

№ 5. С. 31—34; **Solov'ev V. A.** Measurement of the relative spectral sensitivity of photoelectronic channels of integral-type colorimeters // Measurement Techniques. 2005. V. 48. N 5. P. 461—465.

2. **Соловьев В. А.** Математическая модель колориметра интегрального типа, работающего в режиме компарирования // Метрология. 2004. № 1. С. 20—26.

3. **Джадд Д., Вышецки Г.** Цвет в науке и технике. М.: Мир, 1978.

4. **Пат. 85228 РФ.** Нейроколориметр / А. А. Белаш и др. // Изобретения. Полезные модели. 2009. № 21.

5. **Пат. 2395063 РФ.** Способ измерения координат цвета и нейроколориметр для реализации способа / А. А. Белаш и др. // Изобретения. Полезные модели. 2010. № 20.

6. **Цветное** оптическое стекло и особые стекла / Под ред. Г. Т. Петровского. М.: Изд-во «Дом оптики», 1990.

Дата принятия 13.03.2012 г.

ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

006.92

Метрологические характеристики цезиевого репера МЦР102 государственного эталона времени и частоты Российской Федерации

Л. С. МИРОШНИКОВА, С. Б. ПУШКИН

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Россия, e-mail: onti@vniiftri.ru

Приведены результаты сравнения частоты, воспроизводимой с помощью первичного метрологического цезиевого репера частоты МЦР102 в составе государственного эталона времени и частоты Российской Федерации, с частотой международного атомного времени TAI с 1990 по 2011 г., а также с частотами, воспроизводимыми цезиевыми реперами PTB-CS1 и PTB-CS2, с 2000 по 2011 г.

Ключевые слова: время, частота, государственный эталон, цезиевый репер, метрологические характеристики.

The results of comparisons of frequency reproduced by means of metrological cesium frequency frame MCR 102 within the composition of Russian Federation national time and frequency standard with the frequency of International Atomic Time (TAI) carried out over 1990—2011 period, as well as with the frequencies reproduced by cesium frequency frames PTB-CS1 and PTB-CS2 during 2000—2011 — are presented.

Key words: time, frequency, national standard, cesium frame, metrological characteristics.

На 13-й Генеральной конференции по мерам и весам в 1967 г. было дано определение секунды как интервала времени, в течение которого совершается 9192631770 колебаний, соответствующих резонансной частоте энергетического перехода между уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия-133 (^{133}Cs), при отсутствии внешних воздействий. Согласно этому определению атом ^{133}Cs является стандартом для измерения времени и частоты. Перед ведущими метрологическими лабораториями мира встала задача повышения точности воспроизведения частоты невозмущенного перехода в своих цезиевых реперах частоты.

В работы по созданию первичного метрологического цезиевого репера частоты ВНИИФТРИ включился с 1975 г. Метрологический цезиевый репер МЦР102 был создан группой

специалистов института в 1978 г. и функционирует в составе государственного первичного эталона времени и частоты (ГЭВЧ) более 30 лет. Как и все цезиевые атомно-лучевые реперы времени и частоты, созданные в то время, МЦР102 предназначался для передачи секунды при формировании атомной шкалы времени эталона TA(SU).

Настоящая статья посвящена вопросам создания и развития отечественного цезиевого репера частоты МЦР102 и оценке его метрологических характеристик на различных этапах эксплуатации в составе ГЭВЧ.

Атомно-лучевая система МЦР102 имеет шестиполюсную фокусирующую оптику, продольное магнитное С-поле и точечный детектор атомного пучка, длина сверхвысокочастотного (СВЧ) резонатора составляет примерно 100 см. Пролетное пространство экранировано от внешних магнитных

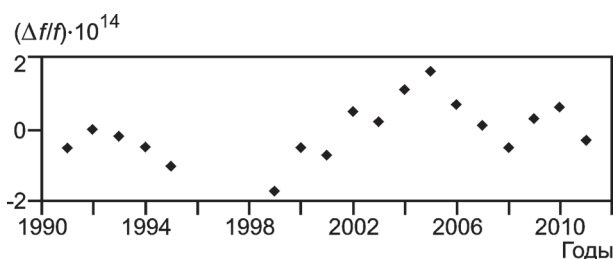


Рис. 1. Среднегодовые относительные разности частот TAI и МЦP102 с 1990 по 2011 гг.

полей тремя слоями пермаллоевых экранов. Ширина линии Рэмси около 110 Гц, сила тока сигнала резонанса Рэмси $(5-10) \cdot 10^{-12}$ А. На обоих концах установки размещены узлы как источника, так и детектора пучка. Возможность изменения направления атомного пучка на противоположное позволяет работать либо с «левым», либо с «правым» пучком.

Для возбуждения атомных переходов используется сигнал СВЧ-генератора, частота которого после фазовой автоподстройки равна сумме частот сигнала водородного хранителя 5 МГц, умноженного на 1836, и сигнала синтезатора частоты 12 МГц. Конструкция и основные параметры репера подробно описаны в [1, 2].

По результатам измерений 1978 г. неисключенная систематическая погрешность воспроизведения частоты репером МЦP102 в относительных единицах составляла $5 \cdot 10^{-13}$.

В дальнейшем в процессе эксплуатации МЦP102 в составе ГЭВЧ отдельные узлы атомно-лучевой трубки и системы электроники неоднократно модернизировались с целью уменьшения сдвигов частоты, вносящих наибольший вклад в неопределенность репера, таких как сдвиги частоты вследствие неоднородности С-поля; фазового сдвига между СВЧ-полями в двух областях взаимодействия резонатора Рэмси и распределенного фазового сдвига в каждой из них; эффекта Раби-затягивания; эффекта Доплера второго порядка. Усовершенствование системы электроники и процедуры обработки детектируемого сигнала позволило в значительной степени исключить влияние линейной части дрейфа фона этого сигнала на параметры подстройки управляемого синтезатора частоты и благодаря этому повысить точность измерения частоты репера при времени усреднения вплоть до 10^5 с. Работы по модернизации репера сопровождались уточнением и последовательным снижением относительного значения неисключенной систематической погрешности воспроизведения размера единицы времени и частоты МЦP102: до $1 \cdot 10^{-13}$ — с 1982 по 1989 гг.; до $5 \cdot 10^{-14}$ — с 1990 по 2000 гг.; до $3 \cdot 10^{-14}$ — с 2001 по 2011 гг. [1—4].

В результате модернизации, проведенной в 1989—1990 гг., средняя относительная

разность единиц частоты TAI (МБМВ) и цезиевого репера МЦP102 в 1990 г. составила $-0,5 \cdot 10^{-14}$; до 1989 г. эта разность на годовых интервалах составляла в среднем $-25 \cdot 10^{-14}$. Эти данные взяты из годовых отчетов по работе «Содержание Государственной службы времени и частоты». Неисключенная систематическая погрешность воспроизведения единиц времени и частоты МЦP102 с 1990 г. в относительных единицах была не более $5 \cdot 10^{-14}$.

На рис. 1 представлены среднегодовые относительные разности частот $\Delta f/f$ [TAI – МЦP102] с 1990 по 2011 гг.

На интервале с 1990 по 1995 гг. среднегодовая относительная разность размеров единиц частоты TAI и МЦP102 $\Delta f/f = -4 \cdot 10^{-15}$, среднее квадратическое отклонение (СКО) этой величины от среднего значения $\delta_f = 3 \cdot 10^{-15}$.

При аттестации государственного первичного эталона времени и частоты в 1994 г. межведомственной комиссией было принято решение об изменении единицы частоты в UTC(SU) (национальной шкале) и шкале атомного времени TA(SU) на $-0,9 \cdot 10^{-13}$, чтобы приблизить ее к единице частоты, воспроизводимой МЦP102. Это было осуществлено в

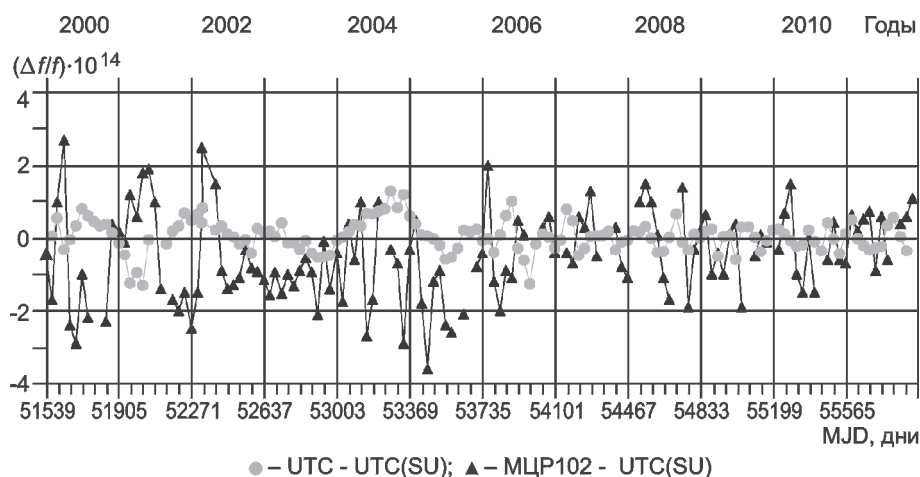


Рис. 2. Среднемесячные относительные разности частот МЦP102 и UTC(SU), UTC и UTC(SU) с 2000 по 2011 гг.

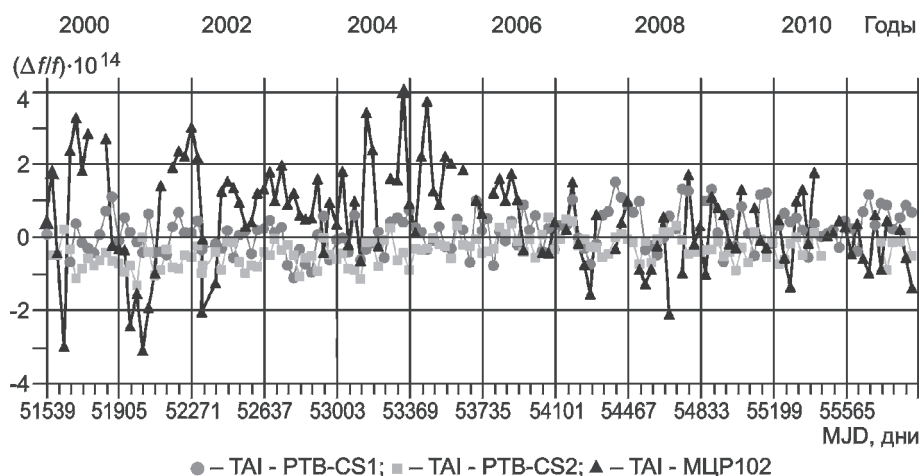


Рис. 3. Среднемесячные относительные разности частот, воспроизводимых реперами PTB-CS1 и PTB-CS2, относительно частоты TAI и разности частот TAI и МЦP102 с 2000 по 2011 гг.

0h UT 23 марта 1995 г. (MJD = 49799) и было объявлено эталонам времени Российской Федерации и МБМВ.

В 1996 г. вышел из строя синтезатор частоты, поэтому данные измерений с 1996 по 1998 гг. отсутствуют. В 1999 г. была проведена модернизация системы управления МЦР102, включающая создание комплексной программы автоматизации измерений и математической обработки результатов измерений [3]. Относительная неисключенная систематическая погрешность воспроизведения единицы частоты МЦР102 была не более $3 \cdot 10^{-14}$.

На интервале с 2000 по 2011 гг. среднегодовая относительная разность единиц частоты TAI и МЦР102 $\Delta f/f = 2 \cdot 10^{-15}$, СКО этой величины от среднего значения $\delta_r = 6 \cdot 10^{-15}$ (см. рис. 1 и таблицу).

Количество единичных циклов измерений МЦР102 с водородным хранителем на годовых интервалах было в среднем 60. Единичный цикл измерений состоял из двух сеансов: при «левом» и «правом» атомных пучках атомно-лучевой трубки с усреднением результатов измерений. Продолжительность сеанса измерений при каждом направлении пучка атомов 6—7 ч. При помощи МЦР102 на месячных интервалах определяли среднее относительное значение частоты опорного водородного хранителя $BC_{опор}$. Относительное среднемесячное значение частоты, воспроизводимой МЦР102, относительно шкалы координированного времени России (UTC(SU)) находили расчетным путем по формуле

$$\Delta f/f[\text{МЦР102} - \text{UTC(SU)}] = \Delta f/f[\text{МЦР102} - BC_{опор}] - \Delta f/f[\text{UTC(SU)} - BC_{опор}].$$

На рис. 2 представлены относительные среднемесячные разности частот $\Delta f/f[\text{МЦР102} - \text{UTC(SU)}]$ и $\Delta f/f[\text{UTC} - \text{UTC(SU)}]$ за период 2000—2011 гг., где UTC — координированная шкала МБМВ.

Среднее значение за 12 лет $\Delta f/f[\text{МЦР102} - \text{UTC(SU)}] = 5 \cdot 10^{-15}$, СКО среднемесячного значения относительной разности частот от среднего $\delta_m = 1,2 \cdot 10^{-14}$.

В зарубежных странах наряду с реперами времени и частоты фонтанного типа в некоторых метрологических центрах продолжают использовать реперы классического типа, работающие на тепловом пучке атомов цезия, например, в РТВ (Германия), NRC (Канада).

На рис. 3 приведены публикуемые МБМВ в ежемесячных бюллетенях «Т» относительные среднемесячные значения частот, воспроизводимые реперами РТВ-CS1 и РТВ-CS2 относительно частоты TAI за период 2000—2011 гг. Представлены также относительные среднемесячные разности частот между TAI и МЦР102 за этот же период, полученные пересчетом по формулам

$$\Delta f/f[\text{МЦР102} - \text{TA(SU)}] = \Delta f/f[\text{МЦР102} - \text{UTC(SU)}] - \Delta f/f[\text{TA(SU)} - \text{UTC(SU)}];$$

$$\Delta f/f[\text{TAI} - \text{МЦР102}] = \Delta f/f[\text{TAI} - \text{TA(SU)}] - \Delta f/f[\text{МЦР102} - \text{TA(SU)}].$$

Среднее значение относительной разности частот между шкалой TAI и цезиевым репером МЦР102 за 12 лет $\Delta f/f < 5 \cdot 10^{-15}$, СКО среднемесячного значения относительной разности частот от среднего $\delta_m = (1,1 \pm 0,4) \cdot 10^{-14}$. Средние значения $\Delta f/f$ между TAI и РТВ-CS1, РТВ-CS2 за 12 лет со-

ставили примерно $+3 \cdot 10^{-15}$ и $-3 \cdot 10^{-15}$ соответственно, СКО $\delta_m < 5 \cdot 10^{-15}$.

В таблице представлены среднегодовые относительные разности между частотами МЦР102 и UTC(SU), TAI и МЦР102 за последние 12 лет (2000—2011 гг.) и СКО среднемесячных разностей частот от среднегодовых.

Среднегодовые относительные разности между частотами МЦР102 и UTC(SU), TAI и МЦР102

Год	$\Delta f/f[\text{МЦР102} - \text{UTC(SU)}]$	$\Delta f/f[\text{TAI} - \text{МЦР102}]$	$\delta_m \cdot 10^{14}$ от среднегодового значения $\Delta f/f[\text{TAI} - \text{МЦР102}]$
2000	0,8	-0,5	1,8
2001	0,3	-0,7	1,0
2002	-0,3	0,5	1,4
2003	-0,4	0,2	1,6
2004	-0,5	1,1	1,6
2005	-1,5	1,6	1,1
2006	-0,5	0,7	0,9
2007	-0,1	0,1	0,7
2008	0,4	-0,5	0,8
2009	-0,4	0,3	0,7
2010	-0,3	0,6	0,8
2011	0,3	-0,3	0,7
Среднее	-0,2	0,3	1,1
δ_r	0,5	0,5	0,4

Выводы. По результатам исследований метрологических характеристик МЦР102 с 2000 по 2011 гг. (за 12 лет) получены следующие оценки:

относительная неисключенная систематическая погрешность воспроизведения частоты МЦР102 на длительных интервалах не превышает $3 \cdot 10^{-14}$;

средняя разность значений частоты TAI и МЦР102 за 12 лет в относительных единицах менее $5 \cdot 10^{-15}$;

нестабильность воспроизведения частоты МЦР102, выраженная как СКО среднегодовых значений относительных разностей частот TAI и МЦР102 от среднего за 12 лет, менее $1 \cdot 10^{-14}$.

Метрологические характеристики МЦР102 на сегодняшний день достигли своего предела и не могут быть значительно улучшены. В то же время следует отметить, что они находятся на уровне лучших реперов подобного типа — РТВ-CS1 и РТВ-CS2.

В следующем году в состав ГЭВЧ для решения современных и перспективных задач эталона будет введен метрологический цезиевый репер фонтанного типа, при этом точность эталона возрастет в 100 раз.

Л и т е р а т у р а

1. **Abashev Y. G. e. a.** Metrological parameters of the primary cesium beam frequency standards in the national time and frequency standard of the USSR // Proc. Fourth symp. on frequency standards and metrology. Ancona, Italy, 1988. P. 374—378.

2. **Елкин Г. А. и др.** Опыт длительной эксплуатации МЦР102 и МЦР103 в составе Госэталоны // Метрология времени и пространства: Труды 5-го Всерос. симп. Менделеево, 1994. С. 116—119.

3. **Бойко А. И. и др.** Исследование МЦР102 после его модернизации // Исследования по метрологии времени и

пространства: Труды ВНИИФТРИ. 2005. Вып. 50. С. 79—86.

4. **Guinot B., Azoubib J.** Comparison of primary frequency standards // Proc. Fourth symp. on frequency standards and metrology. Ancona, Italy, 1988. P. 37—42.

Дата принятия 01.06.2012 г.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

681.26.077.2

Системы поверки кориолисовых расходомеров

М. Ю. МИХЕЕВ*, К. В. ГУДКОВ*, В. А. ЮРМАНОВ*, Н. К. ЮРКОВ**

* Пензенская государственная технологическая академия, Пенза, Россия, e-mail: mix1959@gmail.com

** Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

Предложен способ поверки кориолисовых расходомеров на месте их эксплуатации. Рассмотрены конструкция системы, принципы работы, результаты моделирования воздействия импульсных помех.

Ключевые слова: кориолисов расходомер, поверка, грубые искажения результатов измерений.

A method of Coriolis flow meters' on-site verification is suggested. The system's design, operation principle and pulse interferences' influence simulation are considered.

Key words: Coriolis flow meter, verification, gross distortion of measurements results.

В настоящее время массовые расходомеры Кориолиса часто используют для контроля транспортировки и взвешивания налоговых пошлин по результатам измерений расхода многих различных жидкостей, в частности, сжиженного нефтяного газа и других углеводородов. Для этих областей применения измерительное устройство должно иметь погрешность 0,5 % или даже 0,1 %.

Использование систем на основе гравиметрического дивертора для поверки расходомеров представляет собой относительно трудоемкий и дорогостоящий процесс, а сами измерительные стенды относительно громоздки. С меньшей точностью, но проще процедура поверки с применением эталонных измерительных устройств, поверяемых на гравиметрических системах и используемых при калибровке относительно менее точных измерительных устройств. Большинство современных способов поверки содержит операцию извлечения поверяемого расходомера из трубопровода, в котором он работает. При поверке расходомеров на месте их работы необходима автоматическая компенсация внешних влияний, действующих на точность и воспроизводимость результатов: механического воздействия на измерительное устройство; конфигурации трубопровода; изменения свойств и состава жидкости и окружающей среды.

В способе, предложенном в [1] для поверки любых расходомеров в рабочих условиях эксплуатации, используется поверочное устройство, содержащее два идентичных эталонных массовых расходомера на основе эффекта Кориолиса,

включенных в трубопровод последовательно (рис. 1). Результаты поверки получают после обработки информации от трех указанных расходомеров.

Рассмотрим особенности использования такой схемы.

Во-первых, с целью минимизации погрешности при подсчете импульсов и обеспечения воспроизводимости результатов, поступающих с выхода измерительных устройств на базе двух поверочных и одного поверяемого кориолисовых расходомеров, каждая серия поверок должна иметь длительность 1—2 мин. Это предполагает высокую стабиль-

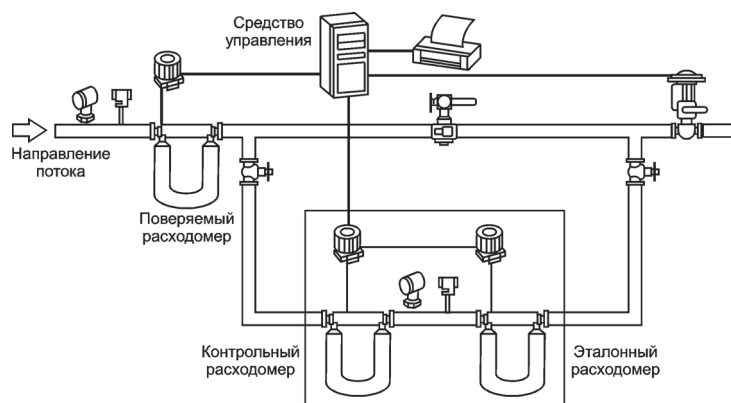


Рис. 1. Устройство поверки расходомеров на основе эффекта Кориолиса