

Jerzy Bernasik^{*}, Leszek Kolondra^{}**

ANALIZA PORÓWNAWCZA POŚREDNICH METOD OKREŚLANIA SIŁ NAPRĘŻENIA LIN ODCIĄGOWYCH^{*}**

Streszczenie

Bezpieczna eksploatacja masztów, wież wiertniczych, czy stalowych kominów wymaga, aby naprężenia ich stalowych lin odciągowych było korygowane do wartości normatywnych. Bezpośrednie – dynamometryczne metody pomiaru fizycznych (czy również geometrycznych) parametrów odciągów są rzadko stosowane, ze względu na ich techniczne niedogodności. Siły naciągu lin można z powodzeniem określać metodami pośrednimi – geodezyjnie lub fotogrametrycznie. Porównanie dokładności uzyskiwanych metodami: geodezyjną (obserwacje kątowe) i fotogrametrycznymi: analogową, analogowo-cyfrową, oraz nowo opracowaną cyfrową metodą zautomatyzowaną, wskazuje że najwyższą dokładność pozwala osiągnąć ta ostatnia. Metoda cyfrowa, oparta o rejestrację obrazu liny przy użyciu wysokorozdzielczej kamery cyfrowej, oraz przetwarzanie danych w nowo opracowanym systemie pomiarowym (wykorzystującym kamerę cyfrową współpracującą w systemie on-line z notebookiem), pozwala określać parametry liny w czasie prawie rzeczywistym – w ciągu kilku minut.

THE COMPARISON NON-DYNAMOMETRICAL METHODS OF DETERMINATION OF THE STAY ROPES TENSION

Resume

A stay ropes tension of masts, boring towers, and steel chimneys should be corrected for their safety exploitation. Dynamometric measurements of ropes tension is often difficult from a technical point of view. Physical and geometrical parameters of stay ropes can be determined basing on surveying or photogrammetrical measuring methods. Accuracy of four applied methods: surveying (measurements of the angles), and photogrammetrical: classical (analog), analog-digital, and digital, is compared. Ropes tensivity can be determined self-automatically, with high accuracy, in a few minutes, by photogrammetric digital method. This new photogrammetric close range System make it possible, on a field station, to record the investigation object, fully process the collected data, and produce the final results. The basic System components are: high-resolution digital camera, developed software, and notebook, connected on-line with camera.

1. Wstęp

Metodyce określania naprężeń lin odciągowych masztów, wież wiertniczych, stalowych kominów, badania lin nośnych, oraz trakcyjnych (kolei linowych) poświęcano w ostatnich latach wiele uwagi. Dowodem tego są liczne publikacje naukowe, a nawet - rozprawa habilitacyjna [Janusz J. 1966]. Niedocenianie wagi tego zagadnienia miało w ostatnich latach katastrofalne skutki. Te względy przyczyniły się zapewne do sfinansowania przez KBN badań nad „Automatyzacją fotogrametrycznego badania naprężeń lin odciągowych na drodze analizy obrazów cyfrowych”. Niektóre doświadczenia i wnioski zdobyte w ciągu dwóch lat realizacji tego projektu ma upowszechnić niniejsze publikacja.

* Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

** Pracownia Foto-Kart w Katowicach

*** Opracowano w ramach GRANT-u KBN nr 9T12E01418

Opracowane i opisane przez L. Kolondrę zasady fotogrametrycznego określania parametrów lin odciągowych [Kolondra L.1984, 1986], oraz doświadczenia zdobyte przez J.Bernasika w trakcie 20 lat pomiarów wież wiertniczych (badania odkształceń, pomiary stanu konstrukcji i naprężeń lin – zarówno fotogrametryczne jak geodezyjne) stanowiły punkt wyjścia do podjęcia prac w ramach wspomnianego Grantu. Algorytm i oprogramowanie stworzone przez zespół: W. Mierzwa, S. Mikrut, J. Cieślak, kalibracje użytej kamery CCD Kodak DCS 760 (R. Tokarczyk, A. Boroń), oraz prace pomiarowe wykonywane przy udziale wszystkich członków zespołu badawczego doprowadziły do stworzenia systemu pomiarowego umożliwiającego określanie „on line” naprężeń lin na podstawie zarejestrowanego cyfrowo obrazu liny - w czasie prawie rzeczywistym. W niniejszym opracowaniu, system ten został poddany wielostronnej analizie, na tle innych pośrednich metod: fotogrametrycznej - analogowej, fotogrametrycznej – analogowo-cyfrowej (off-line), cyfrowej (on line) oraz geodezyjnej (obserwacje katowe).

2. Metodyka określania i korygowania naprężeń lin odciągowych

Pośrednie metody określania naprężeń lin odciągowych są szeroko stosowane ze względu na praktyczne niedogodności związane z bezpośrednim pomiarem dynamometrycznym. Jakkolwiek bowiem dynamometryczny pomiar jest najpewniejszy (nie opiera się na założeniu wiotkości cięgna), to od strony technicznej jest najtrudniejszy, a jeżeli wykonawcy nie mają odpowiednich (różnorodnych i wysokich) kwalifikacji - także ryzykowny [Adamczewski, 1992]. Jest też najbardziej kosztowny.

Zapewne wymienione problemy techniczne (zgodnie z zasadą, że potrzeba jest matką wynalazku), stały się „siłą sprawczą” opracowania na Wydziale Wiertniczo-Naftowym AGH przyrządu pozwalającego na pomiar sił naprężenia na zasadzie odginania liny (J.Artymiuk, S.Bednarz). W przyrządzie tym wielkość siły boczego nacisku na linę jest określana dynamometrycznie, zaś wielkość wygięcia liny mierzy się zainstalowanym czujnikiem [3]. Przyrząd ten nie wymaga „wpinania” w linę, działa bowiem mimośrodowo. Niestety dokładność tego „pomiaru” jest niewysoka (ok. 4%). Na wynik pomiaru znaczny wpływ mają: sztywność liny, jej stan techniczny, okres pracy, stopień nasmarowania. Urządzenie jest stosowane jedynie w wyjątkowych przypadkach.

Pośrednie metody określania naprężeń lin odciągowych są oparte na znajomości strzałki zwisu liny odciągowej, której wielkość można wyznaczyć metodą geodezyjną [5]. Sposób ten jednak nie zawsze zapewnia uzyskanie poprawnych wyników, ze względu na charakter obiektu. Konstrukcja masztowa z normatywnie naprężonymi linami odciągowymi jest bowiem układem dynamicznym, ulegającym wpływom warunków atmosferycznych i pogodowych (wiatr, temperatura, sadz, „naledź”) Wypadkowa centralnego układu wektorów, na każdym poziomie lin odciągowych powinna być równa zero – jest to warunek niezbędny by konstrukcja zachowała stateczność. Pod wpływem wiatru pionowa konstrukcja masztu może zataczać stożek, a liny odciągowe - co potwierdzają obserwacje [7] - mogą być wprawione w ruch falowy lub drgania. Znajomość tych faktów winna a priori wykluczać każdy pomiar trwający dłużej niż ułamek sekundy, a nawet przy spełnieniu tego warunku, pomiar wszystkich lin jednego poziomu odciągów winien być wykonywany synchronicznie. W przeciwnym wypadku, wyniki uzyskane dla każdej płaszczyzny lin odciągowych będą opisywały inny stan dynamiczny konstrukcji.

W przypadku konstrukcji masztowych posadowionych na obszarach podlegających wpływom eksploatacji górniczej, podczas kontroli naprężeń lin, należy stosować bardziej rygorystyczne procedury pomiarowe: każdorazowe sprawdzanie wcześniej wyznaczonych współrzędnych punktów dostosowania (przede wszystkim sprawdzanie stałości położenia dolnych punktów zaczepienia lin odciągowych), przy równoczesnym określeniu odchylenia od

pionowości konstrukcji masztu, oraz wyznaczeniu (i ewentualnie skorygowaniu) współrzędnych górnych punktów zaczepienia lin.

Z pośrednich metod pozyskiwania informacji o naprężeniu lin odciągowych najbardziej predestynowaną jest technologia fotogrametryczna, w wariacie cyfrowej rejestracji i automatycznej obróbki wyników na miejscu pomiaru, zapewniająca dostarczenie wyników w czasie niemal rzeczywistym. Metoda ta zapewnia momentalną rejestrację wielu tysięcy punktów, wszystkich (lub kilku) lin odciągowych masztu, pozwalając na poprawną aproksymację zebranych danych i najdokładniejsze określenie parametru k krzywej łańcuchowej. Prostota formuły /2/ określającej poziomą składową siły pozwala na bezpośrednie jej wyznaczenie.

Metody pośrednie są oparte na równaniu krzywej łańcuchowej (katenuidy), której kształt przyjmuje wiotkie, ciężkie cięgno. Możliwość obliczenia sił naprężenia liny, przy wykorzystaniu wzorów /1/ i /2/, ilustruje rys.1.

Obliczenia oparte są o zależność /1/:

$$Z - b = k \cosh \frac{X - a}{k} \quad /1/$$

Obliczenie wielkości: k , a , b na podstawie obserwacji kształtu liny wymaga znajomości współrzędnych (X , Z) co najmniej 3 jej punktów. Określić je można (wykonując pomiar w optymalnych warunkach pogodowych) geodezyjną metodą obserwacji kątowych, lub fotogrametrycznie.

Typowe postępowanie pomiarowe objaśnia rys. 2. Teodolitem mierzy się kąty pionowe do kontrolowanych punktów liny, oraz poziome - względem kierunku wyznaczonego przez oś „Y”. W przypadku ”klasycznego” pomiaru fotogrametrycznego określa się dodatkowo elementy orientacji kamery - przy postępowaniu opartym o przekształcenie przez podobieństwo, albo współrzędne punktów kontrolnych – przy przekształceniu rzutowym. By sprostać wymogom mechaników-konstruktorów czuwających nad korekcją naprężeń lin odciągowych i dostarczyć wyniki w czasie niemal rzeczywistym należy skorzystać z dobrodziejstw rejestracji przy użyciu wysokorozdzielczych kamer cyfrowych z niezbędnym oprzyrządowaniem i oprogramowaniem.

Celem pomiarów jest określenie i korekta naprężeń lin. Nie powtarzając znanych z literatury [5], [7], [10], [11] zależności pozwalających określić fizyczne i geometryczne parametry liny odciągowej, warto przypomnieć wzór najważniejszy, określający poziomą składową siły wywieranej przez linę na maszt:

$$F_x = k q \quad /2/$$

gdzie k – ciężar jednostkowy liny.

Mankamentem stosowanych metod pośrednich jest wzmiankowana wrażliwość na warunki atmosferyczne - optymalnym byłoby więc postępowanie oparte o równoczesny pomiar nie tylko wszystkich kontrolowanych lin, ale również masztu, a następnie bezpośrednio w terenie podanie wartości korekcyjnych, które doprowadzą cały układ konstrukcyjny do stanu normatywnego. Warto też mieć świadomość, że wraz ze wzrostem stromości liny gwałtownie wzrastają błędy pośredniego określenia wyznaczanych sił naprężenia liny.

3. Cyfrowe metody fotogrametryczne określania naprężeń lin odciągowych

Zamierzeniem Autorów niniejszego opracowania jest porównanie efektywności czterech pośrednich metod określania naprężeń lin odciągowych: geodezyjnej - opartej o

pomiar kątów, fotogrametrycznej - analogowej, fotogrametrycznej - analogowo-cyfrowej, oraz fotogrametrycznej - cyfrowej (zautomatyzowanej). Opisy dwóch pierwszych metod można znaleźć w literaturze wyszczególnionej w „Bibliografii”, natomiast objaśnienia (choć skrótowego) wymagają obydwie cyfrowe metody fotogrametryczne.

Fotogrametryczna metoda analogowo-cyfrowa została oparta o pomiar w fotogrametrycznej stacji cyfrowej zeskanowanego zdjęcia fotogrametrycznego (rys.3). W tym przypadku wykorzystano nachylone (pod nieznanym kątem) zdjęcie wykonane kamerą Photheo 19/1318. Fotogram zeskanowano w skanerze PhotoScan TD (Zeiss) z rozdzielczością 14 μ m. Ten obraz cyfrowy został pomierzony w fotogrametrycznej stacji cyfrowej VSD. Pomierzono współrzędne znaczków tłowych, punktów dostosowania i 10. punktów linii. Znając kalibracyjne współrzędne znaczków tłowych (pomierzone w stereokomparatorze precyzyjnym Stecometer), pomierzone punkty dostosowania stanowiły podstawę określenia parametrów przekształcenia rzutowego, co z kolei doprowadziło do obliczenia współrzędnych tłowych a następnie - terenowych współrzędnych pomierzonych punktów linii. Parametry linii obliczono – podobnie jak poprzednio – programem GEOCATEN (L. Kolondra).

Metoda zautomatyzowana została opisana w sprawozdaniu z realizacji wspomnianego na wstępie projektu badawczego. W ogólnym zarysie - polega ona na automatycznym pomiarze obrazu linii zarejestrowanego kamerą cyfrową. Komputerowy program przekształcania wyników pozwala odczytać w czasie „prawie rzeczywistym” - jako wynik końcowy - siłę naprężenia linii (i jej składowe). Opracowanie komputerowe obejmuje: przetworzenie otrzymanego obrazu do postaci optymalnej dla automatycznego pomiaru linii, wprowadzenie parametrów przetwarzania, pomiar punktów dostosowania, automatyczny pomiar współrzędnych punktów na środku linii, obliczenie współczynników transformacji (rzutowej, lub DLT), transformację pomierzonych punktów obrazu linii do układu terenowego, aproksymację punktów linii katenoidą, oraz obliczenie sił naprężenia linii.

4. Eksperymentalne pomiary naprężenia linii odciągowej

Pole testowe porównawczych pomiarów czterema omawianymi metodami stanowiła jedna z linii odciągowych stalowego komina. Odległości między punktami zaczepienia linii wynosiły: w poziomie - 18 m; w pionie 21 m. Linę stalową charakteryzował ciężar jednostkowy 0,9 kG/m. Pomiary i rejestracje były wykonywane w idealnych warunkach pogodowych (bezwietrznie, lekkie zachmurzenie, stała temperatura).

Sieć pomiarowa składała się z ośmiu punktów obranych w sposób pokazany na rysunku 3, których zestawienie zawiera tabela 1. Punkty 2 - 8 znajdowały się w płaszczyźnie (pionowej) linii; punkty 2 i 8 - to punkty zaczepienia linii, punkty 3,4,5,6 były sygnalizowane tarczami a punkt 7 został utrwalony na trzonie komina. Numer „1” otrzymało stanowisko pomiarowe obrane w odległości 43,086 m od płaszczyzny linii.

Na stanowisku 1 pomierzono teodolitem kąty (poziome i pionowe) do 9. punktów linii (nr-y 10 - 18), oraz do wyznaczanych punktów kontrolnych (2 - 8). Z tego samego stanowiska wykonano zdjęcia fototeodolitem Photheo 19/1318 (z powiększonym przesuwem obiektywu): poziome, oraz nachylone (o nieznaną wartość). Z pobliskiego miejsca zarejestrowano obraz linii cyfrową kamerą KODAK DCS 760. Kamera ta - jako pierwszy w Polsce egzemplarz tego typu zasługuje na krótkie objaśnienie .

Cyfrowa kamera Kodak DCS 760 stanowi efekt integracji technologii Nikona i Kodaka. Przeznaczona jest do profesjonalnej fotografii wykorzystywanej w różnych dziedzinach; między innymi w zaawansowanych zastosowaniach wojskowych. Posiada ona szereg rozwiązań technologicznych ułatwiających rejestrację i wykorzystanie zarejestrowanych obrazów. Obraz rejestruje matryca złożona z ponad 6 000 000 sensorów (3052x2016) w kadrze 27,5x18,1 mm o światłoczułości w przedziale 80 – 400 ISO. Do zapisu obrazu służy

miniaturowy twardy dysk o pojemności 1GB. Wynika stąd, że piksel ma wymiar 9 μm , co przy zastosowaniu obiektywu o ogniskowej 50 mm daje kątową rozdzielczość rzędu 30 - 37". Osiągając podpikselową dokładność automatycznego pomiaru 1/35 piksela można więc dysponować narzędziem pomiarowym porównywalnym dokładnościowo z teodolitem 1. sekundowym. Zalety rejestracji i przetwarzania danych w czasie rzeczywistym (RTP) pozwalają uważać kamerę za atrakcyjne urządzenie fotogrametryczne. Automatyczna analiza kilku tysięcy punktów (pikseli) pozwala osiągnąć wysoką dokładność.

Podane w tabeli 1 współrzędne punktów liny - określone na podstawie obserwacji kątowych, pozwoliły określić szukane parametry liny, oraz składowe siły jej naprężenia. Przy uwzględnieniu ciężaru jednostkowego liny (0,9 kG/m), parametry przyjęły wartości podane w tabeli 5. Formę zestawienia wyników uzyskiwaną przy liczeniu programem GEOCATEN ilustruje tabela 2. Jak widać – określa się zarówno fizyczne, jak i geometryczne parametry lin.

Poziome zdjęcie fotogrametryczne stanowiło kolejny pomiarowy materiał porównawczy. Pomierzone na stereokomparatorze precyzyjnym (Stecometer) współrzędne łowe 9. punktów liny pozwoliły obliczyć poszukiwane parametry liny odciągowej (obliczone również programem GEOCATEN, podane są w tabeli 3). W tabeli tej – dla przejrzystości – porównuje się jedynie wartości kilku z wyznaczanych parametrów; pozostałe przyjęły wielkości różniące się proporcjonalnie (do parametru katenoidy - „k”).

Analogowo-cyfrowe określenie parametrów, podobnie jak poprzednie, stanowiło procedurę „off-line”. Nachylone zdjęcie (wykonane kamerą Photheo 19/1318) zeskanowano, po czym pomierzono w cyfrowej stacji fotogrametrycznej VSD współrzędne 9 punktów obrazu liny. Podstawę przekształcenia rzutowego do płaszczyzny liny stanowiły punkty dostosowania (2 - 8). Obliczenia tego przekształcenia wykonano w dwóch wariantach:

- opierając się na czterech punktach które w warunkach typowego pomiaru będą stanowiły podstawę przekształcenia rzutowego (2, 5, 6, 8),
- wykorzystując wszystkie punkty dostosowania.

Jak się należało spodziewać, różnice wyników mieściły się w granicach błędów określenia poszczególnych parametrów. W Tabeli 3 zamieszczono więc rezultaty oparte o minimalną liczbę punktów dostosowania (4).

Wyniki uzyskane czwartą metodą (on-line) uzyskano w postępowaniu opisanym w sprawozdaniu z wzmiankowanego GRANT-u; szkicowy opis procedur pomiarowych podano w rozdziale 2.

5. Analiza uzyskanych wyników

Analiza poprawności rozpatrywanych (pośrednich) metod określania naprężeń lin odciągowych prowadzi do wniosku, że najpoprawniejszą z nich są metody fotogrametryczne; tylko one umożliwiają rejestrację całej liny w tym samym momencie. Dodatkowy walor metody cyfrowej kryje się w tym, że pozwala ona bezpośrednio w terenie określać szukane parametry, umożliwiając natychmiastową korekcję naprężeń wszystkich lin.

Wadę geodezyjnego postępowania pomiarowego stanowi nierównoczesność pomiaru punktów liny. Wiadomo jest bowiem, że lina, której górny punkt zaczepienia zmienia położenie wraz z wychyleniem pod wpływem wiatru, zmienia strzałkę zwisu i wpada w ruch falowy. Rozciągnięte w czasie pomiary poszczególnych punktów liny dotyczą zatem różnych obiektów (kształtów liny). Ponadto pomiar mogą zakłócać omówione w rozdziale 1 czynniki atmosferyczne, powodujące kołysanie liny, jej rozszerzalność termiczną, czy zmieniając jednostkowy ciężar. Wpływ tych czynników można ograniczyć stosując metody fotogrametryczne.

Z pośród porównywanych metod fotogrametrycznych, najwięcej zalet ma oczywiście cyfrowa metoda pozwalająca uzyskać wyniki w czasie prawie rzeczywistym. Wadę metody

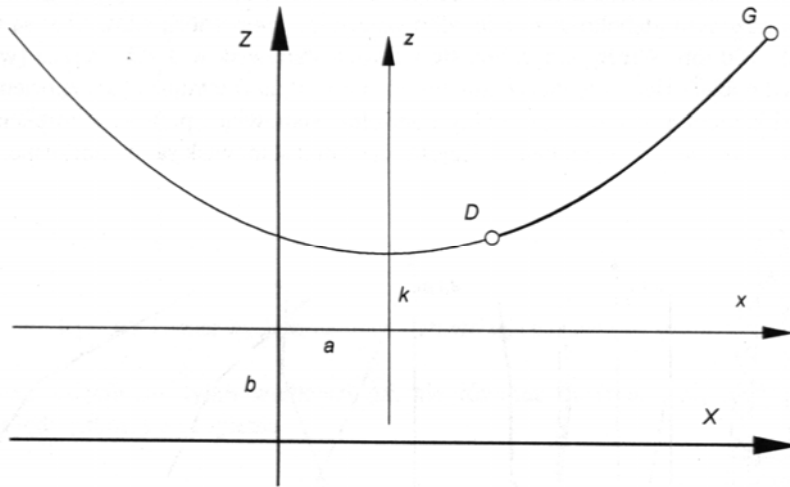
stanowi kosztowność sprzętu (cena wysokorozdzielczej kamery cyfrowej). Ograniczenie tych kosztów można znaleźć dwiema drogami: poprzez działania organizacyjno-marketingowe pozwalające obniżyć koszt jednostkowego wykorzystania kamery, oraz przez stosowanie tańszych kamer, co niekoniecznie musi prowadzić do rażącego obniżenia dokładności (przy wykorzystaniu pakietu programów opracowanych w ramach wspomnianego GRANTU).

Perspektywicznie warto rozważyć następujący problem: celem pomiaru jest na ogół określenie wielkości korekcyjnych, których wprowadzenie przywróci stan normatywny urządzenia – nie tylko normatywne naprężenia lin, ale również pionowość masztu. Wszystkie informacje o odchyleniach od takiego stanu powinny być pozyskane w tym samym momencie (lub – przy spełnieniu określonych warunków - prawie równocześnie). Korekcyjne poprawki powinny bowiem rozwiązywać kompleksowo zagadnienie: jak skorygować naprężenia poszczególnych lin, aby przy ich normatywnych naprężeniach, maszt zajmował prostą i pionową pozycję. Jest to kolejne zadanie czekające na rozwiązanie w trybie „real time”.

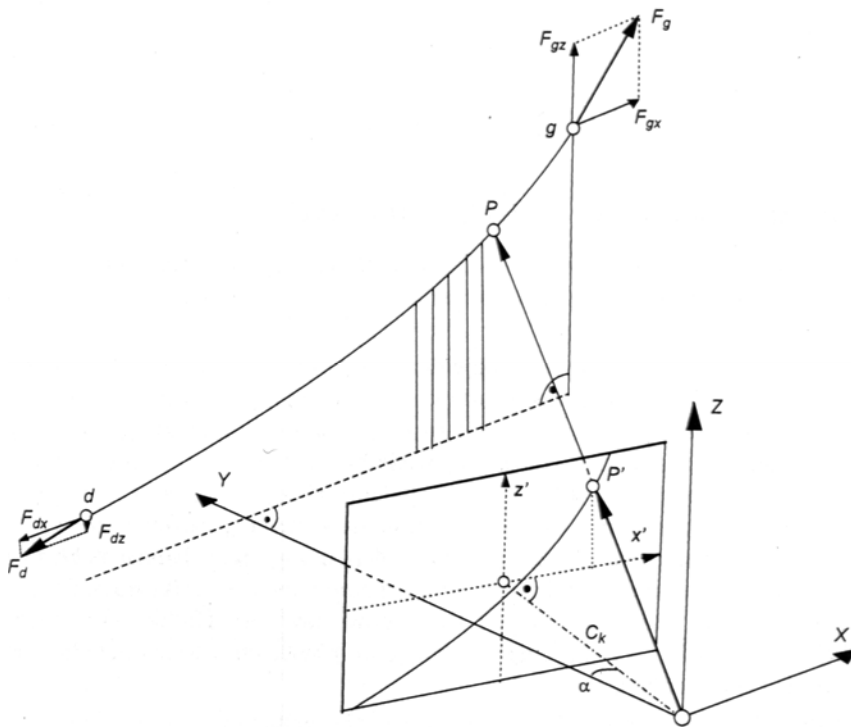
Bibliografia

1. Adamczewski Z. Krzywa łańcuchowa jako linia realna (dywagacje numeryczne po zawaleniu przez majstrów najwyższego masztu świata). Przegląd Geodezyjny, nr 4/1992.
2. Bernasik J., Tokarczyk A.: Fotogrametryczne pomiary wież wiertniczych. Przegląd Geodezyjny. Nr.11. Warszawa 1961.
3. Bernasik J., Sołtysik A.: Korekcja napięć lin odciągowych wież i masztów wiertniczych. Materiały Konferencji n/t: Application of Mathematical Methods in Science and Technique. AGH Kraków 1995.
4. Janusz J.: Metodyka geodezyjnego badania naprężeń i wydłużeń lin w konstrukcjach ciągnowych. IGIK, Warszawa 1996.
5. Gogolińska M., Gogoliński W.: Krzywa łańcuchowa. Przegląd Geodezyjny. Nr.7. Warszawa 1976.
6. Kolondra L. Próba kompleksowego opracowania wyników terrofotogrametrycznego pomiaru sił naciągu lin odciągowych masztu antenowego. Zeszyty Naukowe AGH Kraków. Geodezja z.64, 1984, ss.31-44.
7. Kolondra L.: Determining Tensions Forces of Guy-Ropes of an Aerial Mast by Means of Terrophotoqrammetric Measuremants. Preceedings of the Symposium “Real-Time Photogrammetry – A New Challege”,m June 16-19,1986, Ottawa, Canada, vol. 26, part 5, pp. 209-216.
8. Praca zbiorowa. Geodezja inżynieryjno-przemysłowa. AGH Kraków 1969.
9. Wynalek J., Zaremba S.: Wyznaczanie parametrów geometrycznych lin dla analizy sił w konstrukcjach ciągnowych. Raport, seria SPR, nr.927. Politechnika Wroclawska 1998.
10. Wynalek J.,Zaremba S.: Geodezyjny pomiar jako podstawa do obliczania sił naciągu w linach. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wroclawiu. Geodezja I Urządzenia Rolne XIV. Nr 324.
- 11.Zarankiewicz M. Mechanika teoretyczna. PWN Warszawa 1996.

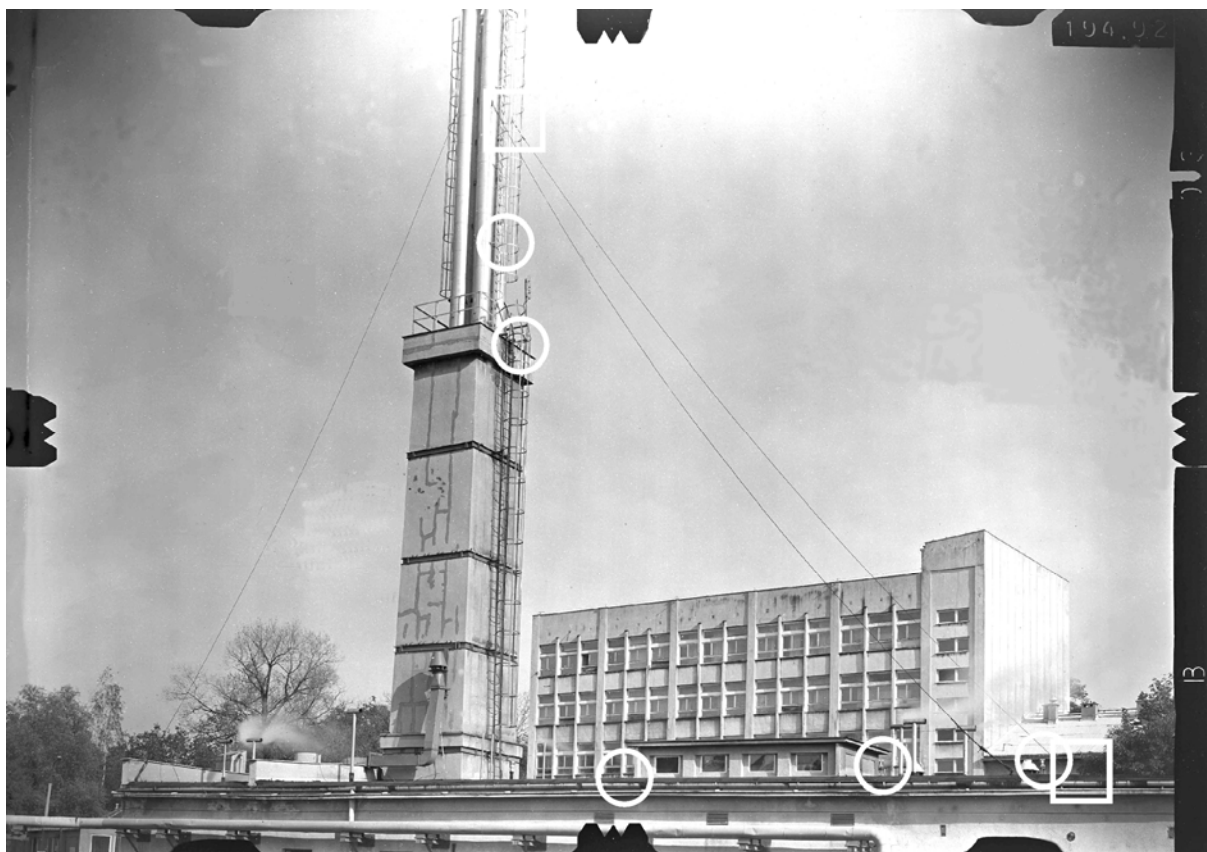
Rysunki i podpisy pod rysunkami



Rys.1. Układ katenoidy (x,z) i lokalny geodezyjny układ linii (X, Z) , oraz parametr krzywej łańcuchowej „ k ” i wzajemne przesunięcia obu układów („ a ” i „ b ”).



Rys.2. Pomiar punktu (P) linii odciągowej: stanowisko kamery – początek lokalnego układu współrzędnych, punkty zaczepienia linii $(d$ i $g)$, składowe siły naprężenia linii.



Rys.3. Fotogram linii z zaznaczonymi punktami dostosowania; kwadracikami zaznaczono punkty zaczepienia linii .

Tabele z tytułami

Tabela 1. Zestawienie współrzędnych punktów pomiarowych

| | Punkty sieci | | | Punkty liny | |
|-------|--------------|--------|-------|-------------|--------|
| Nr.p. | X [m] | Z [m] | Nr.p. | X [m] | Z [m] |
| 1 | 0.00 | 0.00 | 10 | 5.662 | 3.891 |
| 2 | 5.731 | 3.828 | 11 | 2.757 | 6.764 |
| 3 | 5.041 | 4.113 | 12 | 0.046 | 9.657 |
| 4 | 0.238 | 4.004 | 13 | -2.665 | 12.759 |
| 5 | -7.798 | 3.376 | 14 | -6.085 | 16.991 |
| 6 | -11.868 | 17.866 | 15 | -8.875 | 20.715 |
| 7 | -12.458 | 19.525 | 16 | -11.920 | 25.070 |
| 8 | -11.918 | 25.073 | | | |

Tabela 2. Zestawienie wyników uzyskane przy pomocy programu GEOCATEN

```

=====
Wielkoscil sil obliczono przy ciezarze jednostkowym liny =
0,9 [ kg ]

                WIELKOSCI SIL [ N ] ;

SKLADOWA POZIOMA NACIAGU LIN                457.502
SKLADOWE PIONOWE SIL
    W DOLNYM ZACZEPIE                        433.905
    W GORNYM ZACZEPIE                        678,742
SILY WYPADKOWE
    W DOLNYM ZACZEPIE                        630.541
    W GORNYM ZACZEPIE                        818.534

                CECHY GEOMETRYCZNE LINY [ m ]

DLUGOSC RZUTU POZIOMEGO LINY                17.582
DLUGOSC RZUTU PIONOWEGO LINY                21.180
DLUGOSC CIECIWY (MIEDZY ZACZEPAMI)         27.526
DLUGOSC LUKU LINY                           -27.581
ODCIETA X DLA STRZALKI MAX.                 -3.319
STRZALKA PIONOWA MAX.                       1.168
WSPOLRZEDNE ZACZEPOW
    X DOLNEGO ZACZEPU =          5.662      Z DOLNEGO ZACZEPU =
3.891
    X GORNEGO ZACZEPU =         -11.920     Z GORNEGO ZACZEPU =
25.070
=====

```

Tabela 3. Zestawienie wyników i błędów pomiarów

| Metoda: | k [m] | a [m] | b [m] | m _Z [mm] | m _k [cm] | F _x [N] | m _{F_x} [N] |
|---------------------------|-------|-------|--------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------------------|
| Geodezyjna | 51.80 | 49.46 | -69.55 | 1 | 3.8 | 457 | 0.3 |
| Fotogr. analog. | 51.94 | 49,63 | -67.81 | 1 | 6.9 | 459 | 0.6 |
| Fotogr. anal-cyfr. | 51.82 | 49.49 | -67.59 | 1 | 4.2 | 458 | 0.4 |
| Fotogr. cyfrowa | 52.07 | 49.76 | -68.00 | | 0.6 | 460 | 0.1 |