

doi:10.15199/48.2024.12.15

Wykorzystanie Rzeczywistych Danych Pomiarowych Do Prognozowania Polskiej Skali Czasu UTC(PL) Przy Użyciu Sieci Neuronowej typu GMDH

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań prognozowania wartości różnic dla Polskiej Skali Czasu UTC(PL) dla rzeczywistych danych pomiarowych przygotowanych w postaci szeregu czasowego TS1 i TS2. Uzyskano bardzo dobrą jakość prognozowania skali czasu UTC(PL). Otrzymane wartości prognoz dla analizowanego okresu czasu różnią się od różnic publikowanych przez BIPM na ten sam dzień prognozy o maksymalnie $\pm 2,3$ ns, zarówno dla szeregu TS1, jak i dla TS2.

Abstract. The article presents research results on forecasting the differences for Polish Timescale UTC(PL) for real-time measurement data prepared in the form of time series TS1 and TS2. Very good quality of forecasting has been obtained for UTC(PL) timescale for analysed period of time. Obtained values of forecasts differ from the differences published by the BIPM at the same day of forecast by max ± 2.3 ns for time series TS1 and TS2. (Using Real-time Measurement Data to Forecast the Polish Time Scale UTC(PL) Using a GMDH Type Neural Network).

Słowa kluczowe: prognozowanie różnic UTC – UTC(k), Skala Czasu UTC(PL), skala UTC i UTC Rapid, korekcja skali czasu, sieci neuronowe.

Keywords: forecasting UTC – UTC(k) differences, UTC(PL) timescale, UTC & UTC Rapid scales, timescale correction, neural networks.

Wprowadzenie

Sterowanie skalą czasu wymagane jest w celu zapewnienia precyzyjnej synchronizacji zegara atomowego realizującego tę skalę z uniwersalnym czasem skoordynowanym UTC [1]. Krajowe skale czasu UTC(k) stanowią podstawę wyznaczania czasu urzędowego w danym kraju, i są realizowane przez człowe Krajowe Instytuty Metrologiczne NMI (ang. National Metrology Institutes). Krajowe NMI dążą do zapewnienia jak najlepszej stabilności i dokładności ich UTC(k). W tym celu wymagane jest bezpośrednie porównanie danej UTC(k) z globalną skalą UTC, wyznaczaną przez Międzynarodowe Biuro Wag i Miar – BIPM (ft. Bureau International des Poids et Mesures) [2, 3, 4]. W głównej mierze związane jest to z potrzebą dysponowania przez NMI częstotliwością o wysokiej dokładności i stabilności oraz możliwością jej precyzyjnej synchronizacji. To z kolei bardzo często stanowi podstawę bezpieczeństwa i jakości funkcjonowania wielu systemów i prowadzenia prac naukowych o charakterze podstawowym. Obecnie prowadzone są bardzo ważne i zaawansowane prace nad przyszłością definicji sekundy według układu SI oraz nad rewizją definicji międzynarodowego uniwersalnego czasu skoordynowanego UTC.

Co miesiąc oraz co tydzień, dla poszczególnych UTC(k), BIPM wyznacza odpowiednio różnice UTC - UTC(k) oraz UTCr - UTC(k). Różnice UTC - UTC(k) określają rozbieżność krajowych skal czasu w stosunku do UTC, natomiast różnice UTCr - UTC(k) – rozbieżność w stosunku do skali UTC Rapid [5]. Różnice UTC - UTC(k) za poprzedni miesiąc publikowane są w biuletynie „Circular T” na dni MJD (ang. Modified Julian Date) kończące się na cyfrę 4 i 9 (z odstępem pięciodniowym), między 8. a 12. dniem następnego miesiąca, natomiast różnice UTCr - UTC(k) za poprzedni tydzień publikowane są w każdą środę o godzinie 19:00 na serwerze FTP BIPM.

Występujące opóźnienia w publikacji różnic UTC - UTC(k) oraz UTCr - UTC(k) przez BIPM powodują trudności w utrzymaniu zgodności UTC(k) z UTC na jak najwyższym poziomie. Głównym czynnikiem, który ma wpływ na zaistniałą sytuację jest czas potrzebny na zgromadzenie, odpowiednie przygotowanie i weryfikację danych pomiarowych z lokalnych i zdalnych porównań ponad 700

zegarów atomowych [6], przesyłanych do BIPM przez NMI, Instytuty Desygnowane i inne laboratoria odpowiedzialne za realizację lokalnych skal czasu UTC(k), a także duża złożoność i czasochłonność samego procesu wyliczania skali UTC przez BIPM [1, 2].

Wobec problemu opóźnienia publikacji różnic wyznaczonych przez BIPM, sterowanie i wyznaczanie krajowych skal czasu UTC(k) oparte jest w większości przypadków na metodach prognozowania (skali czasu lub częstotliwości). Do tego celu wykorzystywane są metody statystyczne: regresja liniowa [7], odchylenia Allana [8], filtr Kalmana [9], czy stochastyczne równania różniczkowe [10]. W wielu przypadkach metody te są często łączone z heurystycznym procesem podejmowania decyzji [7, 11, 12]. Dysponowanie przez NMI lokalnym pierwotnym lub wtórnym wzorcem częstotliwości (PFS lub SFS), tj. fontanną cezową, fontanną rubidową lub zegarem optycznym [11], pozwala tylko na zmianę horyzontu czasowego prognoz, ewentualnie może mieć większe znaczenie w przypadku okresu braku dostępności sygnałów z PFS/SFS [6, 11, 12]. Prognozowanie ma istotny wpływ na zapewnienie jak największej zgodności UTC(k) z UTC. Ponadto zapewnienie jak najlepszej tej zgodności stanowi wiarygodne źródło spójności pomiarowej w dziedzinie czasu i częstotliwości dla skali UTC(k), jak również możliwość precyzyjnej synchronizacji oraz niezależność od mniej wiarygodnych źródeł zewnętrznych.

Polska Skala Czasu UTC(PL) realizowana jest przez Zakład Czasu i Długości Głównego Urzędu Miar (GUM) w Warszawie z zastosowaniem aktywnego masera wodorowego VCH-1003M. Do roku 2016 prognozowanie UTC(PL) realizowane było w oparciu o wspomnianą metodę statystyczną regresji liniowej. Równolegle w Instytucie Metrologii, Elektroniki i Informatyki Uniwersytetu Zielonogórskiego (IMEI UZ) prowadzone były prace badawcze nad zastosowaniem różnych typów sieci neuronowych do prognozowania Polskiej Skali Czasu. Możliwość zastosowania sieci neuronowych do prognozowania wynika z ich właściwości. Sieci neuronowe są bardzo dobrym narzędziem matematycznym stosowanym do rozwiązywania bardzo złożonych problemów o charakterze nieliniowym [13]. Głównym celem tych prac badawczych było uzyskanie lepszej jakości

prognozowania UTC(PL) w stosunku do dotychczas stosowanej metody regresji liniowej [14, 15, 16, 17]. W rezultacie prac badawczych prowadzonych na różnych typach sieci neuronowych wykazano, że sieć neuronowa typu GMDH (ang. Group Method of Data Handling) [18] posiada najlepsze właściwości prognostyczne.

W wyniku przeprowadzonych prac badawczych opracowano procedurę prognozowania krajowej skali czasu UTC(k) z zastosowaniem sieci neuronowej typu GMDH [19]. W pierwszej kolejności poprawność działania opracowanej procedury zweryfikowano dla skal czasu realizowanych w oparciu o komercyjne cezowe zegary atomowe [20], masery wodorowe [21], oraz masery wodorowe nadzorowane pierwotnym wzorcem częstotliwości w postaci fontanny cezowej [22].

Wyniki badań zaprezentowane w powyższych publikacjach pokazały, że opracowana procedura jest uniwersalna, i umożliwi osiągnięcie bardzo dobrej jakości prognozowania UTC(PL) [24], jak i innych krajowych skal czasu UTC(k). Zaowocowało to tym, iż od 2016 do sterowania Polską Skalą Czasu UTC(PL) w Zakładzie Czasu i Długości GUM wykorzystywana jest procedura prognozowania oparta o sieć neuronową typu GMDH.

Celem pracy jest zaprezentowanie wyników badań przedstawiających cotygodniowe wyniki prognozowania Polskiej Skali Czasu UTC(PL) z zastosowaniem sieci neuronowej typu GMDH, bazując na rzeczywistych danych pomiarowych czasu fazowego realizującego UTC(PL) w GUM oraz wartości różnic UTCr - UTC(PL). W pracy przedstawiono wyniki prognozowania różnic dla UTC(PL) z interwałem jednodniowym na cały nadchodzący tydzień (od środy do następnej środy). Do tego celu zastosowano sieć neuronową typu GMDH z zastosowaniem opracowanej procedury [19], dla danych przygotowanych w postaci dwóch szeregów czasowych TS1 i TS2, zbudowanych na bazie różnic wyznaczonych wg skali UTC i UTC Rapid.

Metoda przygotowania szeregów czasowych TS1 i TS2

Istotnym elementem opracowanego systemu prognozowania bazującego na procedurze prognozowania, jest blok poświęcony przygotowaniu danych wejściowych dla sieci neuronowej typu GMDH w postaci szeregu czasowego. Odpowiednie przygotowanie tych danych w znaczący sposób decyduje o jakości otrzymanych prognoz. Na potrzeby prowadzenia prac badawczych, związanych z prognozowaniem Polskiej Skali Czasu UTC(PL), opracowano dwa szeregi czasowe, zawierające dane z odstępem jednodniowym (TS1 i TS2).

Szereg czasowy TS1 składa się z trzech rodzajów danych: wartości czasu fazowego $x_a(t)$ pomiędzy sygnałami 1 pps z UTC_{PL}(t) i zegara atomowego realizującego tę skalę (zegar_{PL}), wartości $x_b(t)$, stanowiących wartości UTC - UTC(k), oraz wartości $x_{br}(t)$ stanowiących wartości UTCr - UTC(k), wyznaczonych według poniższych zależności:

- (1) $x_a(t) = UTC_{PL}(t) - zegar_{PL}(t)$,
- (2) $x_b(t) = UTC(t) - UTC_k(t)$,
- (3) $x_{br}(t) = UTCr(t) - UTC_k(t)$.

Wartości $x_b(t)$ stanowią dane wyznaczone przez BIPM i publikowane w biuletynie „Circular T”. Ze względu na charakter danych z biuletynu (różnice wyznaczone są na dni MJD kończące się na cyfrę 4 i 9, czyli z interwałem pięciodniowym), dane te poddane zostały interpolacji wielomianem Hermite'a dostępnym w programie MATLAB (funkcja PCHIP). Dzięki temu wyznaczono wartości tych różnic na każdy dzień, jak również rozszerzono liczbę danych uczących, co zapewniło odpowiednią liczbę historycznych danych wejściowych dla sieci neuronowej

typu GMDH. Niewystarczająca liczba danych uczących może spowodować zaburzenia w procesie uczenia sieci neuronowej typu GMDH [16]. Zapewniło to również skrócenie okresu czasu dla danych historycznych, co ma również duże znaczenie w prognozowaniu UTC(k) w przypadku wymiany zegara. Wartości $x_{br}(t)$ stanowią dane wyznaczone przez BIPM w oparciu o skalę UTC Rapid i publikowane są w każdą środę na serwerze FTP.

Pierwszy podzbiór $x_1(t)$ zawiera grupy danych (od 1 do i) od dnia t_0 do dnia t_n , dla którego jest znana ostatnia wartość tego szeregu przed dniem każdej publikacji (t_{pub}), wyznaczony wg zależności:

$$(4) \quad x_1(t) = x_a(t) + x_b(t) = UTC(t) - zegar_{PL}(t).$$

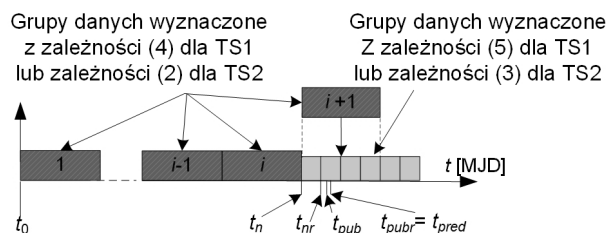
Drugi podzbiór $x_2(t)$ stanowi dopełnienie szeregu TS1 o grupę danych pomiędzy dniami t_n a t_{nr} , o wartościach wyznaczonych na podstawie zależności:

$$(5) \quad x_2(t) = x_a(t) + x_{br}(t) = UTCr(t) - zegar_{PL}(t).$$

Publikacja różnic $x_{br}(t)$ następuje w dniu t_{pubr} (środa), który jest jednocześnie pierwszym dniem prognozy (t_{pred}). Co tydzień następuje uzupełnienie danych szeregu czasowego TS1 o nowe dane obliczone na podstawie (5). Publikacja nowego biuletynu „Circular T” umożliwi obliczenie nowych danych $i+1$, wyznaczonych z zależności (4), które dla odpowiednich dni zastępują dotychczasowe dane wyznaczone na podstawie zależności (5).

Metoda przygotowania szeregu czasowego TS2 jest analogiczna z przygotowaniem szeregu TS1. Pierwszą grupę danych stanowią wyłącznie wartości $x_b(t)$ uzupełnione o brakujące wartości wyznaczone funkcją PCHIP. Natomiast druga grupa danych zbudowana jest tylko z wartości $x_{br}(t)$.

Ogólna metoda przygotowania szeregu czasowego TS1 i TS2 została zaprezentowana na rys. 1. Natomiast szczegółowy opis przygotowania szeregów TS1 i TS2 został przedstawiony w pracy [19, 23].



Rys.1. Ogólna metoda przygotowania szeregów czasowych TS1 i TS2

Sposób prowadzenia badań i ich wyniki

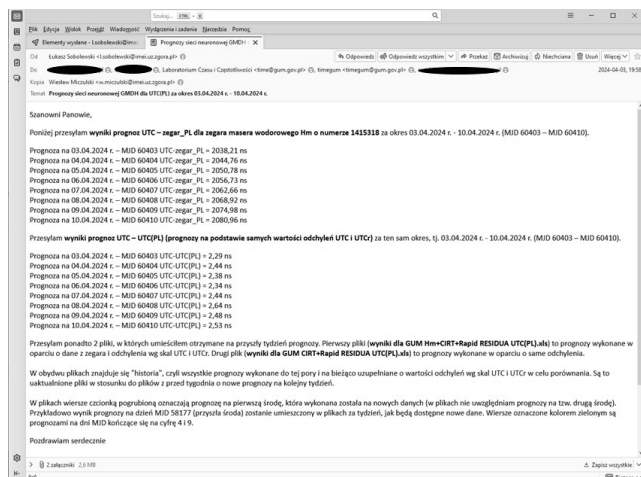
Prognozowanie Polskiej Skali Czasu UTC(PL) dla Zakładu Czasu i Długości GUM przez IMEI UZ prowadzone jest w każdą środę po opublikowaniu przez BIPM danych $x_{br}(t)$, z interwałem jednodniowym na cały nadchodzący tydzień (od środy do następnej środy). Do tego celu zastosowano sieć neuronową typu GMDH w narzędziu GMDH Shell z zastosowaniem opracowanej procedury. Na wejście sieci neuronowej typu GMDH podawano dane w postaci szeregów TS1 lub TS2.

W zależności od sposobu przygotowania szeregu czasowego, następuje odpowiednie prognozowanie wartości $x_b(t)$. W przypadku wykorzystania szeregu TS1 na wyjściu sieci GMDH otrzymywana jest prognoza tego szeregu ($x_{1p}(t_{pred})$). Po uwzględnieniu wartości czasu fazowego zegara realizującego skalę UTC(PL) $x_a(t_{pred})$, zmierzony w dniu wyznaczenia prognozy, prognoza różnicy $x_{bp}(t_{pred})$ obliczona jest z zależności:

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

W przypadku szeregu czasowego TS2 otrzymana wartość prognozy jest jednocześnie prognozowaną wartością $xbp(t_{pred})$. Wyznaczone wartości prognoz $xbp(t_{pred})$ stanowią podstawę korekcji UTC(PL).

Po przeprowadzeniu procesu prognozowania na cały nadchodzący tydzień (od środy do środy) wyniki prognoz przesyłane są pocztą elektroniczną do kierownictwa i pracowników Zakładu Czasu i Długości GUM odpowiedzialnych za sterowanie skalą UTC(PL). Na podstawie otrzymanych prognoz pracownik Zakładu Czasu i Długości GUM decyduje, czy skala czasu wymaga wprowadzenia korekty do femtosteppera. Przykładowy e-mail z wyznaczonymi prognozami dla UTC(PL) przesyłanymi do GUM zaprezentowano na rys. 2.



Rys.2. Zrzut ekranu przykładowej wiadomości e-mail wysyłanej do GUM z wyznaczonymi prognozami dla UTC(PL)

Wyniki badań prognozowania Polskiej Skali Czasu UTC(PL) na rzeczywistych danych pomiarowych zaprezentowano za okres od 1 stycznia 2024 (MJD 60310) do 31 maja 2024 roku (MJD 60461). Poprzez porównanie otrzymanych wartości prognoz $xbp(t)$ z wartościami $xb(t)$ można określić jakość prognozowania Polskiej Skali Czasu UTC(PL). Rozbieżność pomiędzy prognozowaną wartością $xbp(t)$, a wartością $xb(t)$, publikowaną przez BIPM na ten sam dzień prognozy (t_{pred}), określa residuum (r), obliczone z zależności:

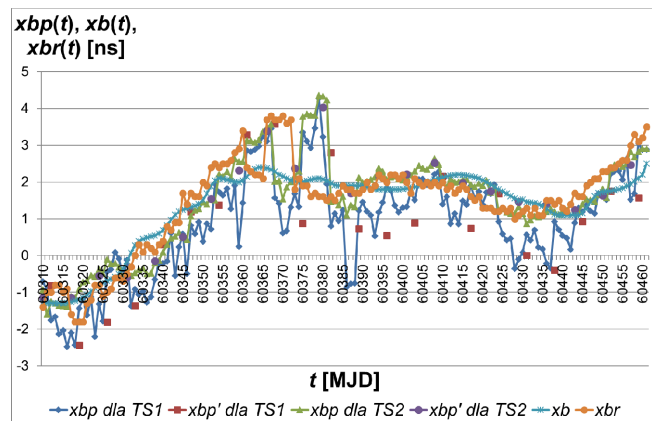
$$(7) \quad r(t_{pred}) = xb(t_{pred}) - xbp(t_{pred}).$$

Natomiast analiza samych wartości $xb(t)$ dla UTC(PL) wskazuje na jej jakość. Im wartości $xb(t)$ publikowane przez BIPM są bliższe zeru, tym skala czasu charakteryzuje się lepszą dokładnością. Skale czasu UTC(k), których wartości $xb(t)$ mieszczą się w granicy ± 10 ns, należą do grupy najlepszych skal czasu. Kolejne dwie grupy skal są zdefiniowane przedziałami ± 20 ns i ± 50 ns.

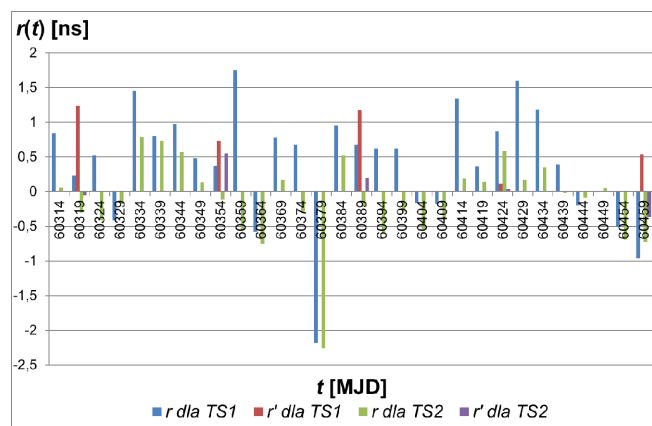
Na rys. 3 przedstawiono wyniki prognoz otrzymane dla szeregów czasowych TS1 i TS2 za okres od MJD 60310 do MJD 60461 z uwzględnieniem dwóch prognoz na ten sam dzień MJD (prognozy wykonywane na środę). Wynika to z prowadzonego procesu prognozowania UTC(PL), gdzie w każdym tygodniu wysyłane do GUM prognozy zawierają prognozę na bieżącą i przyszłą środę. Natomiast na rys. 4 przedstawiono otrzymane wartości residuów na dni MJD kończące się na cyfrę 4 i 9 za ten sam okres czasu.

Analiza wartości $xb(t)$ dla UTC(PL) w prezentowanym okresie czasu (rys. 3) pokazuje bardzo dobrą jakość Polskiej Skali Czasu UTC(PL). Wyznaczone przez BIPM wartości różnic $xb(t)$ dla UTC(PL) na dni MJD kończące się na cyfrę 4 i 9 nie przekraczają granicy $\pm 2,4$ ns, co świadczy o bardzo dobrej jakości sterowania UTC(PL), zbliżonej do

czołowych skal czasu UTC(k), przykładowo Angielskiej UTC(NPL), Francuskiej UTC(OP) czy Niemieckiej UTC(PTB), które do sterowania zegarami realizującymi daną UTC(k) wykorzystują pierwotne wzorce częstotliwości w postaci fontanny cezowej.



Rys.3. Otrzymane wartości prognoz dla skali UTC(PL) dla szeregów czasowych TS1 i TS2 zestawione z wartościami $xb(t)$ i $xbr(t)$



Rys.4. Otrzymane wartości residuów dla skali UTC(PL) dla szeregów czasowych TS1 i TS2

Na podstawie obliczonych wartości residuów (r) wyznaczono wartości wybranych miar jakości prognoz [24]: błąd średni ME wraz z jego wartością procentową MPE , absolutny błąd średni MAE wraz z jego wartością procentową $MAPE$, błąd średniokwadratowy MSE wraz z jego składowymi (MSE_1 , MSE_2 , MSE_3) oraz pierwiastek z błędów średniokwadratowych ($RMSE$). Przedstawiono je w Tabeli 1. Ocena jakości prognoz $xbp(t_{pred})$ przeprowadzono na podstawie residuów, oraz wybranych miar jakości prognoz [24].

Z przedstawionych wyników badań zaprezentowanych na rys. 3 i 4 oraz Tabeli 1 sformułowano następujące wnioski:

1. Porównanie wartości wszystkich miar jakości prognoz oraz residuów wskazuje, że najlepszą jakość prognozowania otrzymano dla przypadku prognozowania UTC(PL) TS2.
2. We wszystkich badanych przypadkach prognozowania skali UTC(PL) otrzymane wartości residuów mieszczą się w granicy $\pm 2,3$ ns, co świadczy o bardzo dobrej jakości prognozowania.
3. Z porównania wartości błędów ME (i MPE), MAE (i $MAPE$) i MSE_1 wynika, że dla wszystkich przypadków prognozowania skali UTC(PL) prognozy są nieobciążone. Zaobserwowane wartości residuów są różnokierunkowe.

4. Dla wszystkich przypadków prognozowania skali UTC(PL), czy to w oparciu o szereg czasowy TS1, czy TS2 występują bardzo małe wartości składowych MSE_2 i MSE_3 . Oznacza to bardzo dobre 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(PL).

Tabela 1. Wartości miar jakości prognoz dla UTC(PL) i szeregów czasowych TS1 i TS2

Miary jakości prognoz	UTC(PL) TS1	UTC(PL)' TS1	UTC(PL) TS2	UTC(PL)' TS2
max [ns]	1,75	1,75	0,79	0,79
min [ns]	-2,18	-2,18	-2,26	-2,26
ME [ns]	0,41	0,50	-0,13	0,09
MPE [%]	32,95	32,55	7,69	8,36
MAE [ns]	0,76	0,78	0,43	0,40
MAPE [%]	58,69	60,85	33,07	31,45
MSE [ns ²]	0,82	0,87	0,35	0,34
MSE ₁ [ns ²]	0,17	0,25	0,02	0,01
MSE ₂ [ns ²]	0,12	0,14	0,06	0,06
MSE ₃ [ns ²]	0,53	0,49	0,27	0,27
RMSE [ns]	0,91	0,93	0,60	0,58

Na podstawie otrzymanych wartości prognoz, obliczonych wartości reszduów (r) i wybranych miar jakości prognoz można stwierdzić bardzo dobrą jakość prognozowania Polskiej Skali Czasu UTC(PL) z zastosowaniem opracowanej procedury prognozowania bazującej na sieci neuronowej typu GMDH. Różnice pomiędzy otrzymaną wartością prognozy, czy to dla szeregu czasowego TS1, czy szeregu czasowego TS2 nieznacznie różnią się od wartości różnic $xb(t)$ i $xbr(t)$. Zaobserwowano również bardzo dużą zgodność pomiędzy prognozami na ten sam dzień MJD (ostatni dzień prognozowania w danym tygodniu i pierwszy dzień nowego tygodnia), co pokazuje bardzo dobre właściwości prognostyczne opracowanej procedury prognozowania.

Podsumowanie

Otrzymane cotygodniowe wyniki prognozowania skali UTC(PL) pokazują bardzo dobrą zbieżność ze skalą UTC. Dla zaprezentowanego okresu czasu różnica pomiędzy UTC(PL), a UTC nie przekracza $\pm 2,3$ ns. Analogiczna różnica dla interwału przekraczającego 2 lata mieści się w przedziale ± 5 ns. Dodatkowo, otrzymane wyniki prognoz na ostatni dzień prognozowania w danym tygodniu są bardzo zbieżne z wynikami prognoz na pierwszy dzień nowego tygodnia prognozowania, co ilustruje bardzo dobrą jakość prognozowania i uniwersalność opracowanej przez Autora procedury prognozowania z zastosowaniem sieci neuronowej typu GMDH.

Autorzy: dr inż. Łukasz Sobolewski, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Metrologii, Elektroniki i Informatyki, ul. prof. Z. Szafrana 2 65-516 Zielona Góra, E-mail: l.sobolewski@imei.uz.zgora.pl.

LITERATURA

[1] BIPM Annual Report on Time Activities, *Bureau International des Poids et Mesures*, 15 (2020), Sevres, France
 [2] Panfilo G., Arias E. F., The Coordinated Universal Time (UTC), *Metrologia*, 56 (2019), nr 4

[3] Arias E. F., Lewandowski W., Modern Application of Timescales, *Metrologia*, 48 (2011), nr 4
 [4] Arias E. F., Panfilo G., Petit G., Timescales at the BIPM, *Metrologia*, 48 (2011), nr 4, 145-153
 [5] Petit G., Arias e. F., Harmegnies A., Panfilo G., Tisserand L., UTCr: a rapid realization of UTC, *Metrologia*, 51 (2014), nr 1, 33-39
 [6] BIPM Time Department Data Base, źródło: <https://webtai.bipm.org/database/clock.html>, dostęp: 24.06.2024
 [7] Czubla A., Konopka J., Nawrocki J., Realization of atomic SI second definition in context UTC(PL) and TA(PL), *Metrol. Meas. Syst.*, 12 (2006), nr 2, 49-159
 [8] Bernier L. G., Use of the Allan deviation and linear prediction for the determination of the uncertainty on time calibrations against predicted timescales, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 52 (2003), nr 2, 483-486
 [9] Davis J. A., Shemar S. L., Whibberley P. B., A Kalman filter UTC(k) prediction and steering algorithm, in Proc. *Joint IEEE (FCS EFTF)*, Maj 2011, 779-784.
 [10] Panfilo G., Tavella P., Atomic clock prediction based on stochastic differential equations, *Metrologia*, 45 (2008), nr 6, 108-116
 [11] Rovera G. D., Bize S., Chupin B., Guena J., Laurent P., Rosenbusch P., Uhrich P., Abgrall M., UTC(OP) based on LNE-SYRTE atomic fountain primary frequency standards, *Metrologia*, 53 (2016), nr 3, 81-88
 [12] Performance of UTC(NIST) and UTC(NIST) Adjustments, źródło: <https://www.nist.gov/pml/time-and-frequency-division/time-services/utcnist-time-scale/performance-utcnist-and-utcnist>, dostęp: 24.06.2024.
 [13] Nelles O., Nonlinear system identification, *From Classical Approaches to Neural Networks and Fuzzy Models*, London, U.K.: Springer-Verlag, 2001
 [14] Miczulski W., Sobolewski Ł., Application of the GMDH neural networks in prediction of corrections of the national time scale, *Electronics: Constructions, Technologies, Applications*, 6 (2011), 45-47
 [15] Kaczmarek J., Miczulski W., Kozioł M., Czubla A., Integrated system for monitoring and control of the national time and frequency standard, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 62 (2013), nr 10, 2828-2838
 [16] Miczulski W., Sobolewski Ł., Influence of the GMDH neural network data preparation method on UTC(PL) correction prediction results, *Metrol. Meas. Syst.*, 19 (2012), nr 1, 123-132
 [17] Sobolewski Ł., Comparison of linear regression method and GMDH neural network in predicting the UTC(PL) national timescale, *Przegląd Elektrotechniczny*, 11 (2018)
 [18] Iwachnienko A. G., Iwachnienko G. A., Savchenko E. A., Wunsch D., Problems of Further Development of the GMDH Algorithms: Part 2, *Pattern Recognition and Image Analysis*, 12 (2002), nr 1, 6-18
 [19] Miczulski W., Sobolewski Ł., Algorithm for predicting [UTC - UTC(k)] by means of neural networks, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 66 (2017), nr 8, 2136-2142
 [20] Sobolewski Ł., Predicting the Lithuanian Timescale UTC(LT) by means of GMDH neural network, *Bulletin of the Military University of Technology*, 66 (2017), 31-41
 [21] Sobolewski Ł., Application of GMDH type neural network for predicting UTC(k) timescales realized on the basis of hydrogen masers, in Proc. *Joint IEEE (FCS EFTF)*, Lipiec 2017, 42-46
 [22] Sobolewski Ł., Jakość prognozowania skali czasu nadzorowanej przez pierwotny wzorzec częstotliwości z zastosowaniem sieci neuronowej typu GMDH na przykładzie skali czasu UTC(NPL), *Przegląd Elektrotechniczny*, 11 (2022)
 [23] Sobolewski L., Miczulski W., Czubla A., Experimental Verification of the Neural Network Predicting Procedure Applied for UTC(PL), *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 70 (2021), 1-9
 [24] Caldwell R. B., Performance metrics for neural network-based trading system development, *NeuroVest Journal*, 3 (1995), 22-26