

УДК 621.3:929

ОПЫТ СОЗДАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ ЧАСТОТЫ В АО «РОССИЙСКИЙ ИНСТИТУТ РАДИОНАВИГАЦИИ И ВРЕМЕНИ» ДЛЯ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС

д.т.н. проф. Басевич А.Б., Лисицын Л.А.

Приведена историческая справка образования в Ленинградском научно-исследовательском радиотехническом институте (ЛНИРТИ) в конце 50-х годов нового тематического направления по созданию квантовых стандартов частоты (КСЧ) для бортовых синхронизирующих устройств космических аппаратов.

Введение

Ныне ЛНИРТИ носит название АО «Российский институт радионавигации и времени» (АО «РИРВ»), которому в конце 70-х годов на основании положительного опыта по данной тематике были поручены разработка и создание бортовых КСЧ. Данные КСЧ использовались для работы в составе бортовых синхронизирующих устройств (БСУ) космических аппаратов системы ГЛОНАСС, которые предназначались для решения следующих задач:

- формирование и хранение высокостабильной бортовой шкалы времени и сигналов синхрочастот для работы бортовой аппаратуры;
- управление бортовой шкалой времени и частотой по сигналам наземного комплекса управления или автономно.

В конце 50-х годов в нашей стране для решения поставленных задач потребовались источники высокостабильных колебаний, требуемые точностные характеристики которых могли быть достигнуты лишь при стабилизации частоты по атомным переходам. К этому времени работы отечественных ученых Н.Г. Басова, А.М. Прохорова и зарубежных специалистов Ч.Х. Таунса, Н.Ф. Рамзея положили начало развитию квантовой электроники, методы которой и легли в основу приборов, получивших название квантовых стандартов частоты [1, 2].

КСЧ нашли широкое применение в составе БСУ на борту космического аппарата (КА) в процессе создания и совершенствования системы ГЛОНАСС [3]. Их отличают сравнительно высокие точностные характеристики, высокая воспроизводимость частоты, устойчивость к внешним воздействующим факторам (температура, вибрация, невесомость, радиация и т.д.), достаточно малое энергопотребление, а также относительно малые вес и габариты.

БСУ, в состав которого входят КСЧ на борту КА, участвует в формировании навигационных сигналов, бортовой шкалы времени (ШВ), поправок к шкале

времени системы (ШВС) относительно координированной шкалы времени России UTC (SU), сигналов эталонных частот для работы других устройств, расположенных на борту КА.

1 История создания тематического направления

В начале 1957 года в ЛНИРТИ был организован отдел, первым начальником которого стал д.т.н. Н.А. Бегун, где были начаты разработки КСЧ, в частности пассивных КСЧ – на атомно-лучевой трубке (АЛТ) и газовой ячейке.

В создании и развитии этого направления принимали активное участие д.т.н., профессор А.А. Колосов, д.т.н., профессор А.Г. Геворкян, д.ф.-м.н., профессор В.С. Жолнеров, д.т.н., профессор А.Б. Басевич.

Перед коллективами института ставилась задача разработки уникальных приборов, обеспечивающих требуемые точностные, эксплуатационные и надежностные характеристики в широком диапазоне климатических и механических воздействий.

Решение проблем, возникших при создании этих приборов, потребовало проведения теоретических и экспериментальных исследований, длительных прецизионных испытаний, разработки оригинальных технологических процессов, создания уникальной технологической базы, в том числе для производства спектральных приборов для КСЧ РГЯ, а также испытательного центра и вторичного эталона частоты.

Разработка и выпуск высокостабильных КСЧ потребовал создания вторичного эталона времени и частоты (ВЭВЧ). В настоящее время характеристика эталона по суточной нестабильности частоты составляет $\sim 3 \times 10^{-15}$. Можно сказать, что ВЭВЧ АО «РИРВ» по своим метрологическим характеристикам удовлетворяет требованиям для метрологического контроля, аттестации, прецизионных испытаний современных КСЧ в испытательном центре. В разные годы эталоном руководили к.т.н. А.С. Перлин, д.т.н. А.Л. Мясников, а Ученым Хранителем времени и частоты эталона был



*Бегун
Николай
Андреевич*

*Начальник отдела, кандидат технических наук.
Работает в институте с момента его основания. За исследования и разработку специальных систем в 1957 году присуждена Ленинская премия.
Главный конструктор ряда разработок. Автор многих изобретений и технических усовершенствований.
За высокие производственные показатели в социалистическом соревновании и активное участие в общественной жизни неоднократно занесен в книгу Почетной института.*



*Колосов
Александр
Андреевич*

*Начальник лаборатории, доктор технических наук, профессор, главный конструктор аппаратуры. Имеет 26 изобретений, 18 патентов.
Работает в институте с 1957 года.
За успешное выполнение государственных планов награжден орденом Трудового Красного Знамени. Неоднократно был занесен на доску Почета.
Активно участвует в общественной жизни института: избирался членом парткома и членом Методического Совета коллегий работников.
За высокие показатели в социалистическом соревновании в 1975, решающем году IX пятилетки занесен в книгу Почета института.*

Копии листов Книги
почета ЛНИРТИ (1973 г.)



*Жолнеров
Вадим
Григорьевич*

*«Политический отдел», «защитит физико-математическую науку», работает в институте с 1959 года.
Мед. Жолнеров В.В. награжден юбилейной медалью «За доблестный труд. В ознаменование 100-летия со дня рождения Владимира Ильича Ульянова (Кедрова)».
«За трудовое отличие». Награжден государственными орденами «Знак отличия», «Знак отличия» 10-ой пятилетки. «За успехи в труде». Награда «Победитель социалистического соревнования в гостях XXVI съезда ЦК КПСС».*



профессор Геворкян А.Г.



профессор Басевич А.Б.

утвержден д.т.н., профессор А.Г. Геворкян.

В первом КА системы ГЛОНАСС в составе БСУ в бортовом АЛСЧ использовалась рубидиевая АЛТ.

В дальнейшем, в широко используемых, разработанных АО «РИРВ» АЛСЧ для различных РТС, в том числе и системы ГЛОНАСС, применялись цезиевые АЛТ, разработанные и изготовленные на предприятиях радиоэлектронной промышленности страны.

Другой вид КСЧ – на основе газовой ячейки – разрабатывался в институте практически со дня его основания. В 1962 году был разработан первый отечественный КСЧ-РГЯ. В семидесятые годы были разработаны КСЧ-РГЯ космического, корабельного и стационарного базирования. В восьмидесятые годы были разработаны самолетный и космический КСЧ-РГЯ с более высокими метрологическими характеристиками. В 90-ые годы был разработан в рамках ОКР целый ряд малогабаритных, с объемом до двух литров, КСЧ-РГЯ для всех групп эксплуатации. Среди них были КСЧ-РГЯ стационарного, самолетного, корабельного, автомобильного и космического базирования [4].

Необходимо отметить, что изготовление рубидиевых квантовых дискриминаторов для КСЧ-РГЯ всех групп эксплуатации было полностью освоено в ЛНИРТИ.

Большой вклад на первоначальном этапе создания КСЧ-РГЯ внесли Ю.В. Крачковский, д.т.н., профессор А.Г. Геворкян, к.т.н. С.В. Семенов, д.ф.-м.н., профессор В.С. Жолнеров, д.т.н., профессор А.Б. Басевич, к.т.н. А.А. Соловов, д.т.н. В.И. Хуторщиков, к.т.н. Г.М. Смирнова.

В результате многолетней работы по данной тематике в институте сложился коллектив ученых, инженеров, конструкторов и технологов, способный ставить и решать сложные научно-технические задачи.

В 2000 году в институте произошли организационные изменения. В частности, было организовано отделение по разработке

радиотехнических систем различного назначения и аппаратных средств, где, в частности, образовались комплексная лаборатория по разработке АЛСЧ и КСЧ-РГЯ и лаборатория по разработке дискриминаторов и спектральных приборов для КСЧ-РГЯ.

Коллективами этих лабораторий были разработаны современные космические КСЧ традиционного типа с повышенными метрологическими и надежностными характеристиками.

2 Этапы разработки космических КСЧ

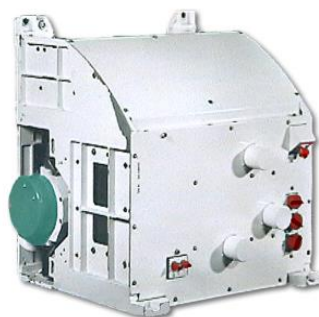
Космические КСЧ в значительной степени определяют точность и надежность системы ГЛОНАСС. На протяжении всех этапов разработки КСЧ, по требованию заказчика, в институте идет непрерывный процесс повышения точностных и ресурсных характеристик КСЧ для системы ГЛОНАСС.

Первый отечественный космический АЛСЧ «Анчар» был разработан в 1979 году. Он был разработан для геодезической космической системы, но учитывая продолжительность разработки АЛСЧ непосредственно для системы ГЛОНАСС, было принято решение установить на борту КА системы ГЛОНАСС АЛСЧ «Анчар».

В АЛСЧ «Анчар» применена рубидиевая АЛТ типа «Уклон-2», разработанная одним из предприятий радиоэлектронной промышленности по техническому заданию ЛНИРТИ, для применения в стандартах частоты, устанавливаемых на самолетах и подводных лодках. АЛСЧ «Анчар» на базе АЛТ «Уклон-2» после наземных испытаний в 1982 году в составе КА был выведен на орбиту, но в серийное производство запущен не был из-за относительно низких характеристик по ресурсу и стабильности частоты. Однако, заслуга его в



АЛСЧ «Анчар»



АЛСЧ «Яхонт»



АЛСЧ «Малахит»

том, что он позволил на ранней стадии приступить к отработке принципов функционирования системы и дал положительный опыт в части разработки последующих космических АЛСЧ для системы ГЛОНАСС.

Вскоре после этого в 1986 году был разработан АЛСЧ «Яхонт» для КА с трехлетним сроком активного существования (САС).

В 1989 году был разработан АЛСЧ

«Малахит» для КА со САС 5 лет. Изделие «Малахит» было изготовлено в единственном экземпляре и выведено на орбиту в составе КА совместно с АЛСЧ «Яхонт». В серийное изготовление прибор не был запущен, т.к. было принято решение разрабатывать АЛСЧ для КА со САС 7 лет.

Уже в 2000 году для этой цели был разработан АЛСЧ «Ракита». В настоящее время выпуск АЛСЧ «Ракита» составил более ста комплектов.

В 2005 году была начата разработка АЛСЧ «Туя» для КА со САС 10 лет. Первые комплекты АЛСЧ «Туя» были выведены на орбиту в составе нового КА со САС 10 лет в начале 2011 года.

Наконец, в том же году был разработан КСЧ-РГЯ «RFS-514» для КА со САС 10 лет. Первые комплекты изделия «RFS-514» были выведены на орбиту в составе нового КА со САС 10 лет в начале 2011 года.

Однако, перед этим, был проведен космический эксперимент по отработке технических решений экспериментальных составных частей будущего БСУ: квантового стандарта частоты на рубидиевой газовой ячейке (КСЧ-РГЯ-Э), компаратора бортового частотно-временного (КБЧВ-Э) и системы прецизионной термостабилизации квантовых стандартов частоты на КА «ГЛОНАСС-М». В течение года проводились измерения характеристик КСЧ-РГЯ-Э и регистрация телеметрических параметров. За время испытаний была подтверждена правильность выбранных технических решений КСЧ для условий эксплуатации в открытом космосе и надежность функционирования электронных блоков нового поколения с применением микроконтроллера. Опыт разработки экспериментального КСЧ затем был учтен при разработке КСЧ-РГЯ и КСЧ-АЛТ для перспективных бортовых синхронизирующих устройств.

Основные тактико-технические данные космических АЛСЧ и КСЧ-РГЯ для КА системы ГЛОНАСС приведены в таблице 1.

Отметим некоторые особенности космических КСЧ:



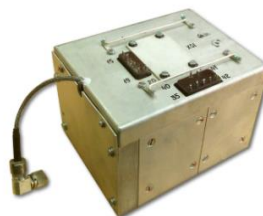
АЛСЧ «Ракита»



АЛСЧ «Туя»



«RFS-514»



Дискриминатор квантовый

1) Современные космические КСЧ по требованию заказчика имеют условия эксплуатации – открытый космос. Поэтому все КСЧ проходят в АО «РИРВ» испытания и сертификацию на специальном оборудовании, имитирующем штатные условия эксплуатации.

2) Рабочий диапазон температур 15-20°C. Точность поддержания температуры внутри диапазона 15-20°C составляет 0,5°C на основании плиты АЛСЧ и до 0,1°C на основании плиты КСЧ-РГЯ. При эксплуатации КСЧ в гермоконтейнере, наполненном газом, точность поддержания температуры внутри рабочих температур 15-30°C составляла $\pm 1^\circ\text{C}$.

3) При разработке АЛСЧ для работы на борту КА со САС 10 лет особое внимание было уделено сохранению метрологических характеристик в новых условиях эксплуатации при одновременном снижении потребляемой мощности, массы и повышении ресурса до 100 000 часов.

4) В современных стандартах частоты применена система автоподстройки частоты с использованием микропроцессорной техники.

5) Для разработки использована отечественная элементная база.

6) В современных космических КСЧ на АЛТ разработана автоматическая подстройка среднего поля и оптимального режима работы АЛТ.

Т а б л и ц а 1 – Основные тактико-технические данные космических АЛСЧ и КСЧ из состава БСУ КА системы ГЛОНАСС

Характеристика		АЛСЧ					КСЧ-РГЯ
		Анчар	Яхонт	Малахит	Ракита	ТУЯ	RFS-514
1	Год разработки	1979	1986	1989	2000	2005	2005
2	АЛТ	Уклон-2	Утро (СД-104А-1)	Удар (СД-106)	Успех-3АМ (СД-109)	Успех-4	–
3	Условия эксплуатации	гермо-контейнер	гермо-контейнер	гермо-контейнер	гермо-контейнер	открытый космос	открытый космос
4	Дрейф частоты за месяц	–	–	–	–	–	$3 \cdot 10^{-12}$
5	Нестабильность 1 с 1 сутки	$1 \cdot 10^{-11}$ $5 \cdot 10^{-12}$	$5 \cdot 10^{-11}$ $5 \cdot 10^{-13}$	$2 \cdot 10^{-11}$ $1 \cdot 10^{-13}$	$2 \cdot 10^{-11}$ $1 \cdot 10^{-13}$	$2 \cdot 10^{-11}$ $1 \cdot 10^{-13}$	$2 \cdot 10^{-11}$ $1 \cdot 10^{-13}$
6	Диапазон рабочих температур, град	(15-30)	(15-30)	(15-30)	(15-30)	(15-20)	(15-20)
7	ТКЧ, 1/град	$1 \cdot 10^{-12}$	$5 \cdot 10^{-13}$	$2 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-13}$
8	Потребляемая мощность, Вт	60	80	85	55	50	28
9	Масса, кг	22	39	50	32	26,5	8
10	γ -ресурс, час	10000	17500	55000	90000	100000	100000

3 Современное состояние мировых разработок в области создания квантовых стандартов частоты

Наряду с АО «РИРВ» научно-исследовательские лаборатории из США, Швейцарии, Италии, Китая активно занимались и занимаются созданием космических стандартов частоты.

Так, например, в бортовом синхронизирующем устройстве КА Block IIR американской системы GPS в качестве источника опорного сигнала используются рубидиевые стандарты частоты с нестабильностью частоты на суточном интервале $<5 \times 10^{-14}$ (на 2-х часовом интервале 1×10^{-13}). Для аппаратов GPS Block IIF и последующих было принято решение вернуться к комбинации в составе БСУ цезиевого и рубидиевого стандартов частоты с практическим обеспечением суточной нестабильности частоты на уровне 1×10^{-14} .

При проектировании европейской ГНСС Galileo для повышения точности было принято решение разрабатывать бортовое синхронизирующее устройство на основе двух технологий: 1) рубидиевого стандарта частоты аналогичного американской GPS (нестабильность частоты на суточном интервале $<3 \cdot 10^{-14}$ и на 2-х часовом интервале $6 \cdot 10^{-14}$); и 2) пассивного водородного стандарта частоты (нестабильность частоты на суточном интервале $<1 \cdot 10^{-14}$ и на 2-х часовом интервале $4 \cdot 10^{-14}$). Стандарты частоты предназначены для установки на открытой платформе КА Galileo в условиях открытого космоса. Летные модели приборов успешно выдержали все механические и климатические испытания, а также тесты на электромагнитную совместимость и радиационную стойкость, прошли летные испытания.

В китайской навигационной системе БЕУДОУ в составе БСУ КА используются рубидиевые стандарты частоты. В настоящее время китайские ученые активно работают над созданием водородных мазеров космического применения.

В БСУ космических аппаратов «Глонасс-М» используются стандарты частоты на атомно-лучевых трубках и должны иметь суточную нестабильность $\leq 1 \cdot 10^{-13}$ при сроке активного существования 7 лет. Реальная суточная нестабильность держится на уровне $6-7 \cdot 10^{-14}$.

В перспективных космических аппаратах «Глонасс-К» в составе БСУ используются стандарты частоты на атомно-лучевых трубках с увеличенным сроком активного существования 10 лет и суточной нестабильностью $\leq 5 \cdot 10^{-14}$.

В БСУ КА «Глонасс-К» используются также малогабаритные стандарты частоты на основе рубидиевой газовой ячейки с относительной нестабильностью частоты на уровне $1-0,5 \cdot 10^{-13}$.

4 Перспективные разработки АО «РИРВ»

В настоящее время перед разработчиками перспективных КСЧ стоят следующие противоречивые задачи:

- а) повышение стабильности частоты;

- б) повышение ресурсных характеристик;
- в) снижение потребляемой мощности;
- г) снижение массогабаритных характеристик;
- д) снижение чувствительности к внешним воздействиям.

Современные задачи в АО «РИРВ» решают двумя путями: модернизацией КСЧ традиционного типа и разработкой КСЧ на новых технологических принципах.

В настоящее время разработаны КСЧ на АЛТ и КСЧ РГЯ с предельными точностными характеристиками на уровне 5×10^{-14} за весь срок эксплуатации. Изделия прошли автономные испытания с положительными результатами и готовы к летным испытаниям. Дальнейшее повышение точностных характеристик КСЧ традиционного типа противоречиво с требуемыми ресурсными характеристиками. Исключение может составить КСЧ РГЯ традиционного типа, который может обеспечить точностные характеристики до уровня 1×10^{-14} без снижения ресурсных.

В конечном итоге, характеристики вновь разработанных КСЧ по сравнению с предыдущими изменились приблизительно следующим образом: по стабильности частоты – увеличение в 2 раза, по температурной нестабильности – уменьшение в 2 раза, по потребляемой мощности – увеличение на 10%, по массе – увеличение на 5-10%, по ресурсу – увеличение на 20%.

Дальнейшее повышение точностных характеристик КСЧ до 5×10^{-15} может быть достигнуто при использовании лазерных технологий. Поэтому в 2009 году была организована лаборатория по разработке перспективных КСЧ с использованием лазерных технологий. Начальником лаборатории стал д.ф.-м.н., профессор В.С. Жолнеров, который приложил много усилий для создания нового направления, в частности, по разработке первоначальных технических требований к лазерным излучателям для КСЧ. Было принято решение сосредоточить внимание на создании КСЧ на цезиевой АЛТ с лазерной накачкой и детектированием, а также на создании КСЧ-РГЯ с импульсной лазерной накачкой.

Заключение

АЛСЧ «Анчар» и «Малахит» в составе БСУ были в штатной эксплуатации практически в единственных экземплярах. АЛСЧ «Анчар» отработал на орбите более чем 0,5 года, а АЛСЧ «Малахит» – более четырех лет. Оба АЛСЧ по разным причинам в серию не пошли. В штатной эксплуатации свои метрологические характеристики подтвердили.

После АЛСЧ «Анчар» на орбиту в составе БСУ был выведен АЛСЧ «Яхонт». Институтом было выпущено более 150 изделий АЛСЧ «Яхонт» для штатной эксплуатации в составе БСУ на КА. В результате анализа работы изделий на орбите в составе КА системы ГЛОНАСС установлено: ресурс изделия находился в пределах 1÷1,5 года, суточная относительная нестабильность частоты в пределах $2 \div 3 \times 10^{-13}$. Ресурс изделия «Яхонт» практически позволял обеспечить САС КА, на котором были установлены три комплекта АЛСЧ, в среднем 3,5÷4 года.

В настоящее время в штатной эксплуатации в составе БСУ находятся АЛСЧ «Ракита», установленные на борту КА со САС 7 лет. Первые комплекты АЛСЧ для семилетнего КА показали низкую надежность, связанную с комплектующим элементом. Определив ненадежный узел, сотрудники института провели соответствующие работы, повысили ресурс работы АЛСЧ. Нарботка АЛСЧ «Ракита» в составе КА после доработки позволяет гарантировать заданный срок САС КА. Анализ показал, что некоторые КА продолжали работать после окончания САС, а работа продолжалась на I-ом или II-ом комплекте АЛСЧ. Суточная нестабильность всех работающих АЛСЧ в период эксплуатации на КА практически была на уровне 5×10^{-14} .

В настоящее время, для нового КА со САС 10 лет разработаны АЛСЧ «ТУЯ» и КСЧ-РГЯ «RFS-514». Эти стандарты частоты прошли все виды наземных испытаний и подтвердили готовность к летным испытаниям (ЛИ). Запуск этих изделий на орбиту в составе КА для проведения ЛИ был успешно осуществлен в начале 2011 года. Для оценки результатов их работы требуется более длительный период эксплуатации.

Однако уже сейчас можно сказать, что комбинация совместной работы АЛСЧ и КСЧ-РГЯ позволяет решить навигационную задачу с требуемой точностью.

В результате многолетней деятельности по созданию КСЧ в АО «РИРВ» образовалась научная школа по квантовой стабилизации частоты, которая насчитывала 8 докторов и более 20 кандидатов наук.

Можно с уверенностью сказать, что технология создания отечественных космических КСЧ впервые освоена в АО «РИРВ». Сложившийся коллектив, накопленный положительный опыт по разработке и созданию современных космических КСЧ позволит и далее АО «РИРВ» успешно решать задачи по повышению тактико-технических данных этих приборов.

Литература

1 *Рамзей Н.* Молекулярные пучки. – М.: Издательство иностранной литературы, 1960.

2 *Риле Ф.* Стандарты частоты. Принципы и приложения. – М.: Физматлит, 2009.

3 *Басевич А.Б., Богданов П.П., Геворкян А.Г., Кутиков В.Ю., Тюляков А.Е., Шибшаевич Б.В.* Вклад Российского института радионавигации и времени в создание и развитие ГЛОНАСС // Космонавтика и ракетостроение. – 2007. – Вып. 3 (48). – С. 87.

4 *Басевич А.Б., Геворкян А.Г., Жолнеров В.С., Мясников А.Л., Хуторициков В.И., Ганкин В.З.* Сорокалетний опыт создания квантовых стандартов частоты в Российском институте радионавигации и времени // Радионавигация и время. – 1997. – №№ 1, 2.