

PRZEGLĄD METOD TESTOWYCH DO WYZNACZANIA DOKŁADNOŚCI INSTRUMENTÓW GEODEZYJNYCH ZGODNIE Z NORMAMI PN-ISO 17123

Maria Pokarowska, Jerzy Wojciechowski

Politechnika Warszawska

Streszczenie. Artykuł poświęcony jest analizie sposobów testowania instrumentów geodezyjnych zgodnie z normami serii ISO 17123, z których 7 zostało przetłumaczonych na język polski i przyjętych jako Polskie Normy. W normach zaleca się wykonanie testów pomiarowych instrumentów przed ich użyciem do konkretnej pracy. Celem testów jest sprawdzenie, czy dokładność pomiaru danym egzemplarzem instrumentu jest zgodna z dokładnością podaną przez producenta.

Artykuł zawiera uwagi odnośnie sposobów testowania instrumentów geodezyjnych zgodnie z procedurami podanymi w normach. Przedstawiono zakładane dla różnych rodzajów instrumentów pola testowe. Szczególną uwagę zwrócono na analizę statystyczną wyników testów. Chociaż normy nie przewidują zmian w organizacji pól testowych i programach obliczeń, autorzy artykułu przedstawiają propozycje modyfikacji niektórych fragmentów norm. W przypadku gdy takich propozycji jest więcej, ISO wprowadza nowe, poprawione normy i wycofuje stare, co do których użytkownicy mieli zastrzeżenia. Dzięki takim opiniom zrewidowano normy 17123-1 oraz 17123-5 w wersji angielskiej. Nie zostały one jeszcze przetłumaczone i przyjęte jako Polskie Normy.

Słowa kluczowe: testowanie instrumentów geodezyjnych, normy ISO 17123, testy statystyczne, estymatory wariancji, dokładność pomiarów

WSTĘP

Okresowe testowanie instrumentów jest niezbędne do zapewnienia odpowiedniej dokładności pomiarów geodezyjnych. Analiza wyników testów pozwala wybrać najkorzystniejszą dla danego instrumentu technikę pomiaru, jak również wyeliminować z użycia te instrumenty, które nie spełniają założonych wymagań dokładnościowych.

Wyróżnia się:

- Testowanie szczegółowe, wykonywane najczęściej przez instytucje mające uprawnienia do wydawania certyfikatów. Testuje się zazwyczaj instrumenty najdokładniejsze w swojej klasie. Metodyka testowania bywa często tematem prac naukowo-badawczych.
- Testowanie użytkowe, wykonywane przez użytkowników instrumentów geodezyjnych. Tego rodzaju testowanie jest przedmiotem zainteresowań rodziny norm ISO przygotowywanych przez Komitet Techniczny ISO/TC 172. Testy instrumentów wykonuje się ściśle według programów obserwacji i obliczeń zawartych w normach, dzięki czemu wyniki testów są porównywalne dla wszystkich testowanych instrumentów.

Zagadnienie testowania instrumentów geodezyjnych jest częścią programu studiów na Wydziale Geodezji i Kartografii PW. Wchodzi także w zakres działalności Komitetu Technicznego Nr 298 ds. Geodezji Polskiego Komitetu Normalizacyjnego, którego przewodniczącym jest autor niniejszego artykułu. Podczas prac normalizacyjnych KT 298 przetłumaczono z języka angielskiego normy ISO serii 17123. Normy te, przyjęte przez PKN jako Polskie Normy, mają wspólną część tytułu „Optyka i instrumenty optyczne – Terenowe procedury testowania instrumentów geodezyjnych i pomiarowych”. Do chwili obecnej ukazały się następujące części:

Część 1: Teoria (PN-ISO 17123-1)

Część 2: Niwelatory (PN-ISO 17123-2)

Część 3: Teodolity (PN-ISO 17123-3)

Część 4: Dalmierze elektrooptyczne (PN-ISO 17123-4)

Część 5: Tachimetry elektroniczne (PN-ISO 17123-5)

Część 6: Lasery wirujące (PN-ISO 17123-6)

Część 7: Optyczne instrumenty do pionowania (PN-ISO 17123-7)

Część 8: GNSS field measurement systems in real – time kinematic (RTK) (ISO 17123-8).

Norma nie została przetłumaczona na język polski.

Normy te obejmują większość instrumentów pomiarowych wykorzystywanych przez geodetów wykonujących pomiary z zakresu geodezji inżynierskiej. Należy podkreślić, że zostały zaprojektowane do sprawdzenia, czy dane dotyczące dokładności pomiaru podane przez producenta są zgodne z wynikami testu. W praktyce pozwala to na niedopuszczenie do użycia wadliwych egzemplarzy instrumentów. Przeprowadzenie testów zgodnie z normami daje gwarancję jakości używanego sprzętu, dlatego normy honorowane są przez firmy prowadzące prace budowlane. Firmy zagraniczne wręcz wymagają od wykonawców prac geodezyjnych wykonania testów zgodnie z powyższymi normami.

Normy PKN muszą być wiernym tłumaczeniem oryginału, co oznacza, że w przypadku występowania ewentualnych wątpliwości nie można ich w wersji polskiej wyjaśniać poprzez dodanie komentarza czy usunięcie błędu.

W polskojęzycznej literaturze oraz instrukcjach technicznych mało jest pozycji dotyczących testowania instrumentów geodezyjnych, tym bardziej uzasadnione jest zainteresowanie normami. Normy są przedmiotem zainteresowania Pawłowskiego [2008], Kwinty i Krupińskiego [2010], Owerki [2009] oraz Godek i Krupińskiego [2010]. W ostatniej pozycji autorzy wspominają poprzedniczkę normy 17123, normę 8322. Testowanie instrumentów według norm 17123-2 do 8 zostało wykonane w ramach prac dyplomowych

przez studentów Wydziału Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej pod naszym kierownictwem. Uwagi i wnioski z tych prac przedstawiono poniżej.

OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA NORMOWYCH METOD TESTOWANIA INSTRUMENTÓW GEODEZYJNYCH

Poniższe zalecenia norm serii 17123 odnośnie metod testowania dotyczą większości instrumentów:

- Przed wykonaniem testu instrumenty powinny zostać zrektyfikowane zgodnie z zaleceniami producenta, co oznacza, że testowi poddaje się sprzęt w pełni sprawny.
- Sprzęt pomocniczy użyty do testu (statywy, reflektory, dalmierze, przyrządy meteorologiczne, łaty niwelacyjne itp.) powinien być ten sam co sprzęt, który ma być użyty w trakcie właściwych pomiarów na obiekcie.
- Test wykonuje się w warunkach zbliżonych do warunków przewidywanych podczas pomiarów produkcyjnych (podobne długości celowych, podobne warunki atmosferyczne itp.). Dzięki temu wykonawca pomiarów geodezyjnych może mieć statystyczną pewność, że wyniki pomiarów danym egzemplarzem instrumentu uzyskane w warunkach terenowych będą zgodne z wynikami testu.
- Testy instrumentów mogą być wykonywane według procedury tzw. pełnej lub uproszczonej, w zależności od potrzeb. Test według procedury pełnej jest znacznie bardziej pracochłonny.
- Wszystkie normy (poza teoretyczną) zawierają przykłady obliczeń. Dzięki temu geodeta nieznający podstaw statystyki i rachunku wyrównawczego może wykonać test instrumentu wraz z obliczeniami.
- Opracowanie wyników pomiarowych następuje według procedur statystycznych, które opisano w części 1 rodziny norm 17123. Przy opracowaniu wyników testów we wszystkich normach przyjęto, za normą PN/ISO 4463-1, współczynnik wiążący odchylenia standardowe z odchyleniami dopuszczalnymi równy 2,5.

SZCZEGÓLWE UWAGI DOTYCZĄCE WYMIENIONYCH NORM

Norma PN-ISO 17123-1 zawiera podstawy teoretyczne szacowania dokładności instrumentów geodezyjnych, a w szczególności pięć formuł na estymatory wariancji (punkty 5.1 ÷ 5.6 normy) oraz trzy testy wariancji (punkty 5.7.1 ÷ 5.7.4).

Dokładność instrumentów geodezyjnych jest wyrażana za pomocą estymatora s odchylenia standardowego σ lub estymatora s^2 wariancji σ^2 . Wariancja s^2 z próbki jest przybliżeniem teoretycznej wariancji σ^2 z populacji. Estymator s^2 wyraża się wzorem:

$$s^2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m s_i^2, \quad (1)$$

gdzie: m – liczba serii pomiarów, s_i^2 – estymatory wariancji uzyskane dla każdej z m serii pomiarów.

Estymator s_i^2 wariancji dla i -tej serii pomiarów oblicza się ze wzoru:

$$s_i^2 = \frac{r_i^2}{v_i}, \quad (2)$$

gdzie: $r_i^2 = \sum_{j=1}^{n_i} r_{ij}^2$ oraz $v_i = n_i - u$,

v_i – liczba stopni swobody dla i -tej serii pomiarów,

n_i – liczba pomiarów w i -tej serii,

u – liczba parametrów do oszacowania,

r_i^2 – suma kwadratów wszystkich poprawek r_{ij} w obrębie i -tej serii pomiarów,

r_{ij} – poprawki (błędy pozorne) wartości uzyskanych z pomiarów względem odpowiednich parametrów szacowanych.

W szczególnym przypadku, gdy r_{ij} jest odchyleniem j -tego pomiaru w i -tej serii x_{ij} od wartości średniej \bar{x}_i :

$$r_{ij} = \bar{x}_i - x_{ij},$$

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij}.$$

W tym przypadku liczba stopni swobody dla i -tej serii pomiarów $v_i = n_i - 1$, ponieważ średnia arytmetyczna z wyników pomiarów jest jedynym parametrem do oszacowania. Zatem:

$$s_i^2 = \frac{1}{n_i - 1} \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 \quad (3)$$

Biorąc pod uwagę wartości przyjęte jako prawdziwe, wywodzące się z innej procedury o niepewności tak małej, że zaniedbywalnej, wzór na estymator wariancji ma postać:

$$s_i^2 = \frac{\varepsilon_i^2}{n_i}, \quad (4)$$

gdzie ε_i^2 jest sumą kwadratów wszystkich odchyłeń ε_{ij} od odpowiednich wartości przyjętych jako prawdziwe \bar{x}_i w obrębie i -tej serii pomiarów:

$$\varepsilon_i^2 = \sum_{j=1}^{n_i} \varepsilon_{ij}^2$$

$$\varepsilon_{ij} = \bar{x}_i - x_{ij}$$

x_{ij} wynik j -tego pomiaru w i -tej serii.

W przypadku podwójnych pomiarów, gdy d_{ij} jest różnicą dwóch odpowiadających sobie wartości uzyskanych z j -tego pomiaru podwójnego w obrębie i -tej serii podwójnych pomiarów ($d_{ij} = x_{ij1} - x_{ij2}$), estymator wariancji oblicza się ze wzoru:

$$s_i^2 = \frac{d_i^2}{2n_i}, \quad (5)$$

gdzie: $d_i^2 = \sum_{j=1}^{n_i} d_{ij}^2$,

d_i^2 – suma kwadratów wszystkich różnic d_{ij} w obrębie i -tej serii podwójnych pomiarów,
 n_i – liczba j -tych pomiarów podwójnych w i -tej serii podwójnych pomiarów.
 Powyższym wzorom (1) ÷ (5) odpowiadają wzory 20, 15, 12, 7 i 18 normy.

W dalszej części normy (punkt 5.7.1) zalecane jest przeprowadzenie testów statystycznych w celu interpretacji wyników pomiarów i uzyskania odpowiedzi na trzy pytania:

- a) Czy odchylenie standardowe σ , którego odpowiednikiem z próby jest odchylenie s , nie jest większe od danej wartości σ_0 (ustalonej przez producenta lub innej z góry zadanej wartości)?

Testujemy na poziomie istotności α hipotezę zerową $H_0 : \sigma \leq \sigma_0$ przy hipotezie alternatywnej $H_1 : \sigma > \sigma_0$.

Hipoteza zerowa nie jest odrzucana, jeśli spełniony jest warunek:

$$\frac{vs^2}{\sigma_0^2} \leq X_{1-\alpha}^2(v),$$

gdzie v – liczba stopni swobody.

Rzeczywiście [Koronacki i Mielniczuk 2009, rozdz. 3], przy zachodzeniu H_0 statystyka X^2 ma rozkład χ^2 z v stopniami swobody.

- b) Interesuje nas porównanie dwóch wariancji. Mamy niezależne próby losowe z populacji normalnych, o jednakowej liczności (obie próby mają tę samą liczbę stopni swobody v). S^2 i \tilde{S}^2 oznaczają, odpowiednio, wariancję w próbie pierwszej i drugiej. Hipoteza zerowa orzeka równość wariancji obydwu populacji $H_0 : \sigma^2 = \tilde{\sigma}^2$. Przy tej hipotezie statystyka $F = \frac{S^2}{\tilde{S}^2}$ ma rozkład Fishera Snedecora z v i v stopniami swobody. Zatem [Koronacki i Mielniczuk 2009], testując na poziomie istotności α hipotezę zerową przy dwustronnej hipotezie alternatywnej $H_1 : \sigma^2 \neq \tilde{\sigma}^2$, za zbiór krytyczny przyjmujemy:

$$C = \{f : f \leq f_{\alpha/2, v, v} \text{ lub } f \geq f_{1-\alpha/2, v, v}\},$$

gdzie $f = \frac{s^2}{\tilde{s}^2}$, s^2 i \tilde{s}^2 są zaobserwowanymi wartościami wariancji, odpowiednio, w próbie pierwszej i drugiej, oraz $f_{\gamma, v, v}$ jest kwantylem rzędu γ rozkładu Snedecora z v i v stopniami swobody.

Wariancje s^2 , \tilde{s}^2 mogą być uzyskane z:

- dwóch próbek pomiarów wykonanych tym samym zestawem pomiarowym, ale w różnych porach;
- dwóch próbek pomiarów wykonanych tym samym zestawem pomiarowym, ale przez różnych obserwatorów;
- dwóch próbek pomiarów wykonanych różnym zestawem pomiarowym.

Jeżeli hipoteza zerowa jest spełniona, oznacza to, że dwie próbki pochodzą z tej samej populacji.

c) Czy parametr a_μ jest równy zero (badamy ważność parametru).

Parametrem a_μ może być różnica miejsca zera pary łąk niwelacyjnych w przypadku testowania niwelatora czy błąd indeksu koła pionowego w przypadku testowania teodolitu.

Testujemy na poziomie istotności α hipotezę zerową $H_0 : a_\mu = 0$, przy hipotezie alternatywnej $H_1 : a_\mu \neq 0$. Jak dość zawile podaje norma, hipoteza zerowa nie jest odrzucona, gdy spełniony jest warunek:

$$|a_\mu| \leq s_{a,\mu} t_{1-\alpha/2}(v),$$

gdzie: $s_{a,\mu}$ – estymator odchylenia standardowego parametru a_μ , $t_{1-\alpha/2}(v)$ – kwantyl rzędu $1-\alpha/2$ rozkładu t Studenta z v stopniami swobody.

Wyjaśnimy to dalej na przykładzie, podczas omawiania testowania niwelatorów.

W tekście normy są dwa ważne błędy:

- (1) Błędne określenie problemu testowania w punkcie 5.7.1 normy.
- (2) Brak uzasadnienia wzoru na estymator odchylenia standardowego w podrozdziale 5.5 normy.

Ad (1) Na początku rozdziału 4. σ^2 oznacza (teoretyczną) wariancję populacji, natomiast s^2 – wariancję próby stanowiącą estymator σ^2 . Zatem, odpowiednio, σ jest odchyleniem standardowym populacji, a s jej odpowiednikiem próbkowym. W dalszej części normy, na początku rozdziału 5 znaczenie symboli σ i s jest już inne (wartość σ oznacza wartość ustaloną przez producenta), co prowadzi do błędnego określenia testu dla problemu (a) w punkcie 5.7.1.

Poprawnie, problem testowania polega na sprawdzeniu, czy populacyjne odchylenie standardowe σ nie jest większe od danej wartości σ_0 (zadanej przez producenta czy określonej z wcześniejszych badań). Tymczasem w normie problem jest opisany jako sprawdzenie, czy $s \leq \sigma$, gdzie s jest empirycznym odpowiednikiem σ , natomiast σ ustaloną wartością populacyjnego odchylenia standardowego. Przy takiej definicji obie wartości s i σ są znane po przeprowadzeniu eksperymentu, zatem albo $s \leq \sigma$, albo $s > \sigma$. Nie ma czego testować!

Ad (2) W rozdziale 5 podanych jest pięć estymatorów populacyjnego odchylenia standardowego – wzory 7, 12, 15, 18 i 20. O ile motywacja formuł 7, 12 i 15 jest podana, to trudniejszy wzór 18 jest pozostawiony bez uzasadnienia. Powinno być napisane, że estymator przeznaczony jest do eksperymentów, w których wykonuje się serię n podwójnych pomiarów, tak że każda para pochodzi z innego rozkładu. Istotnie, w celu optymalności estymatora danego wzorem 18 zakłada się, że x_{j1} , x_{j2} są niezależnymi obserwacjami z rozkładu normalnego o średniej μ_j i wariancji σ^2 . Estymator jest niezastąpiony w sytuacji, gdy kolejne pary pomiarów wykonywane są przy różnych ustawieniach sprzętu.

Ponadto norma jest bardzo lakoniczna. Pewne informacje, które powinny się w niej znaleźć, zostały pominięte, na przykład omawiając testy, nie podano, że zakłada się, iż obserwacje pochodzą z rozkładu normalnego. Błędna interpretacja i niekoherencja występujące w tekście normy czynią go trudnym dla niestatystyka. Czytając normę, trudno będzie mu zrozumieć, dlaczego ma wykonać pomiary testowe w podany sposób.

Szczęśliwie, wszystkie pozostałe normy zawierają przykłady rachunkowe opracowania wyników pomiaru, można więc nie zagłębiając się w teorię, wykonać obliczenia według podanych przykładów.

Norma PN-ISO 17123-2 proponuje dwie procedury testowania niwelatorów: uproszczoną i pełną. Stosując procedurę uproszczoną, niwelator ustawia się w połowie odległości między łątami oddalonymi od siebie o 60 m i wykonuje serię 10 odczytów na obu łątach, zmieniając za każdym razem wysokość osi celowej oraz po pięciu odczytach kolejność odczytów wstecz i w przód. Następnie po przeniesieniu niwelatora na stanowisko oddalone o 10 m od jednej i 50 m od drugiej łąty wykonuje się taką samą serię odczytów. Niepewność wyników pomiaru określa się, licząc średnie arytmetyczne oraz odchylenia standardowe dla obu ustawień instrumentu i przyjmując, zgodnie z ISO 4463-1, współczynnik przejścia równy 2,5.

W tej części normy nie podano sposobu wyznaczenia błędu średniego podwójnej niwelacji na 1 kilometr. Rozważania dotyczą tylko niepewności pomiaru dla jednego stanowiska, co jest istotne przy obsłudze geodezyjnej obiektów budowlanych, nie pozwala jednak na bezpośrednie porównanie wyników testu z danymi technicznymi niwelatora, w których zazwyczaj wartość średniego błędu podwójnej niwelacji na kilometr jest podana.

Na określenie dokładności użytkowej w postaci odchylenia standardowego na 1 km podwójnej niwelacji pozwala pełna procedura testowania. Stosując pełną procedurę testowania, pomiary wykonuje się tylko „ze środka”, ale w większej liczbie powtórzeń, co pozwala na statystyczne opracowanie wyników pomiaru.

Dwa punkty linii testowej, A i B, zakłada się w odległości około 60 m od siebie. Ze stanowiska znajdującego się w środku pomiędzy łątami niwelacyjnymi wykonuje się 2 serie pomiarowe, w każdej serii 20 par odczytów wstecz i w przód, zamieniając między seriami łąty miejscami na obu punktach.

Obliczamy różnice między odczytem wstecz i odczytem w przód $d_j = x_{Aj} - x_{Bj}$ (patrz tablica 1) oraz średnie arytmetyczne różnic wysokości w obu seriach:

$$\bar{d}_i = \frac{\sum_{j=1}^{20} d_{ij}}{20}, i = 1, 2.$$

Różnica $\delta = \bar{d}_1 - \bar{d}_2$ interpretowana jest jako różnica miejsca zera łąt niwelacyjnych. Estymator s_i^2 wariancji dla i -tej serii obliczamy ze wzoru (2), a następnie estymator s^2 ze wzoru (1). Pierwiastek z estymatora wariancji s jest doświadczalnym odchyleniem standardowym różnicy wysokości określonym dla odległości 60 m. Odchylenie standardowe dla 1 km podwójnej niwelacji oblicza się ze wzoru:

$$s_{ISO-LEV} = \frac{s}{\sqrt{2}} \times \sqrt{\frac{1000}{60}}$$

Tabela 1. Przykład pełnej procedury testowej. Obserwacje i poprawki. Pomiar wykonany niwelatorem technicznym Ni 025

Table 1. Example of a complete test procedure. Observations and corrections. Measurement made by Carl Zeiss Jena Level NI 025

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
j	x_{Aj}	x_{Bj}	d_j	r_j	r_j^2	j	x_{Aj}	x_{Bj}	d_j	r_j	r_j^2
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	1445	1430	15	-0,85	0,72	21	1445	1430	15	-0,4	0,16
2	1439	1425	14	0,15	0,02	22	1439	1422	17	-2,4	5,76
3	1436	1421	15	-0,85	0,72	23	1430	1416	14	0,6	0,36
4	1430	1418	12	2,15	4,62	24	1410	1397	13	1,6	2,56
5	1427	1410	17	-2,85	8,12	25	1404	1389	15	-0,4	0,16
6	1420	1407	13	1,15	1,32	26	1397	1382	15	-0,4	0,16
7	1416	1404	12	2,15	4,62	27	1388	1373	15	-0,4	0,16
8	1409	1396	13	1,15	1,32	28	1380	1364	16	-1,4	1,96
9	1402	1390	12	2,15	4,62	29	1370	1358	12	2,6	6,76
10	1395	1382	13	1,15	1,32	30	1364	1349	15	-0,4	0,16
11	1449	1433	16	-1,85	3,42	31	1401	1385	16	-1,4	1,96
12	1442	1428	14	0,15	0,02	32	1390	1375	15	-0,4	0,16
13	1434	1420	14	0,15	0,02	33	1381	1367	14	0,6	0,36
14	1424	1410	14	0,15	0,02	34	1373	1360	13	1,6	2,56
15	1416	1401	15	-0,85	0,72	35	1366	1350	16	-1,4	1,96
16	1409	1394	15	-0,85	0,72	36	1360	1345	15	-0,4	0,16
17	1401	1389	12	2,15	4,62	37	1350	1338	12	2,6	6,76
18	1395	1380	15	-0,85	0,72	38	1345	1330	15	-0,4	0,16
19	1388	1371	17	-2,85	8,12	39	1338	1322	16	-1,4	1,96
20	1380	1365	15	-0,85	0,72	40	1352	1339	13	1,6	2,56
Σ	28357	28074	283	0,0	46,55	Σ	27683	27391	292	0,0	36,80

Dla przykładu z tabeli 1 mamy:

$$\bar{d}_1 = 14,15 \text{ mm}, \bar{d}_2 = 14,6 \text{ mm}, \delta = -0,4 \text{ mm}, \sum_{j=1}^{40} r_j^2 = 83,35 \text{ mm}^2 \quad v = 38,$$

$$s = 1,5 \text{ mm}, s_{ISO-LEV} = 4,3 \text{ mm}$$

Testy statystyczne przeprowadza się tylko dla pełnej procedury testowej.

Odpowiadając na pytanie a) sprawdzamy, czy określone doświadczalnie odchylenie standardowe s jest mniejsze lub równe wartości teoretycznej lub ustalonej z góry wartości

σ_0 :

$$s \leq \sigma_0 \sqrt{\frac{X_{1-\alpha}^2(v)}{v}}.$$

W naszym przykładzie $\sigma_0 = 2,5 \text{ mm}$.

$$s \leq \sigma_0 \sqrt{\frac{X_{0,95}^2(38)}{38}}$$

$$4,3 \text{ mm} \leq 2,5 \text{ mm} \times 1,19$$

$$4,3 \text{ mm} \leq 3,0 \text{ mm}$$

Ponieważ powyższa nierówność nie jest spełniona, populacyjne odchylenie standardowe σ jest większe od danej wartości σ_0 (zadanej przez producenta), hipoteza zerowa $H_0 : \sigma \leq \sigma_0$ jest odrzucona przy poziomie ufności 95%.

Odpowiadając na pytanie b) sprawdzamy, czy dwie próbki, w których wartości odchyłeń standardowych wynoszą s i \tilde{s} , pochodzą z tej samej populacji, Hipoteza zerowa $\sigma = \tilde{\sigma}$ nie jest odrzucona, jeżeli spełniony jest warunek:

$$\frac{1}{f_{1-\alpha/2, v, v}} \leq \frac{s^2}{\tilde{s}^2} \leq f_{1-\alpha/2, v, v}$$

W naszym przykładzie $s = 4,3$ mm, natomiast \tilde{s} wyznaczone przez ten sam zespół pomiarowy, z wykorzystaniem tego samego sprzętu pomiarowego, lecz w bardziej korzystnych warunkach terenowych wynosi $\tilde{s} = 3,6$ mm.

$$\frac{1}{f_{0,975,38,38}} \leq \frac{s^2}{\tilde{s}^2} \leq f_{0,975,38,38}$$

$$0,52 \leq \frac{18,28 \text{ mm}^2}{13,10 \text{ mm}^2} \leq 1,91$$

$$0,52 \leq 1,39 \leq 1,91$$

Ponieważ powyższy warunek jest spełniony, hipoteza zerowa stwierdzająca, że próby o doświadczalnie wyznaczonych odchyleniach standardowych $s = 4,3$ mm i $\tilde{s} = 3,6$ mm należą do tej samej populacji, jest przyjęta przy poziomie ufności 95%.

Odpowiadając na pytanie c) sprawdzamy hipotezę równości wartości średnich \bar{d}_1 oraz \bar{d}_2 (hipotezę zerową $H_0 : \bar{d}_1 - \bar{d}_2 = \delta = 0$), Dysponując niezależnymi próbami losowymi z dwóch różnych populacji, próbami o licznosci odpowiednio n_1 i n_2 , mamy tu do czynienia z problemem porównania wartości średnich tych populacji, Niech \bar{X}_1 i \bar{X}_2 oznaczają, odpowiednio, średnią w pierwszej i drugiej próbie losowej, Zakładając równość odchyłeń standardowych obydwu populacji $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$, wariancja różnicy $\bar{X}_1 - \bar{X}_2$ jest równa:

$$\sigma^2 \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right),$$

Oparty na obydwu próbach estymator postaci:

$$S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2},$$

gdzie S_i^2 , $i = 1, 2$, jest wariancją w i -tej próbie, jest nieobciążonym estymatorem wariancji σ^2 .

Procedurę testową możemy oprzeć na statystyce, która dla hipotezy zerowej $H_0 : \delta = 0$ przyjmuje postać:

$$T = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}},$$

i która ma wówczas rozkład t Studenta z $n_1 + n_2 - 2$ stopniami swobody [Koronacki i Mielniczuk 2009, rozdz. 3].

W naszym przykładzie: $n_1 = n_2 = 20$, $\delta = -0,4$ mm, $s = 1,5$ mm, $S_p = \frac{s}{\sqrt{10}}$

$$|\delta| \leq S_p \times t_{0,975} \quad (38)$$

$$0,4 \text{ mm} \leq 0,47 \text{ mm} \times 2,02$$

$$0,4 \text{ mm} \leq 0,9 \text{ mm}$$

Ponieważ powyższy warunek jest spełniony, hipoteza zerowa stwierdzająca, że różnica miejsc zer łąt niwelacyjnych jest równa zero, nie jest odrzucona przy poziomie ufności 95%.

Norma PN-ISO 17123-3 opisuje pola testowe do badania teodolitów oddzielne dla kątów poziomych i kątów pionowych.

Pole testowe dla kątów poziomych składa się z 5 tarcz celowniczych rozmieszczonych równomiernie w horyzoncie w odległościach od 100 do 250 m od stanowiska instrumentu. Pomiar wykonuje się podobnie jak w metodzie kierunkowej. W I położeniu lunety instrument obraca się prawoskrętnie, w II położeniu lewoskrętnie. Po każdej serii, a jest ich 4, odczyt na pierwszy kierunek zmienia się o 60° (dla teodolitów elektronicznych należy obrócić instrument w spodarce o ok. 120°). Przy pełnej procedurze testowania dla każdej serii pomiarowej, wykonywanej w różnych warunkach atmosferycznych, niezależnie centruje się instrument. Niestaranne wykonanie tej czynności wobec krótkich celowych bardzo obciąża wyniki testu, co jest niewątpliwie mankamentem tego sposobu testowania.

Założenie pola testowego dla kątów pionowych polega na stabilizacji lub wyborze celów na ścianie budynku w zakresie kąta pionowego około 30° . Pomiar kątów pionowych wykonuje się w czterech seriach pomiarowych (pełna procedura). W wyniku opracowania otrzymuje się odchylenie standardowe kąta pionowego obserwowanego w dwóch położeniach lunety.

Przeprowadzenie testów zgodnie z procedurą pełną jest bardzo pracochłonne. Praktyczne wykonanie testów wykazało ponadto duży wpływ błędów centrowania teodolitu na uzyskane wyniki.

Norma PN-ISO 17123-4 zawiera dwa znane z literatury sposoby testowania dalmierzy elektrooptycznych. Pierwszy sposób, określony w normie jako uproszczona procedura testowania, polega na założeniu poligonu testowego w postaci czterech na stałe zamocowanych reflektorów oraz trwale zastabilizowanego stanowiska instrumentu. Pole testowe tworzą więc cztery odcinki o wspólnym początku. Dobiera się długości odcinków typowe dla danego typu dalmierza. Odcinki te muszą być pomierzone innym dalmierzem o wyższej dokładności lub testowanym dalmierzem po jego sprawdzeniu za pomocą pełnej procedury testowania. Długości tak pomierzonych odcinków traktowane są jako wartości prawdziwe, a różnice pomiędzy nimi i pomierzonymi zgodnie z procedurą uproszczoną stanowią podstawę do oceny dokładności badanego egzemplarza. Testowanie według procedury uproszczonej nie pozwala na wykrycie błędów systematycznych (skali). Duże różnice pomiędzy wartościami pomierzonymi i prawdziwymi świadczą o występowaniu

niu błędów stałej dodawania, spowodowanych błędami pomiaru przesunięcia fazowego, Norma zaleca wówczas przeprowadzenie dodatkowych badań, choć nie wyjaśnia jakich.

Linia testowa w przypadku pełnej procedury testowania składa się z prostego poziomego odcinka o długości ok. 600 m, podzielonego na sześć mniejszych odcinków w taki sposób, aby pomiar każdej odległości odbywał się w innym zakresie przesunięcia fazowego. Długość linii testowej i jej podział na odcinki składowe są uzależnione od częstotliwości modulacji danego typu dalmierza. Linia testowa nie jest więc uniwersalna dla wszystkich dalmierzy. Pomiary długości wykonuje się we wszystkich kombinacjach. W wyniku wyrównania otrzymuje się najbardziej prawdopodobne długości odcinków, stałą dodawania oraz estymatory odchylenia standardowego dla poszczególnych długości oraz stałej dodawania. Podawany w literaturze oraz danych technicznych dalmierza błąd średni pojedynczego pomiaru dalmierzem elektrooptycznym w postaci $m_D = A + B$ ppm nie jest w normie porównywany z wynikami testu, co stanowi poważny mankament zalecanych w normie metod badania dalmierzy elektrooptycznych.

W **normie PN-ISO 17123-5** przyjmuje się założenie, że tachimetr elektroniczny mierzy współrzędne, a nie kierunki i długości, z których dopiero odpowiedni program tachimetru oblicza współrzędne. Ma to znaczący wpływ na interpretację wyników testu, gdyż nie otrzymuje się błędów kierunku i długości, jak to podają dane techniczne instrumentów, lecz błędy współrzędnych w przyjętym lokalnym układzie współrzędnych. Ponadto zakłada się, że pomiary terenowe (produkcyjne) będą wykonywane w jednym położeniu lunety.

Pole testowe do badań tachimetrów składa się z trzech punktów (trójkąt). Punkty te nie mają określonych wcześniej współrzędnych. Ustala się długości boków trójkąta zbliżone do tych, jakie będą w trakcie właściwych pomiarów na konkretnym obiekcie. W uproszczonej procedurze testowania zakłada się każdorazowe centrowanie instrumentu i reflektorów nad wierzchołkami trójkąta, co powoduje że wyniki testu zbliżone są do tych uzyskiwanych w warunkach polowych. W pełnej procedurze testowania stosuje się centrowanie mechaniczne, tzn. spodarki na statywach nie są ruszane w czasie testu, przekłada się natomiast badany instrument oraz reflektory.

Obliczenia w przypadku procedury uproszczonej polegają na porównaniu współrzędnych x , y oraz oddzielnie współrzędnej z (ze względu na wpływ refrakcji pionowej i błąd pomiaru kąta zenitalnego większy niż dla kierunków poziomych), otrzymanych z dwustronnego pomiaru każdego boku trójkąta.

Przy pełnej procedurze testowania współrzędne wierzchołków trójkąta otrzymuje się w wyniku wyrównania obserwacji metodą najmniejszych kwadratów (oddzielnie współrzędne płaskie i współrzędna z). Wagi do wyrównania przyjmuje się proporcjonalnie do liczby obserwacji, co dla współrzędnej z nie jest w normie wyjaśnione. Przytoczone testy statystyczne bazują na analizie odchyłeń standardowych obliczonych z rozrzutu wyników pomiaru.

Biorąc pod uwagę opinie użytkowników, ISO zrewidowała normę 17123-5 w wersji angielskiej. Poprawiona norma ISO 17123-5:2012 różni się od poprzedniej wersji co do sposobu organizacji pola testowego.

Norma PN-ISO 17123-6 dotyczy badania instrumentów wyposażonych w wirującą głowicę wysyłającą wiązkę laserową (może być to światło widzialne lub bliska podczerwień). Tego typu instrumenty stosowane są zazwyczaj na budowie do realizacji płasz-

czynny poziomej w zasięgu pracy instrumentu. W geodezji instrumenty te stosuje się sporadycznie, gdyż są mniej dokładne od niwelatorów.

Pole testowe w przypadku uproszczonej procedury testowania składa się z sześciu punktów kontrolnych rozmieszczonych radialnie co 60° wokół stanowiska instrumentu w odległościach 10, 20, ..., 60 m od instrumentu. Punkty stabilizuje się trwale i różnice wysokości pomiędzy nimi określa się niwelatorem optycznym (precyzyjnym). Różnice te traktowane są jako wartości prawdziwe. Te same różnice wysokości określa się badanym instrumentem, wykonując pięć serii pomiarowych. Pomiedzy seriami instrument obraca się na statywie o kąt około 70° ($360^\circ : 5$). Na podstawie różnic wysokości (wartości prawdziwe – pomierzone) oblicza się odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru.

Pole testowe w przypadku pełnej procedury testowania podobne jest do tego, na którym testuje się niwelatory. Dwie łąty (lub przesuwane czujniki) ustawione są w odległości 40 m od siebie. Pomiar wykonuje się z trzech stanowisk: ze środka (odległości do łąty po 20 m), 14,6 m poza pierwszą łątą (odległości 14,6 m oraz 54,6 m) i 14,6 m poza drugą łątą. Stanowiska instrumentu i łąty znajdują się w jednej linii. Pomiedzy seriami odczytów instrument obraca się o 90° , zachowując na każdym stanowisku tę samą orientację instrumentu (w normie są czytelne rysunki programu obserwacji). Takie postępowanie umożliwia wyznaczenie odchylen od płaszczyzny wiązki lasera oraz składowych odchylen od pionu osi instrumentu.

Tytuł **normy PN-ISO 17123-7**: Optyczne instrumenty do pionowania sugeruje, że norma obejmuje tylko pionowniki optyczne, jednakże można badać zgodnie z jej zaleceniami również pionowniki laserowe, o ile możliwe jest odczytanie plamki lasera na przygotowanej wcześniej tarczy obserwacyjnej, którą jest płytka szklana z naniesioną siatką prostopadłych linii x, y. Odstęp pomiedzy liniami siatki jest funkcją powiększenia lunety pionownika oraz wysokości, na jakiej zamierza się testować instrument. Oblicza się go zgodnie z podanym wzorem, a empiryczny współczynnik określa, dla jakich wymiarów oczek siatki szacowanie odczytu będzie najdokładniejsze.

Norma proponuje wykonanie testu tylko według procedury pełnej. Przebieg obserwacji zależy od budowy pionownika. Jeżeli instrument wyposażony jest w jedną libelę lub kompensator jednoosiowy, odczyty wykonuje się przy obrocie pionownika o 180° w kierunku osi x (dwa odczyty) oraz po obrocie o kąt prosty w kierunku osi y (również dwa odczyty). W przypadku dwóch libel prostopadłych lub kompensatora dwuosiowego w jednym położeniu pionownika wykonuje się odczyty x oraz y i tak samo po obrocie o 180° . Pomiar wykonuje się w trzech seriach po 10 kompletów odczytów w każdej serii. Przed każdą serią instrument centruje się nad punktem, względem którego określamy linię pionu. Na podstawie rozrzutu wyników obliczane jest odchylenie standardowe.

Norma nie przewiduje badania pionowników nadirowych, choć po pewnych modyfikacjach można by zastosować metodę proponowaną w normie do testowania tego rodzaju instrumentów. Sugerowana w normie zmiana centrowania pionownika nad punktem stałym przed każdą serią pomiarową ma wpływ na oszacowanie dokładności instrumentu. Określa się w ten sposób nie tyle błąd samego pionownika co błąd czynności pionowania.

Pożądanym byłoby wykonanie testów dla różnych wysokości tarczy.

Norma ISO 17123-8:2007 nie została dotychczas przetłumaczona na język polski przez PKN z powodu ograniczonych środków.

Proponowane przez normę pole testowe obejmuje jeden punkt stały traktowany jako punkt odniesienia oraz dwa punkty położone blisko siebie (w odległości od 2 do 20 m), na których wykonywane są pomiary GPS. Odległość punktu odniesienia od pozostałych dwóch punktów powinna być podobna do tej, jaką przewiduje się we właściwych pomiarach na obiekcie. Odległości poziome oraz różnice wysokości pomiędzy punktami należy określić z wysoką dokładnością, wykorzystując do tego celu precyzyjne tachimetry i niwelatory.

W normie przewidziano dwie metody testu: uproszczoną, gdzie test wykonuje się w jednej serii pomiarowej oraz pełną – w trzech seriach, co umożliwia przeprowadzenie analizy statystycznej wyników pomiaru. Seria pomiarowa składa się z pięciu pomiarów wykonywanych na punktach ruchomych w odstępach 5-minutowych i trwa około 25 minut, co oznacza, że obejmuje cały okres cyklu wielodrożności fali. Stosując uproszczoną procedurę testowania, sprawdza się, czy odległości i różnice wysokości pomiędzy punktami pomierzone za pomocą GPS są zbliżone do tych pomierzonych precyzyjnym tachimetrem i niwelatorem. W przypadku przekroczenia wartości dopuszczalnych podanych w normie całą serię pomiarową powtarza się. Przy pełnej procedurze pomiędzy seriami pomiarowymi zachowuje się 90-minutowe przerwy w celu uwzględnienia zmian konfiguracji satelitów oraz zmian warunków w jonosferze. Tym sposobem liczone odchylenie standardowe uwzględnia wpływ różnych czynników na dokładność pomiaru GPS RTK.

PODSUMOWANIE

Normy ISO 17123 podają szczegółowe metody ustalania dokładności użytkowej dla prawie wszystkich rodzajów instrumentów geodezyjnych stosowanych w geodezji inżynierskiej.

Zalecane przez te normy pomiary testowe dotyczą nie tylko sprzętu pomiarowego, ale również techniki pomiaru w danych warunkach terenowych i atmosferycznych. Z uwagi na fakt, że wiele czynników wpływa na obniżenie dokładności instrumentów pomiarowych, wynik pomiaru testowego, wykonanego zgodnie z normą, pomaga w ustaleniu, czy dany instrument wraz ze sprzętem pomocniczym rzeczywiście może być użyty w konkretnych zastosowaniach.

Przeprowadzenie testów instrumentów zgodnie z normami ISO jest często wymagane przez firmy prowadzące prace budowlane, gdyż daje to gwarancję niezbędnej jakości używanego sprzętu.

Norma ISO 17123-8:2007, ostatnia z całej serii, powinna zostać przetłumaczona na język polski i przyjęta jako norma PN-ISO.

Dostępne jedynie w wersji angielskiej jest również drugie wydanie norm ISO 17123-1:2010 i ISO 17123-5:2012. Nowa norma ISO 17123-1 przybliża zagadnienia statystyczne osobom nie zaznajomionym bliżej ze statystyką. Jest znacznie bardziej obszerna niż jej poprzednia wersja i zawiera przykłady liczbowe. W normie ISO 17123-5 zaproponowano inny niż w poprzedniej wersji normy sposób organizacji pola testowego.

PIŚMIENNICTWO

- Godek K., Krupiński W., 2010. Metodyka oceny sprzętu geodezyjnego za pomocą testów statystyki matematycznej, *Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich* 6/2010, 167–175.
- Koronacki J., Mielniczuk J., 2009. Statystyka dla studentów kierunków technicznych i przyrodniczych, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne Warszawa.
- Kwinta A., Krupiński W., 2010. Analiza terenowego testu geodezyjnego instrumentu kątomierczego metodami statystycznymi, *Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich* 6/2010, 87–99.
- Owerko T., 2009. Badanie dokładności instrumentów RTK GNSS w oparciu o standard ISO 17123-8, *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 19, 341–350.
- Pawłowski W., 2008. Procedury oceny dokładności instrumentów geodezyjnych według standardów ISO mających status norm polskich. *Czasopismo techniczne Ś. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej*, z, 2, 231–237.
- PN-ISO 17123-1,2,3,4,5,6,7 Optyka i instrumenty optyczne, Terenowe procedury testowania instrumentów geodezyjnych i pomiarowych.
- ISO 17123- 8:2007 GNSS field measurement systems in real – time kinematic (RTK).
- PN-ISO 4463-1 Metody pomiarowe w budownictwie, Tyczenie i pomiar, Część 1: Planowanie i organizacja, procedury pomiarowe, kryteria akceptacji.

REVIEW OF PROCEDURES FOR TESTING GEODETIC INSTRUMENTS IN ACCORDANCE WITH PN-ISO 17123 STANDARDS

Abstract. This article presents a practical analysis of the ways geodetic instruments are tested in accordance with the standards of ISO 17123, seven of which have been translated into Polish and adopted as standards in Poland. The standards recommend that measurement tests of instruments be carried out prior to instruments being used for particular work. The objective of testing is to verify whether measurement accuracy of a given instrument agrees with the level of accuracy guaranteed by the manufacturer. The article provides information on methods of testing geodetic instruments in accordance with the procedures described in the standards. Techniques for establishing field tests for various kinds of instruments are presented with special attention on the statistical analysis of the tests results.

Although the standards do not provide for changes to the organization of testing fields or calculation programs, suggestions are presented for modifying certain parts of the standards. When suggestions are received for making amendments, ISO introduces updated standards replacing the former standards that were in question by users. In this way, two of the 17123 series of standards were revised in the English version. They have not yet been translated or adopted into the Polish standards.

Key words: testing geodetic instruments, ISO 17123, statistical tests, variance estimators, measurement accuracy

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 30.12.2013

Do cytowania – For citation: Pokarowska M., Wojciechowski J., Przegląd metod testowych do wyznaczania dokładności instrumentów geodezyjnych zgodnie z normami PN-ISO 17123. *Acta Sci. Pol. Geod. Descr. Terr.*, 12 (4), 41–54.