

Udział Laboratorium Kąta w projekcie EMRP SIB 58 Angles

Katarzyna Nicińska, Joanna Przybylska (Zakład Długości i Kąta, GUM)

We wrześniu 2013 roku, w ramach programu EMRP (European Metrology Research Programme), rozpoczął się, trwający trzy lata, projekt SIB58 Angles „Angle Metrology”. Jego celem jest zapewnienie realizacji i rozpowszechnienie jednostki kąta płaskiego, radiana, zgodnie z oczekiwaniami przemysłu i świata nauki, poprzez opracowanie nowych urządzeń oraz innowacyjnych technik pomiarowych. W artykule przedstawiono ogólne założenia projektu, zaprezentowano pakiety robocze, ze szczególnym uwzględnieniem tych pakietów, w których Laboratorium Kąta bierze czynny udział.

The project EMRP SIB 58 Angles “Angle Metrology” started in September 2013. The aim of this project is to ensure the realization and dissemination of the SI angle unit ‘radian’ according to the demands from different levels – from high scientific work to industrial applications through developing facilities and novel methods of calibrations. In this article main purposes of the project will be discussed. Workpackages of the project will be also presented in the paper including those workpackages in which Angle Laboratory takes part.

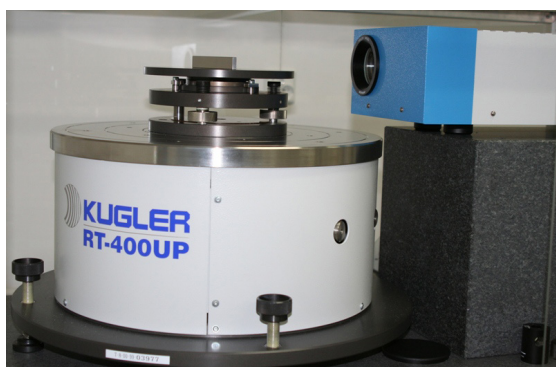
Główne założenia projektu

W Laboratorium Kąta Zakładu Długości i Kąta Głównego Urzędu Miar utrzymywany jest państwowy wzorzec jednostki kąta płaskiego, którego częścią jest stanowisko do odtwarzania jednostki miary poprzez podział kąta pełnego. Składa się ono z precyzyjnego stołu obrotowego o rozdzielczości 0,002” oraz autokolimatora ELCOMAT HRC o rozdzielczości 0,005” (rys. 1) i umożliwia wzorcowanie pryzm wielościennych, płytek kątowych przywieralnych i auto-

kolimatorów z niepewnością rozszerzoną rzędu 0,1”. Parametry metrologiczne i osiągnięte wyniki, potwierdzone m.in. w porównaniach międzynarodowych, lokują to stanowisko w gronie najdokładniejszych.

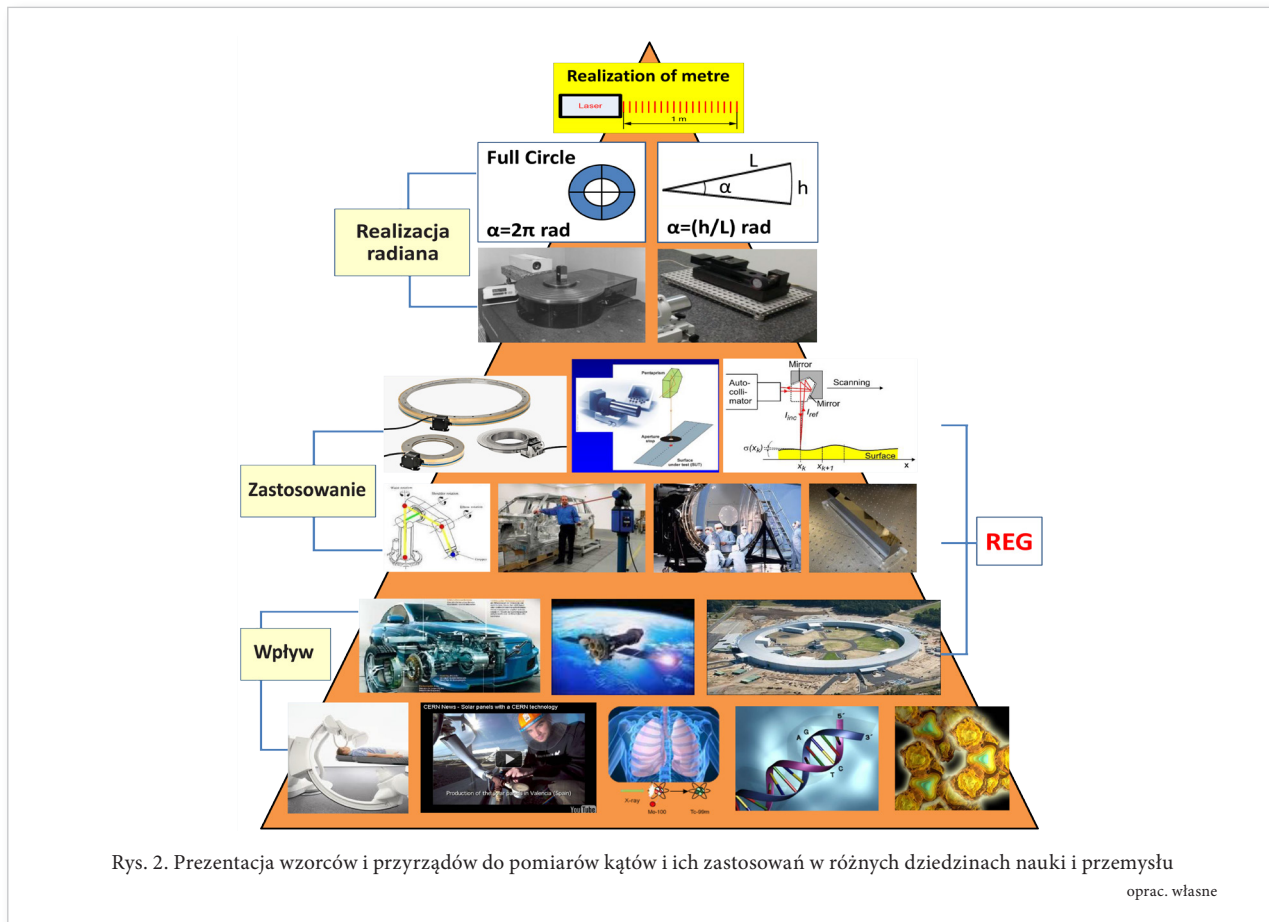
We wrześniu 2013 r., w ramach programu EMRP, rozpoczął się, trwający trzy lata, projekt SIB 58 Angles „Angle Metrology”. W projekcie bierze udział – w różnej formie – 16 laboratoriów – partnerów (14 europejskich oraz 2 pozaeuropejskie). Partnerzy dofinansowani to: TÜBITAK UME (Turcja – koordynator projektu), CEM (Hiszpania), ČMI (Czechy), INRIM (Włochy), IPQ (Portugalia), LNE (Francja), GUM (Polska), MIKES (Finlandia), PTB (Niemcy), SMD (Belgia); partnerzy bez dofinansowania to: AIST (Japonia), KRISS (Korea), FAGOR (Hiszpania), IK4-TEKNIKER (Hiszpania), MWO (Niemcy); partner grantowy to: HZB (Niemcy).

Głównym celem projektu jest rozwój metrologii kąta płaskiego w nauce i przemyśle, poprzez udoskonalanie realizacji i przekazywania jednostki kąta płaskiego (radiana), przy zastosowaniu nowych przyrządów i innowacyjnych technik pomiarowych. Zaawansowana metrologia kąta płaskiego znajduje zastosowanie nie tylko w różnych gałęziach przemysłu (robotyka, automatyka, motoryzacja, medycyna, energetyka itp.), ale także przy pomiarach stałej



Rys. 1. Stanowisko do odtwarzania jednostki kąta płaskiego w zakresie 360°

fot. arch. GUM



Rys. 2. Prezentacja wzorców i przyrządów do pomiarów kątów i ich zastosowań w różnych dziedzinach nauki i przemysłu

oprac. własne

grawitacji G oraz w badaniach przeprowadzanych w centrach synchrotronowych i FEL (free electron lasers), gdzie istnieje konieczność przeprowadzania dokładnych pomiarów kształtu powierzchni precyzyjnych elementów optycznych oraz osiowania tych elementów.

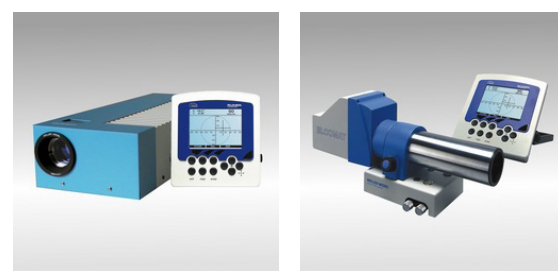
Pakiety robocze

Projekt został podzielony na 6 pakietów roboczych (*workpackages*):

- ♦ WP1 – Charakterystyka metrologiczna autokolimatorów o wysokiej precyzji,
- ♦ WP2 – Zastosowanie autokolimatorów w profilometrii,
- ♦ WP3 – Enkodery kątowe,
- ♦ WP4 – Generatory małych kątów i hybrydowe komparatory kątowe,
- ♦ WP5 – Przekazywanie wiedzy,
- ♦ WP6 – Koordynacja i zarządzanie.

Laboratorium Kąta bierze udział w czterech pakietach roboczych: WP2, WP3, WP5 i WP6.

Pakiet WP1 obejmuje przeprowadzenie prac mających na celu m.in. zbadanie wpływu na wskazania autokolimatora niezwykle trudnych warunków pracy (takich jak małe, rzędu milimetrów, przesłony, krzywizny powierzchni odbijających, zmienna i duża, rzędu pojedynczych metrów, odległość pomiędzy autokolimatorem a powierzchnią odbijającą). Badania tych zagadnień są niezwykle ważne dla laboratoriów metrologicznych w centrach synchrotronowych i FEL. W ramach tego pakietu ma zostać też skonstruowa-



Rys. 3. Autokolimatory fotoelektryczne – ELCOMAT HR i ELCOMAT 3000 – wykorzystywane do badań w ramach projektu EMRP SIB 58 Angles

ne, zrealizowane i przebadane stanowisko umożliwiające wzorcowanie autokolimatorów jednocześnie w dwóch osiach.

Pakiet WP4 obejmuje przeprowadzenie prac nad rozwinięciem zastosowań generatorów małych kątów, realizujących jednostkę kąta płaskiego poprzez stosunek dwóch długości. Celem jest osiągnięcie niepewności pomiaru lepszej niż $0,01''$ (50 nrad), umożliwienie przeprowadzania pomiarów nawet co $0,001''$, znaczne rozszerzenie zakresu pomiarowego, aż do $\pm 3600''$. Zostanie opracowana i przetestowana także nowa metoda wzorcowania autokolimatorów na generatorach małych kątów. Będą również prowadzone badania nad hybrydowymi komparatorami kątowymi. Są to urządzenia łączące w sobie oba sposoby realizacji radiana: jako stosunek dwóch długości i podział kąta pełnego (interferometr kątowy – enkoder).

Pakiet roboczy WP2 wiąże się ściśle z pakietem WP1. Celem tego pakietu jest uzyskanie znaczącego postępu w pomiarach geometrii powierzchni elementów optycznych, stosowanych głównie w centrach synchrotronowych i FEL, za pomocą profilometrów deflektometrycznych. Niepewność pomiaru błędów kształtu i spójność pomiarowa zależą bezpośrednio od wzorcowania oraz charakterystyki metrologicznej autokolimatora, który wraz z pentapryzmą i powierzchnią badaną stanowią komponenty optyczne profilometru tego typu. Prace w ramach tego pakietu obejmują przeprowadzenie przeglądu zastosowań autokolimatorów w profilometrii, scharakteryzowanie wpływu pewnych parametrów opisujących badaną powierzchnię, takich jak współczynnik odbicia i krzywizna na odpowiedź kątową autokolimatora. Głównym zadaniem w tym pakiecie jest skonstruowanie urządzenia i opracowanie metody odtwarzalnego pozycjonowania małych przesłon (o średnicy od $1,5$ mm do $2,5$ mm) w pobliżu badanej powierzchni, w odniesieniu do osi optycznej autokolimatora. Położenie przesłony jest bardzo ważne, aby: – zapewnić równoległość pomiędzy osią przesuwu pentapryzmy i osią optyczną autokolimatora, – zapewnić odtwarzalność wskazań autokolimatorów podczas ich wzorcowania i przy pomiarach z zastosowaniem autokolimatorów, – zwiększyć rozdzielczość stanowiska do pomiarów kształtu powierzchni metodą deflektometryczną. Urządzenie ma zapewnić odtwarzalność pozycjonowania przesłon w granicach $0,1$ mm. W tym zadaniu Laboratorium Kąta bierze czynny udział. W pierwszej fazie zostały zebrane kon-



Rys. 4. Inkrementalny enkoder kątowy RON 905

cepcje, jak takie urządzenie powinno wyglądać i na jakiej zasadzie powinno pracować. Dalszym krokiem będzie skonstruowanie urządzenia, a następnie przeprowadzenie porównań polegających na wykonaniu wzorcowania autokolimatorów na różnych stanowiskach, w tym m.in. na stanowisku GUM, z zastosowaniem małych przesłon i nowego urządzenia.

Pakiet roboczy WP3 to pakiet poświęcony enkoderom kątowym i precyzyjnym stołom obrotowym. W pakiecie tym jest aż siedem zadań, z czego w pięciu bierze udział Laboratorium Kąta.

Zadania pakietu

- ▶ Przegląd istniejących zastosowań enkoderów kątowych, metody ich wzorcowania, zebranie dostępnej dokumentacji, przewodników, procedur pomiarowych, danych dotyczących ich zakresów pomiarowych, rozdzielczości i dokładności.
- ▶ Opracowanie nowych metod wzorcowania stołów obrotowych z zamontowanym w nich jednogłowicowym enkoderem kątowym. Nowe metody mają zapewnić niepewność pomiaru mniejszą niż $0,01''$ ($k = 2$). Jest to ważne zadanie ze względu na to, iż tylko kilka instytutów metrologicznych posiada stoły obrotowe z zamontowanym enkoderem, wykonanym na specjalne zamówienie i posiadającym kilka głowic pomiarowych (np. PTB, LNE, AIST). Instytuty te osiągają na swoich stołach obrotowych niepewności pomiaru rzędu $0,01''$. Pozostałe ośrodki (np. GUM, TUBITAK, IPQ, CEM) mają stoły obrotowe z wbudowanym enkoderem jednogłowicowym. Komercyjne enkodery dwugłowicowe dopiero zaczynają pojawiać się na rynku.
- ▶ Opracowanie nowej metody wzorcowania autokolimatorów przy zastosowaniu stołów obroto-

wych – metoda wykorzystująca tzw. *shearing techniques*.

W ramach tego zadania, w pierwszej kolejności opracowana została procedura opisująca ideę oraz sposób przeprowadzenia pomiarów. W kolejnych etapach, każde z laboratoriów, biorących udział w tym zadaniu, przeprowadzi wzorcowanie autokolimatorów metodą opracowaną na swoim stanowisku. Oszacowany będzie budżet niepewności w podejściu klasycznym i za pomocą symulacji Monte Carlo. Efektem końcowym tego zadania będzie opracowanie i wydanie przewodnika, dotyczącego wzorcowania autokolimatorów z małą niepewnością, za pomocą precyzyjnych stołów obrotowych.

- ▶ Przeprowadzenie badań dotyczących wzorcowania komercyjnie dostępnych enkoderów kątowych za pomocą drugiego enkodera jako wzorca. Podczas wzorcowania enkoderów za pomocą enkodera wzorcowego bezpośrednią metodą porównawczą, pojawia się problem związany ze sprzężeniem obu enkoderów – badanego z wzorcowym. W przypadku, gdy pojawia się kąt pomiędzy osiami obrotu obu enkoderów (nierównoległość powierzchni pomiarowych enkoderów) lub niewspółosiowość, powstają pewne błędy systematyczne, które mają duży wpływ na wyniki pomiarów. Można je wyeliminować bądź osłabić ich wpływ, przeprowadzając pomiary w relatywnych położeniach jednego enkodera względem drugiego. Pojawia się problem, jak zapewnić takie same warunki metrologiczne (ustawienie i powtarzalność warunków) w różnych położeniach enkoderów, i jaki to będzie miało wpływ na wyniki pomiarów. W ramach tego zadania zostaną przeprowadzone badania wpływu poszczególnych czynników, możliwości ich eliminacji lub zminimalizowania, jak również ich udział w budżecie niepewności. Efektem końcowym będzie opracowanie i wydanie przewodnika, obejmującego także zalecenia dotyczące osiowania i adjustacji układu przed przystąpieniem do pomiarów.
- ▶ Nowe metody lepszej interpolacji sygnału enkoderów kątowych. Podstawowa rozdzielczość enkodera kąтового jest określona przez liczbę linii na dysku enkodera. Sygnały otrzymywane z takich linii są inter-

polowane w celu osiągnięcia większej rozdzielczości. Proces interpolacji jest obciążony błędami systematycznymi. W ramach tego zadania będą prowadzone badania dotyczące przetwarzania sygnałów wychodzących z enkodera. Laboratorium Kąta, razem z TUBITAK i CEM, podejmie próbę scharakteryzowania błędów interpolacji przy zastosowaniu metody „shearing techniques”.

Dwa pozostałe zadania w pakiecie roboczym WP3 są realizowane przez innych partnerów. Dotyczą one budowy nowego stołu obrotowego w oparciu o enkoder obrotowy, przy zastosowaniu dwóch głowic (stałej i ruchomej), mającego błędy mniejsze niż 0,01”, wykonania wzorcowania autokolimatorów i enkoderów jednogłowicowych na tym stanowisku oraz badań dotyczących wzorcowania stołów obrotowych z enkoderem kątowym wielogłowicowym.

Praca w pakietach WP5 i WP6 jest obowiązkowa dla wszystkich partnerów projektu. Celem pakietu WP5 jest rozpowszechnienie metod, procedur, urządzeń opracowanych w tym projekcie. Będzie to realizowane poprzez publikacje naukowe, referaty na różnego rodzaju warsztatach i konferencjach naukowych, przewodniki opisujące nowe metody pomiarowe oraz stronę internetową.

Pakiet WP6 dotyczy zarządzania projektem. Prace w tym pakiecie związane są głównie z dokumentami, które każdy uczestnik projektu jest zobowiązany wypełniać (np. raporty okresowe z prac oraz raport końcowy), a także z organizacją i udziałem w cyklicznych spotkaniach roboczych.

Literatura

- [1] Geckeler R. D., Just A., Krause M. and Yashchuk V. V., *Autocollimators for deflectometry: current status and future progress*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 616 (2010).
- [2] Yandayan T., Akgoz S. A., Asar M., *Calibration of high-resolution electronic autocollimators with demanded low uncertainties using single reading head angle encoders*, Measurement Science and Technology, 25 (2014).
- [3] Siewert F., Buchheim J., Hoff T., Fiedler S., Bourenkov G., Cianci M., Signorato R., *High angular resolution slope measuring deflectometry for the characterization of ultra-precise reflective x-ray optics*, Measurement Science and Technology, 23 (2012).