

Albin CZUBLA, Janusz KONOPKA

GŁÓWNY URZĄD MIAR, ZAKŁAD METROLOGII ELEKTRYCZNEJ, LABORATORIUM CZASU I CZĘSTOTLIWOŚCI

Atomowe skale czasu w porównaniach atomowych wzorców czasu i częstotliwości

Dr Albin CZUBLA

Kierownik Laboratorium Czasu i Częstotliwości Zakładu Metrologii Elektrycznej Głównego Urzędu Miar. Studia ukończył w 1994 r. na Uniwersytecie Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie, doktorat w 1999 r. Od 2002 r. pracuje w Głównym Urzędzie Miar i zajmuje się metrologią czasu i częstotliwości. Zainteresowania: prowadzenie i wyznaczanie atomowych skal czasu, analiza niestabilności sygnałów czasu i częstotliwości, precyzyjny transfer czasu, niepewność pomiaru. Ok. 10 publikacji.

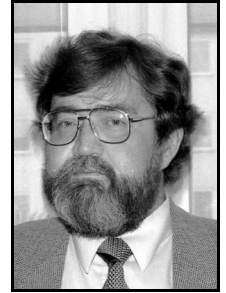
e-mail: timegum@gum.gov.pl



Mgr inż. Janusz KONOPKA

Główny metrolog w Laboratorium Czasu i Częstotliwości Zakładu Metrologii Elektrycznej Głównego Urzędu Miar. Ukończył studia na wydz. Elektroniki Politechniki Warszawskiej (1976). Od roku 1976 pracuje w Głównym Urzędzie Miar (wówczas PKNiM) początkowo jako konstruktor aparatury pomocniczej, a następnie – metrolog czasu i częstotliwości. Opiekun Państwowego Wzorca Jednostek Miar Czasu i Częstotliwości i autor jego dokumentacji.

e-mail: timegum@gum.gov.pl



Streszczenie

Do odtwarzania jednostek czasu i częstotliwości używane są obecnie atomowe wzorce częstotliwości. W referacie przedstawiono sposoby zwiększenia ich dokładności poprzez udział w tworzeniu międzynarodowych atomowych skal czasu TAI i UTC oraz krajowych niezależnych atomowych skal czasu. Omówiono dokładniej niezależną Polską Atomową Skalę Czasu TA(PL), jej organizację i sposób realizacji współpracy, dotychczasowe osiągnięcia i plany na przyszłość. Poruszono też problematykę związaną z określaniem parametrów metrologicznych atomowych wzorców częstotliwości.

Słowa kluczowe: metrologia czasu i częstotliwości, zegary atomowe, atomowe skale czasu

Atomic timescales in comparisons of atomic time and frequency standards

Abstract

At present, atomic time and frequency standards are used for realization of time and frequency units. In this work, methods of increasing accuracy of these units by participation in the international atomic timescales TAI and UTC and independent local atomic timescales are presented. The independent Polish Atomic Timescale TA(PL) is described more exactly. The problems related to metrological parameters of atomic time and frequency standards are briefly treated too.

Keywords: time and frequency metrology, atomic clocks, atomic timescales

1. Wstęp

Czas jest jedną z najważniejszych i jednocześnie, razem z częstotliwością, najdokładniej wyznaczaną wielkością fizyczną we współczesnej metrologii (z niepewnością względną rzędu 10^{-14} , mniejszą o kilka rzędów wielkości od osiąganą dla innych jednostek). Obie te wielkości są obecnie podstawą do określenia lub realizacji wielu innych jednostek wielkości fizycznych (np. metra, kandel, wolta). Jednocześnie pomiary czasu i częstotliwości, m.in. ze względu na konieczność zachowania bezwzględnej ciągłości wyznaczania skal czasu i zależność upływu czasu od wyboru układu odniesienia i od grawitacji (szczególna i ogólna teoria względności), wymagają dokładnej analizy i charakteryzują się dużym stopniem złożoności.

Obecnie definicja sekundy jest oparta na zjawiskach zachodzących w atomie cezu i ma następujące brzmienie:

Sekunda jest to czas równy 9 192 631 770 okresom promieniowania odpowiadającego przejściu między dwoma nadsubtelnymi poziomami stanu podstawowego atomu ^{133}Cs (cezu 133), w temperaturze 0 K.

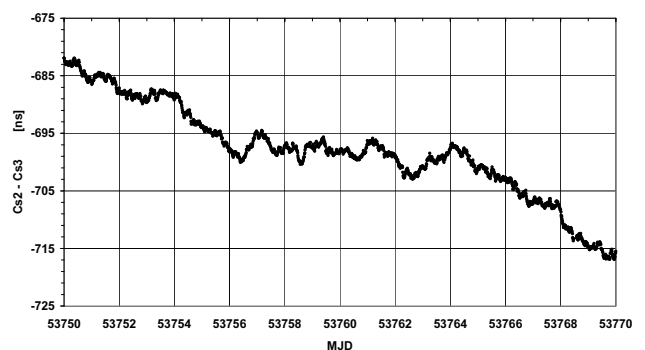
Definicja ta obowiązuje od października 1967 roku (początkowo bez warunku dotyczącego temperatury, który dodano w roku 1997). Zastąpiła ona definicję opartą na zjawiskach astronomicznych związanych z ruchem Ziemi. Opisano to dokładniej w [1].

Do odtwarzania jednostek czasu i częstotliwości są obecnie powszechnie używane atomowe wzorce częstotliwości z wiązką cezową oraz masery wodorowe. Atomowe wzorce częstotliwości wyposażone w odpowiednie urządzenia do zliczania impulsów i w wyświetlacz pokazujący wyniki tego zliczania (cyferblat) są nazywane zegarami atomowymi. W tym artykule nazwy wzorców atomowych i zegar atomowy będą uważane za równoważne.

2. Metody zwiększania dokładności atomowych wzorców czasu i częstotliwości

Wynalezienie i upowszechnienie stosowania zegarów atomowych w dziedzinie czasu i częstotliwości umożliwiło olbrzymi skok jakościowy w dokładności pomiarów. Dokładność ta jest jednak ograniczona. Występują ponadto trudności związane ze znalezieniem odpowiednio dokładnych źródeł sygnału odniesienia, z którym można te wzorce porównywać. Jedyną możliwością jest w zasadzie, porównywanie ich między sobą.

Na rys. 1 przedstawiono przykładowe wyniki porównań między sobą dwóch wzorców cezowych znajdujących się w Głównym Urzędzie Miar (GUM). Na osi poziomej przedstawiony jest okres 20 dni, a na osi pionowej różnice faz między impulsowymi sygnałami sekundowymi (1 Hz) generowanymi przez te wzorce.



Rys. 1. Wyniki porównań dwóch wzorców cezowych GUM między sobą
Fig. 1. Results of comparisons two Cesium beam frequency standards of GUM

Pojedynczy zegar cezowy 5071A(Hp), czyli o podwyższonej dokładności, odtwarza jednostki czasu i częstotliwości z maksymalnym błędem względnym nie większym niż $\pm 1 \cdot 10^{-12}$ w pełnym zakresie warunków pracy, natomiast jego niestabilność jest nie większa niż $2 \cdot 10^{-14}$ dla czasu uśredniania 5 dni i większych [3]. Oznacza to, że wzorec taki generuje sygnał o dużej stabilności,

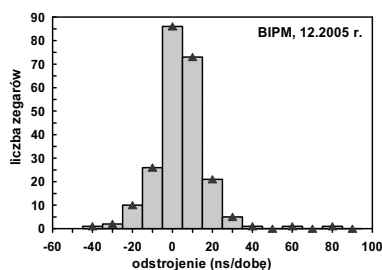
który może być jednak stosunkowo znacznie odstrojony od częstotliwości nominalnej.

W celu zwiększenia dokładności odtwarzania jednostek miar czasu i częstotliwości przez zegary atomowe, porównuje się w sposób ciągły między sobą, w ramach tworzenia międzynarodowych skal czasu TAI i UTC [1, 5] oraz niezależnych krajowych atomowych skal czasu.

3. Międzynarodowe skale czasu TAI i UTC

Obecnie ponad dwieście wzorców atomowych z kilkudziesięciu laboratoriów na całym świecie jest porównywanych między sobą na odległość z wykorzystaniem satelitów systemów nawigacji satelitarnej i satelitów geostacjonarnych. Wyniki tych porównań są przysyłane do Międzynarodowego Biura Miar we Francji (BIPM) i stanowią podstawę do wyliczania międzynarodowych atomowych skal czasu TAI i UTC. Wyniki tych obliczeń, po opublikowaniu w comiesięcznych okólnikach BIPM, są wykorzystywane przez poszczególne laboratoria przy prowadzeniu lokalnych skal czasu (lokalnych realizacji UTC) oraz przy wyznaczaniu parametrów metrologicznych posiadanych przez te laboratoria wzorców atomowych (m.in. odstrojenia częstotliwości i odchylenia Allana, które jest miarą niestabilności wzorca) [1, 2].

Na rys. 2 przedstawiono histogram ilości zegarów atomowych w funkcji odstrojenia ich częstotliwości od średniej, dla wzorców biorących udział w tworzeniu skal czasu UTC i TAI (wg danych BIPM [5]).

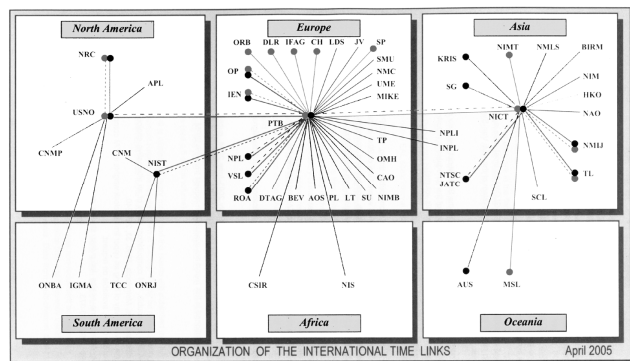


Rys. 2. Histogram ilości zegarów atomowych w funkcji odstrojenia ich częstotliwości od średniej dla wzorców biorących udział w tworzeniu TAI i UTC (wg danych BIPM, [5])

Fig. 2. Frequency offset histogram for Caesium beam standards for TAI and UTC (data of BIPM, [5])

Z rys. 2 wynika, że liczba zegarów atomowych, w funkcji odstrojenia ich od średniej, tworzy krzywą zbliżoną do krzywej Gaussa, z maksimum dla częstotliwości średniej. Średnia wyliczana przez BIPM w ramach tworzenia TAI i UTC jest średnią ważoną, uwzględniającą odstrojenia poszczególnych zegarów od TAI za poprzedni okres. Wagi poszczególnych zegarów są zależne od ich zachowania w poprzednim okresie.

Na rys. 3 przedstawiono schemat sieci porównań koordynowanej przez BIPM. Jest to rozbudowana ogólnosiwiatowa sieć porównań, której dokładniejszy opis można znaleźć w [5].



Rys. 3. Sieć porównań wzorców atomowych w ramach tworzenia TAI i UTC
Fig. 3. The net of time links used for realization timescales TAI and UTC

Wyliczane przez Sekcję Czasu BIPM Skale czasu TAI i UTC stanowią skalę odniesienia dla wzorców atomowych. Skala UTC jest tworzona z TAI poprzez dostosowanie tej ostatniej do ruchów Ziemi. Obecnie, od dnia 1 stycznia 2006 roku, różnica TAI - UTC jest równa 33 sekundy.

4. Niezależne atomowe skale czasu

Międzynarodowe skale czasu są wyznaczane przez BIPM z pewnym, wynikającym z przyczyn technicznych, opóźnieniem (ok. dwóch tygodni od ostatnich danych zawartych w comiesięcznym biuletynie CircularT, wydawanym przez BIPM). Ponadto podstawowy czas uśredniania jest równy 5 dni.

Tych ograniczeń nie mają niezależne atomowe skale czasu, które są realizowane w kilku krajach świata. Są one tworzone na podstawie ciągłych porównań od kilku do kilkunastu wzorców atomowych.

4.1. Niezależna Polska Atomowa Skala Czasu TA(PL)

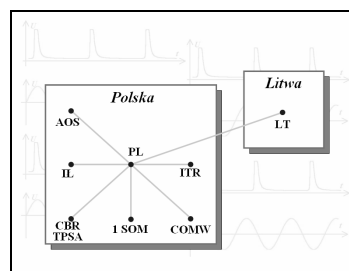
Niezależna Polska Atomowa Skala Czasu TA(PL) jest wyznaczana nieprzerwanie od 2001 roku jako średnia ważona ze wskazań polskich zegarów atomowych i gościnnie zegara Litwy (obecnie z ok. 10 zegarów). W realizacji TA(PL) biorą udział wzorce atomowe z następujących instytucji:

- AOS – Obserwatorium Astrogeodynamiczne, Borowiec,
- CBR TPSA – Centrum Badawczo-Rozwojowe TPSA, Warszawa,
- COMW – Centralny Ośrodek Metrologii Wojskowej, Zielonka,
- GUM – Główny Urząd Miar, Warszawa,
- IŁ – Instytut Łączności, Warszawa,
- ITR – Instytut Tele i Radiotechniczny, Warszawa,
- SOM – 1 Specjalistyczny Ośrodek Metrologii Sił Powietrznych, Warszawa.

Dodatkowo w tworzeniu TA(PL) uczestniczy gościnnie:

- LT – Instytut Fizyki Półprzewodników, Wilno, Litwa.

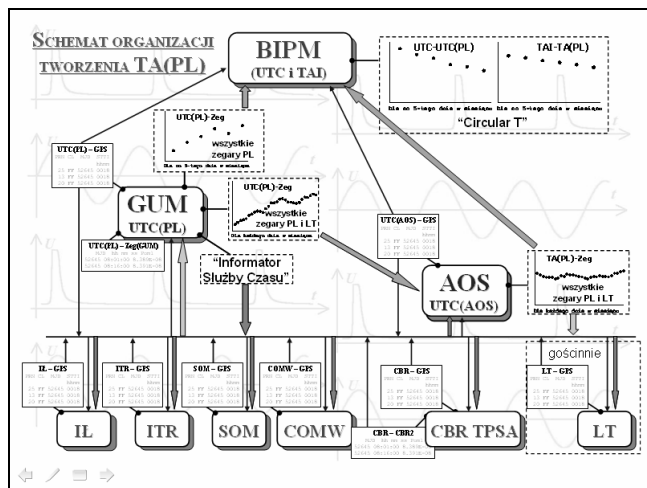
Na rys. 4 przedstawiono sieć porównań krajowych wzorców atomowych uczestniczących w tworzeniu TA(PL).



Rys. 4. Krajowa sieć porównań wzorców atomowych w ramach tworzenia TA(PL)
Fig. 4. The national system of time links for realization TA(PL)

Natomiast na rys. 5 przedstawiono schemat współpracy i wymiany informacji podczas tworzenia TA(PL).

Podstawą do obliczeń są dane z porównań GPS-CV przysyłane przez wszystkich uczestników na początku każdego tygodnia. W Głównym Urzędzie Miar, na podstawie tych danych, są wyliczane różnice (UTC(PL) – Zegar x) dla wszystkich uczestniczących wzorców. Wyniki tych obliczeń są następnie przysyłane do Obserwatorium Astrogeodynamicznego Centrum Badań Kosmicznych PAN, w Borowcu (AOS) gdzie, na ich podstawie, jest wyznaczana skala czasu TA(PL). Wyniki obliczeń AOS przesyła do wszystkich uczestników oraz do BIPM. GUM publikuje różnice (TA(PL) – Zegar x) wyznaczone przez AOS dla wszystkich zegarów TA(PL), w comiesięcznym Informatorze Służby Czasu. Różnice (TAI – TA(PL)) publikuje BIPM w comiesięcznym okólniku „CircularT”.



Rys. 5. Schemat współpracy przy realizacji niezależnej Polskiej Atomowej Skali Czasu TA(PL)

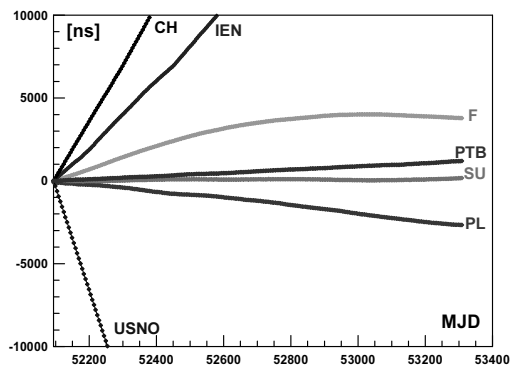
Fig. 5. Block diagram of cooperation in realisation of independent Polish Atomic Timescale TA(PL)

Niezależna Polska Atomowa Skala Czasu TA(PL) istnieje oficjalnie od czerwca 2001 roku (pierwsze oficjalne dane opublikowane w okólniku „CircularT” noszą datę 4 lipca 2001 roku). Powstała ona w dużej mierze dzięki wysiłkom doktora Jerzego Nawrockiego z AOS CBK PAN, który jest twórcą algorytmu jej liczenia, jak również przy współpracy doktora W. Lewandowskiego z BIPM. W dniu 3 grudnia 2004 roku zostało podpisane Porozumienie o wzajemnej współpracy w zakresie tworzenia niezależnej Polskiej Atomowej Skali Czasu TA(PL), ostatecznie formalizując współpracę przy jej tworzeniu i gwarantując ciągłość wyznaczania TA(PL).

Obecnie w tworzeniu TA(PL) uczestniczy około 10 wzorców atomowych, w tym trzy wzorce cezowe i jeden aktywny maser wodorowy z GUM. Udział w tworzeniu TA(PL) pozwala na szybszą wymianę danych, doświadczeń i wyników pomiarów, a co za tym idzie – lepszą kontrolę pracy posiadanych wzorców atomowych. Nie bez znaczenia jest również integracja środowiska metrologii czasu i częstotliwości, jak również zauważalny na arenie międzynarodowej fakt realizacji z powodzeniem takiego przedsięwzięcia.

4.2. Porównanie TA(PL) z innymi niezależnymi atomowymi skalami czasu

Obecnie publikowane są przez BIPM (CircularT nr 216) różnice (TAI – TA(k)) dla 14 lokalnych niezależnych atomowych skal czasu. Wykres tych różnic w funkcji czasu dla niektórych z nich przedstawiono na rys. 6.

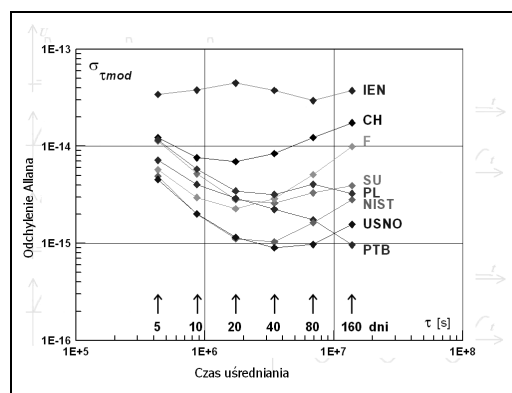


Rys. 6. Zależność różnic (TAI – TA(k)) od czasu dla kilku niezależnych atomowych skal czasu.

Fig. 6. Differences (TAI – TA(k)) vs. time for several independent atomic timescales

Na rys. 6 CH jest skalą szwajcarską, IEN – włoską, F – francuską, PTB – niemiecką, SU – rosyjską, USNO – amerykańską (USA), a PL to polska skala TA(PL). Na rysunku przedstawiono poszczególne krzywe przesunięte tak, aby miały wspólny początek. W rzeczywistości poszczególne skale mają wartości różnic znacznie większe, lecz zredukowano je w celu pokazania wszystkich zachowań na jednym wykresie. Zachowano natomiast rzeczywistą szybkość zmian każdej ze skal w funkcji czasu. Wyraźnie widoczne jest tu, że dokładność niezależnej atomowej skali czasu nie ma znaczenia, natomiast najważniejszym celem jej wyznaczania jest uzyskanie jak najmniejszej jej niestabilności.

Na rys. 7 przedstawiono wykresy odchylenia Allana [2] w funkcji czasu uśredniania, dla skal czasu z rys. 6. Niestabilność częstotliwości danego wzorca, a w tym przypadku niestabilność danej skali czasu, jest tym mniejsza, im mniejsza jest wartość odchylenia Allana. Skala czasu TA(PL) osiąga pod tym względem bardzo dobre wyniki. Należy przy tym wziąć pod uwagę, że jest ona realizowana przez zegary rozproszone terytorialnie, podobnie jak skala francuska TA(F), podczas gdy pozostałe skale czasu uwzględnione na rys. 7 są oparte na zegarach posiadanych przez jedno laboratorium i zgromadzonych w jednym miejscu.



Rys. 7. Porównanie niestabilności kilku atomowych skal czasu

Fig. 7. Comparison of the frequency stabilities of several atomic timescales

5. Podsumowanie

Utworzenie i prowadzenie niezależnej Polskiej Atomowej Skali Czasu TA(PL) jest dużym osiągnięciem zarówno organizacyjnym jak i merytorycznym. W najbliższym czasie planowane jest wyliczanie TA(PL) w cyklu tygodniowym, a także dalsza automatyzacja pomiarów i obróbki wyników. Ciągłe doskonalony jest również algorytm wyznaczania TA(PL). Prowadzone są też prace nad doskonaleniem zdalnych metod porównań atomowych wzorców częstotliwości. Prowadzone są na przykład próby wykorzystania do tego celu łączy światłowodowych.

6. Literatura

- [1] Czubla A., Gadomski P., Konopka J.: „Realizacja jednostek miar czasu i częstotliwości na stanowisku państwowego wzorca”, artykuł w „Podstawowe problemy metrologii”, Prace Komisji Metrologii Oddziału PAN w Katowicach, Seria Konferencje Nr 8, Ustroń, 8-11 maj 2005.
- [2] Kartashoff P.: „Częstotliwość i czas”, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1985.
- [3] „HP 5071A Primary Frequency Standard – Operating and Programming Manual”, Hewlett-Packard Company, 1994.
- [4] „Cesium Beam Frequency Standard 5061A – Operating and Service Manual”, Hewlett-Packard Company 1973.
- [5] Strona Sekcji Czasu BIPM: www.bipm.org/en/scientific/tai/.
- [6] Azoubib J., Nawrocki J., Lewandowski W.: „Independent atomic timescale in Poland – organization and results”, Metrologia 40 (2003).
- [7] Audoin C., Guinot B.: „The Measurement of Time – Time, Frequency and the Atomic Clock”, Cambridge University Press 2001.