

УДК 006.92.034(476)

Е. Н. Такун

МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЭТАЛОН ЕДИНИЦ: ВРЕМЕНИ – СЕКУНДЫ, ЧАСТОТЫ – ГЕРЦА И ШКАЛЫ ВРЕМЕНИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

В статье приведены описание, состав модернизированного национального эталона единиц времени – секунды, частоты – герца и шкалы времени Республики Беларусь и результаты исследований основных метрологических характеристик за 2018 год на основании внешних (международных) и внутренних (взаимных) сличений.

This article provides description and composition of the modernized standard of the units of time – second, frequency – hertz and time scale of the Republic of Belarus as well as the results of examinations of main metrological characteristics for the year 2018 on the basis of external (international) and internal (mutual) comparisons.

Введение

Секунда – одна из основных единиц международной системы. Точность ее воспроизведения на несколько порядков превышает точность воспроизведения других единиц физических величин. Это первая единица, значение которой передают на расстояние в режиме «реального времени» [1].

Для воспроизведения и хранения единиц: времени – секунды (с), частоты – герца (Гц) и шкалы времени в Белорусском государственном институте метрологии функционирует национальный эталон единиц: времени – секунды, частоты – герца и шкалы времени Республики Беларусь (НЭВЧ). С 2016-го по 2018 год эталон был модернизирован, так как уровень метрологического обеспечения измерений времени и частоты растет такими темпами, что в среднем за каждые 5 лет основные метрологические характеристики эталонов улучшаются на порядок.

Для повышения точности характеристик НЭВЧ нами был выполнен большой объем работ, что обеспечило максимальное приближение национальной шкалы времени к международной шкале. Эталон был дополнен новыми высокоточными реперами частоты, системами внутренних и внешних сличений. Полностью заменена аппаратура распределения и корректировки шкал времени, улучшена система условий термостатирования в помещении хранителей времени, установлена система пожаротушения и видеонаблюдения, а также полностью заменена система бесперебойного питания эталона. Все это позволяет обеспечивать функционирование НЭВЧ надежно и бесперебойно.

Проведенная модернизация эталона позволяет воспроизводить, хранить и передавать размер единицы времени и частоты с точностными характеристиками, ранее не обеспечиваемыми в республике.

Основные характеристики и состав НЭВЧ

Национальный эталон единиц: времени – секунды, частоты – герца и шкалы времени Республики Беларусь представляет собой комплекс средств измерений, обеспечивающих воспроизведение, хранение и передачу размеров единиц времени и частоты.

НЭВЧ после модернизации обеспечивает воспроизведение (передачу) единицы времени (и частоты) со средним квадратическим отклонением результата измерений $S_{\Sigma 0}$ на годовом интервале, не превышающем $\pm 1 \cdot 10^{-14}$.

Допускаемое расхождение национальной шкалы координированного времени UTC (BY), хранимой НЭВЧ, со всемирной шкалой координированного времени UTC, хранимой Международным бюро мер и весов (МБМВ), – не более ± 100 нс.

В состав модернизированного НЭВЧ входят [2]:

1) аппаратура воспроизведения и хранения единиц времени и частоты – 9 водородных стандартов времени и частоты различных типов: Ч1-1033, VCH-1005, VCH-1006С и VCH-1008С, выполняющие функцию хранителей шкал времени при их непрерывной работе;

2) аппаратура корректировки шкал времени, включающая шесть генераторов ввода отстроек по фазе и частоте HROG-5RM;

3) аппаратура внутренних сличений, включающая различные автоматизированные частотно-

временные измерительные системы, обеспечивающие проведение автоматизированных непрерывных измерений;

4) аппаратура внешних сличений, которая включает оборудование для сличений эталона по каналам навигационной спутниковой связи GPS/ГЛОНАСС/Galileo: TTS-4 и TTS-5;

5) аппаратура распределения и передачи сигналов времени и эталонных частот, включающая: усилители-распределители сигналов и сервера времени;

6) аппаратура обеспечения бесперебойного функционирования эталона, которая состоит из систем: термостатирования, пожаротушения, бесперебойного электропитания и видеонаблюдения.



Рис. 1. Внешний вид НЭВЧ после модернизации

Внешний вид НЭВЧ приведен на рис. 1.

Постоянная исследовательская метрологическая работа на НЭВЧ в 2018 году проводилась в следующих направлениях:

- воспроизведение и хранение единиц времени и частоты, передача их потребителям по различным каналам электросвязи;
- ведение национальной шкалы координированного времени UTC (BY);
- обеспечение функционирования НЭВЧ;
- сличение национальной шкалы координированного времени республики UTC (BY) с международной шкалой времени и шкалами времени эталонов других стран.

Цель проведения данных исследований – это подтверждение метрологических характеристик НЭВЧ. Для определения основных метрологических характеристик как отдельных составляющих

НЭВЧ, так и всего комплекса в целом проводятся регулярные внутренние и внешние сличения эталона.

Результаты международных сличений НЭВЧ

Состав аппаратуры и ведение шкал времени UTC (BY) и Tr (BY) (рабочая шкала) позволяют НЭВЧ участвовать в международных сличениях. Международные сличения НЭВЧ с национальными шкалами других стран проводятся регулярно согласно теме COOMET TF.398/RU-07 «Сличения национальных эталонов времени и частоты с использованием шкалы РФ UTC (SU)» и теме МБМВ ССТF-K001. UTC «Ключевые сличения. Определение эталонной шкалы времени UTC». Их результаты используются для сравнения национальных шкал времени

и размеров воспроизводимых единиц времени и частоты, а также для формирования международной координированной шкалы времени UTC.

Для проведения внешних сличений применяются специализированные многоканальные приемники сигналов GPS/ГЛОНАСС/Galileo, предназначенные для измерения расхождения удаленных шкал времени путем синхронного приема эталонных сигналов частоты и времени обоими пунктами с помощью систем GPS/ГЛОНАСС/Galileo. Таким образом определяются разности рабочих шкал времени сличаемых эталонов и шкал времени систем (ШВС) GPS/ГЛОНАСС/Galileo. Данные приемники позволяют

реализовать синхронизацию сличений по сигналам GPS/ГЛОНАСС/Galileo с другими национальными эталонами по формату МБМВ. Введя поправку на рабочую шкалу времени в результаты сличений, получают поправки на ШВС в шкалах UTC (BY) и UTC (*i*). В результате взаимнообмена вышеуказанными поправками и использования их при дальнейшей обработке результатов сличений определяются разности шкал UTC (BY) и UTC (*i*) сличаемых эталонов. Сличения по сигналам Galileo в 2018 году не проводились в связи с внутренними настройками программного обеспечения TTS-4 и TTS-5. Функция вывода данных измерений в формате, утвержденном МБМВ, еще не разработана производителем.

Данные по GPS/ГЛОНАСС-сличениям на координированную шкалу UTC (BY) регулярно направлялись в МБМВ, Россию и Украину. Пример протокола – протокол 1.

```
CGGTTT GPS/GLONASS DATA FORMAT VERSION = 02
REV DATE = 1996-10-20
RCVR = SRC AOS TTS-4, SN:0146, 2009, HW:133.32, SW:2.39 2016/01/14
CH = 216 (GPS-L1C/L2C/L1P/L2P/L5P Galileo-E1/E5a Glonass-L1C/L2C/L1P/L2P SBAS)
IMS = SRC AOS TTS-4, SN:0146, 2009, HW:133.32, SW:2.39 2016/01/14
LAB = BY
X = +3336860.01 m (GPS, GLONASS)
Y = +1740040.38 m (GPS, GLONASS)
Z = +5132636.88 m (GPS, GLONASS)
FRAME = ITRF, PZ-90->ITRF Dx = 0.0 m, Dy = 0.0 m, Dz = 2.0 m, ds = 0.0, Rx = 0.0, Ry = 0.0, Rz = -0.000002
COMMENTS = NO COMMENTS
INT DLY = [ns] GPS: L1C:-46.40 L2C:0.00 L1P:-51.40 L2P:-59.40 L5P:0.00, GLO: L1C:-57.80 L2C:0.00 L1P:-59.90 L2P:-56.10
CAB DLY = 144.14 ns (GPS), 144.14 ns (GLONASS)
REF DLY = -42.50 ns (1PPS DLY: -30.30 ns, phase corr: -12.20 ns)
REF = UTC (BY)
CKSUM = 41
```

SAT	CL	MJD	STTIME	TRKL	ELV	AZTH	REFSV	SRSV	REFSYS	SRSYS	DSG	IOE	MDTR	SMDT	MDIO	SMDI	MSIO	SMSI	ISG	FR	HC	FRC	CK
			hhmmss	s	.1dg	.1dg	.1ns	.1ps/s	.1ns	.1ps/s	.1ns	.1ns	.1ps/s	.1ns	.1ps/s	.1ns	.1ps/s	.1ns	.1ps/s				
29	FF	58470	001400	780	541	914	-3131134	79	2	160	3	84	98	9	60	5	7	2	6	0	0	L1C	59
25	FF	58470	001400	780	129	1532	6928436	7	-16	61	16	3	352	183	127	20	238	20	33	0	0	L1C	D2
16	FF	58470	001400	780	314	3079	73344	35	-25	58	7	57	152	-30	86	-12	4	10	20	0	0	L1C	8B
31	FF	58470	001400	780	190	2353	-720345	23	-26	50	7	66	242	72	111	14	13	-14	12	0	0	L1C	AA
20	FF	58470	001400	780	83	1779	-5199903	4	-30	-1	27	73	536	-400	141	-21	56	-26	53	0	0	L1C	F2
5	FF	58470	001400	780	290	537	-3587	-16	-43	-18	8	16	164	16	90	6	-23	-4	16	0	0	L1C	6D
120	FF	58470	001400	780	349	621	3627737	-10	55	-1	10	0	139	26	78	11	233	14	14	2	0	L1C	B4
104	FF	58470	001400	780	207	233	-2877583	-13	113	-22	13	0	223	35	103	8	56	31	27	6	0	L1C	CA
112	FF	58470	001400	780	451	3046	395336	-18	120	-18	6	0	112	-7	65	-4	9999	9999	999	-1	0	L1C	4D
110	FF	58470	001400	780	89	1873	-377263	-88	248	-88	26	0	513	454	135	25	346	4	23	-7	0	L1C	11

Протокол 1

В 2018 году осуществлялся взаимообмен результатами сличений по GPS/ГЛОНАСС с ПЭВЧ (первичный эталон времени и частоты): Всероссийского научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений Российской Федерации (далее – SU), Харьковского национального научного центра «Институт метрологии» (далее – UA), Литовского департамента стандартизации (далее – LT). Дополнительно использовались данные сличений

по сигналам GPS/ГЛОНАСС от ПЭВЧ Немецкого физико-технического института (PTB), Парижской обсерватории (далее – OP) и Польского главного управления мер (далее – PL).

Данные сличений публикуются в специальных бюллетенях МБМВ CIRCULAR T. В 2018 году в ежемесячном Бюллетене T МБМВ (CIRCULAR T361–T372) также публиковались и расхождения шкалы времени UTC (BY) со шкалой международного времени UTC. Пример Бюллетеня T приведен ниже.

CIRCULAR T 372
2019 JANUARY 10, 10h UTC

ISSN 1143-1393

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES
THE INTERGOVERNMENTAL ORGANIZATION ESTABLISHED BY THE METRE CONVENTION
PAVILLON DE BRETEUIL F-92312 SEVRES CEDEX TEL. +33 1 45 07 70 70 tai@bipm.org

The contents of the sections of BIPM Circular T are fully described in the document "Explanatory supplement to BIPM Circular 1 available at ftp://ftp2.bipm.org/pub/tai/publication/notes/explanatory_supplement_v0.2.pdf

1 - Difference between UTC and its local realizations UTC(k) and corresponding uncertainties.
From 2017 January 1, 0h UTC, TAI-UTC = 37 s.

Date 2018	0h UTC	NOV 27	DEC 2	DEC 7	DEC 12	DEC 17	DEC 22	DEC 27	Uncertainty/ns	Notes	
MJD		58449	58454	58459	58464	58469	58474	58479	uA	uB	u
Laboratory k		[UTC-UTC(k)]/ns									
AOS (Borowiec)		-5.4	-5.2	-4.6	-3.5	-2.8	-2.5	-2.5	0.4	4.2	4.2
APL (Laurel)		3.6	1.5	4.2	4.1	2.8	2.8	3.4	0.4	11.3	11.3
AUS (Sydney)		-54.9	-48.5	-44.4	-41.6	-37.9	-47.4	-27.7	0.4	6.5	6.5
BEV (Wien)		1.5	-9.0	-14.9	-18.7	-29.0	-23.7	-22.7	0.4	3.2	3.2
BIM (Sofiya)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BIRM (Beijing)		5.8	5.0	-	4.7	3.1	1.6	1.7	0.5	3.2	3.2
BOM (Skopje)		-1150.4	-1178.5	-1207.7	-1227.1	-1255.1	-1289.7	-1311.8	1.5	8.3	8.4
BY (Minsk)		-0.1	-0.5	-0.3	-0.5	-0.3	0.0	-0.1	1.5	12.2	12.3
CAO (Cagliari)		-8150.1	-8255.9	-8358.7	-8455.8	-8566.0	-8672.1	-8771.8	1.5	20.0	20.1
CH (Bern-Wabern)		-3.0	-3.1	-2.8	-2.2	-2.8	-3.2	-3.8	0.5	2.2	2.3
KZ (Astana)		28.1	38.5	51.1	53.3	-	-	-	1.5	12.3	12.3
LRTE (Sao Carlos)		-33.3	-31.3	-29.0	-27.2	-31.1	-27.9	-29.6	0.4	20.0	20.0
LT (Vilnius)		529.9	548.6	532.8	544.9	538.7	547.1	572.0	2.0	11.3	11.4
ONBA (Buenos Aires)		-2146.3	-2137.7	-2148.5	-2136.0	-2114.6	-2110.6	-2124.1	2.0	11.3	11.4
ONRJ (Rio de Janeiro)		-2.6	-5.1	-2.9	3.4	-6.7	-0.2	-7.8	0.4	8.0	8.0
OP (Paris)		0.4	0.1	-0.5	-0.9	-0.9	-0.4	-0.2	0.4	1.7	1.7
ORB (Bruxelles)		0.5	1.4	2.5	2.3	1.1	0.0	0.0	0.4	3.2	3.2
PL (Warszawa)		24.8	20.9	17.1	14.1	12.2	10.3	9.9	0.7	3.2	3.3
PTB (Braunschweig)		0.1	0.1	0.5	0.4	0.4	0.6	0.6	0.2	1.2	1.2
ROA (San Fernando)		-2.4	-3.0	-1.4	-1.1	-1.6	-3.3	-3.7	0.4	1.9	1.9
SASO (Riyadh)		-1343.8	-1360.2	-24.7	-26.9	-31.6	-44.1	-55.3	0.5	3.2	3.2 (2)
SCL (Hong Kong)		-2.2	-20.5	-18.9	-16.4	-10.9	-16.7	-20.9	1.0	20.0	20.1
SG (Singapore)		18.4	22.9	20.0	18.6	16.4	15.0	14.9	0.4	6.7	6.7
SIQ (Ljubljana)		389.1	399.6	391.2	410.3	376.5	360.3	389.3	0.4	7.6	7.6
SL (Colombo)		-61.3	-63.3	-66.1	19.3	23.6	22.8	26.9	0.7	20.0	20.0 (3)
SMD (Bruxelles)		1.1	5.0	4.5	6.3	-3.6	1.1	1.5	0.4	3.2	3.2
SMU (Bratislava)		-1670.7	-1619.8	-1577.1	-1525.3	-1482.9	-1432.7	-1388.6	1.5	12.3	12.3
SP (Boras)		-1.5	-0.8	-2.1	-2.1	-3.1	-2.6	-1.5	0.4	1.7	1.7
SU (Moskva)		-2.6	-2.3	-1.7	-1.8	-1.8	-1.6	-1.0	1.3	7.1	7.3
TL (Chung-Li)		-0.9	-0.8	-0.6	-0.5	-0.5	-0.8	-1.4	0.4	1.9	1.9
TP (Praha)		-3.7	4.9	15.5	22.8	20.0	20.1	20.4	0.4	6.8	6.8
UA (Kharkov)		-6.2	-3.0	-3.5	5.7	10.8	5.5	4.8	1.5	9.2	9.3

Бюллетень T

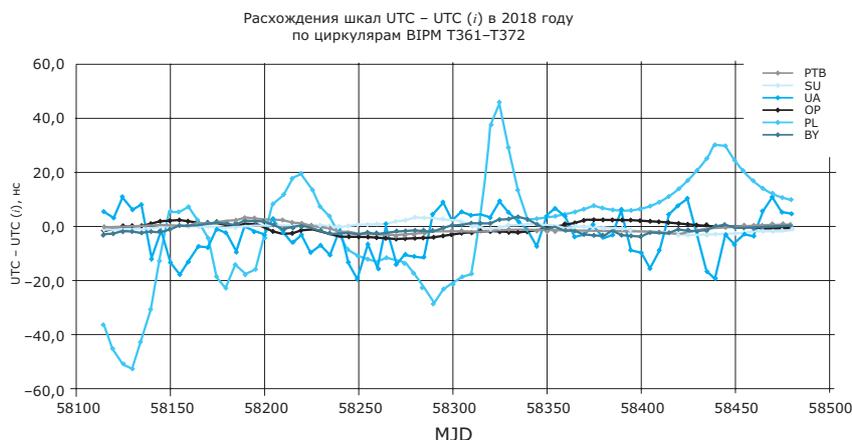


Рис. 2

На рис. 2 показаны среднесуточные расхождения шкал времени UTC (*i*) со шкалой международного времени UTC за 2018 год в MJD, оканчивающиеся на «4» и «9», из публикуемых ВРМ Бюллетеней Т (CIRCULAR T361–T372), на остальные даты проведена линейная интерполяция.

Из рис. 2 видно, что координированные шкалы UTC (SU), UTC (PTB) и UTC (OP) имеют наименьшее расхождение со шкалой UTC, но данные сличений по приемнику UTC (OP) в течение года прерывались, поэтому при расчете суммарной погрешности НЭВЧ были использованы данные сличений по шкалам UTC (SU), UTC (PTB).

Таблица 1
Среднесуточный ход расхождения координированных шкал времени UTC (BY) – UTC (*i*) по результатам сличений с GPS, нс

Период – 2018 год	MJD	UTC (BY) – UTC (SU)		UTC (BY) – UTC (PTB)	
		<i>g</i>	СКВ	<i>g</i>	СКВ
Январь	58 119–58 149	-0,01	0,19	-0,05	0,24
Февраль	58 150–58 177	-0,08	0,22	-0,03	0,26
Март	58 178–58 208	0,07	0,30	0,07	0,29
Апрель	58 209–58 238	0,06	0,36	-0,04	0,36
Май	58 239–58 269	0,05	0,43	-0,11	0,41
Июнь	58 270–58 299	-0,08	0,41	0,01	0,34
Июль	58 300–58 330	-0,11	0,38	-0,07	0,28
Август	58 331–58 361	0,14	0,37	0,19	0,37
Сентябрь	58 362–58 391	0,04	0,32	0,06	0,36
Октябрь	58 392–58 422	-0,15	0,33	-0,08	0,45
Ноябрь	58 423–58 452	0,01	0,44	0,04	0,44
Декабрь	58 453–58 483	0,02	0,31	-0,02	0,28
Среднее значение		-0,03	0,34	-0,03	0,34
СКЗ*		0,08	–	0,08	–

Таблица 2
Среднесуточный ход расхождения координированных шкал времени UTC (BY) – UTC (*i*) по результатам сличений с ГЛОНАСС, нс

Период – 2018 год	MJD	UTC (BY) – UTC (SU)		UTC (BY) – UTC (PTB)	
		<i>g</i>	СКВ	<i>g</i>	СКВ
Январь	58 119–58 149	-0,02	0,22	-0,05	0,28
Февраль	58 150–58 177	-0,08	0,26	-0,03	0,25
Март	58 178–58 208	0,08	0,33	0,08	0,30
Апрель	58 209–58 238	0,03	0,31	-0,07	0,42
Май	58 239–58 269	0,05	0,42	-0,10	0,32
Июнь	58 270–58 299	-0,07	0,40	0,03	0,36
Июль	58 300–58 330	-0,12	0,38	-0,10	0,25
Август	58 331–58 361	0,15	0,48	0,12	0,36
Сентябрь	58 362–58 391	0,06	0,33	0,10	0,35
Октябрь	58 392–58 422	-0,19	0,33	-0,09	0,50
Ноябрь	58 423–58 452	-0,02	0,28	0,05	0,46
Декабрь	58 453–58 483	0,03	0,34	-0,01	0,27
Среднее значение		-0,01	0,34	-0,01	0,34
СКЗ*		0,08	–	0,08	–

*СКЗ рассчитывается путем нахождения среднего квадратического значения хода шкал времени.

Из таблицы 1 видно, что среднее значение СКВ суточного хода шкал UTC (BY) – UTC (SU), UTC (BY) – UTC (PTB) по GPS за 2018 год составляет 0,34 нс, среднесуточный ход шкал (*g*) UTC (BY) – UTC (SU), UTC (BY) – UTC (PTB) составляет минус 0,03 нс, а СКЗ суточного хода шкал UTC (BY) – UTC (SU), UTC (BY) – UTC (PTB) составляет 0,08 нс. Данные таблицы 2 показывают, что среднее значение СКВ суточного хода шкал и СКЗ суточного хода шкал для UTC (BY) – UTC (SU), UTC (BY) – UTC (PTB) по ГЛОНАСС сопоставимы с данными таблицы 1. Таким образом, можно сделать вывод о сходимости

полученных результатов в определении суточного хода шкал UTC (BY) – UTC (SU), UTC (BY) – UTC (PTB) и погрешности сличений (СКВ) как по ГЛОНАСС, так и по GPS. Для определения метрологических характеристик НЭВЧ использовались данные и GPS, и ГЛОНАСС-сличений.



Рис. 3

На рис. 3 показаны среднесуточные расхождения шкал времени UTC (BY) – UTC (SU), UTC (BY) – UTC (PTB), полученные при обработке сличений по GPS, на годовом интервале наблюдения.

Результаты внутренних сличений квантовых хранителей НЭВЧ

По взаимным (внутренним) сличениям водородных стандартов (квантовых хранителей НЭВЧ) и по групповому хранителю определялись их метрологические характеристики.

Внутренние сличения хранителей НЭВЧ в 2018 году проводились в соответствии с суточным расписанием приема эталонных сигналов. Каждый час проводились взаимные сличения водородных стандартов на измерительной системе VCH-011. При этом определялись: относительное отклонение частот (относительная погрешность частоты), среднеквадратическое относительное отклонение частоты (количественная характеристика нестабильности частоты) и разностный ход шкал времени сличаемых водородных стандартов (BC).

По полученным суточным относительным отклонениям частот водородных стандартов в соответствии с методикой [3] строился групповой хранитель (ГрХЧВ), рассчитывались национальная шкала координированного времени UTC (BY) и рабочая шкала времени Тр (BY). В 2018 году расхождение Тр (BY) и UTC (BY) не превысило 100 нс, как рекомендовано МБМВ.

В 2018 году по частоте BC006 формировалась рабочая шкала времени НЭВЧ (Тр (BY)), используе-

мая для международных сличений по сигналам GPS и ГЛОНАСС, а групповой хранитель НЭВЧ в основном строился по трем-четырем стандартам времени и частоты. В разные периоды 2018 года в расчет группового хранителя были включены BC278, BC178, BC022 и BC029, а также

новые активные стандарты частоты и времени BC006, BC005. В качестве ведущего хранителя использовался водородный стандарт BC006. За отчетный период BC029 и BC022 работали в режиме периодической настройки резонатора.

На рис. 4 показаны среднесуточные относительные отклонения частот водородных стандартов BC006, BC005, BC278, BC029, BC022, BC178.

Из рис. 4 видно, что для уменьшения хода шкалы вре-

мени водородных стандартов были проведены коррекции частоты: для BC006 – на $2 \cdot 10^{-14}$; для BC278 – на $4 \cdot 10^{-14}$ и на $4,5 \cdot 10^{-14}$.

Относительные отклонения частот квантовых хранителей НЭВЧ в 2018 году (MJD 58119–58483)

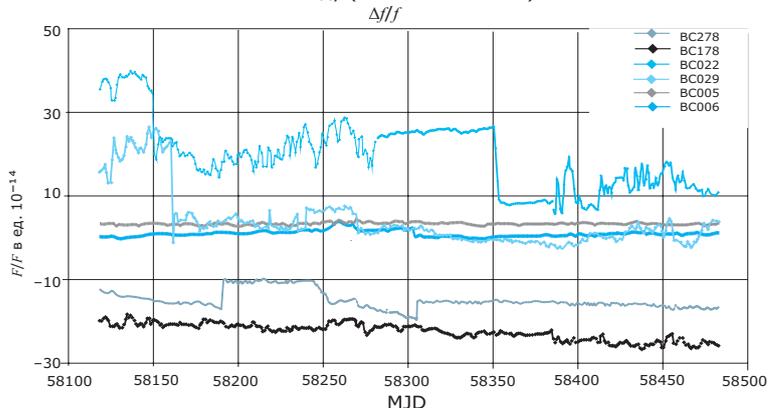


Рис. 4

Видны также скачки частоты BC029 и BC022, которые обусловлены: для BC022 – выходом из строя платы термостатирования, для BC029 – неисправностью вакуумных насосов.

В таблице 3 приведены среднеквадратические относительные часовые отклонения частот водородных стандартов, полученные при обработке взаимных сличений за 1 час на месячном и годовом интервалах наблюдений.

Анализ таблицы 3 показывает, что средние значения СКДО частоты за 1 час на месячном интервале незначительно превышают паспортные значения. Это может быть обусловлено нестабильной работой аппаратуры измерения, обработки, контроля и управления НЭВЧ. Но на годовом интервале (2018 год) для всех BC значе-

ния СКДО не превысили паспортных и составили: для ВС005 – $1,3 \cdot 10^{-15}$, для ВС0278 – $2,0 \cdot 10^{-15}$, для ВС178 – $1,4 \cdot 10^{-15}$, для ВС022 – $2,4 \cdot 10^{-15}$, для ВС029 – $3,0 \cdot 10^{-15}$, для ВС110 – $5,3 \cdot 10^{-15}$, для ВС036 – $7,8 \cdot 10^{-15}$.

Таблица 3
Среднеквадратические относительные часовые отклонения частот водородных стандартов по взаимным сличениям

Период – 2018 год	Номер водородного стандарта						
	005	278	178	022	029	110	036
Январь	1,3	1,2	1,4	1,9	2,2	5,1	7,3
Февраль	1,3	1,2	1,5	2,0	3,1	5,2	7,0
Март	1,4	1,8	1,3	1,6	3,7	6,6	7,6
Апрель	1,3	2,1	1,2	1,9	3,2	5,1	7,6
Май	1,4	2,2	1,3	2,3	3,4	4,6	7,6
Июнь	1,4	1,5	1,3	1,7	3,3	–	7,5
Июль	1,3	2,1	1,5	1,8	3,3	–	7,4
Август	1,3	2,2	1,4	2,0	3,2	–	7,8
Сентябрь	1,3	2,1	1,2	2,5	3,2	–	7,4
Октябрь	1,3	2,4	1,3	2,4	3,4	–	7,3
Ноябрь	1,3	2,5	1,3	1,8	1,1	–	7,5
Декабрь	1,4	2,7	2,6	6,3	3,0	–	11,4
Среднее значение	1,3	2,0	1,4	2,4	3,0	5,3	7,8
Паспортное СКДО за 1 час \leq	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	9,0	9,0

В таблице 4 приведены среднеквадратические относительные суточные двухвыборочные отклонения частот (СКДО) водородных стандартов на 10-дневном и годовом интервалах наблюдений.

Анализ данных таблицы 4 показывает, что на десятидневном интервале значения СКДО для хранителей, входящих в группу, незначительно превышали паспортные значения. Все превышения могут быть связаны с нестабильной работой аппаратуры измерения, обработки, контроля и управления НЭВЧ и неисправностью вакуумных

насосов хранителей ВС278, ВС029, ВС178, но при годовой выборке эта величина для всех данных ВС не превышает паспортных значений. Для ВС022 эта величина на годовой выборке превышает в 1,5 раза паспортные значения, что, как было сказано выше, обусловлено неисправностью платы термостатирования водорода. Но незначительное отклонение метрологических характеристик ВС не повлияло на суммарные метрологические характеристики НЭВЧ.

Таким образом, сравнивая данные таблицы 3, можно сделать вывод, что значения СКДО частоты за 1 час для ВС005 и ВС006 значительно стабильнее, чем для всех остальных ВС типа VCH-1005, входящих в группу. А из таблицы 4 видно, что полученное усреднением значение СКДО частоты на суточном интервале для ВС005 составляет $2 \cdot 10^{-15}$, для ВС006 – $1,1 \cdot 10^{-15}$, что не только соответствует паспортным данным водородного стандарта Ч1-1033, но также стабильнее заявленных паспортных характеристик и характеристик уже имеющихся в составе эталона водородных стандартов времени и частоты типа VCH-1005.

По результатам внешних сличений с ПЭВЧ SU и РТВ определялись метрологические характеристики ведущего хранителя ВС006 в соответствии с методикой [4].

В таблице 5 приведены среднесуточные относительные отклонения частоты и средние квадратические отклонения частоты ведущего хранителя – нового активного водородного стандарта времени и частоты ВС006 – относительно вышеприведенных эталонов на месячном и годовом интервалах наблюдения.

Анализируя данные таблицы 5, можно сделать вывод, что среднеемесячное относительное отклонение частоты Δf ведущего хранителя ВС006 от частоты ПЭВЧ SU и РТВ, определенное по GPS/ГЛОНАСС-сличениям на годовом интервале времени, не превышало минус $2,55 \cdot 10^{-14}$ и относительное среднеквадратическое отклонение частоты не превышало $0,98 \cdot 10^{-14}$.

Данные по результатам внутренних сличений шкал времени НЭВЧ ежемесячно отправлялись в МБМВ. Пример протокола отправки приведен ниже (протокол 2).

58454	10042	1404227	0038123.3	1404229	0090842.3	1404278	0073407.2	1404222	0059364.8	1415105	0079790.8
58454	10042	1415106	0056432.2								
58459	10042	1404227	0038196.0	1404229	0090835.9	1404278	0073512.0	1404222	0059308.3	1415105	0079776.6
58459	10042	1415106	0056428.4								
58464	10042	1404227	0038268.7	1404229	0090841.5	1404278	0073615.9	1404222	0059246.8	1415105	0079762.8
58464	10042	1415106	0056424.4								
58469	10042	1404227	0038340.6	1404229	0090848.4	1404278	0073727.3	1404222	0059193.0	1415105	0079748.2
58469	10042	1415106	0056419.9								
58474	10042	1404227	0038413.2	1404229	0090848.7	1404278	0073839.4	1404222	0059143.3	1415105	0079734.0
58474	10042	1415106	0056415.7								
58479	10042	1404227	0038486.0	1404229	0090835.7	1404278	0073946.3	1404222	0059094.8	1415105	0079720.3
58479	10042	1415106	0056411.9								

Протокол 2

Таблица 4

Среднеквадратические относительные суточные отклонения частот водородных стандартов по взаимным сличениям

в единицах 10^{-14}

Период – 2018 год		Номер водородного стандарта							
Месяц	Декада	006	005	278	178	022	029	110	036
Январь	I	0,6	0,7	1,0	4,4	8,9	9,9	3,1	3,3
	II	0,5	0,4	0,5	5,5	5,2	8,7	3,5	17,4
	III	0,3	0,7	0,5	4,9	5,3	10,1	3,0	9,2
Февраль	I	0,6	0,6	1,2	2,8	6,1	6,1	12,4	11,8
	II	0,8	1,0	1,5	1,9	7,3	6,8	4,7	20,0
	III	0,4	0,6	0,8	0,8	5,2	3,2	5,2	13,2
Март	I	0,8	1,3	1,2	3,0	7,5	4,4	7,0	8,0
	II	1,0	1,0	11,1	2,4	7,8	2,6	7,1	5,7
	III	0,6	0,8	1,1	1,7	6,9	3,3	3,0	7,1
Апрель	I	1,3	1,4	2,0	3,9	14,6	3,4	10,5	7,4
	II	0,4	0,8	1,3	1,5	9,1	7,8	5,9	5,0
	III	0,8	0,7	1,4	2,6	10,9	9,0	2,3	28,7
Май	I	1,2	1,0	2,5	1,8	13,0	1,7	6,2	10,8
	II	2,4	2,6	3,3	4,3	11,7	2,9	1,9	27,3
	III	2,1	2,1	1,5	1,9	11,8	3,4	–	8,4
Июнь	I	0,9	0,7	1,7	6,1	11,7	3,5	–	3,2
	II	0,7	0,9	2,3	1,8	4,8	2,4	–	11,3
	III	0,9	1,3	1,2	2,8	1,5	3,3	–	7,9
Июль	I	0,6	0,8	1,3	1,6	3,6	4,5	–	5,5
	II	0,9	0,9	1,5	2,8	0,9	5,6	–	2,4
	III	0,6	0,5	0,9	1,9	2,7	3,7	–	10,2
Август	I	0,5	0,5	1,6	2,3	1,3	1,5	–	11,8
	II	1,0	1,0	0,8	1,8	1,1	2,7	–	6,7
	III	0,6	0,7	1,2	2,3	2,4	3,5	–	3,5
Сентябрь	I	0,7	0,8	1,1	1,5	0,7	1,5	–	3,0
	II	0,5	0,5	0,7	2,1	1,0	2,3	–	3,6
	III	0,6	0,7	0,7	6,3	6,5	2,6	–	5,2
Октябрь	I	1,5	1,6	2,5	4,2	14,0	2,7	–	15,9
	II	0,9	1,0	1,4	1,4	4,5	3,2	–	9,0
	III	0,5	0,6	1,4	5,5	11,8	2,2	–	13,6
Ноябрь	I	1,0	1,0	1,3	2,6	7,9	3,2	–	3,2
	II	1,0	1,2	0,9	3,2	20,7	6,4	–	8,7
	III	0,9	0,7	1,9	5,3	7,9	6,8	–	6,4
Декабрь	I	0,7	0,5	5,7	5,7	12,2	6,9	–	7,9
	II	0,6	0,6	1,0	2,3	4,7	5,0	–	–
	III	1,0	1,3	1,6	3,2	4,7	5,8	–	6,1
Среднее значение		0,8	0,9	1,8	3,1	7,2	4,5	5,4	9,4
Паспортное значение СКДО за 1 сутки ≤		1,5	1,5	5,0	5,0	5,0	5,0	40,0	40,0

Таблица 5

Метрологические характеристики ведущего хранителя по GPS/ГЛОНАСС-сличениям с ПЭВЧ SU и РТВ

в единицах 10^{-14}

Период – 2018 год	MJD	GPS				ГЛОНАСС			
		UTC (SU)		UTC (РТВ)		UTC (SU)		UTC (РТВ)	
		Δf	СКО						
Январь	58 119–58 149	0,40	0,30	0,35	0,30	0,35	0,35	0,35	0,30
Февраль	58 150–58 177	0,69	0,58	0,81	0,35	0,81	0,46	0,69	0,35
Март	58 178–58 208	1,39	0,31	1,27	0,31	1,39	0,46	1,22	0,46
Апрель	58 209–58 238	1,56	0,42	1,39	0,42	1,50	0,35	1,47	0,58
Май	58 239–58 269	2,55	0,93	2,43	1,06	2,55	0,81	2,66	0,93
Июнь	58 270–58 299	1,62	0,32	1,97	0,32	1,50	0,23	1,96	0,23
Июль	58 300–58 330	0,46	0,29	0,23	0,29	0,46	0,23	0,12	0,35
Август	58 331–58 361	0,12	0,58	0,35	0,41	0,35	0,58	0,35	0,35
Сентябрь	58 362–58 391	0,58	0,35	0,46	0,41	0,58	0,46	0,58	0,35
Октябрь	58 392–58 422	0,58	0,35	0,59	0,45	0,58	0,35	0,66	0,46
Ноябрь	58 423–58 452	0,93	0,98	1,04	1,03	0,81	0,93	0,81	0,81
Декабрь	58 453–58 483	1,04	0,23	0,93	0,30	0,93	0,23	0,93	0,30
Среднее значение		0,99	0,47	0,99	0,47	0,99	0,47	0,99	0,47

Примечания:

1. СКО – среднее квадратическое отклонение частоты, количественная характеристика нестабильности частоты.
2. Δf – относительное отклонение частоты (относительная погрешность меры частоты [5]).

Метрологические характеристики НЭВЧ

Используя характеристики, полученные при сличениях НЭВЧ с ПЭВЧ SU и РТВ по GPS/ГЛОНАСС-сличениям с помощью TTS-4 на годовом интервале в соответствии с методикой [3], определяем среднюю квадратическую погрешность автономного хранения шкалы UTC (BY) δ_{T_0} по формуле

$$\delta_{T_0} = \sqrt{(\omega\sqrt{\tau})^2 + (\delta_{T_c})^2 + (\Delta f \cdot \tau \cdot 86400)^2}, \quad (1)$$

где Δf – неисключенная относительная погрешность в определении размера единицы, хранимой НЭВЧ. Данная величина характеризуется СКЗ суточного хода шкал времени UTC (BY) – UTC (SU), UTC (BY) – UTC (РТВ) на годовом интервале и в период MJD 58 119–58 483 (по данным таблиц 1 и 2 она составила 0,08 нс, что соответствует неисключенной систематической погрешности в определении размера единицы $0,93 \cdot 10^{-15}$);

δ_{T_c} – средняя квадратическая погрешность сличений шкалы UTC (BY) со шкалами UTC (SU), UTC (РТВ) с помощью постоянно используемого канала сличений. Данная погрешность определяется средним значением СКО результатов сличений хранителя BC006 по GPS/ГЛОНАСС. По данным таблицы 5 эта величина составляет $0,47 \cdot 10^{-14}$, что соответствует 0,41 нс;

ω – среднее значение СКВ суточного хода шкалы UTC (BY), по данным таблиц 2 и 3 оно составляет 0,34 нс;

τ – интервал времени в сутках, на котором определяется δ_{T_0} , $\tau = 365$ суток.

Подставив значения указанных выше характеристик в формулу (1), получим среднюю квадратическую погрешность автономного хранения шкалы UTC (BY) $\delta_{T_0} = 30,2$ нс.

Суммарная погрешность НЭВЧ $S_{\Sigma 0}$ определяется по результатам сличений с ПЭВЧ SU, ПЭВЧ РТВ на годовом интервале и выражается средним квадратическим отклонением результата измерений в соответствии с методикой [3] по формуле (2):

$$S_{\Sigma 0} = k \cdot \delta_{T_0} / \tau, \quad (2)$$

где k – коэффициент, вводимый для определения пределов суммарной погрешности, за которые она не должна выходить при автономной работе на длительных интервалах времени.

Поскольку исследования характеристик НЭВЧ проводились на годовом интервале времени, то принимаем $k = 3$. Подставив значения δ_{T_0} , τ и k в формулу (2), получим величину суммарной погрешности эталона.

Таким образом, суммарная погрешность эталона (СКО) равна:

$$S_{\Sigma 0} = 2,88 \cdot 10^{-15} = 0,29 \cdot 10^{-14}.$$

Полученная суммарная погрешность эталона не превышает допустимого (паспортного) значения.

Заключение

В заключение приведем метрологические характеристики НЭВЧ (таблица 6) и среднесуточное расхождение шкал UTC – UTC (BY) (рис. 5)

Таблица 6

Метрологические характеристики НЭВЧ по сличениям с ПЭВЧ

Наименование характеристики	НЭВЧ РБ							
	Паспорт 2018 г.	Отчет 2012 г.	Отчет 2013 г.	Отчет 2014 г.	Отчет 2015 г.	Отчет 2016 г.	Отчет 2017 г.	Отчет 2018 г.
Погрешность воспроизведения единиц времени и частоты S_0 , в ед. 10^{-15}	10	8,0	8,0	7,0	7,0	6,0	3,33	2,88
Неисключенная систематическая погрешность воспроизведения размеров единиц Δf , в ед. 10^{-15}	–	2,0	3,0	2,0	2,0	2,0	1,04	0,99
Погрешность сличения шкал времени δ_{T_i} , нс	–	1,4	1,4	2,8	1,6	1,4	0,80	0,41
Расхождение шкал UTC – UTC (BY), нс	≤ 100	≤ 80	≤ 50	≤ 30	$\leq 11,1$	$\leq 12,4$	$\leq 8,1$	$\leq 3,6$

в период 2012–2018 годов по бюллетеням МБМВ CIRCULAR T289–T372.

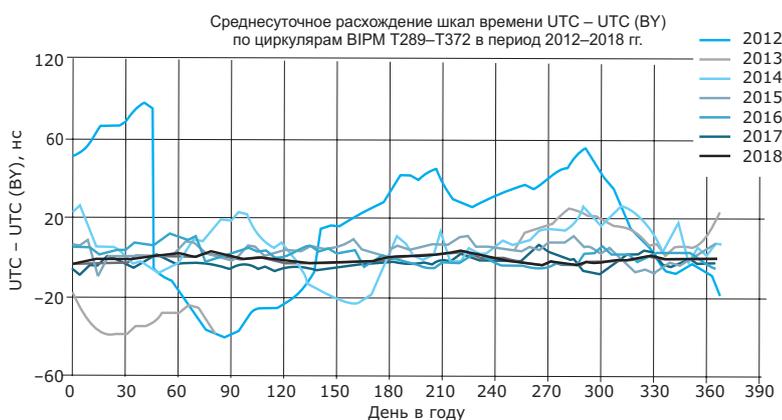


Рис. 5

Полученные в процессе исследований значения погрешностей НЭВЧ, выполненных в 2018 году, стабильны и точность полученных значений соответствует аналогичным эталонам ведущих стран мира. Модернизация эталона позволит воспроизводить, хранить и передавать размер единицы времени и частоты с точностными характеристиками, ранее не обеспечиваемыми в республике.

Дальнейшая работа будет направлена на улучшение точностных характеристик НЭВЧ.

Список использованной литературы

1. Одуан, К. Измерение времени. Основы GPS / К. Одуан, Б. Гино. – Москва: Техносфера, 2002.
2. Правила хранения и применения национального эталона единиц: времени – секунды, частоты – герца и шкалы времени Республики Беларусь.
3. Методика ведения шкал времени национального эталона единиц: времени – секунды, частоты – герца и шкалы времени Республики Беларусь.
4. Методика сличений шкал времени национального эталона единиц времени – секунды, частоты – герца и шкалы времени Республики Беларусь со шкалой всемирного координированного времени и национальными шкалами всемирного координированного времени эталонов других стран.
5. ГОСТ 8.567-2014 Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения времени и частоты. Термины и определения.

Елена Николаевна ТАКУН,

ведущий инженер по метрологии-исследователь отдела радиоэлектронных измерений БелГИМ

Дата поступления 17.04.2019