

Uciekający czas, czyli o jednostce sekundy, pomiarach czasu i nie tylko

Running time – interview on second unit, time measurements and more

Adam Żeberkiewicz (Gabinet Prezesa, GUM)

Z Albinem Czublą, opiekunem państwowego wzorca jednostek miar czasu i częstotliwości, kierownikiem Laboratorium Czasu i Częstotliwości rozmawiamy o tym, jak kiedyś odtwarzano jednostkę czasu, o aktualnych możliwościach pomiarowych GUM w dziedzinie czasu, a także o perspektywach rozwoju jednostki.

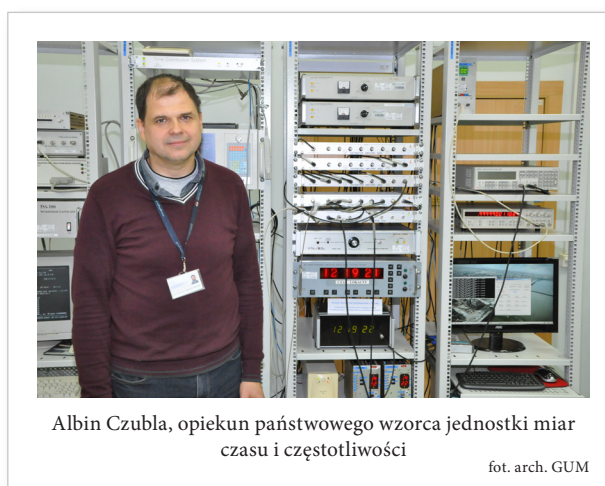
The Bulletin GUM is talking to Mr Albin Czubla, National Time and Frequency Standard Supervisor, the chief of Time and Frequency Laboratory. This interview is focused on how the unit of time was displayed in the past and what are the future prospects connected with development of this unit. Mr Czubla speaks also about actual capabilities of time measurement in GUM and in Poland generally.

– Zaczniemy od budowy wzorca. Z opisu wynika, że jest to układ pomiarowy, który składa się zespołu cezowych wzorców częstotliwości, układu generacji i sterowania UTC(PL) oraz układu porównań zewnętrznych i wewnętrznych. Dlaczego rozmawiamy o wzorcu dwóch jednostek?

– Dlatego, że pomiary czasu pozwalają na dokładne wyznaczenie częstotliwości i odwrotnie – dokładna częstotliwość pozwala dokładnie odmierzать czas. A sam wzorzec państwowy ma w sobie kilka zegarów. Już jeden zegar może być wzorcem czasu i częstotliwości, bo generuje sygnały wzorcowe. Jednak żeby zapewnić ciągłość odtwarzanej skali czasu, a także powiązanie zegarów atomowych z systemem międzynarodowym, potrzeba kilku zegarów, muszą być też systemy dystrybucji czasu, umożliwiające porównanie zegarów na odległość. Konieczne jest również wyznaczanie lokalnie w laboratorium skali czasu UTC (PL). Dopiero te wszystkie elementy razem stanowią wzorzec, który jest spójny pomiarowo z definicją sekundy.

– A jak kiedyś odtwarzano jednostkę czasu?

– Przed erą zegarów atomowych czas był odtwarzany z „zegara” astronomicznego – z obserwacji



Albin Czubla, opiekun państwowego wzorca jednostki miar czasu i częstotliwości

fot. arch. GUM

ruchu wirowego i obiegowego Ziemi. Wówczas zegary wahadłowe albo kwarcowe służyły do przechowywania informacji o czasie, pomiędzy okresami obserwacji astronomicznych. Stąd też wzięło się angielskie pojęcie „keeping time”, czyli utrzymywanie czasu. Do połowy XX wieku jednostkę czasu definiowano jako część doby słonecznej, podzielonej na godziny, a następnie minuty i sekundy. Jednak okazało się, że nie da się dokładnie przewidzieć zmienności ruchu wirowego Ziemi wokół własnej osi w ciągu roku. Ziemia porusza się po elipsie, a to powoduje, że raz wiruje szybciej, a raz wolniej – co uwzględnia się wyliczając średnią dobę słoneczną.

Dodatkowy wpływ ma jednak jeszcze ruch Księżyca, planet i innych ciał niebieskich. W konsekwencji średnia doba słoneczna ma zmienną długość.

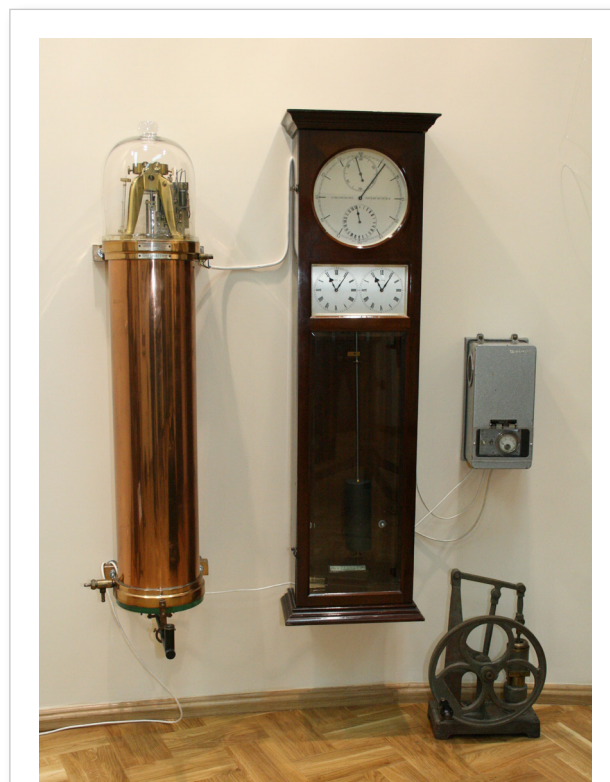
Z kolei podział roku zwrotnikowego na 365 i prawie $\frac{1}{4}$ dnia też nie pozwala dokładnie przewidzieć długości sekundy. Okazuje się, że są jeszcze inne zjawiska, które powodują, że Ziemia czasami zwalnia, czasami przyspiesza. Nie da się więc dokładnie modelować tego, co obserwujemy astronomicznie. Podsumowując: do połowy lat pięćdziesiątych ubiegłego wieku głównym źródłem czasu były obserwacje astronomiczne oparte na monitorowaniu orientacji i fazy ruchu Ziemi. Co jakiś czas Ziemia pozwala obserwować ten sam układ odległych gwiazd.

– **Ale był jakiś przyrząd, który odmierzał czas...**

– Były zegary wahadłowe, np. zegar Shortta, który posiadamy w naszej kolekcji przyrządów historycznych. Jego działanie polegało na tym, że wahadło pracowało w warunkach obniżonego ciśnienia. To nie była wysoka próżnia, ale pozwalała na zminimalizowanie wpływu zakłóceń zewnętrznych. Chociaż był to zegar mechaniczny, ale napędzany elektrycznie, to znaczy jego ruch był podtrzymywany za pomocą przyłożonego napięcia. Następnie zegar główny, bo zegar Shortta składał się z dwóch zegarów, sterował zegarem pomocniczym, który miał wskazówki i możliwość przetwarzania wahnięć na wskazania czasu.

– **Czy to był wzorzec o takiej randze i przeznaczeniu, jak teraz wzorzec państwowy?**

– Zegar ten został zakupiony do Głównego Urzędu Miar w latach dwudziestych ubiegłego wieku. Na pewno służył jako formalne źródło czasu, nadano mu prawdopodobnie jakąś formę etalonu. Ale wtedy było wiele radiowych sygnałów czasu, które pozwalały na porównywanie pracy lokalnych zegarów z tymi sygnałami, a potem również zegarów, które pracowały w obserwatoriach astronomicznych. Tuż przed II wojną światową korzystano już z zegarów kwarcowych, na przykład pierwszy taki zegar pojawił się w GUM jako główny wzorzec w 1938 r. Po wojnie korzystano z zegarów mechanicznych i kwarcowych, dopiero w latach siedemdziesiątych XX wieku pojawiły się w GUM zegary cezowe.



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

– **Wróćmy do współczesności. Gdybyśmy próbowali stworzyć piramidę spójności jednostki czasu, to jak by ona wyglądała?**

– Na wierzchołku piramidy są fontanny cezowe, które pracują w warunkach temperatury rzędu mikrokelwinów. Są tam silnie schłodzone atomy cezu, wybijane przez światło laserowe. Atomy unoszą się i opadają jak krople fontanny i przechodzą dwukrotnie przez wnękę rezonansową. W fontannach cezowych uwzględnia się również wpływ pola grawitacyjnego, pola magnetycznego, temperatury i koryguje się wartość uzyskiwanej częstotliwości do definicji sekundy. Fontanny cezowe nie pracują w sposób ciągły, można je traktować bardziej jako wzorce częstotliwości, która jest bardzo stabilna. Natomiast żeby odmierzać czas potrzebujemy sygnału ciągłego. A zatem fontanny cezowe stoją w hierarchii nieco wyżej niż zegary komercyjne, ale zegary pracujące w sposób ciągły są non stop porównywane. Pozwalają wyznaczać bardzo stabilną średnią ważoną. Można

powiedzieć, że fontanny cezowe i zegary komercyjne razem tworzą poziom najwyższego rzędu.

– Ile jest na świecie fontann cezowych i kto jest w ich posiadaniu?

– Jest ich do dwudziestu, z czego około piętnastu bierze regularnie udział w porównaniach międzynarodowych. I są to między innymi fontanny francuskie, brytyjskie, niemieckie, włoskie, rosyjskie, szwajcarskie, japońskie, amerykańskie. Ostatnio również Indie zbudowały swoją wersję fontanny cezowej. Jest też projekt budowy fontann cezowych w Polsce. Zakłada on, że jedna z fontann stanie w Obserwatorium Astrogeodynamicznym Centrum Badań Kosmicznych PAN w Borowcu k. Poznania, a druga w Głównym Urzędzie Miar.

– Wróćmy do piramidy spójności. Co jest niżej?

– Nieco niżej w piramidzie są komercyjne zegary cezowe, takie między innymi posiada GUM. Zegary cezowe odtwarzają definicję sekundy, ale z większą niepewnością niż fontanny cezowe. Nie weryfikujemy, jaki wpływ ma pole magnetyczne, grawitacyjne, albo warunki zasilania na pracę danego zegara. Weryfikacja odbywa się przez długotrwałe porównywanie z innymi zegarami, a dane są przesyłane do oceny do Departamentu Czasu Międzynarodowego Biura Miar. Uwzględnia się tam, czy dany zegar się spieszy czy późni, czy jego wskazanie nie jest przesunięte choćby o ułamek nanosekundy.

Jeszcze niżej są wtórne wzorce częstotliwości: zegary rubidowe, zegary kwarcowe o podwyższonej stabilności, które non stop pracują i mogą być zsynchronizowane z sygnałami zewnętrznymi, np. GPS, czy sygnałami częstotliwości radiowych. Kolejny poziom piramidy zajmują przyrządy, które włącza i wyłącza się okresowo, np. częstościomierze-czasomierze generatory funkcyjne. Na samym dole są przyrządy typowo użytkowe, różnego rodzaju sekundomierze do pomiarów przedziału czasu, nietypowych sygnałów, stosowanych np. przy sprawdzaniu wodomierzy.

– Czy takie właśnie przyrządy są u nas wzorcowane?

– Otrzymujemy do wzorcowania praktycznie każdego rodzaju przyrządy, od zegara cezowego, przez wtórne wzorce częstotliwości, do prostych przyrządów o charakterze użytkowym, wykorzystywanych w procesach produkcyjnych do weryfikacji warunków czy uzyskiwanych parametrów. Naszymi klientami są zarówno laboratoria akredytowane, dla których wzorcujemy wzorce odniesienia, jak i laboratoria badawcze, gdzie wzorcowane są mniej typowe przyrządy, np. „szybkie” kamery do pomiaru czasu, służące do rejestracji obrazu np. w trakcie zderzenia albo wystrzału. Czas odmierza się przez zliczanie klatek oraz weryfikację częstotliwości robienia zdjęć taką kamerą. Z naszego punktu widzenia jest to więc rodzaj sekundomierza, natomiast laboratorium badawcze potrzebuje zweryfikować, czy to mierzące czas urządzenie działa rzeczywiście poprawnie.

– Czy można sobie wyobrazić funkcjonowanie bez państwowego wzorca jednostki miary czasu?

– Byłoby to bardzo trudne. Oczywiście można byłoby czerpać ten wzorec z innego źródła, na podobnych zasadach, jak radzą sobie okręgowe urzędy miar czy laboratoria akredytowane. Ale państwo potrzebuje również skali czasu, czyli inaczej źródła czasu urzędowego, aby zachować swoją niezależność i nie opierać się na GPS-ie, który jest systemem wojskowym i może być w każdej chwili zakłócony czy wyłączony. Dlatego mamy wzorec państwowy i swoją skalę czasu UTC(PL). Dzięki temu na poziomie milisekund można synchronizować systemy komputerowe w administracji państwowej poprzez serwery czasu urzędowego. W ten sposób zapewniona jest jednolitość rachuby czasu w całym kraju. Jeżeli wyłączylibyśmy całkowicie wzorec państwowy, to szybko by się okazało, że go brakuje. Dokładnego czasu potrzebują współczesna bankowość i giełda. Żeby transakcje zostały przeprowadzone prawidłowo, potrzebna jest zgodność czasu co do sekundy.

– A zdarza się tak, że któryś z tych zegarów jest wyłączany na jakiś czas, np. z przyczyn konserwacyjnych?

– W utrzymywaniu zegarów cezowych tworzących państwowy wzorec czasu i częstotliwości, musimy zachować ciągłość pracy całego układu.

Zegar cezowy zawiera ok. 9 g cezu, który ma przed sobą 9–10 lat normalnej pracy. Zatem tuba cezowa w sposób naturalny się zużywa. Kiedy to nastąpi, trzeba ją wymienić. Trzy zegary cezowe były kupowane na tzw. zakładkę, żeby nie było sytuacji, że wszystkie przestaną działać w jednym momencie. Jeśli więc w jednym zegarze następuje naturalne zużycie tuby cezowej, to dwa pozostałe pracują. Poza tym istotna jest zasada trzech zegarów, to znaczy że porównując je między sobą możemy rozpoznać, który nagle zachowuje się inaczej. Gdyby zegar był tylko jeden, to nawet nie wiedzielibyśmy, że cokolwiek się z nim dzieje. Mając dwa zegary, widzielibyśmy różnicę, ale nie wiedzielibyśmy, w którym zegarze ona wystąpiła. Dlatego ważne, że mamy w GUM grupę zegarów oraz zegary krajowe, które wirtualnie poszerzają możliwości oceny pracy wzorca państwowego i przekazują bezpośrednio jednostkę, od wzorca państwowego dla potrzeb laboratoriów.

– Znaczenie jednostek miar czasu i częstotliwości jest bardzo duże ze względu na szerokie zastosowanie. Częstotliwość jest wykorzystywana do odtwarzania jednostki miary napięcia elektrycznego stałego, jednostki miary długości i pomocniczo w innych dziedzinach pomiarowych...

– Jest jeszcze kwestia wykorzystania sygnałów częstotliwości w telekomunikacji, dzięki czemu jest możliwość przesyłania dużej liczby sygnałów, połączeń telefonicznych. Współczesna technika potrzebuje bardzo dokładnej częstotliwości, bo im ona stabilniejsza, tym mniej szumów, zakłóceń czy błędów w transmisji. Rozwój techniki wiąże się też z produkcją coraz szybszych komputerów i potrzebą istnienia łącz internetowych o coraz większej przepustowości. Rosną też potrzeby nawigacyjne. Jeżeli do synchronizacji systemu GPS używamy komercyjnego zegara cezowego, to przy jego stabilności uzyskujemy dokładność na poziomie kilku, np. trzech, nanosekund. W takim czasie światło przebywa odległość ok. jednego metra. Kiedy mówimy o nawigacji, czyli wykorzystaniu sygnałów wędrujących od satelity do odbiornika na Ziemi, to dokładność będzie na poziomie 10–15 nanosekund, tj. od trzech do pięciu metrów. Coraz więcej mówi się o bezzałogowym transporcie samochodowym czy automatycznym pilocie/kierowcy, który będzie sterował pojazdem. Do tego rozwiązania musimy mieć system, który

pozwole zmieścić się aucie w ramach szerokości pasa. Do tak zaawansowanej nawigacji potrzebne są coraz dokładniejsze zegary.

Rozwój metrologii czasu i częstotliwości z jednej strony umożliwia rozwój nauki, a to z kolei przekłada się na powstawanie coraz doskonalszych systemów nawigacyjnych, połączeń internetowych, czy telefonii komórkowej. Tak więc świat opiera się na dokładnych zegarach. My ich nie widzimy, ale sygnał może być dostarczany na duże odległości i z każdego miejsca – drogą radiową czy światłowodem.

– Jakie są koszty utrzymania tych wszystkich urzędzeń tworzących państwowy wzorzec czasu i częstotliwości?

– Główny koszt stanowią zegary atomowe, do tego dochodzą wewnętrzne układy pomiarowe i systemy do satelitarnego transferu czasu. Są to urządzenia specjalistyczne, wysoko stabilne. Całe wyposażenie kosztuje kilka milionów zł. Jeden zegar ma wartość ok. 400 tys. zł. Do tego serwery czasu, różne pomocnicze systemy pomiarowe, dystrybutory czasu i częstotliwości...

...i co jakiś czas wydatek na wymianę jakiegoś elementu, np. tuby cezowej. Wspominaliśmy już, że taka wymiana nie powoduje przerwy w pracy wzorca...

– Czasem pojedynczy zegar jest wyłączany, ale cały układ działa normalnie. Do tego dochodzi jeszcze zasilanie rezerwowe, czyli akumulatornia, która ma na celu utrzymanie ciągłości pracy wtedy, kiedy nie byłoby zasilania zmiennoprądowego. Wiadomo jednak, że z upływem czasu wszystko podlega zużyciu i akumulatory będą musiały być wymieniane, żeby zachować niezawodność. Ich obecna wydajność nie jest na tyle duża, żeby wystarczała na dłuższy okres podtrzymania pracy.

– W jakich porównaniach międzynarodowych uczestniczy GUM?

– W tworzeniu międzynarodowych atomowych skal czasu TAI i UTC – są to porównania kluczowe. W porównaniach, w których bierzemy udział od trzydziestu lat, uczestniczą cztery zegary Laboratorium Czasu i Częstotliwości, a także inne zegary

z Polski, które są porównywane do naszej skali czasu UTC(PL). Początkowo zegary cezowe były transportowane do porównań. Potem pojawiły się systemy radionawigacyjne i dzięki temu zegary można porównywać zdalnie. Były jeszcze porównania przez łączność telewizyjną. Ta metoda polegała na jednoczesnym odbiorze sygnału telewizyjnego w dwóch lokalizacjach i rejestrację konkretnej ramki w sygnale telewizyjnym. Jeśli uwzględniono się położenie nadajnika i odbiornika radiotelewizyjnego, można było wyliczyć, jaka jest różnica pomiędzy skalami czasu, czy jednym a drugim zegarem. Obecnie dokładnie tak samo działa system GPS.

– Jak często takie porównania się odbywają?

– Czas jest rzeczą dynamiczną, zatem dzieje się to non stop. Przez 24 godziny na dobę bierzemy udział w porównaniach kluczowych, a wyniki pomiaru są wysyłane automatycznie codziennie. Ponadto raz na miesiąc sporządzane są zbiorcze zestawienia różnic naszych zegarów oraz zegarów krajowych w Polsce względem skali czasu UTC(PL) i przesyłane do BIPM. Porównania zdalne dotyczą skali czasu UTC(PL), pozostałe porównania mają charakter lokalny. W wyniku porównań kluczowych uzyskujemy informację, jaka jest różnica między skalą czasu UTC a czasem UTC(PL). W ten sposób możemy wyznaczyć, jak odtwarza jednostkę czasu zegar atomowy – nasz, lub należący do jednego z laboratoriów, które się z nami porównuje, biorąc jednocześnie udział w porównaniach kluczowych. Są jeszcze zegary w ośrodkach metrologii wojskowej (Centralnym Wojskowym Ośrodku Metrologii i Specjalistycznym Wojskowym Ośrodku Metrologii), Instytucie Łączności, telekomunikacji, Centrum Badań Kosmicznych. GUM ma tylko cztery zegary, ale łącznie w Polsce jest ich około piętnaście. Mają one spójność pomiarową przez powiązanie do UTC(PL).

– Niedawno w Instytucie Fizyki UMK w Toruniu zbudowano pierwszy w Polsce optyczny zegar atomowy. Czy to oznacza, że GUM traci monopol na posiadanie najdokładniejszego wzorca czasu?

– Przede wszystkim optyczny zegar atomowy nie pracuje non stop przez długi czas, a jedynie okre-

sowo. Zegar sam nie generuje częstotliwości, tylko pozwala porównać częstotliwość zewnętrzną do częstotliwości przejść optycznych. Zegar optyczny nie generuje też wzorcowych sygnałów częstotliwości i czasu. Nie zapewnia więc ciągłości pracy. Może być wykorzystywany do korekty zegarów pracujących w sposób ciągły, które mogłyby wyznaczać ciągłą skalę czasu i w ten sposób być wzorcem częstotliwości. Rola zegarów optycznych jest taka sama jak fontann cezowych, które też same nie tworzą wzorca czasu i częstotliwości, natomiast pozwalają sterować innym zegarem i korygować jego wskazania do przejść w schłodzonych atomach cezu (w przypadku fontanny cezowej), czy do przejść optycznych w atomach strontu (w toruńskim zegarze optycznym).

Nie można zatem mówić, że tracimy monopol. Raczej zyskujemy możliwość krajowego „dowiązania się” do nowo rozwijanych wzorców optycznych. Jeżeli fontanna cezowa stanie w Głównym Urzędzie Miar, to zyskamy możliwość lepszego „dowiązania się” do definicji sekundy, bo będziemy brać udział nie tylko w porównaniach kluczowych. Chodzi tu zarówno o pracę zegarów, jak i sprawę transferu czasu. Porównanie zegarów za pomocą systemu GPS ma pewne ograniczenia, jeśli chodzi o pomiary w czasie rzeczywistym. Są to pomiary wykonywane na bieżąco, a ich dokładna analiza jest możliwa po kilku dniach.

Natomiast do porównań zegarów na wyższym poziomie wykorzystuje się światłowody. Techniki światłowodowe do pomiaru czasu są rozwijane również w Polsce. GUM współpracuje w tym zakresie z AGH. W tej chwili utrzymujemy łącznie światłowodowe o długości 420 km między GUM a CBK PAN w Borowcu i, przy transmisji sygnału mikrofalowego, jest to jedna z najlepszych na świecie metod transferu czasu. Możemy porównywać wzorce, które są fizycznie odległe o 270 km tak jakby stały obok siebie w tym samym laboratorium. Do porównań wzorców optycznych również używa się światłowodów. To pozwala wejść na wyższy poziom dokładności transferu czasu niż umożliwiają to systemy satelitarne. W ten sposób otrzymujemy informacje na bieżąco. Właściwie w chwili pomiaru wiemy, jaka jest różnica pomiędzy porównywanymi zegarami.

– O jakich projektach, w których uczestniczymy, moglibyśmy jeszcze powiedzieć?

– Na pewno ciekawym projektem realizowanym w ramach EURAMET-u jest monitorowanie charakterystyk systemów do zdalnego transferu czasu. W projekcie tym bierze udział część NMIs i DIs, a my jesteśmy jego koordynatorem. Wraz z AGH zbudowaliśmy też specjalizowany wzorzec do porównań przedziału czasu. Ma on być użyty w porównaniach EURAMET-u.

Staraliśmy się brać udział w różnego typu przedsięwzięciach, takich na przykład jak tworzenie sieci porównań krajowych. Wszystkie zegary atomowe w Polsce są porównywane w ramach tworzenia niezależnej polskiej atomowej skali czasu TA(PL). I to daje każdemu uczestnikowi tych porównań informację o bieżącej pracy zegara, a dla nas jest bardzo przydatne, żebyśmy ocenili, czy nie dzieje się coś nietypowego i by można było zareagować natychmiast, a nie po miesiącu, kiedy pojawią się dane.

Taka współpraca sięga także poza granice kraju. Współpracowaliśmy z Łotwą, która z przyczyn ekonomicznych zamknęła laboratorium czasu, aktualnie współpracujemy z Litwą. Ich zegary są porównywane z naszymi i wykorzystywane do wyliczania TA(PL).

– ***Czy powstanie zegara optycznego będzie się wiązało z redefinicją sekundy?***

– Tak, chociaż ta redefinicja będzie trwała jeszcze przez co najmniej kilkanaście lat, dlatego że najpierw muszą być ustalone relacje pomiędzy aktualną definicją sekundy a poszczególnymi częstotliwościami optycznymi, wzajemne relacje pomiędzy częstotliwościami optycznymi różnych wzorców, a także czy wzorce optyczne w różnych państwach zgadzają się ze sobą – w ramach przypisanej im niepewności. Dopiero, kiedy uda się uzyskać pełną zgodność pomiarów i będą dobrze wyznaczone proporcje między częstotliwościami różnych wzorców, będzie można przyjąć za nominalną jedną z częstotliwości przejścia optycznego wybranego atomu, a pozostałe przyjmie się z jakąś niepewnością.

Będzie to przejście do definicji o dużo mniejszej niepewności. Trzeba to jednak tak uzgodnić, żeby

zachować ciągłość wartości jednostki i mieć pewność w tym względzie. Młyny międzynarodowej administracji miar miały wolno, ale także dlatego, żeby przedwcześnie nie uznać czegoś, co nie będzie dobrym wzorcem.

Dzięki powstaniu zegara optycznego w Toruniu i budowie fontann cezowych w Polsce, nasz kraj będzie mógł się włączyć do prac nad nową definicją sekundy. Być może w ciągu dwóch lat pojawi się w GUM fontanna cezowa i będziemy mogli porównać jej częstotliwość z częstotliwością zegara optycznego oraz dodać swój wkład do weryfikacji wartości częstotliwości optycznej.

– ***Można powiedzieć, że próbując wyznaczyć możliwie najdokładniejszy czas, nieustannie się z nim ścigamy, tak jak biegacz próbujący pobić rekord świata.***

– To prawda, czas jest dynamiczny. Nigdy nie można uznać, że ufamy wystarczająco danemu zegarowi. Zegar, który nie jest porównywany, traci swoją wiarygodność. Można powiedzieć, że w ciągu dziesięciu lat podnosimy stabilność zegarów o jeden rząd wielkości. Przykładowo, moi starsi koledzy walczyli o dokładność w mikrosekundach, my walczymy już o nanosekundy, a nawet schodzimy poniżej tej wielkości. Są to stabilności na poziomie $1 \cdot 10^{-14}$ w przypadku komercyjnych zegarów cezowych, a w przypadku fontann cezowych – $1 \cdot 10^{-16}$, zegarów optycznych – $1 \cdot 10^{-18}$. Gdybyśmy zegar cezowy przesunęli o 100 m w górę, to zobaczymy, że jego wskazanie wyraźnie przyspieszyło. W przypadku fontanny cezowej – o 1 metr. Jeżeli dokładność jeszcze zwiększymy, to może się okazać, że ten sam zegar przesunięty o jeden-dwa centymetry zauważalnie zmieni swoje wskazanie. Zmianę prędkości upływu czasu widzimy dopiero dzięki pomiarom, bo na co dzień jej nie odczuwamy.

Dziękuję za rozmowę.