

Analiza wybranych niepewności i błędów pomiarowych występujących podczas pomiarów tachimetrami elektrooptycznymi stosowanymi w budownictwie

Mgr inż. Karol Daliga

Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

Na przełomie XX i XXI wieku pojawiły się na polskim rynku najnowocześniejsze geodezyjne instrumenty pomiarowe, m.in. ze źródłem światła laserowego, stosowane w różnych branżach budownictwa i przemysłu. Postęp techniczny spowodował, że geodezyjne instrumenty pomiarowe są coraz dokładniejsze, prostsze w obsłudze i coraz tańsze. Dostępność do nowoczesnych instrumentów i prostota ich obsługi spowodowała znaczne skrócenie czasu prac geodezyjnych wykonywanych na budowach oraz zwiększyła efektywność pracy inżynierów geodezji i budownictwa (rys. 1).

Duża efektywność pracy z geodezyjnymi instrumentami pomiarowymi jest spowodowana zwiększonym stopniem automatyzacji procesu pomiaru, archiwizacji danych oraz ich późniejszej obróbki. Jednocześnie automatyzacja wielu procesów

oraz zmniejszenie stopnia trudności obsługi instrumentów pomiarowych powoduje to, że obserwator – operator instrumentu pomiarowego – często „bezkrytycznie ufa” wynikom uzyskanym dzięki stosowaniu nowoczesnego instrumentu pomiarowego. Dodatkowo, obserwator może utracić, w pewnym stopniu, kontrolę nad wykonywanymi pomiarami i wynikami pomiaru. Ponadto, światło laserowe o coraz większej mocy stosowane w instrumentach geodezyjnych stwarza ryzyko nieumyślnego uszkodzenia oczu osoby postronnej przebywającej na budowie w obszarze wiązki światła laserowego.

W artykule opisano niektóre zjawiska występujące podczas wykonywania pomiarów instrumentami geodezyjnymi, szczególnie z zastosowaniem emisji i rejestracji światła z zakresu widzialnego lub podczerwieni.

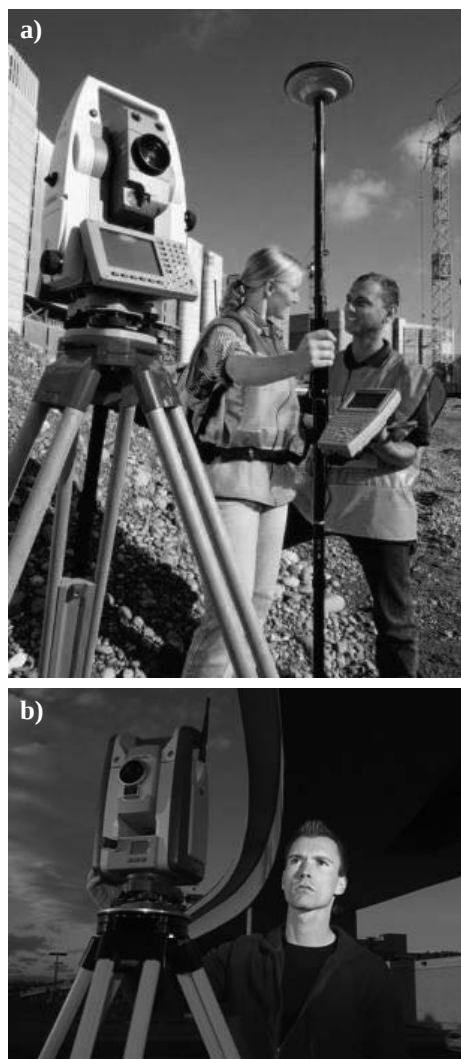
Artykuł jest kontynuacją tematyki poruszanej m.in. w publikacjach [12, 17] poświęconych technikom pomiarowym i instrumentom geodezyjnym stosowanym w budownictwie.

WYBRANE NOWOCZESNE INSTRUMENTY GEODEZYJNE ZE ŹRÓDŁEM ŚWIATŁA LASEROWEGO STOSOWANE W BUDOWNICTWIE

W budownictwie są stosowane różne rodzaje nowoczesnych urządzeń i przyrządów pomiarowych. Można do nich również zaliczyć wszelkie geodezyjne instrumenty pomiarowe. Są one używane w trakcie realizacji obiektów budowlanych, ich inwentaryzacji oraz do szczegółowej analizy „zachowania się” konstrukcji podczas eksploatacji. W trakcie budowy i eksploatacji budowla inżynierska oraz jej elementy ulegają przemieszczeniom i odkształceniom, których wartości nie mogą przekraczać wartości dopuszczalnych, zapewniających bezpieczną eksploatację.

Pomiary przemieszczeń lub deformacji budowli mogą być mierzone w sposób względny lub bezwzględny. Do pomiarów względnych są stosowane czujniki lub przyrządy bezpośrednio montowane do konstrukcji (np. tensometry, akcelerometry, przyrządy śledzące pozorny ruch plamki światła laserowego). Pomiary bezwzględne charakteryzuje odniesienie wyników pomiarów do bazy znajdującej się poza mierzonym obiektem. Do tych pomiarów zalicza się pomiary wykonywane np. niwelatorami, teodolitami, tachimetrami, skanerami laserowymi oraz pomiary satelitarne [11, 12].

Dzięki miniaturyzacji i znacznemu obniżeniu kosztów produkcji podzespołów elektronicznych oraz elektrooptycznych tachimetrie mają wbudowane dalmierze elektrooptyczne z półprzewodnikowym źródłem światła, elektroniczne systemy odczytu odległości oraz kierunków (do obliczania kątów pionowych i poziomych). Mają również system archiwizacji i transferu danych oraz podstawowe funkcje obróbki danych. Przykładem



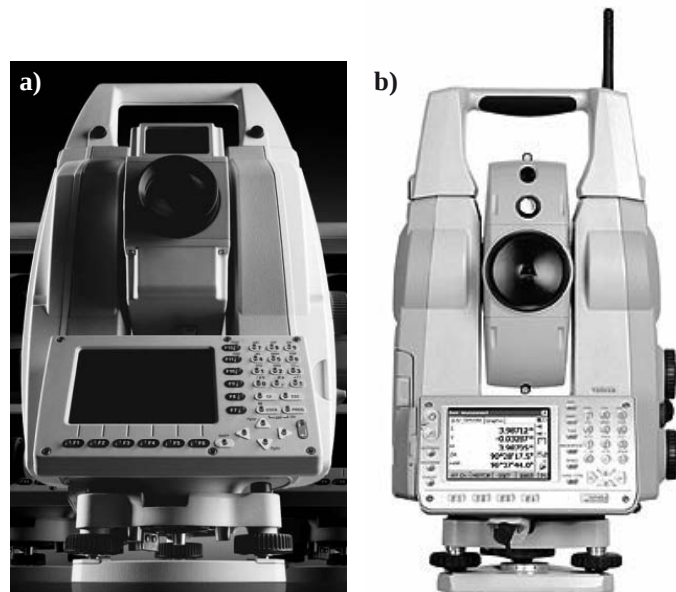
Rys. 1. Zastosowanie zestawu GPS i tachimetru na budowie (a) [7] oraz w budownictwie drogowym (b) [10]



Rys. 2. Tachimetr firmy Topcon GTS-102N [9]

tachimetru tego typu, stosowanego do pomiarów na budowie, jest tachimetr firmy Topcon GTS-102N przedstawiony na rys. 2. Jego dokładność pomiaru odległości do pryzmatu wynosi $(2\text{ mm} + 2\text{ mm/km})$, a pomiaru kierunków $2''$ [9].

Do pomiarów o większej dokładności kątowej niż $2''$ stosuje się tachimetry zmotoryzowane (rys. 3). Dzięki zastosowaniu silników (serwomotorów) i odpowiedniemu oprogramowaniu tachimetry zmotoryzowane potrafią samodzielnie ustawić oś celową na zadany kierunek. Jeżeli mają dodatkowo opcję śledzenia reflektora (pryzmatu), mogą samodzielnie, dokładnie ustawić oś celową na reflektor w punkcie pomiarowym. Tachimetry zmotoryzowane można również zaprogramować tak, aby w sposób automatyczny śledziły kolejno położenie wielu pryzmatów.



Rys. 3. Przykłady przemysłowych tachimetrów zmotoryzowanych:
a) Leica TS30, b) SOKKIA serii NET [6, 8]

Przykładami tachimetrów (przemysłowych) z takimi funkcjami jest tachimetr Leica TS30 (rys. 3a) [6] oraz tachimetry SOKKIA serii NET (rys. 3b) [8]. Tachimetr Leica TS30 wykonuje pomiar odległości z dokładnością do $(0,6\text{ mm} + 1\text{ mm/km})$ – pomiar do pryzmatu lub z dokładnością do $(2\text{ mm} + 2\text{ mm/km})$ – dla pomiaru bezreflektorowego. Dokładność pomiaru kierunku wynosi $0,5''$ [6]. Tachimetr SOKKIA NET05AX wykonuje pomiar odległości z dokładnością do $(0,8\text{ mm} + 1\text{ mm/km})$ – pomiar do pryzmatu lub z dokładnością do $(1\text{ mm} + 1\text{ mm/km})$ – dla pomiaru bezreflektorowego. Dokładność pomiaru kierunku wynosi $0,5''$ [8].

ZAGROŻENIA PODCZAS POMIARÓW GEODEZYJNYCH WYKONYWANYCH INSTRUMENTAMI Z LASEROWYM ŹRÓDŁEM ŚWIATŁA

Potrzeba wykonywania geodezyjnych pomiarów w budownictwie w różnych warunkach atmosferycznych (wilgotności, temperatury), przy różnym oświetleniu i zapyleniu oraz na różnych powierzchniach markujących „punkty pomiarowe” spowodowała konieczność zwiększenia mocy źródeł światła laserowego stosowanego w tachimetrach (w zakresie od poniżej 1 mW do ponad 5 mW).

Do pomiarów, w których znacznikiem punktu pomiarowego jest reflektor (lustro, pryzmat, folia odbłaskowa) lub pomiar jest prowadzony na małych odległościach (do około 30 m), wystarczy zastosowanie źródła światła laserowego klasy pierwszej. Lasery tej klasy są bezpieczne w racjonalnych warunkach pracy, tzn. gdy są stosowane zgodnie z ich przeznaczeniem, są bezpieczne dla oka [15].

W przypadku, gdy pomiar położenia punktu ma być wykonany z dużej odległości z zastosowaniem reflektora (powyżej 100 m) lub punkt pomiarowy nie jest oznaczony „reflektorem” (tzw. pomiar bezlustrowy) wymaga się zastosowania lasera większej mocy, np. powyżej 1 mW. W tachimetrach umożliwiających pomiar „bezreflektorowy” są stosowane lasery klasy 3R. Lasery tej klasy to lasery, dla których bezpośrednie patrzenie w wiązkę, zarówno w wiązkę wychodzącą, jak i w wiązkę odbitą (bezpośrednio i przez przyrządy optyczne) jest potencjalnie niebezpieczne [15]. Stosowane w tachimetrach półprzewodnikowe źródła światła laserowego emitują światło, zależnie od modelu tachimetru, z zakresu $650 \div 800\text{ nm}$. Promieniowanie z tego zakresu może powodować fotochemiczne i termiczne uszkodzenie siatkówki oka, dlatego też przed rozpoczęciem pomiarów należy sprawdzić, jakiej klasy laser jest zainstalowany w tachimetrze. Informacja o klasie lasera musi znajdować się w instrukcji obsługi instrumentu. Na obudowie instrumentu również powinna znajdować się żółto-czarna naklejka informująca o klasie lasera stosowanego w instrumencie.

ANALIZA WPŁYWU ZMIANY WSPÓŁCZYNNIKA ZAŁAMANIA ŚWIATŁA NA POMIAR ODLEGŁOŚCI METODĄ IMPULSOWĄ I FAZOWĄ

Dalmierze elektrooptyczne zainstalowane w tachimetrze dokonują pomiaru odległości metodą impulsową lub fazową. Metoda impulsowa polega na wysyłaniu z dalmierza impulsów

światła oraz pomiaru czasu, w jakim impuls pokonał drogę od instrumentu do punktu pomiarowego i z powrotem. Na podstawie otrzymanego czasu oraz współczynnika załamania światła (ustalonego w instrumencie za pomocą poprawki atmosferycznej, zależnej m.in. od temperatury [16]) jest obliczana odległość między instrumentem a punktem pomiarowym, zgodnie z równaniem (1) [14]:

$$D = \frac{t \cdot c}{n_t} \quad n_t = \frac{c}{v_t} \quad (1)$$

gdzie:

D – odległość między tachimetrem i punktem pomiarowym,

t – zmierzony czas między wysłaniem i odebraniem sygnału,

c – prędkość światła w próżni,

n_t – współczynnik załamania światła w powietrzu (stosowany do obliczeń przez tachimetr),

v_t – prędkość światła w powietrzu.

Z równania (1) wynika, że obliczona odległość między tachimetrem a punktem pomiarowym jest zależna od przyjętego współczynnika załamania światła atmosfery oraz zmierzonego czasu. Niedokładność pomiaru czasu oraz niepoprawnie przyjęta wartość współczynnika załamania światła powoduje błędny pomiar.

W celu uwzględnienia wpływu temperatury współczesne tachimetry mają możliwość wprowadzenia wartości temperatury atmosfery, w której są wykonywane pomiary. Służy ona do automatycznego obliczenia poprawek atmosferycznych, które określają wartość współczynnika załamania światła atmosfery w czasie pomiarów. Przykładowe odległości do punktu obliczone na podstawie równania (1) przez przykładowy dalmierz impulsowy stosujący długość fali $\lambda = 589,3$ nm (barwy żółtej) w zależności od temperatury atmosfery przedstawiono w tabl. 1.

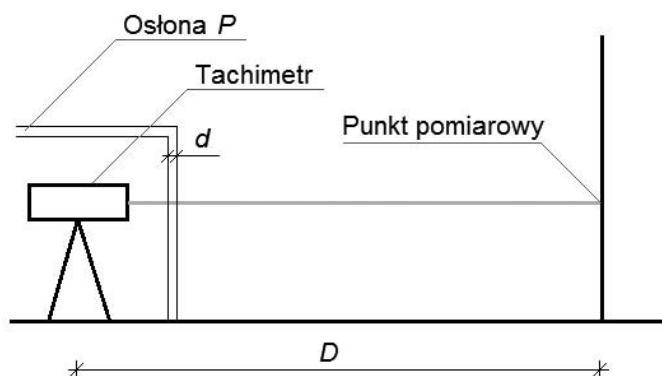
Tabl. 1. Porównanie obliczonych odległości w zależności od temperatury atmosfery

Temperatura [°C]	Współczynnik załamania światła n_t [16]	Odległość rzeczywista $c \cdot t$ [m]	Odległość obliczona przez dalmierz [m]
0	1,000293	200	199,941
15	1,000277		199,945
25	1,000268		199,946
30	1,000264		199,947
40	1,000255		199,949

Zdarza się czasami, że podczas pomiarów, w celu ochrony przed deszczem, tachimetr należy przykryć przezroczystą osłoną. Taka osłona powoduje powstanie błędów systematycznych pomiaru odległości oraz kierunków. Poniżej zaprezentowano analizę przypadku błędu systematycznego pomiaru odległości spowodowanego obecnością przezroczystej osłony tachimetru. Schematyczny rysunek położenia osłony między tachimetrem a punktem pomiarowym przedstawiono na rys. 4.

Dla wartości współczynnika załamania światła atmosfery n_t i przy osłonie P o grubości d i współczynniku załamania światła n_p , czas potrzebny wysłaniu impulsu na przebycie drogi $2D$ można obliczyć za pomocą równania (2):

$$t' = 2D \cdot \frac{n_t}{c} + 2d \cdot \frac{n_p - n_t}{c} \quad (2)$$



Rys. 4. Schemat pomiaru odległości do punktu tachimetrem w przezroczystej osłonie

Po przekształceniu równań (1) i (2) otrzymuje się równanie (3) opisujące różnicę między odległością do punktu pomiarowego D a odległością zmierzoną przez tachimetr w osłonie:

$$\Delta D = \frac{n_p - n_t}{n_t} \cdot d \quad (3)$$

Jeżeli przyjmiemy, że $n_t = 1$ (współczynnik załamania atmosfery), a osłona wykonana jest ze szkła o współczynniku załamania światła $n_p = 1,45$, to istnienie osłony spowoduje zawyżenie odczytu o $\Delta D = 0,45d$ (dla osłony grubości 2 mm $\Delta D = 0,9$ mm).

W tachimetrze z fazowym pomiarem odległości detektor rejestruje różnice faz między sygnałem emitowanym a sygnałem odebrany po odbiciu od punktu pomiarowego. Fazowy pomiar odległości również zależy od właściwie przyjętego współczynnika załamania światła atmosfery. Odległość ta jest obliczana z równania (4) [14]:

$$D = \frac{c}{2 \cdot f \cdot n_t} (N + R) = \frac{\lambda_t}{2} (N + R) \quad (4)$$

gdzie:

D – odległość między tachimetrem a punktem pomiarowym,

c – prędkość światła w próżni,

f – częstotliwość fali wzorcowej,

n_t – współczynnik załamania światła zastosowany do obliczenia odległości,

N – liczba pełnych długości fali wzorcowej mieszczących się w odległości $2D$ (wprost nierejestrowalna),

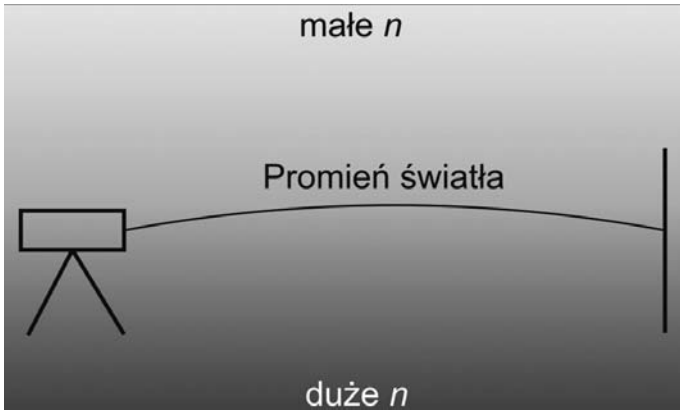
R – „reszta” (rejestrowana przez fazomierz),

λ_t – długość fali wzorcowej emitowanej przez dalmierz.

Producenci tachimetrów zamieszczają w instrukcjach obsługi równania i nomogramy, za pomocą których można obliczyć wpływ współczynnika załamania światła na pomiar odległości [13]. Wzory te są również zaimplementowane w instrumencie pomiarowym.

WPŁYW REFRAKCJI ŚWIATŁA NA WYNIKI POMIARÓW GEODEZYJNYCH

Wartość współczynnika załamania światła n wpływa nie tylko na pomiar odległości. Zmiana współczynnika załamania światła n , zgodnie z prawem Snelliusa, może prowadzić do wystąpienia zjawiska refrakcji. Zjawisko refrakcji występuje, gdy gradient współczynnika załamania światła ma składową prostopadłą i równoległą do kierunku biegu promienia światła. Zjawi-



Rys. 5. Schemat zjawiska refrakcji dla wiązki światła

sko to objawia się ciągłą zmianą kierunku biegu wiązki światła. Zjawisko refrakcji przedstawiono schematycznie na rys. 5, gdzie „małe n ” oznacza obszar o mniejszej wartości współczynnika załamania, natomiast „duże n ” oznacza obszar o większej wartości współczynnika załamania światła.

Zjawisko refrakcji nie wpływa znacząco na pomiar odległości (oszacowane wydłużenie o około 1 mm na długości 1 km) [4]. Natomiast wpływa niekorzystnie na pomiar kierunków oraz tyczenie linii prostej (odchylenie od linii prostej może wynosić około 1 mm/100 m) [1]. Zjawisko refrakcji powoduje wzrost niepewności pomiaru, ponieważ nie jest możliwe dokładne określenie jego wpływu na wartość pomiaru odległości i kierunków.

Zjawisko refrakcji występuje m.in. w obszarze o przestrzennej zmiennej wilgotności, temperaturze [3] oraz w pobliżu obszarów silnych pól elektrycznych [2]. Przykładem obszarów o zmiennej wilgotności są tereny przybrzeżne. Podczas wykonywania pomiarów geodezyjnych na tych terenach, np. przy realizacji obiektów hydrotechnicznych typu nabrzeży, falochronów (rys. 6) lub zapór wodnych, należy bezwzględnie uwzględnić wpływ refrakcji.

Wpływ zjawiska refrakcji, w przypadku przedstawionym na rys. 6, będzie największy, jeżeli oś celowa tachimetru (kierunek pomiaru) będzie przechodzić przez „Obszar zjawiska refrakcji”. Zjawisko refrakcji będzie miało mniejszy wpływ na niepewność pomiaru, jeżeli oś celowa będzie znajdować się w obszarze nabrzeża lub falochronu.



Rys. 6. Przykładowy obszar występowania zjawiska refrakcji [5]
(• – przykładowe stanowisko pomiarowe)

Współczesne tachimetry elektrooptyczne są coraz doskonalsze i bardzo przydatne do pomiarów przemieszczeń wybranych punktów oraz deformacji całych budowli inżynierskich.

Jeżeli parametry atmosfery między tachimetrem i punktem pomiarowym są jednorodne, niezmiennie lub mierzone są małe odległości, to wpływ refrakcji i błąd pomiaru odległości związany z atmosferą można łatwo oszacować lub pominąć. Jeżeli parametry atmosfery między instrumentem i punktem pomiarowym wykazują dużą zmienność, należy być świadomym, że rejestrowane dane będą obciążone błędami przypadkowymi, które zmniejszają dokładność pomiaru. Jest to istotne, jeżeli rejestrowane przemieszczenia punktów pomiarowych znajdujących się na budowli inżynierskiej są rzędu milimetrów.

Przedstawione zagadnienia dotyczą nie tylko tachimetrów. Dotyczą one również innych metod pomiarowych, stosujących emisję i/lub rejestrację promieniowania elektromagnetycznego, wykorzystywanych w budownictwie i geodezji.

W trakcie pomiarów należy zawsze pamiętać o bezpieczeństwie swoim i innych osób. Należy być zawsze świadomym, jakie mogą być skutki niewłaściwego posługiwania się światłem laserowym emitowanym przez tachimetr i inne instrumenty stosujące ten rodzaj światła do pomiarów.

LITERATURA

1. Bryś H.: Geometria refrakcji aliniometrycznej ze strefowym oddziaływaniem pól temperatury. IV Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy automatyzacji w geodezji inżynierskiej”, Warszawa 1999.
2. Bryś H.: Influence of Current Power Line Electric Field on Refraction. AVN 119 (2012) 3.
3. Bryś H., Ćmielewski K., Kowalski K.: Mathematic-physic models of horizontal refraction in engineering and industrial measurements of the highest precision. Reports on Geodesy, No. 2 (87), 2009.
4. Grabowski R., Kobryń A.: Określanie parametrów Krzywych refrakcyjnych przy pomiarze przemieszczeń pionowych metodą niwelacji trygonometrycznej. IV Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy automatyzacji w geodezji inżynierskiej”, Warszawa 1999.
5. <http://www.geoprojekt.szczecin.pl/realizacje/archiwum/falochron-osonowy-portu-zewn-trznego-w-winouj-ciu/> (15.01.2013).
6. http://www.leica-geosystems.pl/pl/Leica-TS30_77093.htm (10.01.2013).
7. <http://www.totalsurveys.co.uk/equipment+and+technology.aspx> (15.01.2013).
8. <http://www.tpi.com.pl/sokkia-net> (10.01.2013).
9. <http://www.tpi.com.pl/topcon-gts-100n> (10.01.2013).
10. <http://www.trimble.com/3d-laser-scanning/vx.aspx?dtID=overview&> (15.01.2013).
11. Kurałowicz Z., Szczechowski B.: Możliwość zastosowania nowoczesnych technologii geodezyjnych w budownictwie. Sesja Jubileuszowa 60-lecia Katedry Geodezji Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2005.
12. Kurałowicz Z., Żurowski A.: Zastosowanie geodezyjnych metod badawczych w budownictwie. Inżynieria i Budownictwo 12/1999.

13. Leica TPS1200 Instrukcja obsługi http://gik.wbiis.tu.koszalin.pl/docs/lgik/TPS1200_User_pl-popr.pdf (15.01.2013).
14. Płatek A.: Geodezyjne dalmierze elektromagnetyczne i tachymetry elektroniczne. Część pierwsza: Geodezyjne dalmierze elektromagnetyczne do pomiarów terenowych, PPWK, Warszawa 1991.
15. PN-EN 60825-1:2005, Bezpieczeństwo urządzeń laserowych – Część 1: Klasyfikacja sprzętu, wymagania i przewodnik użytkownika.
16. Tablice Fizyczno-Astronomiczne. Wydawnictwo Adamantan 2002.
17. Żurowski A., Dunikowski R., Chmielecki M., Kmieciak J.: Geodezyjne pomiary kontrolne torów spustowych pochylni i wyciągów. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 5/1995.