

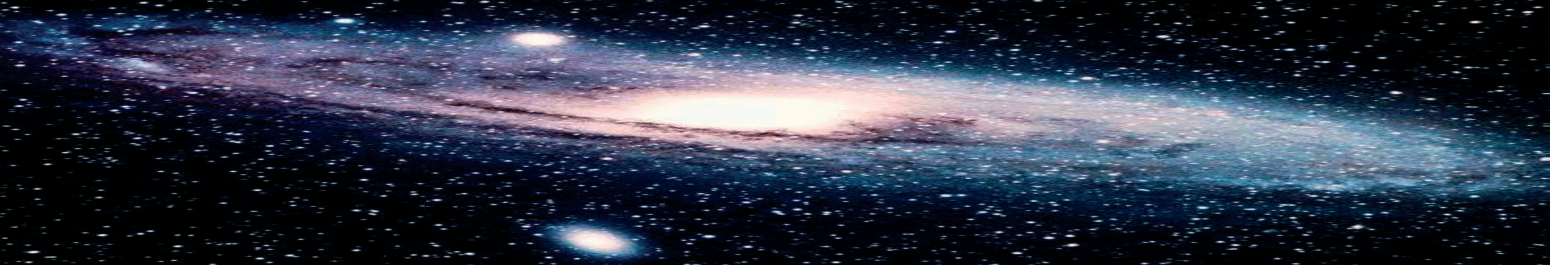


Czas na Ziemi i w kosmosie

Od niepamiętnych czasów pomiar czasu wiązał się z obserwacjami zjawisk astronomicznych. Początkowo opierano się na zwykłej rachubie dni, miesięcy i cyklicznie zmieniających się porach roku. Zegary, a właściwie różnego typu urządzenia do odmierzenia czasu, służyły jedynie do odtwarzania w przybliżeniu równych jego przedziałów. Sytuacja radykalnie zmieniła się wraz z zastosowaniem zegara Harrisona (XVIII w.) w nawigacji morskiej do określania kątovej odległości od portu, będącego punktem odniesienia w kierunku wschód-zachód, czyli do wyznaczania długości geograficzej. Dokładny, jak na owe czasy, zegar Harrisona służył do przeniesienia lokalnego czasu słonecznego w porcie macierzystym (punkcie odniesienia) na dowolne miejsce na morzu, w celu porównania go z lokalnym czasem słonecznym, dzięki czemu można było wyznaczyć pozycję statku na morzu. Rozwój cywilizacji, a zwłaszcza kolei i telegrafu, spowodował, że w 1884 r. na Międzynarodowej Konferencji Południka Zerowego w Waszyngtonie przyjęto podział kuli ziemskiej na 1-godzinne strefy czasowe, z południkiem zerowym przechodzącym przez obserwatorium w Greenwich, przez co głównym odniesieniem dla pomiarów czasu stał się czas słoneczny, uzyskiwany z obserwacji astronomicznych, przeliczony na południk zerowy.

Pojawienie się zegarów atomowych (w połowie XX w.) udowodniło, że wzajemny ruch Ziemi, Słońca i Księżyca jest na tyle nieregularny, że nie może być podstawą do definiowania jednostki czasu. Od 1967 r. sekundę SI definiuje się jako czas trwania 9 192 631 770 okresów promieniowania odpowiadającego przejściu pomiędzy dwoma nadsubtelnymi poziomami atomu cezu 133 w stanie podstawowym. W 1997 roku definicję tę uzupełniono o zapis, że odnosi się ona do atomów cezu w stanie podstawowym, nie zaburzonym przez zewnętrzne pola w temperaturze 0 K.

Z wprowadzeniem atomowej definicji sekundy wynikła konieczność prowadzenia ciągłych, wyznaczanych nieprzerwanie, międzynarodowych atomowych skal czasu. Biorąc pod uwagę nieustanny wzrost dokładności i stabilności zegarów atomowych, prowadzenie ciągłych międzynarodowych i lokalnych porównań w tym zakresie jest procesem bardzo złożonym i wieloetapowym. Stanowi on podstawę zachowania spójności pomiarowej w dziedzinie czasu i częstotliwości począwszy od wzorców najwyższego rzędu, czyli laboratoryjnych cezowych atomowych wzorców czasu i częstotliwości, a skończywszy na najprostszych przyrządach użytkowych, takich jak stopery elektroniczne czy zegary kwarcowe. Działanie to umożliwia również wykorzystanie zegarów atomowych umieszczanych na orbitach okołoziemskich do bardzo precyzyjnej nawigacji lądowej, morskiej i lotniczej oraz do prowadzenia dokładnych pomiarów geodezyj-



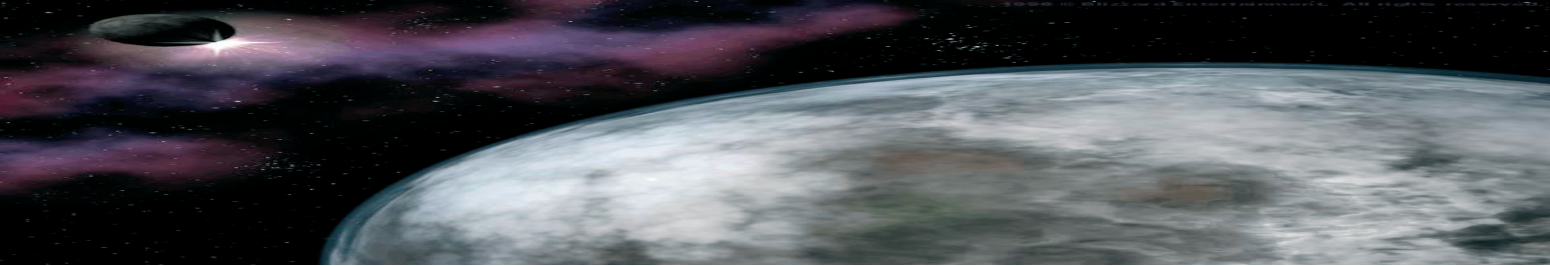
nych. Skutki tych działań są wyraźnie widoczne nie tylko przy prowadzeniu wszelkiego typu pomiarów z dziedziny czasu i częstotliwości, ale także w prawie każdym innym obszarze nauki, techniki i życia codziennego współczesnego człowieka.

Czas na Ziemi

Czas na Ziemi wyznaczany jest w układzie odniesienia związanym z obracającą się geoidą ziemską jako **Międzynarodowa Atomowa Skala Czasu TAI** (*Time Atomic International*). TAI jest średnią ważoną wyznaczaną przez Sekcję Czasu Międzynarodowego Biura Miar (BIPM – *Bureau International des Poids et Mesures*) ze wskazań obecnie ponad 250 zegarów atomowych, w tym w większości wzorców cezowych, utrzymywanych w prawie sześćdziesięciu laboratoriach czasu i częstotliwości na całym świecie. Zegary uzyskują wagę na podstawie analizy ich stabilności i wiarygodności w okresie ostatnich 6-ciu miesięcy, przy czym przed wyliczaniem wartości średniej ważonej zredukowane jest bieżące odstrojenie częstotliwości i różnica fazy zegara. W ten sposób ogranicza się efekty związane ze specyfiką warunków wewnętrznych i zewnętrznych pracy danego czasomierza, ponieważ nie ma dwu identycznych pracujących synchronicznie zegarów. Średnią ważoną dodatkowo precyzyjnie steruje się w odniesieniu do zegarów cezowych pracujących z wiązką atomów cezu schłodzonych do temperatury kilku μK . Średnia wyliczana jest z opóźnieniem do 45 dni ze względu na miesięczne okresy obliczeniowe oraz na konieczność gromadzenia kompletu danych pomiarowych i złożoność międzynarodowej sieci porównań skal czasu. W tworzeniu skali czasu TAI bierze udział obecnie około 10 zegarów atomowych z Polski.

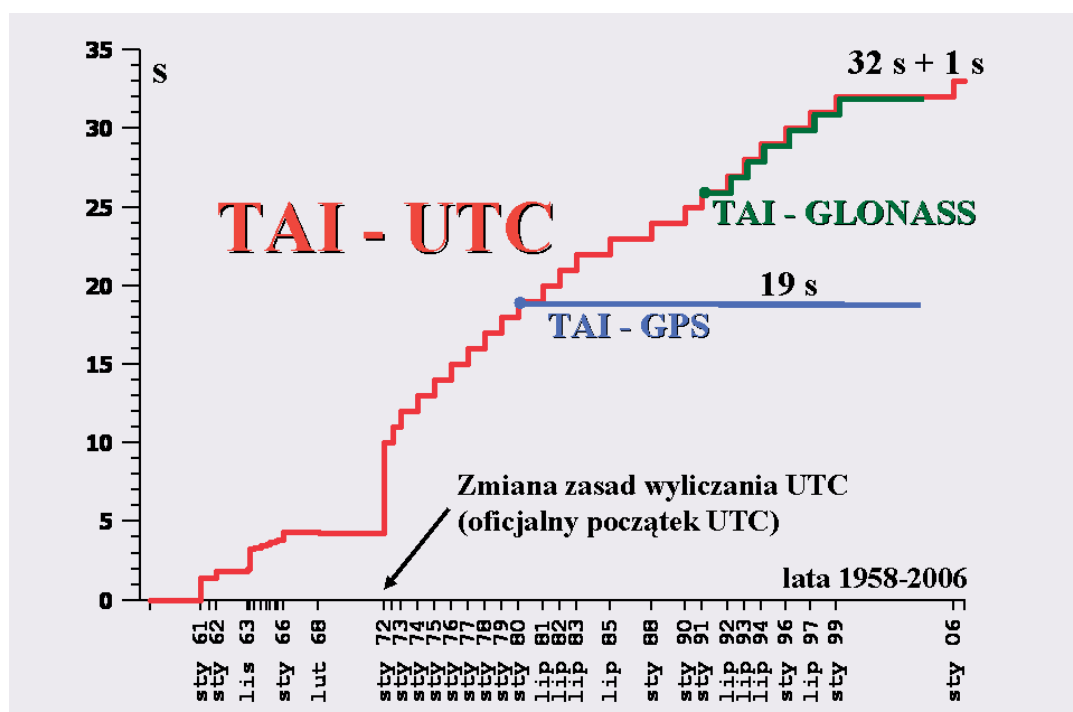
Międzynarodowa atomowa skala czasu TAI nie jest jednak główną skalą czasu odniesienia dla wyznaczania lokalnego czasu urzędowego. Rolę tę pełni międzynarodowa atomowa skala **Czasu Uniwersalnego Koordynowanego UTC** (*Universal Time Coordinated*), różniąc się od TAI o całkowitą liczbę sekund (obecnie 33 s), w celu skoordynowania jej ze średnim czasem słonecznym uzyskiwanym z obserwacji astronomicznych i wyznaczonym dla południka zerowego. Korekty UTC dokonuje się, jeśli różnica między czasem uzyskanym z obserwacji astronomicznych a UTC przekracza 0,9 s. Zmianę wprowadza się na koniec roku kalendarzowego lub na ostatni dzień czerwca (rys. 1). Ostatnio taka dodatkowa sekunda, tzw. sekunda przestępna (*leap second*), została wprowadzona 31 grudnia 2005 r. o godz. 24:00 UTC (w Polsce było to o godz. 1:00 w dniu 1 stycznia 2006 r.).

Skale czasu TAI i UTC są skalami wyliczeniowymi. Laboratoria czasu i częstotliwości głównych krajowych instytutów metrologicznych utrzymują własne fizyczne realizacje skali czasu UTC, tzw. UTC(k), które są utrzymywane jak najbliżej UTC i stanowią główne źródło odniesienia przy wyznaczaniu czasu urzędowego i zachowaniu



spójności pomiarowej w dziedzinie czasu i częstotliwości. W Polsce rolę tę pełni skala czasu UTC(PL), wyznaczana i utrzymywana w Laboratorium Czasu i Częstotliwości Zakładu Metrologii Elektrycznej Głównego Urzędu Miar.

Dodatkowo, na potrzeby dokładniejszego wyznaczania lokalnych realizacji skali czasu UTC oraz analizy stabilności częstotliwości posiadanych wzorców atomowych, niektóre laboratoria wyliczają własne niezależne atomowe skale czasu TA(k) w taki sposób, aby otrzymać jak najstabilniejszą skalę czasu. Nie są one korygowane w stosunku do innych skal czasu. Polska jest jednym z około 10 krajów, które prowadzą własną niezależną skalę czasu TA(PL).



Rys. 1. Historia wprowadzania sekund przestępnych.

Czas w kosmosie

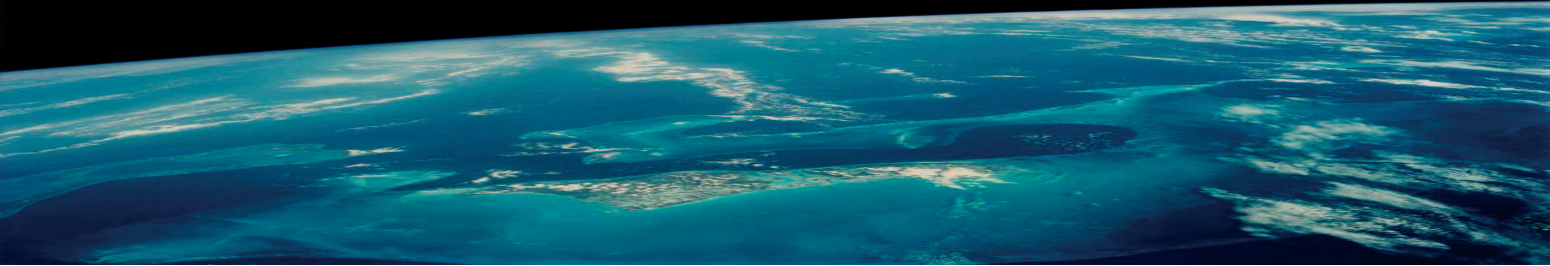
Głównym potwierdzeniem zasadności utrzymywania wysokiej dokładności i stabilności międzynarodowych atomowych skal czasu i ciągłego podnoszenia dokładności i stabilności zegarów atomowych, poza ogromnym wpływem tych prac na rozwój techniki i teleinformatyzacji, są globalne systemy nawigacji satelitarnej (GNSS – *Global Navigation Satellite Systems*). Niepewność i błąd odtwarzania skali czasu bezpośrednio przenoszą się na niepewność i błąd położenia, biorąc pod uwagę, że sygnały wysyłane

przez satelity systemów GNSS rozchodzą się z prędkością światła. Obecnie funkcjonujące systemy GNSS to: *GPS (Global Positioning System)* – utrzymywany i kontrolowany przez Stany Zjednoczone, oraz *GLONASS (Globalnaja Navigacjonnaja Satelitarnaja Sistema)* – utrzymywany i kontrolowany przez Rosję. Obydwa systemy, *GPS* i *GLONASS*, powstały jako systemy wojskowe, ale obecnie w pewnym zakresie są udostępnione dla zastosowań cywilnych. Typowo cywilnym systemem ma być budowany obecnie *Europejski System Nawigacji Satelitarnej GALILEO*, który projektowany jest w celu bardzo szerokiego wykorzystania nie tylko precyzyjnej informacji o czasie i wynikającej z tego precyzyjnej informacji o położeniu, ale i globalnego dostępu do sygnałów satelitarnych. Sygnały te dodatkowo mogą być nośnikiem bardzo szerokiego spektrum jawnych i zaszyfrowanych informacji dotyczących bezpieczeństwa, spraw publicznych, czy sektora prywatnego. Mogą również stanowić globalną sieć telekomunikacyjną i teleinformatyczną, przekazywać informację zwrotną w przypadku zagrożenia i koordynować działania wielu służb, praktycznie niezależnie od rozmiaru obszaru ich działania.

Na każdym satelicie systemu nawigacji satelitarnej umieszczone są, specjalnie przystosowane do pracy w przestrzeni kosmicznej, co najmniej po 2 lub 3 zegary atomowe (zwykle jest to zegar cezowy i pomocnicze wzorce rubidowe i/lub masery wodorowe). Satelity danego systemu rozmieszczone są równomiernie na co najmniej trzech, nachylonych względem siebie i równika, orbitach o ustalonym okresie obiegu dookoła Ziemi w pobliżu połowy doby. W przypadku pełnej konstelacji danego systemu, rozmieszczenie satelitów powinno zapewnić widoczność przynajmniej 4 satelitów z każdego punktu powierzchni Ziemi w dowolnym momencie. Dla systemu *GPS* pełna konstelacja wynosi 24 satelity, a dla systemu *GALILEO* – 30 satelitów. Segment kosmiczny kontrolowany jest przez segment naziemny, poprzez który prowadzone są w sposób ciągły porównania sygnałów emitowanych przez poszczególne satelity. Monitorowane są parametry pracy urządzeń i zegarów tam zainstalowanych oraz, w razie potrzeby, wprowadzane są zdalnie korekty.

Każdy satelita systemu *GNSS* wysyła w sposób ciągły informację o swym położeniu, o pełnej dacie, godzinie, minucie i sekundzie oraz znacznik czasu odpowiadający tej informacji o czasie. Dodatkowy kod *PRN (Pseudo Random Noise)* różnicuje sygnały wysyłane przez poszczególne satelity. Odbierając sygnał z satelity, rejestrowany jest moment odbioru sygnału i w ten sposób można wyznaczyć czas propagacji sygnału z danego satelity do odbiornika. Mając takie informacje z 4 satelitów, można już wyliczyć współrzędne (x, y, z, t) pozycji odbiornika. Im pomiar trwa dłużej, tym wynik jest dokładniejszy. Pomiar geodezyjne trwające po kilka lub kilkanaście dni pozwalają wyznaczyć położenie punktu z dokładnością do 1 mm, gdy pomiary w czasie rzeczywistym dają obecnie dokładność od kilku do kilkunastu metrów.

W metrologii czasu i częstotliwości system *GPS* jest dodatkowo używany do precyzyjnego transferu czasu, gdzie sytuację się odwraca i na podstawie dokładnie wyznaczonej pozycji anteny wyznacza się różnicę czasu między lokalnym zegarem a czasem na danym satelicie. Poprzez synchronizację harmonogramu obserwacji satelitów *GPS*



eliminuje się mniej dokładny czas na satelitach. Metoda ta pozwala uzyskać niepewność standardową w porównaniach międzynarodowych na poziomie kilku ns.

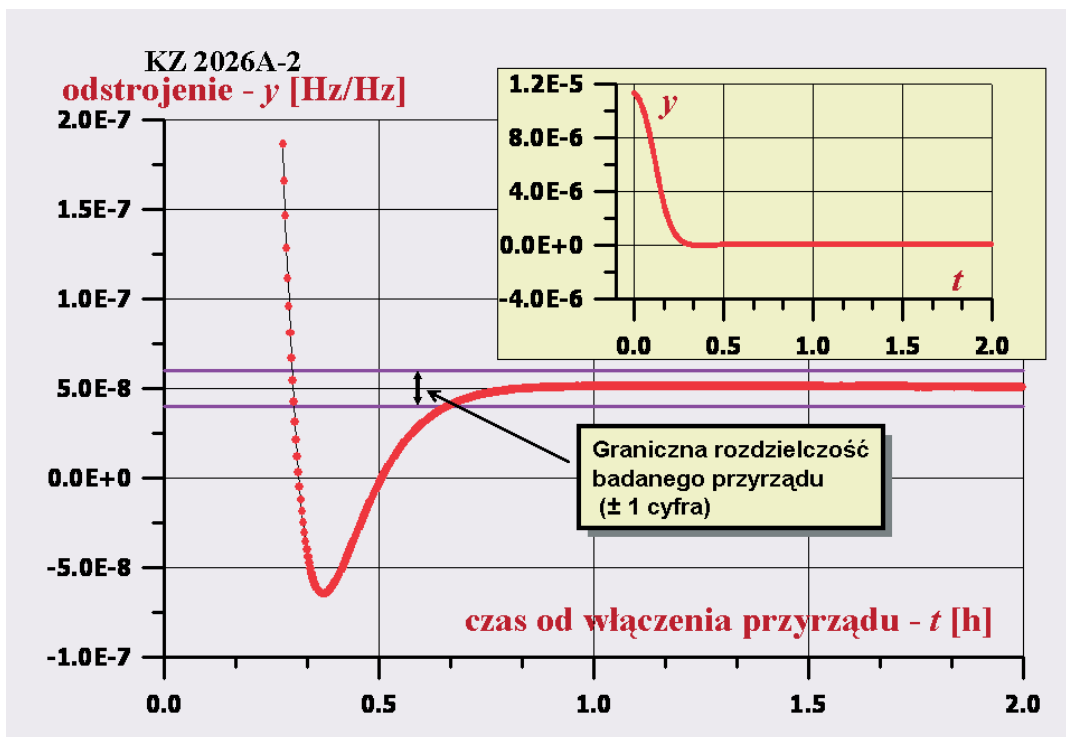
Czas w praktyce inżynierskiej

W praktyce inżynierskiej jako podstawowe źródło sygnałów czasu i częstotliwości używa się zwykle oscylatorów kwarcowych. Przy doborze odpowiedniego generatora kwarcowego czy przy ocenie jakości generatora będącego podstawą czasu przyrządu pomiarowego, najważniejszym parametrem jest dokładność i niestabilność generowanej częstotliwości. Przykładowe parametry typowych generatorów używanych jako podstawa czasu w przyrządach pomiarowych przedstawione są w tabeli.

Tabela. Niestabilność częstotliwości względem wartości nominalnej dla wybranych typów generatorów (UCXO – standardowy generator kwarcowy, TCXO – kompensowany temperaturowo generator kwarcowy, OCXO – termostatowany generator kwarcowy, Rb – generator rubidowy)

Typ generatora	UCXO	TCXO	OCXO	Rb
Starzenie się: na miesiąc na rok	$<5 \cdot 10^{-7}$ $<5 \cdot 10^{-6}$	$<1 \cdot 10^{-7}$ $<1 \cdot 10^{-6}$	$<1 \cdot 10^{-8}$ $<8 \cdot 10^{-8}$	$<2 \cdot 10^{-11}$ $<2 \cdot 10^{-10}$
Wpływ temperatury: (20 ÷ 26) °C (0 ÷ 50) °C	$<3 \cdot 10^{-6}$ $<1 \cdot 10^{-5}$	$<7 \cdot 10^{-7}$ $<1 \cdot 10^{-6}$	$<6 \cdot 10^{-10}$ $<5 \cdot 10^{-9}$	$<2 \cdot 10^{-11}$ $<3 \cdot 10^{-10}$
Wahania napięcia zasilania: ± 10%	$<1 \cdot 10^{-8}$	$<1 \cdot 10^{-8}$	$<5 \cdot 10^{-10}$	$<1 \cdot 10^{-11}$
Razem (dla (20 ÷ 26) °C): 1 rok po wzorcowaniu 2 lata po wzorcowaniu	$<7 \cdot 10^{-6}$ $<1,2 \cdot 10^{-5}$	$<1,5 \cdot 10^{-6}$ $<2,5 \cdot 10^{-6}$	$<1 \cdot 10^{-7}$ $<2 \cdot 10^{-7}$	$<2,5 \cdot 10^{-10}$ $<5 \cdot 10^{-10}$
Razem (dla (0 ÷ 50) °C): 1 rok po wzorcowaniu 2 lata po wzorcowaniu	$<1,2 \cdot 10^{-5}$ $<1,5 \cdot 10^{-5}$	$<1,5 \cdot 10^{-6}$ $<2,5 \cdot 10^{-6}$	$<1 \cdot 10^{-7}$ $<2 \cdot 10^{-7}$	$<2,5 \cdot 10^{-10}$ $<5 \cdot 10^{-10}$

Świadomość dynamiki i niestacjonarności procesu generacji drgań, pozwala uniknąć wielu błędów i zaoszczędzić czas. Ten sam pomiar wykonany godzinę później czy po ponownym włączeniu przyrządu może zdecydowanie różnić się wartością, choć zazwyczaj powinien mieścić się w zakresie niestabilności użytego generatora. Niezwykle istotne jest zatem przestrzeganie okresów wstępnego wygrzewania przyrządów pomiarowych. W początkowym okresie pracy wartość generowanej częstotliwości może zmieniać się nawet w zakresie kilku rzędów wielkości (rys. 2).



Rys. 2. Przykładowy wpływ czasu wstępnego wygrzewania przyrządu na względne odstrojenie częstotliwości generatora podstawy czasu (dla KZ2026A-2).

Podsumowanie

W dzisiejszym świecie czas w technice, w układach elektronicznych, w systemach teleinformatycznych nabiera nowego znaczenia. Kluczowe zaczynają być niezwykle małe części sekundy, skutkiem tego cały wysiłek współczesnej metrologii czasu i częstotliwości nakierowany jest na utrzymywanie i ciągle doskonalenie i tak już bardzo dokładnie odmierzanego czasu. Z drugiej strony ogromna powszechność i dostępność precyzyjnych źródeł częstotliwości pozwala na implementowanie ich do szeregu przyrządów i urządzeń. W tym aspekcie świadomość prawdziwej natury zjawisk okresowych, ich niestacjonarności i ciągłej dynamiki jest bardzo ważna.

Dr Albin Czubla

Kierownik Laboratorium Czasu i Częstotliwości