

Tadeusz Szczutko*

Badania związane z występowaniem błędów cyklicznych w precyzyjnych dalmierzach elektrooptycznych**

1. Wstęp

Przez precyzyjne dalmierze elektromagnetyczne należy rozumieć te modele dalmierzy, które pozwalają na pomiar długości odcinków z dokładnością rzędu 1 mm. Poprawność wskazań dalmierzy należy okresowo kontrolować, aby wykonawca miał pewność, że jego sprzęt pracuje poprawnie. Kontrole te wykonywane w oparciu o terenowe bazy wzorcowe zazwyczaj dotyczą stałej dodawania dalmierza oraz skali długości. Długości odcinków testowych powinny pokrywać równomiernie zakres długości boków sieci mierzonych w terenie [5].

Oprócz szczegółowych i pomiarowych sieci geodezyjnych wykonane są pomiary w sieciach specjalnych np. na obszarach eksploatacji górniczej, założonych do badania odkształceń zapór wodnych itp. W sieciach tych, podobnie jak w pomiarach przemysłowych, występuje potrzeba pomiaru krótkich boków o długościach rzędu od kilkunastu do kilkudziesięciu metrów.

W celu zbadania poprawności wskazań dalmierzy w tym nietypowym zakresie pracy należy zastosować dodatkowe procedury ich testowania, związane z określeniem występowania błędów systematycznych takich jak:

- błąd zależny nieliniowo od odległości (w zakresie krótkich odległości),
- błędy cykliczne.

2. Model matematyczny

Dla dalmierzy stosowanych do pomiaru typowych osnów geodezyjnych w procesie testowania na bazie wzorcowej wyznacza się parametry równania dalmierza

* Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska

** Opracowano w ramach badań statutowych 11.11.150.478/06 w 2006 r.

$$D = k D_{\text{pom}} + c \quad (1)$$

gdzie:

D – długość poprawiona,

c – stała dodawania,

k – współczynnik skali,

D_{pom} – długość pomierzona.

Dla krótkich odległości wpływ współczynnika k może być pominięty, zatem otrzymamy

$$D = D_{\text{pom}} + c \quad (2)$$

Procedury wyznaczania stałej dodawania omówione są w [5]. Model opisany równaniem (2) może być uzupełniony o wyraz opisujący błędy systematyczne o charakterze nieliniowym w zakresie krótkich odległości. W pracy przedstawiono badania występowania błędów o charakterze nieliniowym. Jako wzorec długości wykorzystano interferometr laserowy HP 5529A [3]. Pomiar interferometrem laserowym jest pomiarem różnicowym, tzn. zliczanie odległości odbywa się od punktu, w którym licznik zostanie wyzerowany (reset), do punktu, do którego przesunięto wózek z pryzmatem (rys. 1). Punkt zerowania licznika ustala się w odległości d od osi obrotu badanego tachimetru.

Na podstawie wyników pomiaru długości dalmierzem i interferometrem tworzy zbiór różnic rD

$$rD = D_{\text{pom}} - (D_{\text{int}} + d) \quad (3)$$

gdzie:

D_{pom} – długość pomierzona dalmierzem,

D_{int} – odległość odczytana z interferometru,

d – odległość pomierzona dalmierzem w momencie wyzerowania (resetowania) interferometru (przyjęto $d = 2,000$ m).

Długość d jest obarczona błędem systematycznym w postaci składowej stałej dodawania c . Spowoduje to przesunięcie wykresu różnic rD wzdłuż osi pionowej, co nie ma to znaczenia dla całości badań.

Na podstawie wstępnej analizy zbioru różnic rD możemy napisać:

$$rD = c + f(D) \quad (4)$$

gdzie $f(D)$ to błędy dalmierza o charakterze nieliniowym w zakresie krótkich odległości.

Wzór (4) będzie modyfikowany na podstawie analizy wyników pomiaru poszczególnych dalmierzy.

Dla kilku typów badanych dalmierzy przyjmie postać:

$$rD = c + A \ln(D) + c_\lambda \quad (5)$$

czyli:

$$D = D_{\text{pom}} + c + A \ln(D) + c_\lambda \quad (6)$$

gdzie c_λ – błędy cykliczne wyznaczone drogą analizy harmoniczej według wzoru

$$c_\lambda = \sum_{i=1}^n \left(x_i \sin 2\pi i \frac{D}{\lambda/2} + y_i \cos 2\pi i \frac{D}{\lambda/2} \right) \quad (7)$$

gdzie:

A – parametr funkcji logarytmicznej opisującej nachylenie wykresu różnic rD ,

λ – długość fali wzorcowej dalmierza,

n – liczba harmoniczych przyjęta do obliczeń błędów cyklicznych,

x_i, y_i – amplituda składowych błędów cyklicznych.

Liczba harmoniczych n jest ustalana doświadczalnie. Do opisu błędów cyklicznych wystarczy $n = 2$, wyjątkowo występuje konieczność wykorzystania trzeciej i czwartej harmoniczej.

3. Wyniki badań dalmierzy

Badaniom poddano 4 egzemplarze dalmierzy precyzyjnych pochodzących od dwóch producentów:

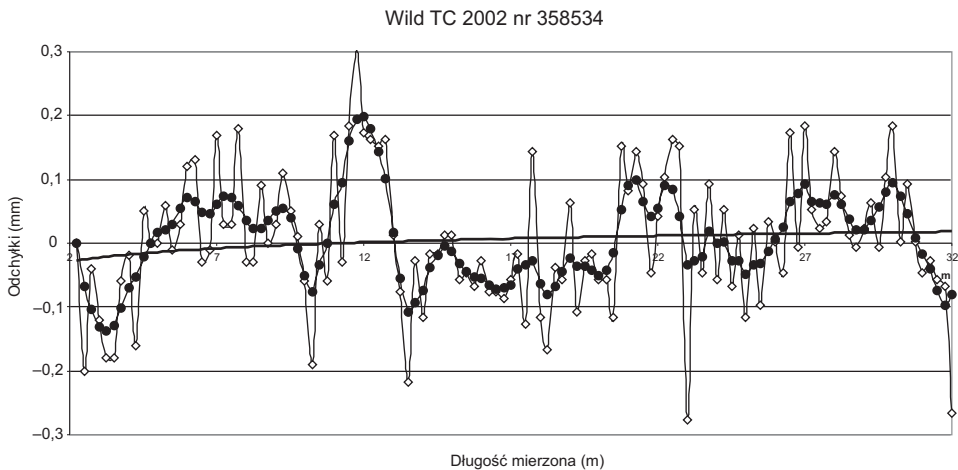
- TC 2002 nr 358534,
- TCA 2003 nr 664662 i nr 438337,
- Geodimeter ATS 640 nr 64210025,
- Geodimeter 440 nr 69444 dalmierz o niższej dokładności.

Parametry badanych dalmierzy podane przez firmy zestawiono w tabeli 1.

Pomiar wykonano w zakresie od 2 do 32, wykorzystując bazę poziomą w Geodezyjnym Laboratorium Metrologicznym Wydziału Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH [1]. Po torowisku bazy przesuwano co 0,25 m wózek z pryzmatem HP 10767A odbijającym promień lasera interferometru. Interferometr laserowy HP 5529A (rys. 1) zapewnia dokładność pomiaru odległości 0,01 mm, czyli rząd więcej niż dokładność odczytu odległości dalmierza precyzyjnego wynoszącej 0,1 mm.

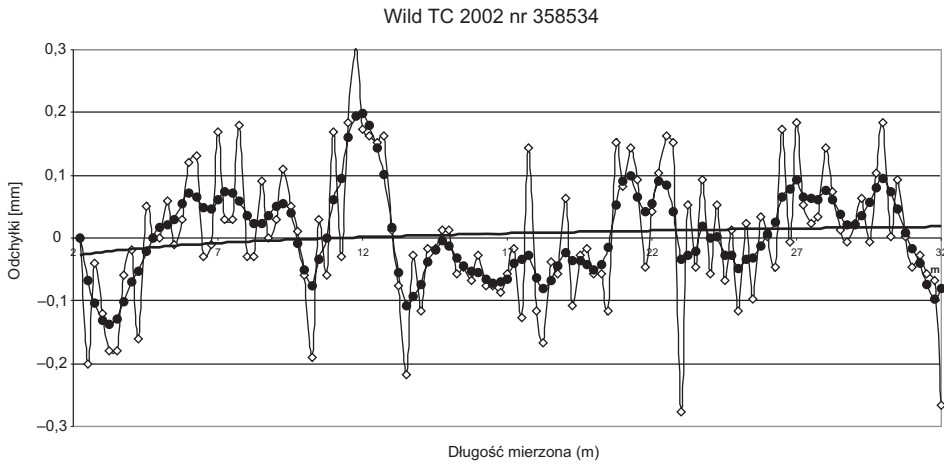
Tabela 1. Parametry dokładnościowe badanych dalmierzy

Producent	Typ	Częstotliwość wzorcowa f_w (MHz)	Długość fali wzorcowej $\lambda_w/2$ (m)	Składnik błędu niezależny od odległości a (mm)	Składnik błędu zależny od odległości b (mm/km)
Leica	TC 2002	50	3	1	1
Leica	TCA 2003	50	3	1	1
Leica	TDA 5000	50	3	1	2
				0,5 mm do 120 m	
Geodimeter	ATS 640	15	10	2	2
Geodimeter	440	15	10	2	3

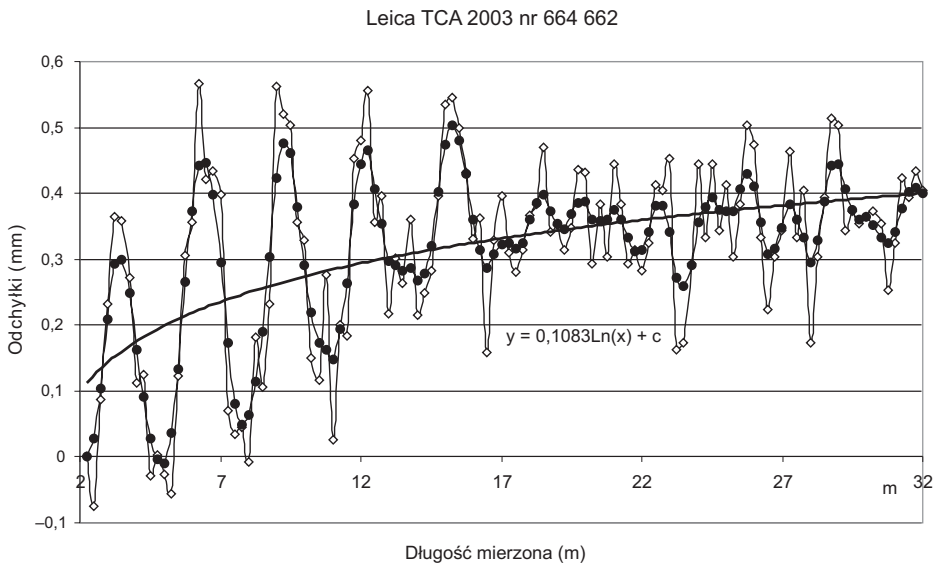


Rys. 1. Schemat układu pomiarowego z interferometrem laserowym HP 5529A: L – głowica laserowa HP 5519A, I – interferometr optyczny HP 10766A, P – precyzyjny pryzmat firmy HP 10767A, K – komputer z oprogramowaniem pomiarowym, W – wózek z układem pryzmatów, S – pozioma (zamocowana na podporach) szyna aluminiowa o długości 32 metrów, X – badany dalmierz

Na rysunku 2 przedstawiono wyniki badania dalmierza Wild TC 2002 nr 358534 sposobem opisanym powyżej. Na podstawie analizy wykresu różnic pomiędzy pomiarem odległości dalmierzem a długością mierzoną interferometrem można stwierdzić, że w dalmierzu tym praktycznie nie występują błędy cykliczne. Błędy cykliczne o amplitudzie poniżej 0,1mm giną w szumach.



Rys. 2. Wykres porównania długości mierzonej dalmierzem TC 2002 ze wskazaniami interferometru

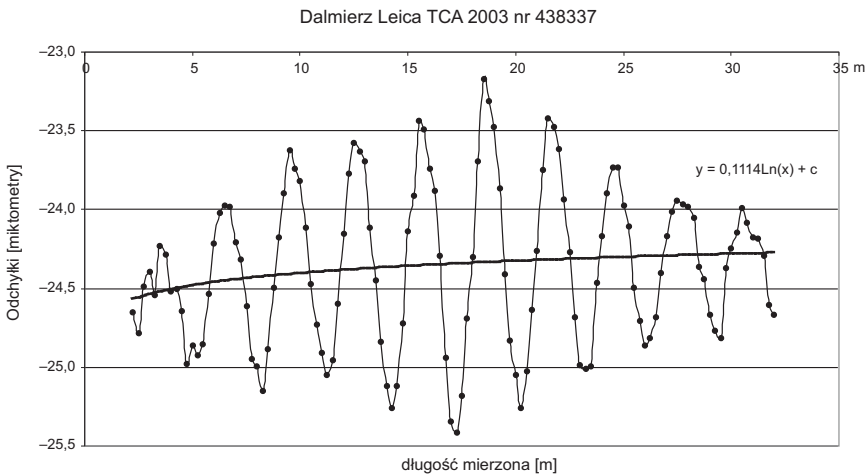


Rys. 3. Wykres błędów dalmierza TCA 2003 nr 664 662

W badanym egzemplarzu dalmierza TCA 2003 nr 664662 (rys. 3) do odległości 17 m daje się zauważyć wyraźny błąd cykliczny o okresie 3 m i amplitudzie 0,2mm, później błąd cykliczny ginie w szumach. Nachylenie wykresu da się opisać funkcją logarytmiczną. Nieuwzględnienie tego nachylenia spowoduje w badanym zakresie odległości błąd do 0,3mm. Z wykresu wynika również, że odcinki wzorcowe bazy

wielopunktowej wykorzystywane do wyznaczania stałej dodawania tego dalmierza nie powinny być krótsze niż 17 m.

W dalmierzu Leica TCA 2003 nr 438337 stwierdzono występowanie błędu cyklicznego o amplitudzie ok. 2mm zmodulowanego przebiegiem o okresie 60 m (rys. 4). Stwierdzono również nachylenie pasma błędów dające się opisać krzywą logarymiczną. Porównanie charakterystyk dwóch dalmierzy TCA 2003 pozwala stwierdzić, że dalmierz nr 438337 wymaga regulacji serwisowej.

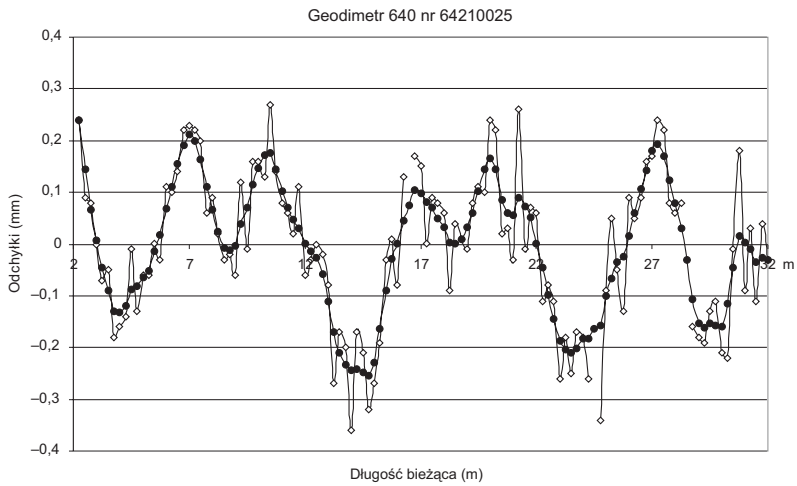


Rys. 4. Przykład występowania błędów cyklicznych o amplitudzie większej od nominalnej dokładności dalmierza

Dalmierze precyzyjne TCA 2003 oraz Di 2002 były wykorzystywane do pomiaru sieci kątowno-liniowej na terenie obszaru górniczego Kopalni Soli „Wieliczka”. Z powodu występowania błędów cyklicznych o znacznej amplitudzie dalmierz TCA 2003 nr 438337 nie był użyty w terenie, ale został skierowany do serwisu. Podczas testów na polowej bazie wzorcowej okazało się, że dalmierz ten był dodatkowo obciążony błędem skali $dk = 2\text{mm/km}$.

W dalmierzu precyzyjnym Geodimeter 640 nr 64210025 występują błędy cykliczne o okresie 10 m oraz nałożonym okresem 5 m i wypadkowej amplitudzie ok. 0,3 mm (rys. 5).

Amplituda błędów cyklicznych jest jednakowa dla trzech mierzonych okresów o długości 10 m. Oznacza to, że mogą one występować dla długości większych od 32 m. Wskazane jest zatem wykonanie badań w zakresie większym od 32 m; zakres taki można uzyskać drogą powielenia długości mierzonej interferometrem za pomocą układu luster.

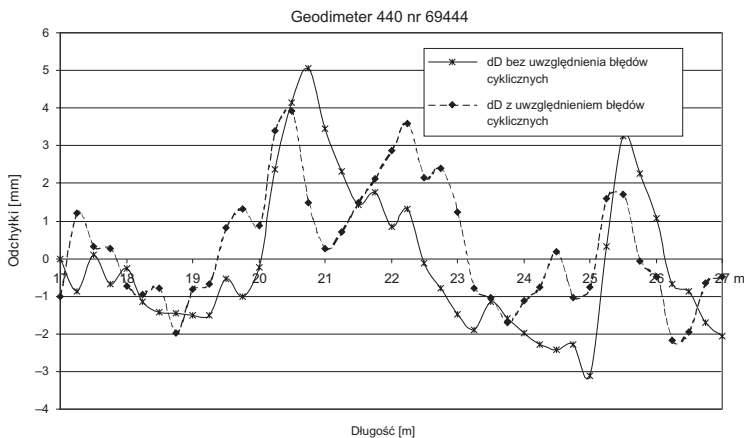


Rys. 5. Wykres występowania błędów cyklicznych Geodimetru 640

W dalmierzach typu Geodimeter błędy cykliczne są wyznaczone w fabryce, a następnie ich wartości są wpisywane do pamięci instrumentu w celu poprawiania odczytów mierzonych długości.

W dalmierzu Geodimeter 440 nr 69444 wyznaczono błędy cykliczne w oparciu o pomiar interferometrem:

- bez uwzględnienia ustawień fabrycznych (rys. 6),
- z uwzględnieniem ustawień fabrycznych błędów cyklicznych (rys. 6).

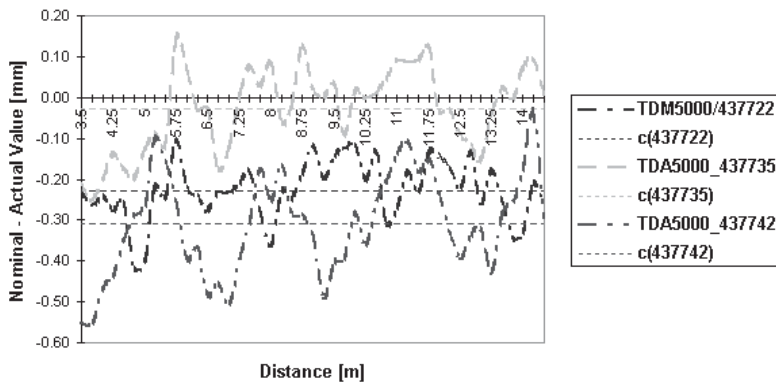


Rys. 6. Wykres występowania błędów cyklicznych Geodimetru 440 nr 69444 bez korekcji oraz z korekcją abryczną błędów cyklicznych

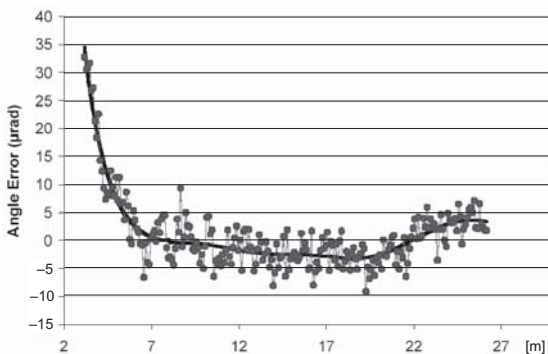
W obu przypadkach występują błędy cykliczne o znacznych wartościach, co oznacza to, że jedną z przyczyn tego stanu rzeczy może być starzenie się elementów elektronicznych w układach dalmierzy.

4. Badania dalmierzy w European Synchrotron Radiation Facility (ESRF)

Badania wskazań dalmierzy w zakresie krótkich odległości są wykonywane między innymi w Grenoble w European Synchrotron Radiation Facility przez Survey and Alingment Group (Zespół Pomiarów i Osiowania) w Grenoble (Francja) [2]. Wyniki wyznaczeń błędów cyklicznych są podobne (rys. 7) jak w badaniach przedstawionych powyżej. Błędy cykliczne występują również w jednostkach dalmierczych najdokładniejszych obecnie produkowanych tachimetrów Leica serii TPS 5000.



Rys. 7. Występowanie błędów cyklicznych w dalmierzach Leica seria TPS 5000 [2]



Rys. 8. Wyniki badania stałości osi celowej dla jednego z tachimetrów ESRF Leica TDA5005 [4]

Lunety tachimetrów tej serii wykazują niestałość osi celowej, zwłaszcza w zakresie krótkich odległości (rys. 8). Ponieważ pomiar odległości odbywa się przez lunetę tachimetru, niestałość osi celowej może mieć wpływ na pomiar krótkich odinków. Wynika stąd konieczność prowadzenia badań sprzężonych w celu wyznaczenia wzajemnego wpływu poszczególnych elementów funkcjonalnych instrumentu uniwersalnego, jakim jest tachimetr elektroniczny.

5. Wnioski

- 1) Wzorzec dokładności i poprawności działania dalmierzy stanowi Wild TC 2002.
- 2) Celowe jest badanie wpływu starzenia się elementów elektronicznych na wyniki pomiarów oraz wykonywanie badań stałości osi celowej lunety.
- 3) Na podstawie wykonanych pomiarów można dokonać wyboru najlepszego egzemplarza spośród dalmierzy tego samego typu.
- 4) W najnowszych konstrukcjach dalmierzy również występują błędy systematyczne w zakresie krótkich odległości.

Literatura

- [1] Cholewa T., Zajski A.: *Wyznaczenie wpływu błędów cyklicznych w precyzyjnych pomiarach odległości wykonywanych za pomocą dalmierzy elektronicznych*. Kraków, AGH, (praca magisterska niepublikowana), 2005.
- [2] Gottwald R., Müller I., Obrist M. *Leica TDA5000 – Short Range Performance Tests using Corner Cube and Tooling Ball Reflectors*. FHBB Basel Institute of Technology, Switzerland Dept. of Surveying & Geoinformation Systems.
- [3] *HP 5529A Dynamic Calibrator* – opis systemu.
- [4] Martin, D.: *Instrumentation and calibration at the ESRF*, Grenoble France Proceedings of the 7th International Workshop on Accelerator Alignment, Springer-8, 2002.
- [5] Szczutko T.: *Badanie charakterystyk dokładnościowych dalmierzy elektrooptycznych z wykorzystaniem terenowej bazy testowej*. Kraków, AGH (niepublikowana praca doktorska), 1989.