

Łukasz SOBOLEWSKI
Uniwersytet Zielonogórski
Instytut Metrologii, Elektroniki i Informatyki

PORÓWNANIE JAKOŚCI PROGNOZOWANIA SKAL UTC(PL) I UTC(NPL) Z ZASTOSOWANIEM SIECI NEURONOWEJ GMDH

W pracy przedstawiono wyniki badań prognozowania wartości odchyłeń dla skali UTC(PL) oraz UTC(NPL) dla danych przygotowanych w postaci szeregu TS1 i TS2. Lepszą jakość prognozowania otrzymano dla skali czasu UTC(NPL). Otrzymane wartości prognoz różnią się od odchyłeń publikowanych przez BIPM na ten sam dzień prognozy o maksymalnie $\pm 3,6$ ns zarówno dla szeregu TS1, jak i dla TS2.

COMPARISON OF QUALITY OF UTC(PL) AND UTC(NPL) SCALES PREDICTION BY MEANS OF GMDH NEURAL NETWORK

The article presents research results on predicting the deviations for UTC(PL) and UTC(NPL) timescales for data prepared in the form of time series TS1 and TS2. Better quality of prediction has been obtained for UTC(NPL) timescale. Obtained values of predictions differ from the deviations published by the BIPM at the same day of prediction by max ± 3.6 ns for time series TS1 and TS2.

1. WPROWADZENIE

Krajowe skale czasu UTC(k) są fizycznymi realizacjami skali czasu UTC (ang. *Universal Coordinated Time*) i nadzorowane są przez Międzynarodowe Biuro Wag i Miar BIPM. W każdym miesiącu dla poszczególnych UTC(k) wyznaczane są przez BIPM odchylenia wyznaczone wg zależności

$$xb(t) = UTC(t) - UTC_k(t), \quad (1)$$

określające rozbieżność krajowych skal czasu w stosunku do UTC [1]. Odchylenia te publikowane są w biuletynie „Circular T”, między 8. a 12. dniem następnego miesiąca. Opóźnienie publikacji odchyłeń $xb(t)$ przez BIPM wpływa niekorzystnie na utrzymanie zgodności UTC(k) z UTC. Dlatego też w celu przyspieszenia przekazywania informacji o rozbieżności UTC(k) w stosunku do UTC BIPM w 2012 r. uruchomił projekt A Rapid UTC [2]. Na podstawie skali UTCr w każdą środę na serwerze ftp BIPM publikowane są odchylenia wyznaczone wg zależności

$$xbr(t) = UTC(t) - UTC_k(t) \quad (2)$$

za poprzedni tydzień dla poszczególnych zegarów realizujących skale UTC(k).

Biorąc pod uwagę dzień publikacji odchyłeń $xb(t)$ oraz $xbr(t)$, zapewnienie jak największej zgodności UTC(k) w stosunku do UTC jest możliwe jedynie poprzez prognozowanie wartości odchyłeń.

Otrzymane wyniki badań nad zastosowaniem sieci neuronowych do prognozowania odchyłeń dla krajowych skal czasu UTC(k) wykazały, że najkorzystniejsze wyniki w prognozowaniu odchyłeń wykazują sieci neuronowe typu GMDH. Wnioski z przeprowadzonych badań były podstawą do opracowania procedury prognozowania odchyłeń dla krajowych skal czasu UTC(k) w oparciu o sieć neuronową typu GMDH [3]. Wyniki badań pokazały, że opracowana procedura umożliwia osiągnięcie bardzo dobrej jakości prognozowania krajowych skal czasu UTC(k).

Celem pracy jest porównanie jakości prognozowania skali czasu UTC(PL), realizowanej w oparciu o pojedynczy komercyjny zegar cezowy, ze skalą UTC(NPL), realizowaną w oparciu o aktywny maser wodorowy, nadzorowany dodatkowo przez fontannę cezową. W pracy przedstawiono wyniki

badan prognozowania wartości odchylen dla UTC(PL) i UTC(NPL) z zastosowaniem opracowanej procedury w oparciu o dane przygotowane w formie dwóch szeregów, zbudowanych na bazie odchylen wyznaczonych wg skali UTC i UTCr.

2. PRZYGOTOWANIE DANYCH WEJŚCIOWYCH DLA SIECI NEURONOWEJ TYPU GMDH

Dane wejściowe dla sieci neuronowej typu GMDH przygotowane zostały w postaci dwóch szeregów czasowych. Podstawowymi elementami tych szeregów były odchylenia $xb(t)$ oraz $xbr(t)$.

Utworzony szereg czasowy TS1 składał się z dwóch podzbiorów (rys. 1). Pierwszy podzbiór zawiera grupy danych (od 1 do i), wyznaczone według zależności:

$$x_1(t) = xa(t) + xb(t) = UTC(t) - zegar_k(t), \quad (3)$$

od dnia t_0 do dnia t_n , dla którego była znana ostatnia wartość tego szeregu przed dniem każdej publikacji (t_{pub}). Wartości $xa(t)$ stanowią historyczne wyniki pomiarów czasu fazowego, określone zgodnie z zależnością:

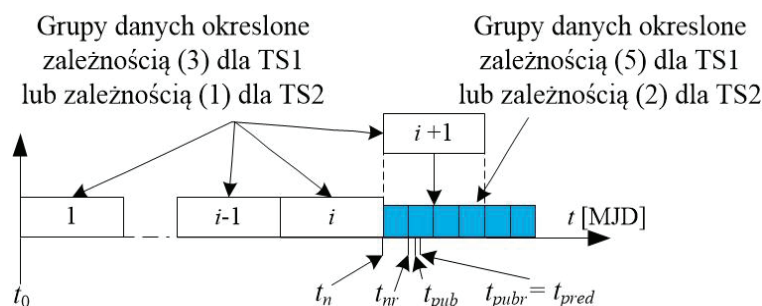
$$xa(t) = UTC_{PL}(t) - zegar_k(t). \quad (4)$$

Drugi podzbiór stanowił dopełnienie szeregu TS1 o grupę danych pomiędzy dniami t_n a t_{nr} , o wartościach wyznaczonych na podstawie zależności:

$$x_2(t) = xa(t) + xbr(t) = UTCr(t) - zegar_k(t). \quad (5)$$

Wartości odchylen $xbr(t)$ są publikowane przez BIPM w dniu t_{pubr} (rys. 1). Dzień publikacji odchylen $xbr(t)$ może być jednocześnie dniem (t_{pred}), w którym prognozowano wartość odchylenia $xb(t)$, zwaną dalej $xb_p(t_{pred})$. W każdym tygodniu dane szeregu czasowego TS1 są uzupełniane o nowe grupy danych obliczonych na podstawie (5). W momencie opublikowania nowego biuletynu „Circular T”, zawierającego wartości odchylen $xb(t)$, tworzona jest, na podstawie (3), nowa grupa danych $i+1$ (rys. 1), która dla odpowiednich dni zastępuje dotychczasowe dane wyznaczone na podstawie (5).

Szereg czasowy TS2 bazuje tylko na publikowanych przez BIPM wartościach odchylen $xb(t)$ i $xbr(t)$ i składa się z dwóch podzbiorów przygotowanych według zasady opisanej na rys. 1.



Rys. 1. Tworzenie szeregów czasowych TS1 oraz TS2.
Fig. 1. Creation of time series TS1 and TS2.

3. WYNIKI BADAŃ

Prognozowanie odchylen dla badanych skal czasu UTC(PL) oraz UTC(NPL) prowadzono za okres 6 miesięcy, od MJD 58124 do MJD 58279, na dni MJD kończące się na cyfry 4 i 9. Na wejście sieci neuronowej typu GMDH podawano dane w postaci szeregów TS1 lub TS2. W przypadku zastosowania szeregu TS1, na wyjściu sieci neuronowej otrzymano prognozę tego szeregu ($x_{1p}(t_{pred})$).

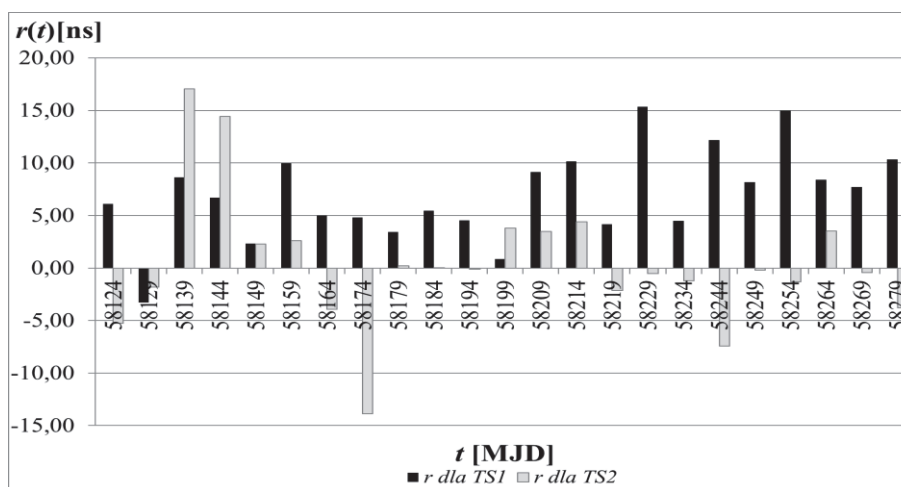
Po uwzględnieniu zmierzonej w dniu wyznaczenia prognozy wartości $xa(t_{pred})$, prognozę $xb_p(t_{pred})$ obliczono z zależności:

$$xb_p(t_{pred}) = x_{1p}(t_{pred}) - xa(t_{pred}). \quad (6)$$

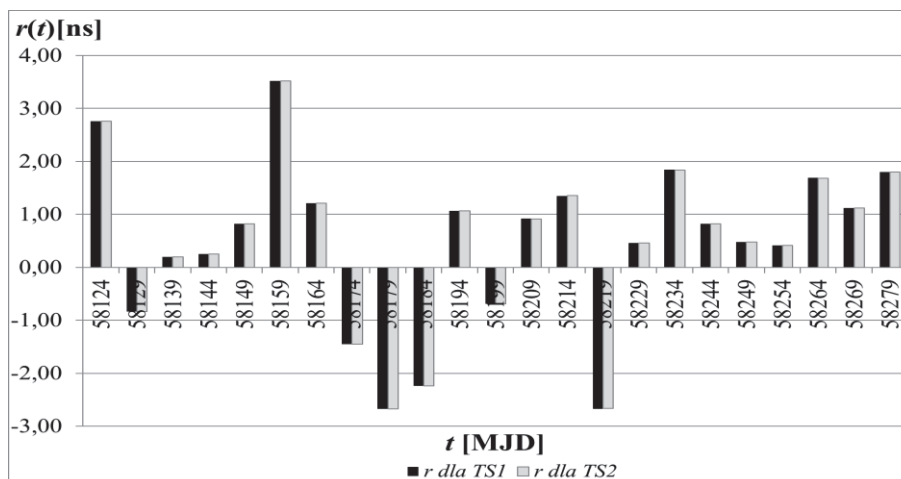
Dla szeregu TS2 wyznaczana wartość prognozy jest jednocześnie wartością prognozowanego odchylenia $xb_p(t_{pred})$.

Na rys. 2 i 3 przedstawiono wartości residuów (r), czyli różnic pomiędzy prognozowaną wartością odchylenia, a odchyleniem $xb(t)$ publikowanym przez BIPM na ten sam dzień prognozy, obliczone z zależności:

$$r(t_{pred}) = xb(t_{pred}) - xb_p(t_{pred}). \quad (7)$$



Rys. 2. Otrzymane wartości residuów r dla UTC(PL).
Fig. 2. Determined values of r residuals based for UTC(PL).



Rys. 3. Otrzymane wartości residuów r dla UTC(NPL).
Fig. 3. Determined values of r residuals based for UTC(NPL).

Na podstawie obliczonych residuów (r) wyznaczono wartości wybranych miar jakości prognoz [4]: błąd średni (ME), absolutny błąd średni (MAE), błąd średniokwadratowy (MSE) wraz z jego składowymi (MSE_1 , MSE_2 , MSE_3) oraz pierwiastek z błędu średniokwadratowego ($RMSE$), które przedstawiono w Tabeli 1. Ocena jakości prognoz $xb_p(t_{pred})$ przeprowadzono na podstawie residuów, wybranych miar jakości prognoz [4] oraz zmodyfikowanego odchylenia Allana (MDEV).

Z przedstawionych wyników badań (rys. 1 i 2) oraz Tabeli 1 sformułowano następujące wnioski:

1. Porównanie wartości wszystkich miar jakości prognoz wskazuje, że lepsze jakościowo prognozy otrzymano w przypadku skali UTC(NPL).
2. W przypadku skali UTC(PL) w 19 przypadkach na 23 otrzymane wartości residuów mieszczą się w granicy ± 10 ns dla szeregu TS1, natomiast w 20 przypadkach na 23 dla TS2.
3. W przypadku skali UTC(NPL) wszystkie otrzymane wartości residuów mieszczą się w granicy ± 4 ns dla szeregu TS1 oraz TS2.
4. Z porównania wartości błędów ME , MAE i MSE_1 wynika, że w przypadku skali UTC(PL) i szeregu czasowego TS1 prognozy są obciążone. Otrzymane wartości prognoz są niższe od wartości zaobserwowanych.
5. W przypadku skali UTC(NPL) występują bardzo małe wartości składowych MSE_2 i MSE_3 . Oznacza to lepsze przewidywanie zmienności wartości prognozowanych w stosunku do zmienności wartości zaobserwowanych oraz dużą zgodność kierunku zmian prognozy w porównaniu z kierunkiem zmian wartości prognozowanej. Spowodowane jest to bardzo dużą stabilnością skali UTC(NPL).
6. Osiągnięte małe wartości residuów dla UTC(NPL) umożliwiły otrzymanie dużej stabilności czasowej i częstotliwościowej (odpowiednio: 0,86 ns oraz $5,72 \cdot 10^{-16}$ dla $\tau = 30$ dni).

Tabela 1.

Wartości miar jakości prognoz dla UTC(PL) i UTC(NPL) dla szeregów czasowych TS1 i TS2.

Miara jakości prognozy	UTC(PL) dla TS1	UTC(PL) dla TS2	UTC(NPL) dla TS1	UTC(NPL) dla TS2
max (ns)	16	17	3.6	3.6
min (ns)	-3.3	-14	-2.7	-2.7
ME (ns)	6.9	0.4	0.4	0.4
MAE (ns)	7.2	4.1	1.4	1.4
MSE (ns ²)	66	39	2.6	2.6
MSE_1 (ns ²)	48	0.2	0.2	0.2
MSE_2 (ns ²)	0.8	0.3	0.03	0.03
MSE_3 (ns ²)	17	38	2.4	2.4
$RMSE$ (ns ²)	8.1	6.2	1.6	1.6

4. PODSUMOWANIE

Wyniki badań pokazały, że lepszą jakość prognozowania otrzymano dla skali UTC(NPL). Aktualnie do realizacji UTC(PL) również wykorzystywany jest maser wodorowy, co jest właściwym kierunkiem działań. Wstępne wyniki nad prognozowaniem UTC(PL) realizowanej przez maser wodorowy wykazały poprawę jakości prognozowania.

LITERATURA

1. BIPM Annual Report on Time Activities, vol. 11, Sevres BIPM, 2016.
2. G. Petit, F. Arias, A. Harmegnies, G. Panfilo, L. Tisserand, "UTCr: a rapid realization of UTC," Metrologia vol. 51, no. 1, pp. 33–39, 2014.
3. W. Miczulski and L. Sobolewski, "Algorithm for predicting [UTC-UTC(k)] by means of neural networks," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement vol. 66, pp. 2136–2142, 2017.
4. R. B. Caldwell, "Performance metrics for neural network-based trading system development," NeuroVest Journal, vol. 3, pp. 22-26, 1995.