

doi:10.15199/48.2022.11.25

Jakość prognozowania skali czasu nadzorowanej przez pierwotny wzorzec częstotliwości z zastosowaniem sieci neuronowej typu GMDH na przykładzie skali czasu UTC(NPL)

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań prognozowania wartości różnic dla skali UTC(NPL) oraz dla danych przygotowanych w postaci szeregu TS1 i TS2. Uzyskano bardzo dobrą jakość prognozowania skali czasu UTC(NPL). Otrzymane wartości prognoz różnią się od różnic publikowanych przez BIPM na ten sam dzień prognozy o maksymalnie $\pm 4,8$ ns, zarówno dla szeregu TS1, jak i dla TS2.

Abstract. The article presents research results on predicting the differences for UTC(NPL) timescale for data prepared in the form of time series TS1 and TS2. Very good quality of prediction has been obtained for UTC(NPL) timescale. Obtained values of predictions differ from the differences published by the BIPM at the same day of prediction by max ± 4.8 ns for time series TS1 and TS2. (Quality of Predicting Time Scale Supervised by The Primary Frequency Standard by Means of GMDH Type Neural Network on The Example Of UTC(NPL) Timescale).

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

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

Wstęp

Informacje zawarte w biuletynie „Circular T” [1] pokazują, że aktualnie przeszło 50% krajowych skal czasu UTC(k) realizowanych jest w oparciu o masery wodorowe. Ponadto skale czasu UTC(k) charakteryzujące się najmniejszymi wartościami [UTC – UTC(k)] realizowane są w oparciu o masery wodorowe dodatkowo nadzorowane przez pierwotne wzorce częstotliwości w postaci fontanny cezowej (PFS). Są to czołowe Narodowe Instytuty Metrologiczne NMI (ang. National Metrology Institutes). Takie działania związane są z potrzebą dysponowania przez NMI częstotliwością o wysokiej dokładności i stabilności oraz możliwością jej precyzyjnej synchronizacji, co stanowi często podstawę bezpieczeństwa i jakości funkcjonowania wielu systemów i prowadzenia prac naukowych o charakterze podstawowym. W tym obszarze prowadzone są obecnie bardzo ważne i zaawansowane prace nad przyszością definicji sekundy według układu SI oraz nad rewizją definicji międzynarodowego uniwersalnego czasu koordynowanego UTC (ang. Universal Coordinated Time) [2]. Dotyczą one również jakości oraz formalnego i praktycznego statusu skal czasu, dystrybuowanych przez satelitarne systemy nawigacji satelitarnej GNSS. Prace te obejmują także sposoby lokalnych realizacji skal czasu UTC(k), będących podstawą do wyznaczania czasu urzędowego.

Skale UTC(k), utrzymywane przez NMI są fizycznymi realizacjami skali UTC i nadzorowane są przez Międzynarodowe Biuro Wag i Miar BIPM (fr. Bureau International des Poids et Mesures) [1, 3, 4]. W każdym miesiącu oraz w każdym tygodniu dla poszczególnych UTC(k) wyznaczone są przez BIPM różnice, obliczane odpowiednio z zależności:

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

$$(2) \quad xbr(t) = UTCr(t) - UTC_k(t).$$

Różnice $xb(t)$ określają rozbieżność krajowych skal czasu w stosunku do skali UTC, natomiast różnice $xbr(t)$ rozbieżność w stosunku do skali UTC Rapid [1]. Różnice $xb(t)$ publikowane są w biuletynie „Circular T” na dni MJD kończące się na cyfrę 4 i 9 (z odstępem pięciodniowym), między 8. a 12. dniem następnego miesiąca. Opóźnienie publikacji różnic $xb(t)$ przez BIPM wpływa niekorzystnie na

utrzymanie zgodności UTC(k) z UTC. Spowodowane jest ono procesem gromadzenia danych oraz czasochłonnym i bardzo złożonym procesem wyliczania skali UTC przez BIPM [1, 2]. Wymagane jest wcześniejsze odpowiednie przygotowanie i weryfikacja danych pomiarowych z lokalnych i zdalnych porównań ponad 700 zegarów atomowych [5], przesyłanych do BIPM przez Narodowe Instytuty Metrologiczne, Instytuty Desygnowane (DI) i inne laboratoria odpowiedzialne za realizację lokalnych skal czasu UTC(k). Dlatego w celu przyspieszenia przekazywania informacji o rozbieżności UTC(k) w stosunku do UTC, BIPM w 2012 r. uruchomił projekt „A Rapid UTC” [6]. Na podstawie skali UTC Rapid w każdą środę na serwerze FTP BIPM publikowane są różnice $xbr(t)$ wyznaczone za poprzedni tydzień dla poszczególnych zegarów realizujących skale UTC(k). Mimo to, z uwagi na opóźnione publikowania różnic $xb(t)$ oraz $xbr(t)$, zapewnienie jak największej zgodności UTC(k) w stosunku do UTC jest możliwe jedynie poprzez prowadzenie działań korygujących krajową skalę czasu UTC(k) przez NMI.

W wielu krajach wyznaczanie UTC(k) przez NMI jest oparte na ich prognozowaniu (skali czasu lub częstotliwości) z zastosowaniem metod statystycznych: regresji liniowej [7], odchylenia Allana [8], filtru Kalmana [9], czy stochastycznych równań różniczkowych [10], często w połączeniu z heurystycznym procesem podejmowania decyzji [7, 11, 12]. Posiadanie lokalnego pierwotnego (PFS) lub wtórnego (SFS) wzorca częstotliwości, tj. fontanny cezowej, rubidowej lub zegara optycznego, zmienia tylko horyzont czasowy prognoz lub ma większe znaczenie w okresach braku dostępności sygnałów z PFS/SFS [5, 11, 12, 13]. Prognozowanie ma istotny wpływ na zapewnienie jak największej zgodności UTC(k) z UTC. Zapewnienie jak najlepszej zgodności UTC(k) z UTC stanowi ponadto: wiarygodne źródło spójności pomiarowej w dziedzinie czasu i częstotliwości dla skali UTC(k), możliwość precyzyjnej synchronizacji oraz niezależność od mniej wiarygodnych źródeł zewnętrznych.

W Instytucie Metrologii, Elektroniki i Informatyki Uniwersytetu Zielonogórskiego (IMEI UZ) wykonano szereg prac nad zastosowaniem różnych typów sieci neuronowych, których celem było uzyskanie lepszej jakości prognozowania Polskiej Skali Czasu UTC(PL) w stosunku do dotychczas stosowanej metody regresji liniowej [14, 15,

16, 17]. Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że najlepszymi właściwościami prognostycznymi charakteryzuje się sieć neuronowa typu GMDH [18], należąca do grupy sieci samoorganizujących. Rezultatem badań nad zastosowaniem sieci neuronowej typu GMDH do prognozowania UTC(PL) było opracowanie procedury prognozowania lokalnych skal czasu UTC(k) w oparciu o sieć neuronową typu GMDH [19]. Poprawność działania opracowanej procedury została zweryfikowana dla wybranych skal czasu UTC(k), realizowanych w oparciu o pojedyncze, komercyjne zegary cezowe oraz masery wodorowe [20, 21, 22]. Narzędzia oparte o sztuczną inteligencję, w tym sieci neuronowe, zaczynają być również stosowane w badaniach dotyczących sterowania lokalnymi skalami czasu UTC(k) przez inne NMI [23]. Efektem prowadzonych prac w IMEI UZ było umocnienie współpracy z Głównym Urzędem Miar GUM i rozpoczęcie od października 2016 r. (i prowadzenie do tej pory) prognozowania Polskiej Skali Czasu UTC(PL) w czasie rzeczywistym na podstawie danych bieżących. Rezultaty tych badań zostały zaprezentowane w pracy autora [24].

Koncepcja zastosowania sieci neuronowych wynikała z ich właściwości. Są one bardzo dobrym narzędziem matematycznym stosowanym do rozwiązywania bardzo złożonych problemów o charakterze nieliniowym [13]. Sieci neuronowe wykorzystywane są tam, gdzie występuje częściowy lub całkowity brak znajomości reguł opisujących obiekty lub procesy [13]. Utworzone przez sieć neuronową modele behawioralne mają wewnętrzną budowę i zasadę działania, które odpowiadają zachowaniu się modelowanych obiektów lub procesów. Unikatową właściwością sieci neuronowych jest możliwość budowania modeli metodą opierającą się wyłącznie na analizie konkretnych przykładów, czyli metodą indukcyjną.

Celem pracy jest sprawdzenie jakości prognozowania skali czasu UTC(NPL), utrzymywanej w National Physical Laboratory w Teddington pod Londynem. Skala UTC(NPL) realizowana jest w oparciu o jeden z maserów wodorowych, nadzorowany dodatkowo przez fontannę cezową (PFS). W pracy przedstawiono wyniki prognozowania różnic $xb(t)$ dla UTC(NPL) z zastosowaniem sieci neuronowej GMDH oraz opracowanej procedury [19] dla danych wejściowych, przygotowanych w postaci dwóch szeregów czasowych TS1 i TS2, zbudowanych na bazie różnic wyznaczonych wg skali UTC i UTC Rapid.

Proces przygotowania 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 różnice $xb(t)$ oraz $xbr(t)$. Sposób przygotowania danych wejściowych dla sieci neuronowej typu GMDH w oparciu o opracowaną procedurę prognozowania został szczegółowo opisany w wielu pracach autora, m. in. w pracach [19, 24]. Jednakże w celu przypomnienia i właściwego zobrazowania procesu przygotowania danych wejściowych, autor poniżej przytacza metodologię opracowania dwóch szeregów czasowych TS1 oraz TS2.

Pierwszy utworzony szereg czasowy TS1 składa się z dwóch podzbiorów (rysunek 1). Pierwszy podzbiór zawiera grupy danych (od 1 do i) wyznaczone według zależności:

$$(3) \quad x_1(t) = xa(t) + xb(t) = UTC(t) - zegarHM_{NPL}(t).$$

Są to elementy szeregu czasowego TS1 wyznaczone od dnia t_0 do dnia t_n , dla którego była znana ostatnia wartość tego szeregu przed dniem każdej publikacji biuletynu „Circular T” (t_{pub}). Wartości $xa(t)$ stanowią historyczne wyniki pomiarów czasu fazowego pomiędzy sygnałami 1

pps z $UTC_{NPL}(t)$ i masera wodorowego realizującego tę skalę ($zegarHM_{NPL}$), określone na każdy dzień zgodnie z zależnością:

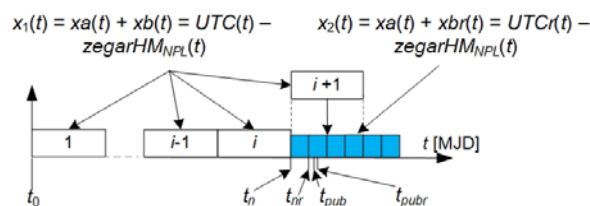
$$(4) \quad xa(t) = UTC_{NPL}(t) - zegarHM_{NPL}(t).$$

Natomiast wartości $xb(t)$ stanowią dane opublikowane w biuletynie „Circular T” z odstępem pięciodniowym. W celu rozszerzenia liczby danych uczących zbiór wartości $xb(t)$ poddany został interpolacji funkcją PCHIP (interpolacja Hermite'a dostępna w MATLAB). Dzięki temu możliwe było wyznaczenie wartości tych różnic na każdy dzień.

Drugi podzbiór danych wyznaczony za okres od t_n do t_{nr} , stanowi dopełnienie szeregu TS1 o grupę danych wynikających z co tygodniowych obliczeń UTC Rapid przez BIPM, o wartościach wyznaczonych na podstawie zależności:

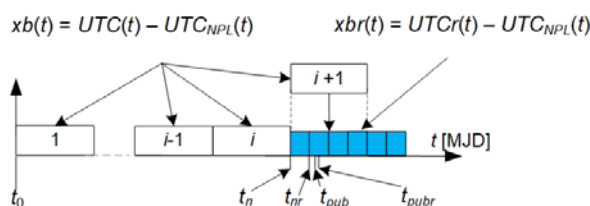
$$(5) \quad x_2(t) = xa(t) + xbr(t) = UTCr(t) - zegarHM_{NPL}(t).$$

Publikacja wartości różnic $xbr(t)$ następuje w dniu t_{pubr} (rysunek 1). Oznacza to, że dzień publikacji różnic $xbr(t)$ może stanowić jednocześnie dzień prognozowania wartości różnicy $xb(t)$ dla UTC(NPL) (dzień t_{pred}), zwany dalej $xb_p(t_{pred})$. Co tydzień szereg czasowy TS1 może być uzupełniany o nowe grupy danych obliczonych na podstawie (5). Umożliwia to wyznaczanie w kolejnych tygodniach nowych wartości prognoz $xb_p(t_{pred})$. Przeważnie, w pierwszej dekadzie miesiąca, po opublikowaniu nowego biuletynu „Circular T” z różnicami $xb(t)$ tworzona jest na podstawie (3) nowa grupa danych $i+1$ (rysunek 1). Zastępuje ona dotychczasowe dane wyznaczone na podstawie (5).



Rys. 1. Metoda przygotowania szeregu czasowego TS1

Autor przygotowując metodykę tworzenia danych wejściowych dla sieci neuronowej wziął pod uwagę również sytuację, w której może zaistnieć konieczność zastąpienia zegara atomowego realizującego krajową skalę UTC(NPL) innym zegarem. Sytuacja ta może mieć miejsce w przypadku awarii zegara atomowego realizującego skalę czasu UTC(k), lub zmianę zegara na inny model, tak jak przedstawiono to w pracy autora [24]. Może to spowodować brak wymaganej liczby danych do utworzenia szeregu czasowego TS1 w celu wyznaczania wartości prognozy $xb_p(t_{pred})$. W tym celu przez autora zaproponowane zostało rozwiązanie alternatywne. Mowa o zaproponowanym szeregu czasowym TS2, który bazuje wyłącznie na publikowanych przez BIPM różnicach $xb(t)$ oraz $xbr(t)$ (rysunek 2).



Rys. 2. Metoda przygotowania szeregu czasowego TS2

Szereg czasowy TS2 również zbudowany jest z dwóch podzbiorów danych. Zasada przygotowania tych

podzbiorów danych jest analogiczna z zasadą opisaną dla szeregu czasowego TS1. Jediną różnicę stanowi fakt, iż elementami pierwszego podzbioru są wyłącznie wartości różnic $xb(t)$, uzupełnione o brakujące wartości wyznaczone funkcją PCHIP. Natomiast drugi podzbiór danych składa się tylko z wartości różnic $xbr(t)$.

Prowadzenie badań i ich wyniki

Prognozowanie skali czasu UTC(NPL) prowadzono z zastosowaniem sieci neuronowej typu GMDH dostępnej w komercyjnym narzędziu GMDH Shell.

Proces prowadzenia badań związanych z prognozowaniem skali czasu UTC(NPL) wymaga w pierwszej kolejności przygotowania zbiorów danych uczących dla sieci neuronowej typu GMDH według metod opisanych w poprzednim rozdziale. Ze względu na specyfikę publikacji danych UTC Rapid zbiory danych uczących przygotowywane były w każdą środę po opublikowaniu na serwerze FTP BIPM różnic $xbr(t)$ dla UTC(NPL) za cały poprzedni tydzień (od poniedziałku do niedzieli) oraz pobraniu danych czasu fazowego pomiędzy UTC(NPL) a maserem wodorowym realizującym tę skalę. Dane uczące dla prognozowania skali czasu UTC(NPL) zostały przygotowane w arkuszu kalkulacyjnym MS EXCEL, co umożliwi ich bezpośrednio wprowadzenie do narzędzia GMDH Shell.

Prognozowanie wartości różnic dla UTC(NPL) wykonywane jest na dni MJD kończące się na cyfrę 4 lub 9, zgodnie z algorytmem przedstawionym w pracy [19]. Takie podejście zostało przyjęte w celu możliwości bezpośredniego porównania wyników prognoz z wartościami różnic $xb(t)$, publikowanych przez BIPM na dni MJD kończące się cyfrą 4 i 9. W pierwszym etapie prognozowania wykonywany jest dobór parametrów uczenia sieci neuronowej typu GMDH. Prowadzony jest on w procesie prognozowania z horyzontem jednodniowym na dzień ostatniej znanej wartości $xbr(t)$ dla UTC(NPL) (niedziela). Taki sposób działania pozwala otrzymać jak najmniejszą rozbieżność pomiędzy wyznaczoną prognozą, a wartością różnicy $xbr(t)$ określoną przez BIPM.

W drugim etapie, w zależności od sposobu przygotowania szeregu czasowego, następuje odpowiednie prognozowanie wartości różnicy $xb(t)$ dla UTC(NPL). W przypadku zastosowania szeregu czasowego TS1 na wyjściu sieci neuronowej typu GMDH otrzymywana jest prognoza tego szeregu ($x_{1p}(t_{pred})$). Po uwzględnieniu zmierzonej w dniu wyznaczenia prognozy wartości czasu fazowego $xa(t_{pred})$, prognoza różnicy $xb_p(t_{pred})$ obliczona jest z zależności

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

Dla szeregu czasowego TS2 wyznaczona wartość prognozy jest jednocześnie wyznaczoną wartością prognozowanej różnicy $xb_p(t_{pred})$.

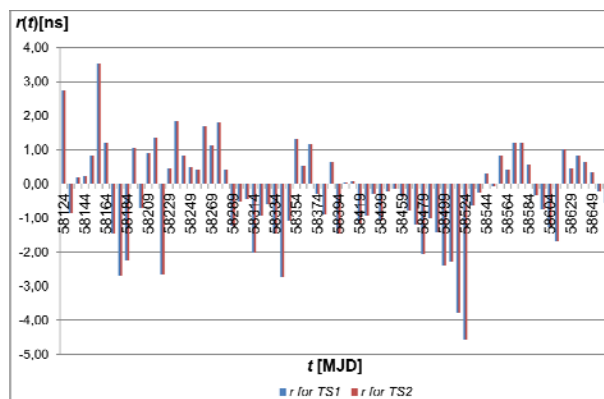
Prognozowanie wartości różnic na dni MJD 4 lub 9 wynika ze specyfikacji prowadzenia badań opisanej powyżej. Podczas prognozowania UTC(NPL) w danym tygodniu mogą wystąpić przypadki wyznaczenia dwóch prognoz na dni MJD kończące się cyfrą 4 i 9. Autor zdecydował, że ze względu na krótszy horyzont prognozy pod uwagę brana jest pierwsza uzyskana prognoza w przypadku wystąpienia takiej sytuacji.

Wyniki badań prognozowania różnic dla skali czasu UTC(NPL) prowadzono za okres 18 miesięcy, od MJD 58124 (06.01.2018 r.) do MJD 58664 (30.06.2019 r.). Na wejście sieci neuronowej typu GMDH podawano dane w postaci szeregów TS1 lub TS2.

Otrzymane wyniki badań, zaprezentowane na rysunku 3, przedstawiono w postaci reszduów (r), czyli różnic

pomiędzy prognozowaną wartością różnicy $xb_p(t)$, a różnicą $xb(t)$ publikowaną przez BIPM na ten sam dzień prognozy (t_{pred}), obliczone z zależności:

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



Rys.3. Otrzymane wartości reszduów dla skali UTC(NPL) dla szeregów czasowych TS1 i TS2

Na podstawie obliczonych reszduów (r) wyznaczono wartości wybranych miar jakości prognoz [25]: 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. Ocenę jakości prognoz $xb_p(t_{pred})$ przeprowadzono na podstawie reszduów, oraz wybranych miar jakości prognoz [25].

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

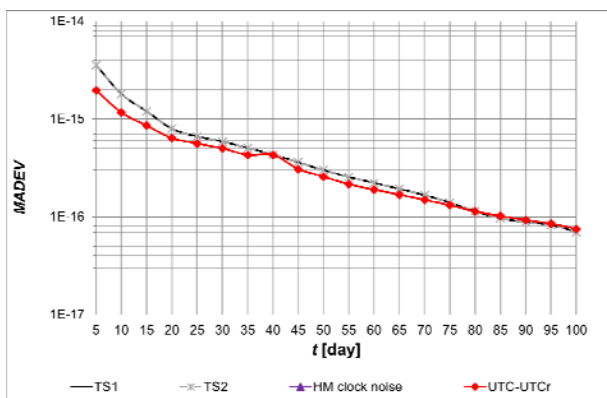
Miara jakości prognozy	UTC(NPL) dla TS1	UTC(NPL) dla TS1
max [ns]	3,5	3,5
min [ns]	-4,8	-4,8
ME [ns]	-0,3	-0,3
MAE [ns]	1,1	1,1
MSE [ns ²]	2,0	2,0
MSE_1 [ns ²]	0,07	0,07
MSE_2 [ns ²]	0,05	0,05
MSE_3 [ns ²]	1,9	1,9
$RMSE$ [ns]	1,4	1,4

Z przedstawionych wyników badań (rysunek 3) oraz Tabeli 1 sformułowano następujące wnioski:

1. Porównanie wartości wszystkich miar jakości prognoz oraz reszduów wskazuje, że nie ma różnicy w jakości prognozowania pomiędzy szeregiem TS1, a TS2. Wynika to ze specyfiki realizacji skali czasu UTC(NPL) i utrzymywania wartości czasu fazowego zegara realizującego tę skalę na stałym poziomie.
2. W przypadku skali UTC(NPL) wszystkie otrzymane wartości reszduów mieszczą się w granicy $\pm 4,8$ ns dla szeregu TS1 oraz TS2.
3. Z porównania wartości błędów ME , MAE i MSE_1 wynika, że w przypadku skali UTC(NPL) i szeregów TS1 i TS2 prognozy są nieobciążone. Zaobserwowane wartości reszduów są różnokierunkowe.
4. Dla skali UTC(NPL) i obu szeregów występują również 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).

Na rysunku 4 przedstawiono porównanie zależności zmodyfikowanego odchylenia Allana ($MADEV$) od interwału

obserwacji (τ) dla wyznaczonych prognoz z zastosowaniem sieci neuronowej typu GMDH, i porównanie do UTC Rapid i niestabilności zegara. Pozwala to na porównanie rzeczywistych granic niestabilności zegarów i skal czasowych z niestabilnością prognozowanych residuów i w ten sposób zweryfikować, czy predykcja poprawia, czy pogarsza stabilność otrzymanej skali czasu.



Rys.4. Zmodyfikowane odchylenie Allana dla TS1 i TS2 w porównaniu z niestabilnością zegara i skali UTC Rapid

W przypadku wyników MADEV dla TS1 i TS2 otrzymano niestabilność częstotliwościową i czasową na poziomie $5,9E-16$ i $0,88$ ns dla $\tau = 30$ dni. Dla UTC Rapid otrzymano niestabilność częstotliwościową i czasową na poziomie $5,0E-16$ i $0,75$ ns dla $\tau = 30$ dni, co pokazuje, że otrzymane niestabilności prognoz dla TS1 i TS2 są bardzo zbliżone do niestabilności skali UTC Rapid. Jeżeli chodzi o niestabilność masera wodorowego, to specyfika realizacji UTC(NPL) (stała wartość czasu fazowego zegara) wpływa na fakt, iż MADEV dla tego przypadku ma wartość 0 ns.

Podsumowanie

Wyniki badań wykazały bardzo dobrą jakość prognozowania dla skali czasu UTC(NPL). Duży wpływ na osiągnięcie tak dobrej jakości prognozowania ma specyfika realizacji skali czasu UTC(NPL). Maser wodorowy realizujący tę skalę dodatkowo nadzorowany jest przez pierwotny wzorzec częstotliwości, co umożliwia zakwalifikowanie UTC(NPL) do grupy najlepszych skal czasu. Aktualnie do realizacji UTC(PL) również wykorzystywany jest maser wodorowy, co jest właściwym kierunkiem działań. Wyniki badań nad prognozowaniem UTC(PL) realizowanej przez maser wodorowy przedstawione w pracy [24] wykazały znaczącą poprawę jakości prognozowania w stosunku do zegara cezowego.

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*, 13 (2018), 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] BIPM Time Department Data Base, źródło: <https://webtai.bipm.org/database/clock.html>, dostęp: 12.07.2022
- [6] Petit G., Arias e. F., Harmegnies A., Panfilo G., Tisserand L., UTCr: a rapid realization of UTC, *Metrologia*, 51 (2014), nr 1, 33-39
- [7] Czubla A., Konopka J., Nawrocki J., Realization of atomic SI second definition in context UTC(PL) and TA(PL), *Metrologia*, 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: 12.07.2022.
- [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, *Metrologia*, 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., 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
- [21] 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
- [22] Sobolewski Ł., Comparison of quality of UTC(PL) and UTC(NPL) scales prediction by means of GMDH neural network, *Measurement Systems in theory and in practice*, Zielona Góra, 229-242, 2020
- [23] Tanebe T., Ye J., Suzuyama T., Kobayashi T., Yamaguchi Y., Yasuda M., Potential for improving the local realization of coordinated universal time with a convolutional neural network, *Review of Scientific Instruments*, 90 (2019), nr 12
- [24] Sobolewski Ł., Miczulski W., Czubla A., Experimental Verification of the Neural Network Predicting Procedure Applied for UTC(PL), *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 70 (2021), 1-9
- [25] Caldwell R. B., Performance metrics for neural network-based trading system development, *NeuroVest Journal*, 3 (1995), 22-26