

Od zegara wahadłowego do zegara optycznego (Pomiary czasu i częstotliwości w Polsce i na świecie 1919–2014)¹

Albin Czubla (Zakład Elektryczny, GUM)

Wstęp

W ciągu ostatnich 95 lat dokonał się ogromny postęp w dziedzinie precyzyjnych pomiarów czasu – poziom dokładności w Polsce i na świecie zmienił się o 6 rzędów wielkości: z poziomu milisekund do poziomu nanosekund. Jest to wynikiem ogromnego zapotrzebowania na wiarygodną i dokładną informację o czasie – początkowo głównie dla potrzeb nawigacji morskiej czy zwykłej regulacji transportu publicznego i komunikacji, a w końcu w licznych zastosowaniach nawigacji satelitarnej, łączności przewodowej i bezprzewodowej, teleinformatyce, bezpieczeństwie operacji finansowych, energetyce i praktycznie w każdym obszarze funkcjonowania państwa i społeczeństwa. Przed Głównym Urzędem Miar od początku jego istnienia stało i nadal stoi zadanie wychodzenia naprzeciw tym potrzebom i dbałości o rozwój tej dziedziny.

Precyzyjne zegary mechaniczne (wahadłowe)

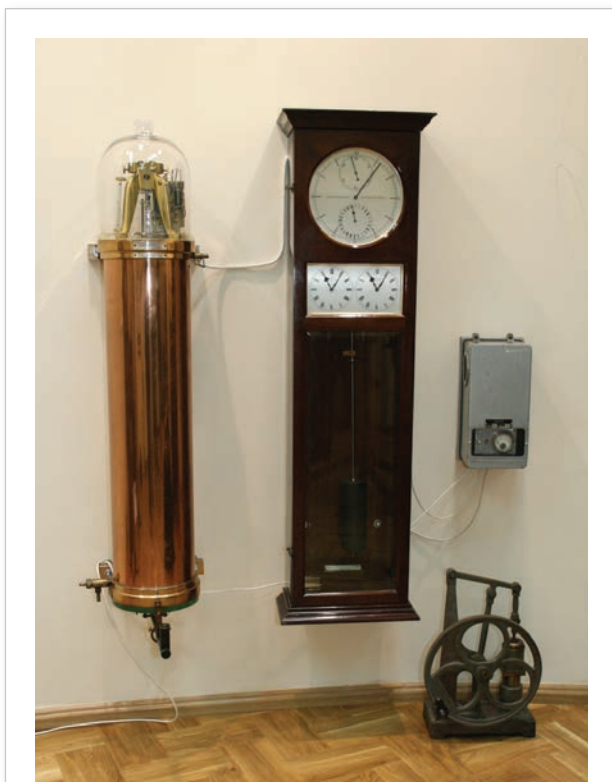
W okresie pomiędzy I i II wojną światową, i jeszcze przez następnych prawie 30 lat, głównym odniesieniem dla precyzyjnych pomiarów czasu i częstotliwości były długo-okresowe obserwacje astronomiczne wzajemnego ruchu Ziemi, Słońca i Księżycy, a także pozostałych planet układu słonecznego. W Polsce, podobnie jak w innych krajach, zegary służyły wtedy do przechowywania informacji o czasie pomiędzy okresami, dla których znane były wyniki obserwacji astronomicznych i ułatwiały prowadzenie precyzyjnych obserwacji astronomicznych. Początkowo były to głównie zegary mechaniczne o napędzie elektrycznym, które – w celu uzyskania wysokiej dokładności i równomierności odmierzanego czasu – wymagały stabilnych warunków pracy i zminimalizowania wpływu zakłóceń zewnętrznych, a zwłaszcza drgań i wstrząsów mechanicznych oraz zmian temperatury i ciśnienia. Osiągnano to poprzez

umieszczanie zegarów na ścianach, specjalnie do tego celu budowanych, niepowiązanych z resztą budynku – potężnych betonowych postumentów sięgających nawet na kilkanaście metrów w głąb ziemi. Dodatkowo stosowano specjalizowane osłony i obudowy oraz układy kompensujące, przynajmniej częściowo, wpływ zmian temperatury i ciśnienia atmosferycznego. Stosowano także szczelne hermetyczne obudowy utrzymujące wewnątrz, w obszarze pracy wahadła i bezpośrednio powiązanej z nim części mechanicznej zegara, stałe pod- lub nadciśnienie. Brak w tamtych czasach typowych układów elektrycznych, zasilaczy i innych elementów grzejnych o większej mocy powodował, że temperaturę w pomieszczeniach z zegarami można było utrzymywać na niezmiennym poziomie, poprzez regulację liczby włączonych i wyłączonych żarówek w oświetleniu, minimalizując w ten sposób wpływ dobowych i sezonowych zmian warunków termicznych wewnątrz i na zewnątrz budynku.

Precyzyjny zegar Shortta

W najdokładniejszym zegarze mechanicznym, skonstruowanym w 1921 r. zegarze Shortta – składającym się w istocie z dwu zegarów wahadłowych: zegara głównego, tzw. master clock, i zegara pomocniczego, tzw. secondary lub slave clock – wahadło zegara głównego umieszczone było w szczelnie zamkniętym miedzianym cylindrze zamkniętym szklaną kopułą, z którego wypompowywano powietrze. Osiągnano w ten sposób stan niewysokiej próżni (ok. 25 mmHg), który pozwalał na prawie swobodny ruch inwarowego wahadła, z minimalnym udziałem pozostałego wewnątrz powietrza. Zegar główny nie posiadał ani tarczy ani wskazówek, gdyż miał za zadanie odmierzać jak najdokładniej pojedyncze sekundy, natomiast połączony z nim elektrycznie zegar pomocniczy, posiadający już pełny mechanizm zegarowy i układy generujące impulsy elektryczne niezbędne do prowadzenia skali czasu i porównywania wskazań zegarów, był synchronizowany do zegara głównego. Dzięki temu praca zegara głównego była zakłócana jedynie przez podawane co 30 s – dokładnie w momencie przejścia wahadła zegara głównego przez położenie

¹ Niniejszy tekst jest skróconą, a także, w niektórych fragmentach, rozwiniętą i uzupełnioną, wersją artykułu „Pomiary Czasu i Częstotliwości w Polsce i na świecie 1919–2009”, zamieszczonego w jubileuszowym Biuletynie Głównego Urzędu Miar, wydanym w 2009 r. z okazji 90-lecia GUM.



Obecnie działający zegar Shortta w Olsztyńskim Planetarium i Obserwatorium Astronomicznym. Po lewej stronie: zegar główny, pośrodku: zegar pomocniczy z układem tarcz i wskazówek, po prawej: źródło zasilania zegara i pozostałości po ręcznej pompie próżniowej

fol. Olsztyńskie Planetarium i Obserwatorium Astronomiczne

równowagi – delikatne impulsy elektryczne, mające na celu podtrzymanie ciągłości ruchu wahadła, a jednocześnie synchronizujące ruch wahadła zegara pomocniczego. Równomierność odmierzanego czasu przez taki tandem zegarów przekraczała nawet 0,1 sekundy na rok i pozwoliła już zauważyć nieregularności w ruchu wirowym i obiegowym Ziemi dookoła Słońca.

Pierwsze precyzyjne zegary w Głównym Urzędzie Miar

Prawdopodobnie w latach 1927–1928 do Głównego Urzędu Miar został sprowadzony i rozpoczął pracę pierwszy precyzyjny zegar Shortta (Nr 14). Do 1935 r. w GUM pojawił się również drugi zegar Shortta o Nr 70. Oba zestawy zegarów Shortta zostały zainstalowane na ścianach specjalnie do tego celu wybudowanego potężnego betonowego postumentu oddzielonego od reszty budynku. Zegary były porównywane pomiędzy sobą oraz z zagranicznymi (radiowymi) sygnałami czasu.

Z raportu ze spotkania informacyjnego (1935 r.) przedstawiciele instytucji państwowych w Polsce zainteresowanych usprawnieniem służby czasu dla swoich potrzeb wynika, że precyzyjne zegary mechaniczne posiadały wówczas jeszcze: Biuro Pomiarowe Ministerstwa Komunikacji w Borowej Górze (zegar precyzyjny Leroy¹), Państwowy Instytut Meteorologiczny w Gdyni (dwa precyzyjne zegary Rieflera², stosowane do obsługi marynarki) oraz Państwowy Instytut Telekomunikacyjny w Warszawie przy ul. Ratuszowej (zegar kamertonowy, stanowiący wzorzec częstotliwości³). Obserwatoria astronomiczne w Krakowie, Poznaniu, Wilnie czy Lwowie prawdopodobnie też posiadały precyzyjne zegary do prowadzenia obserwacji astronomicznych. Zagraniczne radiowe sygnały czasu, za pośrednictwem których porównywane były zegary w ówczesnej Polsce, kontrolowane były przez Międzynarodowe Biuro Czasu w Paryżu. Biuro to, na podstawie analizy gromadzonych wyników obserwacji astronomicznych, z opóźnieniem kilku miesięcy ogłaszało poprawki dla poszczególnych sygnałów czasu.

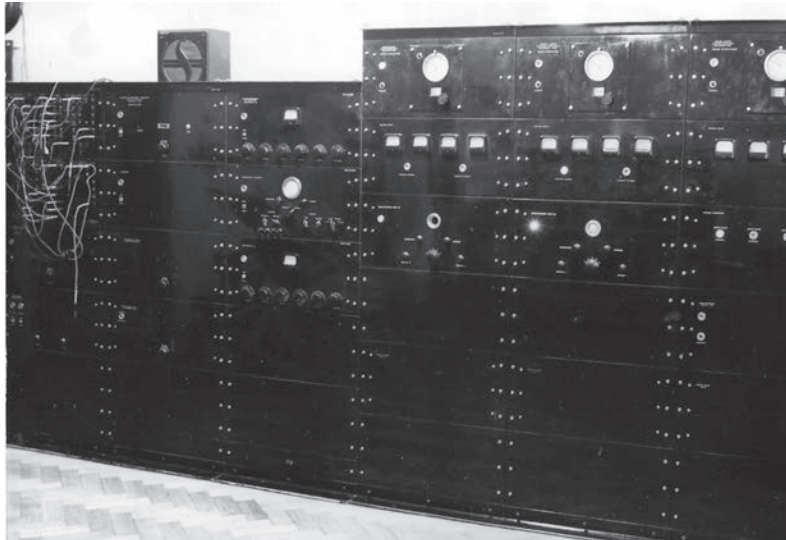
Zegary kwarcowe

Niedługo potem, bowiem już w 1938 r. w Głównym Urzędzie Miar rozpoczął pracę pierwszy w Polsce zegar kwarcowy, skonstruowany przez Państwowy Instytut Telekomunikacyjny w Warszawie, co miało miejsce 9 lat po zbudowaniu pierwszego na świecie zegara kwarcowego w Laboratorium Bella w USA. Główną częścią pierwszych tego typu zegarów był podwójnie termostatowany kryształ kwarcu, o częstotliwości drgań własnych ok. 100 kHz, z którego sygnał był przekazywany do części zegarowej sterowanej elektrycznym silnikiem synchronicznym oraz do układów generujących elektryczne sygnały czasu. Część zegarowa była z kolei złożonym mechanicznym układem wielu przekładni i kół zębatych. Dokładność najlepszych tego typu zegarów kwarcowych sięgała początkowo ok. 1 ms na dobę (1 sekunda na 3 lata), aby w coraz doskonalszych konstrukcjach, już pozbawionych mechanicznej części zegarowej, a także coraz mniejszych i w pełni elektronicznych, osiągnąć współcześnie poziom ok. 1 μ s na dobę (1 sekunda na 3 tys. lat) przy spełnieniu odpowiednich warunków. Zegary kwarcowe, jako główne wzorce czasu i częstotliwości, pracowały w Głównym Urzędzie Miar do końca lat 60. ubiegłego stulecia.

¹ Zegar wahadłowy pracujący pod zmniejszonym ciśnieniem.

² Zegar wahadłowy pracujący typowo pod zwiększonym ciśnieniem.

³ Mechanizm zegarowy poruszany jest przez drgający ciągle kamerton.



Zegary kwarcowe i urządzenia do generacji elektrycznych sygnałów czasu w Głównym Urzędzie Miar (zdjęcie wykonano prawdopodobnie w latach 60. XX w.)

fol. arch. GUM

wane za wzorcowe, natomiast wzorcowymi przedziałami czasu stały się bardzo krótkie okresy promieniowania w atomach cezu.

W cezowym zegarze atomowym i praktycznie w każdym innym zegarze atomowym, źródłem wyjściowych wzorcowych sygnałów czasu i częstotliwości jest dobrze wystarczony, termostatowany, kontrolowany elektrycznie kryształ kwarcu. Realizowane w zegarach cezowych sprzężenie pomiędzy przejściami kwantowymi a drganiami elektromechanicznymi kryształu kwarcu opiera się na powielaniu częstotliwości podstawowej drgań kwarcu precyzyjnie do wartości mikrofalowej $9\,192\,631\,770\text{ Hz}$, a następnie na podawaniu tej częstotliwości na wnękę rezonansową tuby cezowej i wyko-

Zegary atomowe

W 1976 r., prawie 10 lat po przyjęciu przez Generalną Konferencję Miar atomowej definicji sekundy opartej na przejściach kwantowych w atomach cezu 133, w Głównym Urzędzie Miar zaczął pracę pierwszy cezowy zegar atomowy. W kolejnych latach sukcesywnie dołączały do niego nowe zegary atomowe, na trwale potwierdzając w Polsce zmianę koncepcji odmierzenia czasu. Była to bardzo istotna zmiana, ponieważ bardzo długie przedziały czasu uzyskiwane z obserwacji astronomicznych przestały być uzna-

rzystaniu zjawiska rezonansu zachodzącego w atomach cezu wewnątrz tuby cezowej w obszarze, do którego wprowadzane są atomy cezu w niższym stanie energetycznym. Im częstotliwość mikrofalowego sygnału podawanego na wnękę rezonansową jest bliższa wartości nominalnej, tym więcej atomów cezu przechodzi do wyższego stanu energetycznego i uzyskuje się silniejszy sygnał z tuby cezowej. Im częstotliwość jest dalsza od wartości nominalnej, tym sygnał jest słabszy. Układy wewnętrzne zegara tak sterują częstotliwością kwarcu, aby utrzymywać stan, w którym sygnał z tuby cezowej jest najsilniejszy. W ten sposób wszystkie wzorcowe sygnały uzyskiwane z przetwarzania częstotliwości generowanej przez kryształ kwarcu uzyskują prawie dokładność i stabilność przejść kwantowych w atomach cezu. Słowo „prawie” oznacza obecnie w tym przypadku stabilność na poziomie ok. 1 ns na dobę (1 sekunda na 3 mln lat). Całkowity czas pracy zegara cezowego uzależniony jest głównie od wielkości źródła atomów cezu – w dostępnych komercyjnie zegarach cezowych o podwyższonej dokładności wystarcza ono obecnie na ok. 9 lat ciągłej pracy.

Fontanny cezowe, rubidowe i zegary optyczne

Głównym ograniczeniem dokładności zwykłych zegarów cezowych jest zmienność warunków zewnętrznych, w których przelatujące atomy cezu oddziałują z sygnałem mikrofalowym, wymagany szybki ruch atomów oraz duża



Pierwszy cezowy zegar atomowy w Polsce. Posiada jeszcze 24-godziną tarczę ze wskazówkami. Pracował w Głównym Urzędzie Miar w latach 1976–1995

fol. arch. własne

szerokość krzywej rezonansowej oddziaływania z sygnałem mikrofalowym. W tzw. fontannach cezowych utrzymywany jest stan wysokiej próżni, a atomy cezu są schładzane światłem laserowym do temperatury rzędu mK. W momencie, kiedy laser świecący od „góry” przestaje działać, atomy cezu są wybijane przez światło lasera świecącego od „dołu” i, jak krople wody w fontannie, wznoszą się do góry, przelatując pierwszy raz przez wnękę mikrofalową i opadają z powrotem, przelatując drugi raz przez wnękę rezonansową. W ten sposób wydłużony zostaje czas oddziaływania atomów cezu z sygnałem mikrofalowym, mniejsza jest zmienność warunków zewnętrznych i, w konsekwencji, uzyskuje się sygnał o 1 do 2 rzędów wielkości stabilniejszy. Dodatkowo uwzględnienie rzeczywistego wpływu temperatury, pól zewnętrznych (pola magnetycznego i grawitacyjnego) i zjawisk towarzyszących (efekt Dopplera, promieniowanie ciała doskonale czarnego i inne) pozwala na wyznaczenie absolutnej wartości częstotliwości, zgodnie z aktualną definicją sekundy. Fontanny rubidowe działają na analogicznej zasadzie jak fontanny cezowe, ale niektóre z niekorzystnych efektów można łatwiej wyeliminować.

W obu powyższych przypadkach jednak mamy do czynienia z sygnałem mikrofalowym (zakres GHz), co powoduje, że szerokość krzywej rezonansowej stanowi konstrukcyjnie barierę dla dokładności i stabilności nie do przekroczenia. Zastosowanie częstotliwości z zakresu promieniowania optycznego, czyli o częstotliwościach rzędu PHz ($1 \text{ PHz} = 10^{15} \text{ Hz}$), pozwoliłoby na uzyskanie docelowo zegarów o stabilności do 1000 razy lepszej niż fontann cezowych. W tym właśnie kierunku trwają obecnie prace w najbardziej zaawansowanych laboratoriach czasu i częstotliwości i instytutach naukowych na świecie. Budowane są prototypowe zegary optyczne, wykorzystujące przejścia kwantowe na pojedynczych atomach i jonach lub sieciach atomów (Sr, Yb, Yb⁺, Hg⁺, Al⁺, Sr⁺, Ca⁺, Mg⁺, Be⁺, ...).

W Polsce nie ma jeszcze fontanny cezowej ani rubidowej, choć są prowadzone rozmowy i poszukiwania środków finansowych na ten cel. Natomiast w Toruniu Krajowe Laboratorium Fizyki Atomowej Molekularnej i Optycznej buduje zegar optyczny. Na razie jest to przedsięwzięcie głównie naukowe, ale kiedy prace zostaną zakończone i zegar stanie się zegarem operacyjnym lub przynajmniej okresowym źródłem wzorcowej częstotliwości optycznej, wówczas po włączeniu w sieć porównań krajowych i międzynarodowych nabierze znaczenia metrologicznego, mającego przełożenie na dokładność pomiarów czasu i częstotliwości w Polsce.

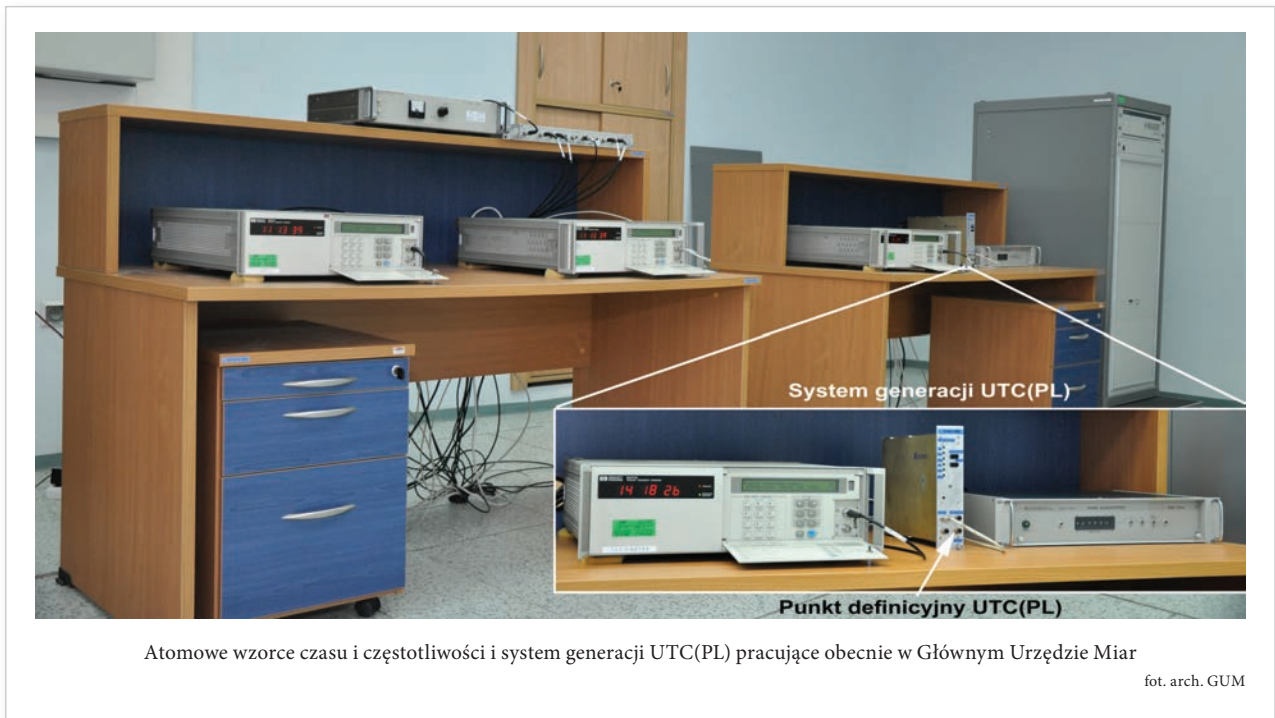
Porównania wskazań zegarów

Ze względu na ciągły upływ czasu, dynamiczny charakter pracy każdego zegara, a także wrażliwość na stabilność warunków zewnętrznych, zegary wymagają utrzymywania w ciągłej pracy i stałej weryfikacji wskazań. W przypadku zegarów mechanicznych wahadłowych i zegarów kwarcowych ze złożoną częścią zegarową, transport nieprzerwanie działającego zegara bez zakłócenia jego pracy był nieuzasadniony i praktycznie niemożliwy. Porównania lokalne, poprzez bezpośredni pomiar przedziału czasu między generowanymi przez zegary impulsowymi elektrycznymi sygnałami sekundowymi, również nie były wystarczające do pełnej weryfikacji poprawności pracy zegara. Dopiero ciągłe zdalne porównania międzynarodowe i krajowe zegarów pozwoliły i pozwalają do dnia dzisiejszego na aktualizowanie poprawek do wskazań precyzyjnych zegarów – wzorców czasu i częstotliwości. Do tego celu stosowano początkowo zwykle radiowe sygnały czasu, a później bardziej precyzyjne sygnały z sieci naziemnych nadajników radionawigacyjnych lub nadajników telewizyjnych, a w końcu sygnały z systemów nawigacji satelitarnej. Radiowe sygnały czasu w porównaniach zdalnych pozwalały osiągnąć poziom dokładności ok. 1 ms, co dla zegarów mechanicznych było w zupełności wystarczające. Sygnały z naziemnych systemów radionawigacyjnych, które zaczęły powstawać od czasu II wojny światowej, pozwalają już osiągnąć poziom dokładności ok. 1 μ s. Wreszcie wykorzystanie obecnie powszechnie dostępnych sygnałów z satelitarnych systemów nawigacyjnych, głównie z systemu GPS, umożliwia już osiągnięcie poziomu dokładności kilku ns, podczas gdy wykorzystanie geostacjonarnych satelitów radiokomunikacyjnych czy sieci światłowodowej pozwala osiągnąć poziom dokładności lepszy niż 1 ns.

Dzień dzisiejszy

Dla Głównego Urzędu Miar teraźniejszość w dziedzinie metrologii czasu i częstotliwości to m.in.:

- ▶ członkostwo Polski w Komitecie Doradczym ds. Czasu i Częstotliwości (CCTF) Międzynarodowego Komitetu Miar (CIPM) – członkiem jest CBK PAN, czynione są starania o członkostwo GUM w tym zakresie;
- ▶ 3 zegary cezowe i 1 maser wodorowy pracujące w Głównym Urzędzie Miar oraz 10 wzorców cezowych i 2 masery wodorowe pracujące w Polsce w innych instytucjach, uczestniczące w sposób ciągły w tworzeniu TAI i UTC oraz TA(PL);



Atomowe wzorce czasu i częstotliwości i system generacji UTC(PL) pracujące obecnie w Głównym Urzędzie Miar

fot. arch. GUM

- ▶ dwuczęstotliwościowy system TTS-4 do zdalnego transferu czasu metodami satelitarnymi;
- ▶ synchronizacja państwowego wzorca napięcia elektrycznego stałego i państwowego wzorca długości wzorcowymi sygnałami częstotliwości z zegarów atomowych;
- ▶ ścisła współpraca z Akademią Górniczo-Hutniczą w zakresie precyzyjnego światłowodowego transferu czasu i częstotliwości oraz trzeci rok ciągłej pracy operacyjnego światłowodowego łącza GUM-AOS (Warszawa – Borowiec k. Poznania) o długości 420 km z dokładnością transferu czasu na poziomie ok. 300 ps;
- ▶ regionalna sieć porównań atomowych wzorców czasu i częstotliwości obejmująca metrologię cywilną i wojskową, a także i Litwę;
- ▶ prawie 10 lat funkcjonowania *Porozumienia o współpracy w zakresie tworzenia niezależnej Polskiej Atomowej Skali Czasu TA(PL)* (podpisanego 3 grudnia 2004 r.);
- ▶ oczekiwanie na wyniki prac nad budową zegara optycznego w Toruniu, rozszerzenie światłowodowej

sieci porównań zegarów atomowych o połączenie Poznań – Toruń, czy decyzje w sprawie budowy fontanny cezowej lub rubidowej w Polsce.

Ostatnie słowo w obszarze metrologii czasu i częstotliwości nie zostało jeszcze powiedziane. Przed Głównym Urzędem Miar, podobnie jak przed innymi głównymi krajowymi instytucjami metrologicznymi, stawiane są w tej dziedzinie ciągle nowe wyzwania, m.in. związane z zegarami optycznymi, rozwojem algorytmów wyliczania skal czasu, rozwojem technik światłowodowych i satelitarnych, czy coraz większym znaczeniem synchronizacji czasu w różnego typu systemach dla bezpieczeństwa, konkurencyjności i zagwarantowania odpowiedniej jakości usług.

Podziękowania

Główny Urząd Miar dziękuje Dyrekcji Olsztyńskiego Planetarium i Obserwatorium Astronomicznego za udostępnienie i wyrażenie zgody na zamieszczenie w prezentowanych materiałach zdjęć zegara Shortta.