

MIECZYSLAW KOWALEWSKI

STEFANIA PACHELSKA

528.48:627.43

## **Geodezyjna kontrola elementów konstrukcji piętrzących jazów. Metody pomiarów, obliczeń oraz analiza wyników**

### **1. Wstęp**

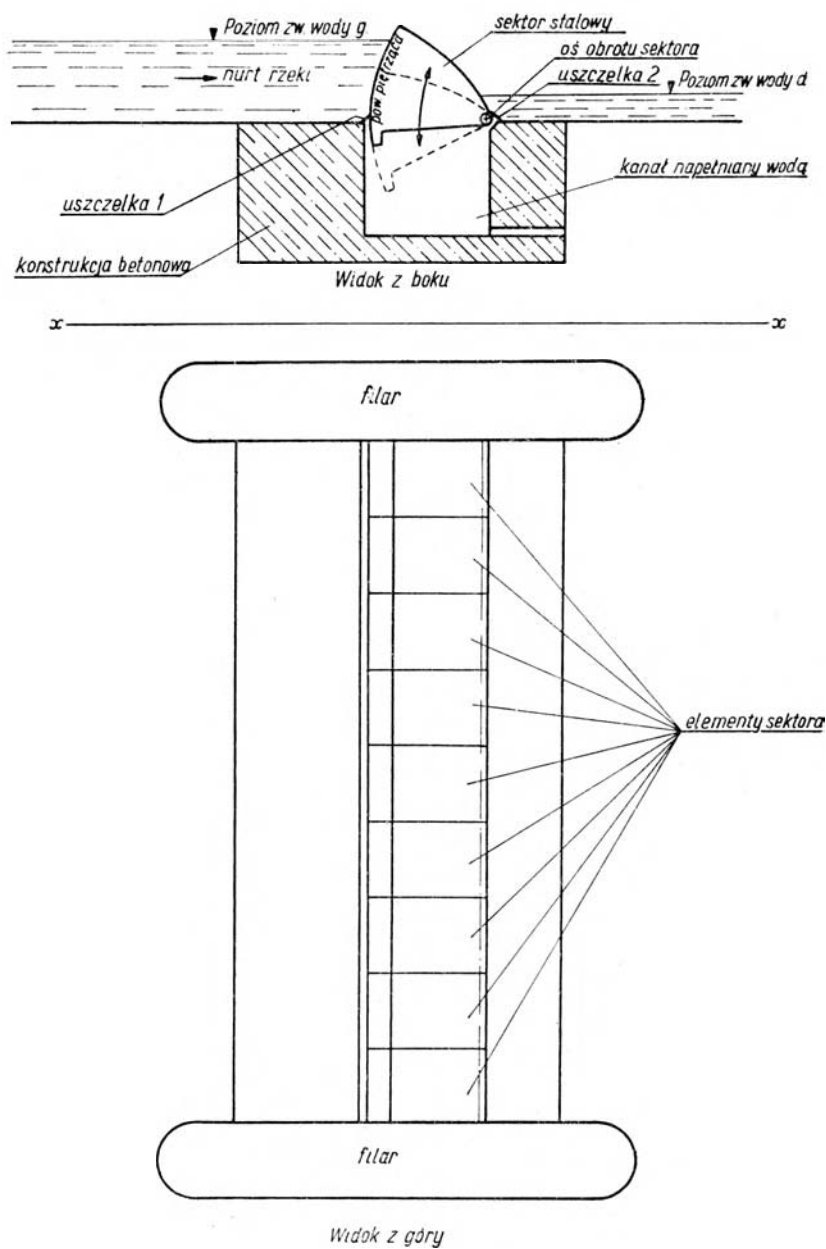
W 1969 r. w Instytucie w Zakładzie Geodezji Gospodarczej opracowano metody pomiarów i obliczeń związanych z kontrolą elementów piętrzących jazów. Elementy piętrzące jazów wykonywane są przez Tczewską Stocznnię Rzeczną dla Czechosłowacji. Kontrakt dotyczy budowy jazów o nowatorskiej konstrukcji pozwalających na zautomatyzowanie regulowania stanów wód na rzece Łabie.

Jaz przegradzający koryto rzeki zbudowany jest w ten sposób, że pomiędzy czterema filarami betonowymi znajdują się płyty betonowe z wmontowanymi konstrukcjami stalowymi tzw. sektorami służącymi do zmiany stanu wody. Zasadę działania jazu ilustruje schematycznie rys. 1.

W poprzek nurtu rzeki wbudowana zostaje w podłoże konstrukcja betonowa. W konstrukcji tej pomiędzy filarami wykonany jest kanał. Przy górnej krawędzi kanału od strony wody dolnej przytwierdzone są do płyty zawiasy, na których obraca się stalowy sektor. Sektor wykonany jest z blachy w ten sposób, że jego powierzchnia piętrząca stanowi wycinek walca (o promieniu 3900 mm lub 3400 mm) o osi znajdującej się na osi obrotu. Gdy poziom wody górnej należy podnieść, obracamy sektor wokół osi ku górze (linia ciągła), kiedy poziom wody górnej chcemy obniżyć, powodujemy obrót sektora do dołu (linia przerywana).

Podnoszenie lub opuszczenie sektora następuje przez napełnienie wodą lub opróżnienie kanału wykonanego pod sektorem. Sektor musi być wykonany tak, żeby woda z rzeki nie przedostawała się bezpośrednio do kanału. W związku z tym przy krawędzi kanału od strony wody górnej przytwierdzona jest do płyty uszczelka gumowa (1), przeciwdziałająca przedostawaniu się wody z koryta rzeki do kanału.

Od strony wody dolnej powierzchnia sektora nazywa się powierzchnią przelewową (ma kształt walca o dużym promieniu — 9300 mm lub 8100 mm) przechodzącą w pobliżu osi obrotu w powierzchnię walcową o małym pro-



Rys. 1

mieniu (160 mm). Powierzchnia o małym promieniu uszczelniona jest za pomocą uszczelki gumowej (2), która jest przytwierdzona do płyty.

Światło jazu między sąsiednimi filarami wynosi około 50 m.

W związku z tym, że sektory są wykonywane w Polsce i transportowane barkami wodą na miejsce montażu, wykonuje się je w częściach zwanych elementami wysyłkowymi o długości rzędu 4,5 m. Na miejscu w Czechosłowacji podczas montażu na jazie elementy spawane są ze sobą wzdłuż krawędzi blach opierających tworząc jednolitą całość tzw. sektor. Jaz składa się z trzech sektorów.

Dla umożliwienia prawidłowego zmontowania sektorów, a co za tym idzie prawidłowego działania jazu, niezbędne jest zachowanie przy produkcji elementów następujących warunków tzw. tolerancji projektowych:

1. Powierzchnia piętrząca elementu powinna mieć kształt wycinka walca o projektowanym promieniu 3900 mm lub 3400 mm liczonym w stosunku do osi obrotu sektora. Dopuszczalne odchyłki promienia wynoszą  $\pm 2$  mm z tym, że na jednym przekroju poprzecznym dopuszcza się odchyłki do  $\pm 3$  mm dla dwóch kontrolowanych punktów.

2. Powierzchnia uszczelniająca elementu w pobliżu osi obrotu powinna mieć promień 160 mm  $\pm 3$  mm.

3. Krawędzie blach opierających w miejscach styków z krawędziami blach sąsiednich elementów powinny być tak obcięte, aby po zesparowaniu elementów osie wszystkich tulei ruchomych części zawias znajdowały się na linii prostej z odchyłkami nie przekraczającymi  $\pm 1$  mm.

Wymagane dokładności są trudne do uzyskania przy obecnie znanej technologii wykonania konstrukcji stalowej przez spawanie. Toteż w trakcie produkcji elementów stalowych oraz ich montażu zastosowano zabiegi polegające na dodatkowej obróbce korekcyjnej i regulacji wyprodukowanych elementów dla doprowadzenia ich do projektowanego kształtu, wymiarów i wzajemnego usytuowania po zmontowaniu. Podstawą do obróbki korekcyjnej i regulacji stały się wyniki precyzyjnych pomiarów wykonywanych metodami geodezyjnymi.

Zagadnienie wykonania pomiarów takich elementów dla celów korekcyjnych oraz dla montażu sektorów piętrzących miało charakter nowatorski w geodezji. Opracowane więc zostały nowe metody pomiarów i obliczeń w zakresie dotyczącym wyznaczenia odchyłek kształtu i wymiarów poszczególnych elementów konstrukcyjnych oraz pomiarów i wytyczeń związanych z dopasowaniem łączonych elementów w sektor.

Opracowana została metoda wyznaczania odchyłek powierzchni elementu w miejscach określonych przez narożniki siatki prostokątów pokazanej na rysunku 4. Usuwanie odchyłek powierzchni polega na odpowiednim jej wyklepywaniu na gorąco. Wyklepywanie powierzchni elementu jest trudne, a w miejscach usztywnień na tak zwanych ramach (każdy element

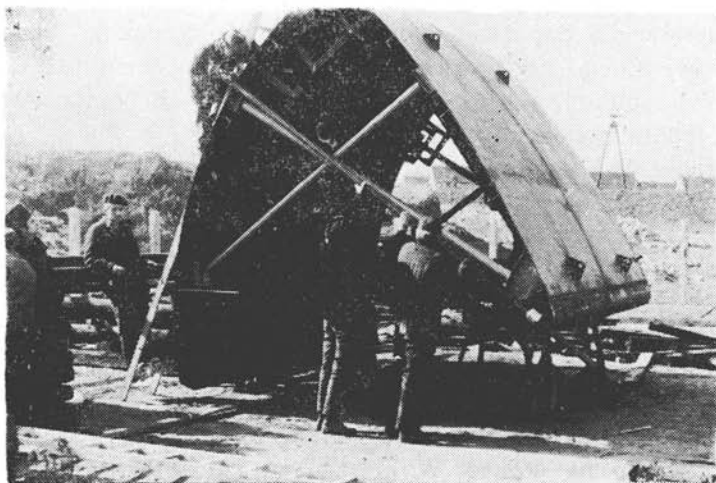
ma ich dwie lub trzy) w ogóle nieskuteczne. Metoda usuwania odchyłek polegała więc na odpowiednim przesuwaniu tulei określających położenie osi elementu. Pomierzone odchyłki zostały wykorzystane do obliczenia wielkości, o jakie należy przesunąć tuleje, aby zmniejszyć do minimum odchyłki powierzchni na ramach. W rezultacie dokonania korekty położenia osi ulegają zmniejszeniu odchyłki powierzchni, które należy usunąć drogą wyklepywania. Praktyka potwierdziła powyższe postępowanie bowiem powierzchnie wielu elementów miały tak duże odchyłki, że nie można by było skorygować je wyłącznie przez wyklepywanie.

Po dokonaniu korekt powierzchni i osi elementów przystąpiono do prac związanych z dopasowaniem elementów (stykowaniem). Dla wykonania tych prac niezbędne jest ustawianie elementów sektora współosiowo — osie poszczególnych elementów mają znaleźć się na linii prostej (osi sektora) z błędem średnim nie przekraczającym  $\pm 0,3$  mm. Zastosowane tu zostały również nowe metody tyczenia z uwagi na bardzo trudne warunki i duży ruch na placu montażowym.

## **2. Ogólna koncepcja pomiarów i obliczeń odchyłek promieni powierzchni elementów**

### **2.1. Opis konstrukcji elementu wysyłkowego i rozmieszczenia punktów kontrolowanych**

Każdy element konstrukcji piętrzącej jazu jest zbudowany w ten sposób, że do odpowiednio skonstruowanych dwóch ram (w 1970 r. trzech ram) stalowych i innych usztywnień jest przyspawana stalowa blacha opierza-



Rys. 2

jąca o grubości 10 mm. Ogólny widok elementu jest pokazany na rysunku 2. Długość takiego elementu wynosi około 4,5 m. Każdy z elementów zaopatrzonej jest w dwie pary uszu wykonanych z blachy stalowej i przyspawanych do elementu w  $1/4$  i  $3/4$  jego długości. W otwory uszu zakłada się i mocuje tuleje zawias, w te ostatnie zaś, na miejscu montażu sektora w jazie, wmontowane zostają tuleje łożyskowe spełniające rolę ruchomych części zawias.

Tak więc każdy element dzieli się na:

1. Część konstrukcyjną, na którą składają się zespawane trwale ramy i inne usztywnienia oraz blacha opierająca i blachy uszu z otworami dla tulei zawiasów.

2. Część mechaniczną w postaci tulei zawiasów i tulei łożyskowych.

Część mechaniczna zostaje wmontowana w konstrukcję elementu w trakcie montażu sektora w jazie.

Blacha opierająca element składa się z trzech części mających różną krzywiznę. Każda z tych części stanowi wycinek walca kołowego o innym promieniu. Rozróżnia się więc powierzchnię piętrzącą (o promieniu 3400 lub 3900 mm w zależności od typu jazu); powierzchnię przelewową (o promieniu 9300 lub 8100 mm) oraz powierzchnię uszczelniającą od strony wody dolnej (o promieniu 160 mm), będącą przedłużeniem powierzchni przelewowej. Wielkości promieni powierzchni piętrzącej i uszczelniającej liczone są w stosunku do prostej przechodzącej przez osie tulei ruchomych części zawias.

Dla prawidłowego montażu i pracy sektora na jazie konieczne jest aby wyprodukowane elementy odpowiadały następującym warunkom:

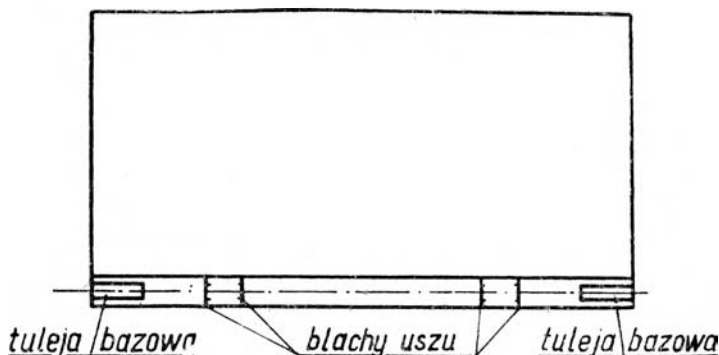
- 1) wielkość promienia krzywizny blachy opierającej powinna być w dowolnym punkcie powierzchni zbliżona do wielkości projektowanej i nie przekraczać dopuszczalnych odchyłek projektowych podanych we wstępie niniejszego opracowania;

- 2) Krawędzie blach opierających w miejscach styków z krawędziami blach sąsiednich elementów powinny być tak obcięte, aby po zespawaniu elementów osie wszystkich tulei ruchomych części zawias znajdowały się w jednej linii prostej.

Blachy opierające element tworzą powierzchnie zbliżone do projektowych. Sprawdzenie, czy odchyłki promieni powierzchni wykonanego elementu nie przekraczają wielkości dopuszczalnych, wymaga uprzedniego określenia w każdym elemencie położenia prostej przechodzącej przez osie tulei ruchomych części zawias. Ponieważ tuleje te zostają wmontowane dopiero w trakcie montażu sektora, zachodzi potrzeba zainstalowania w każdym elemencie przy jego skrajach dwu dodatkowych tulei zwanych tulejami bazowymi. Tuleje bazowe zostają przytwierdzone do konstrukcji elementu w ten sposób, aby prosta przechodząca przez ich osie przechodziła

przez środki otworów w blachach uszu, przeznaczonych do wmontowania tulei ruchomych części zawias. Tuleje te pozostają aż do chwili zakończenia osiowania elementów w trakcie montażu sektora w jazie. Błąd osiowania tulei bazowych w otworach uszu nie przekracza  $\pm 0,2$  mm. Rozmieszczenie tulei bazowych i uszu w elemencie ilustruje rysunek 3.

Geodezyjne pomiary dotyczą kontroli powierzchni piętrzącej i uszczelniającej.



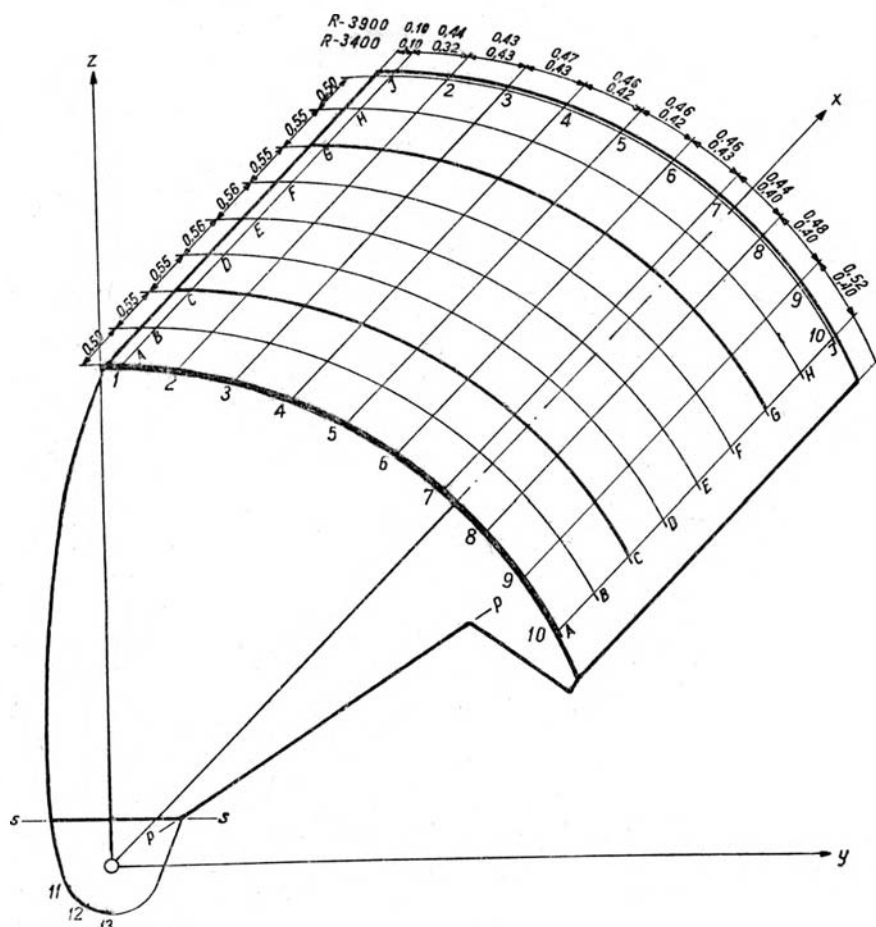
Rys. 3

Kontrola geodezyjna powierzchni piętrzącej i uszczelniającej polega na zbadaniu, czy odchyłki tych powierzchni zawierają się w granicach odchyłek dopuszczalnych. W tym celu zachodzi potrzeba wyznaczenia odległości wielu punktów na tych powierzchniach od osi elementu zadanej przez osie tulei bazowych. Odległości te utożsamimy z promieniami powierzchni i porównamy je z wielkością projektową.

Na rysunku 4 przedstawiono rozmieszczenie kontrolowanych punktów usytuowanych na przecięciach linii przekrojów elementu. Zgodnie z tym rysunkiem na powierzchni piętrzącej kontroluje się punkty znajdujące się na przecięciach dziesięciu przekrojów oznaczonych od 1 do 10 przechodzącymi przez oś elementu z dziewięcioma przekrojami poprzecznymi (kołowymi) oznaczonymi literami od A do I; natomiast na powierzchni uszczelniającej ( $R = 160$  mm) kontroluje się punkty znajdujące się na przecięciach trzech przekrojów oznaczonych na rysunku od 11 do 13, przechodzącymi przez oś elementu z wymienionymi dziewięcioma przekrojami poprzecznymi oznaczonymi literami od A do I.

Rozmieszczenie punktów na powierzchniach podlegających geodezyjnej kontroli nie jest dowolne, lecz uwarunkowane tym, aby przekroje poprzeczne (np. C i G dla elementów środkowych) pokrywały się z ramami, ponieważ powierzchni na ramach nie da się poprawić, a pozostałe przekroje tworzyły regularną siatkę, co ułatwia późniejsze opracowania.

Odchyłki promieni powierzchni kontrolowanych mogą być spowodowane:



Rys. 4

- 1) niewłaściwym kształtem i wzajemnym rozmieszczeniem tych powierzchni;
- 2) niewłaściwym usytuowaniem tulei bazowych względem tych powierzchni.

Usunięcie nadmiernych odchyłek (nie mieszczących się w granicach tolerancji projektowych) można dokonać na drodze:

- 1) doprowadzenia kształtu blachy opierającej do kształtu właściwego przez wyklepanie lub zastosowanie innej techniki;
- 2) odpowiedniego przesunięcia tulei bazowych (za pomocą odpowiednich śrub nagwintowanych i zakontrowanych) wyznaczających oś elementu.

Specyficzną cechą konstrukcji elementu jest usztywnienie powierzchni opierających w przekrojach poprzecznych, w których blachy przyspawane są do ram. Ramy takie znajdują się w większości elementów w przekrojach

C i G (jedynie w skrajnych elementach sektorów są dodatkowe ramy w innych przekrojach). W praktyce przy usuwaniu odchyłek promieni powierzchni nie istnieją możliwości zmiany kształtu powierzchni blach opierających w przekrojach zawierających ramy usztywniające. Dlatego odchyłki promieni powierzchni zmierzone w stosunku do prostej przechodzącej przez osie tulei bazowych należy przeliczyć tak, aby drogą przesunięcia tych tulei o odpowiednie wielkości można było uzyskać zmniejszenie do minimum odchyłek powierzchni w przekrojach zawierających ramy. W rezultacie oblicza się też odchyłki w pozostałych miejscach powierzchni odpowiadające nowemu, zmienionemu położeniu tulei bazowych. Poprawienie powierzchni w miejscach poza ramami polega na usuwaniu nadmiernych odchyłek po korekcie osi elementu.

Biorąc pod uwagę powyższe, określimy kolejność wykonania czynności dla zmniejszenia odchyłek promienia powierzchni:

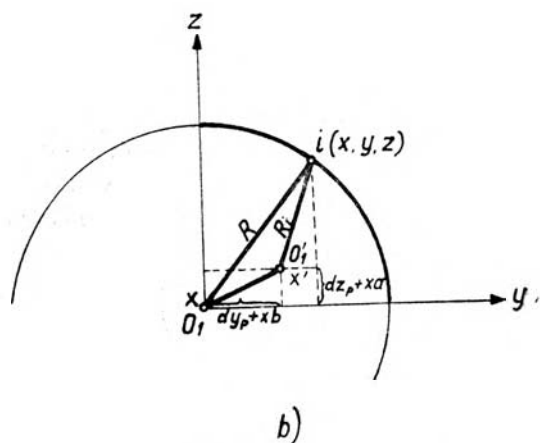
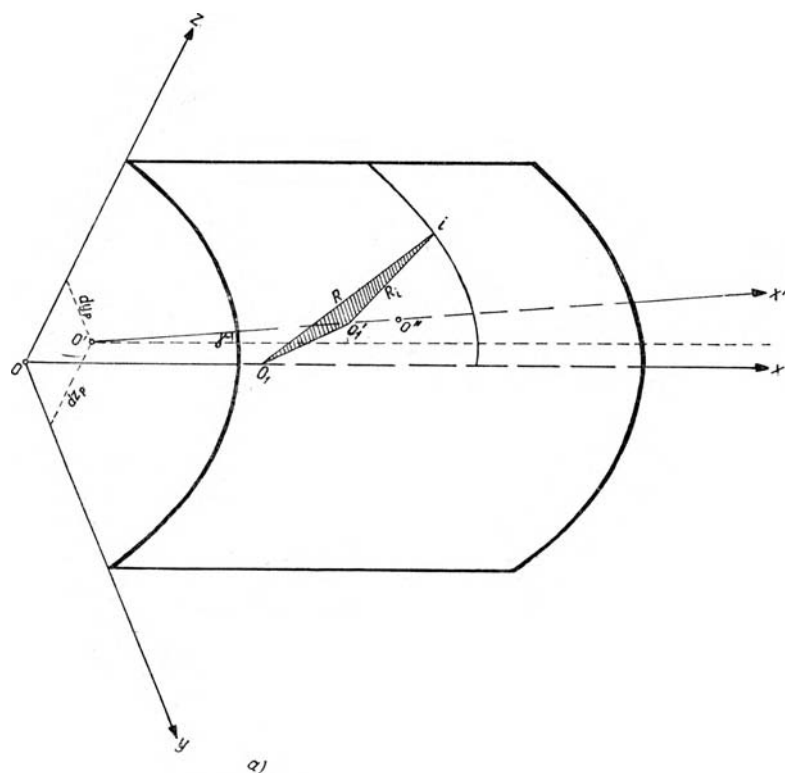
- 1) pomiar odchyłek powierzchni w stosunku do prostej zadanej przez tuleje bazowe;
- 2) obliczenie wielkości korekt położenia tulei bazowych i odchyłek powierzchni odpowiadających nowym, skorygowanym położeniom tulei;
- 3) przesunięcie tulei bazowych o obliczone wielkości i usunięcie nadmiernych spośród wtórnych odchyłek promieni powierzchni przez zastosowanie odpowiedniej techniki — podgrzewanie, wyklepywanie.

## 2.2. Wyprowadzenie wzorów dla obliczenia korekt osi elementu i obliczenia wielkości odchyłek promieni po skorygowaniu położenia osi

Po wykonaniu pomiarów i określeniu wielkości promieni krzywizn w punktach kontrolowanych może się okazać, że odchyłki tych promieni (odchyłką promienia nazywamy różnicę między promieniem istniejącym a projektowanym) przekraczają wartości dopuszczalne. Częściowe zmniejszenie odchyłek promieni można uzyskać przez zmianę położenia osi elementu zadanej przez tuleje bazowe. W tym celu trzeba obliczyć poprawki o jakie należy przesunąć tuleje bazowe. Poprawki te określimy z odpowiednich wzorów. Aby wyprowadzić wspomniane wzory rozpatrzmy rysunki 5a i 5b.

Dla jednoznacznego określenia położenia elementu obieramy przestrzeny prostokątny układ współrzędnych  $Oxyz$  (rysunek 4 i 5). Oś  $x$  pokrywa się z prostą przechodzącą przez środki krzywizn projektowych powierzchni piętrzącej i uszczelniającej. Oś  $y$  obrano prostopadłe do osi  $x$  i równoległe do płaszczyzny ( $ss$ ) konstrukcji elementu, zaś za oś  $z$  przyjęto prostą prostopadłą do osi  $x$  i  $y$ . Za początek układu obieramy punkt przebiecia płaszczyzny przekroju  $A$  przez oś  $x$ .

Gdyby element był wykonany bezbłędnie, tzn. zgodnie z projektem, wówczas dowolny punkt  $i$ -ty powierzchni miałby współrzędne  $X_i, Y_i, Z_i$ ,



Rys. 5

a każdy przekrój poprzeczny (prostopadły do osi  $x$ ) od  $A$  do  $I$  byłby wycinkiem koła. Byłoby spełnione więc równanie

$$Z_i^2 + Y_i^2 = R^2,$$

gdzie  $R$  — promień projektowy; co łatwo zauważyć na rysunku 5b. Ale oś  $x'$  elementu zadana przez tuleje bazowe jest przesunięta w stosunku do osi  $x$  na jednym skraju elementu o wielkość składowych  $dz_P$  i  $dy_P$ , a na drugim skraju o wielkość składowych  $dz_K$  i  $dy_K$ .

Punkt  $O'$  leżący na osi  $x'$  w płaszczyźnie  $zOy$  (przekrój  $A$ ) będzie miał współrzędne:

$$\begin{aligned}X_{O'} &= 0, \\Y_{O'} &= dy_P, \\Z_{O'} &= dz_P.\end{aligned}$$

Natomiast punkt  $O''$  leżący na osi  $x'$  lecz w przekroju  $I$  będzie miał współrzędne:

$$\begin{aligned}X_{O''} &= cx_I = X_I, \\Y_{O''} &= dy_P + bx_I = dy_K, \\Z_{O''} &= dz_P + ax_I = dz_K,\end{aligned}$$

gdzie  $c = \cos \gamma$ ,

$$\begin{aligned}b &= \frac{dy_K - dy_P}{D} = \operatorname{tg} \beta = \frac{Y_{O''} - Y_{O'}}{X_{O''} - X_{O'}}; & \beta &= \arctg \frac{Y_{O''} - Y_{O'}}{X_{O''} - X_{O'}}; \\a &= \frac{dz_K - dz_P}{D} = \operatorname{tg} \alpha = \frac{Z_{O''} - Z_{O'}}{X_{O''} - X_{O'}}; & \alpha &= \arctg \frac{Z_{O''} - Z_{O'}}{X_{O''} - X_{O'}};\end{aligned}$$

$D$  — długość elementu.

Kąt  $\gamma$  jest to kąt jaki tworzy oś  $x'$  z osią  $x$ . Ze względu na to, że kąt  $\gamma$  jest mały, możemy przyjąć, iż  $\cos \gamma = 1$ ; stąd też przyjmujemy  $X_{O''} = X_I$ .

W dalszym ciągu naszych rozważań rozpatrzmy zakreskowany na rysunku 5a trójkąt  $O_1O_1'$ , powstały przez przecięcie elementu płaszczyzną równoległą do płaszczyzny  $zO$  i pokazany w tej płaszczyźnie na rysunku 5b. Niech  $i$ -ty punkt powierzchni ma współrzędne  $x, y, z$ , wówczas stosując twierdzenie Pitagorasa otrzymamy:

$$\begin{aligned}\text{I} \quad R^2 &= z^2 + y^2, \\ \text{II} \quad R_i^2 &= (z - dz_P - xa)^2 + (y - dy_P - xb)^2.\end{aligned}$$

Podnosząc do kwadratu wielomiany drugiego równania otrzymujemy:

$$\begin{aligned}R_i^2 &= z^2 + \underline{(dz_P)^2} + \underline{(xa)^2} - 2zdz_P - 2zxa + \underline{2xadz_P} + y^2 + \underline{(dy_P)^2} + \\ &\quad + \underline{(xb)^2} - 2yxb + \underline{2xbd y_P} - 2ydy_P.\end{aligned}$$

W ostatnim równaniu możemy opuścić wielkości małe drugiego rzędu (podkreślone), wtedy po uporządkowaniu otrzymujemy

$$R_i^2 = z^2 + y^2 - 2(zdz_P + ydy_P + zxa + yxb).$$

Następnie odejmując powyższe równanie od równania I mamy

$$R^2 - R_i^2 = 2(zdz_P + ydy_P + zxa + yxb).$$

Równanie to możemy przekształcić następująco:

$$(R + R_i)(R - R_i) = 2(zdz_P + ydy_P + zxa + yxb).$$

Po podzieleniu stronami ostatniego równania przez  $(R + R_i)$  zauważymy, że wynik dzielenia nie ulegnie zmianie, jeżeli przyjmiemy  $R \approx R_i$  czyli  $(R + R_i) \approx 2R$ .

Po skróceniu przez 2 otrzymujemy ostatecznie

$$R - R_i = \frac{z}{R} dz_P + \frac{y}{R} dy_P + \frac{zx}{R} a + \frac{yx}{R} b = \frac{1}{R} (z dz_P + y dy_P + zxa + yxb) \quad (1)$$

gdzie:

- $R$  — promień projektowy przekroju poprzecznego,
- $R_i$  — promień istniejący, stanowiący odległość punktu  $i$ -tego na powierzchni od nie skorygowanej osi elementu zadanej przez tuleje bazowe,
- $x, y, z$  — współrzędne projektowe rozpatrywanego punktu powierzchni w obranym układzie współrzędnych,
- $dz_P, dy_P$  — niewiadome — składowe przesunięcia punktu osi  $x'$  leżącego w początku układu współrzędnych (w przekroju  $A$ ),
- $a, b$  — niewiadome — objaśnione wyżej wzorami.

Biorąc pod uwagę fakt, że różnica  $R - R_i$  jest na ogół wynikiem dwu czynników:

- 1) nieskorygowania osi;
  - 2) nieprawidłowości wykonania projektowanej powierzchni;
- równanie (1) potraktujemy jako podstawę do obliczenia najprawdopodobniejszych wartości  $dz_P, dy_P, a, b$  służących do skorygowania osi. Rozwiązanie układu równań doprowadzi do uzyskania w każdym z nich poprawki wyrównawczej  $v$ . W tej sytuacji równanie poprawki przyjmie postać

$$\frac{z}{R} dz_P + \frac{y}{R} dy_P + \frac{zx}{R} a + \frac{yx}{R} b = R - R_i + v. \quad (2)$$

Równanie (2) jest równaniem poprawki dla dowolnego punktu kontrolowanej powierzchni. Wielkość  $R - R_i$  stanowi wyraz wolny równania, który otrzymujemy w wyniku pomiarów geodezyjnych. Poprawka  $v$  jest tu różnicą między promieniem projektowym powierzchni a promieniem liczonym od skorygowanej osi elementu w płaszczyźnie przekroju poprzecznego na ramie, do punktu kontrolowanego na powierzchni. Dla poprawnie wykonanego elementu poprawki  $v$  powinny być mniejsze od tzw. tolerancji projektowej (2,0 mm dla powierzchni piętrzącej lub 3,0 mm dla powierzchni uszczelniającej).

Współrzędne projektowe  $z$  i  $y$  odczytujemy z projektu elementu wykonanego w skali 1 : 10. Współrzędne  $x$  są zadane przez zaprojektowanie siatki rozmieszczenia punktów kontrolowanych na powierzchni.

Współrzędne  $x$ ,  $y$ ,  $z$  służą do obliczenia współczynników przy niewiadomych  $dz_p$ ,  $dy_p$ ,  $a$ ,  $b$  w równaniu (1). Dla wszystkich punktów badanych (leżących na przecięciu tworzących od 1 do 13 z przekrojami poprzecznymi od A do I) — zgodnie z rysunkiem 4 moglibyśmy zestawić równania poprawek, jednakże ze względu na to, że blacha opierająca element jest przyspawana do ram w przekrojach C i G (a w roku 1970 również w przekrojach I), równania poprawek zestawiamy tylko dla punktów kontrolowanych położonych na ramach. Spowodowane jest to tym, że powierzchnia elementu, w bezpośrednim otoczeniu punktów położonych na ramach, nie da się poprawić przez wyklepanie ani też przez zastosowanie innej techniki, co jest możliwe w innych przekrojach. Aby więc znaleźć najwłaściwsze położenie osi elementu zadanej przez tuleje bazowe, musimy zrealizować zasadę, aby dla punktów kontrolowanych, położonych na ramach, suma poprawek promieni uzyskanych po korekcie osi wynosiła zero ( $\sum v = 0$ ) oraz suma kwadratów tych poprawek wynosiła minimum ( $[vv] = \text{minimum}$ ). Zasadę tę realizujemy łatwo, przechodząc od równań poprawek do równań normalnych, w celu obliczenia najprawdopodobniejszych wartości korekt początku osi  $dz_p$  i  $dy_p$  oraz współczynników  $a$  i  $b$ .

Rozwiązując równania normalne otrzymujemy wartości niewiadomych  $dz_p$ ,  $dy_p$ ,  $a$ ,  $b$ , a następnie podstawiając wartości niewiadomych do równań poprawek otrzymujemy wielkości poprawek  $v$ , dla punktów powierzchni na ramach, liczonych w stosunku do osi, skorygowanej o składowe  $dz_p$ ,  $dy_p$ ,  $dz_K$ ,  $dy_K$ .

Poprawka  $v$  jest równoznaczna z obliczoną odchyłką promienia wolną od wpływu nieprawidłowego usytuowania osi względem kontrolowanych punktów powierzchni na ramach.

Wielkości odchyłek (po korekcie osi) dla pozostałych przekrojów poprzecznych możemy znaleźć na drodze analitycznej bądź opisaną niżej drogą graficzną.

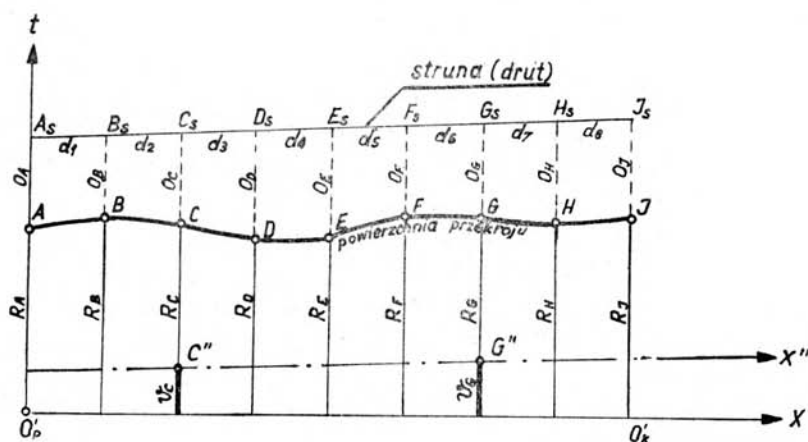
### 2.2.1. Analityczne określenie odchyłek promieni po korekcie osi (w przekrojach bez ram)

Należy w tym miejscu wyjaśnić, że współczynniki równań poprawek dla wszystkich elementów środkowych są jednakowe niezależnie od wielkości promienia, ponieważ ze zmianą promienia zmieniają się współrzędne  $z$  i  $y$ . Dotyczy to elementów środkowych wszystkich sektorów poszczególnych jazów, w których ramy w elementach wyprodukowanych w 1969 r. znajdo-

wwały się na przekrojach poprzecznych  $C$  i  $G$ , natomiast w elementach produkowanych w 1970, które ponadto wzmocniono tzw. ramą usztywniającą — na przekroju  $I$ . Dla elementów skrajnych sektora, współczynniki równań poprawek obliczono analogicznie, z tym że są one inne ponieważ ramy usztywniające znajdują się w innych przekrojach.

W 1970 r. opisany powyżej układ współrzędnych przestrzennych uległ skrętowi wokół osi  $x$ , tak że oś  $y$  jest obecnie równoległa do podstawy elementu oznaczonej na rysunku 4 prostą ( $pp$ ); nie zmienia to jednak w niczym samej koncepcji pomiaru i obliczeń. Wobec powyższego można ułożyć jednorazowo równania poprawek dla wszystkich punktów badanych, w których dla poszczególnych elementów będą zmieniały się wyrazy wolne ( $R - R_i$ ), a podstawiając następnie do nich niewiadome obliczone na podstawie rozwiązania układu równań normalnych dla punktów na ramach otrzymujemy metodą analityczną poprawki dla wszystkich punktów badanych.

Obliczone poprawki  $v$  liczone są w stosunku do osi skorygowanej. Poprawki promieni po korekcie osi dla punktów kontrolowanych poza ramami, można uzyskać także rozumując w następujący sposób. Wyobraźmy sobie przekrój elementu płaszczyzną przechodzącą przez osie tulei bazowych przez prostą ( $x'$ ) i przez dowolną tworzącą siatki punktów kontrolowanych, co ilustruje rysunek 6. Przekrój taki możemy traktować jako układ współrzed-



Rys. 6

nych płaskich, w którym za początek układu ( $O'_p$ ) przyjmujemy punkt tulei bazowej leżącej na przecięciu płaszczyzny przekroju  $A$  prostą  $x'$ . Oś  $t$  tego układu jest krawędź przecięcia się płaszczyzny przekroju  $A$  z płaszczyzną rozpatrywanego przekroju osiowego. Założmy dalej, że znamy w tym układzie współrzędne  $T$  punktów badanych powierzchni, leżących na przecięciu przekroju osiowego wzdłuż rozpatrywanej tworzącej i poszczególnych prze-

krojów poprzecznych  $A, B, \dots, I$  (założenie takie jest realne, gdyż współrzędne tych punktów w danym układzie możemy uzyskać na podstawie pomiarów). Jeżeli więc potrafimy określić analitycznie położenie osi skorygowanej ( $x''$ ) w tym samym układzie, to problem znalezienia poprawek promieni po korekcie mamy rozwiązany.

Mianowicie z wyrównania (z obliczenia poprawek dla przekrojów na ramach  $C$  i  $G$ ) otrzymujemy dla punktów  $C$  i  $G$   $n$ -tej tworzącej, poprawki  $v_C$  i  $v_G$ . Przez algebraiczne odjęcie poprawek  $v_C$  i  $v_G$  od współrzędnych  $T_C$  i  $T_G$  punktów przekrojów  $C$  i  $G$  możemy obliczyć współrzędne dwóch punktów  $C''$  i  $G''$  osi skorygowanej. Na podstawie współrzędnych tych punktów można ułożyć równanie osi skorygowanej, jako prostej przechodzącej przez dwa punkty według wzoru:

$$\frac{T_{i''} - T_{C''}}{X_{i''}'' - X_{C''}''} = \frac{T_{G''} - T_{C''}}{X_{G''}'' - X_{C''}''} = \operatorname{tg} \alpha \quad \text{lub} \quad T_{i''} = \operatorname{tg} \alpha (X_{i''}'' - X_{C''}'') + T_{G''}$$

gdzie

$T_{i''}$   $X_{i''}''$  — szukane współrzędne dowolnego punktu osi skorygowanej w odległości  $X'' = X' = x$  od początku układu,

przy czym

$$X_{i''}'' = X_i' = X_i$$

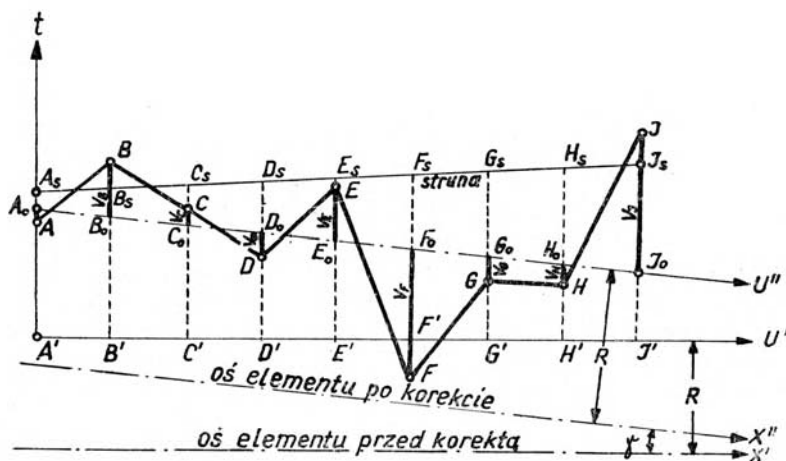
$T_{C''}$   $T_{G''}$  oraz  $X_{C''}''$   $X_{G''}''$  — współrzędne osi skorygowanej w punktach  $C''$  i  $G''$ .

Podstawiając do równania prostej wartości na  $X_i'' = X_i'$  (jako odległości od początku układu współrzędnych) otrzymamy współrzędne pozostałych punktów leżących na osi skorygowanej (punktów  $A, B, D, \dots, I$ ) w przekroju osiowym wzdłuż  $n$ -tej tworzącej. Różnice współrzędnych  $T_i$  przekrojów powierzchni badanej i współrzędnych  $T_{i''}$  osi skorygowanej zmniejszone o wielkość promienia projektowego dadzą nam wielkość odchyłek promieni po korekcie osi. Postępując w analogiczny sposób z innymi przekrojami osiowymi wzdłuż badanych tworzących znajdziemy odchyłki po korekcie osi we wszystkich punktach badanych poza ramami.

### 2.2.2. Graficzne określenie odchyłek promieni po korekcie osi (w przekrojach bez ram).

Zamiast metody analitycznej praktyczniej jest stosować sposób graficzny określenia odchyłek promieni po korekcie osi. Sposób ten możemy stosować po uprzednim ułożeniu i rozwiązaniu równań poprawek dla punktów kontrolowanych położonych na ramach. Musimy tu również zrobić założenie, że znamy wielkości promieni punktów badanych powierzchni w odniesieniu do osi  $x'$  zadanej przez tuleje bazowe. Rozpatrzmy teraz rysunek 7 przedsta-

wiający  $n$ -ty przekrój elementu płaszczyzną przechodzącą przez osie tulei bazowych ( $x'$ ) i  $n$ -tą tworzącą zawierającą punkty kontrolowane. Płaszczyzna ta przetnie badaną powierzchnię wzdłuż linii zadanej przez punkty  $A, B, \dots, I$ . Dla punktów  $A, B, \dots, I$  znajdujących się poza ramami musimy określić wielkości odchyłek promieni po korekcie osi. Na płaszczyźnie przekroju obieramy układ współrzędnych  $tA'u'$ , w którym za oś  $u'$  przyjmuje-



Rys. 7

my prostą (teoretyczną tworzącą), równoległą do osi  $x'$  w odległości równej wielkości promienia projektowego  $R$ . Oś  $t$  jest krawędzią przecięcia płaszczyzny przekroju osiowego i płaszczyzny przekroju  $A$ . Początkiem układu jest punkt ( $A'$ ) przecięcia się prostej  $u'$  i  $t$ . Na tak obranym układzie współrzędnych wykonujemy następujące czynności:

1. Na osi  $u'$  odkładamy kolejno w skali 1 : 50 odcinki równe odstępom między przekrojami (zgodnie z rys. 4), otrzymując punkty  $B', C', \dots, I'$ .

2. Od punktów  $A', B', \dots, I'$  odkładamy w skali 10 : 1, prostopadłe do osi  $u'$ , wielkości odchyłek promieni uzyskanych z pomiaru otrzymując położenie punktów  $A, B, \dots, I$  w przekroju  $n$ -tym.

3. Od punktów  $C$  i  $G$  odkładamy poprawki  $v_C$  i  $v_G$  w skali 10 : 1 równoległe do osi  $t$  (ze znakami przeciwnymi niż mają one z wyrównania, gdyż odniesione są one do osi skorygowanej) otrzymując punkty  $C_0$  i  $G_0$ . Punkty te wyznaczają nam położenie skorygowanej osi  $u''$  odległej od skorygowanej osi elementu (po wprowadzeniu składowych przesunięć  $dz_P, dy_P, dz_K$  i  $dy_K$  na skrajach elementu) o projektową wielkość promienia.

4. Odczytujemy w skali rysunku odcinki  $A_0A, B_0B, \dots, I_0I$ , które są wielkościami odchyłek promienia powierzchni po korekcie osi.

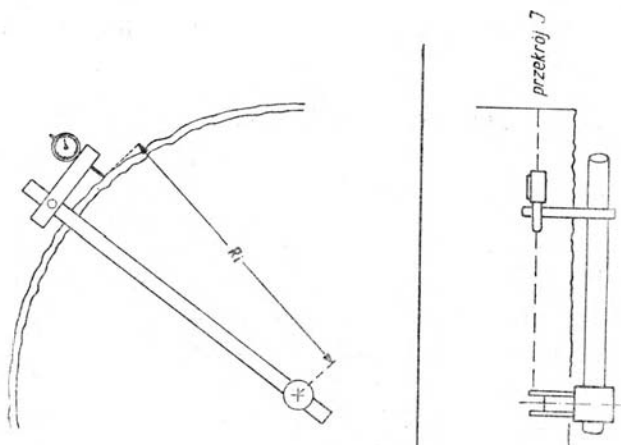
### 3. Metody pomiarów i obliczeń odchyłek promieni powierzchni elementów

#### 3.1. Oprzyrządowanie i pomiar elementu

Geodezyjne pomiary kontrolne powierzchni elementu, ze względu na swój specyficzny charakter wymagały rozwiązania szeregu problemów związanych z techniką pomiarów. Problem techniki pomiarowej został po-myślnie rozwiązany dzięki opracowaniu odpowiednich przyrządów pomiarowych.

Siatkę punktów kontrolowanych na powierzchni rozmierza się za pomocą ruletki wg ustalonego schematu, pokazanego na rysunku 4. Punkty kontrolowane zaznacza się na powierzchni elementu za pomocą punktaka.

Promienie powierzchni kontrolowanej na skrajach elementów (w przekrojach A i J) mierzy się za pomocą sztywnego przymiaru zwanego cyrklem mechanicznym, pokazanym schematycznie na rysunku 8. Cyrkiel wykonany jest z rury stalowej o średnicy około 50 mm, do której na jednym koń-

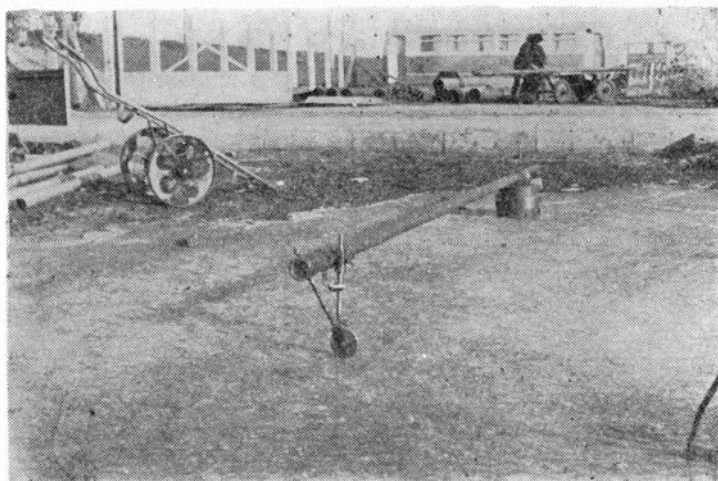


Rys. 8

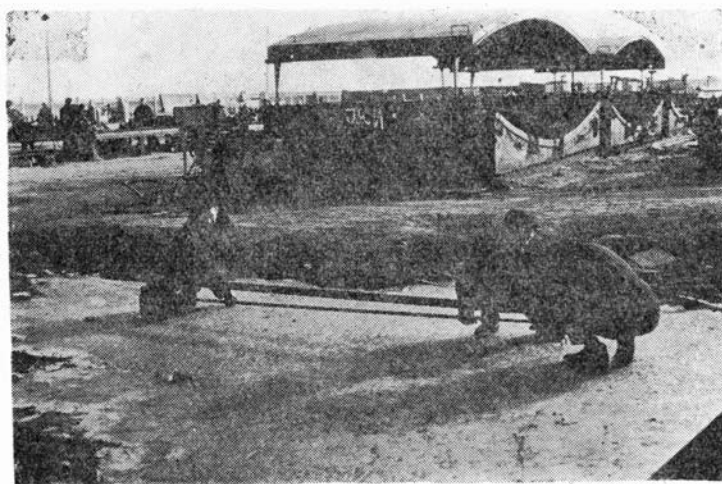
cu przymocowany jest trzpień osiowy zakładany w czasie pomiaru w otwór tulei bazowej; na drugim końcu do rury jako ramienia zasadniczego, zamontowany jest za pomocą obejmy, pod kątem prostym, kawałek rury stalowej o znacznie mniejszej średnicy, w którą z kolei wmontowany jest czujnik mechaniczny, co ilustruje rysunek 2 i 8. Czujnik należy zamocować w uchwycie w takiej odległości od wałka cyrkla, aby w czasie obwodzenia blachy opierającej zmienność promienia powierzchni nie spowodowała zmian odczytów czujnika wykraczających poza jego zakres pomiarowy. Długość ramienia zasadniczego może być regulowana dzięki możliwości przesuwania obejmy. Cyrkiel ten może więc być wykorzystany do pomiaru pro-

mieni skrajnych liczonych od osi tulei bazowych, dla elementów posiadających promień projektowy powierzchni piętrzącej 3900 mm lub 3400 mm. Dla pomiaru promieni powierzchni uszczelniającej skonstruowano podobny cyrkiel, z tym że jego zasadnicze ramię jest krótkie i dla wygody pomiaru wygięte.

Dokładną długość ramienia cyrkla wyznacza się za pomocą komparatora pokazanego na rysunku 9 i 10. Komparator polowy składa się z podstawy w kształcie cylindra o znanym promieniu z otworem o średnicy nieco większej od średnicy tulei osiowej cyrkla i skonstruowanych fabrycznie średnicówek z końcówką mikrometryczną. W czasie komparacji tuleję osiową



Rys. 9



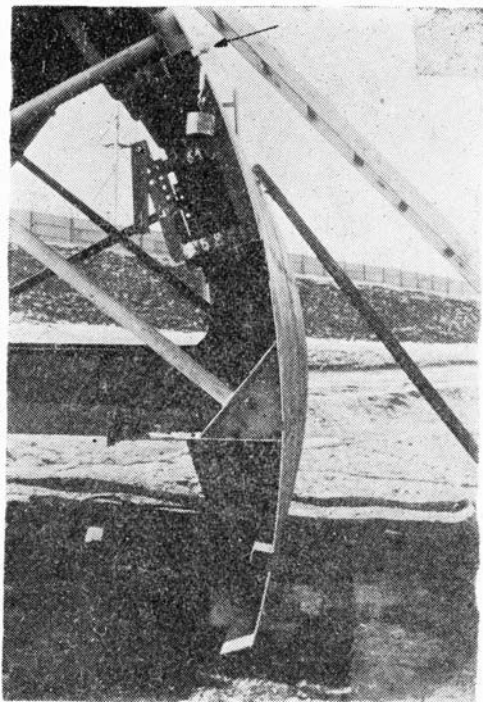
Rys. 10

cyrkla, wkłada się w otwór podstawy komparatora, następnie opierając jednym końcem średnicówkę o powierzchnię zewnętrzną podstawy komparatora, a drugi koniec o nóżkę czujnika cyrkla odczytuje się jego wskazanie. Wskazanie czujnika powinno być również odczytane przed przyłożeniem średnicówki. Całkowita długość ramienia cyrkla będzie się składać z następujących odcinków:

- a) znana i stała wielkość promienia podstawy komparatora,
- b) znana i stała długość średnicówek,
- c) odczytana długość końcówki średnicówki.

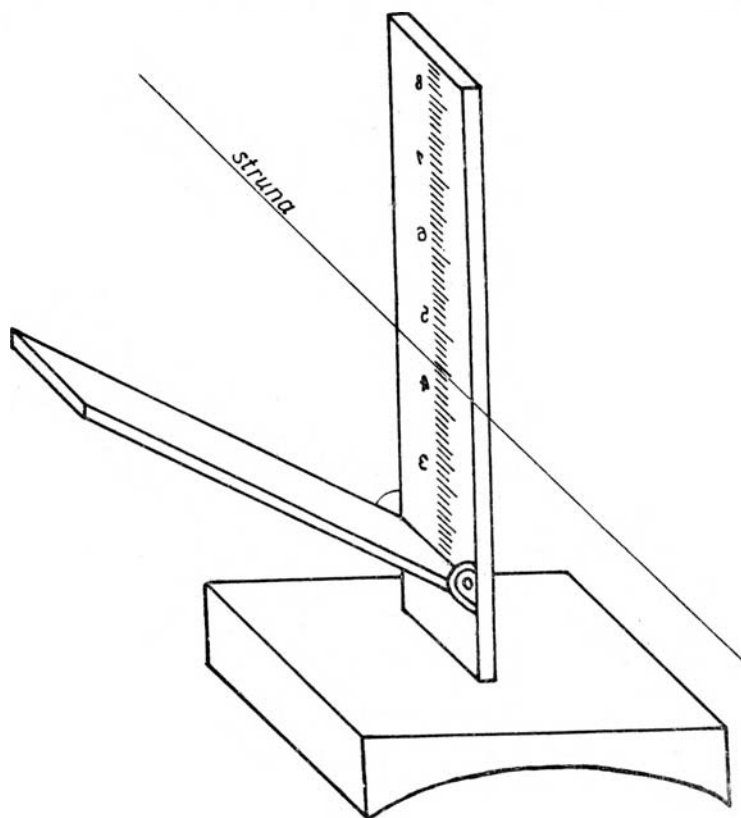
Po dodaniu do sumy odcinków wymienionych w punktach od a) do c) odczytów czujnika na poszczególnych punktach badanych w przekrojach *A* i *I* otrzymuje się wielkości promieni istniejących w tych przekrojach w odniesieniu do prostej zadanej przez tuleje bazowe. Wielkości odchyłek istniejących dla punktów przekroju *A* i *I* otrzymuje się łatwo przez odjęcie wielkości promieni istniejących od promienia projektowego.

Dla punktów badanych pozostałych przekrojów poprzecznych wielkości promieni istniejących otrzymuje się po uprzednim pomiarze wszystkich odległości badanych punktów powierzchni od struny (drutu) rozciąganej około 50 mm nad powierzchnią, w przybliżeniu równoległe do kolejno bada-



Rys. 11

nych tworzących, zgodnie z siatką punktów kontrolowanych. Jako struny używa się drutu stalowego o średnicy 0,3 mm. Struna przekładana jest końcami przez bloczki i zamocowana do specjalnych uchwytów dla drutu zakończonych haczykami pozwalającymi na zawieszenie obciążników 7,5 kG. Błoczek jest zamocowany do konstrukcji pozwalającej na jego swobodny obrót w dwóch prostopadłych do siebie kierunkach. Konstrukcję z bloczkiem (rysunek 11) przytwierdza się do blachy opierającej na skraju elementu za pomocą śruby dociskowej. Ruch bloczka w kierunku tworzącej

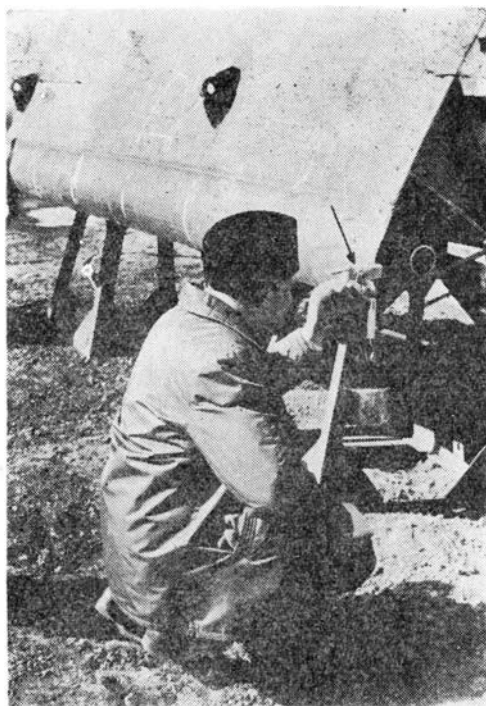


Rys. 12

pozwała na obciążenie struny i jego naciągnięcie, a w kierunku prostopadłym na usytuowanie struny w płaszczyźnie przekroju osiowego elementu, zawierającego badaną tworzącą.

Odległości punktów badanych powierzchni od struny mierzymy za pomocą przyrządu w postaci milimetrowej podziałki (rysunek 12), z odchylanym lustrem, przytwierdzonej do stopki ze stali magnetycznej, która jest ustawiona na powierzchni blachy w punktach badanych (rysunek 13).

Podstawa obudowy podziałki nie tworzy powierzchni płaskiej lecz powierzchnię wklęsłą, posiadającą kształt wycinka walca o promieniu zbliżonym do promienia powierzchni uszczelniającej ( $R = 160$ ). Zero podziałki znajduje się na płaszczyźnie przechodzącej przez proste krawędzie podstawy. Pomiar odległości wykonują dwie różne osoby dwoma takimi podziałkami, a do obliczeń przyjmuje się wyniki średnie. Po wykonaniu pomiaru



Rys. 13

wzdłuż jednej tworzącej, strunę przesuwając nad kolejną tworzącą i wykonuje się kolejno pomiar odległości punktów powierzchni od struny. Analogicznie postępuje się dla wszystkich trzynastu przekrojów osiowych.

Pomiar elementu składa się więc z następujących czynności:

- 1) rozmieszczenie siatki punktów kontrolowanych na elemencie,
- 2) pomiar promieni na skrajach elementu (w przekrojach A i I) przez dwukrotne obwodzenie cyrklem mechanicznym (tam i z powrotem),
- 3) komparacja cyrkla bezpośrednio po pomiarze,
- 4) rozpięcie struny nad powierzchnią i pomiar odległości punktów badanych od struny.

### 3.2. Obliczenie istniejących odchyłek promieni powierzchni na przekrojach nieramowych

Wielkość odchyłek istniejących liczonych w stosunku do prostej przechodzącej przez osie tulei bazowych w przekrojach A i I otrzymuje się bezpośrednio z pomiaru wielkości promieni zmniejszonych o wielkość promienia projektowego. Dla pozostałych punktów położonych na przekrojach od B do H istniejące odchyłki możemy określić dwoma metodami.

- 1) analitycznie,
- 2) graficznie.

#### 3.2.1. Analityczne określenie istniejących odchyłek dla środkowych przekroji poprzecznych

Rozpatrzmy jeszcze raz rysunek 6 przedstawiający  $n$ -ty przekrój elementu płaszczyzną przechodzącą przez osie tulei bazowych i przez rozpiętą nad badaną powierzchnią struną. Układ współrzędnych przyjmijmy taki sam, jak opisany w punkcie 2.2.1. tzn. oś  $x'$  pokrywa się z prostą wyznaczoną przez osie tulei bazowych. Za początek układu ( $O_p'$ ) przyjmujemy punkt przebiecia płaszczyzny przekroju A prostą  $x'$ . Oś  $t$  jest krawędź przecięcia się płaszczyzny przekroju A z płaszczyzną rozpatrywanego przekroju osiowego.

Znając z pomiaru odległości struny od powierzchni w punktach badanych rozpatrywanej tworzącej  $n$  ( $o_A, o_E, o_C, \dots, o_I$ ) oraz znając wielkości  $R_A$  i  $R_I$ , możemy obliczyć w pierwszym rzędzie współrzędne punktów struny  $A_s$  i  $I_s$ . Będą one wynosiły:

$$\begin{aligned} x'_{A_s} &= 0; & x'_{I_s} &= \sum_1^8 d; \\ T_{A_s} &= R_A + O_A; & T_{I_s} &= R_I + O_I. \end{aligned}$$

Następnie obliczamy współrzędne punktów pośrednich struny  $B_s, C_s, \dots, H_s$ , jako punktów na prostej wg znanego wzoru:

$$X'_{i_s} \sum_1^i d \sin \alpha, \quad T_{i_s} = \sum_1^i d \cos \alpha,$$

gdzie 
$$\alpha = \arctg \frac{X'_{I_s} - X'_{A_s}}{T_{I_s} - T_{A_s}}$$

Współrzędne  $T$  punktów badanych powierzchni położonych na przekroju

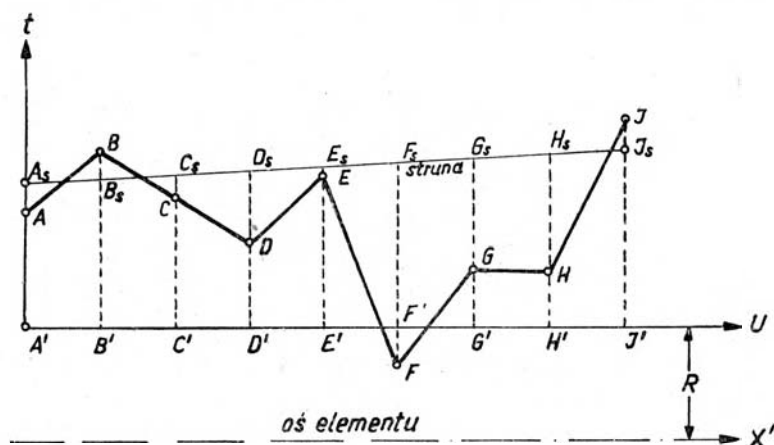
$n$ -tym otrzymamy przez odjęcie od współrzędnych struny odpowiednich zmierzonych odległości struny od powierzchni:

$$T_i = T_{is} - o_i = R_i.$$

Dla poszczególnych punktów badanych w przekroju  $n$ -tym współrzędne te są równe promieniom istniejącym odniesionym do prostej przechodzącej przez osie tulei bazowych, a różnica  $R - R_i$  jest równa odchyłce promienia istniejącego.

### 3.2.2. Graficzne określenie istniejących odchyłek dla środkowych przekroi poprzecznych

Istniejące odchyłki można określić stosunkowo łatwo i szybko metodą graficzną. Metoda ta polega na odtwarzaniu sytuacji przestrzennej w momencie pomiaru i sprowadzeniu jej do płaszczyzny rysunku wykonanego w odpowiednio dobranej skali. Dla łatwiejszego jej zrozumienia rozpatrzmy rysunek 14 przedstawiający  $n$ -ty przekrój elementu płaszczyzną przecho-



Rys. 14

dzącą przez osie tulei bazowych (przez oś  $x'$ ) i przez strunę rozpiętą nad powierzchnią. Płaszczyzna ta przetnie badaną powierzchnię wzdłuż linii zadanej przez punkty badane  $A, B, \dots, I$ . Dla punktów tych musimy określić wielkości odchyłek istniejących.

Na płaszczyźnie przekroju obieramy układ współrzędnych  $tO'U$ , w którym za oś  $U$  przyjmujemy prostą (teoretyczną tworzącą), równoległą do osi  $x$ , w odległości równej wielkości promienia projektowego  $R$ . Oś  $t$  jest krawędzią przecięcia płaszczyzny przekroju osiowego i płaszczyzny przekroju  $A$ . Początkiem układu jest punkt  $O'(A')$  przecięcia się prostej  $t$  i  $u$ .

Na tak obranym układzie współrzędnych wykonujemy następujące czynności:

1. Na osi  $u$  odkładamy kolejno w skali 1 : 50 odcinki równe odstępom między przekrojami (zgodnie z rysunkiem 4), otrzymując punkty  $B'$ ,  $C'$ ,  $I'$ .

2. Od punktu  $A'$  i  $I'$  odkładamy w skali 10 : 1 prostopadłe do osi  $u$ , odchyłki promieni istniejących (w przekrojach  $A$  i  $I$ ) otrzymanych z pomiaru cyrklem, otrzymując położenie punktów  $A$  i  $I$  powierzchni elementu w przekroju  $n$ -tym.

3. Od punktów  $A$  i  $I$  odkładamy prostopadłe do osi  $u$  w skali 1 : 10 zredukowane o wielkość (np. 45 mm) odczyty  $o_A$  i  $o_I$  uzyskane z pomiarów wykonanych przyrządem pokazanym na rysunku 12, otrzymując położenie punktów  $A_s$  i  $I_s$ . Linia łącząca punkty  $A_s$  i  $I_s$  symbolizuje na rysunku położenie struny w stosunku do której wykonano odczyty  $o_A$ ,  $o_B$ , ...  $o_I$ . Kierunek odkładania zredukowanych  $o_A$  i  $o_I$  w punktach  $A$  i  $I$  dla każdego przekroju  $n$ , wynika ze wzoru:

$$o_{z_r} = o_p - o_r,$$

gdzie

$o_{z_r}$  — odczyt zredukowany,

$o_p$  — odczyt polowy,

$o_r$  — odczyt przyjęty, o który redukujemy odczyt polowy (45 mm).

U w a g a. Jeśli odczyt zredukowany jest dodatni to odkładamy go w górę, a jeśli ujemny to w dół.

4. Od punktów  $B_s$ ,  $C_s$ , ...,  $H_s$  położonych na prostej symbolizującej na rysunku strunę, a powstałych przez przecięcie się struny i półprostych wychodzących z punktów  $B'$ ,  $C'$ , ...,  $H'$  równoległe do osi  $t$ , odkładamy prostopadłe do osi  $u$  zredukowane odczyty  $o_B$ ,  $o_C$ , ...,  $o_H$  otrzymując punkty  $B$ ,  $C$ , ...,  $H$  powierzchni rozpatrywanego przekroju  $n$ . Zredukowane odczyty odkładamy w skali 10 : 1 ze znakami przeciwnymi niż to wynika z powyższego wzoru na  $o_{z_r}$  (ze względu na przyjęty układ współrzędnych).

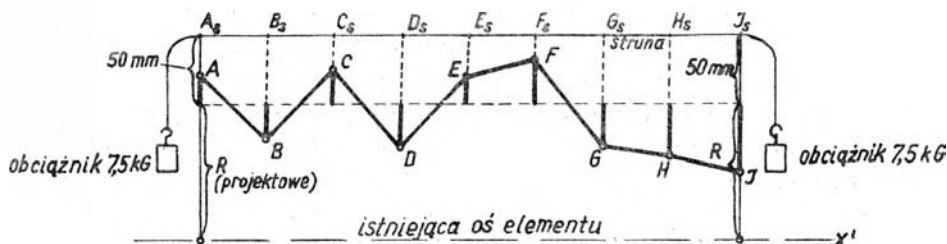
5. Odczytujemy z rysunku wielkości odcinków  $BB'$ ,  $CC'$ , ...,  $HH'$ , które są wielkościami odchyłek istniejących promieni powierzchni w punktach  $B$ ,  $C$ , ...,  $H$  w przekroju  $n$ -tym.

Graficzny sposób określenia istniejących odchyłek jest prosty, szybki i bardzo przejrzysty, a odpowiednio duża skala zabezpiecza wymaganą dokładność.

### 3.3. Zmodyfikowana metoda pomiarów elementów

Po pewnym okresie wykonywania pomiarów i obliczeń sposobem opisanym w punkcie 3.1. opracowana została przez Tczewską Stocznnię Rzeczną i Instytut ulepszona metoda. Metoda ta pozwala na odczytanie odchyłek ist-

niejących promieni wprost w trakcie pomiaru elementu. Dla zastosowania tej metody zmieniono nieco oprzyrządowanie. Mianowicie zamiast cyrkla z czujnikiem, zastosowano dwa cyrkle mechaniczne zaopatrzone w urządzenia do mocowania i napinania struny, co ilustruje schematycznie rysunek 15. Cyrkle te po uprzednim ustawieniu rozstawu ramion na wielkość  $R + 50$  mm, (gdzie  $R$  — promień projektowy) wkładamy jednocześnie w tuleje bazowe na krańcach elementu, i ustawiamy je w takim położeniu aby struna rozpięta między nimi znalazła się w płaszczyźnie przekroju osiowego-



Rys. 15

go, przechodzącego przez badaną tworzącą  $n = 1$ . Struna w czasie pomiaru jest jak i w metodzie poprzedniej naciągnięta obciążnikami 7,5 kG, lecz obecnie jest równoległa do prostej przechodzącej przez osie tulei bazowych.

Teraz przystępujemy do pomiaru w poszczególnych przekrojach poprzecznych A, B, ..., I odległości powierzchni blachy opierającej od struny. Pomiar wykonujemy za pomocą przyrządu w postaci milimetrowej podziałki (pokazanego na rysunku 12).

Dalszy pomiar odbywa się analogicznie do opisanego wyżej, a mianowicie zmieniamy położenie cyrkli tak, aby struna znalazła się w płaszczyźnie przekroju osiowego, przechodzącego przez tworzącą  $n = 2$  oraz wykonujemy pomiar odległości powierzchni od struny w przekrojach poprzecznych A, B, ..., I. Analogicznie postępujemy przy pomiarze odległości struny od powierzchni dla wszystkich trzynastu tworzących.

Przy dobrze wycechowanej podziałce (bez błędu miejsca zera urządzenia odczytowego), wielkości odchyłek istniejących promieni dla powierzchni piętrzącej znajdziemy wprost z różnicy: 50 mm — odczyt podziałki.

Natomiast dla powierzchni uszczelniającej, różnicę: 50 mm mniej odczyt podziałki należy zwiększyć o poprawkę 1,3 mm z tytułu wyokrąglenia podstawy podziałki.

Zmodyfikowana metoda pomiarów elementów jest łatwa w stosowaniu i znacznie szybsza, a co najważniejsze pozwala od razu w czasie pomiaru uzyskiwać odchyłki promieni istniejących.

#### 4. Dokumentowanie wyników pomiaru oraz przykład obliczeń metodą analityczno-graficzną

##### 4.1. Dokumentowanie wyników pomiarów odchyłek promieni powierzchni

Wyniki pomiarów zapisywane są w odpowiednio opracowanym formularzu zatytułowanym „Protokół pomiaru i obliczenia odchyłek elementu”. Formularz jest opracowany dla dokumentowania wyników pomiaru, wyrazów wolnych (odchyłek istniejących) oraz obliczonych odchyłek po korekcie osi elementu dla 117 badanych punktów powierzchni leżących na przecięciach 9 przekrojów kołowych (od A do I) z 10 tworzącymi (od 1 do 10) dla powierzchni piętrzącej oraz na przecięciu 9 przekrojów kołowych (od A do I) z 3 tworzącymi (od 11 do 13) dla powierzchni uszczelniającej. Układ formularza jest kolumnowo-wierszowy, co ilustruje załącznik 1. W wierszach wpisane są kolejne tworzące od 1 do 13, a w kolumnach przekroje kołowe od A do I. Dla każdej z badanych tworzących przeznaczono 4 wiersze poziome.

W pierwszym od góry zapisujemy wyniki pomiarów odległości punktów badanych powierzchni od struny — dwa wyniki obok siebie.

W wierszu drugim zapisuje się obliczone średnie z tych wyników, w trzecim wyrazy wolne (odchyłki istniejące) równań poprawek, a w czwartym poprawki  $v$ , tzn. odchyłki jakie otrzymalibyśmy po wprowadzeniu korekt osi elementu zadanej przez tuleje bazowe, przy dostosowaniu osi do punktów powierzchni leżących w przekrojach na ramach (C i G). Po lewej i prawej stronie formularza, (w wąskich kolumnach) w wierszu pierwszym i drugim zapisujemy wyniki z dwukrotnego pomiaru cyrklem (odczyt czujnika plus wielkość rozstawu ramion cyrkla, minus wielkość promienia teoretycznego), a poniżej w trzecim wierszu wynik średni.

Na dole formularza w dwóch ostatnich wierszach w kolumnie A, wpisuje się składowe  $-dz_p$  i  $-dy_p$  przesunięcia osi do nowego położenia, obliczone uprzednio na podstawie rozwiązania równań normalnych, zaś w kolumnie I wpisuje się składowe  $-dz_K$  i  $-dy_K$  obliczone z wzorów:

$$-dz_K = -(dz_p + x a),$$

$$-dy_K = -(dy_p + x b),$$

czyli składowe przesunięcia osi na końcu elementu.

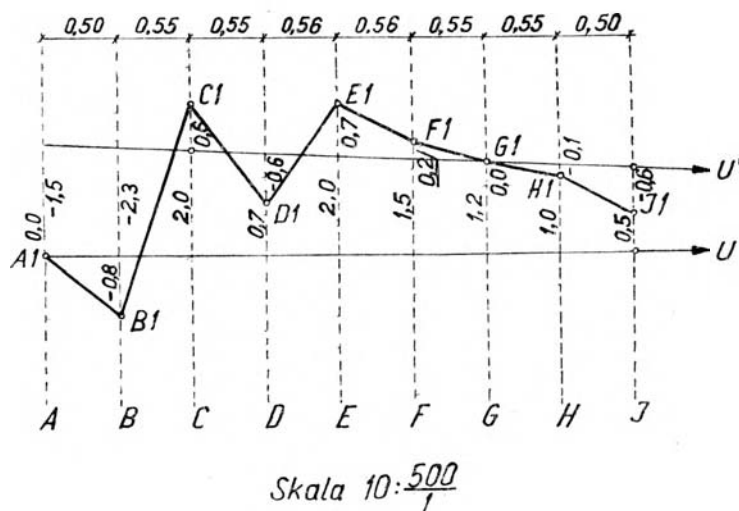
Składowe  $dz_p$ ,  $dy_p$ ,  $dz_K$  i  $dy_K$  wpisujemy ze znakami przeciwnymi w stosunku do obliczonych, ponieważ są one poprawkami o jakie należy przesunąć tuleje bazowe aby zmniejszyć optymalne odchyłki po korekcie osi w przekrojach C i G.

Należy tu wspomnieć, że formularz jest opracowany dla metody pomiaru przed jej zmodyfikowaniem. Podczas pomiaru metodą zmodyfikowaną for-

mularz nie ulega zmianie, jedynie kolumny (obok *A* i *I*) nie są wypełnione, a wiersz trzeci (dla każdej tworzącej) jest wypełniony bezpośrednio po pomiarze.

Przykład zawiera wyniki pomiarów elementu 1H Roudnice wykonanych 14. 09. 1970 r., tj. w okresie stosowania aktualnej metody geodezyjnej kontroli elementów.

Wyniki dwukrotnych pomiarów połowych zawarte są w załączniku nr 1, w pierwszych wierszach dla każdego z przekroi od 1 do 13. Drugie wiersze zawierają wartości średnie z tych pomiarów. Wąskie kolumny z lewej strony przekroju *A* i z prawej strony przekroju *I* nie są wypełnione, ponieważ nie prowadzi się bezpośrednio pomiarów cyrklem. Wiersze trzecie w załączniku nr 1 możemy wypełnić bezpośrednio po obliczeniu wartości średnich z pomiarów. Mianowicie od wielkości 50,0 mm odejmujemy wartości średnie z pomiarów, czyli odległość badanych punktów powierzchni od struny (rysunek 16).



Rys. 16

Następnie po jednorazowym obliczeniu współczynników równań poprawek (załącznik nr 2) w obranym układzie współrzędnych (skręconym w stosunku do poprzedniego o pewien kąt) i zestawieniu tych równań, w których jako wyrazy wolne wchodzi odchyłki promieni istniejących (w trzecich wierszach załącznika nr 1) punktów znajdujących się na ramach (w przekroju *C*, *G* i *I*), liczymy równania normalne i rozwiązujemy je. Z równań tych obliczamy (z kontrolą) niewiadome  $dz_p$ ,  $dy_p$ ,  $a$  i  $b$ , potem podstawiamy je do równań poprawek i obliczamy poprawki  $v$  (odchyłki promieni po-

wierzchni jakie powstałyby po korekcie osi zadanej przez tuleje bazowe) dla punktów na ramach (w przekrojach  $C$ ,  $G$  i  $I$ ).

Dalsze czynności wykonujemy następująco:

1. Rysujemy poziomo oś  $U$  ilustrującą teoretyczną tworzącą (w przekroju pierwszym) odniesioną do istniejącej osi elementu zadanej przez tuleje bazowe i odkładamy na niej w skali 1 : 50 odległości między przekrojami  $A, B, \dots, I$  zgodnie ze schematem rozmieszczenia punktów kontrolowanych (rys. 4).

2. Rysujemy normalne do osi  $U$  ilustrujące przekroje  $A, B, \dots, I$  i odkładamy na poszczególnych przekrojach wielkości podane w wierszu trzecim (dla pierwszej tworzącej) w skali 10 : 1 otrzymując położenie punktów kontrolowanych. Punkty te łączymy otrzymując osiowy przekrój powierzchni wzdłuż pierwszej tworzącej. Wielkości dodatnie należy odkładać w górę od osi  $U$ , a ujemne w dół, co ilustruje rysunek 16.

3. Od punktów  $C$ ,  $G$  i  $I$ , czyli punktów znajdujących się na ramach, odkładamy obliczone poprawki  $v_C$  (0,6),  $v_G$  (0,0),  $v_I$  (-0,6), lecz ze znakami przeciwnymi, tzn. wielkości dodatnie odkładamy w dół od punktu leżącego na ramie, a wielkości ujemne w górę. Otrzymane w ten sposób wszystkie trzy punkty powinny znajdować się na jednej prostej, co stanowi dodatkową kontrolę prawidłowości obliczeń poprawek  $v$  oraz poprawności naniesienia na wykres punktów położonych na ramach. Punkty te połączone linią prostą tworzą oś skorygowaną  $U'$ , czyli teoretyczną tworzącą elementu (w pierwszym przekroju), liczoną w stosunku do skorygowanej osi elementu.

4. Odczytujemy z wykresów na podstawie miar graficznych poprawki  $v$  w pozostałych przekrojach  $A$  (-1,5),  $B$  (-2,3),  $D$  (-0,6),  $E$  (0,7),  $F$  (0,2),  $H$  (-0,1), tj. odległości badanych punktów powierzchni od osi skorygowanej  $U'$  będących odchyłkami promieni po korekcie osi elementu. (Korektę osi elementu wykonuje się w praktyce przez odpowiednie przemieszczenie tulei bazowych znajdujących się na skrajach elementu, za pomocą czterech śrub wkręcanych lub wykręcanych, analogicznie jak przy przesunięciach płytki z krzyżem nitek w teodolitach).

Wykresów musimy wykonać tyle, ile jest badanych tworzących (w naszym przykładzie 13 — załącznik 3). Czynności dla znalezienia wielkości poprawek  $v$  po korekcie osi dla pozostałych przekrojów 2÷13 są takie same, jak dla pierwszej tworzącej (przekroju pierwszego). Jeszcze raz należy podkreślić, że prace obliczeniowe powinny być wykonywane z kontrolą, a wykresy przez dwie osoby, niezależnie.

Po sczytaniu i uśrednieniu, ostateczne poprawki  $v$  (odchyłki po korekcie osi elementu) wpisujemy do formularza „Protokół pomiaru i obliczenie odchyłek elementu” w wierszach czwartych dla wszystkich trzynastu przekroi wzdłuż tworzących.

U w a g a. Elementy nie posiadają ramy w przekroju  $I$  od strony powierzchni uszczelniającej, dlatego brak jest równań poprawek dla punktów badanych w przekroju  $I$ , leżących na powierzchni uszczelniającej ( $R = 160$ ).

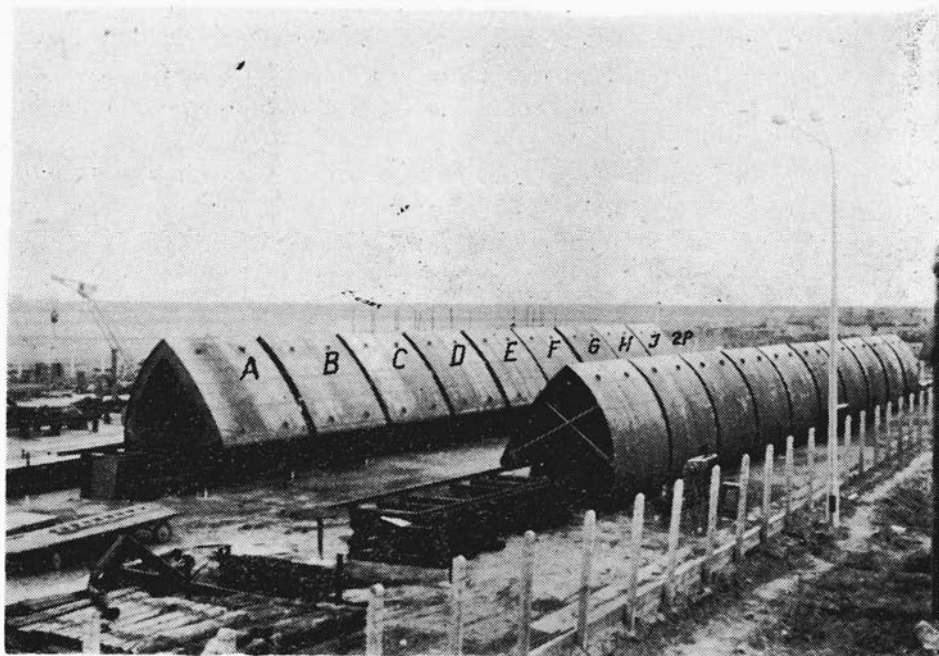
### **5. Sposób wyznaczenia długości projektowej elementów, krawędzi obciążenia elementów skrajnych oraz długości sektora**

Oprócz opisanych w punkcie 2.1. pomiarów kształtów powierzchni elementów w zakres pomiarów geodezyjnych wchodzi jeszcze następujące prace:

- 1) pomiar i korekta bazy mechanicznej służącej do osiowania elementów,
- 2) pomiar i wyznaczenie długości projektowej elementów,
- 3) pomiar dla wyznaczenia krawędzi obciążenia elementów skrajnych,
- 4) pomiar i wyznaczenie długości sektora.

Jak wiemy z poprzednich rozdziałów sektor składa się z elementów, które później są ze sobą zespawane tworząc jednolitą całość. Na miejscu w stoczni przeprowadza się próbny montaż dla sprawdzenia, czy sektor jest wykonany zgodnie z założeniami projektowymi. W tym celu na podkładach kolejowych (kilka warstw) umocowane są równolegle dwie szyny kolejowe, na których z kolei ułożone są elementy w takiej kolejności w jakiej są one w sektorze (rysunek 17). Równolegle do szyn w odległości ok. 1 m założono tzw. bazę mechaniczną. Baza składa się z 13 słupków wbitych w ziemię na głębokość ok. 0,5 m i obetonowanych. Słupki są wykonane z kątownika i wystają około 1 m ponad ziemię. Do górnej części słupków są umocowane na dwóch śrubach blachy ze szczerbinkami (rysunek 18). Blachy te można przesuwając w płaszczyźnie poziomej i pionowej w granicach 1 cm. Dla usytuowania wszystkich szczerbin w linii prostej założono dwa stanowiska. Usytuowane są one tak, aby celowa przebiegała nieco ponad szczerbinami. Na jednym stanowisku ustawiamy teodolit zaopatrzony w nasadkę z płytką płaskorównoległą lub niwelator precyzyjny, a na drugim tarczę celowniczą. Po wycelowaniu na tarczę wykonujemy odczyty na łatce ustawianej w kolejnych szczerbinkach. Łatka jest specjalnie przystosowana do jednoznacznego ustawiania zarówno w pionie jak i w poziomie.

W celu przyspieszenia oraz ułatwienia pracy regulację bazy robimy dwoma niwelatorami (w poziomie — sposobem opisanym powyżej, w pionie — niwelując szczerbinki niwelacją ze środka) — ustawiając łatkę w poziomie, a następnie w pionie. Na podstawie zanotowanych odczytów dla pionowych i poziomych ustawień łatki obliczamy średni odczyt i za pomocą przesunięć na śrubach doprowadzamy blachy ze szczerbinkami do takiego położenia (drogą kolejnych przybliżeń) aby odczyty na łatce ustawionej



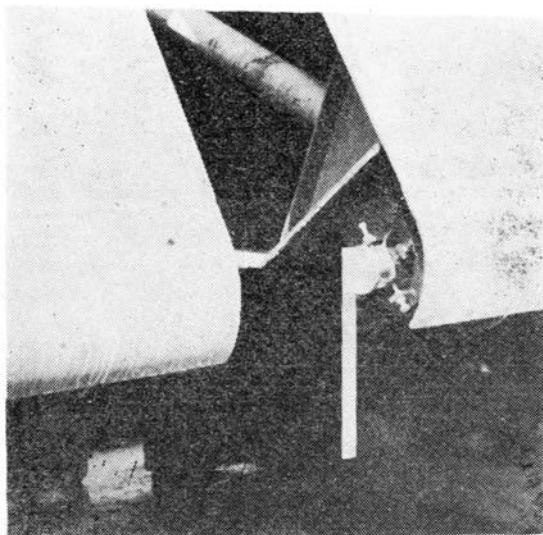
Rys. 17



Rys. 18

w szczyrbince były równe odczytowi średniemu w granicach założonej dokładności  $\pm 0,5$  mm. Po ustawieniu wszystkich szczyrbinek w pionie i w poziomie w jednej linii prostą rozciągamy drut w szczyrbinkach na końcach go obciążając. W ten sposób baza gotowa jest do wykorzystania jej przy próbnym montażu sektora.

Teraz za pomocą przyrządów specjalnie skonstruowanych wyposażonych w podziałki i libele (rysunek 19) i założonych w otwory tulei bazowych, ustawia się poszczególne elementy na szynach kolejowych tak, aby osie elementów zadane przez tuleje bazowe znalazły się na jednakowej wysokości

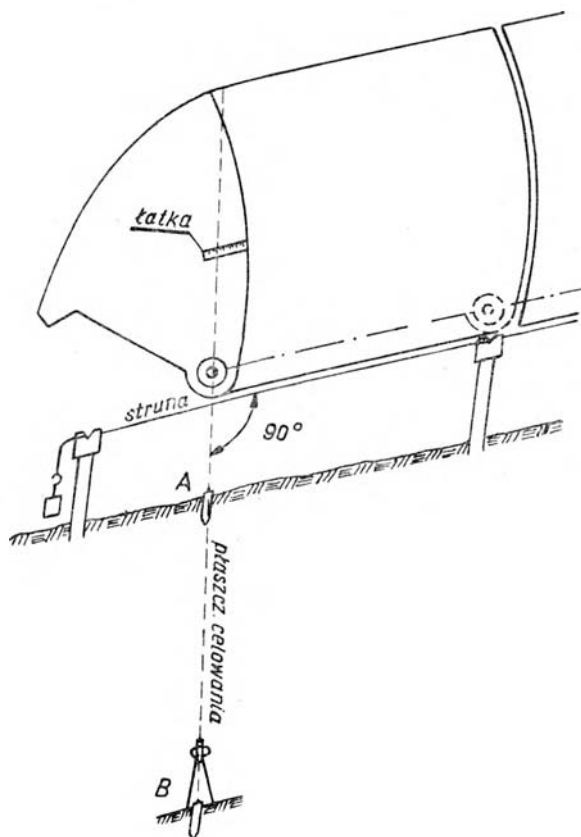


Rys. 19

ponad struną oraz w jednakowej od niej odległości poziomej, zaś odległość między elementami wynosiła kilka centymetrów. Teraz dla dwóch sąsiednich elementów ustawionych jak opisano powyżej, możemy wyznaczyć, odkładając długość projektową, linię obcięcia. Jedna krawędź (w każdym elemencie) zostaje wygładzona i zfrezowana — nie podlega obcięciu, natomiast druga krawędź (przystająca do krawędzi zfrezowanej i wygładzonej następnego elementu) jest wyznaczona przez odłożenie jednakowych odcinków od krawędzi zfrezowanej, wzdłuż tworzących, na całej wysokości elementu. Odległości te ustala się tak, aby linia obcięcia znalazła się w projektowanej odległości od uszu dla tulei zawiasów. Na zewnętrznych skrajach pierwszego i ostatniego elementu sektora dokonuje się obcięcia blach w taki sposób, aby krawędzie zawierały się w płaszczyźnie prostopadłej do osi sektora (bazy). Wykonywane to jest następująco:

Punkt struny *A* — rysunek 20 — znajdujący się około 10 cm od skrajnego elementu zostaje przerzutowany (z dwóch stanowisk) na palik wbity

w ziemię (pod drutem) i utrwalony gwoździem. Następnie ustawiamy teodolit nad punktem *A*, odkładamy od kierunku bazy kąt prosty i na celowej stabilizujemy palik z gwoździkiem — punkt *B* w odległości ok. 8 m od bazy. W ten sposób wyznaczamy linię celową prostopadłą do bazy mechanicznej. Ustawiamy teraz teodolit nad punktem *B* i celujemy na punkt *A*, a następnie odczytujemy latkę (w dwóch położeniach lunety) przykładaną do skraj



Rys. 20

blachy opierającej, równoległe do osi sektora. Linia obcięcia zewnętrznego skraj sektora jest linią równoległą do płaszczyzny kolimacyjnej teodolitu przebiegająca przez punkt, w którym odczyt na latce jest największy (czyli obcina się tylko naddatki blachy opierającej w stosunku do tego punktu).

Aby długość sektora zawierała się w granicach tolerancji projektowej, nadmiar długości zostaje zlikwidowany przez obcięcie blach opierających skrajnych elementów od strony wewnętrznej (od strony sąsiedniego elementu).

Stykowanie elementów i wyznaczenie linii obciążenia blach opierających wykonano za pomocą bazy mechanicznej, a nie metodą wytyczenia teodolitem, ze względu na bardzo długi okres ustawiania elementów współosiowo. Gdyby ustawiać wszystkie elementy współosiowo bezpośrednio metodą optyczną, to ze względu na ciągłość tej pracy w okresach obejmujących również warunki niekorzystne dla obserwacji uzyskalibyśmy mniejszą dokładność niż przy użyciu bazy mechanicznej. Usytuowanie szczyrbów bazy mechanicznej na jednej prostej było kontrolowane wielokrotnie i korygowane.

## 6. Dokładność wyznaczenia odchyłek promieni oraz osiowania elementów

Należy w kilku słowach poruszyć sprawę uzyskiwanych dokładności pomiarów kontrolnych konstrukcji piętrzących jazów.

Spróbujemy oszacować dokładność poszczególnych czynności pomiarowych:

1. Pomiary cyrklem mimo, że były wykonane dwukrotnie, a odczyty dokonane za pomocą czujnika mechanicznego o nominalnej dokładności odczytu 0,01 mm, to ze względu na błąd justowania średnicówki, błąd jednoznacznego przyłożenia tejże średnicówki na wzorcu oraz ze względu na to, że powierzchnia blach opierających elementu nie jest całkowicie gładka, zwłaszcza na skrajach elementu, sumaryczny błąd pomiaru określimy jako  $\pm 0,4$  mm. Znalazło to potwierdzenie w wynikach pomiarów wykonanych dwukrotnie na tych samych miejscach.

2. Błąd odczytu odległości powierzchni elementu od struny, mierzonej za pomocą urządzenia w postaci milimetrowej podziałki, określanej z rozbieżności między dwukrotnymi odczytami, wynosi  $\pm 0,2$  mm, jednak ze względu na nierówności blachy opierającej i niejednoznaczne przyłożenie przyrządu w tym samym punkcie, bezpieczniej jest ocenić go na  $\pm 0,3$  mm.

3. Błąd z tytułu graficznego opracowania wyników odchyłek pierwotnych i wtórnych nie przekracza  $\pm 0,1$  mm.

4. Błąd wytyczenia na jedną prostą szczyrbów blach dla bazy mechanicznej nie przekracza  $\pm 0,5$  mm.

5. Błąd właściwego usytuowania elementu w stosunku do struny stanowiącej bazę mechaniczną podczas montażu sektora w jazie określimy jako  $\pm 0,5$  mm.

Tak więc błąd średni wyznaczenia odchyłki promienia powierzchni elementu za pomocą cyrkla mechanicznego czyli metodą pierwotną wyniósł:

$$m_p = \pm \sqrt{0,4^2 + 0,3^2 + 0,1^2} = \pm 0,5 \text{ mm}$$

i stanowi 1/8 wielkości tolerancji projektowej długości promienia elementu.

Dla metody zmodyfikowanej błąd średni wyznaczenia odchyłki promienia powierzchni wynosi:

$$m_p = \pm \sqrt{0,3^2 + 0,1^2} = \pm 0,3 \text{ mm},$$

co stanowi 1/3 wielkości tolerancji projektowej.

Średni błąd osiowania sektora podczas montażu w jazie jest uzależniony od błędów osiowania poszczególnych jego elementów i wynosi

$$m_o = \pm \sqrt{0,5^2 + 0,5^2} = \pm 0,7 \text{ mm}$$

jest to 1/3 wielkości tolerancji projektowej.

Jak wynika z powyższej krótkiej oceny dokładności — pomiary były wykonywane z wystarczającą dokładnością aby tolerancje nie były przekroczone.

Powyższa ocena była podstawą do opracowania przyrządów użytych w podanej metodzie. Szczegółowa analiza wyników pomiarów kontrolnych została przeprowadzona w punkcie 8.

## **7. Korzyści wynikające z zastosowania opracowanych metod pomiarów i obliczeń**

Dzięki zastosowaniu opracowanych w IGiK metod pomiarów i obliczeń, Tczewska Stocznia Rzeczna mogła poprawić jakość produkowanych elementów. Wprowadzając korektę osi zadanej przez tuleje bazowe, odchyłki wtórne promieni powierzchni w przekrojach ramowych ulegają znacznemu zmniejszeniu i z reguły mieszczą się w granicach tolerancji, a i w pozostałych przekrojach odchyłki promieni powierzchni ulegają w widoczny sposób zmniejszeniu. Uchroniło to, zwłaszcza w początkowym okresie produkcji elementów, przed ich wybrakowaniem, bowiem jak wiemy, poprawienie powierzchni na ramach ze względu na jej usztywnienie jest niemożliwe. Problem ten jest szerzej omówiony i udokumentowany w następnym rozdziale zatytułowanym „Analiza błędów”.

Ponadto wyniki pomiarów elementów pozwoliły na zlokalizowanie nadmiernych (nie mieszczących się w granicach tolerancji) odchyłek promieni i usunięcie ich przez zastosowanie odpowiedniej techniki (wyklepywania, podgrzewania). Również dzięki pomiarom geodezyjnym, po zapoznaniu się z wynikami, można zweryfikować element do dalszego montażu. Opracowane metody pomiarów i obliczeń zabezpieczyły realizowanie założonych wymagań dokładnościowych tzn. niedopuszczenie do przekroczenia maksymalnych odchyłek projektowych; ułatwiły i przyspieszyły ostateczny montaż elementów w sektor na miejscu działania jazu, bowiem elementy w miejscu produkcji tj. w Tczewskiej Stoczni Rzecznej, były odpowiednio przygoto-

wane do montażu (wyznaczenie długości projektowych elementów i sektora — co umożliwi obcięcie naddatków blach opierających oraz wyznaczenie krawędzi obcięć elementów skrajnych sektora). Opracowana przez IGiK metoda osiowania elementów sektora została w całości adoptowana na miejscu montażu w CSRS, co w efekcie zwiększa dokładność montażu i w mniejszym stopniu absorbuje obsługę geodezyjną na tym odcinku. Obsługa geodezyjna ogranicza się tutaj do okresowej kontroli prostoliniowości bazy mechanicznej.

Przy dłuższej serii produkcji elementów na tym samym stanowisku montażowym pomiary odchyłek promieni powierzchni pozwalają na stwierdzenie istniejących drobnych błędów systematycznych, powstających w czasie montażu elementów na tym samym stanowisku i usunięcie ich przez wprowadzenie korekt.

Należy zaznaczyć, że przedstawione powyżej metody pomiarów i obliczeń mogą być z powodzeniem zastosowane w innych podobnych przypadkach dla powierzchni regularnych.

Opisane metody pomiarów konstrukcji stalowych różnią się od dotychczas stosowanych tym, że wykorzystano w nich lokalny układ współrzędnych ściśle powiązany z elementem jazu kontrolowanym co do poprawności wykonania.

## 8. Analiza wyników

### 8.1. Odchyłki pierwotne i odchyłki wtórne. Ogólne omówienie metody i celu analizy

Jak wiemy z poprzednich rozdziałów, w wyniku pomiaru elementu dla każdego z punktów siatki, która składa się z przekroi podłużnych i poprzecznych, wyznacza się różnicę między istniejącą a projektową (zadaną, nominalną) wartością promienia krzywizny powierzchni. Różnice te, tzw. odchyłki pierwotne, nie mogą co do wartości bezwzględnych przekraczać zadanej projektowo odchyłki równej  $\pm 3$  mm. Jeśli warunek ten nie jest spełniony dla więcej niż dwóch punktów przekroju poprzecznego, to powierzchnia danego elementu musi ulec korekcji. Taką korektę przeprowadza się inaczej dla punktów położonych na ramach elementu, inaczej zaś dla punktów poza ramami. W tym ostatnim bowiem przypadku powierzchnię elementu stanowi blacha stalowa, której ukształtowanie może być w dość dużym zakresie zmienione w sposób mechaniczny (wyklepywanie). Ramy natomiast usztywniają konstrukcję elementu przez co wartości odchyłek dla punktów na przekrojach ramowych nie mogą być zmieniane w ten sposób, jak dla punktów poza ramami (tylko przez korektę położenia osi).

Odchyłki dla punktów ramowych zależą jednak od położenia osi elemen-

tu, które może być korygowane w granicach kilku milimetrów w płaszczyźnie przekroju poprzecznego. Można więc wyznaczyć pewne najwłaściwsze położenie osi, którym jest położenie zapewniające minimum sumy kwadratów odchyłek dla punktów ramowych. Takie odchyłki obliczone na podstawie odchyłek pierwotnych i z uwzględnieniem wyznaczonych rachunkowo zmian usytuowania osi, są jak już wiemy z rozdziału 2 nazwane odchyłkami wtórnymi.

Należy podkreślić, że składowe korekty osi wyznaczone są na podstawie odchyłek pierwotnych wyłącznie dla punktów przekroi ramowych i przy warunku minimum sumy kwadratów odchyłek wtórnych dla tych samych punktów. Stąd odchyłki wtórne mogą dla przekroi pozaramowych wykazywać rozkłady gorsze niż odchyłki pierwotne. Dla przekroi tych odchyłki wtórne przekraczające dopuszczalne wartości są usuwane drogą wykłepywania.

Zastosowanie kryterium najmniejszej sumy kwadratów odchyłek pierwotnych dla wyznaczenia najwłaściwszych elementów korekty osi opiera się na następujących dwu założeniach:

1) wartości odchyłek pierwotnych mają charakter przypadkowy i są wzajemnie niezależne,

2) rozkład odchyłek pierwotnych jest normalny.

Pierwsze założenie wynika zarówno z przyjętych jako przypadkowe niedokładności prac montażowych, jak też z przypadkowych błędów pomiaru elementu. Założenie to oznacza między innymi również, że lokalnie średnia wartość promienia krzywizny jest stała, tj. średni promień krzywizny nie zależy od fragmentu elementu (np. przekrój poprzeczny jest łukiem okręgu, a nie elipsy) oraz że występowanie określonej wartości odchyłki w danym punkcie badanej powierzchni nie ma wpływu na wartości odchyłek w punktach sąsiednich (to znaczy lokalne „wybrzuszenia” lub „zagłębienia” obejmują niewielkie fragmenty badanej powierzchni).

Drugie założenie oznacza natomiast, że pomierzone „zagłębienia” i „wybrzuszenia” badanej powierzchni występują z jednakowym prawdopodobieństwem na całej badanej powierzchni, oraz że odchyłki małe co do wartości bezwzględnych są bardziej prawdopodobne niż odchyłki duże.

Przeprowadzone w dalszym ciągu niniejszego rozdziału testy i analizy mają na celu m. in. wykazanie słuszności tych założeń, a zatem uzyskanie pewnych dodatkowych informacji co do jakości wykonania elementów, prawidłowości prac pomiarowych oraz skuteczności zastosowanej metody korekcji. Analizy te dotyczą ocen numerycznych wielkości charakteryzujących dokładność wykonawstwa pomiaru oraz wpływy czynników zewnętrznych.

Rozważania niniejszego rozdziału dotyczą przeciętnego materiału (odchyłek) wybranego spośród wszystkich pomierzonych elementów. Wyniki

omawianych testów i analiz dają więc pewne średnie statystyczne oceny co do jakości prac wykonawczych stoczni a także co do dokładności i prawidłowości geodezyjnych prac kontrolnych.

## 8.2. Test przypadkowości odchyłek pierwotnych

### 8.2.1. Metoda

Dla stwierdzenia słuszności pierwszego z wymienionych w punkcie 8.1. założeń tj. założenia, że wartości odchyłek pierwotnych są wielkościami losowymi, zastosowane zostało tzw. kryterium Abbego [3]. Kryterium to polega na wzajemnym porównaniu dla danego przekroju dwu ocen dla wariancji odchyłki pierwotnej, a mianowicie:

1) oceny obliczonej na podstawie różnic między poszczególnymi odchyłkami pierwotnymi, a odchyłką średnią,

2) oceny obliczonej na podstawie różnic kolejnych odchyłek pierwotnych.

Pierwszą z tych ocen daje wzór

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{l} - l_i)^2 \quad (3)$$

zaś drugą wzór

$$q^2 = \frac{1}{2(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} (l_{i+1} - l_i)^2 \quad (4)$$

We wzorach tych:

$l_i$  — odchyłka pierwotna dla  $i$ -tego punktu danego przekroju,

$n$  — liczba wszystkich punktów przekroju ( $n = 10$ ),

$\bar{l}$  — odchyłka średnia, tj:

$$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \quad (5)$$

Wielkość

$$r = \frac{q^2}{s^2} \quad (6)$$

jest zmienną losową o rozkładzie w przybliżeniu normalnym o ile wielkości  $l_i$  są wzajemnie niezależnymi zmiennymi losowymi.

Wartość oczekiwana zmiennej  $r$  przy spełnieniu powyższego warunku wynosi

$$E(r) = 1.$$

Jeśli przypadkowość zmiennych  $l_i$  jest naruszona przez systematyczne

przesunięcie wartości przeciętnej, to należy się spodziewać, że wielkość  $s^2$  będzie znacznie większa od  $q^2$ , a zatem  $r$  będzie znacznie mniejsze od 1.

Jeśli zaś odchyłki  $l_i$  są wzajemnie zależne, to wystąpi sytuacja odwrotna, mianowicie  $r$  przekroczy (w sposób istotny) wartość 1.

Aby można było wnosić o tym, że odchyłki  $l_i$  są wzajemnie niezależnymi zmiennymi losowymi i wartość przeciętna nie jest systematycznie przesunięta, wystarczy by  $r$  spełniało warunek  $r_d \leq r \leq r_g$ , gdzie  $r_d$  i  $r_g$  podane w tablicy [1] i uszeregowane w zależności od liczby punktów pomiarowych i tzw. poziomu istotności.

Poziom istotności jest to wynikające z losowego charakteru zmiennych prawdopodobieństwo wyciągnięcia mylnego wniosku, tj. prawdopodobieństwo tego, że pomimo iż  $r < r_d$  nie występuje systematyczne przesunięcie wartości przeciętnej, lub pomimo że  $r_d \leq r \leq r_g$  takie przesunięcie lub współzależność odchyłek pierwotnych występuje.

Tablica 1

| Liczba przekroi | Poziom istotności | $r_d$ | $r_g$ |
|-----------------|-------------------|-------|-------|
| $n = 10$        | 0,001             | 0,241 | 1,759 |
|                 | 0,01              | 0,376 | 1,624 |
|                 | 0,05              | 0,521 | 1,469 |
| $n = 9$         | 0,001             | 0,221 | 1,779 |
|                 | 0,01              | 0,354 | 1,646 |
|                 | 0,05              | 0,512 | 1,488 |

W tablicy 1 podane są według [3] wartości graniczne  $r_d$  i  $r_g$  (przyjęto tu symetryczny rozkład zmiennej  $r$ , czyli  $r_g = 2 - r_d$ ). Przy  $r < r_d$  występuje systematyczne przesunięcie wartości przeciętnej zaś przy  $r > r_g$  — odchyłki pierwotne  $l_i$  nie są wzajemnie niezależne).

### 8.2.2. Opis obliczeń

Spośród wszystkich pomierzonych 97 ram, 64 ramy zostały wykonane w roku 1969, zaś 33 ramy w roku 1970, przy czym jak to już napisano w poprzednim rozdziale dla każdego elementu z 1969 r. zastosowano dwie ramy, zaś elementy z 1970 r. zostały skonstruowane w oparciu o trzy ramy. Obliczenia wielkości  $s^2$ ,  $q^2$  i  $r$  według wzorów (3) do (6) przeprowadzono ogółem dla 50 ram, co stanowi 51% dostępnego materiału pomiarowego, w tym dla 32 ram z 1969 r. (50%) oraz dla 18 ram z 1970 r. (55%). W obliczeniach tych brano pod uwagę po 10 punktów pomiarowych dla każdej ramy tj. wyłącznie punkty położone na powierzchni piętrzącej. Zastosowanie wyników wszystkich omawianych obliczeń podane jest w tablicy 2. Należy przy tym

Tablica 2

| Oznaczenie elementu |    | Przekrój ramowy | $s^2$ | $q^2$ | $r$   |
|---------------------|----|-----------------|-------|-------|-------|
| Kopiste 69          | 1A | C               | 0,830 | 0,502 | 0,606 |
|                     |    | G               | 3,482 | 0,883 | 0,254 |
|                     | 1B | C               | 1,228 | 0,188 | 0,154 |
|                     |    | G               | 1,783 | 1,252 | 0,703 |
|                     | 1C | C               | 0,880 | 0,689 | 0,782 |
|                     |    | G               | 0,548 | 0,425 | 0,775 |
|                     | 1D | C               | 1,002 | 0,568 | 0,568 |
|                     |    | G               | 1,027 | 0,292 | 0,284 |
|                     | 1E | C               | 10,79 | 5,679 | 0,527 |
|                     |    | G               | 15,19 | 15,64 | 1,06  |
|                     | 1F | C               | 0,514 | 0,155 | 0,302 |
|                     |    | G               | 0,914 | 0,314 | 0,344 |
|                     | 1G | C               | 0,571 | 0,260 | 0,455 |
|                     |    | G               | 0,762 | 0,383 | 0,504 |
|                     | 1H | C               | 2,614 | 1,189 | 0,457 |
|                     |    | G               | 2,387 | 1,397 | 0,585 |
| Roudnice 69         | 1A | C               | 1,019 | 0,874 | 0,858 |
|                     |    | G               | 1,017 | 0,687 | 0,676 |
|                     | 1D | C               | 9,500 | 1,359 | 0,143 |
|                     |    | G               | 3,609 | 0,374 | 0,104 |
|                     | 1F | C               | 0,684 | 0,133 | 0,195 |
|                     |    | G               | 2,999 | 0,491 | 0,164 |
| Lovosice 69         | 1A | C               | 0,778 | 0,551 | 0,708 |
|                     |    | G               | 1,627 | 0,929 | 0,571 |
|                     | 1B | C               | 0,893 | 0,560 | 0,627 |
|                     |    | G               | 0,583 | 0,387 | 0,690 |
|                     | 1D | C               | 0,369 | 0,113 | 0,305 |
|                     |    | G               | 1,123 | 0,191 | 0,170 |
| Kopiste 70          | 1A | C               | 0,127 | 0,090 | 0,708 |
|                     |    | G               | 1,107 | 0,341 | 0,308 |
|                     | 1G | C               | 0,936 | 0,572 | 0,611 |
|                     |    | G               | 1,358 | 0,566 | 0,417 |
|                     | 1A | C               | 0,851 | 0,426 | 0,587 |
|                     |    | G               | 0,353 | 0,237 | 0,672 |
|                     | 1C | I               | 2,608 | 1,787 | 0,685 |
|                     |    | C               | 1,193 | 0,279 | 0,234 |
|                     | 1E | G               | 1,296 | 0,340 | 0,262 |
|                     |    | I               | 2,377 | 1,658 | 0,697 |
|                     | 1F | C               | 0,805 | 0,831 | 1,03  |
|                     |    | G               | 1,049 | 0,904 | 0,862 |
|                     | 1G | I               | 1,712 | 1,428 | 0,834 |
|                     |    | C               | 0,889 | 0,340 | 0,382 |
|                     | 1H | G               | 0,518 | 0,204 | 0,394 |
|                     |    | I               | 2,041 | 0,723 | 0,354 |
|                     | 1G | C               | 0,171 | 0,173 | 1,01  |
|                     |    | G               | 0,558 | 0,458 | 0,821 |
|                     | II | I               | 0,768 | 0,742 | 0,866 |
|                     |    | C               | 0,942 | 0,125 | 0,133 |
|                     |    | G               | 0,359 | 0,180 | 0,502 |
|                     |    | I               | 6,838 | 3,733 | 0,546 |

zaznaczyć, że oznaczenie elementu i ramy służy w niniejszych analizach wyłącznie dla identyfikacji i nie ma żadnego znaczenia przy zestawieniach statystycznych.

Poza zastosowaniem kryterium Abbego do badania ram elementów, kryterium to użyte zostało również do zbadania przekroi nieramowych 6 elementów przez obliczenie wielkości  $r$  dla wszystkich przekroi poprzecznych i podłużnych, za wyjątkiem skrajnych przekroi poprzecznych — o ile nie stanowiły one ram. Krawędzie elementów są bowiem w procesie montażu segmentów odpowiednio dopasowane, zaś kształt skrajnych przekroi nieramowych ulega zmianie.

Tablica 3

| Oznaczenie elementu |    | Przekroje poprzeczne |           |       |       |       |           |                |
|---------------------|----|----------------------|-----------|-------|-------|-------|-----------|----------------|
|                     |    | B                    | C<br>rama | D     | E     | F     | G<br>rama | H<br>I<br>rama |
| Kopiste 1969        | 1B | 0,693                | 0,154     | 0,790 | 0,750 | 0,722 | 0,703     | 0,882          |
| Kopiste 1969        | 1E | 1,20                 | 0,527     | 1,12  | 0,959 | 1,08  | 1,06      | 0,892          |
| Kopiste 1969        | 1G | 0,880                | 0,455     | 0,408 | 0,646 | 0,550 | 0,504     | 1,03           |
| Roudnice 1969       | 1A | 0,392                | 0,143     | 0,255 | 0,121 | 0,333 | 0,104     | 0,723          |
| Kopiste 1970        | 1A | 1,26                 | 0,587     | 0,645 | 0,624 | 0,692 | 0,672     | 1,01           |
| Kopiste 1970        | 1F | 0,978                | 0,382     | 0,623 | 1,41  | 1,10  | 0,394     | 0,870          |

Podobnie jak w przypadku przekroi ramowych, dla wszystkich przekroi poprzecznych uwzględniono wyłącznie punkty pomiarowe powierzchni piętrzących tj. 10 punktów. Pozostałe części przekroi poprzecznych (punkty od 11 do 13), które są położone na powierzchni uszczelniającej, winny być testo-

Tablica 4

| Nr<br>przekroju<br>podłużnego | Oznaczenie elementu |                  |                  |                   |                  |                  |
|-------------------------------|---------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|
|                               | Kopiste 69<br>1B    | Kopiste 69<br>1E | Kopiste 69<br>1G | Roudnice 69<br>1A | Kopiste 70<br>1A | Kopiste 70<br>1F |
| 1                             | 0,336               | 0,711            | 0,649            | 0,800             | 1,07             | 1,34             |
| 2                             | 0,326               | 0,375            | 0,783            | 1,02              | 1,39             | 0,653            |
| 3                             | 0,951               | 0,367            | 0,835            | 0,281             | 1,53             | 0,431            |
| 4                             | 0,592               | 0,826            | 0,596            | 0,427             | 0,517            | 0,877            |
| 5                             | 0,339               | 0,404            | 0,317            | 0,279             | 0,555            | 0,733            |
| 6                             | 0,349               | 0,238            | 0,519            | 0,416             | 0,536            | 0,475            |
| 7                             | 0,360               | 1,07             | 0,839            | 0,422             | 0,526            | 0,248            |
| 8                             | 0,480               | 1,25             | 1,41             | 0,436             | 0,344            | 0,844            |
| 9                             | 0,772               | 0,404            | 0,414            | 0,754             | 0,388            | 1,10             |
| 10                            | 0,598               | 0,306            | 1,09             | 0,297             | 0,530            | 0,573            |
| 11                            | 0,175               | 0,969            | 1,18             | 1,34              | 0,788            | 1,00             |
| 12                            | 0,301               | 1,22             | 1,07             | 1,22              | 0,725            | 0,502            |
| 13                            | 0,769               | 1,45             | 0,90             | 0,657             | 0,404            | 0,997            |

wane oddzielnie, jednak zbyt mała liczba punktów pomiarowych na każdym przekroju poprzecznym powierzchni uszczelniającej (3 punkty) nie pozwala na przeprowadzenie tego typu badań.

Wartości wielkości  $r$  dla poszczególnych przekroi poprzecznych badanych elementów podaje tablica 3.

W tablicy 4 podane są wyniki podobnych badań przeprowadzonych dla przekroi podłużnych tych samych 6 elementów. Przekroje takie dla powierzchni uszczelniającej zawierają taką samą liczbę punktów pomiarowych, jak dla powierzchni piętrzącej tj. 9 punktów, stąd możliwym było włączenie wszystkich przekroi do przytoczonego zestawienia.

### 8.2.3. Interpretacja wyników

Wyniki zastosowania kryterium Abbego do przekroi ramowych przytoczone w tablicy 2 wykazują, że w żadnym z badanych przypadków wielkość  $r$  nie przekroczyła w sposób istotny (tj. uwzględniając tablice 1) wartości 1. Oznacza to zgodnie ze sformułowaniami w punkcie 8.2.1., że odchyłki pierwotne są wielkościami wzajemnie niezależnymi.

Występowanie systematycznego przesunięcia średniej z odchyłek pierwotnych zarówno dla całej grupy badanych przekroi ramowych, jak też z rozbiciem na ramy wykonane w 1969 r. i 1970 r. i przy różnych poziomach istotności ilustruje tablica 5.

Tablica 5

| Oznaczenie<br>badanych<br>ram | Badane<br>przekroje |                       | Poziom istotności            |                       |             |                       |             |                       |
|-------------------------------|---------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|-------------|-----------------------|-------------|-----------------------|
|                               |                     |                       | 0,001                        |                       | 0,01        |                       | 0,05        |                       |
|                               |                     |                       | Przekroje ramowe dla których |                       |             |                       |             |                       |
|                               |                     |                       | $r < 0,241$                  |                       | $r < 0,376$ |                       | $r < 0,531$ |                       |
|                               | Ilość               | Procent <sup>1)</sup> | Ilość                        | Procent <sup>2)</sup> | Ilość       | Procent <sup>2)</sup> | Ilość       | Procent <sup>2)</sup> |
| Wyk. w<br>1969 r.             | 32                  | 64                    | 6                            | 19                    | 12          | 38                    | 17          | 53                    |
| Wyk. w<br>1970 r.             | 18                  | 36                    | 2                            | 11                    | 4           | 22                    | 7           | 39                    |
| Ogółem                        | 50                  | 100                   | 8                            | 16                    | 16          | 32                    | 24          | 48                    |

1) — w stosunku do ogólnej ilości ram  
2) — w stosunku do ilości ram w danej grupie

Systematyczne przesunięcie odchyłek pierwotnych odpowiada niekolewkości przekroju poprzecznego. Spośród trzech stopni „ostrożności” kryterium Abbego odpowiadających trzem zastosowanym poziomom istotności,

poziom 0,001 jest najbardziej „łagodnym” wariantem kryterium, podczas gdy poziom istotności równy 0,05 jest wariantem najbardziej „ostрым”. Z tablicy 5 należy wnosić, iż kształt ram odbiega od kołowego w stopniu wykrywalnym przez zastosowaną metodę pomiarową średnio dla 16 (48%) ram, w tym dla 19 (53%) ram wykonanych w 1969 r., oraz dla 11 (39%) ram wykonanych w 1970 r. Można stąd również wnioskować o wyższej jakości prac wykonawczych przy produkcji elementów w roku 1970 w stosunku do roku 1969.

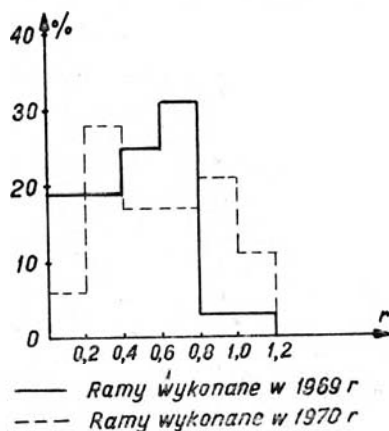
Porównanie jakości prac wykonawczych w latach 1969 i 1970 podaje również tablica 6, w której przytoczone są względne i bezwzględne liczby ram sklasyfikowanych w różnych grupach pod względem wartości  $r$ .

Tablica 6

| Wartości<br>$r$    | Ramy wykonane<br>w 1969 r. |         | Ramy wykonane<br>w 1970 r. |         |
|--------------------|----------------------------|---------|----------------------------|---------|
|                    | Ilość                      | Procent | Ilość                      | Procent |
| $0,0 \leq r < 0,2$ | 6                          | 19      | 1                          | 6       |
| $0,2 \leq r < 0,4$ | 6                          | 19      | 5                          | 28      |
| $0,4 \leq r < 0,6$ | 8                          | 25      | 3                          | 17      |
| $0,6 \leq r < 0,8$ | 10                         | 31      | 3                          | 17      |
| $0,8 \leq r < 1,0$ | 1                          | 3       | 4                          | 21      |
| $1,0 \leq r < 1,2$ | 1                          | 3       | 2                          | 11      |
| Ogółem             | 32                         | 100     | 18                         | 100     |

Graficzną ilustrację tablicy 6 stanowi wykres (rysunek 21).

Z tablicy i wykresu widać, że w przedziałach  $0,8 \leq r < 1,0$  i  $1,0 \leq r < 1,2$ , a więc w przedziałach odpowiadających pracom wykonawczym



Rys. 21

najwyższej jakości, udział ram wykonanych w 1970 r. jest znacznie większy niż ram wykonanych w 1969 r. Również liczba gorzej wykonanych ram (co odpowiada  $r < 0,2$ ) jest większa w 1969 niż w 1970 roku.

Wykres na rysunku 21 wykazuje jedno maksimum dla ram 1969 r., które odpowiada przedziałowi  $0,6 \leq r < 0,8$ , oraz dwa maksima dla ram 1970 r., odpowiadające przedziałom  $0,2 \leq r < 0,4$  i  $0,8 \leq r < 1,0$ . Świadczy to o występowaniu wyraźnych grup ram o wysokiej i niskiej jakości wśród ram z 1970 roku, podczas gdy dla ram z 1969 r. taką wyraźną grupę stanowią ramy o jakości pośredniej. Występowanie dla ram z 1970 r. maksimum w przedziale  $0,2 \leq r < 0,4$  pozwala sądzić, iż wśród poziomów istotności najbardziej właściwym dla kryterium Abbego w zastosowaniu do badania odchylek pierwotnych jest poziom 0,01.

Zastosowanie kryterium Abbego do wszystkich przekroji poprzecznych (za wyjątkiem skrajnych nieramowych) oraz przekroji podłużnych badanych sześciu elementów, dla których zestawienie wyników podają tablice 3 i 4, wykazuje przy poziomie istotności 0,01 niewystępowanie przekroji, dla których odchyłki są wzajemnie zależne, jakkolwiek w przypadku przekroji podłużnych (tablica 4) występują wartości  $r$  bliskie 1,65 ( $r_g$  przy poziomie istotności 0,01).

Tablica 7

| Oznaczenie elementu | Stosunek ilości przekrojów wadliwych<br>do wszystkich przekrojów dla: |                       |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------|
|                     | przekrojów poprzecznych                                               | przekrojów podłużnych |
| Kopiste 69 1B       | 1 : 7                                                                 | 5 : 13                |
| Kopiste 69 1E       | 0 : 7                                                                 | 2 : 13                |
| Kopiste 69 1G       | 0 : 7                                                                 | 1 : 13                |
| Roudnice 69 1A      | 5 : 7                                                                 | 3 : 13                |
| Kopiste 70 1A       | 0 : 8                                                                 | 1 : 13                |
| Kopiste 70 1F       | 1 : 8                                                                 | 1 : 13                |

Tablica 7 podaje dla każdego spośród badanych elementów wartości stosunku liczby przekroji, dla których wykryto systematyczne przesunięcie średniej z odchylek pierwotnych przy poziomie istotności 0,01, do liczby wszystkich badanych przekroji.

Spośród badanych elementów stosunkowo duża liczba wadliwych przekroji poprzecznych została wykryta dla elementu „Roudnice 69 1A”, zaś wadliwych przekroji podłużnych dla elementu „Kopiste 69 1B”. Przytoczone w tablicy 7 liczby odpowiadające tym elementom na tyle odbiegają od pozostałych, że można uznać wymienione elementy jako wybrakowane.

Warto zauważyć, że podane w tablicy 7 proporcje są na ogół mniejsze dla elementów wykonanych w 1970 r. niż dla elementów wykonanych w 1969 r.

Fakt ten potwierdza wysunięte poprzednio wnioski o wyższej jakości prac wykonawczych w roku 1970 niż w roku 1969.

W zakończeniu niniejszych analiz opartych na kryterium Abbego należy podkreślić, że niezależnie od przyjętego stopnia istotności, kryterium to pozwala wysuwać wnioski natury jakościowej, a nie ilościowej. Oznacza to, że kryterium Abbego może z ustaloną wiarygodnością stwierdzić poprawność lub wadliwość danego elementu (w sensie zgodności z pierwszym z przyjętych w punkcie 8.1. założeń) lecz w stosowanym w niniejszym opracowaniu zakresie nie daje „miary” tej poprawności lub wadliwości, tj. na przykład nie pozwala porównać jakości dwu prawidłowo wykonanych elementów.

Wyniki kryterium Abbego są przy tym ściśle związane z dokładnością prac pomiarowych, której poświęcony jest punkt 8.5. niniejszego opracowania.

### 8.3. Badanie rozkładu odchyłek pierwotnych

W celu stwierdzenia, czy odchyłki pierwotne danego elementu mają rozkład normalny o wartości przeciętnej równej zero, zastosowano w niniejszym opracowaniu kryterium stosunku odchylenia standardowego (błędu średniego) do odchylenia przeciętnego (błędu przeciętnego).

Stosunek ten [4] w przypadku rozkładu normalnego winien bowiem wynosić

$$\frac{\sigma}{Q} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cong 1,25, \quad (7)$$

gdzie:

- $\sigma$  — odchylenie standardowe (błąd średni),
- $Q$  — odchylenie przeciętne (błąd przeciętny).

Wielkości  $\sigma$  i  $Q$  są wyznaczone według znanych wzorów rachunku błędów [4]

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum l^2}{n-1}} \quad (8)$$

$$Q = \frac{\sum |l|}{\sqrt{n(n-1)}}, \quad (9)$$

w których:

- $l$  — jest odchyłką pierwotną,
  - $n$  — liczbą punktów pomiarowych danego elementu,
- zaś symbol  $\sum$  oznacza sumowanie względem punktów pomiarowych tego elementu.



c.d. tablicy 8

## Lovosice 69

|                      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 2L                   | 2,4 | 1,3 | 1,9 | 1,1 | 1,2 | 1,2 | 1,6 | 1,0 | 0,7 | 0,8 | 1,8 | 1,3 | 1,4 | 1,4 | 1,0 | 1,9 | 1,3 | 1,1 | 1,0 |
| 1A                   | 2,0 | 1,3 | 1,6 | 1,1 | 1,2 | 1,2 | 1,7 | 1,3 | 0,8 | 1,0 | 2,1 | 1,6 | 1,8 | 1,5 | 1,2 | 2,2 | 1,3 | 1,1 | 0,8 |
| 1B                   | 2,1 | 1,0 | 1,6 | 0,7 | 1,3 | 1,4 | 2,0 | 1,1 | 1,0 | 1,1 | 1,8 | 1,5 | 1,4 | 1,3 | 1,2 | 1,7 | 1,2 | 0,9 | 0,8 |
| 1C                   | 1,8 | 1,2 | 1,5 | 1,0 | 1,2 | 1,2 | 1,5 | 1,2 | 0,8 | 1,0 | 1,7 | 1,5 | 1,3 | 1,3 | 1,1 | 1,4 | 1,0 | 0,8 | 0,7 |
| 1D                   | 1,9 | 1,4 | 1,5 | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,8 | 1,4 | 0,9 | 1,0 | 2,1 | 1,5 | 1,8 | 1,3 | 1,2 | 2,1 | 1,3 | 1,0 | 0,9 |
| 1E                   | 2,4 | 1,2 | 1,8 | 0,9 | 1,3 | 1,3 | 2,0 | 1,1 | 0,8 | 0,9 | 2,1 | 2,0 | 1,8 | 1,9 | 1,1 | 2,6 | 1,7 | 1,2 | 0,8 |
| 1F                   | 3,2 | 1,5 | 2,8 | 1,3 | 1,1 | 1,2 | 2,0 | 1,0 | 0,6 | 0,7 | 1,5 | 2,1 | 1,3 | 1,2 | 1,1 | 1,4 | 1,3 | 0,9 | 0,6 |
| 1G                   | 2,3 | 1,4 | 1,7 | 1,1 | 1,3 | 1,3 | 2,0 | 1,4 | 0,9 | 1,0 | 1,6 | 1,0 | 1,6 | 0,8 | 1,0 | 1,3 | 1,3 | 0,8 | 1,3 |
| 2P                   | 1,7 | 1,1 | 1,4 | 0,9 | 1,2 | 1,3 | 1,5 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 1,5 | —   | 1,4 | —   | 1,2 | 1,5 | 1,1 | 1,0 | —   |
| Śr. arytm. 1,22 1,26 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| Śr. arytm. 1,19 1,12 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |

## Kopiste 70

|                      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 2L                   | 2,2 | 2,0 | 1,6 | 1,4 | 2,3 | 1,5 | 2,0 | —   | 0,9 | —   | 0,8 | 0,8 | 0,6 | 0,7 | 1,4 | 1,2 | 0,8 | 1,0 | —   |
| 1A                   | 1,2 | 1,2 | 0,9 | 0,9 | 1,3 | 1,3 | 1,2 | —   | 1,0 | —   | 1,3 | 1,2 | 1,0 | 1,0 | 1,3 | 1,2 | 1,2 | 0,9 | —   |
| 1B                   | 1,3 | 1,0 | 1,0 | 0,8 | 1,3 | 1,3 | 1,0 | —   | 0,8 | —   | 1,2 | 1,7 | 1,0 | 1,2 | 1,2 | 1,4 | 1,7 | 1,4 | —   |
| 1C                   | 1,5 | 1,1 | 1,3 | 0,8 | 1,2 | 1,3 | 1,1 | —   | 0,7 | —   | 1,6 | 1,1 | 1,2 | 0,9 | 1,3 | 1,2 | 1,1 | 0,7 | —   |
| 1D                   | 1,7 | 1,5 | 1,3 | 1,1 | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,2 | 0,9 | 1,1 | 1,3 | 0,7 | 1,0 | 0,6 | 1,3 | 1,2 | 0,7 | 0,5 | 1,0 |
| 1E                   | 1,3 | 1,1 | 1,1 | 0,9 | 1,2 | 1,2 | 1,1 | —   | 0,8 | —   | 1,6 | 1,4 | 1,3 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 0,9 | —   |
| 1F                   | 1,3 | 1,0 | 1,1 | 0,8 | 1,2 | 1,3 | 1,0 | —   | 0,8 | —   | 1,3 | 1,6 | 1,0 | 1,4 | 1,3 | 1,2 | 1,6 | 1,2 | —   |
| 1G                   | 1,1 | 1,1 | 0,9 | 0,9 | 1,3 | 1,3 | 1,1 | —   | 1,0 | —   | 1,1 | 1,1 | 0,8 | 0,8 | 1,3 | 1,3 | 1,1 | 1,0 | —   |
| 1I                   | 2,3 | 1,7 | 1,8 | 1,3 | 1,3 | 1,3 | 1,7 | 1,3 | 0,7 | 1,0 | 0,9 | 1,0 | 0,8 | 0,7 | 1,2 | 1,4 | 1,0 | 1,1 | 0,9 |
| Śr. arytm. 1,26 1,25 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| Śr. arytm. 1,28 1,27 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |

Błędy średnie wielkości  $\sigma$  i  $Q$  są na podstawie wzorów podanych w [3] takie, że w przybliżeniu oszacowana dokładność pojedynczej wartości  $\sigma/Q$  wynosi około 15% tj. około 0,2.

Obliczenie wartości stosunku  $\sigma/Q$  wykonano dla elementów tworzących sektory: „Kopiste 69”, „Roudnice 69”, „Lovosice 69” i „Kopiste 70”, tj. ogółem dla 40 elementów. Obliczenia te wykonane zostały oddzielnie dla powierzchni piętrzącej i uszczelniającej tych elementów. W większości przypadków wykonano po dwa pomiary elementów, z których pierwszy — bezpośrednio po zakończeniu montażu elementu, zaś drugi — po dokonaniu korekty osi i wyklepaniu powierzchni. Obliczenia  $\sigma/Q$  przeprowadzono oddzielnie dla obu pomiarów. Pełne zestawienie wykonanych obliczeń podaje tabela 8.

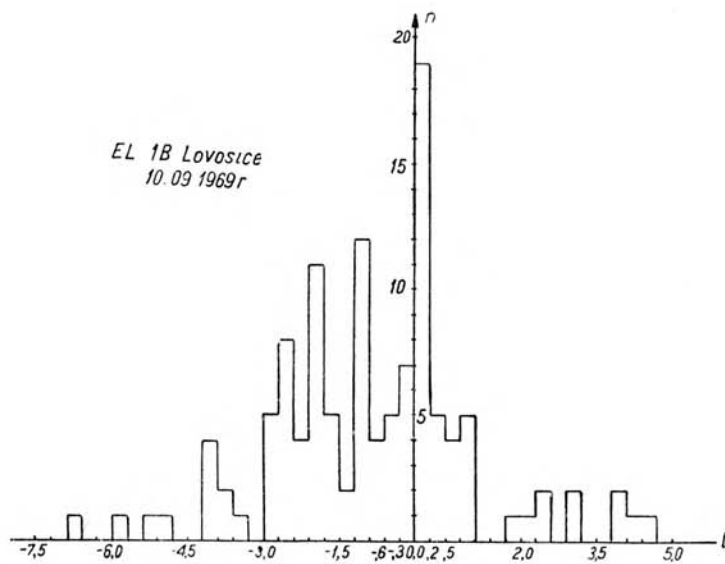
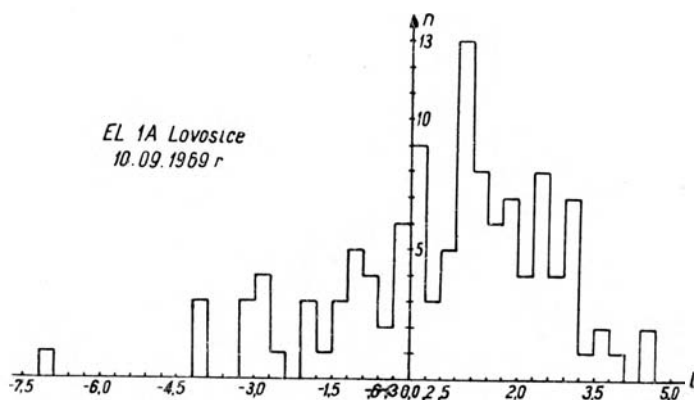
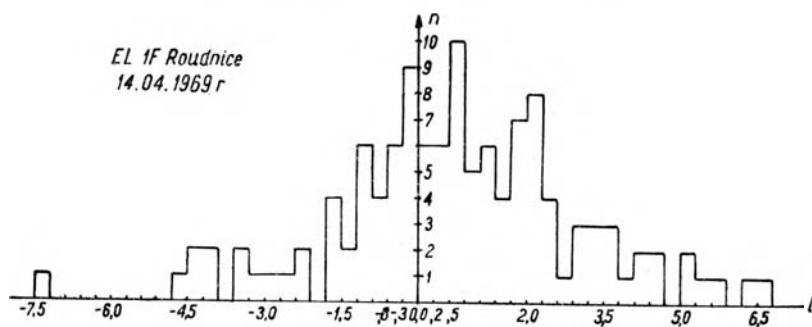
W obliczeniach nie brano pod uwagę przekrojów skrajnych o ile nie były one ramami.

Jak wynika z tego zestawienia średnie wartości  $\sigma/Q$  w poszczególnych grupach są na ogół bardzo bliskie wartości oczekiwanej 1,25. Również dla poszczególnych elementów wartości  $\sigma/Q$  mieszczą się w granicach tolerancji w otoczeniu 1,25. Świadczy to o słuszności przyjętego założenia, że rozkład odchyłek pierwotnych jest normalny, o zerowej wartości przeciętnej.

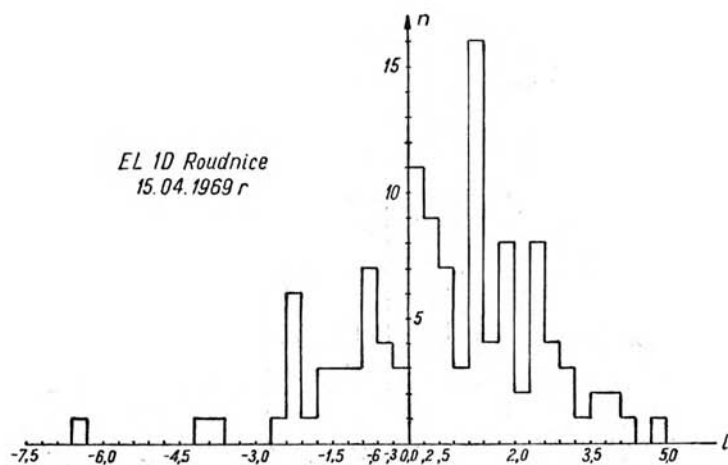
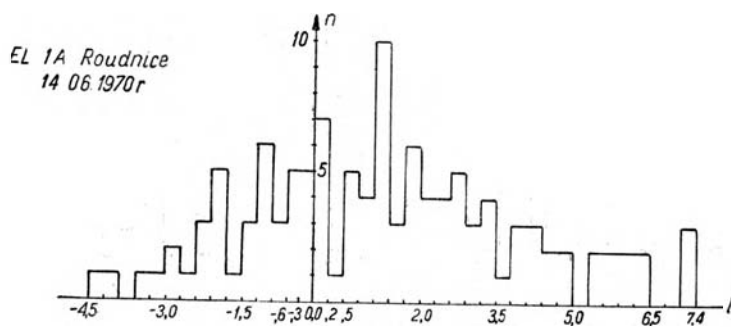
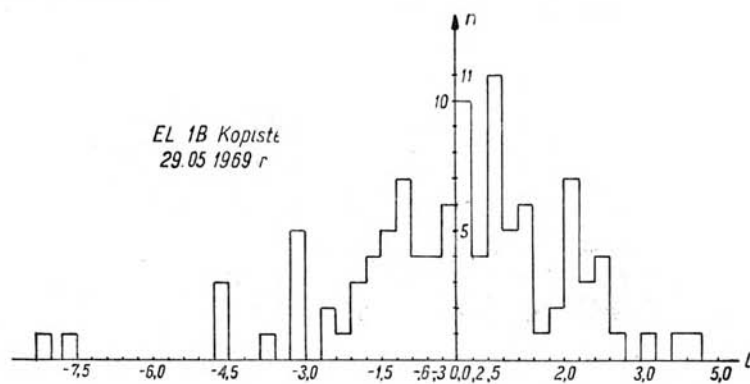
Dla 12 elementów sporządzono wykresy gęstości odchyłek pierwotnych w odstępach co 0,2 mm tj. wykresy liczby odchyłek w każdym interwale (rys. 22). Wykresy te mają kształt zbliżony do kształtu krzywej gęstości prawdopodobieństwa w rozkładzie normalnym. Potwierdza to poprzedni wniosek co do normalnego rozkładu odchyłek pierwotnych.

#### 8.4. Ocena efektywności wyrównania oraz poprawności pomiaru i korekty

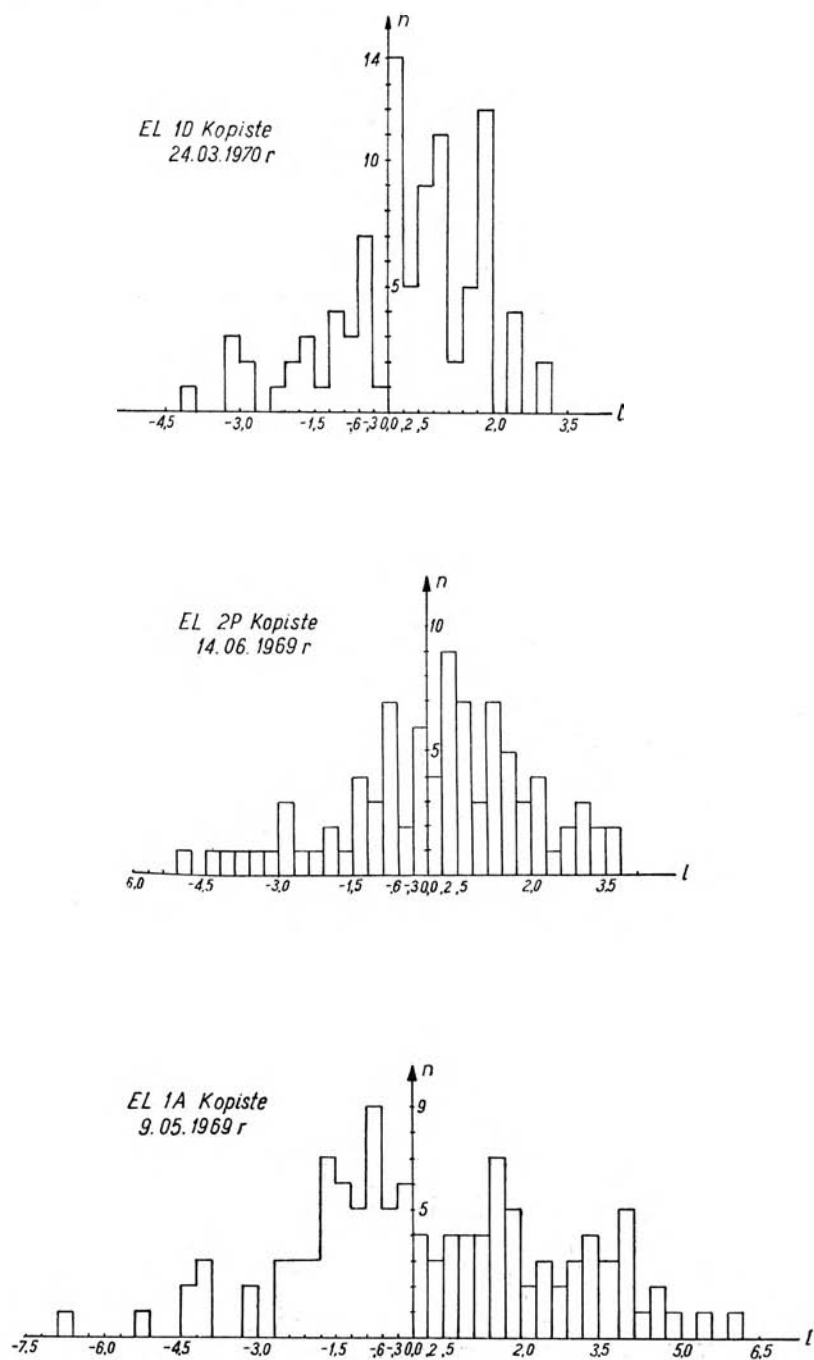
Efektywność procesu wyrównawczego, zmierzająca do wyznaczenia najprawdopodobniejszych wartości składowych korekty osi elementu i opartej na minimum sumy kwadratów odchyłek pierwotnych dla przekroji ramowych, charakteryzuje zmiana wartości błędu średniego po wyrównaniu (biorąc pod uwagę wszystkie punkty pomiarowe danego elementu) w stosunku do wartości tego odchylenia przed wyrównaniem. Miara tej efektywności jest wartość stosunku obu odchyłek standardowych  $\sigma'/\sigma$  gdzie:  $\sigma$  — średni błąd przed wyrównaniem,  $\sigma'$  — średni błąd po wyrównaniu, przy czym jeśli  $\sigma'/\sigma < 1$  wyrównanie powoduje „polepszenie” rozkładu odchyłek, zaś jeśli  $\sigma'/\sigma > 1$  powoduje „pogorszenie” tego rozkładu. W tym ostatnim przypadku nie można jednak mówić o niecelowości przeprowadzenia wyrównania, gdyż nie może ono powodować „pogorszenia” rozkładu odchyłek dla przekroji ramowych, a bezwzględne wartości tych odchyłek mogą ulec zmniejszeniu tylko wskutek korekty osi elementu. W naszych rozważaniach bierzemy natomiast pod uwagę również odchyłki na przekrojach nieramo-



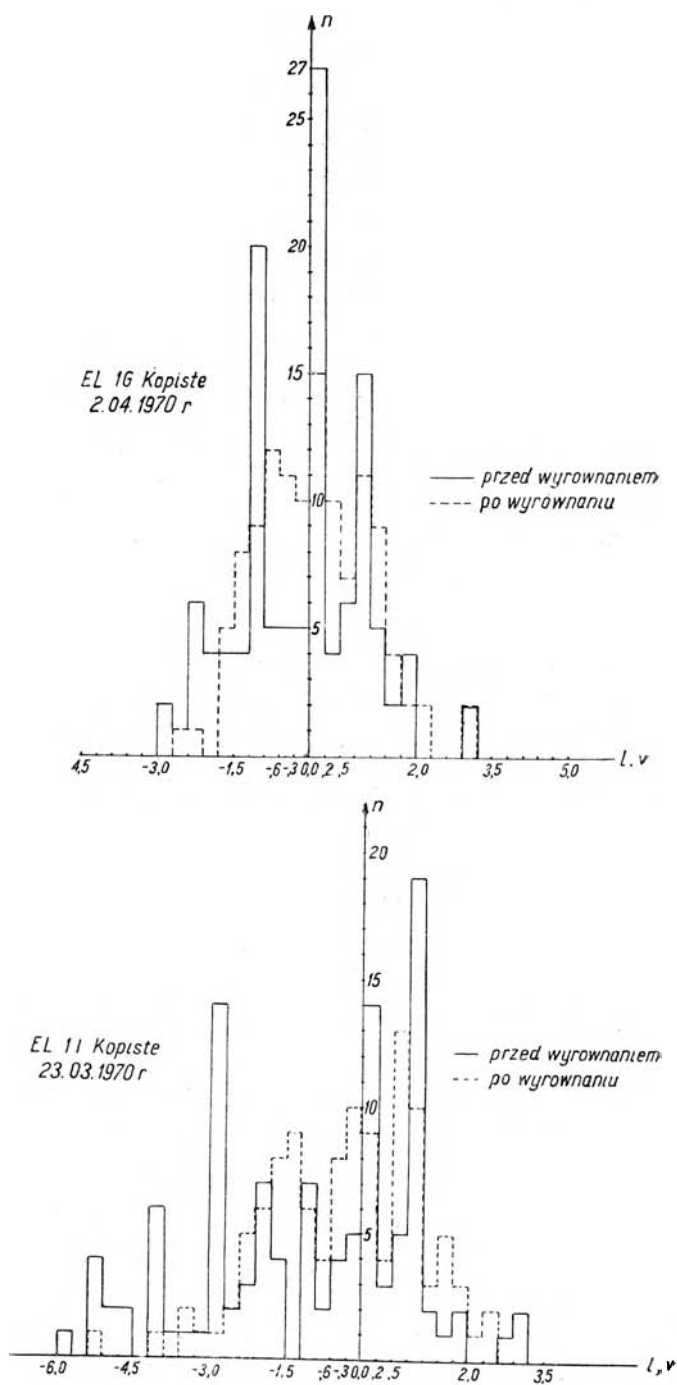
Rys. 22 a, b, c



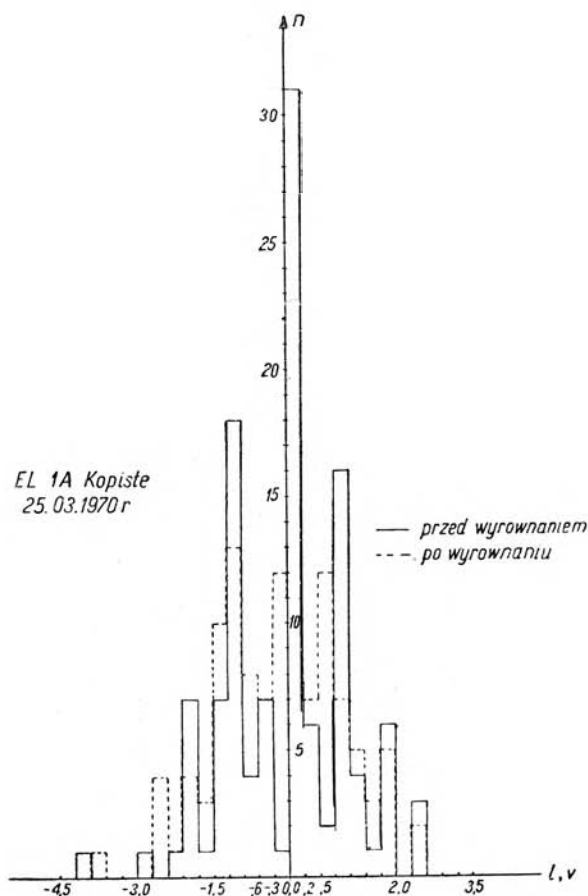
Rys. 22 d, e, f



Rys. 22 g, h, i



Rys. 22 j, k



Rys. 221

wych, które nawet ewentualnie zwiększone co do wartości bezwzględnych wskutek zmiany położenia osi, mogą być następnie skorygowane drogą wyklepywania.

Do obliczenia stosunku  $\sigma'/\sigma$  wykorzystano otrzymane poprzednio według wzoru (8) wartości  $\sigma$ . Wzór ten wykorzystano również do obliczenia odchyleń  $\sigma'$  z tym jednak, że zamiast odchylek pierwotnych  $l$  występują tu odchyłki wtórne  $v$ , tj. odchyłki będące rezultatem wyrównania. Zestawienie wyników obliczeń wykonanych dla tych samych co w punkcie 8.3. sektorów przytoczone jest w tabelicy 8.

Analiza uzyskanych stosunków — wykazuje, że w większości przypadków występują wartości mniejsze od 1. Świadczy to o tym, że proces wyrównawczy nie tylko minimalizuje sumę kwadratów odchylek na przekrojach ramowych, lecz również powoduje na ogół zmniejszenie bezwzględ-

nych wartości odchyłek na wszystkich przekrojach badanego elementu. W stosunkowo nielicznych przypadkach nastąpiło istotne powiększenie błędu średniego — z reguły dla powierzchni uszczelniających. Dla powierzchni tych występuje również więcej przypadków niż dla powierzchni piętrzących, kiedy stosunek  $\sigma'/\sigma$  przekracza 1. Oba stwierdzenia prowadzą do wniosku, że proces wyrównawczy jest bardziej efektywny dla powierzchni piętrzącej niż uszczelniającej. Może to wynikać zarówno z większej liczby punktów pomiarowych na pierwszej z nich, jak też z mniejszego promienia krzywizny drugiej powierzchni. Obie powierzchnie są bowiem usytuowane względem siebie i osi w ten sposób, że uzyskanie istotnego zmniejszenia stosunku  $\sigma'/\sigma$  dla obu jednocześnie jest możliwe tylko w wyjątkowych przypadkach.

Ważnym zjawiskiem wśród wyników podanych w tabelicy 8 jest to, że dla pomiarów II (tj. po korekcji) wartości  $\sigma'/\sigma$  zawierają się w mniejszym otoczeniu jedności niż dla pomiarów I. Wystąpienie tego zjawiska może służyć jako jeden ze sprawdzianów, że zmiana położenia osi i wyklepywania powierzchni zostały dokonane prawidłowo. Wyrównanie odchyłek przeprowadzone dla poprawnie skorygowanego elementu powinno bowiem wykazać zerowe składowe „ponownej” zmiany położenia osi, co stanowi sprawdzian dokonanej zmiany, oraz nie spowodować zmiany wartości błędu średniego — co jest sprawdzianem prawidłowości całej korekty. Inaczej mówiąc, po prawidłowo dokonanej korekcie wyrównanie pomierzonych odchyłek nie powinno wskazywać na konieczność nowej korekty. W przypadku, gdy stosunek  $\sigma'/\sigma$  dla pomiaru II nie jest większy niż 0,7 lub nie jest mniejszy niż 1,3 można wnosić o nieprawidłowości przynajmniej jednej z następujących czynności:

- pomiaru I,
- zmiany położenia osi,
- wyklepania,
- pomiaru II.

Spośród 32 elementów podanych w tabelicy 8, dla których możliwe jest przeprowadzenie opisanego powyżej testu stwierdzono występowanie w/w nieprawidłowości w następujących elementach (PP — powierzchnia piętrząca; PU — powierzchnia uszczelniająca):

Kopiste 69 1C — PU  
Kopiste 69 1G — PP  
Kopiste 69 1H — PP  
Roudnice 69 2L — PP  
Roudnice 69 1A — PP i PU  
Roudnice 69 1C — PP i PU  
Roudnice 69 1H — PP i PU  
Roudnice 69 1I — PP i PU

Roudnice 69 2P — PP i PU  
 Lovosice 69 1C — PP  
 Lovosice 69 1F — PP i PU  
 Lovosice 69 1G — PU

### 8.5. Oszacowanie błędów pomiaru odchyłki

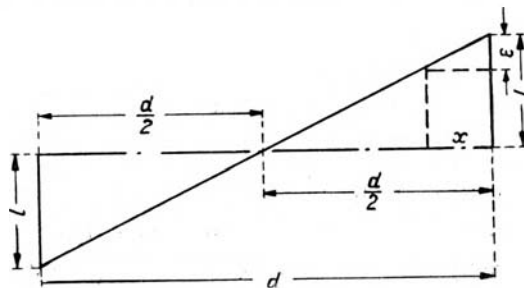
Na wartość odchyłki pierwotnej punktu pomiarowego na dowolnym przekroju ramowym składają się dwa typy błędów, a mianowicie:

- błąd wykonania ramy (łącznie z błędem usytuowania osi),
- błąd pomiaru.

Przy powtórnych pomiarach elementu, tj. po dokonaniu zmiany położenia osi, zmierzone wartości odchyłek powinny być równe odchyłkom, jakie wynikają z obliczenia, po wprowadzeniu korekty osi na podstawie pierwszego pomiaru (odchyłki wtórne). Praktycznie występują jednak różnice między pierwotnymi odchyłkami z drugiego pomiaru a wtórnymi odchyłkami z pierwszego pomiaru. Różnice te powstają przede wszystkim wskutek błędów obu pomiarów, a także w wyniku wpływu takich czynników, jak:

- błędy identyfikacji punktów pomiarowych przy obu pomiarach,
- różnica temperatur elementów w trakcie obu pomiarów,
- wykonanie korekty osi.

Dla oszacowania wpływu błędów identyfikacji punktów pomiarowych na omawianą różnicę rozważymy rysunek 23, na którym odcinek o długości



Rys. 23

$d$  oznacza odległość między sąsiednimi punktami pomiarowymi,  $l$  — odchyłkę pierwotną, zaś  $x$  — błąd identyfikacji punktu pomiarowego oraz  $\epsilon$  — wpływ tego błędu na wielkość odchyłki.

Z rysunku tego wynika, że

$$\epsilon = 2 \frac{l}{d} x, \quad (10)$$

co dla  $l = 3 \text{ mm}$ ,  $d = 560 \text{ mm}$  oraz  $x = 10 \text{ mm}$  daje  $\epsilon = 0,1 \text{ mm}$ .

Zważywszy, że rozpatrywany przypadek jest skrajnie niekorzystny, bowiem  $l$  jest duże, oraz że wzór (10) zakłada przeciwne znaki odchyłek na sąsiednich punktach (co wynika również z rys. 23) — wpływ błędu identyfikacji można pominąć.

Wpływ czynnika termicznego, który ma charakter systematyczny i jest stały dla danej pary elementów, można ograniczyć do minimum przez odpowiedni dobór par pomiarów tego samego elementu tak, aby różnica temperatur była możliwie najmniejsza. Przy praktycznych obliczeniach brano przy tym pod uwagę temperaturę powietrza w Tczewie według danych Państwowego Instytutu Hydrologiczno-Meteorologicznego, ponieważ w trakcie prac pomiarowych pomiary temperatur nie były wykonywane.

Błąd wykonania korekty osi wpływa na omawianą różnicę odchyłek również w sposób systematyczny, jakkolwiek odchyłki w oparciu o które obliczono składowe zmiany położenia osi mają charakter przypadkowy o rozkładzie normalnym i są wzajemnie niezależne. Błędy te są jednak stałe dla danego elementu, stąd uwzględniając usytuowanie ramy względem końców osi — ich wpływ jest stały dla wszystkich punktów pomiarowych danej ramy. Szczegółowa analiza tego typu błędów podana jest w punkcie 8.6. Wpływ tych błędów objawia się w ten sposób, że różnice odchyłek, jakkolwiek przypadkowe i o rozkładzie normalnym, mają dla danego przekroju ramowego wartość średnią (nadzieję matematyczną) różną od zera.

Z tego względu średni błąd różnicy odchyłek należy obliczać nie bezpośrednio na podstawie samych różnic, lecz na podstawie ich odchyłeń od wartości średniej, tj. według wzoru:

$$\sigma_{\Delta}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}{n-1} \quad (11)$$

gdzie:

$\Delta_i = l_i^{\text{II}} - v_i^{\text{I}}$  — różnica odchyłek,

$l_i^{\text{II}}$  — odchyłka pierwotna z drugiego pomiaru,

$v_i^{\text{I}}$  — odchyłka wtórna z pierwszego pomiaru,

$\bar{\Delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i$  — różnica średnia,

$n$  — liczba punktów pomiarowych powierzchni uszczelniającej przekroju ramowego ( $u = 10$ ).

Wielkość  $\Delta$  wyraża przy tym łączny systematyczny wpływ czynnika termicznego, błędu wykonania korekty osi i błędów pomiarowych, zaś  $\sigma_{\Delta}/\sqrt{n}$  jest błędem średnim wielkości  $\bar{\Delta}$ .

Zakładając, że pomiary są wykonywane ze stałą dokładnością oraz pomijając wpływy termiczne i błędy identyfikacji, wielkość  $\sigma_{\Delta}^2$  jest równa po-

dwójnej wartości kwadratu średniego błędu pomiaru. Ten ostatni błąd można więc wyznaczyć z wzoru

$$\sigma_{\text{pom}}^2 = \frac{1}{2} \sigma_{\Delta}^2 \quad (12)$$

Tablica 9

| Oznaczenie elementu | Oznaczenie przekroju ramowego | $ \Delta t $<br>°C | $\bar{\Delta}$<br>mm | $\sigma_{\text{pom}}$<br>mm |
|---------------------|-------------------------------|--------------------|----------------------|-----------------------------|
| Kopiste 69 2P       | B                             | 2,4                | $-0,6 \pm 0,3$       | 0,6                         |
|                     | C                             |                    | $-0,9 \pm 0,3$       | 0,6                         |
|                     | G                             |                    | $0,0 \pm 0,2$        | 0,5                         |
| Kopiste 69 1A       | C                             | 4,2                | $+0,6 \pm 0,2$       | 0,4                         |
|                     | G                             |                    | $-0,2 \pm 0,4$       | 1,0                         |
| Kopiste 69 1B       | C                             | 2,8                | $+0,6 \pm 0,1$       | 0,3                         |
|                     | G                             |                    | $-0,2 \pm 0,3$       | 0,8                         |
| Roudnice 69 1C      | C                             | 1,9                | $+0,4 \pm 0,6$       | 1,4                         |
|                     | G                             |                    | $+1,2 \pm 0,4$       | 0,8                         |
| Roudnice 69 2L      | B                             | 1,9                | $-0,4 \pm 0,7$       | 1,6                         |
|                     | C                             |                    | $-0,2 \pm 0,5$       | 1,0                         |
|                     | G                             |                    | $0,0 \pm 0,3$        | 0,6                         |
| Lovosice 69 1F      | C                             | 3,8                | $-0,1 \pm 0,2$       | 0,4                         |
|                     | G                             |                    | $+1,0 \pm 0,2$       | 0,4                         |
| Kopiste 70 1B       | C                             | 2,3                | $+0,1 \pm 0,2$       | 0,4                         |
|                     | G                             |                    | $+0,1 \pm 0,2$       | 0,5                         |
|                     | I                             |                    | $\pm 0,4 \pm 0,4$    | 0,9                         |

Analizując wyniki 17 wyznaczeń błędów pomiaru odchyłki, które są przytoczone w tablicy 9, należy stwierdzić, że w 4 przypadkach, a mianowicie dla przekroi:

- C — element „Kopiste 69 2P”,
- C — element „Kopiste 69 1A”,
- G — element „Roudnice 69 1C”,
- G — element „Lovosice 69 1F”,

wystąpiło odchylenie wartości  $\bar{\Delta}$  od zera. Świadczy to o wystąpieniu w tych przypadkach wymienionych poprzednio czynników o charakterze systematycznym. W pozostałych przypadkach czynniki te nie wystąpiły lub ich wpływy były jednakowe przy pomiarach pierwszym i drugim i w procesie obliczania różnic  $\Delta$  zredukowały się.

Średni błąd pojedynczego pomiaru odchyłki  $\sigma_{\text{pom}}$  daje się wyznaczyć jak wykazuje tablica 9, z dość dużym rozrzutem: od 0,3 mm do 1,6 mm. Rozrzut ten wynika prawdopodobnie z nieliniowych odkształceń elementu pod wpływem temperatury oraz wskutek wpływu czynników atmosferycznych

i innych podczas pomiarów (np. wiatr). W czterech przypadkach wartość średniego błędu pomiaru jest równa lub przekracza 1 mm, co wydaje się świadczyć o szczególnie złych warunkach pomiarowych.

Ogólnie można stwierdzić, że w typowych warunkach błąd pojedynczego pomiaru odchyłki wynosi około  $\pm 0,5$  mm.

#### 8.6. Wpływ błędów wykonania korekty osi na wartości odchyłek w przekrojach ramowych

Zmianę wartości odchyłki wskutek dokonania korekty położenia osi elementu wyznacza wzór (1) (patrz punkt 2.2.).

$$dl = \frac{l}{R} (z dz_P + y dy_P + z x a + y x b),$$

w którym jak wiadomo:

$x, y, z$  — są współrzędnymi punktu pomiarowego,

$dy_P, dz_P$  i  $dy_K, dz_K$  — stanowią elementy korekty osi, odpowiednie dla jej punktu początkowego i końcowego,

$R$  — nominalna wartość promienia powierzchni elementu,

$D$  — długość elementu.

$$a = \frac{dz_K - dz_P}{D},$$

$$b = \frac{dy_K - dy_P}{D},$$

Dokonanie korekty osi polega na zmianie jej położenia na obu końcach o wyznaczone rachunkowo składowe  $dy_P, dz_P, dy_K, dz_K$ . Składowe te realizowane są w trakcie korekty z pewnymi błędami, co do których zakładamy, że są przypadkowe, niezależne, mają rozkład normalny i są jednakowe, tj. przyjmujemy następującą zależność między błędami średnimi:

$$\sigma_{dy_P} = \sigma_{dz_P} = \sigma_{dy_K} = \sigma_{dz_K} = \sigma. \quad (13)$$

Uwzględniając powyższe założenia oraz zależność (13) i wzory na współczynniki  $a$  i  $b$  otrzymujemy z (1) po odpowiednich przekształceniach i na podstawie prawa Gaussa o przenoszeniu się niezależnych błędów średnich:

$$\sigma_l^2 = \frac{(D-x)^2 + x^2}{D^2} \sigma^2. \quad (14)$$

Wzór ten wyraża wpływ średniego błędu realizacji składowych korekty

osi na średni błąd odchyłki. Warto zauważyć, że wyraz  $\frac{x^2}{D^2}$  jest wpływem błędu korekty na jednym końcu osi, zaś wyraz  $\frac{(D-x^2)}{D^2}$  — na drugim końcu, przy czym w licznikach tych wyrazów są kwadraty odległości badanego punktu odpowiednio od początku i końca elementu (wzdłuż tworzącej). W związku z tym błędy korekty osi mają na przekroje poprzeczne wpływy symetryczne względem środkowej płaszczyzny elementu prostopadłej do jego osi, tj. odpowiednie wartości ( $\sigma_l$ ) są jednakowe dla przekroi ramowych C i G oraz B i I (dla elementów skrajnych),  $\sigma_l$  przy tym jest niezależne od promienia powierzchni elementu.

Wielkość  $\sigma_l$  nie zależy od współrzędnych  $y$  i  $z$ . Oznacza to, że przy stałym  $x$ , tj. dla danego przekroju poprzecznego,  $\sigma_l$  jest stałe. Dla danego elementu wpływ błędów korekty ma charakter systematyczny i jest związany z konkretnymi wartościami niezgodności między obliczonymi a zrealizowanymi składowymi korekty.

Przyjmując  $\sigma = 0,3$  mm dla przekroi C i G mamy  $\sigma_l = 0,24$  mm, zaś dla przekroi B i I —  $\sigma_l = 0,21$  mm.

## 9. Wnioski końcowe

Celem analizy wyników opisanych w niniejszym rozdziale było zbadanie prawidłowości i skuteczności zastosowanych metod pomiarowych, obliczeniowych i korekcyjnych oraz oszacowanie jakości prac wykonawczych i montażowych.

Analiza wyników, jak też sama metoda kontroli geodezyjnej, opierają się na pewnych hipotezach co do losowego charakteru odchyłek. Statystyczna weryfikacja tych hipotez ma istotne znaczenie jeśli chodzi o prawidłowość metody kontroli geodezyjnej oraz słuszność dalszych wniosków wynikających z analizy wyników.

Wspomniane hipotezy zweryfikowano za pomocą kryterium Abbego oraz testu opartego na stosunku odchylenia standardowego do odchylenia przeciętnego (dodatkowo zilustrowanego wykresem gęstości prawdopodobieństwa). Metody te pozwalają stwierdzić, że omawiane hipotezy są prawdziwe, to znaczy, że:

1) odchyłki, które wyrażają niezgodności pomiędzy projektowanym a zrealizowanym kształtem powierzchni, są wzajemnie niezależnymi zmiennymi losowymi o rozkładzie normalnym;

2) wynika stąd, że odchyłki te można traktować podobnie, jak traktuje się błędy pomiarowe.

Jednocześnie udało się stwierdzić, że kryterium Abbego jest dość dobrym

narzędziem dla zbadania wzajemnej niezależności statystycznej zmiennych losowych oraz występowania w ciągu tych zmiennych systematycznego przesunięcia wartości przeciętnej. Najwłaściwszym poziomem istotności z jakim należy stosować kryterium Abbego w tego typu pracach, jest poziom 0,01. Jeśli zaś chodzi o drugą metodę, tj. o test  $\sigma/Q$  to jest to dość słabe kryterium. Oznacza to, że odchylenia stosunku  $\sigma/Q$  od jego wartości oczekiwanej mogą być duże nawet wtedy, gdy rozkład badanych zmiennych jest normalny. Dla lepiej umotywowanych wniosków co do normalności rozkładu odchyłek należałoby zastosować inne testy statystyczne, na przykład test „ $\chi$  — kwadrat”, które wymagają jednak dość żmudnych prac rachunkowych.

Jakość prac wykonawczych i montażowych charakteryzują następujące wnioski z analizy wyników:

1) niezgodność zrealizowanego kształtu ram w stosunku do kształtu projektowanego wykryto dla 48% badanych ram;

2) jakość prac wykonawczych i montażowych była wyższa w 1970 r. niż w 1969 r.;

3) wykryto pewną niestaranność wykonania powierzchni uszczelniających dla niektórych elementów (w badanym materiale — dla elementów „Roudnice 69 1A” i „Kopiste 69 1B”).

Jakości prac pomiarowych i korekcyjnych, a także efektywności procesu wyrównawczego, dotyczą następujące wnioski:

1) zgodność aktualnego kształtu powierzchni elementu z kształtem projektowanym charakteryzuje średnia kwadratowa z pomierzonych odchyłek, która jest bliska co do wartości tzw. odchyleniu standardowemu czyli błędowi średniemu;

2) zgodnie z powyższym, miarą tego, jak obliczone składowe korekty osi wpływają na zmniejszenie odchyłek, jest stosunek  $\sigma'/\sigma$ , tj. stosunek średniego błędu pojedynczej odchyłki wtórnej do średniego błędu pojedynczej odchyłki pierwotnej; im stosunek ten jest mniejszy, tym skuteczność korekty osi o obliczone składowe jest większa (pomijamy tu dokładność, z jaką składowe te są praktycznie realizowane);

3) zastosowana metoda kontroli geodezyjnej powoduje zmniejszenie wartości średniej odchyłki o 30%, przy czym wzięto tu pod uwagę również odchyłki poza przekrojami ramowymi;

4) wartości  $\sigma'/\sigma$  obliczone na podstawie pomiarów wykonanych po korekcie osi powinny być bliskie 1; kryterium to może służyć jako sprawdzian prawidłowości przed i po korekcie osi, jak również prawidłowości wykonania samej korekty;

5) tego typu nieprawidłowości stwierdzono w badanym materiale dla 12 elementów, tzn. dla 30% wszystkich badanych elementów (dla powierzchni piętrzącej lub uszczelniającej);

6) omawiana analiza wyników umożliwiła również oszacowanie średniego błędu pomiaru pojedynczej odchyłki; błąd ten wynosi około 0,5 mm i w dużym stopniu zależy od warunków pomiarowych;

7) drogą teoretyczną oszacowano wpływ dokładności, z jaką praktycznie realizowane są składowe korekty osi; przy założeniu, że błąd realizacji składowych wynosi 0,3 mm stwierdzono, że jego wpływ na wartości odchyłek wynosi około 0,2 mm (dla przekroji ramowych).

W zakończeniu należy dodać, iż opisane metody geodezyjnych prac kontrolnych są ściśle dostosowane do technologii produkcji elementów piętrzących. Zgodnie z tą technologią każdy element składa się z ram usztywniających, których raz nadany kształt nie może być zmieniany, oraz z blach stanowiących właściwe powierzchnie elementu, których kształt po zakończeniu montażu może być zmieniany mechanicznie. Dostosowany do tej technologii proces korekcji obejmuje więc dwa etapy i korektę położenia osi elementu, mającą na celu odpowiednią zmianę wartości odchyłek na przekrojach ramowych, oraz „wyklepywanie” części blaszanych w celu zmiany wartości odchyłek poza przekrojami ramowymi.

Opisana metoda kontroli nie zależy natomiast, za wyjątkiem sposobu obliczania współczynników równań obserwacyjnych, od projektowanego kształtu powierzchni. Metodę tą można więc stosować nie tylko do powierzchni będących fragmentami walca obrotowego, jak w przypadku opisanym w niniejszej pracy, lecz również do innych powierzchni opartych na konstrukcji ramowej.

#### LITERATURA

- [1] Hausbrandt S.: Rachunki geodezyjne. W-wa FPWK 1953.
- [2] Janusz W.: Opracowanie metod pomiarów i obliczeń związanych z kontrolą elementów piętrzących jazów. Przegląd Geodezyjny Nr 7/70.
- [3] Linnik J. W.: Metoda najmniejszych kwadratów i teoria opracowania obserwacji. W-wa PWN 1962.
- [4] Warchałowski E.: Rachunek wyrównawczy dla geodetów. W-wa PWN 1955.

Uwaga: Rysunki 2, 9, 10, 11, 13, 17, 18, 19 są zdjęciami wykonanymi przez dr inż. Janusza W.

*Recenzowali: doc. dr inż. Andrzej Hermanowski  
dr inż. Krystyna Kamińska-Czyż*

*Rękopis złożono w Redakcji w listopadzie 1970 r.*

Protokół pomiaru i obliczenia odchyłek elementu EL — 1H. Roudnice 14. 09. 70 r.

|   | A                                  | B                                   | C                                  | D                                   | E                                  | F                                   | G                                 | H                                  | I                                   |
|---|------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 49,9   50,0<br>50,0<br>0,0<br>-1,5 | 50,9   50,8<br>50,8<br>-0,8<br>-2,3 | 48,1   47,9<br>48,0<br>2,0<br>0,6  | 49,3   49,3<br>49,3<br>0,7<br>-0,6  | 47,9   48,0<br>48,0<br>2,0<br>0,7  | 48,6   48,4<br>48,5<br>1,5<br>0,2   | 48,7   48,9<br>48,8<br>1,2<br>0,0 | 49,0   49,1<br>49,0<br>1,0<br>-0,1 | 49,5   49,5<br>49,5<br>0,5<br>-0,6  |
| 2 | 48,0   48,0<br>48,0<br>2,0<br>0,5  | 48,0   47,9<br>48,0<br>2,0<br>0,6   | 48,5   48,5<br>48,5<br>1,5<br>0,2  | 49,0   49,1<br>49,0<br>1,0<br>-0,2  | 49,9   50,0<br>50,0<br>0,0<br>-1,1 | 48,9   49,0<br>49,0<br>1,0<br>0,0   | 48,9   48,9<br>48,9<br>1,1<br>0,1 | 50,0   49,9<br>50,0<br>0,0<br>-0,9 | 48,0   48,1<br>48,0<br>2,0<br>1,1   |
| 3 | 48,4   48,6<br>48,5<br>1,5<br>0,2  | 48,0   48,1<br>48,0<br>2,0<br>0,8   | 49,1   49,0<br>49,0<br>1,0<br>-0,1 | 50,1   50,0<br>50,0<br>0,0<br>-1,0  | 50,0   50,0<br>50,0<br>0,0<br>-1,0 | 48,9   49,0<br>49,0<br>1,0<br>0,0   | 49,1   49,0<br>49,0<br>1,0<br>0,1 | 49,5   49,5<br>49,5<br>0,5<br>-0,3 | 48,4   48,6<br>48,5<br>1,5<br>0,7   |
| 4 | 48,0   48,1<br>48,0<br>2,0<br>1,0  | 48,6   48,8<br>48,7<br>1,3<br>0,3   | 49,1   49,0<br>49,0<br>1,0<br>0,1  | 50,0   50,1<br>50,0<br>0,0<br>-0,8  | 49,8   49,6<br>49,7<br>0,3<br>-0,5 | 50,3   50,3<br>50,3<br>-0,3<br>-1,0 | 49,5   49,1<br>49,3<br>0,7<br>0,0 | 48,3   48,2<br>48,2<br>1,8<br>1,2  | 50,0   50,1<br>50,0<br>0,0<br>-0,6  |
| 5 | 48,4   48,6<br>48,5<br>1,5<br>0,7  | 50,1   50,0<br>50,0<br>0,0<br>-0,7  | 50,0   50,0<br>50,0<br>0,0<br>-0,7 | 50,0   50,0<br>50,0<br>0,0<br>-0,6  | 48,7   48,9<br>48,8<br>1,2<br>0,6  | 49,1   49,0<br>49,0<br>1,0<br>0,3   | 49,2   49,3<br>49,2<br>0,8<br>0,2 | 49,2   49,4<br>49,3<br>0,7<br>0,1  | 50,1   49,9<br>50,0<br>0,0<br>-0,5  |
| 6 | 49,8   49,8<br>49,8<br>0,2<br>-0,3 | 49,1   48,9<br>49,0<br>1,0<br>0,5   | 49,3   49,1<br>49,2<br>0,8<br>0,4  | 50,3   50,5<br>50,4<br>-0,4<br>-0,8 | 47,9   48,1<br>48,0<br>2,0<br>1,6  | 50,0   50,1<br>50,0<br>0,0<br>-0,3  | 49,5   49,1<br>49,3<br>0,7<br>0,3 | 49,1   48,9<br>49,0<br>1,0<br>0,7  | 50,5   50,5<br>50,5<br>-0,5<br>-0,8 |



Zestawienie równań poprawek, równań normalnych oraz rozwiązanie tych równań dla elementu  
1 EL- 1 H Roudnice, pomierzonego dnia 14. 09. 70 r.

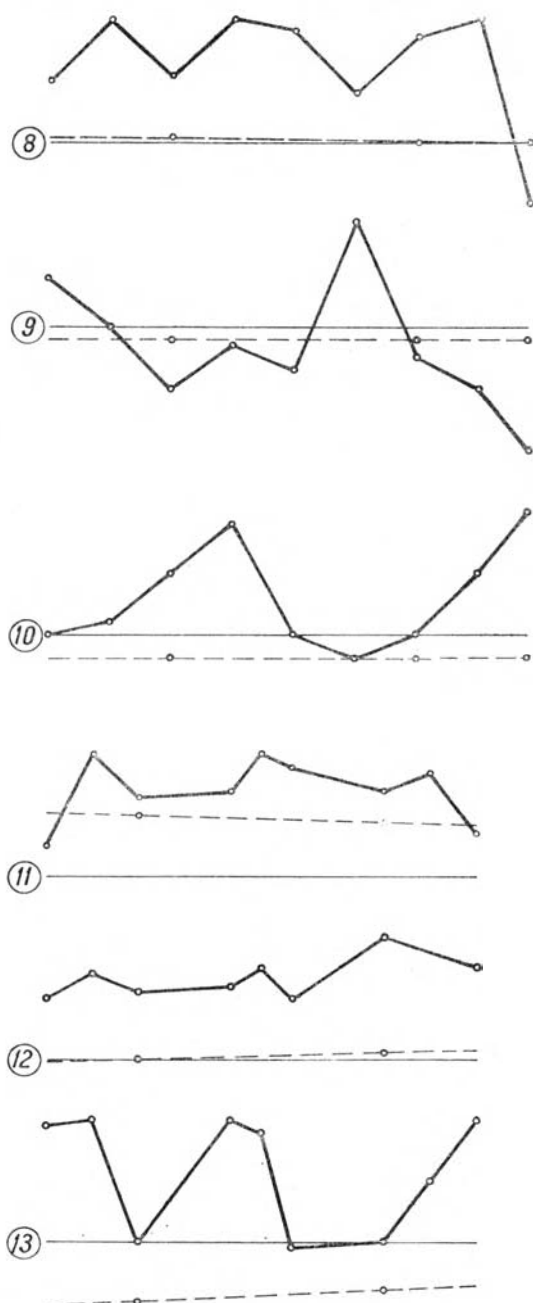
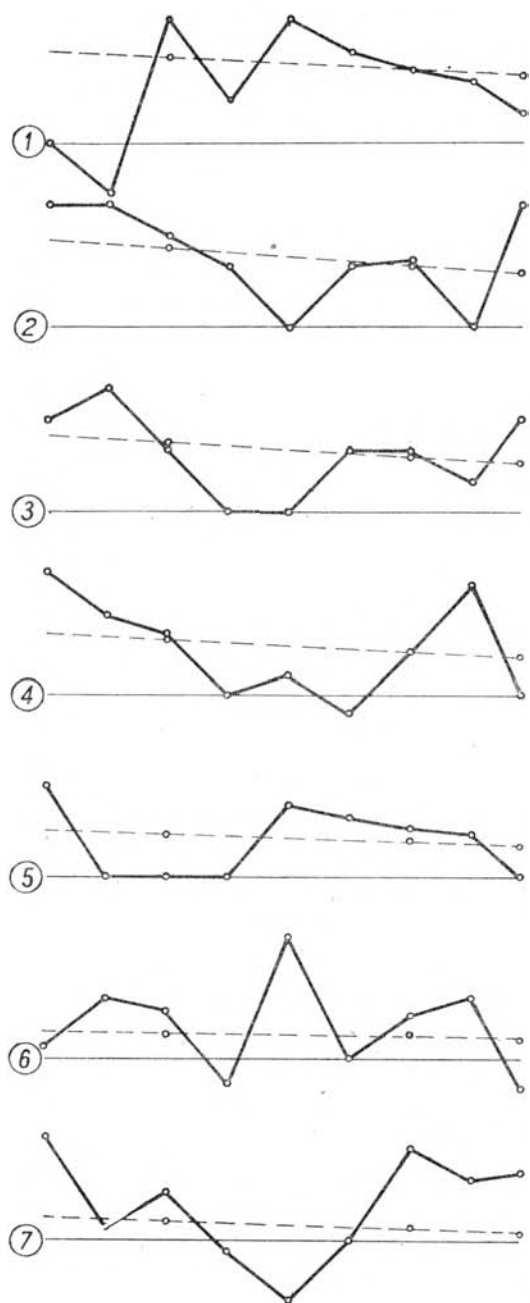
| Przekrój |   | $\frac{1}{R} z_i dz_P + y_i dy_P + z_i x_i a + y_i x_i b = R - R_i = l$ |        |       |       |      |      |
|----------|---|-------------------------------------------------------------------------|--------|-------|-------|------|------|
|          |   | $dz_P$                                                                  | $dy_P$ | $a$   | $b$   | $l$  | $v$  |
| 1        | C | 0,81                                                                    | 0,59   | 0,91  | 0,66  | 2,0  | 0,6  |
|          | G | 0,81                                                                    | 0,59   | 2,72  | 1,98  | 1,2  | 0,0  |
|          | I | 0,81                                                                    | 0,59   | 3,55  | 2,58  | 0,5  | -0,6 |
| 2        | C | 0,74                                                                    | 0,67   | 0,83  | 0,75  | 1,5  | 0,2  |
|          | G | 0,74                                                                    | 0,67   | 2,49  | 2,25  | 1,1  | 0,1  |
|          | I | 0,74                                                                    | 0,67   | 3,24  | 2,93  | 2,0  | 1,1  |
| 3        | C | 0,66                                                                    | 0,75   | 0,74  | 0,84  | 1,0  | -0,1 |
|          | G | 0,66                                                                    | 0,75   | 2,22  | 2,52  | 1,0  | 0,1  |
|          | I | 0,66                                                                    | 0,75   | 2,89  | 3,28  | 1,5  | 0,7  |
| 4        | C | 0,56                                                                    | 0,83   | 0,63  | 0,93  | 1,0  | 0,1  |
|          | G | 0,56                                                                    | 0,83   | 1,88  | 2,79  | 0,7  | 0,0  |
|          | I | 0,56                                                                    | 0,83   | 2,45  | 3,64  | 0,0  | -0,6 |
| 5        | C | 0,45                                                                    | 0,89   | 0,50  | 1,00  | 0,0  | -0,7 |
|          | G | 0,45                                                                    | 0,89   | 1,51  | 2,99  | 0,8  | 0,2  |
|          | I | 0,45                                                                    | 0,89   | 1,97  | 3,90  | 0,0  | -0,5 |
| 6        | C | 0,34                                                                    | 0,94   | 0,38  | 1,05  | 0,8  | 0,4  |
|          | G | 0,34                                                                    | 0,94   | 1,14  | 3,16  | 0,7  | 0,3  |
|          | I | 0,34                                                                    | 0,94   | 1,49  | 4,12  | -0,5 | -0,8 |
| 7        | C | 0,23                                                                    | 0,97   | 0,26  | 1,09  | 0,8  | 0,5  |
|          | G | 0,23                                                                    | 0,97   | 0,77  | 3,26  | 1,5  | 1,3  |
|          | I | 0,23                                                                    | 0,97   | 1,11  | 4,25  | 1,1  | 1,0  |
| 8        | C | 0,11                                                                    | 0,99   | 0,12  | 1,11  | 1,1  | 1,0  |
|          | G | 0,11                                                                    | 0,99   | 0,37  | 3,33  | 1,7  | 1,7  |
|          | I | 0,11                                                                    | 0,99   | 0,48  | 4,34  | -1,0 | -1,0 |
| 9        | C | -0,01                                                                   | 1,00   | -0,01 | 1,12  | -1,0 | -0,8 |
|          | G | -0,01                                                                   | 1,00   | -0,03 | 3,36  | -0,5 | -0,3 |
|          | I | -0,01                                                                   | 1,00   | -0,04 | 4,38  | -2,0 | -1,8 |
| 10       | C | -0,13                                                                   | 0,99   | -0,15 | 1,11  | 1,0  | 1,4  |
|          | G | -0,13                                                                   | 0,99   | -0,44 | 3,33  | 0,0  | 0,4  |
|          | I | -0,13                                                                   | 0,99   | -0,57 | 4,34  | 2,0  | 2,4  |
| 11       | C | 0,50                                                                    | -0,88  | 0,56  | -0,99 | 1,3  | 0,3  |
|          | G | 0,50                                                                    | -0,88  | 1,68  | -2,96 | 1,4  | 0,5  |
| 12       | C | -0,03                                                                   | -1,06  | -0,07 | -1,19 | 1,1  | 1,1  |
|          | G | -0,06                                                                   | -1,06  | -0,20 | -3,56 | 2,0  | 1,9  |
| 13       | C | -0,62                                                                   | -0,88  | -0,69 | -0,99 | 0,0  | 1,0  |
|          | G | -0,62                                                                   | -0,88  | -2,08 | -2,96 | 0,0  | 0,8  |

|        |         |         |          |         |
|--------|---------|---------|----------|---------|
| 8,3350 | 8,8791  | 23,7043 | 25,9759  | 12,1520 |
|        | 28,2204 | 25,9706 | 79,5674  | 9,8410  |
|        |         | 82,6419 | 92,3957  | 32,3020 |
|        |         |         | 275,6408 | 26,3420 |

|         |        |        |         |                       |
|---------|--------|--------|---------|-----------------------|
| 2,8870  | 3,0755 | 8,2107 | 8,9975  | 44,2092               |
|         | 4,3315 | 0,1659 | 11,9810 | -0,7167               |
|         |        | 3,8986 | 4,2406  | -0,5488               |
|         |        |        | 5,7584  | -0,1070 $dz_K$ $dy_K$ |
| -1,9752 | 0,1094 | 0,1205 | 0,0186  | -1,4 0,2              |

EL 1H Roudnice pomiar 14.09.1971

Załącznik 3



— powierzchnia projektowa przed skorygowaniem osi  
 --- powierzchnia projektowa po skorygowaniu osi

— powierzchnia istniejąca

## ГЕОДЕЗИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ПОДПОРНОЙ ПЛОТИН — МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ, ВЫЧИСЛЕНИЙ А ТАКЖЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ

### Резюме

В Отделе Хозяйственной Геодезии ИГиК разработано методы измерений и вычислений связанных с контролем элементов подпорных плотин. С целью обеспечения правильности действия плотины необходимо было изготовить и смонтировать стальные подпорные секторы с очень высокой точностью. Применяемая, в настоящее время, технология изготовления стальной конструкции секторов соединяемых методом сварки с трудом обеспечивает получение требуемой точности. Поэтому в процессе изготовления элементов и монтажа производится дополнительные работы имеющие целью коррекционную обработку и регулировку изготовленных элементов для того, чтобы привести их к форме и размерам соответствующим в точности проектной форме и размерам, и обеспечивающим правильное взаимное местоположение после смонтирования.

Разработано метод установления отклонений поверхности элемента в местах определенных углами сетки прямоугольников (рис. 4). Устранение замеченных чрезмерных отклонений поверхности состоит в соответствующем выклепывании ее после подогрева. Так как каждый элемент содержит две, так называемые рамы, которых предназначением является придание жесткости поверхности, что в этих местах метод выклепывания не может применяться. Поэтому разработано метод устранения отклонений систематического характера путем соответствующего перемещения втулок определяющих положение оси элемента. Измеренные отклонения используются в процессе вычисления расстояний, на какие необходимо передвинуть втулки, чтобы уменьшить к минимуму отклонения поверхности в местах жесткого крепления. В результате произведения исправления положения оси уменьшаются также отклонения поверхности, которые следует устранить методом выклепывания.

После исправления поверхности и осей элементов приступлено к выполнению последующих работ связанных с совмещением элементов.

Здесь было необходимым установление элементов сектора (сектор состоит из двенадцати элементов) соосно, т.е. оси всех элементов должны совмещаться с прямой линией (являющейся осей сектора) со средней квадратической ошибкой не превосходящей  $\pm 0,3$  мм. В этих работах применялось новые приемы провешивания, учитывающие местные условия и значительное усиление движения на монтажной площадке.

Тесты и анализ произведенные во второй части этой работы имели целью получение информации относительно качества, правильности измерительных работ, а также эффективности применяемого метода коррекции, а в слет этому доказательство справедливости принятых предпосылок, а именно что:

1) значения первоначальных отклонений (разности между существующей и предполагаемой в проекте величиной радиуса кривизны поверхности) имеют случайный характер и являются взаимно независимыми,

2) распределение первоначальных отклонений подчиняется нормальному закону.

Упомянутый анализ касается оценки числовых значений характеризующих точность произведенных измерений а также влияние внешних факторов.

Для доказательства первого предположения использовался так называемый критерий Абея.

Для доказательства второго предположения применяется в настоящей работе критерий отношения стандартного отклонения (средней квадратической ошибки) к посредственному отклонению (к посредственной ошибке).

На величину первоначального отклонения в измеряемой точке на произвольном рамовом сечении складываются ошибки:

- изготовления рамы, учитывая в том ошибку местоположения оси,
- измерения.

При вторичном измерении, т.е. после осуществления замены оси, измеренные значения отклонений должны равняться отклонениям какие вытекают из вычислений составляющих корректуру оси на основании первого измерения (вторичные отклонения). На практике обычно наблюдается расхождение между первичными отклонениями, получаемыми по данным второго измерения, и вторичными отклонениями из первого измерения. Они возникают, прежде всего, в результате ошибок обих измерений, а также в результате влияния таких факторов как:

- ошибка идентификации измерительных пунктов при первом и при втором измерении,
- разницы температуры элементов в моменте производства обих измерений,
- выполнение исправления оси.

Влияние перечисленных факторов подвергается в дальнейшей части этой работы тщательному анализу и обсуждению.

## GEODETIC CONTROL OF DAMMING UP WATER ELEMENTS IN WEIRS METHODS OF MEASUREMENT, CALCULATION AND ANALYSIS OF RESULTS

### Summary

In the Institute of Geodesy and Cartography there have been elaborated the methods of measurements and calculations connected with checking up the damming up water elements mounted in weirs. In order to ensure the proper working of weir, it was necessary to produce and set up with very high accuracy the steel sectors. It is difficult to achieve the required accuracy by the known technology of setting up a steel structure with welding. For that reason, while producing and mounting the elements, there have been employed additional measures consisting in the corrective treating and regulation of the produced elements in order to carry them, after mounting, into the designed shape, sizes and mutual position.

There has been elaborated a method of determining the deviations of a element surface in the points fixed by the angles of a rectangular grid (fig. 4). At first, the deviations of the element surface were eliminated by hammering the surface when heated. But each element has two frames stiffening the surface, so in these places the hammering method proved to be ineffective at all. Therefore, there has been elaborated a method of eliminating deviations having the systematic character by displacement of the muffs which fix an axis of the element. Measured deviations are used for calculating the values of displacing the muffs in order to decrease to minimum the deviations of the surface in the stiffened places. In the result of the axis correction, the surface deviations are decreased and they should be eliminated by a hammering way. After having corrected the surfaces and axes, the further works of putting the elements together could be commenced. It was necessary to put coaxially the sector elements (a sector consists of 12 elements) — axes of the all elements had to be placed on a straight line (a sector axis) with a mean square error not exceeded of  $\pm 0,3$  mm. Because of the local conditions and much traffic on the mounting place, there were applied, for these works, the new solutions of the alignment methods.

In the second part of the paper there have been carried out the tests and analyses in order to obtain informations about quality and correctness of the measuring works and about efficiency of the used correction method, and, in the result of that, to prove the rightness of assumptions that:

1 — values of original deviations (differences between actual and designed value of a radius of a surface curvature) have accidental character and are mutually independent,

2 — distribution of original deviations is normal.

These analyses are referred to numerical evaluation of quantity which characterize an accuracy of measurement and influence of a medium.

For ascertaining the rightness of the first assumption, the Abbe criterion has been used.

For ascertaining the rightness of the second assumption, there has been used a criterion of a ratio of standard deviation (mean error) to average deviation (average error).

A value of the original deviation at the measuring point placed on any frame consists of errors of:

- producing the frame, together with an error of fixing an axis,
- measuring.

Measured value of deviations, after second measuring i. e. after the axis displacement, should be equal to the deviations which resulting from calculation of the axis correction on the basis of the first measuring (secondary deviations). In reality, there are existing differences between the original deviations from the second measuring and the secondary deviations from the first measuring, and also as an influence of:

- identification error of measuring points while the two measuring,
- temperature difference of elements during the two measuring,
- execution of correction of axis.

Effect of the agents mentioned above, has also been analysed and described in the paper.

