

NAJNOWSZE KIERUNKI ROZWOJU METROLOGII KĄTA PŁASKIEGO

Katarzyna NICIŃSKA¹, Joanna PRZYBYLSKA²

1. Główny Urząd Miar, Laboratorium Długości
tel.: 22 581 9484, e-mail:k.nicinska@gum.gov.pl
2. Główny Urząd Miar, Laboratorium Długości
tel.: 22 581 9558, e-mail:j.przybylska@gum.gov.pl

Streszczenie: Artykuł opisuje w skrócie najważniejsze efekty prac wspólnego projektu EMRP SIB 58 Angles „Angle Metrology”, w którym Główny Urząd Miar brał udział w latach 2013-2016. W ramach tego projektu zostały opracowane i przebadane: stanowiska pomiarowe pozwalające na pomiar 2D autokolimatorów fotoelektrycznych, generatory małych kątów, urządzenie do odtwarzalnego pozycjonowania przesłon w stosunku do osi autokolimatora. Przetestowana została również nowa metoda pomiarowa jednoczesnego wyznaczania wartości błędów pomiaru stołu obrotowego i autokolimatora fotoelektrycznego. Opracowano także uniwersalne przewodniki techniczne EURAMET dotyczące wzorcowania autokolimatorów fotoelektrycznych i precyzyjnych enkoderów kątowych. W artykule opisano również doświadczenie, jakie Laboratorium Długości zdobyło podczas prac nad projektem.

Słowa kluczowe: kąt płaski, enkoder kątowy, autokolimator, projekt EMRP.

1. WSTĘP

Laboratoria instytucji metrologicznych zajmują się w codziennej pracy tzw. „klasyczną” metrologią kąta (wzorcowanie przyrządów pomiarowych dla przemysłu, utrzymywanie wzorców, udział w porównaniach międzynarodowych i międzylaboratoryjnych). W ostatnich latach pojawiła się jednak konieczność opracowania nowych metod pomiarów małych kątów za pomocą autokolimatorów. Przyrządy te znalazły zastosowanie w profilometrach deflektometrycznych do pomiarów kształtu powierzchni elementów optycznych używanych w synchrotronach czy laserach swobodnych elektronów. Te zastosowania wymagają mniejszych niepewności przy pomiarach kątów i w konsekwencji budowy nowych stanowisk pozwalających na wzorcowanie autokolimatorów z większą dokładnością i mniejszą niepewnością. Tego problemu dotyczyła część prac wykonanych w ramach projektu EMRP SIB 58 Angles.

Inny pakiet roboczy dotyczył badań nad precyzyjnymi enkoderami jedno i wielogłowicowymi. Wiele światowych laboratoriów metrologicznych posiada stoły obrotowe z dostępnym komercyjnie enkoderem jednogłowicowym. Tylko nieliczne dysponują obecnie stołami obrotowymi z enkoderami wielogłowicowymi. Niemniej jednak wszyscy borykają się z tymi samymi problemami: jak wyzorcować enkoder zamocowany w stole obrotowym, jak zminimalizować błędy wynikające z zamontowania go

w stole i jak poprawnie wzorcować precyzyjne enkodery kątowe dla klientów.

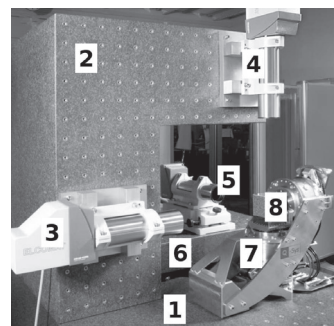
Próbę rozwiązania tych zagadnień podjęto w ramach projektu SIB 58 Angles. Część z nich udało się zrealizować w pełni, część nadal wymaga rozwoju i badań.

2. POMIARY 2D AUTOKOLIMATORÓW FOTOLEKTRYCZNECH

2.1. SAAC – stanowisko do wzorcowania autokolimatorów w dwóch osiach jednocześnie

Autokolimatory to wszechstronne urządzenia do bezkontaktowego pomiaru kąta pochylenia powierzchni odbijającej. Wiązka światła wychodząca z autokolimatora biegnie wzdłuż jego osi optycznej i jest odbijana od powierzchni. Mierzony jest kąt odbicia wiązki powracającej. Autokolimatory są często wykorzystywane do jednoczesnych pomiarów obu kątów pochylenia (osi x/osi y). W związku z tym zaistniała potrzeba opracowania metody i zbudowania stanowiska do wzorcowania tych przyrządów jednocześnie w obu osiach. Do tej pory możliwe było wyznaczanie wartości błędów pomiaru autokolimatora oddzielnie dla każdej osi.

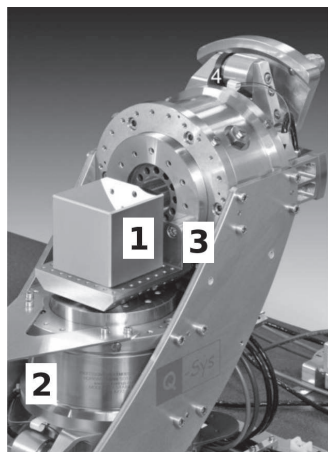
W ramach projektu SIB 58 Angles w niemieckim instytucie metrologicznym PTB opracowano i zbudowano nowe stanowisko do wzorcowania autokolimatorów w dwóch osiach, SAAC, które przedstawione jest na rysunku 1.



Rys. 1. Zdjęcie przedstawiające stanowisko PTB do wzorcowania autokolimatorów w dwóch osiach - SAAC (Spatial Angle Autocollimator Calibrator) [1]

Całe stanowisko ustawione jest na poziomej granitowej płycie (1). Na pionowej płycie (2) zamocowane są prostopadle do siebie autokolimatory wzorcowe (3) i (4). Autokolimator do wzorcowania (5) umieszczony jest na ruchomej płycie (6), dzięki której możliwe jest swobodne dobieranie długości wiązki optycznej wychodzącej z autokolimatora.

Powierzchnię odbijającą dla wszystkich trzech autokolimatorów stanowi kostka (8), zamocowana na urządzeniu pochyłającym (7), które przedstawione jest na rysunku 2.



Rys. 2. Urządzenie pochyłające, umożliwiające szybkie i dokładne pozycjonowanie kostki w osiach x i y, zawierające kostkę odbijającą (1) oraz łożyskowane powietrznie osie obrotowe (2) i (3), napędzane sterownikami (4) [1]

Rozszerzenie możliwości wzorcowania autokolimatorów w dwóch kierunkach jest szczególnie istotne dla pomiarów elementów optycznych stosowanych w synchrotronach i laserach swobodnych elektronów.

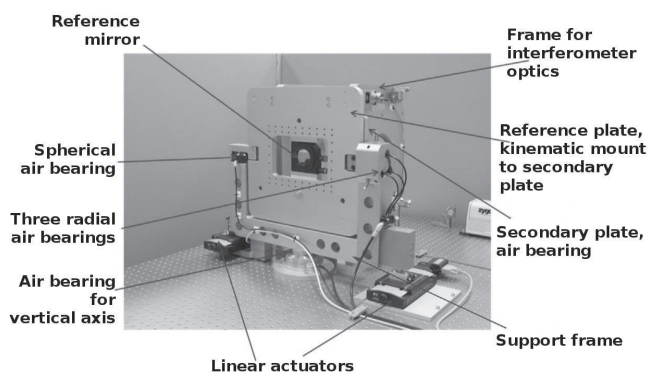
2.2. Interferometryczny generator małych kątów do pomiarów 2D

Inne rozwiązanie problemu wzorcowania autokolimatorów w dwóch osiach zastosowano w fińskim instytucie metrologicznym VTT – interferometryczny generator małych kątów.

Generatory małych kątów to urządzenia realizujące mały kąt jako stosunek długości dwóch boków trójkąta prostokątnego, gdzie stałą jest przeciwprostokątna, a zmienną, odzwierciedlającą małe przemieszczenie jest przyprostokątna. Wielkość tego przemieszczenia musi być wyznaczana z bardzo dużą dokładnością. Wartość kąta pochylenia jest wyznaczana z funkcji sinus. W przypadku stanowiska VTT przemieszczenia w obu osiach mierzone są za pomocą interferometrów laserowych. Rysunek 3. przedstawia front układu pomiarowego z opisanymi najważniejszymi częściami mechanicznymi.

Urządzenie wykorzystuje układ trzech interferometrów laserowych, które pozwalają mierzyć pochylenie zwierciadła referencyjnego niezależnie dla obu osi. Pochylenie zwierciadła zmierzone przez autokolimator jest porównywane ze wskazaniami interferometrów.

Należy podkreślić, że stanowisko zaproponowane przez VTT jest jedyne na świecie. Istniejące generatory małych kątów z odczytem interferencyjnym pozwalają na wyznaczanie błędów pomiaru autokolimatorów tylko w jednej osi.

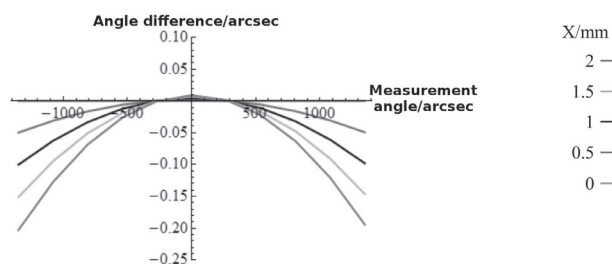


Rys. 3. Generator małych kątów – VTT, Finlandia [2]

3. URZĄDZENIE ACenD

W deflektometrii, w celu ograniczenia wiązki padającej na badaną powierzchnię, a tym samym zwiększenia rozdzielczości układów pomiarowych, stosuje się przesłony z otworem o średnicy nieprzekraczającej kilku milimetrów. Niezwykle ważne jest, aby wiązka światła wychodząca z autokolimatora padała dokładnie współśrodkowo w otwór.

Drugim ważnym parametrem jest odległość między przyrządem a zwierciadłem. W ramach projektu przeprowadzono symulacje pomiarów przy zastosowaniu autokolimatorów dla różnych odległości D , a także dla różnych położeń przesłony w odniesieniu do osi optycznej. Rysunek 4. przedstawia wykres otrzymany w wyniku symulacji pomiaru przy odległości $D = 300$ mm i przy różnych położeniach przesłony (w granicach $(0 \div 2)$ mm). Otrzymane wyniki pokazały zależność pomiędzy wskazaniami autokolimatora a pozycją przesłony. Przy stałych parametrach zwierciadła, mierzone kąty różniły się o dziesiąte części sekundy kątowej przy zmianie pozycji o 2 mm. Tej wielkości różnice są zbyt duże dla precyzyjnych pomiarów kątowych przy pomocy autokolimatorów z zastosowaniem przesłony.



Rys. 4. Różnice pomiędzy wskazaniem autokolimatora dla wiązki przechodzącej centralnie przez środek otworu przesłony a wskazaniami autokolimatora przy przesłonie przesuniętej o 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm, 2 mm [3]

W ramach projektu zostało skonstruowane i przetestowane urządzenie zapewniające precyzyjne, z dokładnością $< 0,1$ mm, pozycjonowanie przesłon o średnicach z zakresu $(1,5 \div 2,5)$ mm. Jest ono zaprezentowane na rysunku 5.

Wpływ przystawki ACenD na pomiary kąta za pomocą autokolimatora został potwierdzony w porównaniach wykonanych pomiędzy uczestnikami projektu, w których Główny Urząd Miar brał udział. Okazało się, iż użycie przystawki ACenD, pozwala dziesięciokrotnie poprawić

powtarzalność pozycjonowania przesłony, co daje przełożenie na trzykrotne zmniejszenie wartości niepewności standardowej przy wzorcowaniu autokolimatorów [4]. Urządzenie zostało opatentowane i jest dostępne komercyjnie.



Rys. 5. Przystawka ACenD wraz kompletem przesłon, zamocowana na autokolimatorze ELCOMAT 3000

4. METODA „SHEARING TECHNIQUES”

W projekcie SIB58 prowadzone były prace nad metodami wzorcowania enkoderów kątowych jedno- i wielogłowicowych oraz autokolimatorów. Szeroko badana była nowatorska metoda jednoczesnego wzorcowania autokolimatorów i enkoderów kątowych, tzw. „*shearing techniques*”. Idea i matematyczne podstawy tej metody miały swoje źródło w rozwiązaniach wykorzystywanych w interferometrii (*shearing interferometry*) [5], [6]. Warunkiem koniecznym zastosowania tej metody jest możliwość uzyskania dwóch oddzielnych niezależnych sygnałów, a tym samym możliwość wyznaczenia ich sumy lub różnicy. Taka sytuacja występuje w metrologii kąta płaskiego, np. przy pomiarach z zastosowaniem autokolimatora i stołu obrotowego wyposażonego w precyzyjny enkoder kątowy. Technika ta pozwala także na wyznaczanie wartości błędów interpolacji enkoderów kątowych.

Przed przystąpieniem do pomiarów ustala się pożądany zakres i krok pomiarowy Δ dla wzorcowanego autokolimatora. Następnie dobiera się wartości liczb cięć s_1 i s_2 . Pary liczb cięć są kombinacją dwóch liczb względnie pierwszych.

W metodzie „*shearing techniques*” wykonuje się trzy serie pomiarowe. Pierwsza seria obejmuje pomiary w pełnym zakresie pomiarowym, obliczonym z wzoru (1). Druga i trzecia seria jest przesunięta w stosunku do serii pierwszej o kąty o wartościach zależnych od dobranych liczb cięć.

$$R = (s_1 \cdot s_2 - 1) \cdot \Delta \quad (1)$$

Poszczególne wartości kątowych przesunięć dla serii drugiej i trzeciej są iloczynami odpowiednich liczb cięć i wartości kroku pomiarowego. Zależnie od budowy układu pomiarowego może być obracany autokolimator albo stół. Na rysunku 6. pokazany jest schemat punktów pomiarowych.

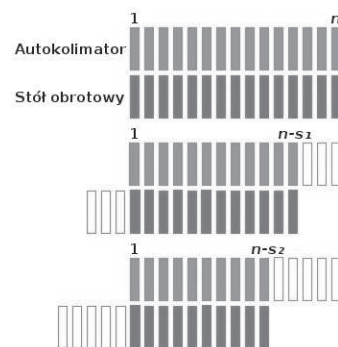
W każdej serii pomiarowej oraz dla każdego punktu pomiarowego wyznaczane są, według wzorów (2), (3) i (4), wartości różnic między wskazaniami autokolimatora i stołu.

$$\delta_1(i) = \eta_{AC}(i) - \eta_E(i), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$\delta_2(i) = \eta_{AC}(i) - \eta_E(i + s_1), \quad i = 1, 2, \dots, n - s_1 \quad (3)$$

$$\delta_3(i) = \eta_{AC}(i) - \eta_E(i + s_2), \quad i = 1, 2, \dots, n - s_2 \quad (4)$$

gdzie: $\eta_{AC}(i)$ – wskazania autokolimatora w kolejnym punkcie pomiarowym, $\eta_E(i)$ – wskazania stołu w kolejnym punkcie pomiarowym, $\delta_1(i)$, $\delta_2(i)$, $\delta_3(i)$ – różnice pomiędzy wskazaniami autokolimatora i stołu w poszczególnych punktach pomiarowych



Rys. 6. Graficzna prezentacja punktów pomiarowych, przy obracającym stole, dla wartości liczb cięć: $s_1 = 3$ oraz $s_2 = 5$

Do algorytmu obliczania wartości błędów pomiaru wzorcowanego autokolimatora i enkodera kąтового stosowane są transformaty Fouriera. Opracowany w Laboratorium Długości program obliczeniowy umożliwia również szacowanie niepewności pomiaru z wykorzystaniem metody Monte Carlo.

5. WZORCOWANIE PRECYZYJNYCH ENKODERÓW KĄTOWYCH

W większości stołów obrotowych, wykorzystywanych zarówno w laboratoriach pomiarowych, jak i będących częścią przyrządów i maszyn, elementem mierzącym wartość kąta obrotu są jednogłowicowe enkodery kątowe. W związku z tym konieczne jest ich wzorcowanie – jako odrębnego przyrządu, bądź w postaci całego stołu obrotowego. Niezwykle istotnym czynnikiem, który wpływa na dokładność, jest precyzyjne zamocowanie enkodera w stole oraz zamocowanie i sprężgnięcie enkodera referencyjnego – zminimalizowanie niewspółosiowości oraz bicia wzdłużnego i poprzecznego.

Jednym z zadań, wykonywanych w ramach projektu, było zbudowanie testowego urządzenia, które umożliwiłoby zbadanie wielkości wpływu zamocowania na wskazania enkodera i oszacowanie związanych z tym składników niepewności.

Urządzenie zostało skonstruowane przez partnerów z Hiszpanii, po czym wykonano cykl badań. Rezultaty zostały uwzględnione w opracowanym budżecie niepewności pomiarów precyzyjnych enkoderów kątowych oraz opisane w opracowanym przewodniku EURAMET.

6. UDZIAŁ GUM WE WSPÓLNYM PROJEKCIE ERMP SIB 58 ANGLES

Zadania realizowane w ramach projektu SIB 58 Angles wytyczyły kierunki prac badawczych realizowanych w Laboratorium Długości GUM. Do tej pory Laboratorium posiadało możliwość wzorcowania autokolimatorów tylko o małych rozdzielczościach (rzędu 0,1"), z niepewnością rozszerzoną na poziomie 0,3". Obecnie, dzięki wiedzy zdobytej w trakcie trwania projektu, udoskonalana jest metoda wzorcowania autokolimatorów o wyższych rozdzielczościach. Możliwe będzie również wzorcowanie autokolimatorów dwoma różnymi metodami, z niepewnością rozszerzoną rzędu 0,1"

Przy zastosowaniu metody „*shearing techniques*” prowadzone są w Laboratorium pomiary mierzące do wyznaczenia wartości błędu interpolacji enkodera RON 905. Jest on integralną częścią stołu obrotowego RT-440, wchodzącego w skład państwowego wzorca jednostki kąta płaskiego. Dzięki metodzie można będzie uwzględnić ten, bardzo istotny, czynnik w budżecie niepewności pomiaru płytek kątowych przywieralnych, autokolimatorów oraz enkoderów kątowych, wzorcowanych na tym stanowisku.

Kolejnym efektem uczestnictwa w projekcie będą prace prowadzone w Laboratorium nad zaprojektowaniem i zbudowaniem urządzenia pomocniczego, umożliwiającego precyzyjne zamocowanie enkodera kąтового i sprzęgnięcie go z enkoderem wzorcowym do wykonania wzorcowania. Jest to działanie bardzo ważne, gdyż w ostatnich latach obserwowane jest rosnące zapotrzebowanie na wzorcowanie precyzyjnych enkoderów kątowych.

7. WNIOSKI KOŃCOWE

Ideą wspólnego projektu EMRP SIB58 Angles było przeprowadzenie wspólnych prac mierzących do rozwinięcia możliwości pomiarowych z zakresu kąta płaskiego, odpowiadającym współczesnym wymaganiom. Odbiorcami zainteresowanymi pomiarami kąta płaskiego na wysokim poziomie są podmioty z przemysłu, ale przede wszystkim instytuty badawcze z różnych dziedzin nauki. Precyzyjne pomiary kąta płaskiego wykorzystywane są m.in. w medycynie, przemyśle samochodowym, kosmicznym,

lotniczym, automatyce i robotyce, w centrach synchrotronowych itp.

Rosnące wymagania klientów wymuszają stwarzanie możliwości pomiarów małych kątów, rzędu nanoradianów, z coraz mniejszymi niepewnościami, ale w coraz większym zakresie pomiarowym.

Rezultatem prac było wykonanie i przebadanie wielu nowych stanowisk pomiarowych, które spełniają oczekiwane założenia. Ponadto opracowane zostały dwa dokumenty – przewodniki EURAMET, opisujące metody wzorcowania dwóch podstawowych przyrządów do pomiaru kąta płaskiego – enkoderów kątowych oraz autokolimatorów. Będą one dostępne na stronie internetowej: www.euramet.org/publications-media-centre/cgs-and-tgs/.

8. BIBLIOGRAFIA

1. Kranz O., Geckeler R.D., Just A., Krause M., Osten W.: From plane to spatial angles: PTB's spatial angle autocollimator calibrator, *Advanced Optical Technologies*, Volume 4, De Gruyter 2015, s.397-411.
2. Heikkinen V., Byman V., Palosuo I., Hemming B., Lassila A.: Inerferometric 2D small angle generator for autocollimator calibration, *Metrologia* 54 (2017), s. 253-261.
3. Kranz O., Geckeler R.D., Just A., Grubert B., Ray tracing simulations of autocollimator with variable aperture positions, Deliverable of EMRP Project SIB 58 Angles.
4. Praca zbiorowa, Final Report on aperture centring device ACenD, Deliverable of EMRP Project SIB 58 Angles.
5. Geckeler R.D., Just A.: A shearing-based method for the simultaneous calibration of angle measuring devices. *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 25 (2014), 105009 15 pp.
6. Przybylska J., Nicińska K.: Wzorcowanie precyzyjnych autokolimatorów i enkoderów kątowych z zastosowaniem *shearing techniques* – efekt prac w ramach wspólnego projektu EMRP SIB58 Angles, *Mechanik* 11(2016), s.1616-1617.

NEW FRONTIERS IN ANGLE METROLOGY

The article describes in short the most important results of the investigations carrying out in the frame of Joint Project EMRP SIB 58 Angles “Angle Metrology”. Central Office of Measures participated in this project in years 2013 – 2016. The new small angle generators, the new systems for 2D calibration of autocollimators, the new device for reproducible positioning of the aperture relative to the autocollimator optical axis, the new method for simultaneously calibration of autocollimators and angle encoders (“*shearing techniques*”) were developed and tested. Additionally the investigations on the autocollimator response on different distances and different diaphragm positions were carried out. Also the influences of not proper mounting and coupling of angle encoders on the indications and uncertainty, during calibration, were mentioned. The special device for these investigations was developed. The EURAMET Technical Guides (Calibration of Autocollimators, Calibration of Angular Encoders) were elaborated and could be downloaded from the website soon. The article presents also profits which Laboratory of Length gained during the project and shortly describes the main tasks, which have to be done to be able to carry out measurements on the level required by customers.

Keywords: plane angle, encoders, autocollimators, Project EMRP.