

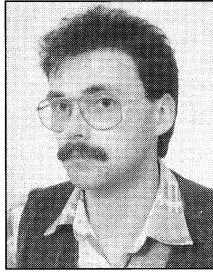
Robert TARGOS, Andrzej MAŁKIŃSKI

CENTRALNY OŚRODEK METROLOGII WOJSKOWEJ – ZIELONKA K. WARSZAWY

## Monitoring rubidowego wzorca częstotliwości wspomagany komputerowo

### Mgr. inż. Robert TARGOS

– urodzony w 1967 r. W 1993 r. ukończył studia w zakresie radioelektroniki na Wydziale Elektromechanicznym Wojskowej Akademii Technicznej. W latach 1993 do 1996 wykładowca w Wyższej Szkole Oficerskiej w Koszalinie w Katedrze Elektroniki i Automatyki. Od 1996 r. zatrudniony w Centralnym Ośrodku Metrologii Wojskowej w Zielonce. Obejmuje stanowisko starszego inżyniera w Zakładzie Miernictwa Elektronicznego (pracownia czasu i częstotliwości). W roku 1998 ukończył zaoczne studia podyplomowe w zakresie Metrologii w Wojskowej Akademii Technicznej na Wydziale Elektroniki. W jego dorobku znajdują się dwa wnioski racjonalizatorskie i kilka modernizacji automatycznych stanowisk pomiarowych.



### Inż. Andrzej MAŁKIŃSKI

– urodzony w 1938 r. W 1964 r. ukończył Państwową Szkołę Techniczną na kierunku radiowym. W 1971 r. został absolwentem Wieczorowego Studium Inżynierskiego na kierunku miernictwo elektroniczne. Pracował w Zakładach Radiowych im. Kasprzaka w Warszawie, a następnie w Przemysłowym Instytucie Telekomunikacji, również w Warszawie. Od 1964 r. jest zatrudniony w Centralnym Ośrodku Metrologii Wojskowej w Zielonce. Obejmuje stanowisko starszego specjalisty legalizatora w Zakładzie Miernictwa Elektronicznego (pracownia czasu i częstotliwości). Autor wielu wniosków racjonalizatorskich. W 1998 r. odznaczony za całokształt pracy Krzyżem Kawalerskim Orderu Odrodzenia Polski.



### Streszczenie

W artykule przedstawiono przykładowe rozwiązanie wspomaganego komputerowo monitoringu rubidowego wzorca częstotliwości w dowiązaniu do wzorców cezowych Głównego Urzędu Miar przy wykorzystaniu telewizyjnej metody pomiarowej.

### Abstract

The article presents the example of how to solve the computer monitoring of the rubid frequency standard connected to the Head Office of Measures using the television measuring method.

### Wprowadzenie

Podstawowe metody porównań wzorców częstotliwości i czasu można podzielić na trzy główne kategorie, wykorzystujące:

- fizyczny transport pracujących zegarów (wzorców częstotliwości);
- połączenia przewodowe;
- połączenia radiowe (beprzewodowe).

Metody porównania, w których stosuje się sygnały radiowe, stanowią najważniejszą i najliczniejszą kategorię metod porównawczych. Wynika to głównie stąd, że dla indywidualnego użytkownika te metody przedstawiają rozwiązanie optymalne z punktu widzenia elastyczności i kosztów.

Systemy i metody porównawcze, wykorzystujące sygnały radiowe, można klasyfikować w różny sposób, np. odpowiednio do wymagań użytkowników lub do specyfikacji systemu, przy uwzględnieniu kosztów aparatury i eksploatacji. Można także rozróżnić systemy, które są przeznaczone wyłącznie do dystrybucji czasu i częstotliwości oraz takie, które służą głównie innym celom, lecz wymagają dokładnego określenia czasu. Te ostatnie to precyzyjne systemy nawigacyjne.

Do porównań wzorca częstotliwości (czasu) w Centralnym Ośrodku Metrologii Wojskowej zastosowano metodę synchronizacji impulsów telewizyjnych (metodę telewizyjną) wykorzystującą system sieci telewizyjnej. Jest to metoda pośrednia, która pozwala na ciągłą kontrolę wzorca częstotliwości z błędem  $<1 \times 10^{-12}$ . Stosując tę metodę, uzyskano możliwość porównania wzorca rubidowego znajdującego się w COMW, z wzorcami cezowymi znajdującymi się w Głównym Urzędzie Miar. Wzorce cezowe GUM są porównywane z wzorcami międzynarodowymi metodą satelitarną.

Jest to metoda dokładna i dostępna, gdyż GUM prowadzi tego typu pomiary i udostępnia wyniki użytkownikom tej metody, wydając specjalne biuletyny informacyjne systematycznie wykorzystywane przez COMW. Zawierają one między innymi wyniki pomiarów odstępów czasu  $\tau_A$  (rys.1) między sekundowymi impulsami zegara cezowego, a telewizyjnymi impulsami synchronizującymi o godzinie 13:21:00 i 20:21:00 uniwersalnego czasu skoordynowanego UTC (Universal Time Coordinated).

W oparciu o tę metodę oraz praktyczne doświadczenia, w zakładzie Metrologii Elektronicznej COMW zbudowano zautomatyzowane stanowisko wzorcowe czasu i częstotliwości, zwane dalej stanowiskiem, umożliwiające ciągłą rejestrację wyników pomiarów oraz jej obróbkę matematyczną za pomocą komputera.

Do oprogramowania stanowiska zastosowano własne aplikacje programowe pracujące w systemie Windows 95, dzięki którym uzyskano:

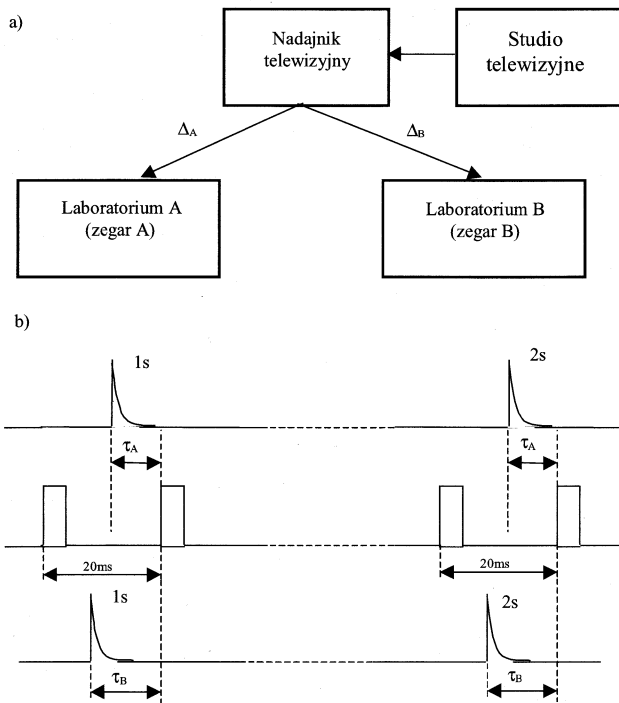
- automatyczne włączanie i wyłączanie układu pomiarowego w określonych godzinach czasu UTC i rejestrację pomiarów przedziału czasu  $\tau_B$ ;
- obróbkę matematyczną wyników pomiarów poprzez określenie odchylenia względnego oraz dobową i miesięczną niestabilność własnego wzorca;
- wydruk końcowy wykresu niestabilności własnego wzorca za jeden miesiąc pomiarowy.

### Porównanie zegarów metodą telewizyjną

#### Ogólne omówienie metody telewizyjnej

Metoda telewizyjna nie służy bezpośrednio do pomiaru błędu odchylenia generatorów wzorcowych z uwagi na zbyt małą stałość częstotliwości telewizyjnych impulsów synchronizujących (ok.  $4 \times 10^{-7}$ ). Jest natomiast wykorzystywana do porównań skal czasu, co pozwala na wyznaczenie błędu odchylenia i niestabilności częstotliwości generatorów wzorcowych.

Pomiar odbywa się w następujący sposób. Impuls sekundowy z lokalnego zegara wzorcowego powoduje start miernika odstępów czasu (licznika). Następny przychodzący telewizyjny impuls synchronizujący powoduje zatrzymanie licznika, wyświetlenie i wydrukowanie wyniku. Ten pomiar jest powtarzany co sekundę w obu miejscach, w których znajdują się zegary (rys.1).



Rys. 1. Powiązanie laboratoriów A i B przy odtwarzaniu skali czasu  
a) schemat powiązania, b) przebiegi pokazujące istotę pomiarów

Różnice czasów zegarowych oblicza się następująco: niech  $t$  oznacza czas wspólny, np. UTC. Nadajnik wysła impuls w chwili  $t = T_S$ . Dociera on do odpowiednich miejsc, w których są zegary i zatrzymuje liczniki w chwilach:

$$\begin{aligned} t &= T_S + \Delta_A \text{ (zegar A)} \\ t &= T_S + \Delta_B \text{ (zegar B)} \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:  $\Delta_A, \Delta_B$  - opóźnienia wynikające z propagacji i z samych urządzeń, odpowiadające upływowi czasu od chwili, gdy impuls synchronizacji jest wysłany, do chwili, gdy zatrzymuje on liczniki, które zostały uruchomione przez poprzedzające impulsy sekundowe zegarów A i B w chwilach odpowiednio  $t = T_A$  i  $t = T_B$ , przy czym zakładamy, że zegary są bliskie synchronizmu, tj. różnica  $T_B - T_A$  nie przekracza 1ms. Wskazania obu liczników wynoszą:

$$\begin{aligned} \tau_A &= T_S + \Delta_A - T_A \\ \tau_B &= T_S + \Delta_B - T_B \end{aligned} \quad (2)$$

Wskazania te są rejestrowane (drukowane). Różnica wynosi:

$$\tau_B - \tau_A = \Delta_B - \Delta_A + T_A - T_B \quad (3)$$

a więc różnica czasów zegarowych wynosi:

$$T_B - T_A = \tau_A - \tau_B + \Delta_B - \Delta_A \quad (4)$$

Zakładając, iż ten sam impuls telewizyjny zatrzymuje liczniki w obu miejscach, w których znajdują się zegary, jedyną stałą kalibracji jest różnica czasów propagacji  $\tau_B - \tau_A$ . Przy odbiorze w zasięgu widzialności różnice czasów przebiegu można obliczyć z różnicy odległości anten odbiorczych - mierzonych wzdłuż linii prostych - od anteny nadawczej z niepewnością mniejszą niż 1  $\mu$ s, lub zmierzyć je przewożąc zegar pomocniczy z niepewnością mniejszą niż 0,1  $\mu$ s. Różnice opóźnień powstałych w aparaturze są pomijane z uwagi na ich małą wartość.

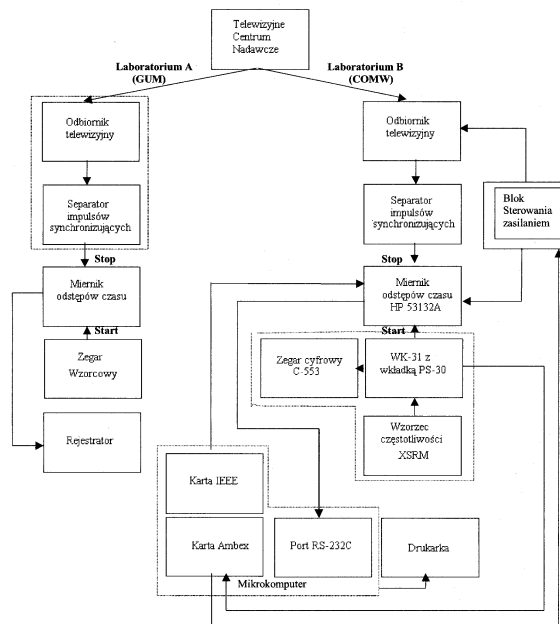
Aby użytkownik B (COMW) dowiedział się do użytkownika A (GUM) należy:

- 1) ustawić wstępnie skalę czasu zegara B z błędem mniejszym niż 1 ms (pomiar błędu odchylenia i niestabilności generatora kwarcowego),
- 2) zmierzyć czas propagacji  $\tau_B - \tau_A$  (utrzymanie czasu UTC).

## Opis stanowiska pomiarowego przy pomiarach automatycznych

### Schemat blokowy układu pomiarowego

Schemat połączeń układu pomiarowego stanowiska przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat połączeń układu pomiarowego stanowiska przy pomiarach automatycznych

### Przyrządy przystosowane do pracy w stanowisku

#### • Wzorcowy zegar cyfrowy

Porównanie wzorców częstotliwości metodą telewizyjną przeprowadzane jest na bazie czasu (1s). Wzorcowy zegar cyfrowy z możliwością regulacji fazy (1s) zrealizowano w COMW adaptując posiadane przyrządy pomiarowe.

Wzorcowy zegar cyfrowy zbudowany jest z następujących bloków:

#### • rubidowy wzorzec częstotliwości XSRM

Sygnal z rubidowego wzorca częstotliwości (komparowany z GUM) o częstotliwości 5 MHz steruje wzorcem częstotliwości WK-31 (wewnętrzny generator kwarcowy odłączony).

• kwarcowy wzorzec częstotliwości WK-31 z wkładką przesuwnika fazy PS-30  
Wzorzec częstotliwości WK-31 przystosowano do pracy w układzie dzielnika - mnożnika częstotliwości 5 MHz z rubidowego wzorca częstotliwości poprzez:

- odłączenie wewnętrznego generatora kwarcowego,
- doprowadzenie do układów dzielnika i mnożnika sygnału z wzorca rubidowego o częstotliwości 5 MHz (wyjście 100 kHz zamieniono na wejście sterujące).

Na wyjściach wzorca częstotliwości WK-31 otrzymywane są sygnały z dokładnością wzorca rubidowego o częstotliwościach: 10 MHz; 5 MHz; 1 MHz i 1 Hz.

Do wkładki przesuwnika fazy PS-30 doprowadzone są sygnały wzorcowe 10 MHz i 1 Hz oraz napięcie zasilające +5 V ze wzorca częstotliwości WK-31. Z wyjścia wkładki sygnał 1 s doprowadzony jest do zegara cyfrowego oraz poprzez wyłącznik oznaczony „100 ms“ i wyjście „1Hz“ do wejścia „start“ częstotliwościomierza - czasomierza (sygnał 10 Hz oraz impulsy przesuwnika 100 ms zostały odłączone).

Wkładka PS-30 zapewnia skokową, w układzie dziesiętnym, regulację fazy 1 Hz w zakresie od 100 ns do 11,1111 ms ( $0,1 \mu s \div 1 s$ ).

Wzorzec częstotliwości pracuje w ruchu ciągłym, co zapewnione jest poprzez stałe zasilanie z sieci 220 V (poza wyłącznikiem) oraz zasilanie buforowe z akumulatorów 24 V, w przypadku zaniku napięcia z sieci.

#### • zegar cyfrowy C-553

W celu uzyskania dokładnych wskazań czasu ( $\leq 1 \mu s$ ) zegara cyfrowego C-553 dokonano następujących zmian w jego układzie:

- odłączono (odcięto) układ generatora kwarcowego wraz z dzielnikiem częstotliwości,
- poprzez potencjometr do wejścia licznika wskaźnika zegara doprowadzono z wkładki przesuwnika fazy PS-30 wzorcowe impulsy 1 Hz o poziomie TTL,
- pozostałe układy wskaźnikowo - sterujące pozostawiono bez zmian.

#### • Separator telewizyjny

Zadaniem separatora telewizyjnego jest wydzielenie z całego sygnału telewizyjnego grupy (pięciu) impulsów synchronizacji pionowej. Impulsy te doprowadzane są do wejścia „stop“ miernika odstępów czasu. Uruchomienie (start) licznika miernika odstępów czasu odbywa się wzorcowym impulsem sekundowym, a zatrzymanie (stop) pierwszym wydzielonym impulsem synchronizującym.

#### • Częstościomierz-czasomierz

Częstościomierz-czasomierz cyfrowy na stanowisku pomiarowym pełni rolę miernika odstępów czasu między impulsami z wzorca częstotliwości a sygnałami telewizyjnymi.

#### • Karta pomiarowa AMBEX

Moduł LC-055-DCU jest nowoczesnym urządzeniem kontrolno-pomiarowym przystosowanym do pracy w komputerach rodziny IBM-PC XT/AT/386. Moduł umożliwia sterowanie oraz sprawdzenie stanu logicznego urządzeń za pomocą 48 standardowych linii TTL o zadanym kierunku pracy w grupach po 8 linii. Pozwala na pomiar wielkości fizycznych sprowadzonych do dziedziny czasu na zasadzie pomiaru czasu trwania impulsów, częstotliwości ich powtarzania, czasu pomiędzy kolejnymi impulsami, zliczaniu impulsów itp. Funkcje sterowania zawierają możliwość sterowania impulsowego poprzez generację określonej liczby impulsów o zadanej częstotliwości powtarzania oraz wypełnieniu. Urządzenie posiada budowę umożliwiającą różnorodną konfigurację w zależności od postawionego zadania sterowania. Jest to realizowane dzięki rozbudowanemu układowi przerwań.

#### • Blok włączania i wyłączania zasilania

Aby zapobiec zbędnemu zużyciu energii elektrycznej i przegrzewaniu się takich urządzeń jak telewizor i miernik odstępów czasu (pomiar dokonywany jest tylko dwa razy dziennie) został skonstruowany układ włączający i wyłączający zasilanie tych urządzeń tylko w czasie pomiarów na pięć minut przed godziną 13:21:00 i 20:21:00 czasu UTC. Układ sterowany jest binarnie z karty LC-055-DCU.

#### • Karta interfejsowa IEEE 488

Do sterowania miernikiem odstępów czasu zastosowano kartę interfejsową standardu IEEE 488, która służy do wywołania odpowiednich ustawień przyrządu niezbędnych do wykonania prawidłowych pomiarów.

## Oprogramowanie stanowiska

Do oprogramowania stanowiska stworzono program „Czas UTC” pracujący w systemie Windows 95. Jest to aplikacja

składająca się z pięciu głównych modułów:

- a) moduł zliczający przerwania sprzętowe generowane przez kartę pomiarową;
- b) moduł uruchamiający i wyłączający urządzenia peryferyjne o określonej godzinie;
- c) moduł ustawiający częstościomierz-czasomierz do pomiaru odstępów czasu między sygnałami wzorca częstotliwości i sygnałami telewizyjnymi;
- d) moduł odczytu wyników pomiarów i zapisania ich do odpowiedniego zbioru;
- e) moduł selekcji dokładnego pomiaru z godziny 13:21:00 i 20:21:00.

Poszczególne moduły wykorzystują odpowiednie porty wejścia/wyjścia.

Moduł zliczający przerwania wykorzystuje kartę pomiarową generującą co 1 sekundę przerwania sprzętowe na podstawie sygnału z wzorca częstotliwości.

Moduł włączający i wyłączający urządzenia wykorzystuje funkcję wejścia/wyjścia karty pomiarowej. Wysyłając odpowiednią sekwencję bitów na wyjście karty, uzyskujemy włączenie bądź wyłączenie urządzeń poprzez blok sterowania zasilaniem.

Do ustawienia częstościomierza-czasomierza wykorzystywana jest karta standardu IEEE 488. W celu oprogramowania odpowiednich funkcji karty posłużono się dynamiczną biblioteką 16-bitową dostarczoną przez producenta karty.

Moduł odczytu pomiarów wykorzystuje złącze szeregowo RS-232C /COM/. Po ustawieniu częstościomierza-czasomierza na jego złącze szeregowo wysyłane są poszczególne wyniki pomiarów, które są odczytywane przez program i zapisywane do zbioru wyjściowego, a także zapisywane do tablicy aktywnej.

Moduł selekcji dokładnego pomiaru bazuje na tablicy tworzonej podczas odczytu. Wyselekcjonowany pomiar jest zapisywany do zbioru wyników z całego miesiąca.

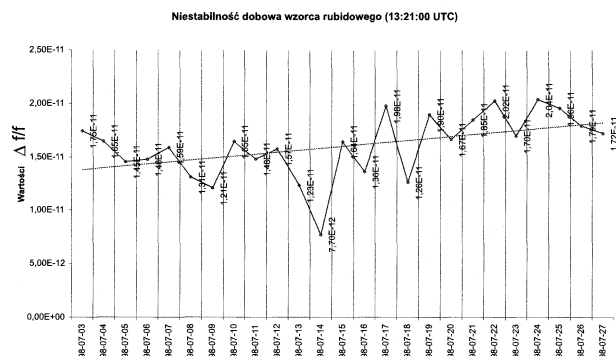
Kolejne moduły działają w określonym odstępie czasowym, a pomiar odbywa się zgodnie z czasem UTC przy wykorzystaniu metody telewizyjnej.

Do programu dołączone są także podprogramy umożliwiające synchronizację zegara czasu UTC, daty systemowej a także zmianę czasu lokalnego z letniego na zimowy.

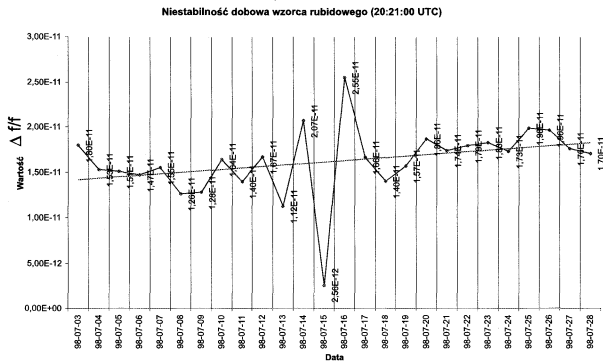
Data systemowa jest wykorzystywana do tworzenia zbiorów wyjściowych, zarówno zawierających wyniki pomiarów, jak i zbiory pomiarów dokładnie z godzin 13:21:00 i 20:21:00. Po zmianie miesiąca tworzone są nowe zbiory.

W celu usprawnienia analizy otrzymanych danych zostało opracowane specjalne MAKRO (makrodefinicja rejestrująca kolejne czynności operatora) w oparciu o programy Excel 97 i Visual Basic. Na tej podstawie otrzymujemy obraz miesięcznego zachowania się wzorca, którego przykład za miesiąc lipiec 1998 roku przedstawia rys. 3a, b.

Z wykresu można wywnioskować, że wzorzec odstraja się w kierunku dodatnim, a wahania pomiarów niestabilności dobowych



Rys. 3a. Przykładowe miesięczne zachowanie się wzorca w miesiącu lipcu 1998 roku (pomiar z godziny 13-21-00 UTC)



Rys. 3b. Przykładowe miesięczne zachowanie się wzorca w miesiącu lipcu 1998 roku (pomiar z godziny 20-21-00 UTC)

mieszczą się między wartością  $1 \times 10^{-11}$  a  $2 \times 10^{-11}$ , czyli w zakresie  $1 \times 10^{-11}$  co jest zgodne z danymi technicznymi wzorca.

### Analiza dokładności komparacji wzorca

Uwzględniając realne możliwości eksploatacji wzorca w COMW założono, że jego odchylenie względne  $\Delta f/f$  nie powinno być większe niż  $\pm 1 \times 10^{-11}$ .

Utrzymanie takiego odchylenia wymaga precyzyjnego dostrajania wzorca. W tym celu należy określić kierunek odstrajania się wzorca w czasie (w większości wzorce odstrajają się w kierunku dodatnim, w naszym przypadku jak to wynika z rysunku 3a,b również jest ono w kierunku dodatnim) i przeliczenie przestrojenia odchylenia względnego na działkę helipotu. Dostrojenie należy przeprowadzać, gdy z pomiarów wynika, że odchylenie względne wzorca zbliża się do wartości  $\Delta f/f = 1 \times 10^{-11}$ . Należy wtedy przestroić helipot wzorca o taką ilość działek (na minus), aby odchylenie względne wzorca przyjęło wartość  $\Delta f/f = -1 \times 10^{-11}$ .

Wyznaczenie odchylenia względnego wzorca częstotliwości przy metodzie telewizyjnej dokonuje się zgodnie ze wzorem (5):

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{(\tau_{C_{n+1}} + \tau_{G_{n+1}}) - (\tau_{C_n} - \tau_{G_n})}{24h} \quad (5)$$

gdzie:

$\frac{\Delta f}{f} =$  - odchylenie względne częstotliwości rubidowego wzorca w n-tym dniu pomiaru;

$\tau_{C_{n+1}} \cdot \tau_{C_n}$  - odstęp czasu między impulsem sekundowym a pierwszym impulsem telewizyjnym synchronizacji pionowej zmierzonym w COMW o godz.13:21:00 i 20:21:00 czasu UTC w kolejnych dniach [μs];

$\tau_{G_{n+1}} \cdot \tau_{G_n}$  - odstęp czasu między impulsem sekundowym a pierwszym impulsem telewizyjnym synchronizacji pionowej zmierzonym w GUM o godz.13:21:00 i 20:21:00 czasu UTC w kolejnych dniach [μs];

24 h - 86400 sekund

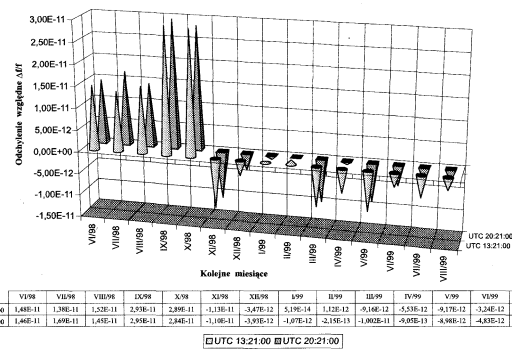
n - dzień pomiaru.

Dla tak dokonanych obliczeń odchylen względnych wzorca można określić niestabilność długoterminowe (miesięczne). A następnie przeprowadzić analizę zachowania się wzorca w czasie i precyzyjnie określić czasy przestrojenia, aby utrzymać go w założonych granicach odchylenia względnego. Uśrednione odchylenia względne w poszczególnych miesiącach przedstawia rys. 4.

Na powyższym wykresie można zauważyć dwa etapy zachowania się wzorca częstotliwości. Pierwszy obejmuje obserwację wzorca i określenie wielkości i kierunku odchylenia względnego w czasie (VI-XI 1998r). Drugi etap obejmuje przestrojenie wzorca do wartości odchylenia względnego  $\Delta f/f = -1 \times 10^{-11}$  i również obserwację jego zachowania się w czasie.

Z otrzymanych wyników nasuwa się wniosek, że można określić niestabilność długoterminową własnego wzorca z błędem nie

Graficzna interpretacja odchylenia względnego częstotliwości wzorca (wyniki uśrednione za miesiąc)



Rys. 4. Graficzna interpretacja odchylenia względnego częstotliwości wzorca

gorszym niż  $\pm 5 \times 10^{-12}$  w wybranym przedziale czasu, co pozwala stwierdzić prawidłowość założeń metody. Otrzymane wyniki pozwalają również stwierdzić, że wzorec jest, jak na tę klasę wzorców, bardzo stabilny i utrzymuje z dużym zapasem swoje dane techniczne. Stosunkowo duże różnice wartości odchylenia względnego między poszczególnymi miesiącami są wynikiem pracy wzorca w pomieszczeniu o niestabilizowanych warunkach klimatycznych. W tym miejscu należałoby zaznaczyć, że względna niedokładność długoterminowa (miesięczna) wzorca XSRM według danych technicznych jest  $\leq 1 \times 10^{-11}$  (typowa  $8 \times 10^{-12}$ ), wpływ niepewności temperaturowej wynosi  $\leq 2 \times 10^{-12}/^{\circ}\text{C}$ . Obecnie prowadzone są prace mające za zadanie przeprowadzenie wzorcowania przyrządu w Głównym Urzędzie Miar, w celu określenia uśrednionego za dobę odstrojenia częstotliwości w założonych warunkach temperaturowych.

### Podsumowanie

Stanowisko dzięki prowadzonemu monitoringowi umożliwia komparację ciągłą rubidowego wzorca częstotliwości - etalonu wojskowego (COMW) z wzorcem cezowym (GUM) metodą telewizyjną. Pozwala to na wykorzystanie wzorca do:

- sprawdzania i dostrajania uwierzytelnianych wzorców częstotliwości (generatorów) z dokładnością  $\geq 1 \times 10^{-11}$ ;
- określania niestabilności uwierzytelnianych wzorców częstotliwości (generatorów) z dokładnością  $\geq 5 \times 10^{-12}$ ;
- utrzymania czasu UTC z dokładnością  $\leq 1 \mu\text{s}$ ;
- prowadzenia historii zmiany parametrów ze względu na procesy starzeniowe własnego wzorca, a jednocześnie określania właściwych momentów przestrojenia w kierunku przeciwnym do kierunku odchylenia częstotliwości względem wzorca państwowego.

Z przedstawionych możliwości wykorzystania wzorca można ponadto stwierdzić, że metoda telewizyjna komparacji w dobie porównań skal czasu poprzez systemy satelitarne typu GPS czy GLONAS, jest co prawda już metodą przestarzałą, ale spełniającą bardzo dobrze swoje założenia w małych laboratoriach posiadających wzorce rubidowe, które przy niewielkim nakładzie finansowym i pracy własnej można porównywać z wzorcem państwowym.

Automatyzacja procesów pomiarowych na stanowisku do komparacji wzorca częstotliwości została wdrożona w COMW w czerwcu 1998r.

### Literatura

[1] Peter KARTASCHOFF: Częstotliwość i czas. Wyd. Komunikacji i Łączności Warszawa 1985,  
 [2] Andrzej MAŁKIŃSKI: Stanowisko wzorcowe czasu i częstotliwości. Część I i II. - opracowanie własne COMW. Zielonka 1997.