



AKADEMIA GÓRNICZO – HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska

PROJEKT INŻYNIERSKI

IMIĘ i NAZWISKO: Kamil Kaczorowski

Nr albumu: 252545

KIERUNEK: Geodezja i Kartografia

KATEDRA: Geomatyki

TYTUŁ PROJEKTU: Budowa kolimatora do wyznaczania niestałości osi
celowej lunet geodezyjnych.

TITLE OF WORK: Building a collimator for determining the instability of
the line of sight geodetic telescopes.

OPIEKUN PROJEKTU: Dr inż. Tadeusz Szczutko

Ocena projektu:

.....
Podpis Opiekuna projektu

Kraków, 2015 r.

Oświadczam, świadomy odpowiedzialności karnej za
poświadczenie nieprawdy, że niniejszą pracę dyplomową wykonałem osobiście i
samodzielnie i że nie korzystałem ze źródeł innych niż wymienione w pracy.

.....
data

.....
czytelny podpis studenta

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica

Kraków,

Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska

Kierunek: Geodezja i Kartografia

Kamil Kaczorowski

Praca dyplomowa inżynierska

Tytuł: *Budowa kolimatora do wyznaczania niestałości osi celowej lunet geodezyjnych*

Opiekun: Dr inż. Tadeusz Szczutko

STRESZCZENIE

Niniejsza praca traktuje o procesie budowy i wykorzystaniu kolimatora do wyznaczania niestałości osi celowej. Autor opisuje cały proces, od fazy założeń i projektu przez budowę, kończąc na sprawdzeniu działania wykonując pomiar.

W tekście pracy poruszane są podstawowe problemy z zakresu optyki. Autor wykorzystuje równanie soczewki do zbudowania układu optyczno-mechanicznego imitującego cele w określonej odległości od obserwatora. Opisuje przy tym wszystkie napotkane problemy na każdym etapie prac. Następnie szerzej pochyla się nad zagadnieniem niestałości osi celowej. Bada przyczynę występowania, a następnie przeprowadza serie pomiarów mających wykryć ewentualne błędy. Analizuje otrzymane wyniki pod kątem dokładnościowym i opatruje stosownym komentarzem.

AGH University of Science and Technology

Kraków, the.....

Faculty of Mining Surveying and Environmental Engineering

Field of Study: Geodesy and Cartography

Kamil Kaczorowski

Engineer Diploma Thesis

Title: *Building a collimator for determining the instability of the line of sight geodetic telescopes.*

Supervisor: PhD eng. Tadeusz Szczutko

SUMMARY

This paper deals with the process of the construction and use of a collimator for determining the instability of the line of sight. The author describes the entire process, from the design phase of the assumptions and the building, ending in checking out a measurement operation.

The text of the paper are discussed the basic problems in the field of optics. The author uses the lens equation to build a system with optical and mechanical imitation of targets within a certain distance from the observer. Describes at the same time all the problems encountered at every stage. Then bends over wider issue of the instability of the line of sight. Investigating the cause of the occurrence, and then performs a series of measurements to detect any error. Analyzes the results obtained for a precision and provides relevant commentary.

Zawartość

1. WSTĘP	5
2. BUDOWA	7
2.1. Założenia	7
2.2. Projektowanie	8
2.3. Wykonanie i budowa.....	10
2.4. Sprawdzenie	12
3. BŁĄD NIESTAŁOŚCI OSI CELOWEJ	15
3.1. Definicja i wykrywanie	15
3.2. Pomiar	17
3.3. Obliczenia	22
3.4. Analiza dokładności.....	25
3.5. Przedstawienie graficzne wyników i komentarz	30
4. WNIOSKI.....	33
5. BIBLIOGRAFIA	35

1. WSTĘP

Od zarania dziejów człowiek miał tendencje do dzielenia. Dotyczyło to różnych płaszczyzn: mentalnej, kulturowej, ale też takich jak podział dóbr, czy terytoriów. O ile w przypadku tych pierwszych nie da się wyznaczyć ściśle dokładności, o tyle w przypadku istnienia rzeczy fizycznej można podać zakres błędu, z jakim została podzielona. Podział zawsze wiąże się z pomiarem otrzymanych wielkości. Skupiając się na materii, da się zaobserwować na przestrzeni czasów, dążenie do osiągnięcia jak najwyższej dokładności podziału. Na początku, kiedy mierzono okiem nieuzbrojonym, pojęcie dokładności w pomiarach było bardzo względne. Granice ustalano na podstawie linii gór, czy lasów. W skrajnych przypadkach wystarczyło stwierdzenie „po horyzont”. Z czasem gdy ludności przybywało a napięcia między poszczególnymi grupami narastały, człowiek zaczął dzielić dokładniej. Linie graniczne wyznaczały koryta rzek, poszczególne drzewa, wieże strażnicze, mury obronne. Równoległe zaczęło pojawiać się zorganizowane budownictwo. Wymusiło to wynalezienie narzędzi pomiarowych. Powstawało wiele jednostek długości, z reguły odpowiadającym wielkościom ludzkich łokci czy stóp. Do tyczenia już starożytni Egipcjanie i Rzymianie używali prostych przyrządów zbudowanych na bazie belek i sznurków. Okazały się one na tyle skuteczne, że budowle z tamtego czasu przetrwały do dziś a dokładność ich wykonania nadal zdumiewa. Zatem od tego momentu możemy mówić o wymiernych błędach pomiaru. Kolejny przełom w miernictwie miał miejsce w XVI i XVII wieku kiedy to powstały pierwsze lunety i teodolity. Wraz z rozwojem nauki i techniki budowano coraz dokładniejsze instrumenty. Miały one wówczas zastosowanie głównie w astronomii i wojskowości. Rozpoczęło się dążenie do uzyskania jak największej dokładności pomiaru. Kiedy optyka i trygonometria zostały dostatecznie poznane a rozwiązania techniczne nie stanowiły problemu ustalona została zasada konstruowania teodolitów. Powszechne stało się używanie noniuszów a sama budowa instrumentów pozwalała na obroty poszczególnych części wokół ich osi. Noniusz pozwolił na zwiększenie precyzji odczytu a odpowiednia budowa na zniwelowanie błędów wynikających z procesu produkcji. Dzięki rozwojowi technologicznemu można było wytwarzać coraz dokładniejsze podzespoły mechaniczno-optyczne. Istnieje zatem ścisły związek pomiędzy tymi dwoma rodzajami elementów. Jednak nie tylko możliwości technologiczne decydują o dokładności pomiaru. Zawsze do obsługi instrumentu potrzebny jest człowiek. Ludzkie oko to również układ optyczny, który może

generować niedokładności. Zatem możemy wyróżnić dwie grupy błędów: instrumentalne (wynikające z możliwości technicznych instrumentu) oraz osobowe, czyli związane bezpośrednio z obserwatorem. Istnieje również trzecia grupa błędów wynikająca z warunków zewnętrznych.

Niniejsza praca będzie traktować o zbudowaniu kolimatora, który w tym badaniu zostanie użyty do wyznaczania błędu niestałości osi celowej. Błąd ten jest błędem instrumentalnym w niewielkim stopniu zależny od operatora. Z tego powodu oraz faktu wykonywania prac laboratoryjnych trzecia grupa błędów zostanie pominięta. Sam kolimator ma więcej zastosowań, nad którymi jednak autor nie będzie się szczegółowo pochylał.

Idea kolimatora jest ogólnie znana od dłuższego czasu – odwrócona luneta z wstawionym krzyżem ma imitować cel na danej odległości. Zbudowanie prostego urządzenia z jednym celem nie jest trudne, jednak stworzenie kolimatora, który będzie imitował kilka celów na ściśle określonej odległości wymaga szczegółowego projektu. Inspiracją do budowy takowego był brak podobnego urządzenia na wyposażeniu Geodezyjnego Laboratorium Metrologicznego AGH oraz chęć wyznaczenia rzadko uwzględnianego błędu niestałości osi celowej.

Wspomniany błąd wynika bezpośrednio z procesu produkcyjnego oraz użytkowania instrumentu. Powodują go gorszej jakości materiały i mało precyzyjna obróbka oraz wycieranie się poszczególnych elementów podczas eksploatacji.

W niniejszej pracy zostanie poruszony proces projektowania, stworzenia i zastosowania kolimatora na konkretnym przykładzie.

2. BUDOWA

2.1. Założenia

Założeniem projektu było zbudowanie kolimatora umożliwiającego imitowanie celu nie tylko w nieskończoności, ale również na różnych długościach celowej. Wyniknęło to z potrzeby wykrycia błędu niestałości osi celowej. Aby wyznaczyć ten błąd należy przebadąć rozkład błędów kolimacji i indeksu na poszczególnych odległościach. Ponieważ niestałość osi występuje z reguły w bardzo niewielkim zakresie, istniała konieczność zbudowania urządzenia do pomiarów w warunkach laboratoryjnych w celu wyeliminowania czynników zewnętrznych, jak i komfortu pracy.

Powołując się na równanie soczewki:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{x} + \frac{1}{y}$$

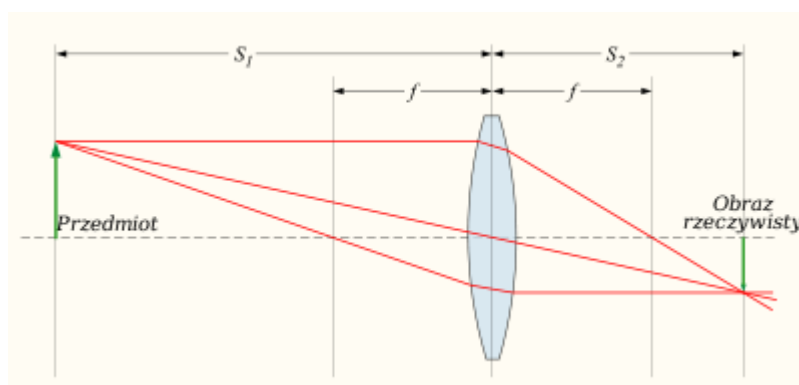
gdzie:

f – ogniskowa soczewki,

x – odległość przedmiotowa,

y – odległość obrazowa,

postawiono tezę, że umieszczając krzyże celownicze za ogniskową lunety w kreślonych odstępach, uzyska się cele na różnych odległościach. Potrzebna była zatem luneta, zestaw krzyży celowniczych oraz konstrukcja łącząca wszystko w całość.



Rys. 2.1. Założenie otrzymania obrazu w odległości y .

($S_1 = x$; $S_2 = y$) źródło: <http://fizyka.biz/>

Błąd niestałości osi celowej jest błędem instrumentalnym, zależnym od precyzji wykonania elementów lunety a ściślej rzecz ujmując od działania mechanizmu ogniskowania. Mechanizm ten działa w pewnym zakresie, a ponieważ regulacja o stały obrót okularu nie przekłada się liniowo na odległość ogniskowania, na wstępie postanowiono przebadać podane długości osi celowej:

- 2 m,
- 5 m,
- 10 m,
- 40 m.

2.2. Projektowanie

Do wykonania postawionego zadania, użyto dostępnej w Geodezyjnym Laboratorium Metrologicznym AGH (GLM AGH) lunety o ogniskowej równej ok. 675 mm oraz wymontowanych z nieużywanych instrumentów, zestawu czterech krzyży celowniczych.



Rys. 2.2. Wykorzystana luneta.



Rys. 2.3. Wymontowane krzyże celownicze.

Niezbędne było zaprojektowanie konstrukcji, w której można by umieścić krzyże oraz połączyć je z lunetą.

Zanim jednak rozpoczęto projektowanie należało ustalić ogniskową lunety. Ponieważ wiązka światła przechodząca przez soczewkę jest załamywana i wszystkie jej promienie przecinają się w przybliżeniu w ogniskowej, postanowiono doświadczalnie wyznaczyć odległość od soczewki do tego punktu.

W tym celu, w ciemnym pomieszczeniu, przepuszczono światło latarki przez lunetę, świecąc od strony soczewki. Następnie manewrowano odległością lunety od ekranu (luneta musiała być skierowana prostopadle do ekranu), aby uzyskać jak najmniejszy i najwyraźniejszy punkt świetlny. Po paru próbach ustalono ogniskową f na 675 mm. Mając na względzie możliwość regulacji położenia krzyża celowniczego w osi kolimatora, omyłka rzędu nawet 2-3 cm była dopuszczalna. Dzięki znanej ogniskowej, można było obliczyć odległości przedmiotowe x dla założonych odległości obrazowych y . W tym celu przekształcono równanie soczewki do postaci:

$$x = \frac{f * y}{y - f}$$

Otrzymano wyniki:

Tab. 2.1. Zestawienie odległości przedmiotowych i obrazowych.

Nr. celu	f [mm]	y [mm]	x [mm]
1	675	2000	1019
2		5000	780
3		10000	724
4		40000	687

Przypuszczano, że położenie krzyży może ulec zmianie, ale wstępne obliczenie ich położenia pomogło oszacować wielkość projektowanej konstrukcji. Długość całego urządzenia obliczano na nieco powyżej 1 m.

Następnym krokiem było zaprojektowanie pierścieni, które miały posłużyć do osadzenia krzyży celowniczych oraz montażu całej konstrukcji na lunecie. Wymagane również były prowadnice, na których całość mogłaby się opierać. Dodatkowo należało pomyśleć o możliwości regulowania położenia każdego pierścienia z krzyżem. Materiał do wykonania konstrukcji musiał być stosunkowo lekki, jednocześnie zapewniając sztywność całemu układowi. Prowadnice zdecydowano wykonać z gwintowanego, stalowego pręta o średnicy 8 mm oraz podwyższonej

szttywności a pierścienie z tworzywa sztucznego. Pręty pozwoliły zachować sztywność a plastik nie obciążał zbytnio konstrukcji, jak również był łatwy w obróbce. Dodatkowo gwint pozwolił na regulację odległości od soczewki. Stabilizację pierścieni wzdłuż osi zaplanowano za pomocą nakrętek.

Mocowanie układu do lunety zaprojektowano za pomocą dwóch pierścieni, w których każdy miał cztery śruby kontruujące. Dodatkowo w każdym pierścieniu zaplanowano wywiercenie i nagwintowanie czterech symetrycznych otworów na stalowe prowadnice. Usztywnienie konstrukcji miało zapewnić pierścien z nagwintowanymi otworami, montowany na końcu.

Elementy, w których osadzono krzyże celownicze zaprojektowano podobnie do pierścieni mocujących, przy czym otwory na prowadnice rozwiercono do średnicy 9,5 mm, tak aby można było swobodnie przesuwac je na całej długości prowadnic. W miejsce śrub kontruujących zaplanowano wstawienie śrub regulujących położenie krzyża w płaszczyźnie pionowej.

Zwymiarowano dokładnie lunetę i zakupiono niezbędne materiały:

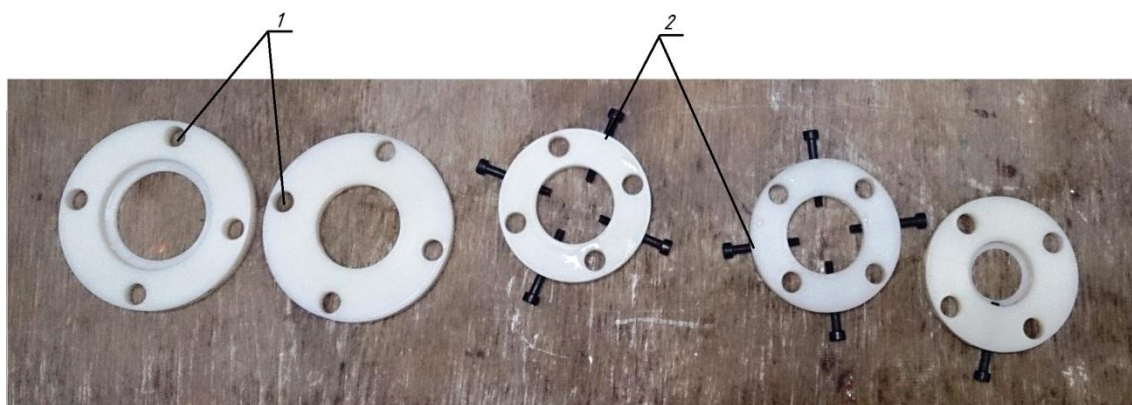
- 4 stalowe, nagwintowane pręty ϕ 8 mm, długości 1 m o podwyższonej sztywności,
- wałki z tworzywa sztucznego ϕ 90 mm,
- śruby i nakrętki.

2.3. Wykonanie i budowa

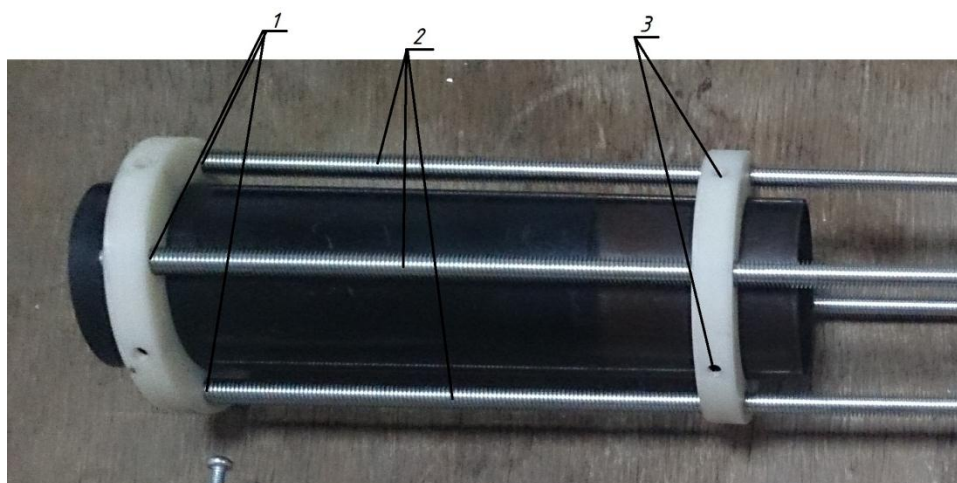
Ponieważ do wykonania zaprojektowanych elementów niezbędne były odpowiednie narzędzia, prace prowadzono w warsztacie ślusarskim.

Rozpoczęto od wytoczenia pierścieni. Na początku precyzyjnie wyznaczono środek walca na tokarce, następnie przy pomocy wzornika zaznaczono dwa prostopadłe krzyże, skrecone względem siebie o 45 stopni. Znaczniki te posłużyły w dalszym etapie do wywiercenia otworów na śruby kontruujące/regulujące oraz na prowadnice. Wcześniejsze wyznaczenie środka i znaczników pod otwory jest bardzo istotne, ponieważ po wybraniu środkowej części walca ciężko o precyzyjne wyznaczenie otworów w jednej osi. Następnie wywiercono otwory na prowadnice. Wiercenie w całym bloku, przed podzieleniem go na pojedyncze pierścienie, gwarantowało współliniowość otworów, ważnych z punktu widzenia stabilności konstrukcji. Kolejnym etapem było doprowadzenie do jednakowej średnicy zewnętrznej pierścieni. Cały blok przetoczono do żadanego wymiaru. Następnie podzielono walec

na jednakowej szerokości pierścienie. Średnice wewnętrzną każdego krążka dopasowywano indywidualnie do danego krzyża a w przypadku elementów odpowiadających z mocowanie, do średnicy zewnętrznej lunety. Kolejnym krokiem było rozwiercenie otworów na prowadnice w pierścieniach z krzyżami, tak aby mogły się one swobodnie przesuwac po nagwintowanych prętach. Następnie nagwintowano otwory pod prowadnice w krążkach mocujących/spinających wszystkie elementy. Ostatnim etapem prac było wywiercenie i nagwintowanie otworów pod śruby kontrolujące (w przypadku pierścieni mocujących) oraz pod śruby regulujące (w przypadku pierścieni przeznaczonych do mocowania krzyży celowniczych). Zatem każdy pierścień miał 4 otwory na prowadnice i 4 na śruby kontrolujące/regulujące. Wykonane elementy wyglądały następująco:



Rys. 2.4. Pierścienie przeznaczone do mocowania krzyży celowniczych: 1 – otwory na prowadnice, 2 – otwory na śruby regulujące.



Rys. 2.5. Pierścienie mocujące: 1 – nagwintowane otwory pod prowadnice, 2 – prowadnice, 3 – otwory na śruby kontrolujące.

Wytoczenie pierścieni stanowiło zdecydowaną większość prac związanych z budową kolimatora. Zatem po ich wykonaniu pozostało jedynie połączyć wszystkie elementy. Krzyże celownicze umocowano w pierścieniach, następnie wszystkie zamontowano na prowadnicach i całość przymocowano do lunety.



Rys. 2.6. Krzyże celownicze w pierścieniach.



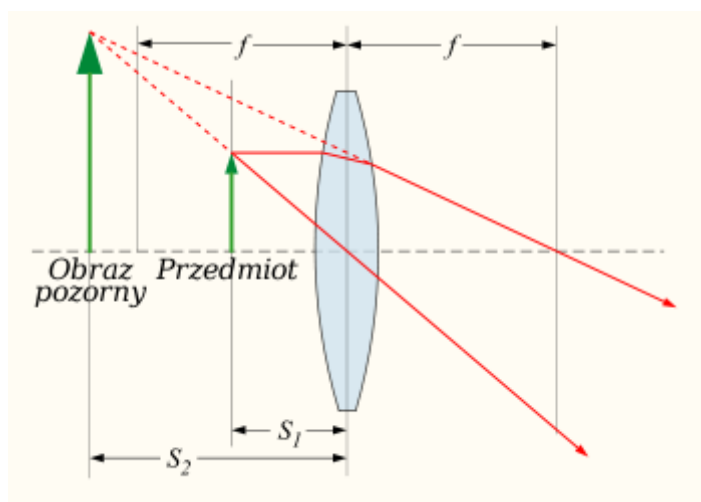
Rys. 2.7. Wstępny wygląd kolimatora. Na zdjęciu brak wszystkich elementów.

Na tym etapie prac postanowiono nie umieszczać krzyży w konkretnym położeniu. Należało najpierw sprawdzić działanie a dopiero później ustalać szczegółowe położenie elementów. Z tak przygotowanym kolimatorem powrócono do GLM AGH celem sprawdzenia poprawności założeń i wykonania.

2.4. Sprawdzenie

Decydującym momentem było przeprowadzenie testu poprawności założeń i wykonania. Do tego celu wykorzystano tachimetr Nikon DTM410 o nr. seryjnym 115605. Ustawiono kolimator i instrument na słupach pomiarowych w GLM AGH w odległości ok. 35 cm. Po wykonaniu paru prób okazało się, że kolimator działa poprawnie, ale postawione założenie jest błędne. Zaobserwowano, że da się ogniskować tylko na dwa pierwsze (patrząc od strony instrumentu) krzyże celownicze. Były one umieszczone najbliżej ogniskowej. Co więcej, ogniskując od 0 do ∞ najpierw był widoczny drugi cel a bliżej ∞ pierwszy. Świadczyło to jednoznacznie o złym umieszczeniu krzyży. Założenie, że mają one być za ogniskową soczewki było błędne.

Cele powinny być znajdować się pomiędzy ogniskową a soczewką lunety. Wynika to z zależności optycznych. Obraz przedmiotu, postawionego w większej odległości od soczewki niż ogniskowa tej soczewki, powstaje jako rzeczywisty i odwrócony, czyli po stronie instrumentu. Sytuację tą obrazuje rysunek 2.1. Obserwowanie zatem bardzo odległych krzyży było po prostu niemożliwe. Natomiast obraz przedmiotu, ustawionego pomiędzy ogniskową a soczewką, powstaje jako pozorny i prosty, czyli po stronie przeciwnej, patrząc od instrumentu. Sytuację tą obrazuje rysunek:



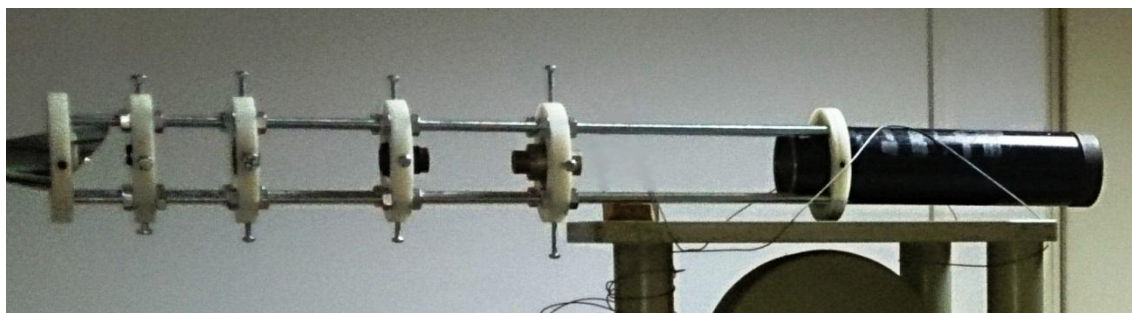
Rys. 2.8 Obraz przedmiotu ustawionego między ogniskową f a soczewką.

($S_1 = x$, $S_2 = y$), źródło: <http://fizyka.biz/>.

Zależność ta tłumaczy również fakt obserwowania najpierw drugiego celu a potem pierwszego (pierwszy cel ustawiony był między soczewką a ogniskową, drugi bliżej ogniskowej).

Mając na względzie powyższe, należało przeprojektować konstrukcję tak, aby dało się ustawić krzyże między soczewką a ogniskową. Konieczne było obliczenie poprawnych odległości przedmiotowych. Żeby zminimalizować prace, postanowiono obciąć tubus lunety w celu adaptacji istniejącej konstrukcji. W trakcie budowy analizowano więcej rozwiązań (których autor w celu przejrzystości pracy nie przytoczył) i wykonano więcej elementów (można je zaobserwować na niektórych zdjęciach). Okazały się one bardzo pomocne.

Po dokonaniu niezbędnych przeróbek kolimator wyglądał następująco:



Rys. 2.9. Kolimator po przeróbkach

Przeliczono odległości przedmiotowe, tak aby odpowiadały zmianom. Przekształcono w tym celu równanie soczewki do postaci:

$$x = \frac{f * y}{y + f}$$

Tab. 2.2. Zestawienie przeliczonych odległości przedmiotowych.

Nr. celu	f [mm]	y [mm]	x [mm]
1	675	2000	505
2		5000	595
3		10000	632
4		40000	664

Ustawiono cele w przybliżeniu w podanych odległościach i wykonano ponownie test. Tym razem uzyskano żądany efekt – przy ogniskowaniu od 0 do ∞ ujawniały się kolejno cele 1, 2, 3 i 4. Dodatkowo zaobserwowano ścisły związek między ogniskową kolimatora a odległością i powiększeniem lunety instrumentu. Ponieważ już w tym momencie kolimator spełniał swoje założenia postanowiono nie pochylać się nad tym problemem. Wspomniany związek skutkował jedną decyzją: zarzucono projektowane odległości i ustawiono krzyże tak, aby były widoczne jeden po drugim po wykonaniu takiej samej ilości obrotów okularom ogniskującym. Zapewniło to przebadanie niestałości osi w równych zakresach ruchu soczewki ogniskującej (co nie równało się równomiernemu rozłożeniu krzyży, ani tym bardziej równym odległościom do celów). Użyto do tego instrumentu Nikon DTM410, który jest wyposażony w lunetę o 30-krotnym przybliżeniu, a więc taką jaką stosuje się w większości instrumentów.

Ostatnią czynnością było doświadczalne wyznaczenie odległości do celów. Aby tego dokonać ogniskowano na poszczególne krzyże, obracano instrument w stronę łąty i tak nią manewrowano, żeby uzyskać ostry obraz. Następnie mierzono odległość do łąty ruletką. W rezultacie otrzymano wyniki:

Tab. 2.3. Odległość do celu.

Nr. celu	odległość przedmiotowa [m]
1	1,2
2	2,2
3	5,2
4	70,0

Literatura (J. Tatarczyk 1978) podaje, że kolimator powinien spełniać trzy warunki:

- imitować punkt nieskończenie daleki,
- zapewniać taką orientację płytki ogniskowej kolimatora, aby kreska pionowa tej płytki leżała w pionowej płaszczyźnie kolimacyjnej,
- gwarantować pionowe położenie osi optycznej kolimatora.

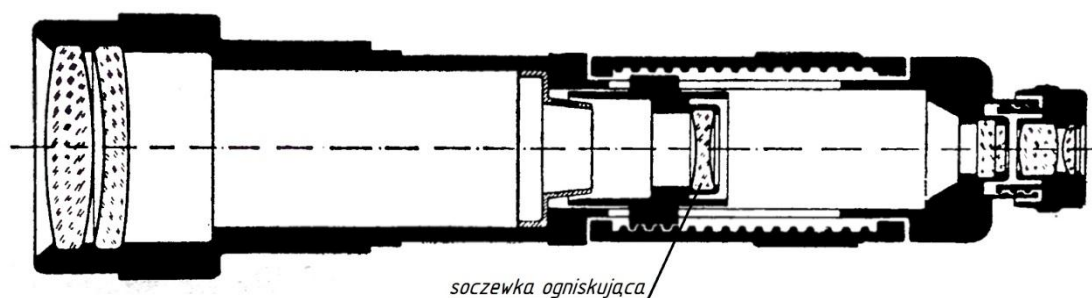
Z uwagi na to, że projekt jest w fazie rozwojowej i na daną chwilę kolimator zbudowany został pod konkretne zadanie, nie spełnia on drugiego i trzeciego warunku. Nie przeszkadza to jednak w realizacji postawionego zadania. Należy jednak dodać, że konstrukcja została tak zaprojektowana, aby w niedalekiej przyszłości spełniać w/w warunki, co więcej, zbudowany kolimator ma możliwość imitowania celów w określonej odległości o czym podana literatura nie wspomina.

3. BŁĄD NIESTAŁOŚCI OSI CELOWEJ

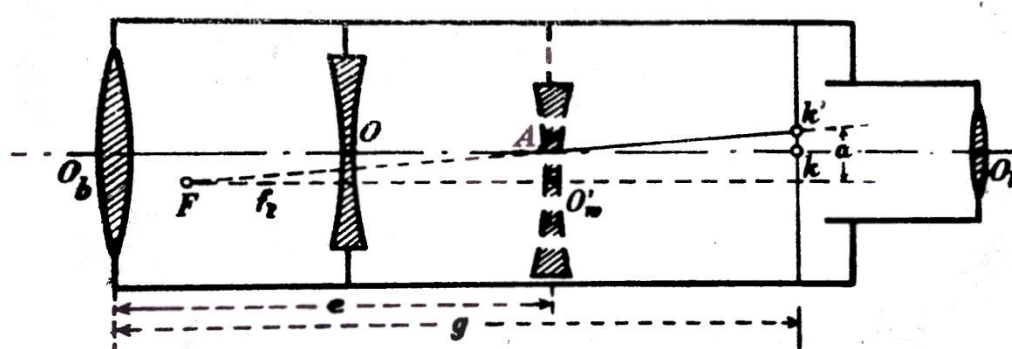
3.1. Definicja i wykrywanie

W dostępnych wydziałowych źródłach, szerzej do błędu niestałości osi celowej odnosi się jedynie J. Szymoński (1971). Autor publikacji pisze: *Przy zmianie ogniskowania, tj. przy celowych o różnych długościach, zachodzić mogą błędy w położeniu osi celowej instrumentu spowodowane błędami mechanizmu ogniskującego*. Dalej J. Szymoński jedynie szczegółowo omawia konkretne rozwiązania konstrukcyjne lunet.

Dla zobrazowania problemu zamieszczono dwa rysunki: 3.1. oraz 3.2.



Rys. 3.1. Przekrój przez lunetę Zeiss-Jena Theo 030 z ogniskowaniem wew. (J. Szymoński 1971)



Rys. 3.2. Niestalość osi celowej w lunecie z systemem wewnątrzniskującym.

(J. Szymoński 1971)

Oprócz lunet z ogniskowaniem wewnętrznym istnieją jeszcze lunety z wyciągiem siatkowym. Jednak ze względu na mniejsze błędy w geodezji zastosowanie mają te pierwsze. Na rysunku 3.2. przez punkty O_b i O_k przebiega oś celowa. Wewnątrz zaznaczono dwa położenia soczewki ogniskującej: jedno prawidłowe w osi oraz drugie, generujące błąd. Wiązka świetlna od punktu F powinna przebiegać przez punkt A do punktu k' . Natomiast ze względu na nieprawidłowe położenie soczewki przebiega przez punkt O'_w . W konsekwencji powstaje błąd położenia punktu o wielkości a .

Jedyną możliwością wykrycia niestalości osi celowej jest pomiar błędu kolimacji i indeksu na współliniowe (w przybliżeniu) punkty, rozrzucone w różnych odległościach. Błędy te wynikają z niespełnienia warunków osiowych instrumentu. Błąd kolimacji to efekt braku prostopadłości osi celowej lunety instrumentu do osi obrotu tej lunety. Natomiast błąd indeksu to efekt błędnego położenia miejsca zero na limbusie kręgu pionowego. Oba te błędy mają stałą wartość kątową niezależną od odległości (J. Beluch 2007).

Współliniowość celów jest o tyle ważna, że podczas pomiaru w różnych kierunkach na niestałość może nałożyć się błąd mimośrodu kręgu podziałowego, który będzie fałszował wynik. Różne wartości obu błędów na różnych odległościach będą świadczyły o występowaniu niestałości osi celowej. Błąd kolimacji będzie informował o niestałości w płaszczyźnie poziomej a błąd indeksu w płaszczyźnie pionowej.

3.2. Pomiar

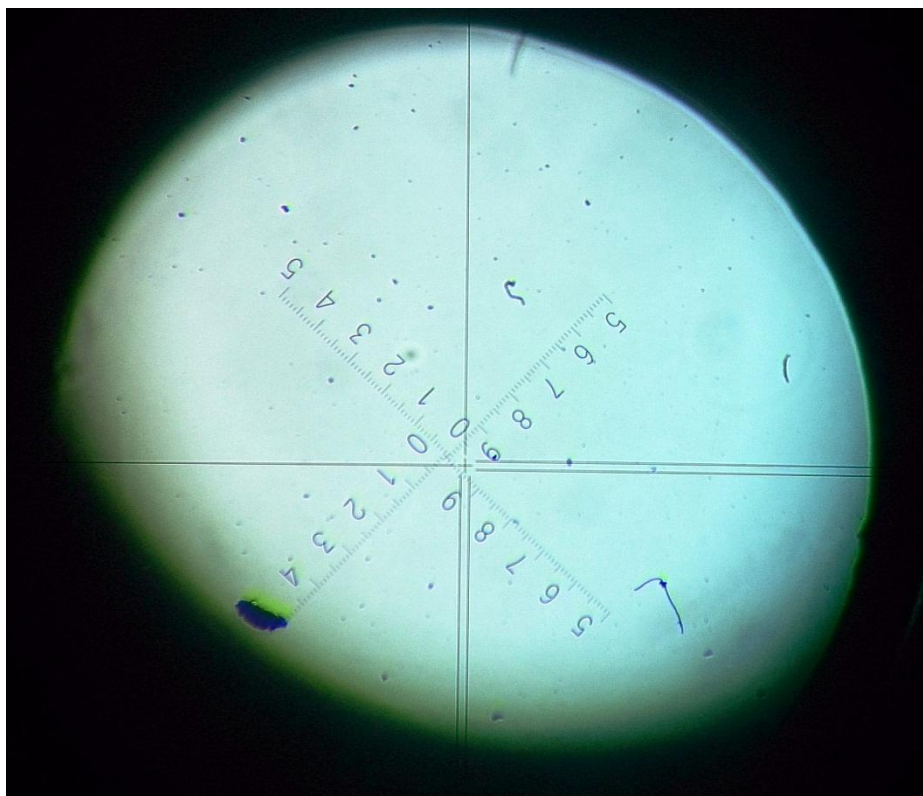
Ponieważ kolimator został zbudowany w konkretnym celu, należało przeprowadzić serię pomiarów, badając trzy instrumenty:

- teodolit elektroniczny T2002 produkcji Wilda o numerze seryjnym 346328,
- tachimetr elektroniczny Topcon OS 103 o numerze seryjnym FCT0647,
- tachimetr elektroniczny Nikon DTM410 o numerze seryjnym 115605.

Teodolit T2002 jest jednym z najprecyzyjniejszych instrumentów na świecie, zapewnia pomiar kierunku z dokładnością rzędu $0,5''$ ($1,5^{\circ}$), dlatego też zaplanowano wykonanie nim pomiaru wzorcowego w 12 seriach, celem wyznaczenia położenia celów. Pozostałe dwa tachimetry to średniej klasy instrumenty użytkowe (Nikon zapewnia dokładność pomiaru kąta rzędu $4''$ (12°) a Topcon rzędu $3''$ (9°)) i były głównym przedmiotem badania. Planowano wykonać nimi po 6 serii pomiarowych.

Przed przystąpieniem do pomiarów należało wszystko starannie przygotować. Kolimator przymocowany był do postumentu już na dzień przed pomiarem co zapewniło jego niezmiennie położenie (pomieszczenie jest stabilne pod względem temperatury i wilgotności). Instrument ustawiony był na kolumnie umożliwiającej regulację wysokości osi celowej. Istotne jest aby oś celowa przebiegała jak najbliżej poziomu, ponieważ to gwarantuje najmniejszy błąd pomiaru kąta zenitalnego. Ponadto, aby były widoczne wszystkie cele w kolimatorze, oś celowa musiała przebiegać w przybliżeniu zgodnie z osią optyczną kolimatora. Instrument starannie spoziomowano, usunięto paralaksę i przystąpiono do prac. Za każdym razem wykonywano pełną liczbę serii na jeden cel w kolejności: I położenie lunety, II położenie, II położenie, I położenie itd. Po wykonaniu wszystkich serii, ogniskowano na kolejny cel i procedurę powtarzano. Taka technika pozwoliła na maksymalne skupienie obserwatora na dokładnym celowaniu (obserwator odrywał wzrok od okularu tylko na krótkie momenty obrotu lunety). Co więcej nie mrużono drugiego oka tylko zasłanianie je ręką. Pozwoliło to na utrzymanie równego ciśnienia w obu gałkach

ocznych dzięki czemu pomiar był dokładniejszy. Wyniki notował sekretarz. Ponieważ obserwator nie odczytywał wyników, sekretarz sprawdzał również poprawność prowadzonych obserwacji.



Rys. 3.3. Przykładowi widok celu w kolimatorze.

W pierwszej kolejności przeprowadzono pomiary teodolitem T2002. Już na wstępie zorientowano się, że ze względu na wspomnianą zależność pomiędzy ogniskową soczewki kolimatora a powiększeniem i odległością lunety instrumentu od kolimatora, nie można obserwować pierwszego celu. Widoczne były natomiast pozostałe cele, zatem kontynuowano pomiar. Tabela poniżej prezentuje wyniki.

Tab. 3.1. Wyniki pomiaru teodolitem T2002 Wilda.

T2002		
Nr. celu	Kier. Hz [cc]	Kier. V [cc]
1	2	3
2	15,80130	99,33831
2	215,80173	300,66095
2	215,80155	300,66026
2	15,80190	99,33822
2	15,80096	99,33841

1	2	3
2	15,80106	99,33910
2	215,80046	300,66089
2	215,80090	300,66101
2	15,80076	99,33704
2	15,80098	99,33795
2	15,80084	99,33854
2	215,80047	300,65930
2	215,80092	300,66007
2	15,80062	99,33859
2	15,80085	99,33843
2	215,80195	300,65960
2	215,80116	300,66089
2	15,80063	99,33886
2	15,80058	99,33899
2	215,79974	300,66134
2	215,79968	300,65979
2	215,80054	300,66125
2	15,79933	99,33788
2	15,79897	99,33878
2	215,79989	300,66051
2	215,79946	300,66017
2	15,79937	99,33812
3	15,90661	99,45598
3	215,90619	300,54265
3	215,90613	300,54245
3	15,90588	99,45874
3	15,90688	99,45703
3	215,90697	300,54316
3	215,90532	300,54373
3	15,90645	99,45666
3	15,90529	99,45817
3	215,90658	300,54313
3	215,90452	300,54033
3	15,90639	99,45988
3	15,90736	99,45684
3	215,90650	300,54183
3	215,90658	300,54153
3	15,90744	99,46002
3	15,90590	99,45864
3	215,90553	300,54398
3	215,90582	300,53931
3	15,90654	99,46117

1	2	3
3	15,90530	99,46132
3	215,90534	300,53899
3	215,90574	300,54398
3	15,90653	99,45993
4	15,93133	99,51286
4	215,93101	300,48598
4	215,93177	300,48703
4	15,93134	99,51339
4	15,93138	99,51256
4	215,93077	300,48731
4	215,93138	300,48644
4	15,93169	99,51219
4	15,93044	99,51294
4	215,93087	300,48487
4	215,93176	300,48720
4	15,93164	99,51274
4	15,93141	99,51458
4	215,93258	300,48501
4	215,93232	300,48566
4	15,93100	99,51368
4	15,93139	99,51380
4	215,93072	300,48635
4	215,93129	300,48528
4	15,93119	99,51143
4	15,93039	99,51189
4	215,93235	300,48400
4	215,93112	300,48714
4	15,93079	99,51269

Następnie wykonano pomiar tachimetrami Topcon oraz Nikon. Tabele prezentują wyniki.

Tab. 3.2. Wyniki pomiaru tachimetrem
Topcon OS103.

Topcon		
Nr. celu 1	Kier. Hz [cc] 2	Kier. V [cc] 3
1	1,4900	99,1018
1	201,4910	300,9052
1	201,4908	300,9058
1	1,4906	99,1032
1	1,4914	99,1030
1	201,4918	300,9040
1	201,4920	300,9040
1	1,4906	99,1042
1	1,4916	99,1032
1	201,4924	300,9052
1	201,4920	300,9040
1	1,4916	99,1022
2	1,8026	99,2752
2	201,8038	300,7332
2	201,8030	300,7322
2	1,8026	99,2746
2	1,8024	99,2750
2	201,8036	300,7336
2	201,8032	300,7332
2	1,8032	99,2752
2	1,8026	99,2748
2	201,8034	300,7324
2	201,8028	300,7332
2	1,8032	99,2750
3	1,9624	99,4313
3	201,9620	300,5756
3	201,9622	300,5638
3	1,9612	99,4312
3	1,9622	99,4300
3	201,9636	300,5750
3	201,9616	300,5736
3	1,9626	99,4328
3	1,9616	99,4318
3	201,9624	300,5748
3	201,9624	300,5754
3	1,9620	99,4318
4	2,0314	99,5160
4	202,0308	300,4888

Tab. 3.3. Wyniki pomiaru tachimetrem
Nikon DTM410.

Nikon		
Nr. celu 1	Kier. Hz [cc] 2	Kier. V [cc] 3
1	36,7941	98,4468
1	236,7890	301,5414
1	236,7899	301,5430
1	36,7943	98,4484
1	36,7935	98,4480
1	236,7901	301,5415
1	236,7903	301,5429
1	36,7941	98,4493
1	36,7942	98,4479
1	236,7910	301,5438
1	236,7904	301,5429
1	36,7947	98,4478
2	37,0183	98,8764
2	237,0148	301,1177
2	237,0149	301,1179
2	37,0180	98,8772
2	37,0191	98,8775
2	237,0157	301,1177
2	237,0181	301,1167
2	37,0193	98,8784
2	37,0182	98,8785
2	237,0155	301,1179
2	237,0150	301,1166
2	37,0183	98,8783
3	37,0950	99,2725
3	237,0907	300,7274
3	237,0909	300,7270
3	37,0945	99,2700
3	37,0953	99,2715
3	237,0915	300,7268
3	237,0915	300,7271
3	37,0943	99,2713
3	37,0940	99,2726
3	237,0912	300,7264
3	237,0912	300,7269
3	37,0942	99,2725
4	37,1051	99,5116
4	237,1002	300,4916

1	2	3
4	202,0306	300,4888
4	2,0298	99,5142
4	2,0294	99,5162
4	202,0298	300,4916
4	202,0300	300,4890
4	2,0300	99,5162
4	2,0306	99,5160
4	202,0300	300,4920
4	202,0288	300,4896
4	2,0300	99,5140

1	2	3
4	237,1000	300,4906
4	37,1038	99,5121
4	37,1032	99,5145
4	237,1005	300,4901
4	237,1008	300,4903
4	37,1038	99,5119
4	37,1036	99,5123
4	237,1014	300,4905
4	237,1011	300,4892
4	37,1032	99,5139

3.3. Obliczenia

Mając wyniki pomiarów przystąpiono do obliczeń. Z każdej pary obserwacji (I i II położenie) obliczono podwójne błędy kolimacji i indeksu. Podwójny błąd kolimacji liczono ze wzoru:

$$\Delta_k = O'' - (O' + 200^g)$$

gdzie:

O' – odczyt z kręgu poziomego w pierwszym położeniu lunety,

O'' – odczyt z kręgu poziomego w drugim położeniu lunety.

Następnie uśredniono wartość błędu dla każdego celu.

Natomiast podwójny błąd indeksu ze wzoru:

$$\varepsilon_i = Z' + Z'' - 400^g$$

gdzie:

Z' – odczyt z kręgu pionowego w pierwszym położeniu lunety,

Z'' – odczyt z kręgu pionowego w drugim położeniu lunety.

Podobnie jak w przypadku błędu kolimacji, uśredniono wynik dla każdego celu.

Rezultat prezentują tabele:

Tab. 3.4. Wyniki obliczeń dla instrumentu T2002 Wilda.

T2002					
L.p.	Nr. celu	Δ [cc]	ε [cc]	Δ_{sr} [cc]	ε_{sr} [cc]
1	2	-6,0	-0,1	2,3	-9,7
2		-0,8	-10,4		
3		-3,7	-21,6		
4		3,0	-13,4		
5		11,0	-19,7		
6		5,3	-2,5		
7		-8,4	3,3		
8		12,1	-8,7		
9		9,2	-7,1		
10		0,9	-17,1		
11	3	-4,2	-13,7	-4,5	7,9
12		2,5	11,9		
13		0,9	1,9		
14		-11,3	3,9		
15		12,9	13,0		
16		-18,7	2,1		
17		-8,6	-13,3		
18		-8,6	15,5		
19		-3,7	26,2		
20		-7,2	4,8		
21		0,4	3,1		
22		-7,9	39,1		
23	4	-3,2	-11,6	3,3	-10,8
24		4,3	4,2		
25		-6,1	-1,3		
26		-3,1	-13,7		
27		4,3	-21,9		
28		1,2	-0,6		
29		11,7	-4,1		
30		13,2	-6,6		
31		-6,7	1,5		
32		1,0	-32,9		
33		19,6	-41,1		
34		3,3	-1,7		

Tab. 3.6. Wyniki obliczeń dla instrumentu Topcon OS103.

Topcon					
L.p.	Nr. celu	2x Δ [cc]	2x ε [cc]	Δ_{sr} [cc]	ε_{sr} [cc]
1	1	10,0	70,0	7,0	76,3
2		2,0	90,0		
3		4,0	70,0		
4		14,0	82,0		
5		8,0	84,0		
6		4,0	62,0		
7	2	12,0	84,0	5,3	79,3
8		4,0	68,0		
9		12,0	86,0		
10		0,0	84,0		
11		8,0	72,0		
12		-4,0	82,0		
13	3	-4,0	69,0	3,7	45,2
14		10,0	-50,0		
15		14,0	50,0		
16		-10,0	64,0		
17		8,0	66,0		
18		4,0	72,0		
19	4	-6,0	48,0	-2,0	54,0
20		8,0	30,0		
21		4,0	78,0		
22		0,0	52,0		
23		-6,0	80,0		
24		-12,0	36,0		

Tab. 3.7. Wyniki obliczeń dla instrumentu Nikon DTM410.

Nikon					
L.p.	Nr. celu	2x Δ [cc]	2x ε [cc]	Δ_{sr} [cc]	ε_{sr} [cc]
1	1	-51,0	-118,0	-40,3	-93,8
2		-44,0	-86,0		
3		-34,0	-105,0		
4		-38,0	-78,0		
5		-32,0	-83,0		
6		-43,0	-93,0		
7	2	-35,0	-59,0	-28,7	-48,7
8		-31,0	-49,0		
9		-34,0	-48,0		
10		-12,0	-49,0		
11		-27,0	-36,0		
12		-33,0	-51,0		
13	3	-43,0	-1,0	-33,8	-13,3
14		-36,0	-30,0		
15		-38,0	-17,0		
16		-28,0	-16,0		
17		-28,0	-10,0		
18		-30,0	-6,0		
19	4	-49,0	32,0	-31,2	31,0
20		-38,0	27,0		
21		-27,0	46,0		
22		-30,0	22,0		
23		-22,0	28,0		
24		-21,0	31,0		

3.4. Analiza dokładności

W celu rzetelnej oceny uzyskanych wyników, przeprowadzono analizę dokładności. Pierwszym etapem było odrzucenie odbiegających od średniej pomiarów. Proces ten wykonano na podstawie kwadratów odchyłek od średniej. v_k^2 – kwadrat odchyłki błędu kolimacji; v_i^2 – kwadrat odchyłki błędu indeksu. Następnie obliczono nowe średnie wartości.

Tab. 3.8. **Odrzucone wartości** oraz nowe wielkości **średnich podwójnych błędów**. Instrument T2002 Wild.

T2002							
L.p.	Nr. celu	Δ [cc]	ε [cc]	v_k^2 [cc ²]	v_i^2 [cc ²]	Δ_{sr} [cc]	ε_{sr} [cc]
1	2	-6,0	-0,1	68,2	92,7	2,3	-9,7
2		-0,8	-10,4	9,4	0,4		
3		-3,7	-21,6	35,5	140,9		
4		3,0	-13,4	0,5	13,5		
5		11,0	-19,7	76,4	99,4		
6		5,3	-2,5	9,2	52,3	3,4	-11,2
7		-8,4	3,3	113,6	169,8		
8		12,1	-8,7	96,8	1,1		
9		9,2	-7,1	48,2	6,9		
10		0,9	-17,1	1,8	54,3		
11	3	-4,2	-13,7	0,1	465,5	-4,5	7,9
12		2,5	11,9	48,4	16,2		
13		0,9	1,9	28,7	35,7		
14		-11,3	3,9	46,8	15,8		
15		12,9	13,0	301,3	26,3		
16		-18,7	2,1	202,8	33,4		
17		-8,6	-13,3	17,2	448,4	-4,8	3,4
18		-8,6	15,5	17,2	58,1		
19		-3,7	26,2	0,6	335,8		
20		-7,2	4,8	7,5	9,5		
21		0,4	3,1	23,6	22,8		
22		-7,9	39,1	11,8	975,0		
23	4	-3,2	-11,6	42,1	0,6	3,3	-10,8
24		4,3	4,2	1,0	225,5		
25		-6,1	-1,3	88,2	90,6		
26		-3,1	-13,7	40,9	8,3		
27		4,3	-21,9	1,0	122,8		
28		1,2	-0,6	4,4	104,4		
29		11,7	-4,1	70,7	45,1	-0,6	-9,8
30		13,2	-6,6	98,2	17,8		
31		-6,7	1,5	99,8	151,7		
32		1,0	-32,9	5,3	487,7		
33		19,6	-41,1	266,0	917,1		
34		3,3	-1,7	0,0	83,1		

Tab. 3.9. **Odrzucone wartości** oraz nowe wielkości **średnich podwójnych błędów**.

Instrument Topcon OS103.

Topcon							
L.p.	Nr. celu	Δ [cc]	ε [cc]	v_k^2 [cc ²]	v_i^2 [cc ²]	Δ_{sr} [cc]	ε_{sr} [cc]
1	1	10,0	70,0	9,0	40,1	7,0	76,3
2		2,0	90,0	25,0	186,8		
3		4,0	70,0	9,0	40,1		
4		14,0	82,0	49,0	32,1	5,6	73,6
5		8,0	84,0	1,0	58,8		
6		4,0	62,0	9,0	205,4		
7	2	12,0	84,0	44,4	21,8	5,3	79,3
8		4,0	68,0	1,8	128,4		
9		12,0	86,0	44,4	44,4		
10		0,0	84,0	28,4	21,8	7,2	81,6
11		8,0	72,0	7,1	53,8		
12		-4,0	82,0	87,1	7,1		
13	3	-4,0	69,0	58,8	568,0	3,7	45,2
14		10,0	-50,0	40,1	9056,7		
15		14,0	50,0	106,8	23,4		
16		-10,0	64,0	186,8	354,7	6,4	64,2
17		8,0	66,0	18,8	434,0		
18		4,0	72,0	0,1	720,0		
19	4	-6,0	48,0	16,0	36,0	-2,0	54,0
20		8,0	30,0	100,0	576,0		
21		4,0	78,0	36,0	576,0		
22		0,0	52,0	4,0	4,0	-4,0	48,8
23		-6,0	80,0	16,0	676,0		
24		-12,0	36,0	100,0	324,0		

Tab. 3.10. **Odrzucone wartości** oraz nowe wielkości **średnich podwójnych błędów**.

Instrument Nikon DTM410.

Nikon							
L.p.	Nr. celu	Δ [cc]	ε [cc]	v_k^2 [cc ²]	v_i^2 [cc ²]	Δ_{sr} [cc]	ε_{sr} [cc]
1	1	-51,0	-118,0	113,8	584,0	-40,3	-93,8
2		-44,0	-86,0	13,4	61,4		
3		-34,0	-105,0	40,1	124,7		
4		-38,0	-78,0	5,4	250,7	-38,2	-89,0
5		-32,0	-83,0	69,4	117,4		
6		-43,0	-93,0	7,1	0,7		
7	2	-35,0	-59,0	40,1	106,8	-28,7	-48,7
8		-31,0	-49,0	5,4	0,1		
9		-34,0	-48,0	28,4	0,4		
10		-12,0	-49,0	277,8	0,1	-32,0	-51,2
11		-27,0	-36,0	2,8	160,4		
12		-33,0	-51,0	18,8	5,4		
13	3	-43,0	-1,0	84,0	152,1	-33,8	-13,3
14		-36,0	-30,0	4,7	277,8		
15		-38,0	-17,0	17,4	13,4		
16		-28,0	-16,0	34,0	7,1	-32,0	-10,0
17		-28,0	-10,0	34,0	11,1		
18		-30,0	-6,0	14,7	53,8		
19	4	-49,0	32,0	318,0	1,0	-31,2	31,0
20		-38,0	27,0	46,7	16,0		
21		-27,0	46,0	17,4	225,0		
22		-30,0	22,0	1,4	81,0	-27,6	28,0
23		-22,0	28,0	84,0	9,0		
24		-21,0	31,0	103,4	0,0		

Kolejnym krokiem było obliczenie błędu średniego m_0 wyznaczenia błędów kolimacji i indeksu dla każdego z celów. Skorzystano ze wzoru:

$$m_0 = \sqrt{\frac{\sum v^2}{n(n-1)}}$$

gdzie:

- m_0 – średni błąd średniej arytmetycznej,
- v – odchyłki poszczególnych obserwacji od średniej,
- n – ilość wykonanych spostrzeżeń.

Tab. 3.11. Wielkość błędu kolimacji Δ oraz indeksu ε z błędem ich wyznaczenia. T2002 Wild.

T2002				
Nr. celu	Δ [cc]	$m0_{\Delta}$ [cc]	ε [cc]	$m0_{\varepsilon}$ [cc]
2	3,4	2,2	-11,2	2,5
3	-4,8	1,5	3,4	1,9
4	-0,6	1,5	-9,8	3,1

Tab. 3.12. Wielkość błędu kolimacji Δ oraz indeksu ε z błędem ich wyznaczenia. Topcon OS103.

Topcon				
Nr. celu	Δ [cc]	$m0_{\Delta}$ [cc]	ε [cc]	$m0_{\varepsilon}$ [cc]
1	5,6	1,5	73,6	4,1
2	7,2	2,3	81,6	7,2
3	6,4	3,1	64,2	12,0
4	-4,0	2,8	48,8	8,3

Tab. 3.13. Wielkość błędu kolimacji Δ oraz indeksu ε z błędem ich wyznaczenia. Nikon DTM410

Nikon				
Nr. celu	Δ [cc]	$m0_{\Delta}$ [cc]	ε [cc]	$m0_{\varepsilon}$ [cc]
1	-38,2	2,4	-89,0	4,7
2	-32,0	1,4	-51,2	2,0
3	-32,0	2,1	-10,0	3,0
4	-27,6	3,1	28,0	1,8

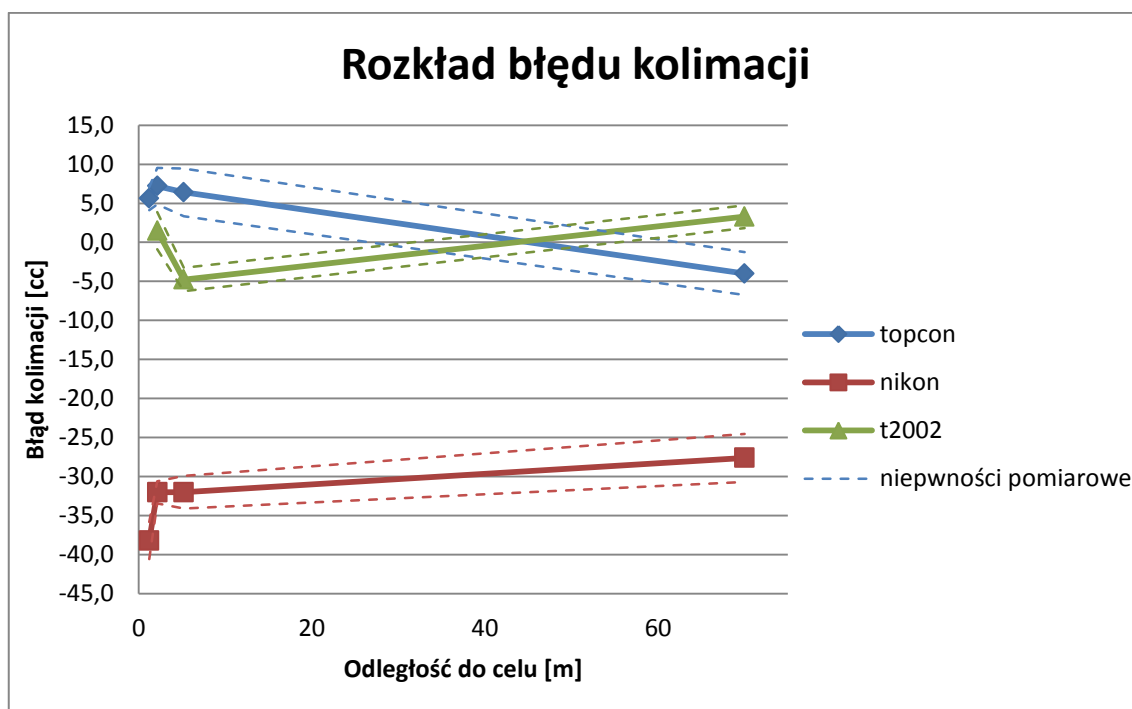
Do analizy dokładności należy dodać, że na pomiar błędów miał wpływ jedynie błąd celowania. Wszystkie pozostałe błędy zostały wyeliminowane:

- wynikające z czynników zewnętrznych – przez pomiar w GLM AGH,
- nie pionowość osi głównej instrumentu – przez pomiar kierunków prawie poziomych,
- błąd centrowania – brak konieczności centrowania,
- błąd odczytu – wszystkie instrumenty były elektroniczne,
- błąd mimośrodów kręgów podziałowych – mierzono punkty współliniowe.

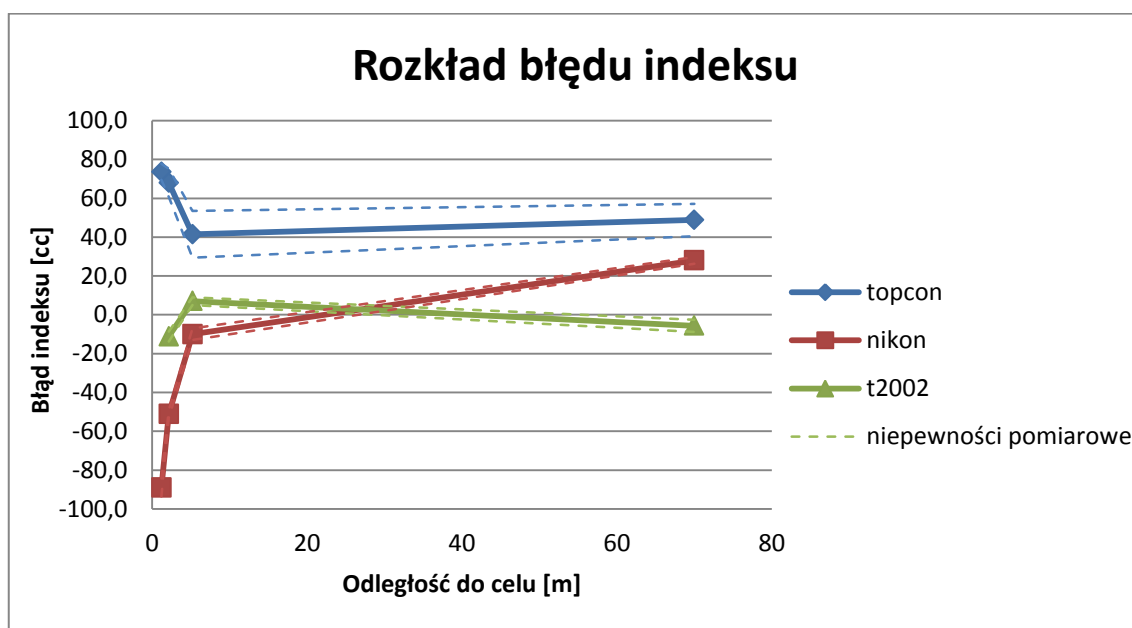
Przy takich warunkach, można założyć z dużą dozą prawdopodobieństwa, że obliczone błędy są bardzo bliskie prawdziwych.

3.5. Przedstawienie graficznie wyników i komentarz

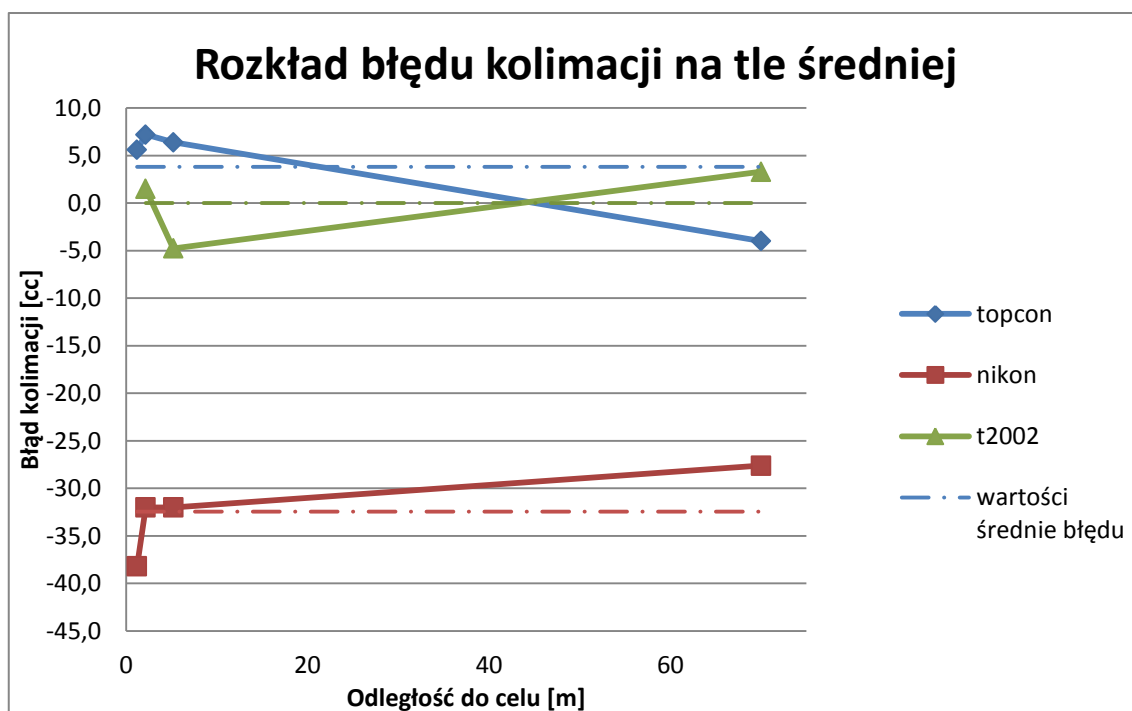
Aby lepiej zobrazować otrzymane wyniki, przedstawiono je na wykresie.



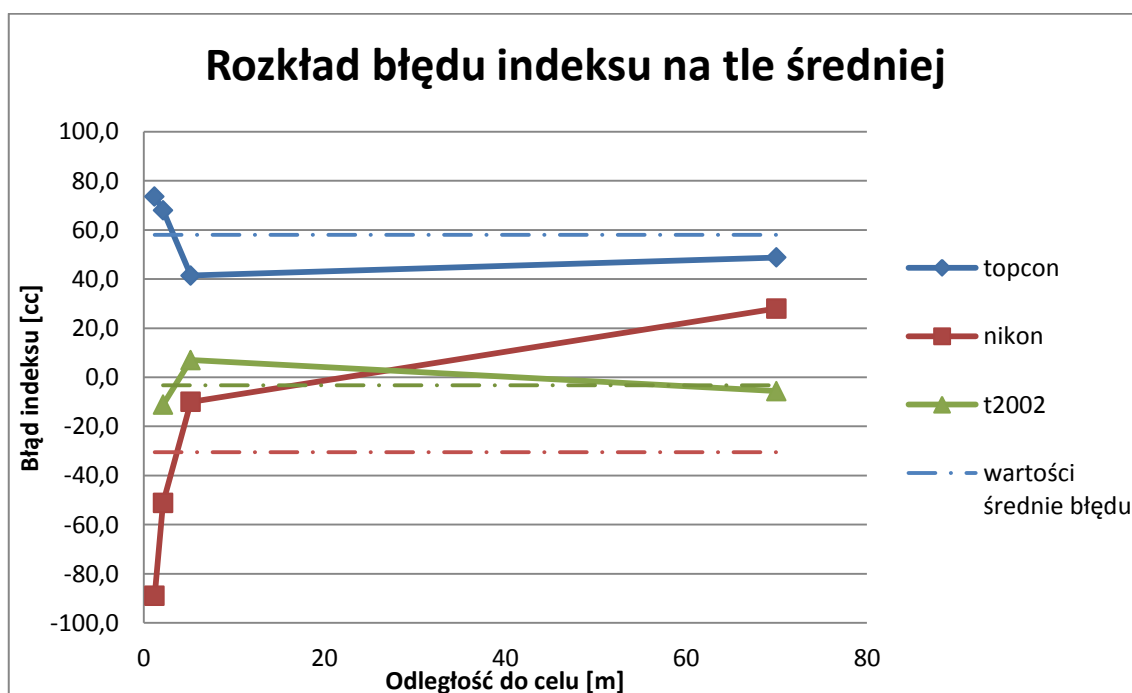
Rys. 3.4. Rozkład błędu kolimacji na poszczególnych długościach celowych.



Rys. 3.5. Rozkład błędu indeksu na poszczególnych długościach celowych.



Rys3.6. Rozkład błędów kolimacji na tle błędu uśrednionego z czterech celów.



Rys. 3.7. Rozkład błędów indeksu na tle błędu uśrednionego z czterech celów.

Analizując wykresy widać bardzo czytelnie występowanie niestałości osi. Szczególnie w przypadku instrumentu Nikon DTM410 wzdłuż płaszczyzny pionowej. W innych przypadkach, na tej samej płaszczyźnie, odchyłki poszczególnych błędów od średniej nie są tak duże, ale zmierzone wielkości są większe niż średni błąd ich wyznaczenia. Mniej wiążąco należy brać pod uwagę wykres rozkładu błędu kolimacji, ponieważ tam zaobserwowano mniejsze zmiany błędu względem niepewności pomiarowych oraz mniejsze odchylenia względem średniej. Dokładniejsze przebadanie występowania niestałości osi w tej płaszczyźnie wymagałoby zwiększenia liczby celów na różnych odległościach. Warto zaznaczyć, że zabieg ten pozwoliłby na wierniejsze oddanie przebiegu niestałości w ogóle. Ponadto sugeruje się umieszczenie dodatkowych krzyży w takim położeniu, aby uzyskać cele w odległości ok 30 - 50 m (dystans 30 m odpowiada standardowej długości celowej w niwelacji precyzyjnej, co byłoby pomoce z punktu widzenia przyszłego zastosowania kolimatora). Z grafiki wynika jeszcze jeden wniosek, że instrument Nikon o nr seryjnym powinien być zrektyfikowany. Należy przyjąć jako zasadę ogólną rektyfikację instrumentów (wg. programu wewnętrznego lub mechanicznie) przed przystąpieniem do badań niestałości osi celowej.

Oba wykresy potwierdzają zakładane tezy, że elementy mechaniczne zużywają się z czasem. Widać to dobrze na przykładzie tachimetru Nikon, który jest w ciągłym użytku od kilkunastu lat. Ponadto zgodnie z oczekiwaniami teodolit T2002 wykazuje wysoką stabilność i precyzję pomiarów. Tachimetr Topcon, co prawda należy do tej samej klasy co Nikon, ale jest on nowy i prawdopodobnie dlatego wykazuje lepsze wyniki. Zaleca się wykonanie podobnego sprawdzenia instrumentu za parę lat, po intensywnym użytkowaniu przez studentów. Większe rozrzut i wartości błędu indeksu potwierdzają jeszcze jedną zasadność, a mianowicie uzyskiwanie gorszych wyników w pomiarach kątów zenitalnych.

Należy skomentować jeszcze osiągnięte błędy średnie pomiarów. Patrząc na same liczby mogą wydawać się one podobne (z wyjątkiem niepewności wyznaczenia błędu indeksu przy tachimetrze Topcon). Wyniki zmusiły do zastanowienia, ponieważ wśród instrumentów znajdował się wysoce precyzyjny teodolit T2002. Należy pamiętać, że w tym przypadku mówimy o precyzji pomiaru a nie o jego dokładności, z racji braku znajomości wartości prawdziwej błędu. Ponadto teodolit T2002 podaje wartość kąta z dokładnością do $0,1''$ a pozostałe instrumenty ze skokiem co $2''$. Im mniejsza dokładność podania kąta tym łatwiej uzyskać większą precyzję. Biorąc pod uwagę

powyższe, nie można równać błędu $2''$ uzyskanego na teodolicie T2002 z błędem $2''$ z tachimetru Topcon czy Nikon.



Rys. 3.6 Autor prac przy stanowisku pomiarowym.

4. WNIOSKI

Biorąc pod uwagę całość projektu, zaangażowane środki, włożoną pracę oraz uzyskane wyniki, można stwierdzić, że spełnił on na tym etapie swoje założenia. Powstało urządzenie zdolne do wykrywania błędów instrumentalnych i z powodzeniem zostało to udowodnione przeprowadzonymi pomiarami. Kolimator, choć jeszcze mocno niedoskonały, zaprojektowany został z myślą o kontynuacji prac nad nim i dalszym rozwoju konstrukcji. W pierwszej kolejności należy pomyśleć nad stabilnym mocowaniem, które zapewni stałość układu a następnie spoziomować urządzenie i doprowadzić do ustawienia wszystkich krzyży w osi soczewki kolimatora. Doprowadzając do takiego stanu urządzenie będzie kompletne i będzie mogło służyć do rektyfikowania większości błędów związanych z optyką.

Pozostaje odpowiedzieć na pytanie, czy istnieje potrzeba badania niestałości osi celowej? Jak pokazały wyniki, potrzeba jest wyraźna, szczególnie w przypadku instrumentów starszych i niższej klasy. Znajomość rozkładu błędu niestałości, powinna być brana pod uwagę szczególnie przy pracach instrumentem w jednym położeniu lunety.

Na tym etapie prac osiągnięto wszystkie założone cele. Ponadto autor pracy, wzbogacił się o bezcenną wiedzę teoretyczną i praktyczną z zakresu instrumentoznawstwa. Zaleca się kontynuowanie prac nad udoskonaleniem kolimatora.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Beluch J.: *Ćwiczenia z geodezji I*, Kraków, UWND 2007
2. Blake K. A. i in.: *Podręcznik Metrologii II Podstawy praktyczne*, Warszawa, WKiŁ 1990
3. Szymoński J.: *Instrumentoznawstwo geodezyjne* (część I), Warszawa, PPWK 1968
4. Szymoński J.: *Instrumentoznawstwo geodezyjne* (część II), Warszawa, PPWK 1971
5. Tatarczyk J.: *Wybrane zagadnienia z instrumentoznawstwa Geodezyjnego*, Kraków, Skrypty uczelniane nr 670 1978
6. Tatarczyk J.: *Elementy optyki instrumentalnej i fizjologicznej*, Kraków, Skrypty uczelniane nr 940 1984