

Результаты летной эксплуатации бортовых стандартов частоты космических аппаратов «ГЛОНАСС-М»

© Д. В. Залетов, А. Б. Басевич, А. Е. Тюляков, В. Е. Шабанов

АО «РИРВ», г. Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены результаты летной эксплуатации цезиевых стандартов частоты на основе атомно-лучевой трубки в составе космических аппаратов «ГЛОНАСС-М».

Ключевые слова: бортовые стандарты частоты, частотные характеристики, атомно-лучевая трубка.

«ГЛОНАСС-М» — это серия космических аппаратов (КА) российской глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС второго поколения, разработанная и выпускаемая АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». От спутников серии «ГЛОНАСС» (1-е поколение) они отличаются гарантированным сроком активного существования (7 лет) [1].

В настоящее время основой орбитальной группировки системы ГЛОНАСС являются КА «ГЛОНАСС-М» с бортовым синхронизирующим устройством, имеющим в своем составе три атомно-лучевых стандарта частоты (АЛСЧ) [2]. Внешний вид данного АЛСЧ представлен на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид АЛСЧ для КА «ГЛОНАСС-М»

Основные заданные технические характеристики АЛСЧ для КА «ГЛОНАСС-М» в сравнении с АЛСЧ для КА «ГЛОНАСС» приведены в таблице.

Следует отметить, что измеренная вариация Аллана за $\tau_{и} = 1$ с составляет $(8-9) \cdot 10^{-12}$, за $\tau_{и} = 1$ сутки составляет $(4-8) \cdot 10^{-14}$, и относительная погрешность по частоте не превышает $\pm(0.1-1) \cdot 10^{-12}$.

Данный АЛСЧ построен по классической схеме. В нем выходная частота прецизионного кварцевого генератора (КГ) 5 МГц подстраивается по сигналу с выхода атомно-лучевой трубки. По сравнению с АЛСЧ для КА «ГЛОНАСС» в преобразователе частоты используется метод прямого умножения частоты сигнала КГ до частоты атомного перехода 9.192631770 ГГц с подмешиванием частоты синтезатора 12.6 МГц. Синтезатор частоты основан на принципе дробно-периодического синтеза. Впервые применена цифро-аналоговая система АПЧ. Также реализована схема изменения коэффициента усиления полезного сигнала с выхода АЛТ по внешней команде, что позволяет увеличить ресурс работы.

Таблица

Основные характеристики АЛСЧ

Характеристика	АЛСЧ для КА «ГЛОНАСС-М»	АЛСЧ для КА «ГЛОНАСС»
Нестабильность вариация Аллана	$5 \cdot 10^{-12} \tau_{и} = 1 \text{ с}$ $1 \cdot 10^{-15} \tau_{и} = 1 \text{ сутки}$	$5 \cdot 10^{-11} \tau_{и} = 1 \text{ с}$ $5 \cdot 10^{-13} \tau_{и} = 1 \text{ сутки}$
Относительная погрешность по частоте	$\pm 5 \cdot 10^{-12}$	$\pm 2 \cdot 10^{-11}$
Температурная чувствительность, не более	$1 \cdot 10^{-13} / ^\circ\text{C}$	$5 \cdot 10^{-13} / ^\circ\text{C}$
Масса	30 кг	39 кг
Потребляемая мощность, не более	55 Вт	80 Вт

Первый КА «ГЛОНАСС-М» был запущен 10.12.2003. В 2004 году с учетом реальных значений погрешности определения расхождения бортовой шкалы времени (БШВ) КА относительно шкалы времени (ШВ) центрального синхронизатора (ЦС) по измерениям системы управления и контроля (СУИК) порядка 20–25 нс и числа сеансов измерений СУИК в сутки (не более 4) «инструментальная» погрешность определения действительного значения частоты (ДЗЧ) АЛСЧ КА составляла не лучше $3.2 \cdot 10^{-13}$, т. е. «инструментальная» погрешность превышала характеристики стабильности частоты. Запуск второго АЛСЧ был осуществлен 26.12.2004. В 2005 году в составе системы синхронизации по-прежнему использовался ЦС на основе водородных стандартов частоты (ВСЧ)

с суточной нестабильностью частоты не более $5 \cdot 10^{-14}$ и формирования ШВ ЦС из сигнала ведущего ВСЧ. Тем не менее, учитывая недостаточную точность измерений, систематическое изменение частоты АЛСЧ практически отсутствовало или не превышало нескольких единиц 10^{-15} за месяц, а суточная нестабильность частоты на интервалах штатной работы, находилась в пределах $2 \cdot 10^{-13}$. Также наблюдалось нештатное функционирование КА на отдельных интервалах, при которых АЛСЧ неоднократно переключались в режим пониженной потребляемой мощности.

Затем, после модернизации ЦС и средств измерений, была достигнута необходимая точность измерений. Также значительно снизилось число аварийных выключений АЛСЧ.

На рис. 2 представлена гистограмма среднего квадратического отклонения (СКО) ДЗЧ КА «ГЛОНАСС-М» за 2012–2015 годы.

Здесь можно отметить, что большинство стандартов частоты удовлетворяют предъявленным к ним требованиям с достаточным запасом, и имеют СКО около $5 \cdot 10^{-14}$.

На рис. 3 представлена гистограмма СКО ДЗЧ КА «ГЛОНАСС-М» на суточном интервале наблюдения за 2016 год.

На первых КА «ГЛОНАСС-М» установлены в составе АЛСЧ атомно-лучевые трубки с использованием в системе детектирования вторичного электронного умножителя (ВЭУ) на высоковольтных диодах. В связи с отсутствием производства материалов для ВЭУ в России, снижением качества производства и, как следствие, деградации параметров АЛТ во времени было принято решение об изменении конструкции АЛТ с применением электрометрического усилителя (ЭМУ). Первый КА № 715 с АЛСЧ на основе АЛТ с

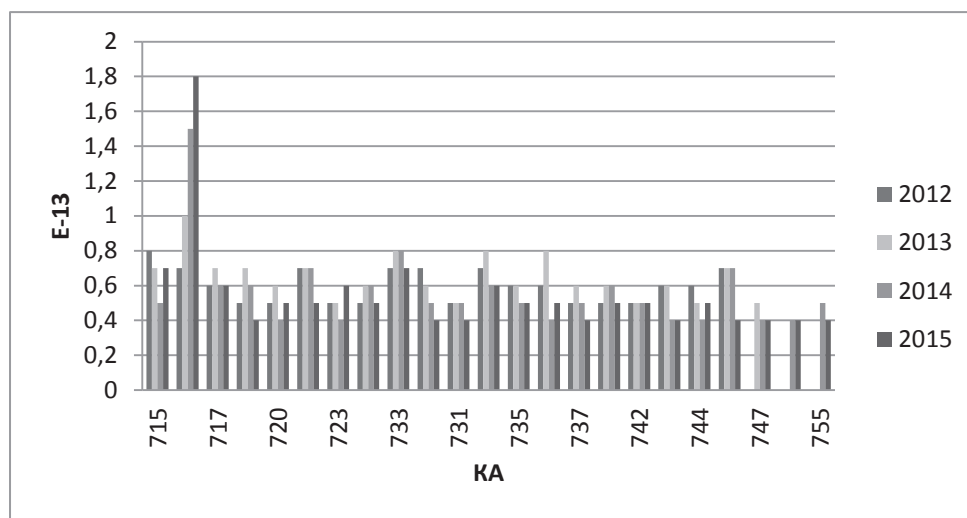


Рис. 2. Гистограмма СКО ДЗЧ КА «ГЛОНАСС-М» за 2012–2015 годы

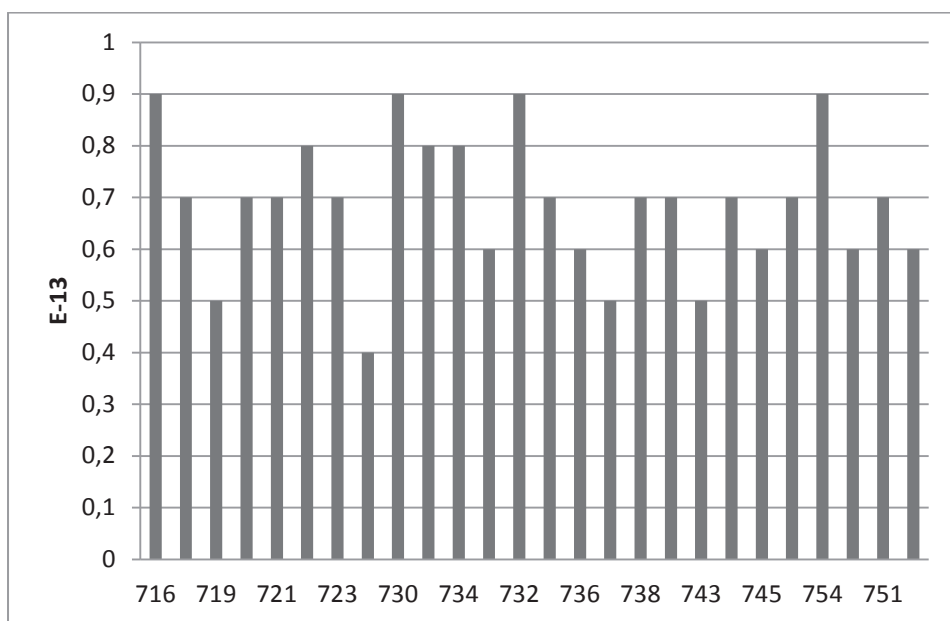


Рис. 3. СКО ДЗЧ КА «ГЛОНАСС-М» на суточном интервале наблюдения за 2016 г.

ЭМУ был запущен 25.12.2006. В 2005 году была проведена очередная модернизация атомно-лучевой трубки из состава АЛСЧ, что позволило повысить надежность и точностные характеристики. На КА № 718Л–723Л частично установлены модернизированные АЛТ, а, начиная с КА № 724, установлены все обновленные АЛТ.

На рис. 4 приведена наработка КА «ГЛОНАСС-М» на февраль 2017 г. с момента запуска.

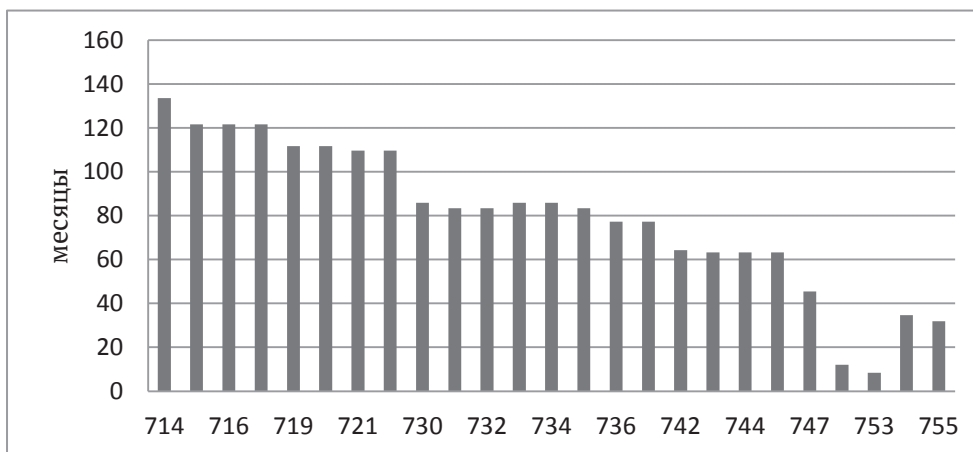


Рис. 4. Нарработка КА «ГЛОНАСС-М» на февраль 2017 г. с момента запуска

Следует отметить, что все закрытые КА выведены из системы не из-за неисправностей или отказов АЛСЧ. В настоящее время 7 КА находятся за пределом назначенного срока активного существования и продолжают успешно эксплуатироваться по целевому назначению. Нарботка каждого из трех КА (715, 716, 717) составляет 121.8 месяца, двух (719, 720) 111.7 месяца и двух КА 109.8 месяца (721, 723).

Шесть КА имеют наработку около 85 месяцев. В орбитальном резерве находится КА 714 с наработкой 133.8 месяца. Данный КА имеет потенциальную возможность использования по целевому назначению.

На рис. 5 представлена наработка АЛСЧ в КА покомплектно.

АЛСЧ из состава КА «ГЛОНАСС-М» продемонстрировали в ходе летной эксплуатации высокую надежность и долговечность при обеспечении точностных характеристик с достаточным метрологическим запасом.

Опыт эксплуатации АЛСЧ позволил создать такие усовершенствования, как автоматическую подстройку С-поля и регулировку коэффициента усиления полезного сигнала с выхода АЛТ в процессе функционирования.

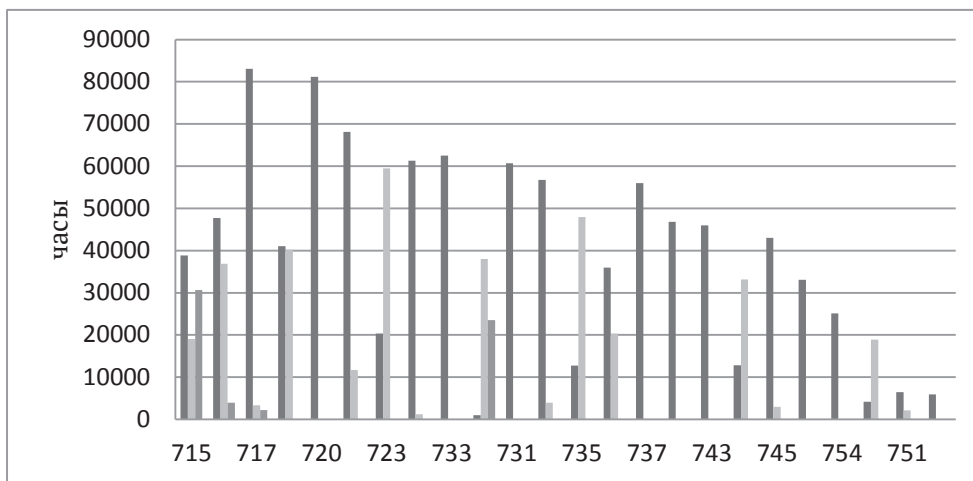


Рис. 5. Нарботка АЛСЧ в КА покомплектно

Успешная эксплуатация АЛСЧ из состава КА «ГЛОНАСС-М» подтвердила правильность выбора схемотехнических решений, позволила отработать технологию производства АЛСЧ и создать новые стандарты частоты для эксплуатации в условиях открытого космоса для КА «ГЛОНАСС-К» и перспективных разработок с увеличенным ресурсом и точностными характеристиками.

Литература

1. Краткое описание на сайте АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва» <https://www.iss-reshetnev.ru/spacecraft/spacecraft-navigation/ghonass-m>.

2. Сайт Информационно-аналитического центра координатно-временного и навигационного обеспечения (ИАЦ КВНО) ФГУП Центрального научно-исследовательского института машиностроения (ЦНИИмаш) <https://www.glonass-iac.ru/GLONASS/>.

The Results of Flight Tests of the GLONASS-M Onboard Clocks

D. V. Zaletov, A. B. Basevich, A. E. Tyulyakov, V. E. Shabanov

Accuracy and operation characteristics of frequency standards are given. The results of flight tests are presented. The prospects for progress in onboard clocks are shown.

Keywords: frequency standards, onboard atomic clock, flight tests.