,23									0
21			/	/	/				1,48 - 3,30		-1,48 3,30										5,70
22			/	/	/				2,70 - 1,26	-2,70 1,26											0,20
23			/	/	/				-3,90 0,44	3,90 - 0,44											11,20
24			/	/	/	-1,87 - 1,64			1,87 1,64												14,30
25			/	/	/			-1,97 - 4,20		1,97 4,20											14,50
26			/	/	/		1,00 - 3,68		-1,00 3,68												14,00
27									-2,15 4,73	1,80 - 0,84	0,35 - 3,89										5,20
28									1,36 2,13	-1,80 0,84	0,06 - 0,84		1,74								-1,41
29									-1,79 - 0,61	0,99 - 2,16		-2,39 0,07									-5,03
30									1,79 0,61	1,74		0,05 0,61									5,08
31									-1,93 - 3,49			0,14 2,88									-4,00
32										-1,720 10,000			1,720 - 10,000								-67,40
33										-10,000 17,200			10,000 17,200								-64,40
34											20,000										2,20
35											-20,000										-11,750
36											17,000 10,400										-24,80
37											-10,400 17,000										52,60
38													-1,720 - 20,200	37,60 37,00	-20,40 - 11,80						-9,56
39														-2,120 - 12,200	46,70 16,60	-25,50 - 4,40					26,50
40															-2,520 - 4,40	49,50 0,40	-24,30 4,00				-35,20
41																-2,520 4,10	46,60 - 16,40	-21,40 12,30			1,00
42																	-21,00 12,10	38,20 31,60	-17,20 19,50		-1,50
43													-7,60 6,50	7,60 - 6,50							0,90
44													-5,00 8,70	5,00 8,70							7,00
45													-1,70 9,90	1,70 9,90							-1,40
46														1,60 9,90	-1,60 - 9,90						0,50
47															5,00 8,70	-5,00 - 8,70					0
48																7,50 6,60	-7,50 - 6,60				0,20

kierunki
 $m_{\theta} \beta = 1''$

kąty
 $m_{\theta} \delta = 15''$

wahadła
 $m_{\theta} \xi = m_{\theta} \zeta = 50 \mu$

strzałki
 $m_{\theta} h = 20 \mu$

długości
 $m_{\theta} l = 100 \mu$

Tablica 2

Wyrównanie różnic obserwacji osnowy kontrolnej (równania normalne) Dostosowanie do pktu.6, kier. 6-8.

z	z ₂	z ₃	z ₄	z ₅	dx	dy	dx ₂	dy ₂	dx ₃	dy ₃	dx ₄	dy ₄	dx ₅	dy ₅	dx ₇	dy ₇	dy ₈	dx ₉	dy ₉	dx ₁₀	dy ₁₀	dx ₁₁	dy ₁₁	dx ₁₂	dy ₁₂	dx ₁₃	dy ₁₃	dx ₁₄	dy ₁₄	dx ₁₅	dy ₁₅	ℓ	s					
4					-937	-648	268	008	430	148	052	328	187	164																			11,70	15,70				
4					-268	-008	1079	-726	-535	212	-176	154	-100	3,68																			330	730				
4					-430	-148	535	-212	-092	-360	-210	3,00	197	4,20																			800	12,00				
7					-052	-328	176	-154	210	-300	-873	-301	390	-044	203	320	092																-9500	-9461				
7					-187	-164	100	-368	-197	-420	-390	044	802	-071	-148	330	523																5990	6544				
					5888	2270	-1436	-043	-3698	-1273	-055	-341	-699	-613																			-3304	-5178				
					3129	-043	-001	-1273	-438	-341	-2152	-613	-538																					-6212	-7508			
						7982	-3504	-5725	2268	-620	542	-200	736																					44	2572			
						4083	2268	-899	542	-474	736	-2708																						-4315	-5767			
							11082	-601	-882	1260	-776	-1655																						-1957	-2141			
							6665	1260	-1800	-1654	-3528																								-7378	-8098		
								8065	-3725	-3640	-395	-737	-640	159																					-3693	-6299		
								13451	1288	-1110	-1159	-1009	054																						35072	40422		
									7625	2034	-456	495	-2073																						4994	8537		
									12622	1005	-1104	-3740																							13836	15679		
										41202	145																									232717	232772	
										42113																										1766	2416	
										43402																										-39716	-117913	
																																					-117913	-119212
																																					-164569	-124985
																																					-23472	16112
																																					-94942	-94942
																																					-57417	-57417
																																					235699	235699
																																					63283	63283
																																					-479693	-479693
																																					-15177	-15177
																																					93266	93266
																																					-18030	-18030
																																					6102	6102
																																					29602	29602
																																					112155	112155

Założono:

$dx_6 = dy_6 = dx_8 = 0$

$m_0 = \sqrt{\frac{150}{16}} = 3,1^{cc}$

Założono:
dx₆=dy₆=dx₈=0

$$m_0 = \sqrt{\frac{150}{16}} = 3,1^{cc}$$

cc

mm

-16,2 -16,1 -16,1 -28,0 -1,91 -6,4 -9,4 -0,3 -9,1 -3,0 -8,3 -4,3 -1,2 -1,5 -5,1 2,5 -0,9 -5,6 -4,6 -1,1 -4,2 -0,9 -3,1 -1,1 -3,4 -1,0 -2,2 -1,2 -1,1 -1,8 -0,3 -2,7 Niewiadome
dx, dy do przetransformowania

łych uzyskanych wartościach stosunków składowych $\frac{dx}{dy}$, do błędów średnich ich wyznaczenia. Godne podkreślenia jest tu uzyskanie małej wartości współczynnika transformacyjnego β co potwierdza wniosek o stałości wspomnianej grupy czterech punktów i stanowi kryterium uzupełniające.

Uwzględniając wynik drugiej transformacji poszukiwawczej wykonano transformację poprawek dx , dy wszystkich punktów osnowy kontrolnej przy dostosowaniu jej do zidentyfikowanych punktów stałych Nr 1, 2, 3, 5 (tablica 4). W rezultacie tego obliczenia otrzymano wielkości składowych przesunięć wszystkich punktów osnowy. Podobnie jak przy drugiej transformacji poszukiwawczej również i w tym przypadku otrzymaliśmy małą wielkość transformacyjnego współczynnika β . Dodatkowym kryterium, sprawdzającym słuszność dostosowania do punktów Nr 1, 2, 3, 5 jest spełnienie nierówności¹⁾:

$$\beta < 2 \sqrt{\frac{[\underline{dx} \underline{dx}] + [\underline{dy} \underline{dy}]}{2(n-1) \cdot [X_r^2 + Y_r^2]}} = 2 m_\beta$$

W naszym przypadku $\beta = 2 \cdot 10^{-7}$ zaś $2 \cdot m_\beta = 5 \cdot 10^{-7}$

Drugi wariant obliczenia objął dwa kolejne wyrównania: Pierwsze wyrównanie dotyczyło zmian wyników obserwacji zewnętrznej części osnowy kontrolnej, obejmującej punkty Nr 1-8 oraz wykonane obserwacje 1-31. Wyrównanie to wykonano przy założeniu stałości punktów Nr 1, 2. (tablica 5). Ponieważ przyjęte punkty dostosowania okazały się faktycznie stałymi, co stwierdzono na podstawie małych uzyskanych z wyrównania wartości składowych dx , dy dwu punktów Nr 3, 5, można było uznać, że wyznaczone z wyrównania wartości dx , dy wyrażają wielkości składowych przesunięć „zewnętrznej” części osnowy kontrolnej. Podobnie jak uprzednio, rozwiązanie układu równań normalnych zostało tu wykonane przy użyciu maszyny elektronowej UMC-1. Niezależnie od wyrównania zostały ponadto obliczone błędy średnie wyznaczenia składowych przesunięć punktów.

Drugie wyrównanie objęło różnice wyników obserwacji „wewnętrznej” części osnowy kontrolnej, składającej się z punktów Nr 9-15 i zawierającej zmiany obserwacji 32-48. Wyrównanie to zostało wykonane przy dostosowaniu do punktów Nr 6, 7, 8, zewnętrznej części osnowy, przy uwzględnieniu wartości składowych przesunięć tych punktów, wyznaczonych z pierwszego wyrównania. W związku z tym do układu równań poprawek obejmującego zmiany wyników obserwacji 32-48 dopisano sześć równań poprawek opartych na zależności (5). Napiszemy je tu dla większej jasności w formie ogólnej oraz z uwzględnieniem kon-

¹⁾ Por. [28].

Tablica 3

I transformacja poszukiwawcza

Punkty dostosowania

Nr	X	Y	dx	dy	X _r	Y _r	dx _r	dy _r	$\frac{dx}{m_{dx}}$	$\frac{dy}{m_{dy}}$
3	312	161	-3,0	-8,3	72	50	0,6	-3,5	0,0	0,1
4	169	61	-4,3	-1,2	-71	-50	-0,7	3,6	0,0	0,1

Punkty do przetransformowania

Nr	X	Y	dx	dy	X _r	Y _r	dx _r	dy _r	$\frac{dx}{m_{dx}}$	$\frac{dy}{m_{dy}}$
1	358	29	-6,4	-9,4	118	-82	-2,8	-4,6	$\frac{2,3}{0,5}$	$\frac{-1,6}{0,5}$
2	349	267	-0,3	-9,1	109	156	3,3	-4,3	$\frac{-0,7}{0,8}$	$\frac{2,5}{0,8}$
5	189	222	-1,5	-5,1	-51	111	2,1	-0,3	$\frac{-3,0}{0,5}$	$\frac{-0,3}{0,5}$

$$10^7 \begin{vmatrix} \beta - \alpha \\ \alpha \quad \beta \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 172 - 376 \\ 376 \quad 172 \end{vmatrix}$$

II transformacja poszukiwawcza

Punkty dostosowania

1	358	29	-6,4	-9,4	4	-119	-3,0	-0,2	0,0	-0,1
2	349	267	-0,3	-9,1	-5	119	3,1	0,1	0,0	-0,1

Punkty do przetransformowania

3	312	161	-3,0	-8,3	-42	13	0,4	0,9	$\frac{0,1}{0,2}$	$\frac{-0,2}{0,5}$
4	169	61	-4,3	-1,2	-185	-87	-0,9	8,0	$\frac{1,4}{0,6}$	$\frac{3,3}{0,7}$
5	189	222	-1,5	-5,1	-165	74	1,5	4,1	$\frac{-0,3}{0,6}$	$\frac{-0,2}{0,6}$

$$10^7 \begin{vmatrix} \beta - \alpha \\ \alpha \quad \beta \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -3 \quad -256 \\ 256 \quad -3 \end{vmatrix}$$

Składowe przesunięć wyrażone są w mm

Współrzędne wyrażone są w m

Tablica 4

Transformacja składowych przesunięć dx , dy uzyskanych z wyrównania zmian wyników obserwacji osnowy kontrolnej

Punkty dostosowania (zidentyfikowane jako wzajemnie niezmiennie).

Nr	X	Y	dx	dy	X_r	Y_r	dx_r	dy_r	$\underline{dx}$	$\underline{dy}$
1	358	29	-6,4	-9,4	56	-141	-3,6	-1,4	0,0	0,1
2	349	267	-0,3	-9,1	47	97	2,5	-1,1	0,0	0,1
3	312	161	-3,0	-8,3	10	-9	-0,2	-0,3	0,0	0,0
5	189	222	-1,5	-5,1	-113	52	1,3	2,9	0,0	0,0
	302	170	-2,8	-8,0						

Punkty poruszone (podlegające transformacji)

4	169	61	-4,3	-1,2	-133	-109	-1,5	6,8	1,3	3,4
6	95	29	0,0	0,0	-207	-141	2,8	8,0	6,4	2,8
7	26	150	2,5	-0,9	-276	-20	5,3	7,1	5,9	0,1
8	95	273	0,0	-5,6	-207	103	2,8	2,4	0,2	-2,9
9	95	29	-4,6	-1,1	-207	-141	-1,8	6,9	1,8	1,7
10	58	56	-4,2	-0,9	-244	-114	-1,4	7,1	1,6	0,9
11	30	103	-3,1	-1,1	-272	-67	-0,3	6,9	1,5	0,0
12	26	150	-3,4	-1,0	-276	-20	-0,6	7,0	0,0	0,0
13	30	201	-2,2	-1,2	-272	31	0,6	6,8	-0,1	-0,1
14	57	246	-1,1	-1,8	-245	76	1,7	6,2	-0,2	-0,1
15	95	273	-0,3	-2,7	-207	103	2,5	5,3	-0,1	0,0

$$10^7 \begin{vmatrix} \beta - \alpha & \\ \beta & \beta \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -2 & -255 \\ 255 & -2 \end{vmatrix}$$

kretnie uzyskanych z pierwszego wyrównania składowych przesunięć (przy uwzględnieniu założonej wielkości $m_{dx} = m_{dy} = 0,5$ mm)

$$\frac{dx_6}{m_{dx}} = \frac{dx_6}{m_{dx}} + \frac{v_{dx}}{m_{dx}} \quad \text{to jest:} \quad 2,00 \cdot dx_6 = \frac{6,48}{0,5} + \frac{v_{dx}}{0,5}$$

$$\frac{dy_6}{m_{dy}} = \frac{dy_6}{m_{dy}} + \frac{v_{dy}}{m_{dy}} \quad 2,00 \cdot dy_6 = \frac{2,75}{0,5} + \frac{v_{dy}}{0,5}$$

$$\frac{dx_7}{m_{dx}} = \frac{dx_7}{m_{dx}} + \frac{v_{dx}}{m_{dx}} \quad 2,00 \cdot dx_7 = \frac{5,79}{0,5} + \frac{v_{dx}}{0,5}$$

$$\frac{dy_7}{m_{dy}} = \frac{dy_7}{m_{dy}} + \frac{v_{dy}}{m_{dy}} \quad 2,00 \cdot dy_7 = \frac{-0,13}{0,5} + \frac{v_{dy}}{0,5}$$

$$\frac{dx_8}{m_{dx}} = \frac{dx_8}{m_{dx}} + \frac{v_{dx}}{m_{dx}} \quad 2,00 \cdot dx_8 = \frac{0,29}{0,5} + \frac{v_{dx}}{0,5}$$

$$\frac{dy_8}{m_{dy}} = \frac{dy_8}{m_{dy}} + \frac{v_{dy}}{m_{dy}} \quad 2,00 \cdot dy_8 = \frac{-2,96}{0,5} + \frac{v_{dy}}{0,5}$$

W wyniku wyrównania różnic wyników obserwacji wewnętrznej części osnowy kontrolnej (tablica 6) otrzymano wielkości składowych przesunięć punktów Nr 9-15.

Otrzymane z obu wariantów obliczeń wartości składowych przesunięć punktów różnią się między sobą w granicach około 0,3 mm z jednym wyjątkiem, kiedy różnica ta osiągnęła 1,1 mm.

Dokładność wyznaczenia składowych przesunięć punktów osnowy kontrolnej zależy od jej konstrukcji geometrycznej, dokładności wyznaczenia zmian obserwacji oraz rozmieszczenia punktów stałych. Wobec znacznej różnorodności tych czynników w konkretnych osnowach a szczególnie wobec zróżnicowania kształtów sieci oraz rozmieszczenia punktów stałych, analiza może przynieść w każdym przypadku odm inną ocenę dokładności wyznaczenia przesunięć. Dlatego też podane dalej wyniki, odnoszące się do analizy ciągów poligonowych, należy traktować jako orientujące w możliwościach dokładnościowych w sposób przybliżony, natomiast dla bardziej precyzyjnej oceny konkretnych osnow należy wykonać ich wstępne analizy dokładności przy użyciu metody znanej w literaturze np. [5].

Interesuje nas głównie możliwa do uzyskania dokładność wyznaczenia składowych przesunięć najślabszego punktu ciągu poligonowego, nawiązanego do punktów o składowych przesunięć wyznaczonych z innego, wyższorzędnego fragmentu osnowy, względnie do punktów stałych. Przy analizie zachodzi potrzeba uwzględniania błędów średnich wyznaczenia składowych przesunięć punktów nawiązania.

Analiza przewidywanych dokładności wyznaczenia składowych przesunięć punktów ciągu poligonowego może być w dużej części oparta o istniejące w literaturze wzory i zestawienia tabelaryczne. Wobec przewidywanego — ze względu na regularne na ogół kształty badanych budowli — stosowania głównie ciągów zbliżonych do prostoliniowych i równobocznych, względnie przebiegających wzdłuż odcinków łuków kołowych, interesują nas głównie te przypadki. Do bezpośredniego wykorzystania nadają się tu wzory wyprowadzone w [16] oraz zamieszczone tam zestawienia tabelaryczne. Ponieważ w przypadku ciągów poligonowych prostoliniowych i równobocznych zachodzi zależność $m_{dh} = \frac{s}{2} m_{dr}$

(por. uproszczenia wzoru (2)), możemy na podstawie tabeli zamieszczonej w [16] na str. 175 zestawić następującą tabelkę współczynników wagowych dla poprzecznej składowej przesunięcia środkowego punktu ciągu prostoliniowego i równobocznego, nawiązanego obustronnie bez azymutów, do dwu punktów o błędach średnich wyznaczenia składowej dx_d równych m_{dx_d}

Tablica 5

Wyrównanie różnic obserwacji zewnętrznej części osnowy kontrolnej
(dostosowano do pktów. 1,2)

Nr obs.	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	Z ₅	dx ₃	dy ₃	dx ₄	dy ₄	dx ₅	dy ₅	dx ₆	dy ₆	dx ₇	dy ₇	dx ₈	dy ₈	ℓ	s
1	/																	0	1,00
2	/					4,30	1,48											0,20	6,98
3	/									1,87	1,64							-0,40	4,11
4	/							0,52	3,28									11,90	16,70
5		/								-1,00	3,68							0	3,68
6		/						-1,76	1,54									3,20	3,98
7		/				-5,35	2,12											0,10	-2,13
8		/																0	1,00
9			/			4,30	1,48											0	6,78
10			/			-5,35	2,12											-0,20	-2,43
11			/			-1,97	-4,20			1,97	4,20							0,30	1,30
12			/			2,10	-3,00	-2,10	3,00									7,90	8,90
13				/				0,52	3,28									0	4,80
14				/		2,10	-3,00	-2,10	3,00									-4,00	-3,00
15				/				-1,76	1,54									-8,50	-7,72
16				/				-3,90	0,44	3,90	-0,44							-15,00	-14,00
17				/				-2,69	-0,92							2,69	0,92	-20,20	-19,20
18				/				-2,03	-3,20					2,03	3,20			-14,00	-13,00
19				/				3,23	-7,15			-3,23	7,15					-33,30	-32,30
20					/					-2,90	-5,23					2,90	5,23	0	1,00
21					/					1,48	-3,30			-1,48	3,30			5,70	-6,70
22					/					2,70	-1,26	-2,70	1,26					0,20	4,20
23					/			-3,90	0,44	3,90	-0,44							11,20	12,20
24					/					1,87	1,64							14,30	18,81
25					/	-1,97	-4,20			1,97	4,20							14,50	15,50
26					/			-1,00	3,68									14,00	17,68
27								-2,15	4,73	1,80	-0,84	0,35	-3,89					5,20	5,20
28										-1,80	0,84	0,06	-0,84			1,74		-1,41	-1,41
29								1,36	2,13	0,99	-2,16			-2,39	0,07			-5,03	-5,03
30								-1,79	-0,61			1,74				0,05	0,61	5,08	5,08
31								1,79	0,61	-1,93	-3,49					0,14	2,88	-4,00	-4,00

Równania normalne

400					4,30	1,48	0,52	3,28	1,87	1,64								1,70	28,79
	400				-5,35	2,12	-1,76	1,54	-1,00	3,68								3,30	6,53
		400			-0,92	-3,60	-2,10	3,00	1,97	4,20								8,00	14,55
			700		2,10	-3,00	-8,73	-3,01	3,90	-0,44	-3,23	7,15	2,03	3,20	2,69	0,92		-95,00	-84,42
				700	-1,97	-4,20	-3,90	0,44	8,02	-0,71	-2,70	1,26	-1,48	3,30	2,90	5,23		59,90	73,09
					110,82	-6,01	-8,82	12,60	-7,76	-16,55								-19,57	62,87
					66,65	12,60	-18,00	-16,54	-35,28									-73,78	-77,56
						80,65	-37,25	-36,40	-3,95	-14,30	31,46	-7,37	-6,40	-7,07	1,59		-36,93	-48,16	
							134,51	12,88	-11,10	23,69	-69,52	-11,59	-10,09	-2,42	0,54		350,72	380,22	
								76,25	20,34	-6,77	-2,09	-4,56	4,95	-11,81	-20,73	48,04		72,46	72,46
								126,22		3,16	0,97	10,05	-11,04	-14,19	-37,40	138,36		177,96	177,96
									20,88	-27,91						0,19	1,06	117,59	111,66
										68,55						-1,46		-256,89	-248,48
											12,02							-24,83	-24,29
																		-26,34	-19,85
																		18,69	18,08
																		36,87	-27,01
																			-20,85

0,0" 0,2 0,1 -11,8 14,4 0,0mm -0,1 1,2 3,4 0,0 -0,5 6,5 2,8 5,8 -0,1 0,3 -3,0 Niewiadome
1,5" 1,5 1,4 1,9 1,9 0,2mm 0,5 0,6 0,7 0,6 0,6 1,0 1,0 1,0 1,0 1,0 1,0 Bł. śr. niew.

$$m_0 = \sqrt{\frac{61}{14}} \approx 2,1$$

Tablica 6

Wyównanie różnic obserwacji wewnętrznej części osnowy kontrolnej
(dostosowano do pktów 6,7,8 z uzmiennieniem)

Nr. obs	dx ₆	dy ₆	dx ₇	dy ₇	dx ₈	dy ₈	dx ₉	dy ₉	dx ₁₀	dy ₁₀	dx ₁₁	dy ₁₁	dx ₁₂	dy ₁₂	dx ₁₃	dy ₁₃	dx ₁₄	dy ₁₄	dx ₁₅	dy ₁₅	L	S
32	-17,20	10,00					17,20	-10,00													-67,40	-67,40
33	-10,00	-17,20					10,00	17,20													-64,40	-64,40
34				20,00										-20,00							2,20	2,20
35			-20,00										20,00								-117,60	-117,60
36					17,00	10,40													-17,00	-10,40	-24,80	-24,80
37					-10,40	17,00													10,40	-17,00	-52,60	-52,60
38							-17,20	-20,20	37,60	32,00	-20,40	-11,80									-9,56	-9,56
39									-21,20	-12,20	46,70	16,60	-25,50	-4,40							26,50	26,50
40											-25,20	-4,40	49,50	0,40	-24,30	4,00					-35,20	-35,20
41													-25,20	4,10	46,60	-16,40	-21,40	12,30			1,00	1,00
42															-21,00	12,10	38,20	-31,60	-17,20	19,50	-1,50	-1,50
43							-7,60	6,50	7,60	-6,50											0,90	0,90
44									-5,00	8,70	5,00	-8,70									7,00	7,00
45											-1,70	9,90	1,70	-9,90							-1,40	-1,40
46													1,60	9,90	-1,60	-9,90					0,50	0,50
47															5,00	8,70	-5,00	-8,70			0	0
48																	7,50	6,60	-7,50	-6,60	0,20	0,20
dx ₆	2,00																				12,96	14,96
dy ₆		2,00																			5,50	7,50
dx ₇			2,00																		11,58	13,58
dy ₇				2,00																	-0,26	1,74
dx ₈					2,00																0,58	2,58
dy ₈						2,00															-5,92	-3,92

Równania normalne

399,84																					1829,20	1833,20
	399,84																				444,68	448,68
		404,00																			2375,16	2379,16
			404,00																		4,348	4,748
				401,16																	126,60	130,60
					401,16																-1163,96	-1159,96
						749,44	298,04	-704,48	-501,00	350,88	202,96										-1645,69	-1645,69
							846,13	-710,12	-688,65	412,08	238,36										-234,72	-234,72
								194,596	1368,94	-1782,08	-752,10	540,60	93,28								-949,42	-949,42
									1290,78	-1179,04	-655,81	311,10	53,68								-574,17	-574,17
										3259,98	1066,49	-244,114	-198,73	612,36	-100,80						2356,99	2356,99
											607,86	-624,27	-172,81	106,92	-17,60						632,83	632,83
												4140,99	27,69	-2379,73	595,44	539,28	-309,96				-4796,93	-4796,93
													632,35	165,50	-163,65	-87,74	50,43				-151,77	-151,77
														3230,61	-1056,20	-1824,44	1193,28	361,20	-409,50		932,66	932,66
															605,07	769,68	-659,77	-208,12	235,95		-180,30	-180,30
																1998,45	-1377,34	-713,29	695,40		-77,20	-77,20
																	1269,10	494,02	-659,76		61,02	61,02
																		749,25	-285,90		-101,14	-101,14
																			820,97		1121,55	1121,55

6,5mm 2,5 7,0 0,0 0,2 -3,0 4,7 1,6 1,3 1,0 2,0 0,0 0,0 -0,1 -0,2 -0,2 0,0 0,2 0,0 -0,2 Niewiadome
0,9mm 0,6 0,6 0,6 0,9 0,6 0,9 0,6 0,8 0,6 0,6 0,6 0,6 0,6 0,6 0,6 0,8 0,6 0,9 0,6 Bł.sr. niew.

$\frac{m_{dx_d}}{m_{dh}}$ n	0	2	10	20
1	1,12	1,74	7,14	14,18
2	1,50	2,10	7,60	14,98
3	2,46	2,82	7,48	14,36
4	3,22	3,52	7,90	14,78
5	4,36	4,58	8,30	14,80
6	5,34	5,54	8,92	15,26
11	12,08	12,16	14,00	18,60
16	20,24	20,28	21,44	24,70
21	31,56	31,58	32,34	34,58

Tabela współczynników $\sqrt{Q}$
do wzoru: $m_{dx} = \sqrt{Q} \cdot m_{dh}$

gdzie: n — liczba punktów ciągu o wyznaczanych przesunięciach.

Z dalej opisanych badań dokładnościowych wynika, że możliwe jest uzyskanie dokładności wyznaczenia zmiany strzałki $m_{dh} = 0,03$ mm. Podstawiając tą wartość do wzoru na błąd średni środkowego punktu otrzymamy następujące zestawienie:

m_{dx_d} n	0,0 mm	0,06 mm	0,3 mm	0,6 mm
3	0,08 mm	0,1 mm	0,3 mm	0,6 mm
6	0,2	0,2	0,3	0,6
11	0,4	0,4	0,4	0,6
16	0,6	0,6	0,6	0,7
21	0,9	0,9	1,0	1,0

Tabela m_{dx} (środk.)

Dla obliczenia przewidywanych dokładności wyznaczenia składowej dy przesunięcia punktu poligonowego (wzdłuż kierunku ciągu) można wykorzystać następujący wzór, uwzględniający zarówno wpływy błędów różnic długości m_{ds} jak i wpływ błędów wyznaczenia składowych dy_d , równych m_{dy_d} przy podobnych jak uprzednio warunkach nawiązania obustronnego:

$$m_{dy_i} = \sqrt{\frac{(m_{dy_d}^2 + i \cdot m_{ds}^2)(m_{dy_d}^2 + (n+1-i) \cdot m_{ds}^2)}{2 \cdot m_{dy_d}^2 + (n+1) m_{ds}^2}} \quad (10)$$

gdzie: i — kolejny numer punktu poligonowego.

Powyższy wzór, wyprowadzony przy założeniu, że składowa dy_i przesunięcia i -tego punktu wyznaczona została jako średnia arytmetyczna

z wyników dwu ciągów wiszących, wybiegających z punktów dostosowania (nawiązania) pozwala zestawić następującą tabelkę:

m_{dyd} n	0,0 mm	0,06 mm	0,3 mm	0,6 mm
3	0,2 mm	0,2 mm	0,3 mm	0,6 mm
6	0,3	0,3	0,3	0,6
11	0,3	0,3	0,4	0,6
16	0,4	0,4	0,4	0,6
21	0,5	0,5	0,5	0,6

Tabela m_{dy} (środk.)

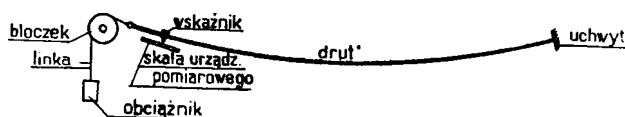
Stosownie do rezultatów obliczeń przedstawionych w [29] można uznać, że nawet w przypadku dosyć znacznych odchyień kształtu ciągu poligonowego od prostoliniowości nie zachodzą większe zmiany w dokładności wyznaczenia składowych położenia punktów. Wobec tego możemy z błędami nie przekraczającymi granic pewności (błąd średni błędu średniego) uznać wyniki przedstawione w powyższych tabelkach za miarodajne dla oceny dokładności również ciągów o zróżnicowanych kształtach lecz o utrzymanej zasadniczej tendencji przebiegu wzdłuż określonego kierunku (przy odchyleniach poszczególnych boków ciągu od kierunku zamykającego nie przekraczających 15—20°).

III. Idea urządzeń odtwarzających zmiany długości, warunki pracy urządzeń

Do wyznaczania zmian niewielkich odległości używane są tensometry. Ogólnie rzecz biorąc — tensometr składa się z dwu uchwytów przytwierdzanych do odkształcającego się elementu konstrukcji oraz urządzenia pozwalającego zmierzyć zmiany ich wzajemnej odległości zachodzące wskutek odkształcenia konstrukcji. Wzajemna odległość uchwytów wynosi zazwyczaj kilka do kilkunastu centymetrów, natomiast zakres pomiaru zmian rozstawu jest dużo mniejszy. W niektórych przypadkach stosuje się przedłużanie wzajemnej odległości uchwytów tensometru za pośrednictwem sztywnych przedłużaczy o niezmienniej długości (tensometr Hugenbergera).

W omawianym tu zagadnieniu zachodzi potrzeba wyznaczania drobnych zmian wzajemnych odległości punktów poligonowych. Zastosowanie do tego celu tensometrów ze sztywnymi przedłużaczami mogłoby spowodować duże trudności konstrukcyjne oraz poważnie zwiększyć

koszt urządzeń odtwarzających zmiany odległości. Wobec tego narzuca się myśl wykorzystania jako przedłużaczy tensometru drutów stalowych lub inwarowych. Jak wynika z publikacji [32], która ukazała się w trakcie trwania prób opisanych w dalszej części taki sposób rozwiązania niniejszego problemu nasunął się również Autorowi wspomnianej pracy. Pozostawiając chwilowo omówienie doświadczeń opisanych w [32] przedstawię koncepcję tensometru z przedłużaczem drutowym, która stała się podstawą do opracowania projektu i prototypu urządzeń odtwarzających zmiany długości boków poligonowych. Tensometr taki charakteryzuje rysunek schematyczny (rys. 8).



Rys. 8

Zawieszony zgodnie ze schematem drut zaopatrzony jest we wskaźnik, którego przesunięcia względem urządzenia pomiarowego pozwalają na wyznaczenie zmian odległości tego urządzenia od uchwytu drutu. Aby wyznaczona wielkość przesunięcia wskaźnika względem skali urządzenia pomiarowego była miarodajna dla oceny zmiany wzajemnej odległości uchwytu i urządzenia pomiarowego (zastabilizowanych w odkształcającej się ścianie budowli) powinny być zachowane rozpatrzone dalej warunki.

Miedzy odległością s uchwytu drutu i jego punktu podparcia na błoczku (przy założeniu, że znajdują się one na jednakowej wysokości) a długością krzywej zwisu drutu między tymi punktami l zachodzi zależność ¹⁾:

$$l = s \left(1 + \frac{8 \cdot f^2}{3 \cdot s^2} \right) \quad (1.3)$$

Ponieważ zachodzi związek:

$$f = \frac{q \cdot s^2}{8 \cdot H} \cong \frac{s^2}{\sigma} 10^{-3} \quad (2.3)$$

można napisać:

$$l = s + \frac{q^2 \cdot s^3}{24 \cdot H^2}$$

Zmiana wzajemnej odległości punktów podparcia i uchwycenia

¹⁾ Przy założeniu, że krzywa zwisu jest parabolą.

drutu o ds przy zachowanym niezmiennym obciążeniu spowoduje zmianę długości krzywej zwisu o dl zgodnie ze wzorem:

$$dl = ds + \frac{q^2 \cdot s^2}{8 \cdot H^2} ds$$

co możemy napisać w postaci przybliżonej:

$$dl \cong ds \quad (11)$$

Stopień przybliżenia jest tu zależny od zastosowanego naprężenia drutu i długości boku poligonowego s . Na przykład przy $s = 50$ m i zastosowanym naprężeniu drutu $\sigma = 10 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$ zaniedbany wyraz wynosi $\frac{q^2 \cdot s^2}{8 \cdot H^2} ds = 2 \cdot 10^{-4} ds$, co stanowi przy $ds < 2$ cm, nieuchwytną z punktu widzenia dokładności pomiaru wielkość 4μ .

Przyjmując, że urządzenie pomiarowe znajduje się blisko bloczka, przez który przełożony jest drut lub naciągająca linka, moglibyśmy uznać zaobserwowane zmiany położenia wskaźnika za równe zmianom długości krzywej zwisu a tym samym równe zmianom długości odcinka między uchwytem drutu a indeksem zerowym urządzenia pomiarowego. Dla wykonania pomiaru zmian należałoby mocować skalę urządzenia pomiarowego równolegle do końcowego odcinka krzywej zwisu.

Wskutek różnorodnych czynników natury fizycznej mogą nastąpić odchylenia od spełniania się zależności (11). Przeanalizujemy przeto, jakie warunki winny spełniać urządzenia odtwarzające zmiany długości, aby odchylenia te przyjmowały wielkości pomijalne lub pozwalały zredukować się na drodze wprowadzenia do wyników pomiaru odpowiednich poprawek.

Podstawowe znaczenie posiada potrzeba zachowania jednolitych warunków równowagi, nie zmieniających się z upływem czasu pracy urządzeń. Przeanalizujemy problem doboru najważniejszej wielkości siły naciągu drutu H oraz wielkości tolerancji zmian tej siły dH występujących wskutek wpływu oporów spowodowanych tarcieniem bloczka i wskutek innych czynników omawianych dalej.

Przyrost obciążenia drutu siłą dH ponad nominalne obciążenie siłą H powoduje przesunięcie wskaźnika na drucie względem skali urządzenia pomiarowego, odpowiadające pozornemu skróceniu odległości uchwytu drutu od indeksu zerowego skali. Ma to związek ze spłaszczeniem się krzywej zwisu i jednoczesnym wydłużeniem sprężystym drutu.

Z różniczkowania długości krzywej zwisu przy zmiennym obciążeniu i zachowanej niezmienniej długości ciężwy otrzymujemy zależność:

$$dl_1 = -2(l-s) \frac{dH}{H} = -\frac{q^2 \cdot s^3}{12 \cdot H^3} dH \quad (3.3)$$

Wydłużenie sprężyste drutu pod wpływem obciążenia siłą H wyraża się wzorem:

$$\Delta l = \frac{H \cdot l}{E \cdot F} = \frac{\sigma \cdot l}{E} \quad (4.3)$$

Z różniczkowania zależności (4.3) względem H otrzymamy:

$$dl_2 = \frac{l \cdot \sigma \cdot dH}{E \cdot H} \cong s \frac{\sigma \cdot dH}{E \cdot H} \quad (5.3)$$

Wielkość zmiany położenia wskaźnika na drucie spowodowana obydwooma przyczynami wyniesie: $dl = -dl_1 + dl_2$

$$dl = \left(\frac{q^2 \cdot s^3}{12 \cdot H^2} + s \frac{\sigma}{E} \right) \frac{dH}{H} \quad (6.3)$$

Ponieważ $q = \frac{G \cdot F}{1000}$ możemy napisać:

$$dl = \left(\frac{G^2 \cdot s^3}{12 \cdot 10^3 \cdot \sigma^2} + \frac{\sigma}{E} s \right) \frac{dH}{H} \quad (7.3)$$

Poszukujemy wielkości σ , przy której dl osiąga minimum, przyrównując w tym celu do zera pochodną wyrażenia w nawiasach (7.3). W rezultacie otrzymujemy:

$$\sigma = 0,0055 \sqrt[3]{G^2 \cdot E \cdot s^2} \quad (12)$$

Realizując wzór (12) otrzymamy dla drutu stalowego przy $G = 7,8$, $E = 2 \cdot 10^4$ wielkość optymalnego naprężenia:

$$\sigma = 0,59 \sqrt[3]{s^2} \quad (8.3)$$

zaś dla drutu inwarowego, przy $G = 8,2$, $E = 1,5 \cdot 10^4$:

$$\sigma = 0,55 \sqrt[3]{s^2} \quad (9.3)$$

Na podstawie powyższych wzorów możemy zestawzić optymalne wartości naprężeń drutów σ w zależności od długości:

Drut \ s	25 m	35 m	50 m
stalowy	5,0 $\frac{\text{kG}}{\text{mm}^2}$	6,2 $\frac{\text{kG}}{\text{mm}^2}$	7,9 $\frac{\text{kG}}{\text{mm}^2}$
inwarowy	4,7 „	5,9 „	7,6 „

Przy zastosowaniu optymalnych naprężeń drutu drobne zmiany naprężenia powodują zmiany położenia wskaźnika określone co do wielkości następującymi wzorami:

$$\text{a) dla drutu stalowego} \quad dl = 38 \cdot 10^{-6} s^{5/3} \frac{dH}{H} \quad (10.3)$$

$$\text{b) dla drutu inwarowego} \quad dl = 47 \cdot 10^{-6} s^{5/3} \frac{dH}{H} \quad (11.3)$$

Na podstawie powyższych wzorów zestawimy tabelkę wartości $dl \frac{H}{dH}$:

Drut \ s	25 m	50 m
stalowy	0,0081 m	0,0258 m
inwarowy	0,0100 „	0,0320 „

Z powyższej tabelki wynika np., że dla uzyskania $dl < 0,1$ mm należałoby jako granicę tolerancji zmian siły naciągu przyjąć: $\frac{dH}{H} < 0,01$

przy $s = 25$ m oraz $\frac{dH}{H} < 0,003$ przy $s = 50$ m. Tak małe tolerancje siły naciągu są przyczyną, dla której właściwa konstrukcja bloczków służących do przenoszenia nominalnej siły naciągu obciążnika na rozwieszony drut urasta w pomiarach bazowych do jednego z głównych problemów badań. Również w omawianym tu zagadnieniu właściwe zaprojektowanie systemu przekazującego siłę naciągu stanowi punkt wyjścia dla uzyskania dobrych rezultatów pomiaru.

Przy wyborze optymalnego obciążenia należy prócz powyższych wniosków wynikających z wzoru (12) wziąć pod uwagę również inne czynniki jak np. fakt, że druty odtwarzające zmiany długości mają pracować w sposób ciągły i przebywać pod obciążeniem przez długi czas. Wynika z tego możliwość wydłużania się drutów pod wpływem długotrwałego obciążenia. Opublikowane wyniki niektórych prób z długotrwałym obciążeniem drutów bazowych [4] wskazują na możliwość zachodzenia z upływem czasu znacznych zmian długości, nie dających się pominąć przy obliczaniu wyników pomiaru.

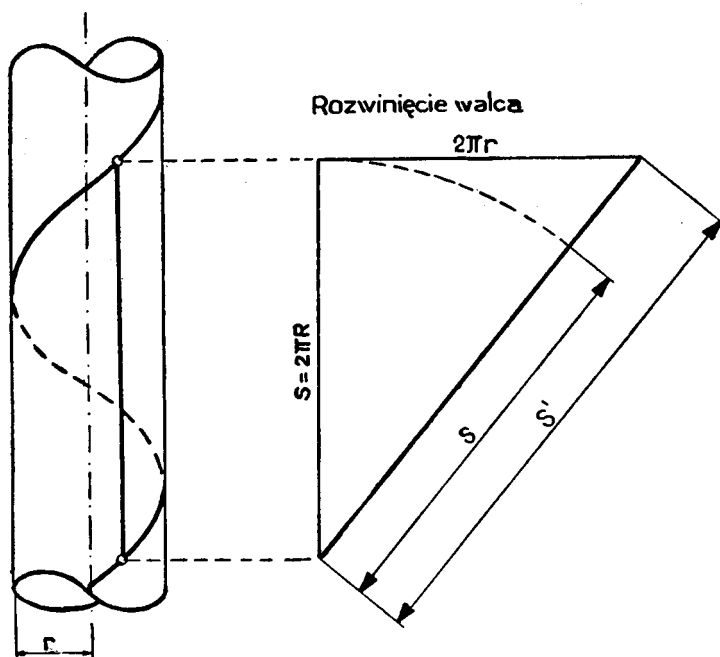
Można przypuszczać, że wydłużanie się drutów pod wpływem obciążenia może mieć dwa źródła. Jednym z nich jest zachodzenie zmian molekularnych oraz ubytki przekroju poprzecznego drutu wskutek korozji jego powierzchni zaś drugim sprężystość poprzeczna drutu, która

powoduje, że drut rozwinięty z bębna czy też zwoju nie przyjmuje po rozwieszeniu teoretycznego kształtu krzywej zwisu lecz układa się wzdłuż linii śrubowej, opasującej tą krzywą. Ścisłe określenie różnic długości drutu i krzywej zwisu występujących wskutek tego byłoby bardzo żmudne i jednocześnie niezbyt pewne z uwagi na małą uchwytność parametrów charakteryzujących wspomniane zjawisko. Wobec tego — dla przybliżonego zorientowania się w zagadnieniu — wykorzystamy wzory stosowane w pomiarach górniczych dla określenia promienia walca, na jakim opasana jest linia śrubowa zwisu drutu zawieszonego pionowo pod obciążeniem. Według publikacji [19] stosuje się dla określenia promienia walca r wzór:

$$r = 10^5 \frac{d^4}{R \cdot H} \quad (12.3)$$

gdzie: d — średnica drutu w cm, R — promień bębna lub zwoju drutu przed rozwinięciem go, r — promień walca.

Wzór ten posiada charakter przybliżony z racji nieuwzględniania różnic sprężystości poprzecznej poszczególnych gatunków drutu i sposobu rozwijania zwoju a ponadto wyznaczany promień walca odpowiada



Rys. 9

warunkom pionowego zawieszenia drutu. Tym nie mniej umożliwia on określenie rzędu wielkości zmian długości spowodowanych zmianą parametrów sprężyny, mogącą zająć skutek długotrwałego obciążenia.

Jeśli przetniemy drut dwoma przekrojami normalnymi, to różnica między odległością tych przekroi a długością sprężyny nawiniętej na walec o promieniu r podzielona przez odległość przekroi wyniesie:

$$\frac{s - s'}{s} = -0,5 \cdot 10^{10} \frac{d^8}{R^4 H^2} \quad (13.3)$$

Wzór ten został wyprowadzony przy założeniu, że jednemu skokowi linii śrubowej odpowiada długość drutu równa obwodowi bębna lub zwoju. Jak wiadomo — długość ta jest zazwyczaj większa i zależy od sposobu rozwijania zwoju.

Z wzoru (13.3) wynika, że jeśli np. drut stalowy $d = 0,8$ mm nawinięty na bęben o promieniu $R = 20$ cm rozwinieśmy i obciążymy po rozwieszeniu siłą $H = 4$ kG (optymalne obciążenie przy długości drutu $s = 50$ m) to $\frac{s - s'}{s} = -3 \cdot 10^{-6}$.

Jeśli założyć, że pod wpływem długotrwałego obciążenia sprężyna utworzona przez rozwieszony drut rozkręca się, zaś promień jej zmniejsza się do zera — możemy spodziewać się wydłużenia drutu o wielkość dochodzącą do określonej wzorem (13.3). Zauważmy, że pod wpływem właściwego sposobu rozwijania drutu ze zwoju następuje jego rozginanie od pierwotnej krzywizny nadanej przez zwój. Wyraża się to zwiększeniem promienia krzywizny R . W pomiarach górniczych przyjmuje się, że zwiększenie promienia jest około 2—3-krotne. Konsekwencją tego stanu rzeczy będzie zmniejszenie wpływu początkowej krzywizny nadanej drutowi przez zwój, wyrażonego wzorem (13.3) odpowiednio 16 lub 81-krotne.

Biorąc pod uwagę obydwa wymienione źródła przyczyn wydłużania się drutów wraz z upływem czasu zauważmy, że jedno z nich wskazuje na potrzebę stosowania obciążeń możliwie jak najmniejszych zaś drugie wprost przeciwnie. Ponieważ jednak wpływ zaniku promienia sprężyny wydaje się być zn'komy, uznamy za właściwe stosowanie niedużych obciążeń. W dalej omówionych pracach eksperymentalnych zastosowano kilka różnych obciążeń drutów, bliskich wartości optymalnej, określonej wzorem (12).

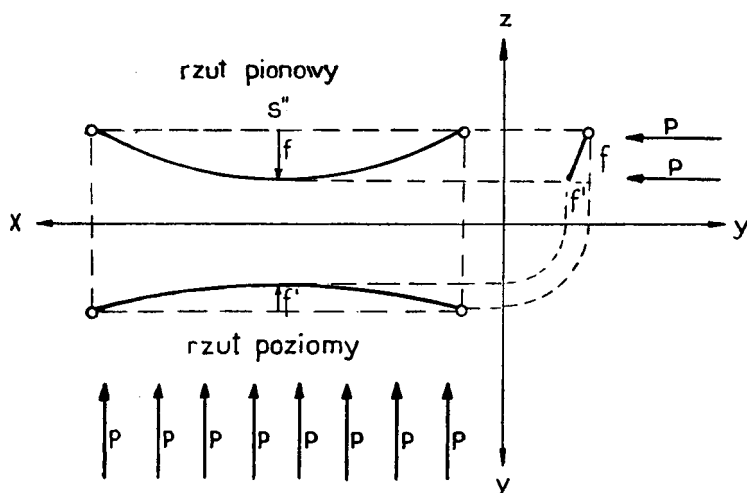
Przeanalizujemy wpływy środowiska na zmienność siły naciągu drutu, która obok omówionej niestabilności drutu decyduje w znacznej mierze o popełnianych błędach wyznaczenia zmian długości.

1) Wpływ wiatru na zmianę krzywej zwisu (oraz jej długości)

W obliczeniach statycznych [22] na obciążenie wiatrem stosuje się wzór empiryczny $P = 0,0625 \cdot V^2$, określający zależność między P — obciążeniem podstawowym powierzchni, wyrażonym w $\frac{\text{kG}}{\text{m}^2}$ a szybkością wiatru V , wyrażoną w $\frac{\text{m}}{\text{sek}}$. Wzór ten nie uwzględnia różnic wynikających ze zmian temperatury, ciśnienia i wilgotności powietrza a odnosi się do warunków przeciętnych w naszym klimacie. Obciążenie podstawowe odnosi się do powierzchni płaskiej, ustawionej prostopadle do kierunku wiatru. Obciążenie jednostkowe dowolnej powierzchni wyraża się wzorem $W = P \cdot K$, gdzie: K — wyznaczony doświadczalnie współczynnik opływu, zależny od kształtu powierzchni, jej ustawienia względem kierunku wiatru i stopnia szorstkości. Nie popełnimy dużego błędu przyjmując, że siła wywierana przez wiatr jest równa obciążeniu podstawowemu powierzchni przekroju poprzecznego drutu (przy kierunku wiatru prostopadłym do drutu). Wówczas obciążenie wiatrem 1 mb drutu wyniesie $q_1 = P \cdot d \cdot 10^{-3}$, gdzie q_1 wyrażone jest w $\frac{\text{kg}}{\text{mb}}$, d — w mm.

Wyboczenie drutu pod wpływem obciążenia wiatrem scharakteryzujemy strzałką wyboczenia f' (przy założeniu, że krzywa wyboczenia jest również parabola, podobnie jak to uprzednio przyjęliśmy dla krzywej zwisu). Otrzymamy w rezultacie wzór:

$$f' = \frac{q_1 \cdot s^2}{8 \cdot H} = 10^{-5} \frac{V^2 \cdot s^2}{d \cdot \sigma} \quad (14.3)$$



Rys. 10

W przypadku, gdy wiatr wieje nieprostopadle do kierunku drutu przyjmuje się naogół (wynika to ze znanych w literaturze geodezyjnej wzorów redukcyjnych), że zachodzi w dalszym ciągu symetria wyboczenia. Wielkość strzałki wyboczenia obliczamy w tym przypadku ze wzoru:

$$f' = 10^{-5} \frac{V^2 \cdot s^2}{d \cdot \sigma} \sin^2 \alpha \quad (15.3)$$

gdzie α — kąt między kierunkiem wiatru a kierunkiem drutu.

Pod wpływem parcia wiatru strzałka zwisu zwiększa się o wielkość $\Delta f = \sqrt{f^2 + f'^2} - f$ oraz odchyła od położenia pionowego. Zwiększenie strzałki krzywej zwisu powoduje zmianę jej długości wyrażającą się wzorem:

$$dl = \frac{16 \cdot f}{3 \cdot s} \cdot df \quad (16.3)$$

Przyrównując $df = \Delta f$ możemy napisać¹⁾:

$$dl = \frac{16 (\sqrt{f^2 + f'^2} - f) f}{3 \cdot s} \quad (17.3)$$

Na podstawie wzorów (14.3), (17.3) możemy obliczyć wielkości dl spowodowane wpływem wiatru. Np. przy $s = 50$ m, $d = 0,8$, $\sigma = 8 \frac{\text{kG}}{\text{mm}_2}$ (zgodnie z tablicą optymalnych naprężeń) otrzymamy przy wietrze wiejącym prostopadle do kierunku drutu:

$V \frac{\text{m}}{\text{sek}}$	1	2	3
dl mm	0,0009	0,0140	0,0710

Przy $s = 25$ m, $d = 0,8$ mm, $\sigma = 5 \frac{\text{kG}}{\text{mm}_2}$ otrzymamy:

$V \frac{\text{m}}{\text{sek}}$	1	2	3	4
dl mm	0,0003	0,0040	0,0230	0,0750

¹⁾ Przy małych wielkościach V można stosować wzór uproszczony

$$dl = \frac{8}{3} \cdot 10^{-10} \cdot \frac{V^4 s^3}{d^2 \cdot \sigma^2} \sin^4 \alpha, \text{ wyprowadzony przy założeniu } df = f'^2/2f.$$

Podane wielkości, obliczone z powyższych wzorów pokrywają się w przybliżeniu z wartościami obliczonymi ze stosowanych w pomiarach bazowych wzorów redukcyjnych [10].

Przyjmuje się w niektórych źródłach, że zmiana krzywizny i jej długości przy wietrze wiejącym prostopadle do kierunku drutu jest częściowo kompensowana przez odpowiednie zwiększenie siły naciągu wskutek oddziaływania wiatru na obciążniki [9].

2) Wpływ zanieczyszczeń drutu na zmiany warunków równowagi i zmianę długości krzywej zwisu

Wskutek długotrwałego zawieszenia drutów odtwarzających zmiany długości mogą na nich powstawać osady kurzu oraz może skraplać się para wodna. Wówczas obciążenie jednostkowe drutu q otrzymuje przyrost dq . Różniczkując (2.3) względem q otrzymamy:

$$dl = 2(l - s) \frac{dq}{q} \quad (18.3)$$

Można obliczyć, że przy optymalnym naprężeniu i długości drutu równej $s = 50$ m dla otrzymania $dl < 0,05$ mm należałoby zachować $dq < 0,01 \cdot q$. Oznacza to, że jeśli ciężar właściwy zanieczyszczeń jest równy w przybliżeniu jedności, to warstwa ich nie powinna przekraczać 0,08 powierzchni przekroju poprzecznego drutu.

Ponieważ trudno jest określić na drodze teoretycznej ilość osadów powstających na drucie i szybkość ich gromadzenia się, w toku dalej opisanych prac eksperymentalnych zbadano praktycznie wpływ zanieczyszczeń drutów na wyniki pomiaru.

Wymienione dotychczas źródła błędów posiadają decydujący wpływ na wyniki pomiaru zmian długości. Przeprowadzona pokrótce analiza wartości tych wpływów ma na celu ustalenie wymaganych warunków dla prawidłowej pracy urządzeń oraz trybu postępowania przy pomiarach.

Należy jeszcze dodać, że poważnym źródłem błędów może być również rozszerzalność termiczna drutu. Z tego względu należy dążyć do projektowania urządzeń pomiarowych opartych na wykorzystaniu drutów o małych współczynnikach rozszerzalności termicznej, instalować urządzenia w miejscach wyróżniających się małymi i powolnymi zmianami temperatur oraz mierzyć temperatury drutów w czasie obserwacji z możliwie jak największą dokładnością.

IV. Idea zespołu urządzeń odtwarzających zmiany strzałek, warunki pracy urządzeń

Pomiar wielkości strzałek można wykonać przy użyciu przyrządów optycznych lub mechanicznych, opartych na wykorzystaniu drutów. W naszym przypadku — z uwagi na zamiar opracowania umożliwiającego dokonywanie rejestracji zachodzących zmian strzałek — bardziej korzystne jest rozpatrywanie konstrukcji przyrządów mechanicznych, bowiem występuje wówczas możliwość obserwowania lub rejestrowania zmian położenia drutu z bardzo małej odległości.

Należy tu podkreślić, że próby zastosowania drutu do wyznaczania poziomych przesunień były dokonane w Związku Radzieckim [21]. Zastosowano tam mianowicie tak zwaną metodę pływającej struny, to jest pojedynczego drutu rozwieszonego w galerii zapory pomiędzy dwoma punktami i podpartego w kilkudziesięciu miejscach na pływakach zanurzonych w specjalnych zbiorniczkach przytwierdzonych do ściany galerii. Pływaki, które mają być przez drut usytuowane w sposób jednoznaczny względem płaszczyzny pionowej przechodzącej przez punkty utwierdzenia końców drutu, zaopatrzone są we wskaźniki, które pozwalają określić prostopadłe do drutu składowe przesunień skal zastabilizowanych w ścianie galerii. Tym samym omawiana metoda ma zastępować optyczny sposób pomiaru odchyień od pojedynczej prostej (alignement). Zastosowanie wspomnianej metody w warunkach spotykanych na naszych zaporach lub innych budowlach nie wydaje się łatwe z uwagi na brak odpowiedniego miejsca dla założenia instalacji. Ponadto dotychczas nie są nam znane wyniki badań dokładnościowych metody „pływającej struny” ani też warunki eksploatacyjne urządzeń odtwarzających i pomiarowych.

Rozpatrzmy tu koncepcję pomiaru strzałek w ciągu poligonowym przy wykorzystaniu zespołu drutów, z których każdy zwisa swobodnie (bez pływaków podpierających) pomiędzy punktami utwierdzenia końców. Podobnie jak przy pomiarach dla celów kolejowych w ogólnym zarysie zasada pomiaru jest ta sama. Mianowicie należy pomiędzy punktami poligonowymi L , P rozciągnąć i napiąć drut oraz zmierzyć rzut poziomy jego odległości od punktu poligonowego C . Z uwagi jednak na odmienny cel opracowania urządzeń (dla działania ciągłego) oraz ze względu na zasadnicze różnice w wymaganych dokładnościach rezultatów, realizacja zasady pomiaru jest tu inna aniżeli w pomiarach kolejowych.

Przy projektowaniu urządzeń musimy wziąć pod uwagę potrzebę jednoznacznego prowadzenia końców drutu przy jednoczesnej możliwości kompensowania zmian jego zwisu, zachodzących wskutek rozszerzalności

termicznej oraz innych przyczyn jak np. rozciągania się i osłabiania drutu wraz z upływem czasu zawieszenia. Potrzeba kompensowania zmian zwisu podyktowana jest tu względami pomiarowymi co znajdzie swój wyraz w dalszych omówieniach tematu.

Projekt urządzeń odtwarzających zmiany strzałek zakłada przewieszanie drutu przez bloczki obracające się na osiach zastabilizowanych w miejscach punktów poligonowych L , P oraz naciągnięcie go przy wykorzystaniu obciążników. Podobnie jak przy zawieszeniu drutów służących do odtwarzania zmian długości można tu jeden koniec drutu zamocować na stałe zaś obciążyć tylko drugi koniec. Na tym kończą się podobieństwa obu zawieszeń, bowiem wymagania dotyczące zachowania się drutu służącego do wyznaczania zmian strzałek są inne. Zachodzi tu mianowicie warunek, aby końce drutu nie podlegały przesunięciom poprzecznym wraz z obrotami bloczków. W związku z tym bloczki nie mogą posiadać luzów umożliwiających ich przesuwanie się wzdłuż osi obrotu, zaś sam drut winien być jednoznacznie prowadzony przez rowki w kształcie litery V, wytoczone na obwodzie bloczków.

Następnym wymaganiem warunkiem jest uniemożliwienie wybaczania się rozwieszonego drutu z położenia w płaszczyźnie pionowej przechodzącej przez punkty utwierdzenia końców. Wyboczenie takie może być w głównej mierze spowodowane wpływem wiatru¹⁾. W przypadku pomiaru strzałek i ich zmian nie jest więc szkodliwą możliwością znacznego nawet wydłużania się drutu pod wpływem długotrwałego obciążenia, natomiast ważne jest przyłożenie do drutu tak dużych obciążeń, przy których wybaczający wpływ wiatru będzie zredukowany do minimum.

Z analizy wzoru (15.3) wynika, że strzałka wyboczenia drutu z położenia w płaszczyźnie pionowej jest tym mniejsza, im większe naprężenie przyłożymy do drutu. Przyłożenie dużego naprężenia jest tu konieczne z uwagi na potrzebę rozciągania drutu na możliwie długich odcinkach równych w przypadku ciągu prostoliniowego podwójnym długościom jego boków. Z wzoru (2.3) wynika, że wraz ze wzrostem długości drutu wzrasta strzałka zwisu co może być niekorzystne z uwagi na miejsce zajmowane przez urządzenia odtwarzające. Również i z tego względu — dla zmniejszenia strzałki zwisu — zastosujemy znaczne naprężenia drutu.

Powyższe wywody wskazują na potrzebę stosowania drutów możliwie jak najbardziej wytrzymałych na rozciąganie.

¹⁾ Analizujemy jedynie wpływy wybaczające drut w sposób zmienny, bowiem wyboczenia o charakterze stałym (np. wskutek przyciągania górotworu) nie obciążają różnic wyników pomiarów.

Bardzo ważnym czynnikiem wymagającym rozpatrzenia jest wybór drutu o właściwej wytrzymałości na rozciąganie i o odpowiedniej grubości. Przy rozpatrywaniu najwłaściwszej grubości drutu należy wziąć pod uwagę następujące czynniki:

1. Wyboczący wpływ wiatru, wyrażony wzorem (15.3), który wskazuje na potrzebę przyjmowania dużych wartości d .

2. Spiralność rozwieszonego drutu, wyrażona wartością promienia r , określonego w przybliżeniu wzorem (12.3). Czynnikiem ten wskazuje na potrzebę przyjmowania małych wartości d .

3. Znany i opisany w literaturze [7] fakt, że druty cienkie posiadają większą wytrzymałość aniżeli druty grube z tego samego materiału. Czynnikiem ten wskazuje na potrzebę przyjmowania małych wartości d .

4. Ponieważ obserwacji podlega sam drut, należy dążyć do tego aby tolerancje dokładnościowe odchylen od nominalnego przekroju poprzecznego drutu były możliwie małe. Jak wiadomo, błędy wymiarów przekroju poprzecznego drutu zmniejszają się na ogół wraz z samą średnicą drutu. Z tego względu należy przyjmować druty o małych wartościach d .

Reasumując stwierdzamy tu potrzebę ustalenia optymalnej grubości drutu. Praktycznie nie jest możliwe znalezienie optymalnej grubości drutu na drodze ujęcia wszystkich wymienionych czynników w formie matematycznej i ustalenia odpowiedniej zależności. W związku z tym postawiłem a priori założenie, że optymalna grubość drutu zawiera się w granicach $0,2 \text{ mm} < d < 0,4 \text{ mm}$. Sprawdzeniem słuszności takiego założenia mogą być wyniki przeprowadzonych prac eksperymentalnych. W późniejszym okresie celowość przyjęcia takiej grubości drutu potwierdzona została przez przyjęcie dla podobnego celu $d = 0,2 \text{ mm}$ w pracach badawczych opisanych w [31].

Niezależnie od wymagań stawianych urządzeniom służącym do odtworzenia zmian strzałek konieczne jest rozpatrzenie wymagań w stosunku do środowiska pomiarów. Rozpatrując wzór (14.3) możemy zestawić tabelkę dopuszczalnych szybkości wiatru, w kierunku prostopadłym do kierunku drutu, przy których wyboczenie nie przekroczy zanedbywalnej wielkości $f' = 0,01 \text{ mm}$. W przypadku np. drutu $d = 0,35 \text{ mm}$ (posiadanego w momencie rozpoczęcia badań eksperymentalnych) otrzymamy następujące dopuszczalne szybkości ruchu powietrza: (patrz tabela na str. 171).

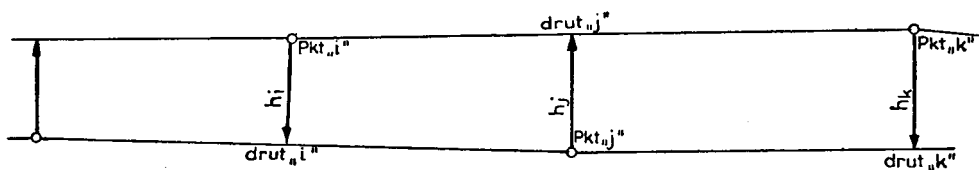
Podane w tabelce wielkości odpowiadają trudnym do uzyskania w otwartym terenie, praktycznie bezwietrznym warunkom. W tunelach pozbawionych silnych ciągów powietrza w kierunku prostopadłym do osi podłużnej (z wyjątkiem miejsc w pobliżu szybów) należy spodziewać się możliwości zachowania podanych warunków. W przypadku instalacji

wania urządzeń odtwarzających zmiany strzałek na zewnątrz budowli należałoby zastosować na całej długości przebiegu drutów osłony zabezpieczające przed podmuchami wiatru oraz opadami atmosferycznymi.

σ s	$50 \frac{\text{kG}}{\text{mm}^2}$	$100 \frac{\text{kG}}{\text{mm}^2}$
50 m	$0,1 \frac{\text{m}}{\text{sek}}$	$0,1 \frac{\text{m}}{\text{sek}}$
100 „	0,04 „	0,06 „
200 „	0,02 „	0,03 „

Rozpatrzmy warunki projektowe, jakie wynikają z zamiaru powiązania szeregu pojedynczych instalacji odtwarzających poszczególne strzałki i ich zmiany w jedną całość, umożliwiającą odtwarzanie zmian strzałek w całym ciągu poligonowym.

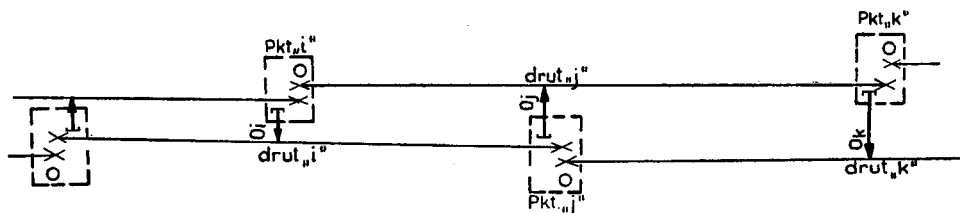
Dla odtworzenia strzałek w ciągu poligonowym należałoby punkty uchwycenia poszczególnych drutów jak i indeksy zerowe skal urządzeń pomiarowych umiejscowić w punktach poligonowych zgodnie ze schematem podanym na rysunku 11.



Rys. 11

Pomiar strzałki byłby tu identyczny z pomiarem odległości punktu poligonowego od rzutu poziomego odpowiedniego drutu, uchwyconego obustronnie w miejscach sąsiadujących punktów ciągu. Jak już stwierdziłem we wstępie — nie jest w naszym przypadku istotne wyznaczanie najprawdopodobniejszych wartości strzałek lecz tylko ich zmian. Wobec tego korzystne będzie z konstrukcyjnego punktu widzenia odtwarzanie w ciągu poligonowym strzałek nieco zniekształconych, pod warunkiem jednak, że zniekształcenia te będą praktycznie niezmiennie. Wówczas zawieszenia drutów i zamocowania urządzeń pomiarowych mogą realizować schemat podany na rysunku 12.

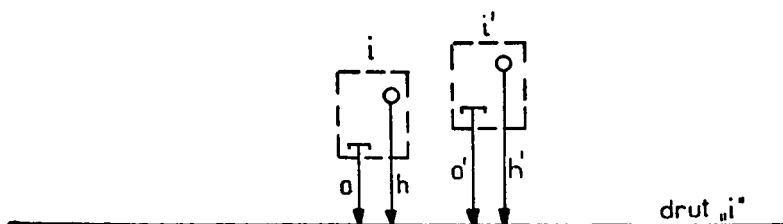
Na rysunku 12 oznaczono: o — miejsce punktu poligonowego, T — indeks zerowy skali urządzenia pomiarowego, x — bloczek do przewieszania i jednoznacznego prowadzenia drutu. Wszystkie te oznaczenia objęte pojedynczym konturem, wykreślonym linią przerywaną dotyczą



Rys. 12

części składowych pojedynczego urządzenia, zastabilizowanego w miejscu punktu poligonowego i spełniają warunek wzajemnej nieruchomości.

Oznaczmy O i O' odczyty położenia rzutu poziomego drutu na skali urządzenia pomiarowego, dokonane w dwu cyklach pomiarowych. Jeśli przyjmiemy, że przesunięcie punktu i do nowego położenia i' nastąpiło na drodze równoległego przesunięcia całego urządzenia pomiarowego wraz z fragmentem muru budowli, zaś punkty uchwycenia drutu nie zmieniły swego położenia to $O' - O = dh_i$ (zgodnie z rysunkiem 13).



Rys. 13

Jeśli wskutek odkształcenia nastąpiło przesunięcie urządzenia zastabilizowanego w miejscu punktu poligonowego i do położenia i' połączone z obrotem tego urządzenia o kąt δ — znajdą zależności zgodne z rysunkiem 14:

$$(O' + b) \cos \delta + a \cdot \sin \delta - O = dh_i \quad (1.4)$$

Przyjmując np. $O' + b = 0,2$ m oraz uznając w powyższej zależności wyrażenia mniejsze od $0,01$ mm za zanedbywalne, możemy dokonać uproszczenia:

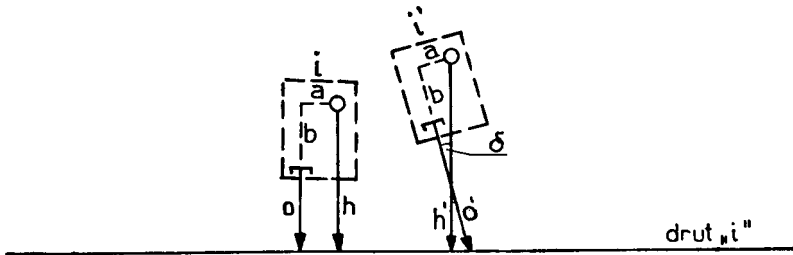
$$\cos \delta = 1 \text{ przy } \delta < 63^\circ.$$

Wówczas zależność (1.4) upraszcza się do postaci:

$$O' + a \cdot \sin \delta - 0 = dh_i \quad (2.4)$$

Wyraz $a \cdot \sin \delta$ lewej strony powyższej zależności możemy również pominąć pod warunkiem, że wartość jego nie przekroczy 0,01 mm. Gdy np. $a = 0,07$ m to obroty nie powinny przekraczać $\delta < 1^\circ$. Wówczas możemy posługiwać się uproszczoną zależnością:

$$O' - O = dh_i \quad (3.4)$$



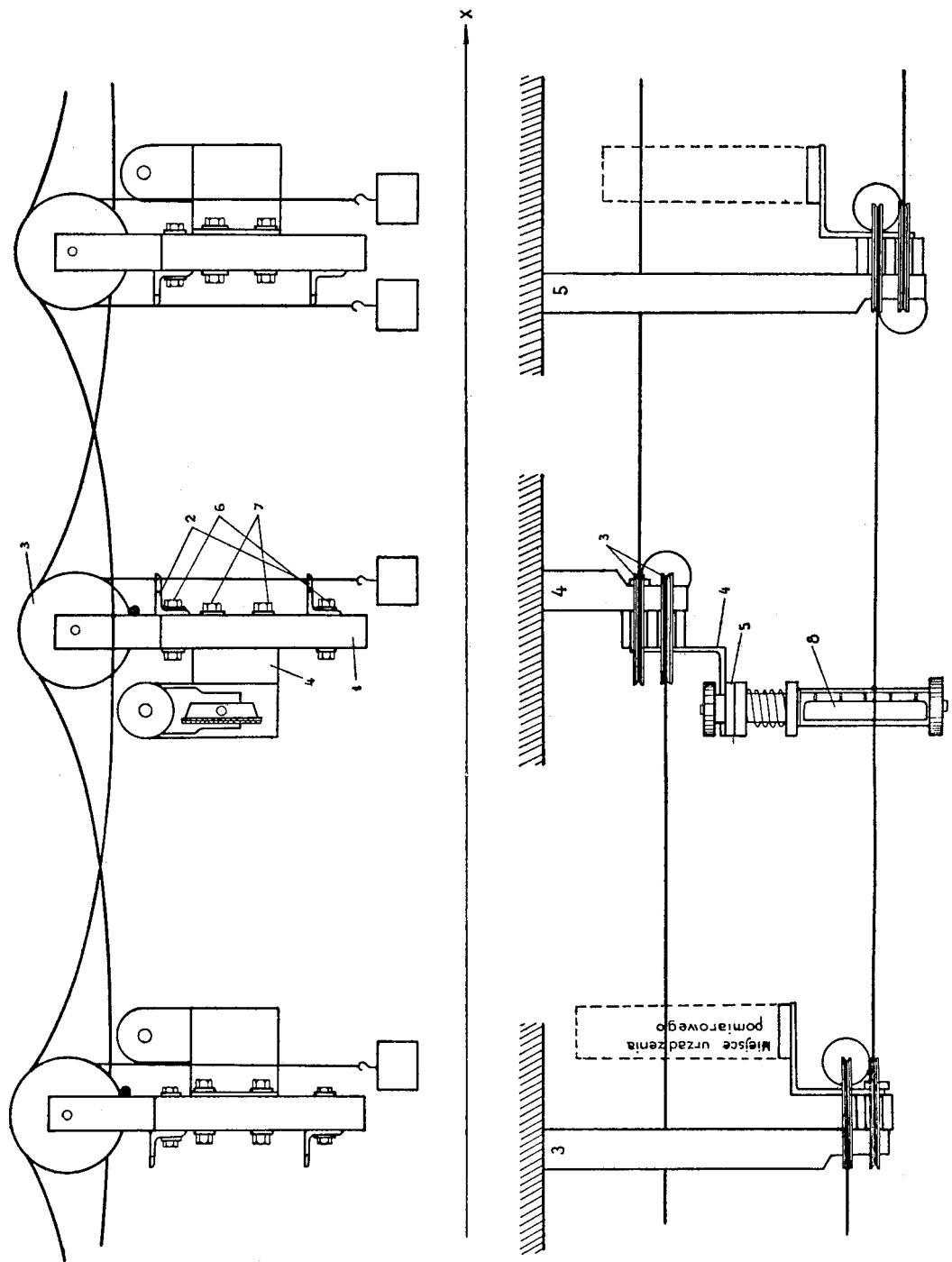
Rys. 14

V. Opis prototypu zespołu urządzeń odtwarzających zmiany strzałek i długości w ciągu poligonowym

Uwzględniając warunki wynikające z rozdziału IV oraz istniejące warunki środowiska w przewidywanym miejscu przeprowadzenia prac eksperymentalnych (I galeria kontrolna zapory wodnej w Rożnowie) opracowałem projekt ideowy urządzeń służących do zawieszenia drutów odtwarzających zmiany strzałek oraz do mocowania przenośnego urządzenia pomiarowego lub rejestratora zmian. W oparciu o wspomniany projekt opracowana została dokumentacja konstrukcyjna urządzeń oraz ich prototyp umożliwiający odtworzenie zmian sześciu strzałek w ciągu poligonowym w przybliżeniu prostoliniowym, zawierającym osiem punktów.

Zaprojektowane i wykonane urządzenia charakteryzuje rysunek 15.

Na rysunku 15 pokazane są w dwu rzutach urządzenia zastabilizowane w ścianie galerii na trzech kolejnych punktach ciągu poligonowego Nr 3, 4, 5. Pojedyncze urządzenie składa się z rozciętej beleczki 1 przykręconej do dwu kątowników 2 zabetonowanych w ścianie badanej budowli. W górnej części beleczki osadzone są na osi dwa bloczki mośiężne 3, bardzo ściśle pasowane dla uniknięcia ich ruchu wzdłuż osi. Bloczki te posiadają na swym obwodzie wytoczone rowki w kształcie litery V o kącie rozwarcia 90° , w których przebiegają przełożone przez



Rys. 15

bloczki druty obciążone na końcach odważnikami 5 kG lub zamocowane sztywno. Do beleczki 1 przymocowana jest podkładka 4 sporządzona z kątownika, do której przykręcona jest płytka mocująca 5 wykonana z mosiądzu i służąca do jednoznacznego mocowania przenośnego urządzenia pomiarowego lub rejestratora.

Rozcięcie beleczki 1 służy do ustawiania jej na właściwej wysokości i w położeniu pionowym oraz zamocowania przy pomocy śrub 6 do zabetonowanych w ścianie kątowników 2. Ponadto umożliwia ono zamocowanie przy pomocy śrub 7 podkładki 4 na właściwej wysokości, zależnej od wysokości przebiegu drutu podlegającego na danym stanowisku obserwacji i z pochyleniem takim, aby płaszczyzna tarczy celowniczej zamocowanego przenośnego urządzenia pomiarowego 8 zajmowała położenie poziome. Wykonany prototypowy komplet urządzeń składał się z sześciu takich urządzeń oraz dwu uchwytów drutu, służących do zamocowania skrajnych drutów ciągu w początkowym i końcowym jego punkcie.

Na rysunku 15 poszczególne urządzenia stabilizowane w trzech kolejnych punktach poligonowych pokazane zostały we wzajemnych małych odległościach. W rzeczywistości urządzenia te zostały zastabilizowane we wzajemnych odległościach rzędu 45 m na odwodnej ścianie I galerii zapory w Rożnowie. Stabilizację tą wykonał w maju 1962 roku autor opracowania wspólnie z inż. Stefanem Zykubkiem.

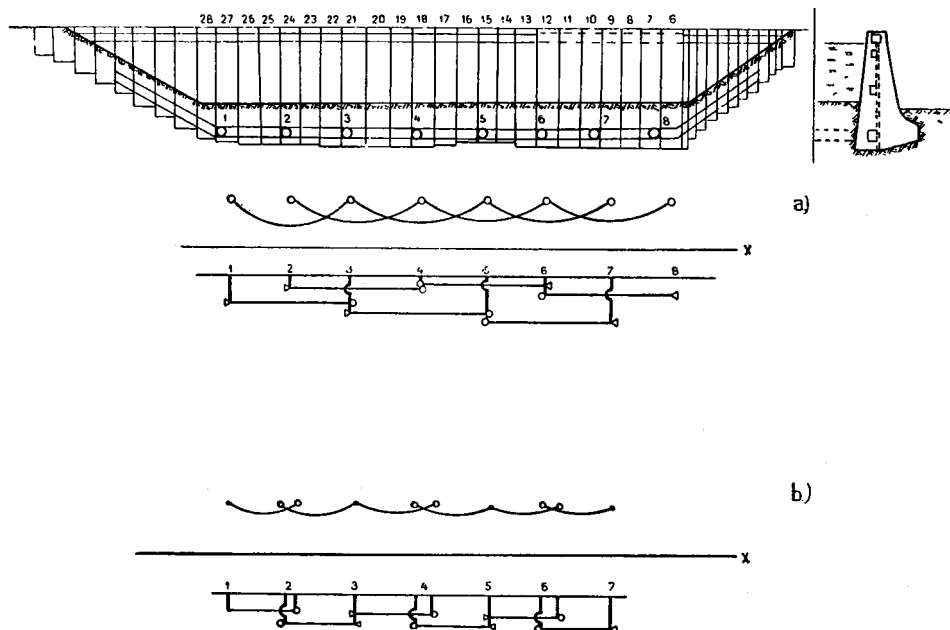
Kolejne punkty poligonowe zostały rozmieszczone w miejscach określonych następującą tabelką:

Nr pktu	Odległość	Nr bloku	Nr fugi
1	45,1 m	27	27/28
2	47,0	24	24/25
3	41,1	21	21/22
4	45,2	18	18/19
5	44,8	15	15/16
6	42,5	12	12/13
7	44,7	10	9/10
8		7	6/7

Zastabilizowane urządzenia, po rozwieszeniu na nich drutów stalowych $d = 0,35$ mm utworzyły model ciągu odtwarzający zmiany strzałek zgodnie ze schematem podanym na rysunku 16.

Dla wyjaśnienia praktycznego działania modelu korzystnie jest porównać rysunek 15 z rysunkiem 16. Rysunek 15 pokazuje zgodnie ze schematem podanym na rysunku 16a praktyczną realizację schematu

w odniesieniu do punktów poligonowych Nr 3, 4, 5. Np. drut przełożony przez błocek urządzenia zastabilizowanego w miejscu punktu poligonowego Nr 3 i zamocowany, drugim końcem jest przełożony przez błocek urządzenia zastabilizowanego w miejscu punktu poligonowego



Rys. 16

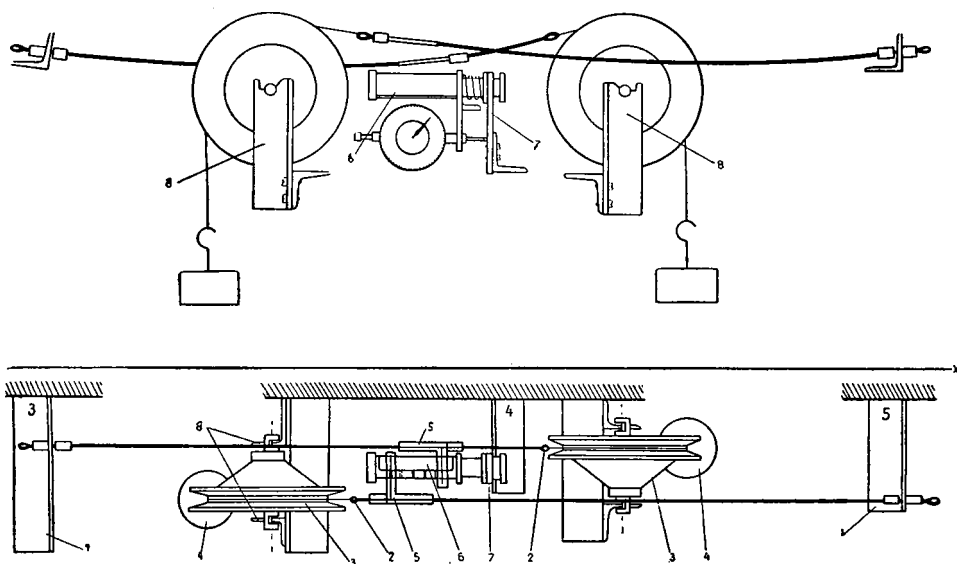
Nr 5 i napięty swobodnie zwisającym obciążnikiem. W rezultacie napięty przez obciążnik drut zwisa swobodnie pomiędzy blokami zastabilizowanymi w miejscach punktów poligonowych Nr 3 i 5. Drut ten może być obserwowany przy pomocy urządzenia pomiarowego zamocowanego na urządzeniu zastabilizowanym w miejscu punktu poligonowego Nr 4. Podobnie drut zamocowany w miejscu urządzenia na punkcie poligonowym Nr 4, wybiegający w kierunku punktu poligonowego Nr 6 (przełożony tam przez błocek i obciążony) zwisa swobodnie w sposób umożliwiający zaobserwowanie go przy pomocy urządzenia pomiarowego przeniesionego na punkt poligonowy Nr 5 i zamocowanego tam.

Po założeniu drutów na blocki urządzeń obciążono je odważnikami 5 kG co odpowiada przy $d = 0,35$ mm naprężeniom $\sigma = 50 \frac{\text{kG}}{\text{mm}^2}$. Długości rozwieszonych odcinków drutu wynosiły po około 90 m wobec czego, przy powyższych naprężeniach strzałki ich zwisu wynosiły po około 0,16 m. Należało te dane wziąć pod uwagę w czasie projektowania roz-

mieszczenia poszczególnych urządzeń przed ich zastabilizowaniem. Przy projektowaniu należało uwzględnić potrzebę takiego wzajemnego, wysokościowego rozmieszczenia urządzeń, aby zwisające swobodnie druty przebiegały na wysokościach kilku mm ponad tarczą celowniczą urządzenia pomiarowego mocowanego na poszczególnych stanowiskach. W tym celu zastabilizowanie urządzeń poprzedzono pomiarem niwelacyjnym dla ustalenia profilu galerii i zaprojektowania wysokości poszczególnych urządzeń względem siebie i względem podłogi galerii. Miano tu również na względzie usytuowanie urządzeń w pozycjach wygodnych dla dokonywania prac pomiarowych.

Prace związane z wytyczeniem pozycji urządzeń przed ich zastabilizowaniem nie ograniczały się do profilu pionowego lecz wymagały również wyznaczenia sytuacyjnego. Podyktowane to było stosunkowo niedużym zakresem pomiarowym urządzenia pomiarowego oraz faktem, że przekrój poprzeczny galerii jest krzywoliniowy. W związku z tym należało zwrócić uwagę, aby druty zwisające pomiędzy bloczkami nie stykały się w swym przebiegu ze ścianą galerii.

Uwzględniając warunki wynikające z rozdziału III opracowałem projekt ideowy urządzeń odtwarzających zmiany długości boków ciągu polygonowego. Na podstawie tego projektu została opracowana dokumentacja konstrukcyjna i prototypowy komplet urządzeń, umożliwiający odtwarzanie zmian długości w ciągu polygonowym składającym się z sześciu boków. Urządzenia te zostały zainstalowane również w I ga-

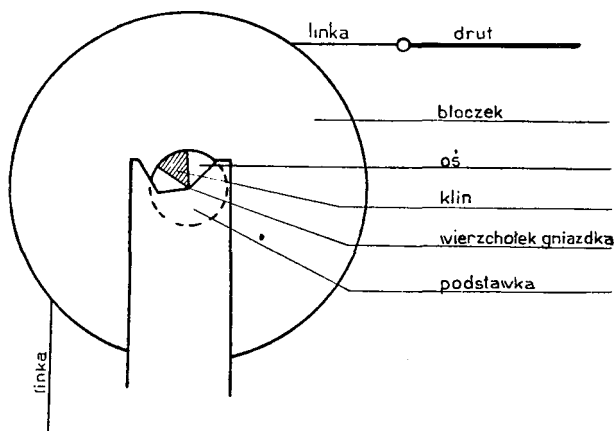


Rys. 17

lerii zapory wodnej w Rożnowie w miejscach punktów poligonowych NrNr 1—7, ponad urządzeniami służącymi do odtwarzania zmian strzałek. Zastabilizowane urządzenia oraz rozwieszone na nich druty pozwalają na odtworzenie zmian długości zgodnie ze schematem podanym na rysunku 16b.

Rysunek 17 ukazuje zespół urządzeń służących do odtwarzania i pomiaru zmian długości dwu kolejnych boków poligonowych pomiędzy punktami NrNr 3, 4, 5.

Zgodnie z rysunkiem 17 drut do wyznaczania zmian długości boku 3—4 przymocowany jest do kątownika 1 zabetonowanego w ścianie galerii w miejscu punktu poligonowego Nr 3 zaś drugi jego koniec zawinięty w kształcie pętli 2 przywiązany jest do cienkiego drutu z fosforobrazu, który przełożony jest przez bloczek 3 i obciążony odważnikiem 4. Na drucie umocowany jest wskaźnik pleksiglasowy 5 z naciętą kreską prostopadłą do drutu, której zmiany położenia określone są przy wykorzystaniu urządzenia pomiarowego 6. Urządzenie pomiarowe (identyczne jak do wyznaczania zmian strzałek) mocowane jest



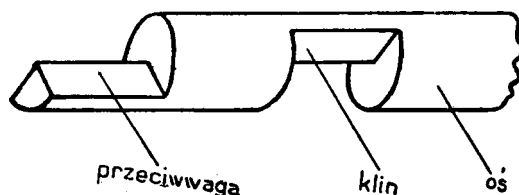
Rys. 18

do płytki mocującej 7 z mosiądzu, przytwierdzonej do kątownika zastabilizowanego w ścianie budowli w miejscu punktu poligonowego Nr 4.

Wobec stwierdzonej w rozdziale III potrzeby uzyskania możliwie jak najmniejszej wartości zmian napięcia drutu, jak również z uwagi na niekorzystne warunki środowiska w przewidzianym miejscu wykonania badań eksperymentalnych zachodziła konieczność zaprojektowania bloczków, których konstrukcja pozwoliłaby praktycznie wyeliminować wpływ tarcia. W związku z tym projekt przewidywał ustawienie bloczka sprężonego z osią na ostrzach wyfrezowanych w osi i wspie-

rających się na gniazdach wyfrezowanych w podstawkach 8. Sposób ustawienia bloczka charakteryzuje rysunek 18. Bloczek przez który przełożony jest cienki fosforobrazowy drut jest sprzężony z osią wykonaną ze stali srebrzanki, posiadającą po obu stronach bloczka dwa wycięcia klinowe o wierzchołkach (ostrzach) na osi geometrycznej. Kąt klina oznaczonego na rysunku 18 przez zakreskowanie wynosi 60° . Ostrza obu klinów osi ustawione są w gniazdkach w kształcie litery V wyfrezowanych w podstawkach przykręconych do kątownika zabetonowanego w ścianie budowli. Ponieważ kąt rozwarcia ścian gniazdka wynosi 120° zachodzi możliwość obracania się klina wraz z całą osią i sprzężonym z nią bloczkiem w granicach nie przekraczających $\pm 30^\circ$.

Zarówno bloczek jak i oś przy obracaniu się nie wytwarzają zmierzających momentów wobec pełnej ich symetrii względem osi geometrycznej. Można się spodziewać, że w minimalnym stopniu momenty takie wystąpią wskutek niesymetrycznego umieszczenia klina, którego ostrze stanowi oś obrotu. Praktycznie można temu zapobiec przez zastosowanie przeciwwag w postaci przeciwstawnie wyfrezowanych w osi identycznych klinów (rysunek 19).

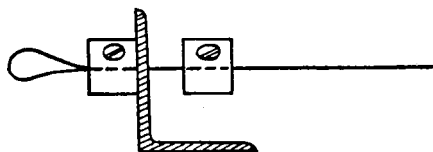


Rys. 19

W naszym przypadku, wobec małej średnicy osi w stosunku do średnicy bloczka zmiany momentów przy zmianach położenia klinów nie wpływają w wyczuwalny sposób na dokładność przeniesienia siły naciągu.

Według niniejszego projektu drut stanowiący przedłużacz tensometru jest przymocowany jednym końcem do kątownika zabetonowanego w ścianie budowli. Przymocowanie końca drutu do kątownika jest dokonane przy wykorzystaniu dwu pierścieni ze śrubkami sprzęgającymi. W celu przymocowania drutu nawleka się nań pierścień 1, (rysunek 20) przekłada się drut przez otwór w kątowniku, nawleka się pierścień 2 oraz po zagięciu końca drutu wciąga się go ponownie w otwór pierścienia 2. Wówczas przykręca się do oporu śrubkę w pierścieniu 2 oraz obciąża drugi koniec drutu, wskutek czego drut zostaje napięty zaś pierścień 2 dociśnięty silnie do powierzchni kątownika. Wobec tego, że pod wpły-

wem napięcia drutu może z upływem czasu nastąpić drobne przesunięcie drutu zaciśniętego wewnątrz pierścienia 2, zachodzi potrzeba kontrolowania wzajemnej nieruchomości drutu i pierścienia 2 zaś w przypadku poruszenia zachodzi potrzeba wyznaczenia wielkości przesunięcia celem wprowadzenia do wyników pomiaru odpowiedniej poprawki. Do tego celu służy pierścień 1, który przykręcamy silnie do drutu w pobliżu kątownika. Ponieważ na pierścień 1 nie oddziałuje siła naciągu drutu można uznać, że zajmuje on nieruchomą względem drutu pozycję. Okresowa kontrola wzajemnej stałości położenia drutu i pierścienia 2 polega na mierzeniu suwmiarką lub mikrometrem wzajemnej odległości zewnętrznych powierzchni obu pierścieni.



Rys. 20

W celu umożliwienia odczytów lub rejestrowania zmian długości nakłada się na drut w pobliżu bloczka wskaźnik pleksiglasowy 5. Wskaźnik został zaprojektowany w kształcie kątownika. Wzdłuż jednego ramienia kątownika nacięty jest rowek w kształcie litery V, nakryty w dwu miejscach przez płaskie główki śrubek wkręconych w ramię kątownika tuż obok wspomnianego rowka. Wskaźnik nakłada się na drut rowkiem po czym przykręca się obie śrubki do oporu, dociskając drut do wskaźnika spodnimi powierzchniami główek. Na drugim ramieniu wskaźnika wyfrezowana jest kreska o grubości 0,2 mm prostopadła do osi rowka prowadzącego drut (tym samym prostopadła do osi drutu). Kreska ta zabarwiona na czerwono lub niebiesko stanowi przedmiot obserwacji lub rejestracji.

Aby uniknąć możliwości przesuwania się wskaźnika wzdłuż drutu zastosowano mocowanie go pomiędzy dwoma pierścieniami (podobnymi jak wykorzystane do mocowania końca drutu).

Jak łatwo zorientować się na podstawie rysunku 17, w omawianym prototypie zespołu urządzeń odtwarzających zmiany długości możliwe jest przy jednym zamocowaniu urządzenia pomiarowego obserwowanie dwu wskaźników założonych na dwa druty odtwarzające zmiany długości dwu kolejnych boków ciągu poligonowego. W zaprojektowanym prototypie bloczki służące do przełożenia linek naciągających (lub elastycznych drutów fosforobrazowych) winny być stabilizowane po obu

stronach miejsca zastabilizowania uchwytu dla mocowania urządzenia pomiarowego w odległościach po około 0,5 m.

Do odtwarzania zmian długości — wobec braku dostatecznej ilości drutu inwarowego, najbardziej przydatnego dla wspomnianego celu — wykorzystano stalowy drut sprężynowy $d = 0,8$ mm naciągany siłą 5 kG (co przy zastosowanej przeciętnej długości boku poligonowego około 45 m odpowiadało naprężeniu 1,3 krotnie przekraczającemu naprężenie optymalne).

Prototypowy komplet urządzeń odtwarzających zmiany długości boków ciągu poligonowego zainstalowany został w galerii zapory w czerwcu 1962 r. Ponadto zainstalowano w komparatorni Głównego Urzędu Miar w Warszawie jedno przesło o długości 48 m służące do okresowego wyznaczania wydłużania się dwu drutów stalowych obciążonych siłami 2 i 4 kG.

VI Urządzenia do pomiaru liniowych zmian położenia drutu lub kreski wskaźnika założonego na drut

Określenie zmian położenia drutu lub kreski wskaźnika odbywa się za pośrednictwem wykonania odczytów położenia przed i po zajściu zmiany. Do wykonania tych odczytów może służyć przenośne urządzenie pomiarowe, mocowane w sposób jednoznaczny na każdym stanowisku pomiarowym.

Przy wyznaczaniu zmian strzałek określeniu podlegają zmiany położenia drutu w kierunku poziomym i poprzecznym do jego osi.

Przy wyznaczaniu zmian położenia drutu wahadła określeniu podlegają składowe ruchu w dwu kierunkach poziomych, równoległych do osi ζ , ξ .

Przy wyznaczaniu zmian długości boków poligonowych określeniu podlegają zmiany położenia wskaźnika w kierunku równoległym do końcowego odcinka rozwieszonego drutu (równoległym do stycznej).

Na każdym stanowisku obserwacyjnym oś urządzenia pomiarowego winna być mocowana równolegle do wyznaczanej składowej zmiany położenia drutu lub wskaźnika. Zauważmy, że w odniesieniu do wyznaczania zmian długości warunek ten spełniony został przy instalowaniu prototypowego zespołu urządzeń jedynie w przybliżeniu (por. rys. 17).

W pomiarach górniczych dla określenia położenia drutu pionu szybowego stosuje się na ogół skale odczytowe z podziałem. Drut przebiegający przed skalą widoczny jest na tle podziału przez lunetę teodolitu.

Określeniu podlega odczyt rzutu drutu na płaszczyznę skali (wierzchołek układu rzutów perspektywicznych jest tu określony przez punkt analityczny lunety teodolitu).

W naszym przypadku — wobec zamiaru uzyskania dużych dokładności odczytu położenia drutu — rezygnujemy z takiego rozwiązania, opartego na zasadzie szacowania części podziału skali. W miejsce skali z podziałem zastosujemy urządzenie celownicze przesuwane ruchem leniwym wzdłuż osi pomiarowej, której położenie na stanowisku obserwacyjnym jest jednoznacznie określone. Położenia urządzenia celowniczego względem osi pomiarowej określane są przy pomocy sprzężonego z nim urządzenia pomiarowego wykorzystującego czujnik warsztatowy lub m'kromierz.

Zasadnicze różnice między możliwymi do zastosowania rozwiązaniami urządzenia pomiarowego polegają na zróżnicowaniu systemów celowniczych. Cechą wspólną tych systemów ma być zapewnienie możliwości celowania bisekcyjnego.

Rozpatrzymy kilka możliwych do zastosowania systemów celowniczych.

1. Najprostszym pod względem konstrukcyjnym wydaje się urządzenie celownicze w postaci tarczy z narysowanymi dwoma równoległymi kreskami, prostopadłymi do osi pomiarowej. Obok tarczy, w tej samej płaszczyźnie osadzone jest zwierciadełko płaskie. Możliwe jest też zastąpienie tarczy zwierciadełkiem posiadającym wytrawione na spodniej stronie kreski bisektora. Korzystanie z takiego celownika wymaga ustawienia oka w płaszczyźnie przechodzącej przez oś obserwowanego fragmentu drutu lub kreski wskaźnika, prostopadłej do płaszczyzny zwierciadełka. Ustawienie to osiąga się przy pozornym pokryciu się obrazu drutu odbitego w zwierciadełku z obrazem samego drutu. Słowa „pozarne” używam tu dla podkreślenia, że ustawieniu temu towarzyszy pewna nieostrość obu obrazów, związana z różnymi odległościami widzenia drutu i zwierciadełka. Po uzyskaniu wymienionej pozycji oka obserwator przesuwa ruchem leniwym tarczę celowniczą wzdłuż osi do położenia, przy którym uzyska wrażenie symetrycznego ustawienia się kresek względem obserwowanego fragmentu drutu lub wskaźnika. Po osiągnięciu tego wrażenia należy odczytać położenie tarczy celowniczej względem osi pomiarowej.

W celu osiągnięcia dużych dokładności oraz możliwości ich oceny należy stosować urządzenia odczytowe o dokładności kilkakrotnie wyższej aniżeli przewidywana dokładność celowania oraz wykonywać nacelowania i odczyty wielokrotnie.

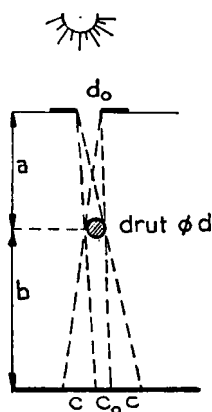
Na podstawie licznych przeprowadzonych badań ocenia się, że dla nieuzbrojonego oka zdolność rozdzielcza na wyczucie symetrii przy opty-

malnych warunkach bisekcji sięga wielkości 3". Wskazują na to między innymi wyniki badań Förstera cytowanych w [2]. Przy obserwacji z odległości najlepszego widzenia równej około 25 cm odpowiada to liniowej dokładności nacelowania równej w przybliżeniu 4μ . Wobec tego, że celowanie w naszym przypadku będzie znacznie odbiegało od warunków optymalnych wskutek podkreślonego zjawiska nieostrości obrazów, nierówności obserwowanego konturu drutu, drobnych zmian w kierunku i sposobie oświetlenia oraz innego niż wymagany przy optymalnych warunkach rozstawu kresek bisektora względem grubości drutu, należy spodziewać się, że błąd celowania będzie wielokrotnie większy.

Przy projektowaniu urządzenia celowniczego należy wziąć pod uwagę możliwość występowania drobnych drgań obserwowanego drutu lub wskaźnika. Wymaga to rozstawienie kresek bisektora szerzej aniżeli by to wynikało z optymalnych warunków bisekcji — tak, aby amplituda drgań była mniejsza od rozstawu kresek.

Przy dużej prostocie konstrukcji niedogodnością urządzenia celowniczego wspomnianego typu jest pewna niewygodna w posługiwaniu się przez osoby z drobnymi wadami wzroku z uwagi na występującą nieuniknioną paralaksę. Ponadto usytuowanie oka w wymaganej pozycji jest przy pomiarach nieco uciążliwe.

2. Możliwe jest wykonanie urządzenia celowniczego, w którym zamiast zwierciadła zamocowane jest w odpowiednim położeniu źródło



Rys. 21

światła o niewielkich rozmiarach. Jeśliby to źródło było umieszczone na prostej prostopadłej do płaszczyzny tarczy o spodku w środku przedziału kresek bisektora, zaś drut przebiegał pomiędzy źródłem światła i tarczą, to celowanie polegałoby na doprowadzeniu kresek bisektora do położenia symetrycznego względem cienia drutu powstającego na płaszczyźnie

tarczy. Urządzenie takie pozostawia obserwatorowi większą swobodę w przyjmowaniu pozycji oka bowiem czynności związane ze „zgraniem” obrazów dotyczą przedmiotów sprowadzonych do jednej płaszczyzny (cień drutu i kreski bisektora znajdują się na płaszczyźnie tarczy celowniczej).

Przy omówionym rozwiązaniu konieczne jest przeanalizowanie wzajemnych odległości i wymiarów: a — odległość drutu od źródła światła, b — odległość drutu od tarczy, d — średnica drutu, d_o — średnica źródła światła, c_o — średnica cienia drutu, c — średnica półcienia. Zgodnie z rysunkiem 21 zachodzą zależności:

$$c_o = d + \frac{b}{a}(d_o - d)$$

$$c = d_o \cdot \frac{b}{a}$$

$$R = \frac{c_o}{c}$$

Dla uzyskania dostatecznie ostrego obrazu (cienia) należy tak dobierać średnice i odległości aby współczynnik R osiągał duże wartości przy małej wartości c_o . Oczywiście wzory te posiadają charakter orientacyjny, bowiem nie przewidują np. wpływu ugięcia dyfrakcyjnego promieni na krawędziach drutu oraz rozproszenia światła na otaczających przedmiotach.

3. Kolejnym możliwym do zastosowania systemem celowniczym może być mikroskop z siatką nitek lub wskaźnikiem przesuwany wzdłuż osi pomiarowej. Rozwiązanie tego typu, umożliwiające obserwowanie powiększonego obrazu drutu, stosowane jest w praktyce w urządzeniach służących do odczytywania wahadeł zawieszanych w pionowych szybach zapór wodnych.

Opis prototypów urządzenia pomiarowego

Zaprojektowane w roku 1962 i wykonane w Pracowni Mechanicznej IGiK urządzenie pomiarowe posiada celownik wielokrotny pierwszego z wymienionych typów oraz urządzenie odczytowe oparte na wykorzystaniu czujnika pomiarowego MNZa-57617 II o zakresie 10 mm i dokładności odczytu 0,01 mm. Prototyp został wykonany według projektu autora, w oparciu o dokumentację konstrukcyjną sporządzoną przez inż. M. Smółkę.

Przy projektowaniu urządzenia brałem pod uwagę postulat jego uniwersalności, to jest możliwości wykorzystania do wykonania odczytów

położenia drutów odtwarzających zmiany strzałek, drutu wahadła jak również wskaźnika na drucie odtwarzającym zmiany długości. Urządzenie pomiarowe zostało zaprojektowane jako przenośne z uwagi na złe warunki środowiska w przewidywanym miejscu pomiarów (wilgoć), które mogłyby spowodować uszkodzenie czułych części: czujnika i zwierciadła. O takim rozwiązaniu zadecydowały również względy ekonomiczne bowiem przenośność urządzenia pomiarowego umożliwia korzystanie z jednego jego egzemplarza.

Widok pierwszego prototypu urządzenia pomiarowego przedstawiony jest na rysunku 22a. Składa się ono z dwu zasadniczych części.

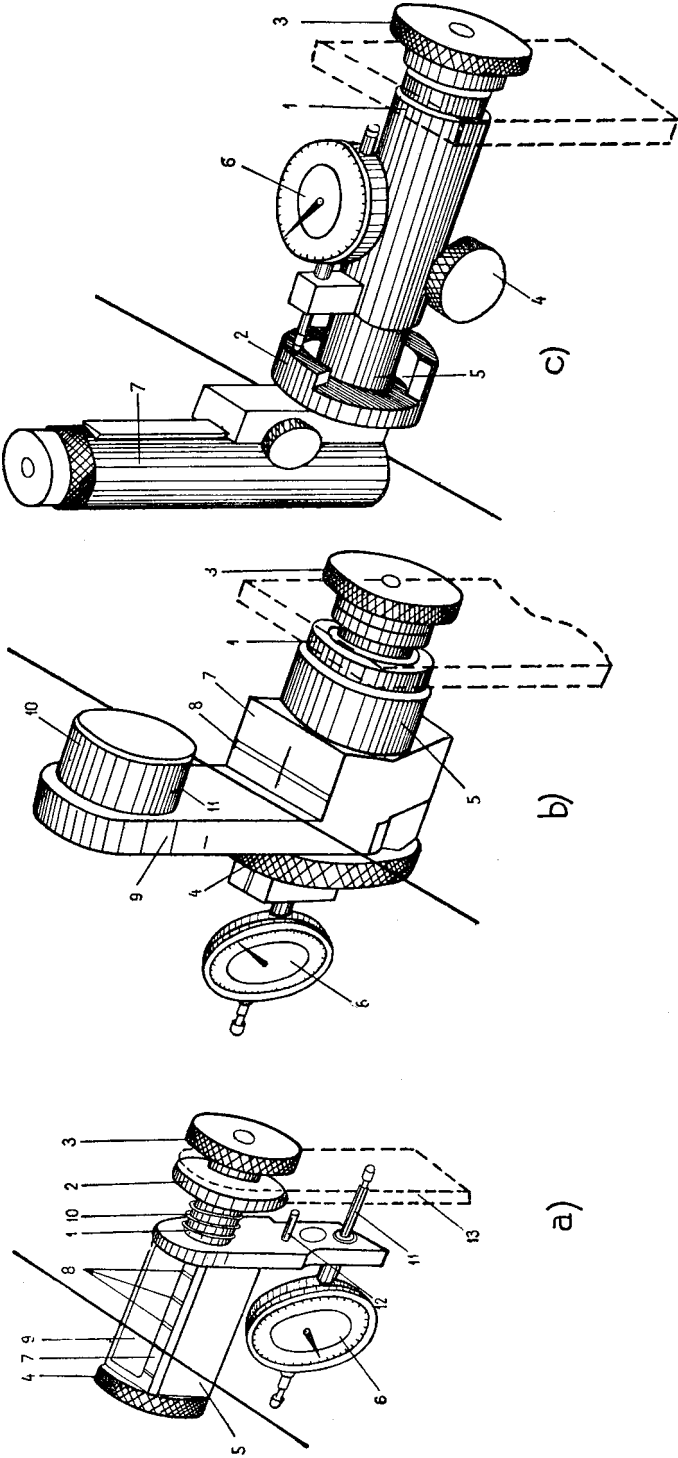
a) Część nieruchoma na stanowisku pomiarowym w postaci walca 1 z kołnierzem 2, zakończonego obustronnie śrubami dla nakrętki sprzęgającej 3 i dla nakrętki ruchu leniwego części ruchomej 4.

b) Część ruchoma w postaci grubościennej rurki 5 nasuniętej na walec i sprzężonego z nią korpusu czujnika 6. Na górnej powierzchni rurki wyfrezowana jest tarcza celownicza 7 z naciętymi parami kresiek 8 o odstępach 1 mm (odległości między środkami przedziałów sąsiadujących par kresiek są równe 10 mm i umożliwiają zwielokrotnienie zakresu pomiarowego czujnika, podobnie jak podział limbusa zwielokrotnia zakres pomiarowy mikrometru). W płaszczyźnie tarczy zamocowane jest zwierciadło płaskie 9. Leniwy ruch części ruchomej wzdłuż osi walca uzyskuje się poprzez pokręcanie nakrętki 4. Możliwość występowania ruchu martwego wyeliminowana jest poprzez silne dociskanie rurki do nakrętki sprężyną 10, nasuniętą na walec i wspartą o kołnierz 2. Kołnierz ten umożliwia jednoznaczne mocowanie urządzenia pomiarowego na płytce mocującej 13.

Zamocowanie urządzenia pomiarowego wymaga przełożenia śruby dla nakrętki zaciskowej przez otwór w płytce mocującej (oznaczonej na rysunku linią przerywaną) i nakręcenie jej do oporu z przeciwnej strony płytki. Nóżka czujnika 11 jest zawsze wsparta o powierzchnię płytki mocującej. Do ruchomej części urządzenia pomiarowego przytwierdzony jest trzpień kontrolny 12.

Na pojedynczy pomiar położenia drutu składa się nacelowanie nań w sposób opisany szczegółowo w [30], odpowiadający temu nacelowaniu odczyt czujnika O_i oraz odczyt czujnika odpowiadający takiemu docięciu ruchomej części urządzenia pomiarowego, przy którym trzpień kontrolny 12 opiera się o powierzchnię płytki mocującej 13. Odczyt O_o odpowiadający takiemu ustawieniu umożliwia kontrolę niezmienności stanu i zamocowania czujnika. Jako wynik pojedynczego pomiaru traktuje się różnicę:

$$O = O_o - O_i \quad (14)$$



Rys. 22

W celu zwiększenia dokładności wyznaczenia położenia drutu wykonuje się kilka nacelowania i odpowiadających im odczytów $O_1, O_2 \dots O_i$

Zastosowane w pierwszym prototypie zwielokrotnienie zakresu pomiarowego czujnika pozwala na zwiększenie tolerancji dokładnościowych zainstalowania urządzeń odtwarzających jak również pozwala na pomiar zmian przekraczających ± 5 mm. Posiada to zasadnicze znaczenie w przypadku przewidywanych dużych wielkości odkształceń.

Opisany wyżej pierwszy prototyp urządzenia pomiarowego wykorzystany został do przeprowadzenia badań eksperymentalnych, związanych z praktyczną oceną dokładności i prawidłowości działania urządzeń odtwarzających zmiany strzałek i długości. W roku 1963 po wykonaniu i opracowaniu wyników tych badań przystąpiono do wykonania prototypu urządzenia pomiarowego posiadającego celownik drugiego z wymienionych uprzednio typów. Dokumentację konstrukcyjną tego prototypu wykonał st. techn. R. Witkowski przy konsultacji inż. Smółki oraz autora. Drugi prototyp urządzenia pomiarowego uwidoczniony został na rysunku 22b. Składa się on również z dwu zasadniczych części:

a) Część nieruchoma w postaci walca 1 zakończonego obustronnie śrubami dla nakrętki sprzęgającej 3 i dla nakrętki ruchu leniwego 4. Do części nieruchomej przytwierdzony jest korpus czujnika 6.

b) Część ruchoma 5 w postaci grubościennej rurki nasuniętej na walec, sprzęgniętej z nią kolumny 9 mieszczącej wewnątrz dwie suche baterie 1,5 V, tulejki 10 mieszczącej wewnątrz żarówkę oraz tarczy celowniczej 7 z naciętymi kreskami 8.

Walec 1 posiada w swej środkowej części wycięcia, w które wchodzi stopka zamocowana w rurce 5 stanowiąca miejsce oparcia dla nóżki czujnika. Również wewnątrz pomieszczona jest sprężyna, która powoduje stały docisk ruchomej części urządzenia do nakrętki ruchu leniwego.

W tulejce 10 wycięta jest szczelina 11 usytuowana w płaszczyźnie przechodzącej przez środek przedziału kresek bisektora. W chwili zapalenia żarówki mieszczącej się wewnątrz tulejki następuje oświetlenie poprzez szczelinę pasma na płaszczyźnie tarczy celowniczej obejmującego kreski bisektora.

Przy zamocowaniu urządzenia pomiarowego na stanowisku obserwacyjnym w sposób identyczny jak to opisano w części dotyczącej pierwszego prototypu uzyskujemy możliwość obserwowania na płaszczyźnie tarczy celowniczej cienia drutu, który przebiega pomiędzy tarczą a źródłem światła pomieszczonym w tulejce 10. Pomiar położenia drutu polega na przesunięciu ruchomej części urządzenia do położenia, przy którym cień drutu zajmuje położenie symetryczne względem kreski bisektora (w miejscu przecięcia z naciętą kreską prostą do kreski bisektora)

oraz wykonaniu odczytu czujnika O_i . Odczyt zerowy O_0 otrzymujemy tu po docisnięciu części ruchomej urządzenia w kierunku płytki mocującej aż do oporu.

W przypadku zmiany przepalanej żarówki na nową należy pamiętać o potrzebie takiego jej wkręcenia, przy którym jasna smuga utworzona na płaszczyźnie tarczy celowniczej obejmie obie kreski bisektora. Miejsce powstawania tej smugi zależy od położenia włókna żarówki.

Po wykonaniu drugiego prototypu urządzenia pomiarowego przystąpiono do opracowania dokumentacji konstrukcyjnej trzeciego prototypu, zawierającego kilka zasadniczych różnic w stosunku do dwu prototypów wyżej opisanych.

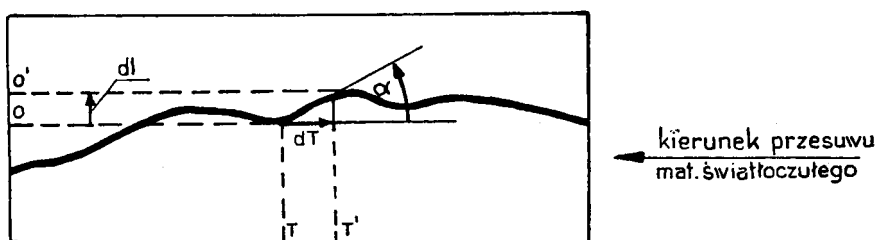
Trzeci prototyp urządzenia pomiarowego przedstawiony jest na rysunku 22c. Nieruchomą na stanowisku pomiarowym część urządzenia stanowi walec 1 posiadający wytoczony otwór, w który wsunięty jest walec 5. Przymocowanie walca 1 do płytki mocującej odbywa się tu przy wykorzystaniu śruby i nakrętki sprzęgającej 3 w sposób identyczny jak w uprzednio opisanych prototypach. Do walca 5 przytwierdzony jest na stałe mikroskop 7, którego lunetka posiada możliwość przesuwania się wzdłuż osi optycznej w zakresie 3 cm. Możliwość przesuwania lunetki pozwala tu na wykonywanie obserwacji drutu służącego do odtwarzania zmian strzałek bez dokładnego kompensowania zmian jego zwisu. Do walca 1 przytwierdzony jest korpus czujnika 6, którego nóżka wspiera się o powierzchnię pierścienia 2 z wyciętymi stopniami różniącymi się co do wysokości o 10 mm. Pierścień ten posiada swobodę obrotu wokół osi walca 5 natomiast nie posiada możliwości przesuwania się wzdłuż walca. Obracając pierścień 2 uzyskujemy możliwość wsparcia nóżki czujnika o kolejne jego stopnie stosownie do wielkości wysunięcia walca 5 z otworu wytoczonego w walcu 1. Tym samym stopnie te pozwalają na zwiększenie zakresu urządzenia odczytowego do ± 15 mm. Przesuwanie części ruchomej urządzenia wzdłuż osi walca 1 odbywa się przy wykorzystaniu pokrętki 4 zaopatrzonej w kółko cierne. Zastąpienie nakrętki ruchu leniwego pokrętką z kółkiem ciernym powinno przynieść w efekcie znaczne zwiększenie szybkości nacelowania.

VII. Idea urządzenia służącego do rejestracji liniowych zmian położenia drutu lub kreski wskaźnika

Odtworzenie zachodzących wskutek odkształcenia budowli zmian strzałek i długości dokonuje się przy pomocy urządzeń opisanych w rozdziale V w sposób ciągły, natomiast określenie tych zmian drogą obserwacji przy wykorzystaniu urządzeń pomiarowych opisanych w rozdziale

VI odbywa się w sposób nieciągły i niejednoczesny na poszczególnych stanowiskach (jakkolwiek nieporównanie szybciej aniżeli przy wykorzystaniu klasycznych metod pomiaru ciągów poligonowych). W związku z tym — w przypadkach zachodzenia odkształceń szybkozmiennych — niezbędne może się okazać wyznaczanie ich przy wykorzystaniu rejestratorów zainstalowanych na poszczególnych stanowiskach w miejsce urządzenia pomiarowego.

Z uwagi na warunki, jakim winny odpowiadać urządzenia służące do odtwarzania zmian, rejestracja musi być dokonana bezstykowo, np. przy użyciu metody fotograficznej. W wyniku rejestracji powinien powstać wykres zmian położenia drutu lub wskaźnika w funkcji upływu czasu, podobny w układzie do podanego na rysunku 23.



Rys. 23

Uzyskane wykresy o tej postaci dla każdej wielkości objętej rejestracją zmian (wszystkie strzałki i długości w ciągu poligonowym jak również składowe położenia drutów wahadeł) pozwoliłyby na zestawienie szeregu kompletów wyrazów wolnych, umożliwiających określanie względnych odkształceń całej budowli lub jej dużego fragmentu w sposób praktycznie ciągły.

Określenie — w oparciu o uzyskany z rejestracji wykres zmian położenia drutu — wartości wyrazu wolnego dl polegałoby na zmierzeniu odstępów $dl = O' - O$, odpowiadającego okresowi czasu $dT = T' - T$ (oczywiście na wszystkich wykresach zmian poszczególnych wielkości pomiar winien odnosić się do przedziału czasu między tymi samymi momentami czasu T i T').

Warto zwrócić uwagę, że przy takim obrazie rejestracji zachodzących zmian wielkości, stosunek drobnego przyrostu rejestrowanej wielkości do odpowiadającego mu przyrostu czasu, wyrażający szybkość zachodzenia zmiany wielkości, stanowi pierwszą pochodną krzywej — na wykresie określa nachylenie stycznej do krzywej.

Gdyby ciągła rejestracja zmian objęła w osnowie wszystkie wielkości to powstałaby możliwość obliczania bezwzględnych wielkości przesuwu

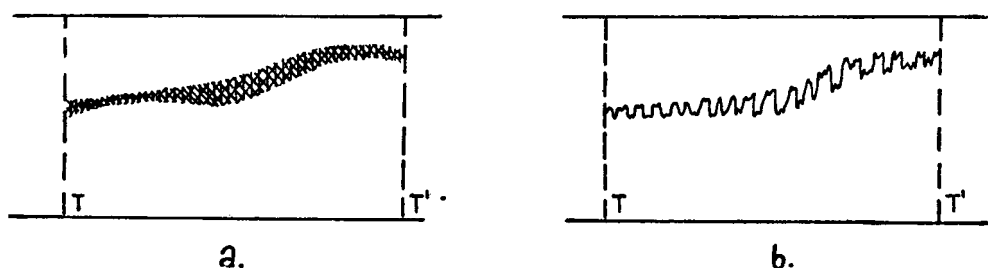
nięć, zachodzących między dowolnie wybranymi momentami okresu rejestracji. Do wykonania tego rodzaju obliczeń mogłyby być przydatne krakowiany transformujące zaś rachunek należałoby prowadzić przy wykorzystaniu maszyny elektronowej. W chwili obecnej na przeszkodzie takiemu traktowaniu zagadnienia stoi brak opracowanych metod zarówno odtwarzania w sposób ciągły jak też rejestracji zmian wielkości w zewnętrznej części osnowy kontrolnej. Możliwe jest obecnie łączne wykorzystanie wyników rejestracji zmian niektórych wielkości w osnowie z wynikami obserwacji zmian innych wielkości dla obliczenia bezwzględnych wielkości przesunięć. Może to być bardzo korzystne w przypadkach, gdy niektóre fragmenty budowli wymagają dokonywania obserwacji odkształceń przy jednoczesnym bardzo trudnym do nich dostępie.

W chwili obecnej istnieją w skali światowej możliwości techniczne, pozwalające na przekazywanie wyników rejestracji do pamięci maszyny elektronowej bez konieczności wykonywania pomiarów zmian na uzyskanych z rejestracji wykresach. Może się to odbywać przez wykorzystanie specjalnych przystawek na wejściu do maszyny, „odczytujących” wykresy i przekazujących odczytane wyniki, lub drogą zmiany systemu rejestracji np. przez natychmiastową zamianę rejestrowanych zmian liniowych położenia drutu na zmiany wyrażone w określonych jednostkach elektrycznych.

Omówmy zagadnienie sposobu rejestracji zmian w jej najprostszym wariantcie, kiedy uzyskujemy w wyniku wykresy podobne do pokazanego na rysunku 23.

Dla umożliwienia wykonywania na wykresach pomiarów zarejestrowanych zmian konieczne jest odpowiednie wyskalowanie tych wykresów. Przy rozpatrywaniu konstrukcji rejestratora należy uwzględnić również potrzebę uzyskania właściwej rozdzielczości rejestracji, to jest zdolności zarejestrowania stanów występujących z określoną częstotliwością. Należy sobie zdawać sprawę, że w praktyce rejestrator może podawać wykres zmian pozwalający na rozróżnianie wielkości zmieniających się z określoną szybkością. Zastosowanie pewnego rejestratora opracowanego dla notowania zmian występujących z określoną szybkością w miejscu gdzie faktycznie zmiany zachodzą szybciej powoduje, że rejestrator zagęszcza notowania zmian wielkości wzdłuż osi czasu do stanu zmniejszającego czytelność wykresu. Wówczas wykres taki posiada wygląd jak na rysunku 24a i nie rejestruje wiernie zmian krótkotrwałych. Zastosowanie w tym przypadku rejestratora o większej rozdzielczości pozwala uzyskać wykres o postaci jak na rysunku 24b. Zauważmy jednak, że uzyskanie dużej rozdzielczości zależy nie tylko od konstrukcji rejestratora lecz również od zachowania się obserwowanego elementu odtwarza-

jącego zmiany. Jeśli np. na drut, którego zmiany położenia mają być zanotowane przez rejestrator oddziałują siły wprowadzające je w drobne drgania o częstotliwości wyższej aniżeli drgania obiektu badań to nie jest możliwe zarejestrowanie w sposób wierny krótkotrwałych zmian wielkości związanych z drganiami budowli.

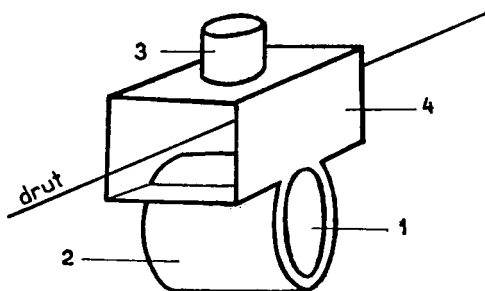


Rys. 24

Zakładając, że rejestrator ma wprost zastąpić urządzenie pomiarowe (określa jedną składową zachodzących zmian, o kierunku zgodnym z kierunkiem osi urządzenia pomiarowego), możemy go zbudować np. w postaci kamery szczelinowej z przesuwającym za szczeliną filmem lub innym materiałem światłoczułym. Na stanowisku pomiarowym kamera winna być ustawiona tak, aby jej szczelina była skierowana równolegle do kierunku wyznaczonej składowej zmian położenia drutu lub wskaźnika. Pomiarowi na filmie podlegałyby przesunięcia obrazu drutu lub wskaźnika w kierunku równoległym do kierunku szczeliny. Przesunięcia obrazu drutu odpowiadałyby wprost składowej przesunięcia drutu w przypadku, gdyby jego ruch odbywał się wyłącznie wzdłuż tej składowej. Ponieważ wskutek np. zmian zwisu założenia takiego nie możemy uczynić, zachodzi w praktyce trudność wykorzystania wprost kamery fotograficznej. Bardziej właściwe w tej sytuacji jest rzucanie cienia drutu na płaszczyznę szczeliny przy pomocy oświetlenia promieniami równoległymi i prostopadłymi do kierunku szczeliny. Wówczas w miejscu cienia rzucanego przez drut powstanie na materiale światłoczułym umieszczonym poza szczeliną, niezaświetlona plamka, odróżniająca się po wywołaniu od pozostałej zaświeczonej powierzchni materiału światłoczułego. Stały przesuw materiału światłoczułego spowoduje, że plamka przekształca się w linię ciągłą, stanowiącą wykres cienia drutu.

Zgodnie z rysunkiem 26 rejestrator taki składałby się z bębna obracanego na osi przy użyciu urządzenia zegarowego lub silniczka o zsynchronizowanych obrotach 1 pomieszczonego w światłoszczelnej obudowie ze szczeliną 2 oraz kolimatora 3. Kolimator jest tu sprzężony z obudową

bębna w położeniu prostym do osi szczeliny. Całość urządzenia należałoby na stanowisku zamocować w taki sposób, aby drut lub wskaźnik, którego zmiany położenia mają podlegać rejestracji, przebiegał pomiędzy kolimatorem i szczeliną w specjalnej osłonie 4 zabezpieczającej przed oświetlaniem szczeliny innym niż z kolimatora. W przypadku rzucania



Rys. 25

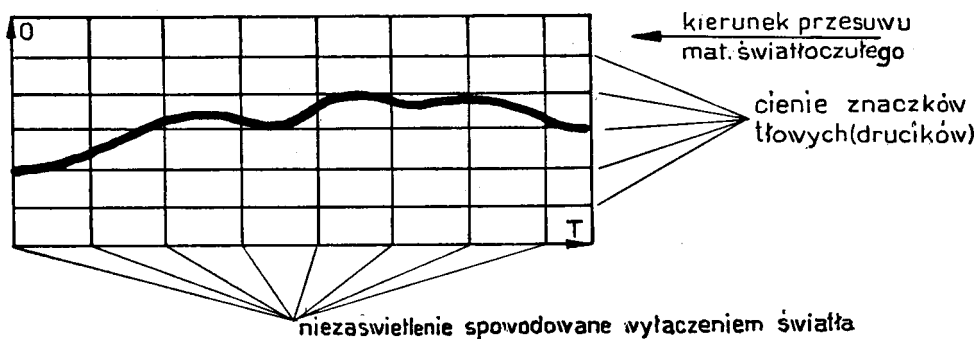
przez kolimator równoległych promieni świetlnych, niezaświetlony pozostałby tylko fragment szczeliny odpowiadający cieniowi drutu lub wskaźnika. Wówczas przesunięcie cienia drutu wzdłuż szczeliny odpowiada wprost składowej przesunięcia samego drutu. Jeśli na bęben założymy materiał światłoczuły i nadamy bębnowi ruch obrotowy, to w miarę upływu czasu naświetlaniu podlegać będą kolejne paski materiału światłoczułego przesuwane się poza szczeliną. Czas naświetlania jest tu zależny od szybkości obrotu bębna, jego średnicy jak również szerokości szczeliny. Na każdym z pasków pozostaje niezaświetlone jedynie plamka o wymiarze określonym grubością drutu. Rząd plamek na kolejnych paskach, tworzący się w sposób ciągły wraz z obrotem bębna, daje w rezultacie smugę o szerokości $d \cdot \tan \alpha$ (gdzie α — kąt nachylenia stycznej do smugi w rozpatrywanym jej miejscu). O rozdzielczości takiego rejestratora decyduje szybkość przesuwnu materiału światłoczułego oraz szerokość szczeliny. Czynniki te decydują o doborze natężenia światła rzucanego przez kolimator oraz czułości użytego materiału światłoczułego.

Wymienione uprzednio cechowanie rejestratora można osiągnąć w następujący sposób: Cechowanie osi rejestrowanych zmian wielkości, spowodowanych zachodzącymi odkształceniami uzyskujemy przez przytwierdzenie do obudowy bębna bezpośrednio przed szczeliną cienkich drucików o znanym stałym rozmieszczeniu. Druciki te spowodują powstawanie na materiale światłoczułym cieni, które w rezultacie obrotu bębna utworzą siatkę niezaświetlonych linii równoległych do kierunku

przesuwu materiału światłoczułego. Wówczas pomiar zmian dI na uzyskanym fotogramie odbywa się w odniesieniu do linii siatki najbliższych wykresowi zmian. Wspomniane drucziki stanowią tu siatkę znaczków tłowych eliminujących zniekształcający wyniki wpływ nierównomierności obrotu bębna (jego drobnych ruchów wzdłuż osi obrotu) oraz przez dosyć gęste rozmieszczenie zmniejszają wpływ skurczów materiału światłoczułego na dokładność wyników rejestracji.

Cechowanie osi zmian czasu, równoległej do kierunku przesuwu materiału światłoczułego należy dokonywać w sposób identyczny i jednoznaczny dla wszystkich rejestratorów pracujących w jednym zespole (rejestrujących zmiany w całej osnowie lub jej części). Najkorzystniejsze wydaje się tu zasilanie wszystkich kolimatorów w rejestratorach ze wspólnego źródła (np. przez podłączenie szeregowo) oraz wyłączanie światła na krótkie okresy w ustalonych momentach. Wyłączenie takie spowoduje niezaświecenie na materiale światłoczułym w każdym rejestratorze całego pasma znajdującego się aktualnie naprzeciw szczeliny (równoległego do osi rejestrowanych zmian wielkości). Szerokość tego pasma odpowiada szerokości szczeliny, zwiększonej o wielkość przesuwu w okresie wyłączenia światła.

W rezultacie cechowań uzyskamy wykres zmian rejestrowanych wielkości w funkcji czasu na tle siatki linii równoległych do osi szczeliny i prostopadłych do niej, które określają układ współrzędnych o osiach O i T (rysunek 26).



Rys. 26

W budowie rejestratorów mogą zachodzić zasadnicze różnice w zależności od ich przeznaczenia. Podstawowe zróżnicowania zależne są od wymaganej rozdzielczości rejestracji, czasu pracy urządzeń bez potrzeby wymieniać materiału światłoczułego, od przewidywanych warunków środowiska pracy urządzeń oraz od tego, czy zachodzi potrzeba natychmia-

stowego podawania wyników rejestracji bezpośrednio po jej dokonaniu czy też dopiero po wymianie materiału, na którym dokonuje się rejestracji. Z tego względu zaprojektowanie konstrukcji określonego rejestratora winno być dokonane w związku z konkretnymi potrzebami badawczymi.

W dalszej części niniejszej pracy przedstawione zostały próby rejestracji zmian położenia drutu przy wykorzystaniu rejestratora szczelinowego.

VIII. Opis wykonanych badań i analiza wyników

1. Badania dokładnościowe pomiaru zmian strzałek

Bezpośrednio po zainstalowaniu prototypowego zespołu urządzeń odtwarzających zmiany strzałek przeprowadzono dużą serię obserwacji strzałek powtarzając cykle w odstępach jednodniowych. W całym okresie trwania tej serii obserwacji (20.VI—21.VII.1962) nie zachodziły zmiany środowiska, które mogłyby dać podstawę do przypuszczeń iż obiekt w którego wnętrzu zainstalowano urządzenia podlega odkształceniom. W rezultacie więc można było traktować różnicę między wynikami, uzyskanymi dla tych samych wielkości w poszczególnych cyklach obserwacji, jako spowodowane wyłącznie błędami obserwacji. Szczegółowy opis sposobu dokonania wymienionej serii badań podany został wraz z analizą uzyskanych wyników w publikacji [30]. Na tym miejscu podam jedynie dla przypomnienia informację, że pierwsza seria badań wykazała możliwość wyznaczenia strzałki z błędem średnim równym $m_h = 0,015$ mm na podstawie wykonanych 9 nacełowań i odczytów. Przeprowadzone badania wykazały też korzystne zachowanie się drutów odtwarzających zmiany strzałek w warunkach środowiska galerii zapory wodnej w Rożnowie, wyrażające się brakiem zauważalnych drgań i wahań pod wpływem ruchu powietrza. W publikacji [30] dla wyznaczenia wzajemnych przesunięć punktu ciągu w kierunku prostopadłym do kierunku tego ciągu zastosowano metodę graficzną. Zauważmy, że metoda ta przynosi dostatecznie dokładne rezultaty w przypadku, gdy wielkości zmian dh nie są duże. W przypadkach przeciwnych bardziej właściwe jest posługiwanie się metodami rachunkowymi a głównie obliczonymi jednokrotnie dla danej osnowy lub jej fragmentu krakowianami transformacyjnymi. W przypadku ciągu poligonowego strzałek zrealizowanego w galerii zapory w Rożnowie możliwe jest ułożenie krakowianu transformującego zaobserwowane zmiany strzałek dh na składowe dx przesunięć punktów ciągu niezależnie od obliczenia składowych dy prze-

sunięć w kierunku równoległym do kierunku ciągu, bowiem ciąg poligonowy strzałek jest tu w przybliżeniu prostoliniowy. Krakowian transformujący zmiany dh na przesunięcia dx można ułożyć przy różnych założeniach nawiązania uzyskując w efekcie bezwzględne wielkości składowych przesunięć (przy nawiązaniu do punktów o składowych przesunięć wyznaczonych z wyższorzędnego fragmentu osnowy) lub wielkości składowych wyrażające przesunięcia niektórych punktów ciągu względem innych, uznanych za nieruchome. W tym ostatnim przypadku — wobec fikcyjności założenia stałości — dopuszczalne jest założenie stałości jedynie dwu punktów. Dla zilustrowania sposobu obliczania składowych dx zestawiony został w tablicy 7 przykład liczbowy.

W tablicy 7 wykazano kolejne etapy obliczenia krakowianu transformującego zaobserwowane zmiany dh ciągu poligonowego w Rożnowie na składowe dx przy dostosowaniu ciągu do punktów Nr 1, 8 o założonej niezmienności położenia. W tablicy tej podany został również przykład obliczenia składowych dx na podstawie uzyskanych z pomiaru wielkości dh .

Obliczenie krakowianu transformującego polegało na zrealizowaniu wzoru krakowianowego: $\underline{t} = (\underline{a}^2)^{-1} \cdot \underline{ra}$, gdzie $\underline{a}$ — krakowian współczynnikowy równań poprawek zmian strzałek. Współczynniki poszczególnych równań poprawek obliczone zostały w oparciu o wzór (5.2). Obliczenie składowych dx przesunięć polega na realizacji wzoru krakowianowego: $\underline{dx} = \underline{dh} \cdot \underline{t}$. Dla uzyskania kontroli rachunku krakowian transformacyjny został uzupełniony kolumną sumową, przez którą również należy przemnażać krakowian $\underline{dh}$ dla uzyskania kontrolnego elementu krakowianu wynikowego $\underline{dx}$ równego sumie pozostałych elementów krakowianu.

Dla uzyskania całkowitej pewności, że otrzymane z pierwszej serii pomiarów eksperymentalnych błędy średnie wyznaczenia zmian strzałek są miarodajne dla oceny dokładności wykorzystanej metody, wykonano próby wyznaczenia błędów prawdziwych składowych dx przesunięć według koncepcji podanej przez Prof. dr T. Lazzariniego.

Pierwsze tego rodzaju próby wykonano na początku czerwca 1962 w trakcie ustalania techniki pomiaru i sprawdzania prawidłowości zainstalowania urządzeń odtwarzających zmiany strzałek. W celu wyznaczenia rzeczywistych błędów przesunięć wykonywano cykl obserwacji strzałek poczym przesuwano poszczególne urządzenia służące do zawieszenia drutów oraz urządzenia pomiarowego o wielkości mierzone bezpośrednio suwmiarką w odniesieniu do krawędzi zabetonowanych w ścianie kątowników 2 (por. rys. 15). Przesunięcie urządzenia względem kątowników 2

Tablica 7

Obliczenie krakowianu transformującego różnice strzałek na składowe dx przesunięć punktów ciągu nawiązanego do punktów NrNr 1,8 traktowanych jako niezmiennych.

Tabela współczynnikowa równań
poprawek /zgodnie z /5.2/ /

dx_2	dx_3	dx_4	dx_5	dx_6	dx_7	S
-1,000	0,490					-0,510
0,470	-1,000	0,535				0,005
	0,525	-1,000	0,480			0,005
		0,500	-1,000	0,500		0,000
			0,490	-1,000	0,515	0,005
				0,515	-1,000	-0,485

Tabela współczynnikowa odwrotności tabeli
równań normalnych $/a^2/^{-1}$

8,028	12,877	14,194	12,860	9,674	5,311
12,877	23,303	26,496	24,369	18,479	10,184
14,194	26,496	32,308	30,661	23,631	13,124
12,860	24,369	30,661	31,444	25,148	14,202
9,674	18,479	23,631	25,148	21,921	12,831
5,311	10,184	13,124	14,202	12,831	8,404

Krakowian transformujący $/a^2/^{-1}$ $\underline{ra}$

-1,72	-1,46	-1,20	-0,92	-0,61	-0,32	-6,23
-1,51	-3,07	-2,54	-1,92	-1,29	-0,67	-11,00
-1,26	-2,57	-3,68	-2,77	-1,86	-0,96	-13,10
-0,93	-1,88	-2,69	-3,53	-2,37	-1,22	-12,62
-0,63	-1,30	-1,85	-2,43	-2,99	-1,55	-10,75
-0,33	-0,66	-0,95	-1,25	-1,54	-1,79	-6,52

Przykład obliczenia składowych dx przesunięć na podstawie
wyznaczonych z pomiaru wartości zmian strzałek dh

$\underline{dh}$

$$\begin{pmatrix} -1,94 \\ 4,73 \\ -3,97 \\ 1,04 \\ -2,01 \\ 3,90 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -1,72 & -1,46 & -1,20 & -0,92 & -0,61 & -0,32 & -6,23 \\ -1,51 & -3,07 & -2,54 & -1,92 & -1,29 & -0,67 & -11,00 \\ -1,26 & -2,57 & -3,68 & -2,77 & -1,86 & -0,96 & -13,10 \\ -0,93 & -1,88 & -2,69 & -3,53 & -2,37 & -1,22 & -12,62 \\ -0,63 & -1,30 & -1,85 & -2,43 & -2,99 & -1,55 & -10,75 \\ -0,33 & -0,66 & -0,95 & -1,25 & -1,54 & -1,79 & -6,52 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,21 \\ -3,40 \\ 2,14 \\ 0,04 \\ 0,00 \\ -3,87 \\ -4,88 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} dx_2 \\ dx_3 \\ dx_4 \\ dx_5 \\ dx_6 \\ dx_7 \\ S \end{pmatrix}$$

odbywało się po lekkim odkręceniu śrub przytwierdzających beleczkę 1. Po dokonaniu na niektórych punktach poligonowych przesunięcia urządzeń wykonano ponowny cykl pomiaru strzałek. Na podstawie różnic strzałek zaobserwowanych w cyklu poprzedzającym poruszenie urządzeń oraz po tym poruszeniu określano sposobem graficznym wielkość zaszelej zmiany położenia punktów ciągu i porównywano ją dla każdego punktu z wielkością zmierzoną bezpośrednio suwmiarką. Obliczenie wielkości wprowadzonych sztucznie przesunięć wzdłuż składowej dx w oparciu o pomierzone zmiany strzałek odbywało się przy założeniu nieruchomości punktów końcowych, które faktycznie nie były przemieszczane. Stwierdzono na podstawie kilkakrotnie przeprowadzonych tego rodzaju prób, że różnice wyników uzyskanych z bezpośredniego pomiaru suwmiarką i wyznaczenia za pośrednictwem określonych zmian strzałek nie przekraczały dla punktów w pobliżu środka ciągu wielkości 0,45 mm. Taki rząd zgodności wyników wydaje się być uzasadniony dokładnością pomiaru przy pomocy suwmiarki, nie umożliwia jednak pełnej weryfikacji dokładnościowej badanej metody i urządzeń. Można przypuszczać, że przy omówionym sposobie powodowania przesunięć wzdłuż osi OX układu zachodziły także obroty beleczki 1 w granicach przekraczających dopuszczalne przy stosowaniu wzoru (3.4). Wreszcie należy powiedzieć, że wspomniane próby przeprowadzone w początkowym okresie badań wykonane zostały przed ustaleniem najbardziej właściwej techniki pomiaru.

Po wykonaniu serii obserwacji opisanej w [30] przeprowadzono w roku 1963 ponowne próby z wyznaczaniem błędów rzeczywistych sztucznie wprowadzonych składowych dx przesunięć. Tym razem zastosowano bardziej prawidłowy sposób wywołania przesunięć oraz ich bezpośredniego pomiaru, pozwalający traktować wyznaczenie bezpośrednie jako praktycznie bezbłędne. Próby tego rodzaju przeprowadzono dziesięciokrotnie wykonując je za każdym razem w identycznym porządku: pier-

Nr próby Nr pktu	Wielkości dh w mm									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	-1,92	-1,88	-1,94	-1,90	-1,91	-1,86	-1,88	-1,89	-1,87	-1,90
3	4,80	4,80	4,73	4,72	4,70	4,73	4,76	4,78	4,77	4,78
4	-3,95	-3,97	-3,97	-3,97	-3,99	-3,96	-3,95	-3,95	-3,97	-3,95
5	1,04	1,06	1,04	1,06	1,04	1,03	1,05	1,03	1,02	1,05
6	-1,95	-2,00	-2,01	-2,00	-1,98	-2,00	-2,01	-1,97	-2,00	-2,02
7	3,88	3,89	3,90	3,89	3,90	3,91	3,91	3,88	3,86	3,90

Obliczenie wielkości składowych dx przy wykorzystaniu krakowianu transformującego dostarczyło odpowiednio następujące wyniki:

Nr próby Nr pktu	Wyznaczone składowe dx przesunięć w mm									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	0,01	-0,02	0,21	0,13	0,21	0,06	0,02	0,01	0,05	0,04
3	-3,76	-3,75	-3,40	-3,47	-3,34	-3,55	-3,66	-3,70	-3,58	-3,67
4	1,77	1,83	2,14	2,05	2,20	2,01	1,88	1,85	2,03	1,88
5	-0,29	-0,23	0,04	-0,06	0,05	-0,06	-0,18	-0,20	-0,01	-0,16
6	-0,28	-0,18	0,00	-0,07	-0,03	-0,08	-0,15	-0,19	-0,01	-0,11
7	-4,00	-3,96	-3,87	-3,90	-3,89	-3,93	-3,96	-3,95	-3,84	-3,93
S	-6,55	-6,32	-4,88	-5,32	-4,80	-5,56	-6,04	-6,18	-5,35	-5,96

W rezultacie odjęcia wyznaczonych wielkości dx od odpowiednich rzeczywistych wielkości składowych dX przesunięć otrzymujemy ε_x .

Nr próby Nr pktu	Błędy rzeczywiste wyznaczenia składowych dx przesunięć									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	-0,01	0,02	-0,21	-0,13	-0,21	-0,06	-0,02	-0,01	-0,05	-0,04
3	0,26	0,25	-0,10	-0,03	-0,16	0,05	0,16	0,20	0,08	0,17
4	0,23	0,17	-0,14	-0,05	-0,20	-0,01	0,12	0,15	-0,03	0,12
5	0,29	0,23	-0,04	0,06	-0,05	0,06	0,18	0,20	0,01	0,16
6	0,28	0,18	0,00	0,07	0,03	0,08	0,15	0,19	0,01	0,11
7	0,00	-0,04	-0,13	-0,10	-0,11	-0,07	-0,04	-0,05	-0,16	-0,07

wotny cykl pomiarowy strzałek, przesunięcie i bezpośredni pomiar przesunięcia niektórych punktów ciągu oraz drugi cykl pomiarowy strzałek. Przy wszystkich tych próbach wprowadzono ze względów konstrukcyjnych identyczne wielkości rzeczywistych składowych przesunięć dX równe dla kolejnych punktów ciągu: 0,00 0,00 - 3,50 2,00 0,00 0,00 - 4,00 0,00 milimetrów. Na podstawie wykonanych pomiarów strzałek uzyskano następujące wartości dh , odpowiadające wspomnianym wyżej, sztucznie wprowadzonym składowym przesunięć dX .

Stosując wzór $m'_{dx_i} = \sqrt{\frac{[\varepsilon_{x_i} \cdot \varepsilon_{x_i}]}{n}}$ obliczymy na podstawie zestawionych wielkości ε_x uzyskane błędy średnie wyznaczenia składowych dx poszczególnych punktów ciągu. Następnie porównamy je z wielkościami błędów m_{dx_i} obliczonymi przy wykorzystaniu współczynników wagowych Q_{ii}

(z tablicy 7) oraz przy założonej wielkości $m_{dh} = 0,023$ mm (zgodnie z wynikiem pierwszej serii badań dokładnościowych, gdzie $m_h = 0,015$ mm). W rezultacie takiego porównania można będzie ocenić, w jakim stopniu wynik analizy błędów rzeczywistych sztucznie wprowadzonych składowych dx przesunięć pokrywa się z wynikiem analizy tych błędów w przypadku, gdy rzeczywiste przesunięcia były równe zeru. Wyniki obliczenia i porównania zestawione są w następującej tablicy:

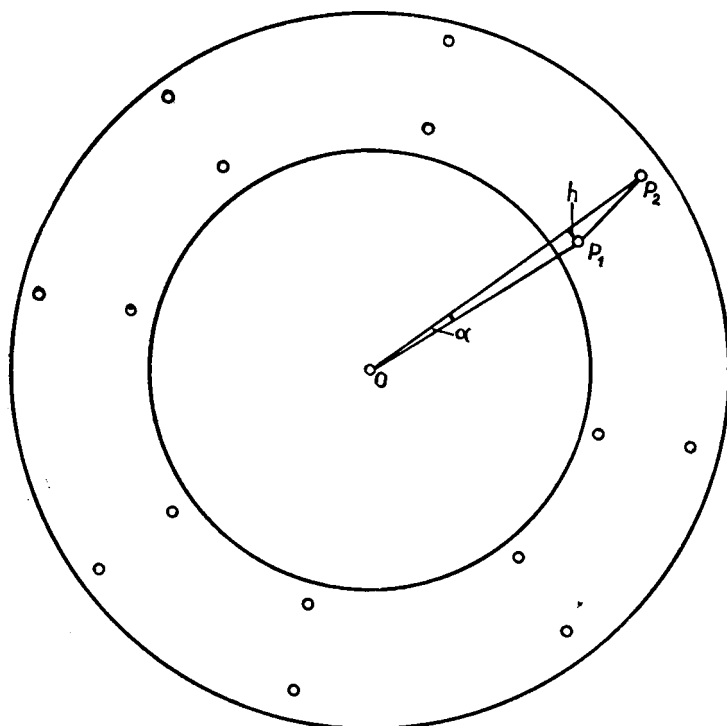
Nr pktu	m'_{dx}	m_{dx}	$\frac{m'_{dx}}{m_{dx}}$	$\frac{[\varepsilon_x]}{n}$
2	0,11 mm	0,07 mm	1,6	-0,07
3	0,16	0,11	1,4	0,09
4	0,14	0,13	1,1	0,04
5	0,16	0,13	1,2	0,11
6	0,14	0,11	1,3	0,11
7	0,09	0,07	1,3	-0,08
średnio			1,3	

W rezultacie porównania otrzymaliśmy wynik wskazujący, że na podstawie ostatnio omówionych prób wyznaczenia błędów rzeczywistych uzyskane zostały wielkości błędów nieznacznie przekraczające wielkości uzyskane w pierwszej serii badań. Jednocześnie uzyskane wielkości $[\varepsilon_x]$ wskazują, że przy wprowadzaniu w sposób sztuczny lub przy pomiarze bezpośrednim popełniano nieznaczne co do wielkości błędy systematyczne, które częściowo wyjaśniają przyczynę uzyskania średniej wielkości $\frac{m_{dx}}{m_{dx}} > 1$. O takim wyniku decyduje również fakt, że wielkości błędów pomiaru badaną metodą nieznacznie tylko przekraczają błędy bezpośredniego pomiaru przesunięć wprowadzonych w sposób sztuczny.

W oparciu o omówione wyniki badań dokładnościowych można stwierdzić, że przy wykorzystaniu rozpatrywanych tu metod i urządzeń w warunkach podobnych do warunków w galerii zapory wodnej osiągalna jest dokładność pomiaru strzałek wyrażająca się wielkością błędu średniego $m_h = 0,015$ mm. Uwzględniając fakt, że długości boków ciągu poligonowego wynosiły tu około 45 m możemy ocenić uzyskane dokładności jako przekraczające 3—4 krotnie dokładność wyznaczenia strzałek i ich zmian na drodze pośredniej — w oparciu o pomierzone teodolitem kąty poligonowe. Aby uzyskać w oparciu o pomiar kątów dokładności odpowiadające $m_{dh} = 0,023$ należałoby tu osiągać $m_{dy} = 0,2''$. Należy przypuszczać, że wydłużenie boków poligonowych do 100 — 150 m przy zasto-

sowaniu omawianej metody nie powinno spowodować zwiększenia błędów pomiaru strzałek, co w jeszcze większym stopniu zwiększałoby jej przewagę dokładnościową nad metodą klasyczną, opartą na pomiarze kątów.

W zestawieniu z niniejszymi wynikami analizy dokładności przeprowadzonych pomiarów eksperymentalnych ciekawe jest porównanie techniki wykonania i osiągniętych rezultatów prac opisanych w publikacji [31] cytowanej na wstępie. Publikacja ta traktuje między innymi o zastosowaniu pomiaru strzałek z użyciem drutu dla wyznaczenia małych kątów w wydłużonych trójkątach, z możliwie jak najwyższą dokładnością. Publikacja [31] stanowiąca opis całokształtu prac pomiarowych związanych z wytyczaniem synchrotronu protonowego wskazuje na pomiar strzałek jako na najdokładniejszy obecnie sposób określenia małych kątów



Rys. 27

w wydłużonych trójkątach. Wg podanego w niej opisu, przy wytyczaniu poszczególnych elementów synchrotronu zachodziła potrzeba wyznaczenia metodą liniową siatki realizacyjnej utworzonej przez punkt centralny oraz punkty posadowione na fundamencie betonowym w kształ-

cie pierścienia. Punkty na fundamencie posadowione zostały zgodnie z rysunkiem 27, na dwu okręgach współśrodkowych o środku w punkcie centralnym. Wobec tego, że w trakcie prowadzenia prac realizacyjnych stwierdzono znaczne odkształcenia fundamentu z posadowionymi znakami należało wykonywać wielokrotne obserwacje osnowy dla korygowania współrzędnych jej punktów. Szczególnie istotnym było określenie zmian wzajemnego położenia punktów umieszczonych w przybliżeniu na tych samych promieniach lecz na różnych okręgach. Wyznaczenie składowych wzajemnych przesunięć wzdłuż promieni polegało na pomiarze wzajemnej odległości, natomiast wyznaczenie składowych stycznych do okręgów z dostatecznie dużą dokładnością narażało poważne trudności. W związku z tym, dla zmierzenia np. aktualnej odległości punktu P_1 od prostej łączącej punkty O, P_2 ustawiano na wszystkich trzech stanowiskach specjalnie przystosowane mikroskopy geodezyjne o powiększeniu $30\times$ oraz podziałce odczytowej wyskalowanej co 5μ oraz rozciągano ponad punktami stalowy drut o średnicy $0,2\text{ mm}$. Dwa mikroskopy zostały nacelowane dokładnie na punkty O i P_2 poczym drut rozwieszony przy wykorzystaniu bloczków umożliwiających dokonywanie ich przesuwu wzdłuż osi obrotu wprowadzany był w pole widzenia mikroskopów — dokładnie ponad punkty O, P_2 . Trzeci mikroskop na stanowisku P_1 został ustawiony osią pomiarową prostopadłe do rozpiętego drutu, poczym na podstawie różnicy odczytów uzyskanych przy nacelowaniu na drut i bezpośrednio na punkt P_1 wyznaczono wysokość trójkąta O, P_1, P_2 . W publikacji podano, że na podstawie 70 par pomiaru wysokości trójkątów uzyskano dokładność wyznaczenia kątów ostrych α na punkcie O , charakteryzująca się błędem średnim $m_\alpha = 0'',08$. Przy zastosowanych długościach boków możemy oszacować na tej podstawie dokładność pomiaru wysokości trójkąta jako charakteryzującą się błędem średnim 15μ . Ponieważ końce drutu zostały wtyczane w linię boku $O-P_2$ należy uwzględnić przy analizie błędy wtyczenia. Przyjmując, że pomiar wysokości odbywał się tu z identyczną dokładnością jak wtyczanie możemy określić błąd wyznaczenia położenia drutu względem każdego z trzech punktów jako równy $9 - 10\mu$.

Jest rzeczą charakterystyczną, że osiągnięta we wspomnianej pracy dokładność nieznacznie tylko przewyższa dokładności uzyskane przy pomiarach eksperymentalnych w Rożnowie, pomimo użycia nieporównanie bardziej skomplikowanych środków i zastosowania większych naprężeń $\left(160 - 220 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}\right)$. Może to wskazywać, że dokładności rzędu 10μ stanowią kres możliwości dokładnościowych pomiaru strzałek z użyciem drutu,

wskutek niedokładności przekroju drutu. W przypadku prac opisanych w [31] należy przypuszczać, że o dokładności decydował również ruch powietrza, bowiem poszczególne strzałki mierzone były przy pomocy drutów wybiegających od punktu centralnego — posadowionego po środku hali. W naszym przypadku druty odtwarzające zmiany strzałek przebiegały wzdłuż ściany galerii to jest w przybliżeniu równolegle do kierunku przepływu powietrza.

Podczas wykonywania poszczególnych cykli pomiarowych prowadzono chronometraż, który wykazał, że pomiar strzałki w trzech seriach po trzy odczyty trwał przeciętnie około 4 minut (wliczając w to czas przechożenia ze stanowiska na stanowisko i innych czynności pomocniczych jak np. poprawiania pozycji drutów z uwagi na zmiany zwisu). Należało przypuszczać, że po usunięciu pewnych zauważonych usterek prototypowego kompletu urządzeń pomiarowych i odtwarzających, szybkość pracy ulegnie zwiększeniu. Stwierdzone usterki pierwszego prototypu urządzenia pomiarowego to zbyt mały skok i za duża długość śruby dla nakrętki sprzęgającej (przedłuża czas mocowania urządzenia) i zastosowany system celowniczy oparty na wykorzystaniu zwierciadła (czyni pomiar nieco uciążliwym, jakkolwiek dokładnie całkowicie spełnia swe zadanie). Stwierdzono też pewne niedogodności w gabarytach urządzeń odtwarzających zmiany strzałek, utrudniające osiągnięcie przy pomiarze wygodnej pozycji. W oparciu o te stwierdzenia zastosowano w drugim i trzecim prototypie urządzenia pomiarowego odpowiednie zmiany konstrukcyjne (por. rozdz. VI).

Od momentu zainstalowania prototypowego kompletu urządzeń odtwarzających zmiany strzałek prowadzone są w sposób systematyczny przeglądy ich stanu oraz pomiary strzałek w odstępach 1-2 miesięcznych. Oczywiście wyniki tych pomiarów nie mogą przez wzajemne porównanie służyć do dokładnościowej weryfikacji metody i urządzeń. Możemy je dla tego celu wykorzystać jedynie przez badanie wewnętrznej zgodności wyników każdego z cykli pomiarowych. Wewnętrzna zgodność wyników w poszczególnych cyklach nie stanowi dobrej podstawy do określenia faktycznej dokładności wyników jednak pozwala na określenie prawidłowości działania urządzenia pomiarowego i urządzeń odtwarzających. W oparciu o wymienione pomiary stwierdzono, że w całym okresie badań błędy średnie strzałek określone na podstawie rozrzutu wyników w poszczególnych cyklach były w przybliżeniu jednakowe — niezależnie od panujących aktualnie warunków atmosferycznych. W trakcie wykonywania poszczególnych pomiarów stwierdzono jedynie, że zmiany warunków atmosferycznych na zewnątrz budowli powodują zmiany wilgotności

powietrza w miejscu zainstalowania urządzeń odtwarzających, co nie wpływa w zasadniczy sposób na przebieg pomiaru i jego wyniki.

W ciągu całego okresu badań maksymalna różnica strzałki nie przekroczyła wielkości $dh = 0,4$ mm co świadczy o wysokiej stabilności obiektu badań.

Prowadzone systematycznie przeglądy urządzeń wykazały ciągłą prawidłową ich pracę. Należało być przygotowanym, że zainstalowane druty odtwarzające ulegną zerwaniu wskutek długiego czasu przebywania pod obciążeniem w wilgotnej galerii zapory. Pierwszy wypadek zerwania drutu nastąpił dopiero po roku pracy, przy czym nie było możliwe stwierdzenie, czy stało się to samoczynnie, czy też wskutek uszkodzenia drutu w trakcie przeprowadzania w galerii innych prac. Po założeniu nowego drutu wykonano pomiar strzałki, który wykazał w stosunku do wyniku poprzedzającego różnicę $dh = 0,05$ mm.

2. Badanie dokładnościowe pomiaru zmian długości

Badania dokładnościowe wyznaczania zmian długości przy wykorzystaniu urządzeń odtwarzających i urządzenia pomiarowego (pierwszy prototyp), zostały przeprowadzone pod kątem potrzeby uzyskania informacji dotyczących kilku problemów rozpatrzonych w rozdziale III. Między innymi brano pod uwagę wpływ zanieczyszczeń drutów na zmiany odczytów położenia wskaźnika jak i własne zmiany długości drutu mogące zajść wskutek długotrwałego obciążenia oraz wskutek osłabienia przez korozję powierzchni. Badania przeprowadzono w dwu miejscach: w galerii zapory w Rożnowie oraz w komparatorni Głównego Urzędu Miar w Warszawie.

W galerii zapory w Rożnowie wykonano w lipcu 1962, bezpośrednio po ustaleniu techniki pomiarów, 9 cykli obserwacji długości w ciągu składającym się z sześciu boków. Następnie — dla zbadania wpływu zanieczyszczeń i długotrwałego obciążenia drutów przebywających w wilgotnym środowisku galerii zapory — wykonano szereg obserwacji o specjalnym programie w kilkumiesięcznych odstępach czasu.

Dla zbadania dokładności obserwacji wykonano prócz wymienionych 9 cykli obserwacji dodatkowe doświadczenia z wyznaczaniem błędów rzeczywistych sztucznie wprowadzonych składowych dy przesunięć.

W komparatorni GUM w Warszawie wykonano badania mające na celu wyznaczenie bezwzględnych wartości wydłużeń drutów stalowych, identycznych jak zainstalowane w Rożnowie, pod wpływem długotrwałego obciążenia.

W rezultacie dziewięciokrotnej obserwacji ciągu uzyskano następujące odczyty położenia wskaźników poszczególnych drutów.

Bok \ Data	2.7	3.7	5.7	7.7	9.7	11.7	13.7	16.7	18.7
1-2	3,59	3,57	3,56	3,60	3,47	3,58	3,63	3,60	3,78
2-3	3,65	3,68	3,71	3,70	3,95	3,78	3,80	3,87	3,72
3-4	2,92	2,83	2,88	2,91	2,72	2,93	2,84	2,81	2,90
4-5	6,31	6,28	6,31	6,26	6,36	6,38	6,44	6,43	6,29
5-6	6,98	6,95	6,93	6,79	6,92	6,92	6,94	6,99	7,02
6-7	5,97	5,97	6,02	5,92	5,95	6,04	5,87	5,97	5,87

Wyżej wymienione obserwacje wykonane zostały w okresie, w którym zapewne nie zachodziły ruchy obiektu (por. terminy obserwacji z zestawieniem warunków środowiska podanym w [30]). W związku z tym można przyjąć, że różnice między wynikami uzyskanymi w kolejnych cyklach obserwacji są spowodowane wyłącznie przez błędy pomiarowe. W celu dokonania analizy błędów zestawimy wyznaczone z powyższych obserwacji zmiany długości boków poligonowych. Ponieważ urządzenie pomiarowe na wszystkich stanowiskach jest mocowane ze zwrotem ku początkowi ciągu poligonowego, obliczenie zmian polega na odejmowaniu wyniku następującego od poprzedzającego dla boków o numerach parzystych i odwrotnie dla boków o numerach nieparzystych. Zestawienie wyznaczonych pomiarem zmian długości ds w mm

Bok \ Data	2-3	3-5	5-7	7-9	9-11	11-13	13-16	16-18
1 (1-2)	-0,02	-0,01	0,04	-0,13	0,11	0,05	-0,03	0,18
2 (2-3)	-0,03	-0,03	0,01	-0,25	0,17	-0,02	-0,07	0,15
3 (3-4)	-0,09	0,05	0,03	-0,19	0,21	-0,09	-0,03	0,09
4 (4-5)	0,03	-0,03	0,05	-0,10	-0,02	-0,06	0,01	0,14
5 (5-6)	-0,03	-0,02	-0,14	0,13	0,00	0,02	0,05	0,03
6 (6-7)	0,00	-0,05	0,10	-0,03	-0,09	0,17	-0,10	0,10

Traktując uzyskane wartości ds jako równe błędom rzeczywistym różnic długości możemy obliczyć błąd średni różnicy długości z wzoru:

$m_{ds} = \sqrt{\frac{[ds \cdot ds]}{n}}$. W rezultacie otrzymujemy $m_{ds} = 0,096$ mm. Przyjmując, że poszczególne cykle wykonywane są z jednakowymi błędami możemy określić błąd odczytu położenia wskaźnika w pojedynczym cyklu z wzoru: $m_{s_1} = \frac{m_{ds}}{\sqrt{2}}$. W rezultacie otrzymujemy $m_{s_1} = 0,068$ mm.

Zakładając niezmiennosc położenia punktów badanego ciągu w całym

okresie powyższego badania (2.7-18.7.62) możemy obliczyć błąd pojedynczego wyznaczenia położenia wskaźnika jako błąd typowego spostrzeżenia, określony na podstawie wielkości rozrzutu wyników w stosunku do średniej arytmetycznej. W rezultacie takiego obliczenia otrzymujemy $m_{s_2} = 0,107$ mm przewyższające m_{s_1} 1,6-krotnie. Jest to zapewne spowodowane pewnymi nieuchwytnymi wpływami zmian stanu środowiska, osiągającymi w większych odstępach czasu większe wartości. Np. w okresie trwania badań prowadzono pomiar temperatury z dokładnością $0,2^{\circ}\text{C}$ nie stwierdzając w tej mierze zachoczenia zmian, które zapewne jednak występowały w granicach dokładności wyznaczenia.

Na podstawie wykonanych obserwacji położenia wskaźników można dokonać oceny dokładności wyników w oparciu o różnice odczytów uzyskanych w poszczególnych cyklach przy kilkakrotnych nacelowaniach. Taki sposób obliczenia wykazał, że błąd średni określenia położenia wskaźnika w pojedynczym cyklu wyniósł $m_{s_3} = 0,014$ mm. Znacznie większe uzyskane wielkości błędów m_{s_1} , m_{s_2} wskazują na dominujący wpływ zmian stanu przyrządów pod wpływem zmian stanu środowiska na wynik pomiaru. W związku z tym stwierdzono, że nie jest celowe dążenie do osiągania dużych dokładności odczytowych natomiast główny nacisk położono na stronę przeglądu stanu urządzeń pomiarowych i określenie praktycznej wielkości wpływów zmian warunków środowiska na wyniki. Przewaga dokładności odczytowej określonej tu błędem m_{s_3} (stanowiącym miarę dokładności pozornej pomiaru) nad dokładnością faktyczną wyrażoną błędami m_{s_1} , m_{s_2} spowodowała, że zdecydowałem się na wykonywanie w poszczególnych cyklach pomiarowych jedynie trzech nacelowań na wskaźnik i odpowiadających im odczytów.

Wyznaczenie błędów rzeczywistych sztucznie wprowadzonych składowych dY przesunąć przeprowadzono przy wykorzystaniu blaszek szczelinomierza mechanicznego wkładanych pomiędzy płaskie powierzchnie pierścienia 2 i kątownika stanowiącego uchwyt końca drutu odtworzającego zmiany długości (por. rys. 17). Wyznaczenie pomiarem zmian dy wykonano pięciokrotnie wprowadzając sztucznie następujące

Nr próby Bok	Wielkości dl w mm				
	1	2	3	4	5
1 (1-2)	-0,05	-0,08	0,02	-0,05	0,00
2 (2-3)	1,99	2,00	1,96	2,03	1,98
3 (3-4)	-1,89	-2,06	-2,01	-1,91	-2,04
4 (4-5)	-3,57	-3,55	-3,48	-3,42	-3,42
5 (5-6)	3,46	3,47	3,49	3,49	3,51
6 (6-7)	-0,12	0,09	0,11	0,08	0,06

rzeczywiste wielkości składowych przesunięć dY dla kolejnych punktów ciągu: 0,00 0,00 2,00 0,00 — 3,50 0,00 0,00 milimetrów. Na podstawie wykonanych pomiarów uzyskano następujące wartości zmian dl . (Patrz tabela na str. 205).

Obliczamy składowe dy przesunięć punktów ciągu na podstawie zmierzonych dl przy założeniu stałości punktu Nr 1. Wobec prostoliniowości ciągu i zorientowania go wzdłuż osi OY układu współrzędnych obliczenie będzie polegało na sumowaniu kolejnych uzyskanych wartości dl .

Nr pktu \ Nr próby	Wyznaczone składowe dy w mm				
	1	2	3	4	5
2	-0,05	-0,08	0,02	-0,05	0,00
3	1,94	1,92	1,98	1,98	1,96
4	0,05	-0,14	-0,03	0,07	-0,08
5	-3,52	-3,69	-3,51	-3,35	-3,50
6	-0,06	-0,22	-0,02	0,14	0,01
7	-0,18	-0,13	0,09	0,22	0,07

W rezultacie odjęcia wyznaczonych wielkości dy od odpowiednich rzeczywistych wielkości składowych dY przesunięć otrzymujemy następujące wartości błędów rzeczywistych ε_y .

Nr pktu \ Nr próby	Błędy rzeczywiste ε_y w mm					m'_{dy}	Q_{ii}	m_{ds}
	1	2	3	4	5			
2	0,05	0,08	-0,02	0,05	0,00	0,048	1,00	0,048
3	0,06	0,08	0,02	0,02	0,04	0,050	1,42	0,035
4	-0,05	0,14	0,03	-0,07	0,08	0,083	1,73	0,048
5	0,02	0,19	0,01	-0,15	0,00	0,109	2,00	0,054
6	0,06	0,22	0,02	-0,14	-0,01	0,120	2,24	0,054
7	0,18	0,13	-0,09	-0,22	-0,07	0,149	2,46	0,061
								0,05

W powyższym zestawieniu podane zostały również (obliczone podobnie jak przy analizie błędów rzeczywistych ε_x) wielkości m'_{dy} dla poszczególnych punktów ciągu. Ponieważ długości poszczególnych boków ciągu są w przybliżeniu równe, można przyjąć, że błędy średnie wyznaczenia składowych dy przesunięć kolejnych punktów ciągu nawiązanego jednostronnie są proporcjonalne do pierwiastka kwadratowego z liczby boków poprzedzających: $m'_{dy_i} = \sqrt{i-1} \cdot m_{ds}$. W oparciu o ten wzór możliwe było na podstawie zestawionych wielkości m'_{dy} obliczenie wielkości m_{ds} podanych w ostatniej kolumnie.

Obliczona na podstawie uzyskanego m_{ds} wielkość $m_{s_1} = 0,035$ okazała się dwukrotnie mniejsza od odpowiedniej wielkości obliczonej na podstawie wyników pomiarów w ciągu, którego punkty nie podlegały sztucznie wprowadzonym przemieszczeniom. Potwierdza to uprzednio postawiony wniosek, że dokładność odczytów nie jest miarodajna dla oceny dokładności wyznaczenia zmiany długości. Próby wyznaczenia błędów rzeczywistych sztucznie wprowadzonych składowych dY przesunięć prowadzone były stosunkowo szybko (pojedyncza próba trwała około 2 godz.), w związku z czym różnice wyników z par cykli nie są tu obciążone tak dużym wpływem zmian temperatur i innych warunków jak to miało miejsce w przypadku porównywania wyników obserwacji wykonanych w odstępach 1-2 dniowych (m_{s_1} z serii dziewięciu cykli) lub też w przypadku analizy materiału obserwacyjnego z całego okresu wykonania wspomnianych dziewięciu cykli (m_{s_2}). Należy jednocześnie dodać, że uzyskanie w ostatnich badaniach wielkości m_{s_1} około dwukrotnie wyższej aniżeli

Nr cyklu	Data	Czynność
1	22. 6. 62	Nasmarowano druty towotem
2	"	Starto towot
3	"	Obciążono druty dodatkowo o 210 G
4	"	Obciążono druty dodatkowo o 340 G (ponad obciążenie nominalne — początkowe)
5	"	Obciążono druty dodatkowo o 380 G
6	"	Odciążono druty do stanu początkowego
7	23. 6. 62	Pozostawiono w stanie poprzedzającym
8	"	Obciążono druty dodatkowo o 210 G
9	"	Obciążono druty dodatkowo o 340 G
10	"	Obciążono druty dodatkowo o 380 G
11	23. 6. 62	Odciążono druty do stanu początkowego
12	"	Starto z drutów zanieczyszczenia
13	23. 10. 62	Pozostawiono druty w stanie poprzedzającym
14	"	Starto z drutów zanieczyszczenia
15	28. 11. 62	Pozostawiono druty w stanie poprzedzającym
16	"	Starto z drutów zanieczyszczenia
17	"	Obciążono druty dodatkowo o 315 G
18	"	Obciążono druty dodatkowo o 545 G
19	"	Odciążono druty do stanu początkowego
20	3. 1. 63	Pozostawiono druty w stanie poprzedzającym
21	"	Starto z drutów zanieczyszczenia
22	"	Obciążono druty dodatkowo o 270 G
23	"	Obciążono druty dodatkowo o 470 G
24	"	Obciążono druty do stanu początkowego
25	13. 2. 63	Pozostawiono druty w stanie poprzedzającym
26	"	Obciążono druty dodatkowo o 250 G
27	"	Obciążono druty dodatkowo o 495 G
28	"	Odciążono druty do stanu początkowego
29	21. 3. 63	Pozostawiono druty w stanie poprzedzającym
30	"	Starto z drutów zanieczyszczenia
31	14. 6. 63	Pozostawiono druty w stanie poprzedzającym
32	"	Obciążono druty dodatkowo o 495-G
33	"	Obciążono druty dodatkowo o 940 G
34	"	Odciążono druty do stanu początkowego
35	1. 7. 63	Pozostawiono druty w stanie poprzedzającym
36	"	Starto z drutów zanieczyszczenia

m_{sg} otrzymywana na podstawie wewnętrznej zgodności wyników w poszczególnych cyklach, wynikało zapewne z poruszania drutów w trakcie wprowadzania w sposób sztuczny przesunięć punktów ciągu.

W ramach badania wpływów środowiska zakłócających prawidłową pracę urządzeń odtwarzających zmiany długości wykonano szereg cykli pomiarowych, poprzedzając każdy z nich następującymi czynnościami: (patrz tab. na str. 207).

Zestawienie wyników obserwacji

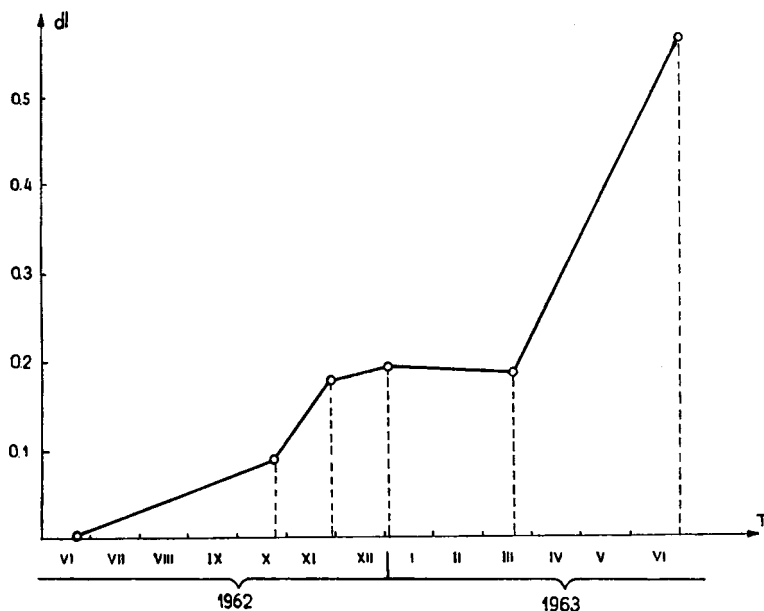
Nr cyklu	Data	Odczyt położenia wskaźnika na drucie:					
		1	2	3	4	5	6
1	22. 6. 62	4,36	4,00	3,90	3,57	4,87	5,87
2	„	3,60	4,35	3,78	3,76	4,71	6,00
3	„	2,54	5,46	2,52	4,68	3,62	6,94
4	„	1,95	6,04	1,78	5,24	2,97	7,52
5	„	1,74	6,25	1,54	5,44	2,75	7,69
6	„	3,52	4,31	3,72	3,69	4,61	6,00
7	23. 6. 62	3,57	4,34	3,65	3,67	4,53	6,09
8	„	2,56	5,55	2,55	4,63	3,51	6,91
9	„	1,94	6,20	1,86	5,19	2,90	7,43
10	„	1,74	6,31	1,62	5,45	2,66	7,62
11	„	3,48	4,43	3,73	3,67	4,52	5,94
12	„	3,47	4,41	3,62	3,71	4,53	6,02
13	23. 10. 62	3,57	3,87	3,05	6,25	7,51	5,75
14	„	3,64	4,01	3,01	6,32	7,36	5,95
15	28. 11. 62	3,57	4,20	2,55	6,61	7,20	6,08
16	„	3,48	4,35	2,44	6,68	7,14	6,13
17	„	2,04	6,03	0,75	8,15	5,60	7,53
18	„	0,93	7,21	—	9,16	4,52	8,59
19	„	3,57	4,41	2,44	6,72	7,12	6,07
20	3. 1. 63	5,54	2,73	4,13	4,65	9,12	4,93
21	„	5,54	2,71	4,10	4,70	9,09	4,93
22	„	4,25	4,04	2,60	6,00	7,74	6,23
23	„	3,16	5,22	1,20	7,15	6,61	7,22
24	„	5,55	2,65	4,10	4,74	9,06	4,90
25	13. 2. 63	6,02	1,59	5,00	3,82	9,77	4,43
26	„	4,86	2,88	3,63	4,94	8,60	5,57
27	„	3,74	4,11	2,25	6,01	7,42	6,75
28	„	6,01	1,64	4,94	3,85	9,75	4,46
29	21. 3. 63	5,43	1,85	4,25	3,97	9,32	4,32
30	„	5,40	1,91	4,44	3,94	9,24	4,33
31	14. 6. 63	3,65	3,94	3,33	5,99	7,47	5,32
32	„	1,35	6,22	0,77	8,23	4,97	7,52
33	„	—	8,57	7,98	0,29	2,86	9,05
34	„	3,66	3,94	3,24	6,02	7,43	5,34
35	1. 7. 63	4,72	4,03	3,62	5,90	7,57	4,68
36	„	3,62	4,20	3,45	5,96	7,21	5,10

Analiza różnic wyników uzyskanych w poszczególnych dniach przed i po przetarciu drutów pozwala na praktyczne określenie wpływu zanieczyszczeń na zmiany położenia wskaźnika (na zmiany długości krzywej zwisu i długości samego drutu wskutek zmian warunków obciążenia). Zestawmy uzyskane zmiany wyników spowodowane oczyszczeniem drutów (ze znakiem plus w przypadkach, gdy starcie osadów powoduje skrócenie krzywej zwisu i wydłużenie sprężyste drutu).

Nr cyklu	Data obserw.	Czas zanie- czyszczania	Zmiana odczytu położenia wsk. na drucie:							
			1	2	3	4	5	6	Σ	
11—12	23. 6.62	1 doba	0,01	—0,02	0,11	0,04	—0,01	0,08	0,21	
13—14	23.10.62	120 „	—0,07	0,14	0,04	0,07	0,15	0,20	0,53	
15—16	28.11.62	36 „	0,09	0,15	0,11	0,07	0,06	0,05	0,53	
20—21	3. 1.63	36 „	0,00	—0,02	0,03	0,05	0,03	0,00	0,09	
29—30	21. 3.63	77 „	0,03	0,06	—0,19	—0,03	0,08	0,01	—0,04	
35—36	1. 7.63	102 „	1,10	0,17	0,17	0,06	0,36	0,42	2,28	

Uzyskane wyniki są co do znaku w większości przypadków zgodne z przewidywaniem. Kilka wyników ze znakiem minus mogło powstać wskutek drobnych błędów pomiarowych przy jednocześnie występującym małym wpływie zanieczyszczeń.

Na podstawie powyższego zestawienia można ocenić, że szybkość pow-



Rys. 28

stawiana na drutach osadów jest zależna od pory roku. Ilustracją takiego stwierdzenia może być wykres (rys. 28) wyrażający wielkość wpływu zanieczyszczeń drutów w poszczególnych okresach, sporządzony na podstawie uzyskanych sum zmian wyników podanych w powyższym zestawieniu. Jest rzeczą charakterystyczną, że nachylenie linii wykresu jest większe w okresach: wiosna, lato, jesień aniżeli w okresie zimowym kiedy w galerii zapory jest stosunkowo najmniej wilgoci.

Uzyskane wyniki skłaniają do wniosku, że w okresach wzmożonej wilgotności powietrza należy wykonywać odczyty położenia wskaźnika na drucie po uprzednim oczyszczeniu powierzchni drutu. Należy przy tym pamiętać, że po oczyszczeniu drutu podwyższa się nieco jego temperatura wskutek pocierania. Wobec tego zachodzi potrzeba zachowania kilkuminutowego odstępu czasu pomiędzy przetarciem a wykonaniem odczytów.

Analiza różnic wyników uzyskanych w poszczególnych dniach przy zmieniających się obciążeniach pozwala na wyznaczenie aktualnych wartości modułu sprężystości. Dokonanie takiego badania podyktowane zostało przypuszczeniem, że wskutek długotrwałego obciążenia oraz korodowania powierzchni zmniejsza się pierwotna wytrzymałość drutu na rozciąganie co pociąga zmianę jego długości. Zmniejszenie wytrzymałości na rozciąganie powinno wyrazić się z czasem zmniejszeniem modułu sprężystości wyznaczanego przy założeniu, że nie nastąpiły zmiany powierzchni przekroju poprzecznego drutu.

W zasadzie wyznaczanie modułu sprężystości winno odbywać się przy pionowym zawieszeniu drutu. W niniejszym przypadku wyznaczanie przeprowadzono bez zmiany sposobu zawieszenia drutu, obciążając go dodatkowo ponad obciążenia nominalne.

Przy obliczaniu wielkości modułów sprężystości na podstawie zmian odczytów spowodowanych przez dodatkowe obciążenia wprowadzono redukcję ze względu na towarzyszące zmianom obciążeń zmiany długości krzywej zwisu.

Uzyskane zestawienie wskazuje, że w ciągu jednego roku od momentu zawieszenia drutów nie zaszły widoczne zmiany wartości modułów sprężystości z tendencją do zmniejszania. Różnice między poszczególnymi uzyskanymi dla tych samych drutów wartościami modułów wskazują, że wyznaczenie odbywało się z dość dużymi błędami. Należy podkreślić, że wyniki wyznaczeń byłyby bardziej dokładne, gdyby zastosować większe dodatkowe obciążenia. Z drugiej jednak strony zachodziła obawa, że pod wpływem znacznych dodatkowych obciążeń mogą zajść trwałe zmiany długości drutów.

W wynikach badania modułów daje się zauważyć charakterystyczna cecha znacznego ich zróżnicowania dla poszczególnych odcinków drutu pochodzącego z jednej partii. Może to wskazywać na niedokładności kalibrowania drutu przy jego produkcji powodujące przewężenia i miejscowe zmniejszenia wytrzymałości.

Zestawione uprzednio wyniki pomiarów przy zmiennych obciążeniach mogą służyć również do określenia zdolności drutu do przyjmowania wyjściowej długości po dokonaniu dodatkowych obciążeń i powtórnych

Zestawienie wyznaczonych modułów sprężystości E

Data wyzn.	Moduł sprężystości drutu w tys. $\frac{\text{kG}}{\text{mm}^2}$					
	1	2	3	4	5	6
22.23.6 .62	22,8	22,2	16,7	25,2	22,0	24,4
28.11.62	23,6	21,6	17,6	23,7	22,3	22,2
3. 1.63	22,1	22,8	15,8	21,7	21,0	20,3
13. 2.63	24,1	22,8	17,0	25,2	23,5	22,1
14. 6.63	22,3	21,8	15,8	23,1	20,8	23,2
Średnio	23,0	22,2	16,6	23,8	21,9	22,4
m_o	0,9	0,6	0,8	1,5	1,1	1,5

odciążeń do stanu wyjściowego. W tym celu możemy porównać wyniki pomiarów wykonanych w tych samych dniach przed przyłożeniem dodatkowych obciążeń i po ich usunięciu. Uzyskane w wyniku takiego porównania zmiany odczytów położenia wskaźników na drutach są funkcją

Zestawienie zmian położenia wskaźników po usunięciu dodatkowych obciążeń w stosunku do stanu przed ich wprowadzeniem

Nr cyklu	Data obserw.	Zmiana odczytu położenia wskaźnika na drucie:							
		1	2	3	4	5	6	Śr.	m_{ds}
2—6	22. 6.62	—0,08	0,04	0,06	—0,07	—0,10	0,00	—0,02	0,067
7—11	23. 6.62	—0,09	—0,09	0,08	0,00	—0,01	0,15	0,01	0,087
16—19	28.11.62	0,09	—0,06	0,00	—0,04	—0,02	0,06	0,00	0,054
21—24	3. 1.63	0,01	0,06	0,00	—0,04	—0,03	0,03	0,00	0,034
25—28	13. 2.63	—0,01	—0,05	—0,06	—0,03	—0,02	—0,03	—0,03	0,037
31—34	14. 6.63	0,01	0,00	—0,09	—0,03	—0,04	—0,02	—0,03	0,043
Średnio		—0,01	—0,02	—0,02	—0,01	—0,04	0,03		

zarówno stopnia sprężystości drutu jak i sprawności urządzeń a w szczególności bloczków. Gdyby z upływem czasu dały się zauważyć zwiększania się zmian odczytów, byłoby to dowodem wzrastania błędów przeniesienia przez bloczki nominalnej siły naciągu jak również utratą sprężystości drutu.

Wyniki podane w powyższym zestawieniu wskazują na dużą zdolność przyjmowania przez druty jednakowej długości odpowiadającej jednokrotnym naprężeniom bezpośrednio po dokonaniu doświadczeń z przykładaniem innych naprężeń. O dobrej pracy bloczków w całym okresie przeprowadzania badań świadczy uzyskanie szeregu małych wartości błędów m_{ds} obliczonych przy założeniu, że zmiany wyników są spowodowane wyłącznie błędami pomiarowymi. Świadczy o tym również brak zauważalnej tendencji do wzrastania m_{ds} wraz z upływem czasu.

Niezależnie od wyżej opisanych badań wykonywano przy każdym przeglądzie urządzeń próbne odczyty położenia wskaźników na drutach przy czym przed każdym odczytem lekko poruszano drut i odczekiwano do momentu jego uspokojenia. W rezultacie cyklu takich powtórzeń odczytów można było na podstawie ich rozrzutu przekonać się, czy bloczki zapewniają na tyle dokładne przenoszenie siły naciągu, aby po lekkim rozkołysaniu drutów stan spoczynku był zawsze identyczny (wskaźnik na drucie zajmował po zaniknięciu kołysania uprzednie położenie). W wyniku takich prób stwierdzono, że w całym okresie pracy urządzeń wielkości błędów m_{s3} obliczone na podstawie rozrzutu wyników uzyskiwanych w sposób wyżej opisany nie przekraczały odpowiednich błędów obliczonych na podstawie cykli odczytów wykonanych przy nieruchomych drutach. Zachowanie przez bloczki wysokiej sprawności i zdolności dokładnego przenoszenia na druty siły naciągu w całym okresie badań dowodzi słuszności zastosowania systemu ustawień nożowych w miejsce łożysk kulkowych. Przeglądy stanu drutów i urządzeń służących do ich zawieszenia wykazały w okresie badań znaczne pokrycie korozją wszystkich części stalowych. W tej sytuacji wydaje się wątpliwe, aby bloczki obracające się na łożyskach kulkowych zachowały sprawność przez dłuższy czas w warunkach spotykanych w galeriach zapór.

3. Badania zmian długości drutów pod wpływem długotrwałego obciążenia

Badania przeprowadzone w komparatorni Głównego Urzędu Miar w Warszawie polegały na okresowym porównaniu długości dwu zainstalowanych na stałe drutów stalowych (z tej samej partii jak zainstalo-

wane w Rożnowie) z długościami drutu inwarowego, komparowanego bezpośrednio przed dokonaniem każdego porównania. W taki sposób możliwe było wyznaczenie zmian długości drutów stalowych wraz z upływem czasu.

Dla wykonania zadania zainstalowano na ścianie nośnej komparatorni GUM urządzenia do pomiaru zmian odległości dwu punktów ściany, oddległych od siebie o 48 m. Wobec tego, że przewidywano, iż wzajemna odległość tych dwu punktów ściany nie będzie ulegała zmianie wobec prawdopodobnie dużej stabilności ściany, projekt badania przewidywał odwrócenie zadania wyznaczania zmian długości przy wykorzystaniu drutów. Mianowicie przewidywano możliwość wyznaczania własnych zmian długości drutu, przy założeniu wzajemnej niezmienności położenia uchwytu drutu i urządzenia pomiarowego. Dla sprawdzenia, czy założenie pełnej stabilności ściany nośnej w komparatorni GUM jest słuszne przewidywano potrzebę wykonywania okresowych pomiarów odległości uchwytu drutu od urządzenia mocującego urządzenie pomiarowe przy wykorzystaniu komparowanego drutu inwarowego.

Dla określenia zależności między siłą naciągu drutu i czasem pracy drutu a jego zmianami długości dokonano zawieszenia dwu drutów stalowych o średnicy $d = 0,8$ mm obciążonych na stałe siłami 2 i 4 kg.

Z pomiarów dokonanych przez zespół Głównego Urzędu Miar pod kierownictwem mgr inż. Igora Dejmicza wynikało, że w praktyce zachodziły pewne zmiany długości ściany przyjętej za niezmienną. W tej sytuacji badanie wydłużania się drutów stalowych wraz z upływem czasu ich obciążenia wymagało bezpośredniego ich porównywania z długością drutu inwarowego, komparowanego bezpośrednio przed dokonaniem porównania. Porównanie wykonywano przez jednoczesne odczyty położenia wskaźników na drutach stalowych oraz pomiar odległości kreski naciętej na uchwycie drutów i drugiej kreski naciętej na uchwycie urządzenia pomiarowego.

W ramach niniejszego badania wykonano w okresie 1 roku 22 cykle odczytów obydwu drutów stalowych. Ze względów organizacyjnych nie było możliwe wykonanie większej niż 5 liczby jednoczesnych wyznaczeń długości komparowanym drutem inwarowym. W związku z tym zestawimy tu jedynie wyniki uzyskane podczas jednoczesnych obserwacji (pozostałe wyniki obserwacji drutami stalowymi stanowią jedynie ilustrację wyznaczonych zmian długości ściany komparatorni, co nie jest w niniejszym badaniu interesujące).

Obserwacje wskaźników na drutach wykonane przez dwu różnych obserwatorów porównywane były oddzielnie z wynikiem obserwacji wyjściowej z uwagi na ewentualne błędy osobowe.

Data	Odczyty wskaźników na drutach stalowych				Odległość wyzn. dr. inwarowym	$t^{\circ}\text{C}$	ΔT dni	
	Obs. Żykubek		Obs. Janusz					
	1	2	1	2				
16. 5.62	5,34	6,54	5,38	6,60	48 m—2,7 mm	19,1	107	
31. 8.62			5,22	6,64		—2,4 mm		19,5
14.11.62			3,18	4,38		—2,0 mm		23,9
7. 2.63			3,75	4,91		—1,6 mm		23,3
11. 5.63	5,86	6,95	5,88	6,98	—1,8 mm	18,5	359	

Powyższe zestawienie posłużyło do określenia zmian długości ściany oraz zmian długości drutów stalowych w stosunku do długości określonej komparowanym doraźnie drutem inwarowym.

Obserwacje drutów stalowych					ds_{inw}	ds_{inw} $-ds_{zred}$		ΔT
ds obserw.		Red. t.	ds zred.					
-0,16	0,04	0,21	0,05	0,25	0,30	0,25	0,05	107
-2,20	-2,22	2,54	0,34	0,32	0,70	0,36	0,38	181
-1,63	-1,69	2,23	0,60	0,54	1,10	0,50	0,56	266
0,51	0,40	-0,32	0,19	0,08	0,90	0,71	0,82	359

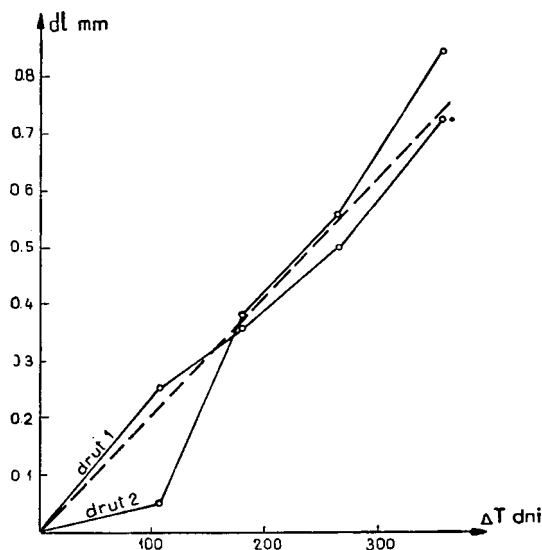
Zestawione dla obu drutów stalowych wielkości $ds_{inw} - ds_{zred}$ wyrażają wielkości wydłużeń każdego z tych drutów z uwzględnieniem wprowadzonej redukcji termicznej. Na podstawie uzyskanych wartości wydłużeń w stosunku do stanu w momencie obserwacji wyjściowej możemy określić zależność między wielkością wydłużeń a czasem pracy drutów. Na podstawie zebranych danych obserwacyjnych sporządzony został wykres wydłużeń drutów stalowych w funkcji upływu czasu rys. 29.

Wykresy wydłużeń drutów: pierwszego obciążonego siłą 4 kG oraz drugiego obciążonego siłą 2 kG wykazują dużą zgodność przebiegu, co mogłoby wskazywać, że w pewnych granicach wielkość siły naciągu drutu nie posiada znaczenia dla jego wydłużania się w funkcji czasu. Wynik ten jest w przybliżeniu zgodny z wynikami innych badań cytowanymi w [4]. Również wielkości wydłużeń drutów w funkcji upływu czasu są w przybliżeniu zgodne z wynikami cytowanych w [4] badań.

Narysowana na wykresie wydłużeń linia przerywana ma w przybliżeniu określać średnie wydłużenie obydwu badanych drutów w funkcji upływu czasu. Wskazuje ona, że wydłużenie drutów we wspomnianym

okresie badań osiągnęło średnio 0,2 mm na 100 dni. Stanowi to względne wydłużenie drutu o $\frac{1}{240\,000}$ w ciągu 100 dni.

Należy podkreślić, że uzyskany wynik może być miarodajny dla oceny zachowania się drutów stalowych pod wpływem długotrwałego obciążenia.



Rys. 29

nia w warunkach podobnych do warunków środowiska w komparatorni GUM. W przypadku zawieszenia drutów odtwarzających zmiany długości w warunkach odmiennych należałoby rozwinąć badanie do stanu umożliwiającego dokonywanie porównań z długością komparowanego drutu inwarowego w miejscu pracy stałej instalacji odtwarzającej zmiany długości.

Uwzględniając wyznaczone wielkości wydłużeń drutów wraz z upływem czasu należałoby przy wyznaczaniu zmian odlegości punktów poligonowych stosować wzór uwzględniający redukcje termiczne oraz redukcje ze względu na wydłużanie się drutów w postaci:

$$ds_{zred} = ds + s \cdot \alpha \cdot dt + f(\Theta, \Delta T)$$

Ponieważ w naszym przypadku stwierdzono w przybliżeniu proporcjonalność wydłużania drutu wraz z upływem czasu możemy wzór powyższy wyrazić:

$$ds_{zred} = ds + s \cdot \alpha \cdot dt + \Theta \cdot s \cdot \Delta T \quad (15)$$

gdzie: α — współczynnik rozszerzalności termicznej drutu równy w naszym przypadku $11 \cdot 10^{-6}$

θ — współczynnik względnego wydłużenia drutu równy w naszym przypadku $42 \cdot 10^{-7} \frac{1}{100 \text{ dni}}$

ΔT — upływ czasu od momentu obserwacji wyjściowej wyrażony w setkach dni.

4. Próby rejestracji liniowych zmian położenia drutu

Początkowe próby zostały wykonane przy wykorzystaniu rejestratora służącego w zasadzie do innych celów, zbudowanego w sposób podobny jak rejestrator opisany w rozdziale VII.

Wykorzystany rejestrator posiadał szybkość przesuwu papieru światłoczułego równą $9 \frac{\text{cm}}{\text{godz}}$ zaś szczelina jego posiadała średnicę 0,3 mm. Nie posiadał on własnego rzutnika światła, bowiem przy normalnym użytkowaniu rejestracja odbywała się przy wykorzystaniu promienia światła odbitego od zwierciadła umocowanego na poruszającym się elemencie. W związku z tym przy wykonywaniu niniejszych badań zaszła potrzeba zastosowania odrębnego kolimatora, do którego to celu wykorzystano lunetę zdekompletowanego niwelatora.

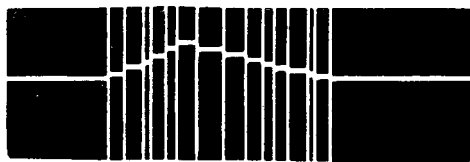
Doświadczenie wykonano w sposób następujący:

Ustawiono w ciemni rejestrator i kolimator we wzajemnej odległości 4,5 m. Luneta niwelatora została skierowana prostopadle do kierunku szczeliny rejestratora. Przed szczeliną rejestratora w odległości około 5 cm umocowano prototypowe urządzenie pomiarowe opisane w rozdziale VI, osią pomiarową równoległą do szczeliny. Do ruchomej części urządzenia pomiarowego przytwierdzono w położeniu prostopadłym do szczeliny rejestratora odcinek drutu $d = 0,35 \text{ mm}$, którego cień przy oświetleniu promieniami wybiegającymi z lunety niwelatora padał na obudowę rejestratora i na szczelinę.

Następnie włączono kolimator wyposażony w żarówkę 10 W, 24 V i w określonych momentach zmieniano położenie ruchomej części urządzenia pomiarowego i sprzężonego z nią odcinka drutu, zapisując każdorazowo odczyty czujnika. Obliczone na podstawie odczytów czujnika wielkości zmiany położenia oświetlanego odcinka drutu można w doświadczeniu przyjąć za praktycznie bezbłędne.

Po wykonaniu serii przesunięć drutu zatrzymano rejestrator oraz wywołano i utrwalono uzyskany fotogram z wynikami dokonanej reje-

stracji. Wynik rejestracji (fot. 30) okazał się bardzo wyraźny i jednoznaczny. Na uzyskanym fotogramie wykonano pomiar położenia poszczególnych fragmentów wykresu cienia drutu w stosunku do krawędzi



Rys. 30

T	O	dL	dl_1	dl_2	dl_3	ε_1	ε_2	ε_3
13 ⁵⁸	0,00							
		0,37	0,35	0,30	0,40	0,02	0,07	-0,03
	0,37	0,28	0,25	0,30	0,30	0,03	-0,02	-0,02
	0,65	0,54	0,70	0,40	0,55	-0,16	0,14	-0,01
	1,19	0,35	0,25	0,50	0,40	0,10	-0,15	-0,05
	1,54	0,56	0,70	0,50	0,55	-0,14	0,06	0,01
	2,10	0,40	0,35	0,50	0,45	0,05	-0,10	-0,05
	2,50	0,70	0,75	0,70	0,75	-0,05	0,00	-0,05
	3,20	0,62	0,55	0,60	0,60	0,07	0,02	0,02
	3,82	1,18	1,35	1,30	1,20	-0,17	-0,12	-0,02
	5,00	-1,09	-1,15	-1,10	-1,20	0,06	0,01	0,11
14 ¹⁰	3,91	-0,81	-0,85	-0,90	-0,80	0,04	0,09	-0,01
	3,10	-0,78	-0,85	-0,70	-0,85	0,07	-0,08	0,07
	2,32	-0,63	-0,75	-0,70	-0,70	0,12	0,07	0,07
	1,69	-1,12	-1,10	-1,20	-1,20	-0,02	0,08	0,08
	0,57	-0,57	-0,55	-0,50	-0,60	-0,02	-0,07	0,03
14 ¹⁹	0,00							
			m_{dl}			0,09	0,09	0,05

obszaru zaświeconego, określonego przez końce szczeliny rejestratora. Na podstawie tych pomiarów obliczono wielkości przesunięć cienia drutu dl . Pomiar na fotogramie wykonano trzykrotnie: dwa razy z użyciem linijki z podziałem mm (różni obserwatorzy) oraz przy wykorzystaniu lupy z podziałką. Przesunięcia cienia drutu obliczone na podstawie tych pomiarów oznaczono dl_1 , dl_2 , dl_3 . Różnice między odpowiednimi przesunięciami rzeczywistymi, określonymi na podstawie odczytów czujnika a powyższymi wartościami stanowią błędy rzeczywiste rejestracji, które posłużyły do wyznaczenia błędów średnich m_{dl} . Podczas dokonywania doświadczenia nie prowadzono zapisu momentów czasu wykonania poszczególnych przesunięć poza wymienionymi w tabelce. W momentach zmiany położenia drutu zakrywano szczelinę rejestratora co jest przyczyną powstania pionowych jasnych pasm niezaświecenia fotogramu.

5. *Próby zastosowania maszyny cyfrowej UMC-1 do obliczania składowych dx , dy przesunięć punktów sieci kontrolnych*

Przeprowadzenie wspomnianych wyżej prób stało się możliwe dzięki opracowaniu przez dr inż. Jerzego Gaździckiego dwu specjalnych programów dla:

1. Obliczania na maszynie UMC-1 składowych dx , dy przesunięć punktów pełnej sieci trygonometrycznej o pomierzonych kierunkach, przy dwu określonych punktach dostosowania,
2. Identyfikowania grup punktów stałych.

Pierwszy z programów o symbolu 0—4 ułożony został tak, aby możliwe było na podstawie jednorazowo obliczonej tabeli odwrotności równań normalnych i dodatkowych stałych danych dotyczących określonej sieci oraz zmieniającej się stosownie do wyników aktualnych pomiarów kolumny wyrazów wolnych równań poprawek obliczenie niewiadomych orientacyjnych dz oraz składowych dx , dy .

W oparciu o program 0—4 i wymienione dane maszyna oblicza kolumnę wyrazów wolnych równań normalnych a następnie drogą wymnażania tej kolumny przez odwrotność tabeli współczynnikowej równań normalnych określa wartości niewiadomych. Obliczenie kontrolowane jest niezależnie przy pomocy sum kontrolnych drukowanych wraz z niewiadomymi w sposób umożliwiający natychmiastową ocenę prawidłowości przeprowadzenia rachunków.

Drugi program o symbolu 0—5 ułożony został w sposób umożliwiający realizację przedstawionej przez autora koncepcji identyfikowania grup punktów o zachowanej niezmienności kształtu utworzonej przez nie figury. Koncepcja ta opisana w [3] stanowi rozwinięcie sposobu

wykorzystania kryterium zniekształcenia skali odcinków sieci, opisanego w [8] i opartego na transformacyjnej metodzie identyfikacji podanej w [14].

W wyniku wyrównania różnic obserwacji przy dostosowaniu sieci do dwu określonych punktów otrzymujemy wielkości dx , dy obciążone ewentualnym wpływem błędnego dostosowania do punktów poruszonych. Wpływ ten wyraża się wielkością współczynnika zmiany skali każdego odcinka sieci, możliwą do obliczenia w oparciu o wzór:

$$\beta_{ik} = -A_{ik}(dx_k - dx_i) - B_{ik}(dy_k - dy_i) \quad (16)$$

Zróznicowanie wartości współczynników β poszczególnych odcinków sieci jest spowodowane zachowaniem przesunięć również innych punktów poza punktami dostosowania. Jedną z oznak stałości pewnej grupy punktów może być między innymi jednakowe zniekształcenie skali odcinków łączących te punkty we wszystkich kombinacjach. Oczywiście ze względu na błędy wyznaczenia nie możemy w praktyce oczekiwać pełnej zgodności wartości współczynników β obliczonych dla grupy punktów o zachowanej wzajemnej niezmienności położenia¹⁾.

Wyszukanie (zidentyfikowanie) grupy „ v ” punktów o zachowanej wspomnianej cesze stałości położenia wymaga posegregowania obliczonych współczynników β na zespoły odpowiadające $\binom{n}{k}$ grupom k -punktowym (n — ilość punktów sieci, które mogą być z racji swego położenia rozpatrywane jako ewentualnie stałe). Następnie w każdym zespole współczynników oznaczonym numerami odpowiednich punktów należy wykonać działania, pozwalające na stwierdzenie wewnętrznej zgodności lub niezgodności wartości współczynników w granicach błędów ich wyznaczenia. Odbywa się to w każdym zespole na drodze wykonania działań:

$$\beta_{sr} = \frac{[p_{\beta_i} \cdot \beta_i]}{[p_{\beta_i}]} \quad (17)$$

$$m_\beta = \sqrt{\frac{[(\sum p_{\beta_i} \cdot v_{\beta_i})^2]}{r}} \quad (18)$$

gdzie: $v_{\beta_i} = \beta_{sr} - \beta_i$

r — ilość współczynników nadliczbowych

p_{β_i} — waga współczynnika β_i obliczona w oparciu o wzór na błąd funkcji wyrównanych wielkości dx , dy .

¹⁾ Omawiana cecha niezmienności położenia punktów jest konieczna lecz niewystarczająca dla stwierdzenia tej niezmienności. Bliższe i bardziej precyzyjne omówienie tematu zawarte jest w cytowanej pracy [3].

Program 0—5 został tak ułożony, aby po obliczeniu wartości współczynników β w oparciu o dostarczone z wyrównania wielkości dx , dy oraz o stałą część danych dotyczących określonej sieci, można było wykonać działania (17), (18) w zespołach posegregowanych współczynników β odpowiadających $\binom{n}{4}$ grupom 4-punktowym. Program powoduje, że po wykonaniu obliczeń maszyna drukuje numery punktów tworzących poszczególne grupy oraz wartości obliczone wzorami (17), (18) w przypadkach, gdy $m_{\beta}^2 \leq 4$. W przypadkach przeciwnych maszyna poprzestaje na obliczeniu odpowiednich wartości lecz nie wykazuje ich, gdyż dotyczą grup punktów niezgodnych wewnątrznie w stopniu przekraczającym wpływ niedokładności obserwacji, co wystarcza do stwierdzenia, że zachodzą wzajemne ruchy punktów rozpatrywanej grupy. W ten sposób zostają przez maszynę podane jedynie informacje o grupach 4-punktowych, które noszą określoną cechę niezmienności położenia.

W przypadku, gdy wydrukowaniu podlegają informacje dotyczące większej ilości grup 4-punktowych, stanowi to oznakę, że w sieci znajduje się zapewne więcej niż 4 punkty stałe. Zidentyfikowanie tych punktów w oparciu o podany przez maszynę wynik identyfikacji stałych grup 4-punktowych przeprowadza się na drodze porównania numerów punktów wchodzących w skład poszczególnych wydrukowanych grup i porównania uzyskanych wartości β_{sr} .

Prace nad automatyzacją obliczania odkształceń dotyczyły w pierwszej fazie wyznaczania przesunięć punktów najszerzej obecnie stosowanego typu osnowy kontrolnej w postaci sieci trygonometrycznej, nie zaś osnowy składającej się z zespołu różnego typu sieci geodezyjnych. Wynikło to z uzyskanego doświadczenia wskazującego, że opracowanie kameralne wyników pomiarów dokonanych w wewnętrznej części osnowy kontrolnej nie zajmuje dużo czasu i może być z powodzeniem wykonane metodą graficzną lub na arytmometrze ręcznym czy elektrycznym. Zasadniczego natomiast przyspieszenia w stosunku do stanu dotychczasowego wymagają obliczenia w zakresie określania składowych przesunięć zewnętrznej części osnowy kontrolnej. W przypadku uzyskania w tym zakresie pozytywnego efektu przez zastosowanie do obliczeń maszyny elektronowej, celowe będzie zapewnienie stosowanie następującego trybu postępowania:

1. Wyznaczenie przesunięć punktów zewnętrznej części osnowy kontrolnej na maszynie elektronowej (wyrównanie, identyfikacja punktów stałych, transformacja przesunięć),

2. Wyznaczenie graficzne lub na arytmometrze przesunięć punktów wewnętrznej części osnowy kontrolnej z uwzględnieniem wyznaczonych

składowych przesunąć punktów nawiazania do zewnętrznej części osnowy.

Omówiony tryb postępowania wydaje się celowy nie tylko z punktu widzenia stosunku nakładów czasu na obliczenia w obu częściach osnowy kontrolnej lecz również ze względu na podane uprzednio sugestie częstego wyznaczania odkształceń względnych w oparciu o pełne cykle obserwacji wewnętrznej części osnowy kontrolnej, uzupełnionych okresowymi obserwacjami i wyznaczeniami przesunąć punktów całej osnowy kontrolnej.

Wspomniane tu próby wykorzystania maszyny cyfrowej UMC-1 do obliczania przesunąć i próby opracowanych w tym celu programów 0—4, 0—5 zostały przeprowadzone na przykładzie sieci kontrolnej zapory w Porąbce. Dotychczas wykonano dla tej sieci obliczenia dotyczące wyników pięciu kolejnych obserwacji. Obliczenia te pozwoliły na dokonanie wstępnej oceny czasu wykonania omawianych zadań w oparciu o wykorzystanie maszyny UMC-1, oraz stanowiły podstawę dla wysnucia wniosków dotyczących dalszego ulepszenia trybu obliczeń.

Na przykładzie sieci zawierającej 10 punktów stwierdzono, że obliczenie składowych przesunąć przy dwu punktach dostosowania programem 0—4 zajmuje maszynie około 30 minut czasu zaś identyfikacja stałych grup 4-punktowych (spośród rozpatrywanych 210 grup) programem 0—5 zajmuje około 50 minut. Do tego należy doliczyć czas wprowadzania do pamięci maszyny wyperforowanych na taśmie programów, wszystkich stałych dla określonej sieci danych oraz wyrazów wolnych równy około 2 godziny. Można przeto przyjąć, że łącznie z przygotowaniem wyrazów wolnych i sum kontrolnych (perforacja), czas wykonania pełnego cyklu obliczeń nie przekracza 5 godzin. Uwzględniając fakt, że maszyna UMC-1 zalicza się do grupy maszyn liczących i wczytujących wolno, można się spodziewać wielokrotnego zmniejszenia tego czasu przy użyciu maszyny bardziej doskonałej technicznie.

Nie można tu pominąć faktu, że użycie maszyny elektronowej dla omawianych celów ma na względzie przede wszystkim przyspieszenie obliczeń powtarzających się dla danej sieci wielokrotnie — po uzyskaniu wyników kolejnych cykli obserwacji. W tej sytuacji można sobie pozwolić na wykonanie w początkowym dla obliczeń danej sieci okresie dosyć pracochłonnych i żmudnych prac przygotowawczych, mających związek z zestawieniem niezmiennych części danych liczbowych. Podkreślę tu, że głównym oczekiwanym i pożądanym efektem zastosowania do obliczeń maszyny elektronowej jest możliwość jak najszybszego podawania wyników po wykonaniu każdego cyklu obserwacji, co ma bezpośredni związek z ostrzegawczą funkcją pomiarów odkształceń.

Niezależnie od wniosków dotyczących ekonomii czasu, przeprowadzone próby obliczeń na przykładzie konkretnie istniejącej i obserwowanej sieci kontrolnej przyniosły ciekawe wyniki natury technicznej — dotychczas praktycznie niemożliwe do uzyskania na drodze rachunku ręcznego. Mianowicie identyfikacja punktów stałych rozpatrująca tu wszelkie możliwe kombinacje grup punktów o zachowanych cechach niezmienności położenia wykazała, że w wielu przypadkach cechy te występują w sposób przypadkowy — nie posiadający związku z faktyczną niezmiennością położenia punktów. Taki uboczny wynik przeprowadzonych prób z wykorzystaniem maszyny wskazał na konieczność baczniejszego zwrócenia uwagi na problem zabezpieczenia prawidłowej i pewnej identyfikacji punktów stałych w sieciach kontrolnych położonych na słabych gruntach i skałach. Wspomniany wynik stał się między innymi przyczyną do zgłoszenia w tej mierze uwag opublikowanych w [28].

Przeprowadzone próby wskazały również na potrzebę opracowania dla maszyny elektronicznej programów służących do wykonania zadania identyfikacyjnego w oparciu o stosowaną dotychczas metodę transformacyjną (przy jednoczesnym rozszerzeniu metody o kryteria stałości w większym stopniu zdeterminowane). Potrzeba taka wynikła z pewnego mankamentu omówionej wyżej metody opartej na analizie zniekształceń skali odcinków, polegającego na zależności wyników analizy od przyjętych założeń dostosowania sieci, poczynionych przy wyrównaniu.

6. Próby wyznaczania zmian długości boków poligonowych ds za pośrednictwem pomiaru zmian strzałki zwisu drutu o utwierdzonych końcach

Sposób niniejszy oparty jest na fakcie, że w przypadku zmiany wzajemnej odległości punktów utwierdzenia końców drutu o wielkość ds , następuje przy pewnych określonych naprężeniach i długościach drutu, kilkunastokrotnie większa zmiana strzałki zwisu df . W tej sytuacji nawet mało dokładny pomiar zmian strzałki zwisu może służyć do dokładnego określenia zmiany odległości. Sposób taki stosowany był dotychczas do kontrolowania zmian odległości końcowych mikroskopów komparatorów lub do badania wpływu tarcia bloczków na wyniki pomiarów [9]. Opis przeprowadzonych prób wykorzystania go do wyznaczania odkształceń związanych ze zmianami termicznymi muru budowlanego znajdujemy w [32]. Wspomniana praca podaje opis zastabilizowanych w murze uchwyty 24-metrowego drutu inwarowego, urządzenia do

pomiaru zmian zwisu drutu w postaci mocowanego w pozycji pionowej czułka mikrometrycznego, wyprowadzenie wykorzystywanej zależności różniczkowej między zmianą długości ds a zmianą strzałki zwisu df oraz opis i analizę wyników wykonanych pomiarów badawczych.

W oparciu o wzory (1.3), (4.3) możemy napisać:

$$l_o + \frac{\sigma \cdot l_o}{E} - s = \frac{8}{3} \cdot \frac{f^2}{s} \quad (1.8)$$

gdzie: l_o — długość drutu bez obciążenia.

Napiszmy powyższą zależność w formie:

$$s - l_o = \frac{\sigma \cdot l_o}{E} - \frac{8}{3} \cdot \frac{f^2}{s} \cong \frac{s^3}{f \cdot E \cdot 10^3} - \frac{8}{3} \cdot \frac{f^2}{s} \quad (2.8)$$

Dla określenia zależności ds od df dokonujemy odpowiedniego różniczkowania (2.8) otrzymując:

$$ds \cong - \left(\frac{s^3}{f^2 \cdot E \cdot 10^3} + \frac{16}{3} \cdot \frac{f}{s} \right) df \quad (3.8)$$

Po przekształceniu (3.8) otrzymamy:

$$\frac{df}{ds} \cong K = - \frac{1}{\frac{16}{3} \cdot \frac{f}{s} + \frac{s^3}{f^2 \cdot E \cdot 10^3}} \quad (19)$$

Wzór na wartość współczynnika K (19) jest zbliżony do wyprowadzonego w [32] z praktycznie wystarczającą dokładnością.

Praktyczne wyznaczanie zmian długości ds na podstawie pomierzonych zmian strzałki zwisu df polega na podzieleniu df przez obliczoną wartość K .

$$ds = \frac{df}{K} \quad (20)$$

Jak zauważymy dalej, taki sposób obliczenia będzie słuszny przy bardzo małych stwierdzonych zmianach df , bowiem współczynnik K dosyć szybko zmienia swą wartość. W przypadku, gdy następują duże zmiany strzałki zwisu należy stosować następujący tryb obliczeń:

Gdy bezpośrednio po zainstalowaniu drutu strzałka zwisu osiągała wartość $f_{wyjśc.}$ zaś po pewnym czasie przyjęła skutek zmiany wzajemnej odległości punktów utwierdzenia drutu wartość f_1 znacznie różniącą się od wyjściowej należy obliczyć ds z wzoru:

$$ds = s_1 - s_{wyjśc.} = (s_1 - l_o) - (s_{wyjśc.} - l_o) \quad (21)$$

gdzie wyrażenia w nawiasach obliczamy z wzoru (2.8) przy przyjęciu odpowiednich wartości f_1 , $f_{wyjśc.}$ Zamiast doraźnego obliczania składni-

ków wzoru (21) możemy korzystać z przygotowanej uprzednio tabeli lub wykresu. Taki sposób postępowania jest korzystny zarówno ze względów ekonomicznych, jak i z uwagi na możliwość oceniania dopuszczalności lub niedopuszczalności stosowania wzoru (20) przy konkretnie uzyskanych wartościach zmian strzałki zwisu. Korzystanie z tabeli lub wykresu jest również korzystne z punktu widzenia analizy zakresu pomiarowego aparatury oraz ustalenia warunków początkowego — wyjściowego zwisu drutu w momencie instalowania.

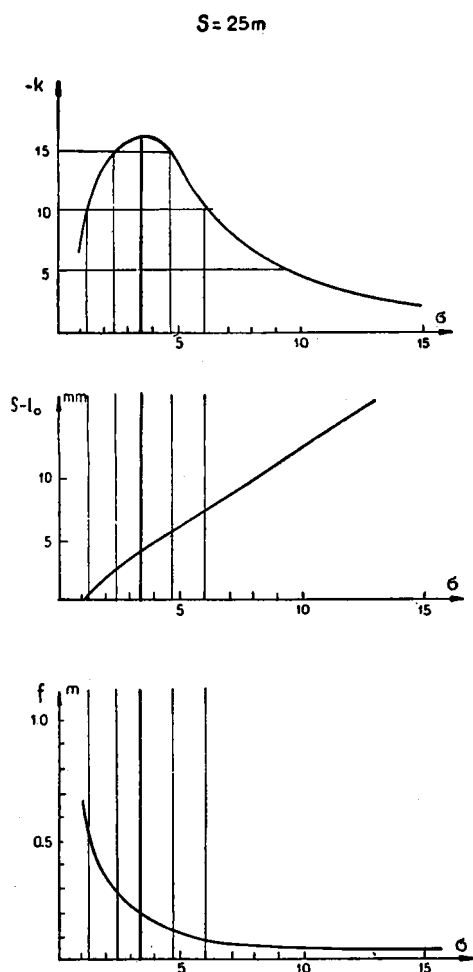
Niżej zamieszczona jest przykładowo obliczona tablica wartości potrzebnych do oceny warunków początkowych, zakresu pomiarowego oraz dla dokonywania obliczeń zmian długości odcinka o długości $s = 25$ m.

σ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	$\frac{\text{kG}}{\text{mm}^2}$
f	0,62	0,31	0,21	0,16	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,04	m
$s-l_0$	-0,41	2,08	3,56	4,87	6,18	7,46	8,72	9,97	11,23	12,48	18,74	mm
K	7	14	16	16	14	10	8	7	6	5	2	

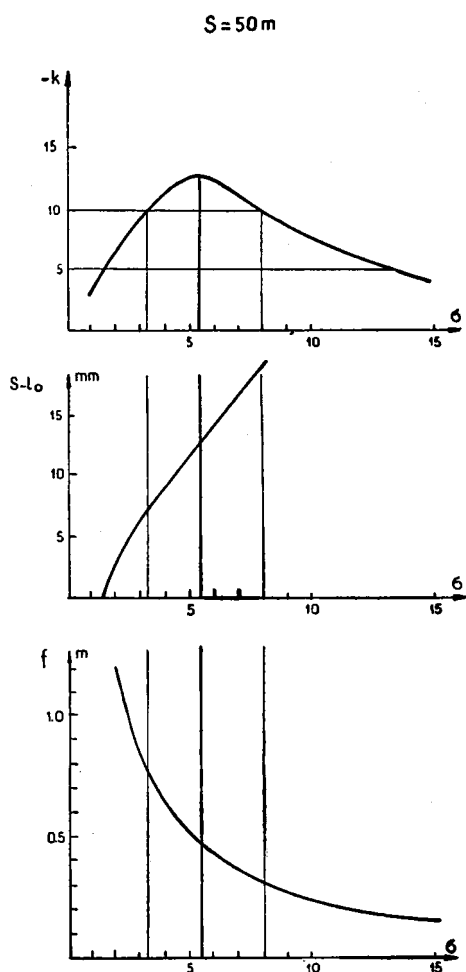
Tablica ta posłużyła do sporządzenia wykresu (rys. 31) ilustrującego interesujące nas zależności.

Jak już stwierdziliśmy uprzednio — praktyczne korzystanie z rozpatrywanego sposobu jest celowe w przypadkach możliwości osiągnięcia dużych wartości współczynnika K . Również ułatwieniem w obliczeniach jest możliwość korzystania ze sposobu w obszarze zakresu pomiarowego, odpowiadającym wolno zmieniającym się wartościom K . Wykres wartości K w funkcji zmiany naprężenia drutu informuje nas, że najbardziej właściwe jest korzystanie z omawianego sposobu przy początkowym takim zawieszeniu drutu, przy którym K osiąga wartość maksymalną (w konkretnym przypadku przy $\sigma = 3,4$). Wówczas dwukierunkowe zmiany długości s w niewielkich granicach (por. wykres wartości $s - l_0$) powodują niewielkie zmiany K . Gdyby np. założyć, że współczynnik K nie powinien osiągać wielkości mniejszych aniżeli $K = 15$ to zachodzi możliwość pomiaru zmian długości w zakresie $\pm \frac{a_{15}}{2} = \pm 1,5$ mm. Dopuszczając wartości $K = 10$ osiągamy możliwość zwiększenia zakresu pomiaru zmian w stosunku do stanu wyjściowego do $\pm \frac{a_{10}}{2} = \pm 3,50$ mm.

Ponieważ podczas instalowania urządzenia nie posiadamy możliwości pomiaru naprężenia drutu, możemy posługiwać się jedynie war-



Rys. 31



Rys. 32

tościami strzałek zwisu. W powyższym przypadku, dla osiągnięcia przy stanie wyjściowym maksymalnej wartości K korzystamy z podanej na wykresie f wartości $f_{wyjśc.} = 0,19\text{ m}$. Instalowanie drutu wymaga dokonania niwelacji umożliwiającej wytyczenie właściwej, początkowej wartości zwisu.

W oparciu o podobną tablicę wartości: σ , f , $s - l_0$, K sporządzony został wykres tych wartości dla $s = 50\text{ m}$ (rys. 32).

Wykres ten wskazuje, że przy długości badanego odcinka $s = 50\text{ m}$ wyjściowa wielkość strzałki zwisu $f_{wyjśc.}$ winna osiągnąć $0,45\text{ m}$ aby

minimalnym wielkościom $K = 10$ towarzyszyły jednakowe zmiany odległości o wielkościach $\pm \frac{a_{10}}{2} = \pm 6,2$ mm. Wówczas początkowa wartość naprężenia wynosi $\sigma = 5,6 \frac{\text{kG}}{\text{mm}^2}$

Zauważmy, że w przypadku gdyby nastąpiła duża zmiana odległości wzajemnej punktów ze zwrotami nazewnątrż — mogłoby nastąpić zbytne naprężenie drutu, powodujące trwałe zmiany jego długości i dyskwalifikujące wartość wyników pomiarów wykonywanych po powrocie punktów utwierdzenia drutu do położen zbliżonych do uprzednio zajmowanych. Ocenia się, że graniczne naprężenie, któremu towarzyszy sprężysta zmiana długości drutu wynosi około $\frac{1}{3}$ naprężenia σ_k , przy którym następuje rozerwanie drutu. Jednak w pobliżu granicy stosowności prawa Hooke'a już mogą nastąpić pewne trwałe zmiany długości drutu wobec czego jako dopuszczalną dla aparatury pomiarowej wartość naprężenia przyjmiemy $\frac{1}{10} \sigma_k$. Przy przeciętnie występującej wytrzymałości drutów stalowych na rozerwanie oznacza to nieprzekraczalność $\sigma = 15 \frac{\text{kG}}{\text{mm}^2}$. Oznacza to, że dopuszczalna zmiana długości $s = 25$ m ze znakiem plus nie może przekroczyć $+ 15$ mm, zaś w przypadku $s = 50$ m — $ds_{\text{maks.}} = + 23$ mm. Odpowiednie zmiany ds na granicy plastyczności drutu osiagają tu 58 i 111 mm.

Korzystając z wykresu (rys. 31) wykonajmy przykład obliczenia zmiany długości ds przy $f_{\text{wyjśc.}} = 0,19$ m, $f_1 = 0,10$ m, $ds = 7,50 - 4,00 = 3,50$ mm.

Gdybyśmy w miejsce wzoru (21) użyli tu wzór (20) otrzymalibyśmy błędną wartość $ds = \frac{-0,09}{16} = 5,6$ mm.

Dla praktycznego zbadania możliwości posługiwania się omówionym sposobem przeprowadzono próby przy wykorzystaniu zainstalowanego w komparatorni GUM urządzenia odtwarzającego zmiany długości. W tym celu imitowano przesunięcia uchwytów drutu przez dociążanie ponad obciążenie nominalne. Jednocześnie z dociążeniami o znane wielkości dH prowadzono odczyty położenia wskaźnika na drucie pozwalające na wyznaczenie w sposób bezpośredni wielkości ds , oraz odczyty określające aktualne wartości strzałki zwisu drutu. Pomiar strzałek zwisu dla wyznaczania wielkości df prowadzony był odmiennie aniżeli w badaniach opisanych w [32]. Mianowicie stwierdzono, że bardziej właściwe jest tu wyznaczanie strzałki w sposób bezstykowy — bez poruszania drutu. W tym celu przytwierdzono do ściany w pobliżu drutu, w położeniu pionowym podziałkę milimetrową naciętą na lustrzanej płaskiej

powierzchni. Pomiar wysokości drutu względem zamocowanej podziałki polegał na odczytaniu wysokości drutu na podziałce przy ustawieniu oka, odpowiadającym pozornemu pokryciu się obrazu drutu i jego odbicia w zwierciadle utworzonym przez powierzchnię podziałki.

Przy próbie dotyczącej drutu stalowego obciążonego początkowo siłą $H = 4$ kG otrzymano następujące rezultaty:

df	0	0,5	1,0	3,3	6,5	13,5	20,3	23,5	0	mm
ds	-0,04	0,09	0,15	0,39	0,71	1,30	1,81	2,22	0,04	mm
dH	0,5	1,0	2,0	5,0	10,0	20,0	30,0	35,0	0	dkG

W rezultacie obliczenia otrzymano następujące wart. ds

$\frac{df}{K}$	0,00	0,05	0,10	0,32	0,64	1,30	1,95	2,25	0,00	mm
----------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	----

wykazujące dużą zgodność z wartościami pomierzonymi w sposób bezpośredni.

Przy podobnej próbie dotyczącej drutu stalowego obciążonego początkowo siłą $H = 2$ kG otrzymano rezultaty:

df	1,3	2,5	5,2	13,0	28,0	54,5	79,0	0,5	mm
ds	0,15	0,26	0,45	1,16	2,27	4,25	6,30	0,03	mm
dH	0,5	1,0	2,0	5,0	10,0	20,0	30,0	0,0	dkG

W rezultacie obliczenia otrzymano następujące wart. ds .

$\frac{df}{K}$	0,12	0,20	0,42	1,06	2,28	4,43	6,42	0,04	mm
----------------	------	------	------	------	------	------	------	------	----

W obszarze wprowadzonych sztucznie zmian położenia końca drutu zachodziły zmiany stosunku $\frac{df}{ds}$ wyrażające się dla pierwszego doświadczenia zmiennością K od początkowej wartości 10,4 do 9,2 i odpowiednio dla drugiego doświadczenia wartość K na początku wynosiła 12,3 zaś przy maksymalnym dociążeniu zwiększyła się do 12,8. Do obliczenia wielkości zmian ds użyto wyjściowe wielkości K .

Dodajmy, że dla prawidłowego obliczenia wartości K potrzebne są informacje dotyczące również wytrzymałości drutu, to jest wartości modułu sprężystości E . W przypadku, gdy nie mamy dużego zaufania do liczbowo określonej wartości E , należy zachować ostrożność przy

analizowaniu wyników pomiaru zawierających się w obszarze, odpowiadającym zwiększonemu wpływowi E na wyznaczoną z obliczenia wielkość K . Dotyczy to przypadków, gdy nastąpiło rozsuniecie się punktów utwierdzenia końców drutu od stanu wyjściowego to jest przy d_s dodatnich.

Reasumując wyniki powyższych dociekań i prób można stwierdzić, że zastosowanie analizowanego sposobu określenia zmian długości może być w praktyce korzystne z uwagi na daleko idące uproszczenie konstrukcyjne urządzeń odtwarzających i pomiarowych. Jednocześnie jednak trzeba podkreślić pewne skomplikowanie czynności obliczeniowych wymagające dużej uwagi oraz konieczność dokonywania okresowej niwelacji uchwytów drutu i uchwytu przytwierdzającego do muru budowli urządzenie pomiarowe. Brak informacji o ewentualnych wzajemnych zmianach wysokości tych części urządzenia wskutek osiadania fragmentów budowli mogłoby spowodować osiąganie błędnych wyników (zmiana wysokości podziałki zmieniałaby pozornie wielkość strzałki zwisu drutu określanej na podstawie wykonanych na podziałce odczytów wysokości drutu).

IX. Wnioski

Reasumując wyniki opisanych badań można wysnuć następujące wnioski:

1. Zaprojektowane i opisane w niniejszej pracy urządzenia odtwarzające zmiany strzałek i długości boków poligonowych oraz urządzenia pomiarowe wykazały w okresie jednego roku pracy pełną sprawność.

2. Możliwe do uzyskania dokładności wyznaczania zmian strzałek charakteryzują się realnie błędami średnimi rzędu 0,03 mm przy długościach boków poligonowych rzędu 45 m. Dokładność ta jest około 3-krotnie większa od możliwej do osiągnięcia dokładności wyznaczania zmian strzałek za pośrednictwem pomiaru teodolitem kątów poligonowych. Można spodziewać się, że w przypadku wydłużenia boków poligonowych do około 100—150 m przy odpowiednim zabezpieczeniu rozwieszonych drutów przed podmuchami wiatru, przewaga dokładnościowa wyznaczania strzałek w stosunku do wyznaczania kątów poligonowych teodolitem odpowiednio wzrośnie.

Obecnie osiągnięta szybkość pomiaru strzałek jest co najmniej 3-krotnie wyższa od szybkości pomiaru kątów poligonowych.

3. Możliwe do osiągnięcia dokładności wyznaczania zmian długości charakteryzują się realnie błędami średnimi rzędu 0,1—0,2 mm przy długościach boków poligonowych rzędu 45 m. Stwierdzono, że dokład-

ności odczytowe są znacznie wyższe (podobne jak przy pomiarze strzałek), jednak na realną dokładność wyznaczania zmian długości wpływają błędy określenia temperatury drutu, poprawek ze względu na wydłużenie drutu wraz z upływem czasu oraz zanieczyszczenia drutów powodujące zmiany obciążenia. Te wszystkie błędy zaliczone zostały we wstępie do grupy błędów spowodowanych zmianą stanu przyrządów pomiarowych lub warunków obserwacji w momencie obserwacji aktualnej w stosunku do stanu w momencie obserwacji pierwotnej lub poprzedzającej.

4. Przedstawiona i zbadana przykładowo koncepcja wyznaczania zmian strzałek w ciągach poligonowych (oraz wyznaczania odchyłeń od stałej prostej) nadaje się wprost do realizacji przy wyznaczaniu odkształceń budowli. Przy okazji takich prac należy oczywiście prowadzić dalsze badania dokładnościowe i przeglądy sprawności urządzeń odtwarzających i pomiarowych.

Przedstawiona i zbadana przykładowo koncepcja wyznaczania zmian długości boków w ciągach poligonowych może być wykorzystana przy wyznaczaniu odkształceń budowli. Wprowadzenie jej do produkcji wymaga jednak zastosowania drutów bardziej odpornych na wpływ wilgoci i odznaczających się mniejszymi wartościami współczynników rozszerzalności liniowej przy dobrych właściwościach wytrzymałościowych. Najbardziej właściwe wydaje się zastosowanie do pomiaru zmian długości drutów z inwaru lub super-inwaru.

5. Przedstawione sposoby wyznaczania zmian strzałek i długości w oparciu o opisane urządzenia odtwarzające i pomiarowe umożliwiają doraźną i szybką kontrolę stanu budowli siłami własnymi personelu miejscowego po jego krótkim przeszkoleniu. Stanowi to istotny krok w kierunku zwiększenia operatywności prac pomiarowo-kontrolnych oraz obciążenia wysokckwalifikowanego w pracach pomiarowych personelu geodezyjnego, przez ograniczenie jego udziału do okresowych obserwacji całej osnowy kontrolnej. Sposoby te pozwalają również na powiązanie dużej grupy obserwacji traktowanych dotychczas w sposób względny w jedną całość, umożliwiającą liczbowe wyrażenie bezwzględnych wartości przesunąć wszystkich badanych punktów.

Doświadczenia zdobyte w trakcie trwania prac projektowych, poprzedzających badania eksperymentalne w Rożnowie wskazują, że dla osiągnięcia wspomnianego celu — to jest powiązania możliwie dużej liczby wyznaczeń traktowanych w sposób względny, w jednolitą całość, umożliwiającą wyznaczanie przesunąć bezwzględnych — konieczne jest opracowywanie dla danego obiektu koncepcji i projektu rozmieszczenia i powiązania urządzeń pomiarowo-kontrolnych równolegle z wykonywaniem projektu samej budowli. Występuje wówczas możliwość uzgadnia-

nia wzajemnego obu projektów oraz korygowania ich. Pełna realizacja omawianej koncepcji na obiekcie istniejącym napotyka na trudności natury zarówno konstrukcyjnej jak i organizacyjnej.

6. Stwierdzono, że istnieje możliwość rejestrowania na materiale światłoczułym zmian położenia drutu lub wskaźnika założonego na drut. Wydaje się, że z uwagi na stwierdzone duże szybkości wyznaczania zmian strzałek i długości w oparciu o istniejące urządzenia odtwarzające przy wykorzystaniu obserwacji wizualnej, zakres praktycznego wykorzystania rejestracji ograniczy się do badania ruchów szybkozmiennych, występujących w stosunkowo krótkich okresach czasu (np. przy próbnym obciążeniu budowli oddawanych do eksploatacji). Wydaje się, że rejestratory winny być wykonywane doraźnie dla sprecyzowanych badań (z określeniem czasu badania, częstotliwości wyznaczeń, wymaganej dokładności, przewidywanego zakresu odkształceń itp.).

7. Stwierdzono w oparciu o wykonane próby, że zastosowanie maszyny elektronowej do obliczania przesunięć przyniosło korzyści ekonomiczne, wyrażające się zarówno w niższych kosztach wykonania równoważnych zadań jak i w znacznym przyspieszeniu pracy. Jednocześnie zastosowanie maszyny elektronowej uczyniło realnym wykonanie zadania identyfikacji punktów stałych w sposób dostarczający wszelkie możliwe do uzyskania informacje. Wynika z tego, że niezależnie od przyspieszenia prac obliczeniowych możliwe tu było rozszerzenie ich zakresu do stanu bardziej zadowalającego z punktu widzenia pewności przeprowadzanej analizy.

Stwierdzona szybkość obliczania przesunięć punktów pełnej sieci trygonometrycznej przy wykorzystaniu maszyny cyfrowej UMC-1 okazała się co najmniej 5-krotnie wyższa aniżeli przy rachunku na arytmometrze. Należy podkreślić jednak, że nie jest to w tej chwili równoznaczne z 5-krotnie szybszym przekazaniem wyników obliczeń, co ma związek z trudnościami organizacyjnymi oraz faktem, że ośrodek obliczeniowy otrzymywał w początkowej fazie badań wspomniane zadania w sposób sporadyczny i przeważnie w momentach, gdy maszyna zajęta była wykonaniem większych zadań obliczeniowych. W takiej sytuacji należy do czasu wykonania obliczeń doliczyć czas oczekiwania na zakończenie aktualnie wykonywanej innej pracy obliczeniowej. Należy przypuszczać, że w przyszłości stan ten ulegnie poprawie wraz z rozszerzeniem się możliwości ośrodków obliczeniowych jak też ze wzrostem udziału obliczeń dla celów związanych z wyznaczaniem odkształceń w całokształcie prac tych ośrodków.

8. Powinny być kontynuowane badania eksperymentalne dotyczące sprawności i możliwości dokładnościowych wyznaczania zmian strzałek i długości w oparciu o wykorzystanie urządzeń podobnych do opisanych

w niniejszej pracy. Również winny być kontynuowane badania prototypowych urządzeń zainstalowanych w Rożnowie i w Głównym Urzędzie Miar.

Dalsze badania winny dać pełniejszą ocenę wartości proponowanej tu metody wyznaczania przesunięć przy zróżnicowaniu:

a) warunków otoczenia (również z uwzględnieniem możliwości instalowania urządzeń na zewnętrznych powierzchniach budowli, przy wykorzystaniu specjalnych osłon),

b) długości boków poligonowych,

c) warunków powiązania zewnętrznych i wewnętrznych części osnowy kontrolnej.

9. Powinny być prowadzone badania mające na celu opracowanie sposobów odtworzenia w sposób ciągły i rejestrowania zmian zachodzących w zewnętrznej części osnowy kontrolnej. Wówczas możliwe będzie całkowite zautomatyzowanie wyznaczania bezwzględnych wartości przesunięć i odkształceń budowli.

LITERATURA

- [1] *Czerski Zb.*: Optyka instrumentalna. W-wa 1954 PPWK.
- [2] *Gomoliszewski J.*: Nowy sposób pomiaru długości boków poligonowych za pomocą dalmierza nitkowego. Geodezja i Kartografia.
- [3] *Gaździcki J, Janusz W.*: Próby wykorzystania elektronowej maszyny cyfrowej UMC-1 do rachunkowego opracowania wyników pomiarów odkształceń budowli hydrotechnicznych (Złożono do opublikowania w Inst. Gosp. Wodnej IX. 1962).
- [4] *Gigas E.*: O primienienii inwarynych provołok k bazisnym izmiereniam. Moskwa — Leningrad 1938.
- [5] *Hausbrandt St.*: Rachunki Geodezyjne. W-wa 1953 PPWK.
- [6] *Hausbrandt St.*: Wyrównanie sieci trygonometrycznych z odrzuceniem założenia bezbłędności punktów nawiązania. Geodezja i Kartografia T. III, z. 1/54.
- [7] *Huber M. T.*: Stereomechanika techniczna (wytrzymałość materiałów) W-wa 1954 PZWS.
- [8] *Janusz W.*: Zagadnienie identyfikacji punktów stałych w sieciach kontrolnych dla pomiarów odkształceń. Prace IGiK, T. IX, z. 1(19) W-wa 1962 PPWK.
- [9] *Jasnorzewski J.*: Metrologia długości. W-wa 1959 PPWK.
- [10] *Krasowski F. N.*: Izbrannyje soczinenia. 1955 Geodezizdat.
- [11] *Lazzarini T.*: Geodezyjne pomiary odkształceń (ze szczególnym uwzględnieniem potrzeb kontroli zapór wodnych) W-wa 1952 PPWK.
- [12] *Lazzarini T.*: Wyznaczanie odkształceń metodami geodezyjnymi. Rocznik Geodezyjny. W-wa 1954.
- [13] *Lazzarini T.*: Wykłady Geodezji II. W-wa 1957.
- [14] *Lazzarini T.*: Geodezyjne pomiary odkształceń i ich zastosowanie w budownictwie. W-wa 1961 PPWK.
- [15] *Ponikowski J.*: Geodezja Gospodarcza. T. III Geodezja kolejowa. W-wa 1954 PPWK.

- [16] Senisson W.: Błędy średnie poprzeczne punktów w prostoliniowym i równobocznym obustronnie nawiązanym poligonie w zależności od długości boków nawiązania przy uwzględnieniu błędów średnich współrzędnych nawiązania. *Geodezja i Kartografia* T. VII, z. 2,3 1958 PWN.
- [17] Stanek V.: Geodeticke mereni deformaci prehrady u Slap. *Geodeticky a kartograficky Sbornik* 1957.
- [18] Szpetkowski St.: Centryczne metody orientacji kopalń. Kom. Geod. PAN 1956 PWN.
- [19] Szpetkowski S.: Wpływ sprężystości drutu pionu szybowego na błąd odpionowania. *Przegląd Geodezyjny*. 10/1956.
- [20] Szymoński J.: Instrumentoznawstwo Geodezyjne. W-wa 1954-6.
- [21] Nauczno isledowatielski Institut osnovanii i podziemnych sooruzenii. *Rukowodztwo po geodeziczskim metodam izmierenii gorizontalnych smieszczanii w osnovaniach sooruzenii*.
- [22] Polska Norma — 54 B-02011. Obciążenia wiatrem w obliczeniach statycznych.
- [23] Marcak P.: Uwagi o wydajności pracy przy pomiarach odkształceń. *Przegląd Geodezyjny* 10/1961.
- [24] Gosudarstwiennoje energeticeskoje izdatielstwo. Nastawlenie po nabliudieniam za osadkami i gorizontalnymi smieszczieniami gidrotechnicznych sooruzenii geodeziczskimi metodami. 1958.
- [25] *Geodezja Gospodarcza*. T. IV.
- [26] Janusz W.: Metody badania odkształceń za pomocą wydłużonych konstrukcji geodezyjnych (ze szczególnym uwzględnieniem badania odkształceń tuneli komunikacyjnych). Praca magisterska w maszynopisie.
- [27] Janusz W.: Rozwinięcie metody uszeregowania punktów (alignment). *Prace IGiK*. T. X, z. 2(22) 1963 PPWK.
- [28] Janusz W.: Sposoby obliczania poziomych przemieszczeń punktów sieci kontrolnych w zależności od rodzaju wykonanych obserwacji. *Przegląd Geodezyjny* 2/1964.
- [29] Janusz W.: Zagadnienie jednolitej instrukcji poligonizacji technicznej. *Prace IGiK*, T. IX, z. 1(19).
- [30] Janusz W.: Próby opracowania metody pomiaru odkształceń wydłużonych budowli przy wykorzystaniu ciągów poligonowych i specjalnej aparatury pomiarowej. *Prace IGiK*, T. X, z. 1(21) 1963.
- [31] Marfenko C. E.: Opyt vysokotocznych geodeziczskich rabot pri montaze protonnogo synchrotrona. *Geodezja i Aerofotosjomka*. 1963 wypusk 4.
- [32] Weise H.: Eine Apparatur zur mestechnischen Erfassung horizontaler Bauwerksveränderungen. *Vermessungstechnik*. 3/1963.

Recenzował: Prof. dr Jerzy Gomoliszewski

Rękopis złożono w Redakcji w lutym 1964 r.

ВОЙЦЕХ ЯНУШ

ПРОБЛЕМА АВТОМЕТРИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ДЕФОРМАЦИИ СООРУЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ
ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ В ВИДЕ ПОСТОЯННОЙ
УСТАНОВКИ КОМПЛЕКСА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ
ПРИСПОСОБЛЕНИЙ

Р е з ю м е

Имеется потребность решения ряда проблем связанных с методикой геодезического определения деформации сооружений. Настоящая разработка занимается техническими вопросами вытекающими из потребности разработки таких измерительных методов, которые представляли бы возможность выполнения измерений в произвольные сроки независимые от актуальных атмосферных условий, в местах труднодоступных, рядом с ведением работ с большой скоростью и частотой и при использовании для ведения измерений вспомогательного персонала — не обладающего геодезическими квалификациями.

Выполнение выше упомянутых требований является возможным путем установки приспособлений воспроизводящих непрерывно деформацию сооружения, а также несложных измерительных или регистрирующих приспособлений для определения численных характеристик воссозданных деформаций.

Простым примером приспособления воссоздающего изменения наклонов части сооружения является подвешенный на ней механический отвес (маятник). Примером измерительного приспособления, которое дает возможность численного определения отображенных отвесом изменений наклонов является микроскопдвигающийся на укрепленном кронштейне со шкалой, который служит для наблюдения актуальных положений проволоки отвеса.

По поводу потребности определения „абсолютных” значений деформации сооружения, отнесенных к постоянным пунктам вне зоны

деформации, необходимым является воссоздание и наблюдение изменений результатов целой геодезической основы.

В настоящей разработке описано приспособления воссоздающие непрерывно изменения стрелок и длин полигонометрического хода проложенного внутри исследуемого сооружения (в туннели, галереи водной плотины и т. п.) а также описание проведенных исследований функциональности приспособлений и точностей измерений. Кроме того приводятся способы взаимной увязки ходов проложенных по различным галереям внутри сооружения с использованием отвесов подвешенных в стволах соединяющих галереи или увязки этих ходов к внешней части контрольной основы, которая находится на местности и имеет форму микротриангуляционной сети.

Запроектированы приспособления воссоздающие изменения стрелок и длин в полигонометрических ходах базируются на использовании проволок. Для воссоздания стрелок развешивается тонкие (0,2 — 0,3 мм) стальные проволоки между блочками установленными в местах полигонометрических пунктов, которые являются конечными пунктами хорды L , P треугольников L , C , P образованных очередными пунктами полигонометрического хода. В случае приближенной прямолинейности хода имеется возможность удобного измерения малой высоты h_c треугольника (т. е. горизонтальной проекции расстояния пункта C от проволоки подвешенной между пунктами L , P). Для правильного расположения проволоки в вертикальной плоскости проходящей через пункты поддержки на блочках нужно проволоки натягивать с большой силой. Это вытекает из формулы определяющей стрелку f' бокового прогиба проволоки под влиянием движения воздуха (формула 17.3).

На пример при напряжении проволоки $\sigma = 50 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$, длине $s = 100$ м и скорости ветра $0,1 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$ боковой прогиб достигает значения $f' = 0,01$ мм, которое можно считать пренебрегательным. Для воссоздания измерений длины, развешивается между полигонометрическими пунктами стальные или инварные проволоки немного большей толщины (0,8 — 1,5 мм.). Способ подвески похожий к применяемому в базисных измерениях. Различие заключается в перекладке проволоки через блочок на сопряженной с ним оси имеющей острия устанавливаемые в гнездах подложек укрепленных в стене сооружения. Благодаря такой установке блочка номинальная сила натяжки проволоки гирой прикладывается к проволоке с минимальной относительной ошибкой (ниже 1 : 1 000). На развешенной проволоке вблизи блоч-

ка находится указатель, которого актуальное положение можно наблюдать или регистрировать.

Проволоки воссоздающие изменения длины нужно натачивать с много меньшей силой чем проволоки воссоздающие изменения стрелок.

Для наблюдения актуальных положений проволоки воссоздающей стрелку, указателя на проволоке отмечающей длину или проволоки отвеса (маятника), служит переносное измерительное приспособление, прикрепляемое на каждой наблюдательной станции в соответственном, однозначном положении с помощью придерживающих плиток, укрепленных в исследуемом сооружении. Имеется тоже возможность заменить измерительное приспособление комплектом регистраторов изменений положения проволок или указателей, укрепленных в исследуемом сооружении в соответствующих положениях.

Проделанные опытные исследования показали, что практически имеется возможность измерения изменений стрелок со средней квадратической ошибкой порядка 0,02 — 0,03 мм, а также изменений длины сторон полигонометрического хода со средней квадратической ошибкой порядка 0,1 — 0,2 мм при длине этих сторон порядка 45 м. При примененных конструктивных решениях измерительные работы характеризуются большой простотой и скоростью выполнения (около 3 минуты длится измерение стрелки, 1 минуту — измерение длины).

В настоящей разработке проделано анализ влияний искажающих результаты измерения изменений длины как: загрязнение проволок, их растяжка под влиянием длительной нагрузки и т. п.

В заключительной части разработки излагается краткое описание экспериментальных работ связанных с использованием электронно-вычислительной машины УМС-1 для вычисления составляющих перемещений пунктов контрольной сети, а также применения регистрации линейных изменений положения проволоки.

Разработка является метериалом к вопросу о полной автоматизации определения деформаций сооружения, которая требует запроектирования системы регистрации изменений направлений или углов в микротриангуляционных сетях. Актуальным использованием разработки являются начатые измерительно-контрольные работы нескольких водных преград на подгорье.

WOJCIECH JANUSZ

THE PROBLEM OF AN AUTOMATIC DETERMINATION OF CONSTRUCTION DEFORMATIONS BY MEANS OF A GEODETIC NETWORK MODEL IN THE FORM OF A PERMANENT MEASUREMENT INSTALLATION

Summary

There are many problems connected with geodetic methods of determination of constructions deformations. This paper is concerned with technical problems arising from the need of working out some methods enabling permanent measurements, independent of actual atmospherics, performed in difficult of access places, swift and frequentative methods carried out not qualified, rather assistance staff.

This is possible by installing an equipment reproducing deformations continously and by including simple measurement apparatus intended for numerical determination of reproduced deformations.

A suspended plummet (pendulum) reproducing variations of construction inclination may be assumed as a simple example of the method. A microscope movable along a bar installed with a scale, serving for the observation of actual position of the plum wire, may be considered as a simple example of measurement apparatus enabling numerical determination of deformations reproduced by the plummet.

For determining "absolute" values of deformations, referred to fixed points existing outside of the deformation zone, it is necessary a shifting of a geodetic network as a whole to be reproduced and observed. In this paper there are described equipments reproducing permanently variations of offsets and distances in a traverse installed in a construction (in a tunnel, gallery of a water stop etc.); examinations are described of both functional equipment and measurement precisions. Besides some methods are added about connection between traverses established in various

galleries inside a construction with the use of plummets suspended in shafts joining galleries, or connection of these traverses with the outside part of a controlling network established on the surface in the form of microtriangulation.

Designed equipments reproducing variations of offsets and distances of traverses are based on wires use. To reproduce offsets, thin steel wires (0,2—0,3 mm) are suspended between guide pulleys installed at traverse points considered as chord ends L , P of triangles L , C , P formed by successive traverse points. In the case of a rectilinear traverse, the measurement of the little height h_C of a triangle (i. e. horizontal distance between the point C and the wire stretched between points L and P) may be carried out easily. To locate the wire precisely in the vertical plane of supporting points (guide pulleys), wires should be strained with a rather big force. This is indicated by formula of offset f' produced by air motion (Formula 17.3). For example when tensioning stress is $\sigma = 50$ kG per sq. mm, distance is $s = 100$ m and wind speed is 0,04 m per sec, the buckling is reaching the value of $f' = 0,01$ mm, what may be neglected. To produce distance variations, a bit thicker wires (0,8—1,5 mm) are suspended between traverse points. The way of wires suspension is very similar to that of base measurements. The difference lies only in the axle of guide pulley which is set into a socket of a support fixed in the wall. Thanks such a setting of the guide pulley, nominal tensile force is applied with the minimum relative error (below 1 : 1 000). To the stretched wire nearby guide pulley an indicator is attached; its actual position can be observed or registered.

Wires reproducing variations of distances should be strained with a smaller force than wires reproducing offsets variations. For both kinds of observations (this of actual position of the wire reproducing offset and that of indicator on wire reproducing distance or plummet wire), portable measurement apparatus is used; the apparatus is fixed on each station, in unanimous position by means of plates established in an examined construction. Measurement apparatus may be replaced by a recording set fixed in suitable places of the construction to be examined.

Experimental researches have proved practical possibility of measurement of offset variations with the mean square error of 0,02—0,03 mm, that of distance variations with the mean square error of 0,1—0,2 mm, distances being about 45 m. Structural solutions enable that measurements are very simple and quick (ca. 3 minutes for an offset measurement and ca. 1 minute for a distance measurement).

In this work some effects were checked in practice influencing on measurement results; these are: wire contamination, wire permanent strain according a long-time load etc.

In the final part of this paper the short description is given both of experimental works connected with the use of electronic machine UMC-1 for computation of displacement components of control network and application of recording of the wire length variations.

This paper is a contribution for the full automation of constructions deformations determination what requires designing of a recording system of directions or angles variations in microtriangulation nets. Initial controlling works of some water stops in submontane region are an actual benefit of this work.

SPIS TREŚCI

WOJCIECH KRZEMIŃSKI, WŁADYSŁAW DĄBROWSKI, ZOFIA MAJDANOWA	
Pomiary Tellurometrem MRA-1 na bazach geodezyjnych w Polsce	3
ZOFIA MAJDANOWA	
Nomogramy do obliczenia wskaźnika refrakcji dla zakresu mikrofalowego	27
ANDRZEJ UHRYNOWSKI	
O rejestracji zmian pola magnetycznego wariografem Gv 3 w warunkach terenowych	36
ALEKSANDRA NOWACKA-WYPYCH	
Przebieg postępowania przy obliczaniu współrzędnych autogrametrycznych punktów sieci aerotriangulacji przestrzennej (xy) metodą St. Dmochowskiego	63
ANTONI HARTMAN	
Negatywowa warstwa rytownicza IGiK	74
MAREK STANIEWSKI	
Kontrola radiowa częstotliwości zegara kwarcowego oraz projekt odbornika tranzystorowego do porównania wzorca lokalnego z emisją wzorcową	92
JERZY SZYMAŃSKI	
Zmiany treści mapy w czasie	115
WOJCIECH JANUSZ	
Zagadnienie automatycznego wyznaczania odkształceń budowli przy pomocy modelu konstrukcji geodezyjnej w postaci stałej instalacji zespołu urządzeń pomiarowych	129

СОДЕРЖАНИЕ

ВОЙЦЕХ КШЕМИНСКИ, ВЛАДЫСЛАВ ДОМБРОВСКИ,
ЗОФЬЯ МАЙДАНОВА

Измерения теллуrometerом MRA-1 на геодезических базисах в Польше 3

ЗОФЬЯ МАЙДАНОВА

Номограммы для вычисления коэффициента преломления воздуха
для волн сантиметрового диапазона 27

АНДЖЕЙ УХРЫНОВСКИ

О регистрировании изменении магнитного поля вариографом Gv 3
в полевых условиях 36

АЛЕКСАНДРА НОВАЦКА-ВЫПЫХ

Ход действий при вычислении координат автограмметрических пунк-
тов сети пространственной фототриангуляции (ху) по методу Ст.
Дмоховского 63

АНТОНИ ХАРТМАН

Негативный гравировальный слой ИГиК 74

МАРЕК СТАНЕВСКИ

Контроль кварцевых часов по радио и проект транзисторного прием-
ника для сравнения местного эталона по образцовой эмиссии . . . 92

ЕЖИ ШИМАНЬСКИ

Изменения содержания карты со временем 115

ВОЙЦЕХ ЯНУШ

Проблема автометрического определения деформации сооружения
с использованием модели геодезической конструкции в виде посто-
янной установки комплекса измерительных приспособлений . . . 129

CONTENS

WOJCIECH KRZEMIŃSKI, WŁADYSŁAW DĄBROWSKI, ZOFIA MAJDANOWA	
Measurements with Tellurometer MRA-1 Geodetic Bases in Poland	3
ZOFIA MAJDANOWA	
Nomograms for Computation of Air Refraction Index for Microwave Range	27
ANDRZEJ UHRYNOWSKI	
About Recording of Variograph Gv 3	36
ALEKSANDRA NOWACKA-WYPYCH	
The procedure of Autogrammetric Coordinates Computation of Space Aerotriangulation Points (xy) by Method of St. Dmochowski	63
ANTONI HARTMAN	
Negative Scribe Coating IGiK	74
MAREK STANIEWSKI	
Radio Control of a Quartz Clock and the Scheme of a Transistor Re- ceiver for Comparison of Local Standard with the Standard Emission	92
JERZY SZYMAŃSKI	
Alterations of Map Contents in Time Elapse	115
WOJCIECH JANUSZ	
The Problem of an Automatic Determination of Construction deforma- tions by means of a Geodetic Network Model in the Form of a Permanent Measurement Installation	129

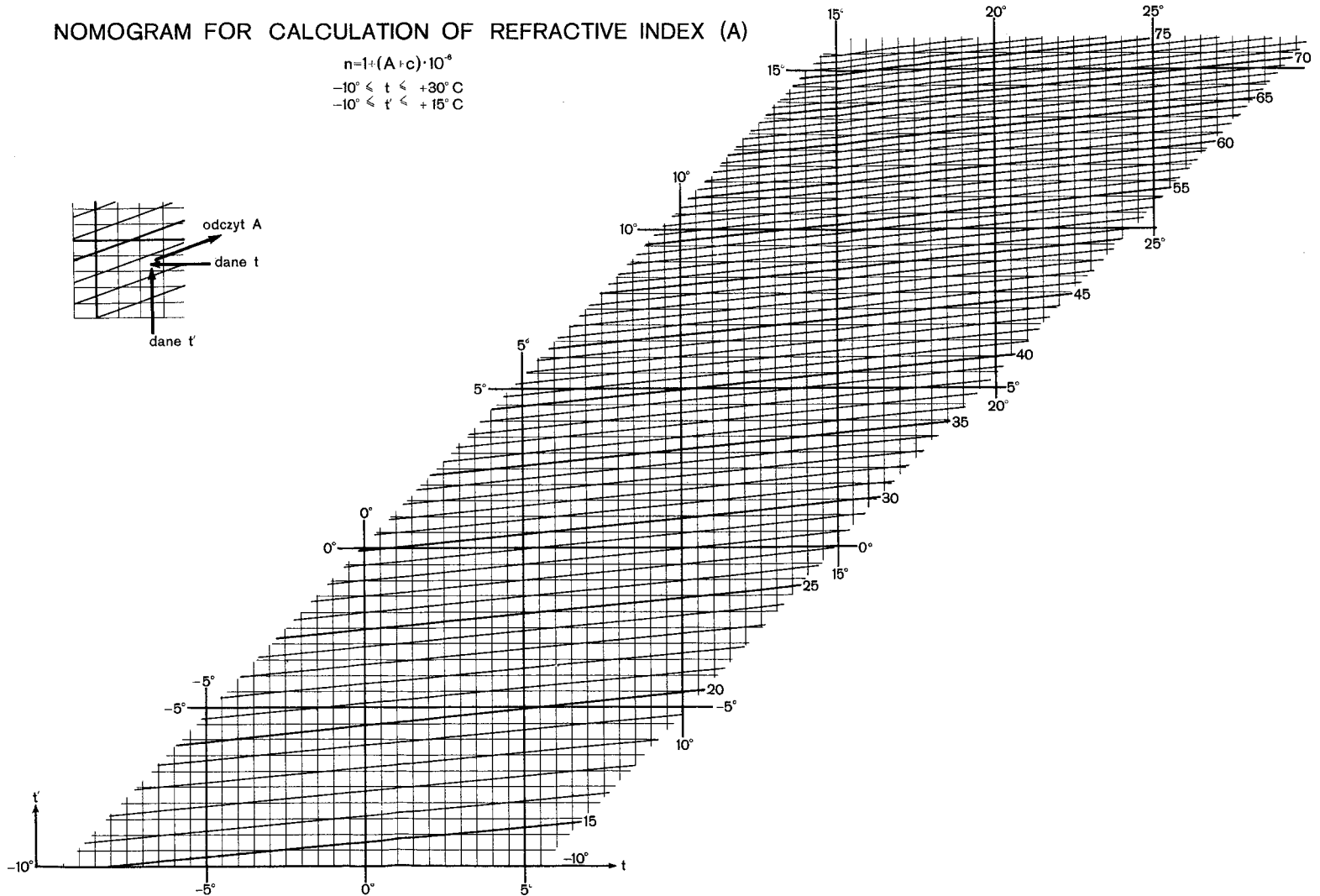
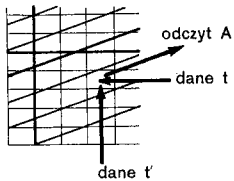
NOMOGRAM DO OBLICZANIA WSPÓŁCZYNNIKA REFRAKCJI (A)

NOMOGRAM FOR CALCULATION OF REFRACTIVE INDEX (A)

$$n = 1 + (A + c) \cdot 10^{-6}$$

$$-10^{\circ} \leq t \leq +30^{\circ} \text{ C}$$

$$-10^{\circ} \leq t' \leq +15^{\circ} \text{ C}$$



INSTYTUT GEODEZJI I KARTOGRAFII

Zofia Majdanowa

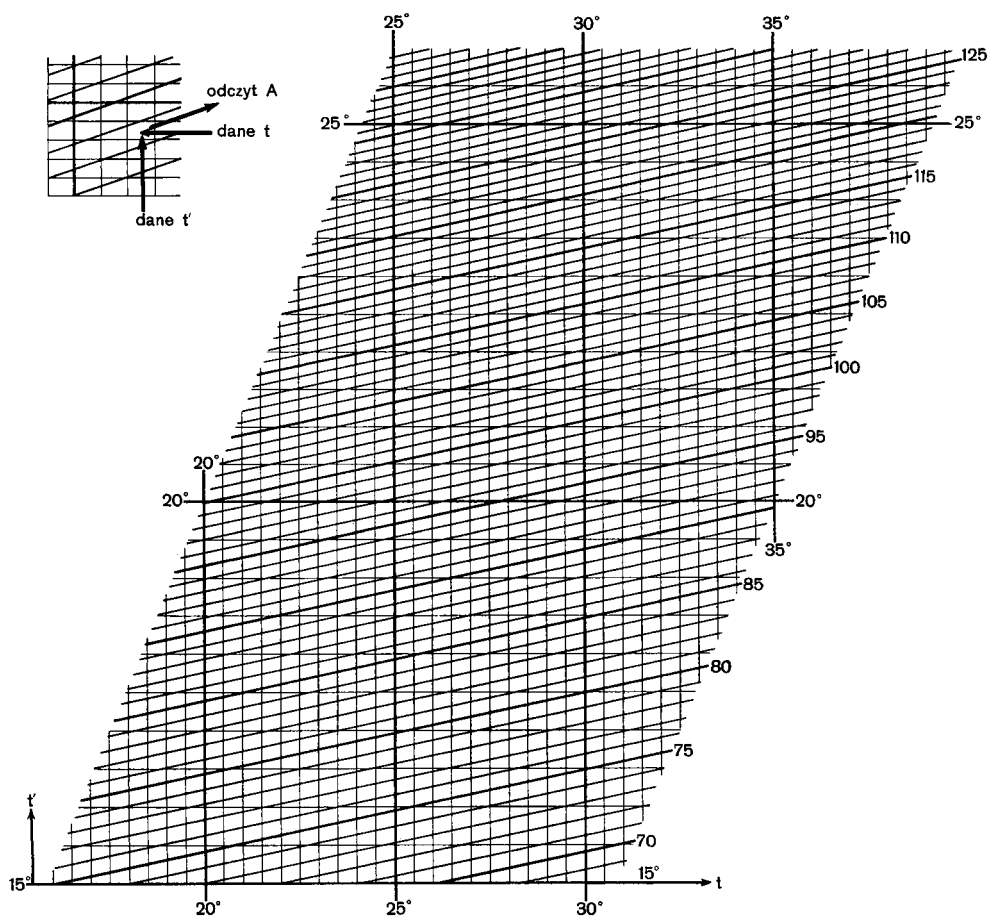
NOMOGRAM DO OBLICZANIA WSPÓŁCZYNNIKA REFRAKCJI (A)

NOMOGRAM FOR CALCULATION OF REFRACTIVE INDEX (A)

$$n = 1 + (A + c) \cdot 10^{-6}$$

$$+15^{\circ} \leq t \leq +40^{\circ} \text{ C}$$

$$+15^{\circ} \leq t' \leq +25^{\circ} \text{ C}$$

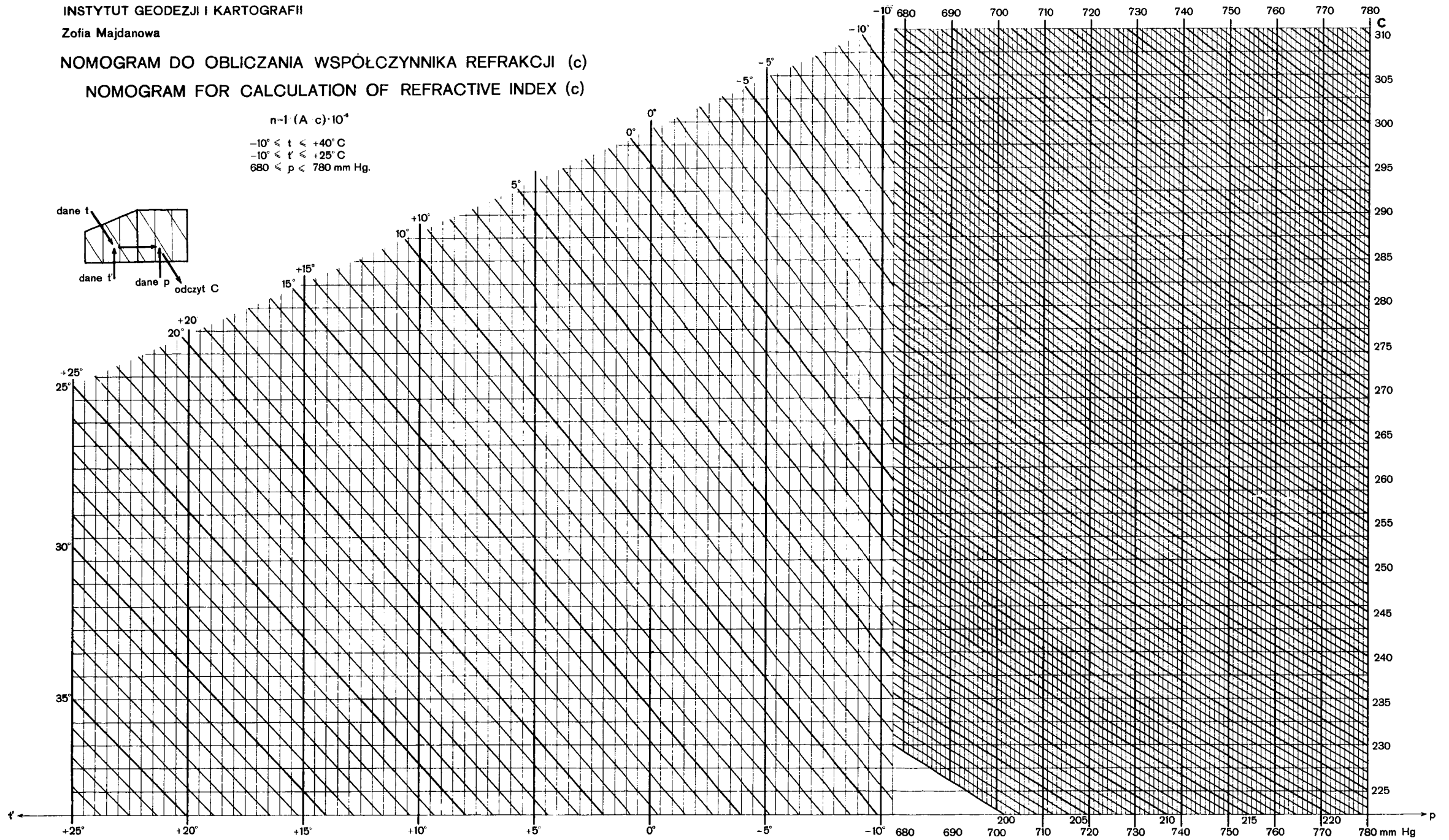
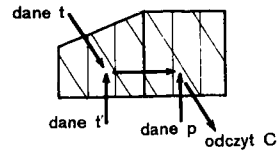


NOMOGRAM DO OBLICZANIA WSPÓŁCZYNNIKA REFRAKCJI (c)

NOMOGRAM FOR CALCULATION OF REFRACTIVE INDEX (c)

$$n-1 (A \cdot c) \cdot 10^6$$

$-10^{\circ} \leq t \leq +40^{\circ} \text{ C}$
 $-10^{\circ} \leq t' \leq +25^{\circ} \text{ C}$
 $680 \leq p \leq 780 \text{ mm Hg.}$



Wzór Nr. 1

Obszar.

Stereogram /0/ Nr 2390-2389 szer.3

Data obliczenia.

Obliczył.

Nr p-tu	Współrz. autogr. zred. do środka ciężkości		Współrz. terenowe		Współrz. terenowe zred. do śr. ciężk.		Współrz. autogrametrycz- ne w układzie terenowym		Sprawdzenie	
	x	y	X_T	Y_T	x_T	y_T	X_A	Y_A	Δ_x	Δ_y
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1/	+ 357,80	+ 555,73	97 408,54	77 854,71	+ 348,50	+ 562,12	97 408,44	77 854,39	+0,10	+0,32
2/	+ 467,00	+ 1358,53					97 504,05	78 659,07		
3/	+ 1200,60	- 232,27	98 264,45	77 080,45	+ 1204,41	- 212,14	98 264,61	77 080,64	-0,16	-0,19
4/	- 1558,40	- 323,47	95 507,13	76 942,60	- 1552,91	- 349,99	95 507,07	76 942,73	+0,06	-0,13
5/	+ 1044,20	+ 1213,53					98 083,73	78 523,83		
6/	- 1884,20	+ 897,53					95 160,59	78 158,25		
	$[0,00]_3$	$[0,0]_3$	97 060,04	77 292,59	$[0,00]_3$	$[0,0]_3$			$[0,00]$	$[0,00]$

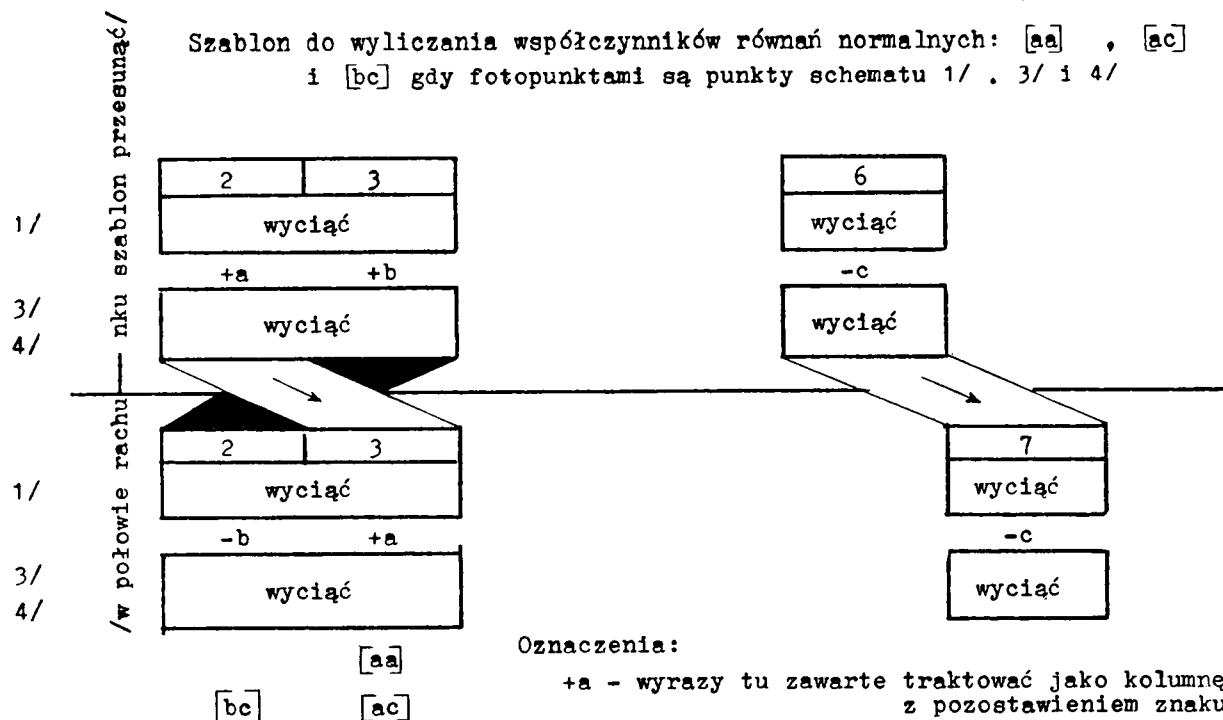
$$\begin{aligned}
 1/ & + 357,80 \cdot k \cos \alpha_0 + 555,73 \cdot k \sin \alpha_0 - 348,50 = 0 & [aa] & = + 4\,465\,489,7867 \\
 3/ & + 1200,60 & & - 232,27 & - 1204,41 = 0 & [ac] & = - 4\,465\,634,8607 & k \cos \alpha_0 & = + 1,00003 \\
 4/ & - 1558,40 & & - 323,47 & + 1552,91 = 0 & [bc] & = + 75\,612,2760 & k \sin \alpha_0 & = - 0,01693 \\
 1/ & + 555,73 & & - 357,80 & - 562,12 = 0 & & & k & = + 1,00017 \\
 3/ & - 232,27 & & - 1200,60 & + 212,14 = 0 & & & \sin \alpha_0 & = - 0,01693 \\
 4/ & - 323,47 & & + 1558,40 & + 349,99 = 0 & & & \alpha_0 & = 398,92
 \end{aligned}$$

Wzór Nr 2

/ tu odciąć /

do wzoru Nr 2

Szablon do wyliczania współczynników równań normalnych: $[aa]$, $[ac]$
i $[bc]$ gdy fotopunktami są punkty schematu 1/ . 3/ i 4/



+1,00003	-0,01693
+k cos α_0	+k sin α_0
$X_T \text{ śr} = 97\,060,04$	

Pasek do wzoru Nr 2

kol.8
 X_A

Załącznik 1

Obszar.
Stereogram /0/ Nr 2390-2389 szer.3

V_X	$6 \cdot 10^4$	$X_T \text{ śr} = 97\,292,59$	$+1,00003$	$-0,01693$
			$+k \cos \alpha_0$	$+k \sin \alpha_0$

Współrzędne autogrametryczne
/przetransformowane i wyrównane /

Obszar Stereogram /1/ Nr 2389-2388 szer.3

Data obliczenia. . . .

Obliczył

$$\begin{aligned} k &= 1,00017 \\ k \cos \alpha_1 &= +1,00003 \\ k \sin \alpha_1 &= -0,01681 \end{aligned}$$

Nr p-tu	Współrz. autogr. zreduk. do środka ciężkości		Współrz. autogrametrycz- ne w układzie terenowym		Sprawdzenie transform.		Poprawki		Współrzędne wyrówn.		Uwagi
	x w metrach	y	x_A	y_A	Δ_x	Δ_y	v_x	v_y	X	Y	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1/	+ 590,0	+ 207,2	97 502,76	78 658,17	+1,29	+0,90					
2/	+ 233,4	+ 1605,8	97 122,53	80 056,82							
3/	+ 1166,4	+ 57,8	98 081,58	78 524,46	+2,15	-0,63					
4/	- 1756,4	- 259,0	95 164,02	78 158,52	-3,43	-0,27					
5/	+ 1102,2	+ 1367,4	97 995,37	79 833,02							
6/	- 1710,4	+ 1036,2	95 188,25	79 454,53							
[0,0] ₃		[0,0] ₃			[+0,01] [0,00]						

śr.c.

Wzór Nr 3

- - - - - / tu odciąć / - - - - -

+1,00003	-0,01681	kol.4 x_A
+k cos α_1	+k sin α_1	
$x_T = 96\ 916,12$		↑

Pasek do wzoru Nr 3

Załącznik 2

Obszar
Stereogram /1/ Nr 2389-2388 szer.3

$y_T = 78\ 447,05$		kol.5 y_A
+0,01681	-k sin α_1	
+1,00003	+k cos α_1	

Współrzędne autogrametryczne
/przetransformowane i wyrównane /

Obszar Stereogram /2/ Nr 2388-2387 szer.3
 $k = 1,00017$

$$k \cos \alpha_2 = +1,00005$$

$$k \sin \alpha_2 = -0,01524$$

Data obliczenia

Obliczył

Nr p-tu	Współrz. autogr. zreduk. do środka ciężkości		Współrz. autogrametryczne w układzie terenowym		Sprawdzenie transform.		Poprawki		Współrzędne wyrówn.		Uwagi
	x'_m	y'_m	x_A	y_A	Δx	Δy	v_x	v_y	X	Y	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1/	+ 358,87	+ 269,73	97 123,50	80 056,67	-0,97	+0,15					
2/	+ 433,27	+ 1683,13	97 176,36	81 471,28							
3/	+ 1227,47	+ 32,53	97 995,76	79 832,70	-0,39	+0,32					
4/	- 1586,33	- 302,27	95 186,92	79 455,00	+1,33	-0,47					
5/	+ 1152,07	+ 1774,13	97 893,81	81 573,24							
6/	- 1311,33	+ 1117,93	95 440,29	80 879,46							
[+0,01] ₃		[-0,01] ₃		[-0,03]		[0,00]					

śr.c.

Wzór Nr 3

/ tu odciąć /

+1,00005 +k cos α ₂	-0,01524 +k sin α ₂	kol.4 x _A ↑
x _T = 96 768,72		

Pasek do wzoru Nr 3

Załącznik 3

Obszar

Stereogram /2/ Nr 2388-2387 szer.3

y_A kol.5	$y_T = 79\ 781,46$	
	+1,00005 +k cos α_2	-0,01524 +k sin α_2