

## КОСМИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ПРЕЦИЗИОННОЙ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ КВАНТОВЫХ СТАНДАРТОВ ЧАСТОТЫ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ

В. Е. Чеботарев<sup>1</sup> ✉, В. А. Деревянко<sup>2</sup>, А. В. Макуха<sup>2</sup>,  
М. Т. Бакиров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнёва»,  
г. Железнодорожный, Московская область, Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт вычислительного моделирования СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН,  
г. Красноярск, Российская Федерация

Основой космических систем навигации являются высокостабильные атомные стандарты частоты, формирующие высокоточную спутниковую шкалу времени и высокостабильную сетку частот, обеспечивающие выходные точностные характеристики космических систем в целом. В основу системы прецизионной термостабилизации были положены следующие основные принципы: обеспечение пространственной неоднородности тепловых потоков на основании атомных стандартов частоты с использованием гипертеплопроводящих пластин; организация управляемых с высокой точностью дозированных тепловых воздействий обогревателей; повышение точности измерения температур (абсолютных и относительных) с помощью бортового стандарта температуры.

Результаты лабораторного, наземного и космического эксперимента показали, что принцип прецизионной термостабилизации работает в части учета отклонения температуры от заданной и учета влияния нестабильности питания бортовой сети, также была обеспечена точность термостабилизации с учетом угла поворота солнечных батарей от 0,025 °С (на солнечных участках орбиты) до 0,04 °С (на теневых участках орбиты). Кроме того, при применении гипертеплопроводящих пластин улучшена пространственная нестабильность термоплиты в 6 раз. В итоге разработанные мероприятия позволяют повысить точность прецизионной термостабилизации до 0,01 °С.

*Ключевые слова:* космические навигационные системы, навигационный спутник, атомные стандарты частоты, прецизионная термостабилизация, гипертеплопроводящая пластина, космический эксперимент.

### Введение

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) находят широкое применение в навигационном обеспечении транспортных средств различного класса: наземного, водного, воздушного, космического [1; 2]. Основой космических навигационных систем являются высокостабильные атомные стандарты частоты (АСЧ), формирующие высокоточную спутниковую шкалу времени и высокостабильную сетку частот, обеспечивающие выходные точностные характеристики навигационных спутников и космической системы в целом [3]. Изменение температурных условий эксплуатации АСЧ при его функционировании в

составе космического аппарата (КА) в течение суток и более приводят к уходу его опорной частоты, который, в первом приближении, пропорционален изменению температуры. Характеристикой такого ухода служит такой параметр, как температурный коэффициент частоты (ТКЧ) [1; 2].

В обеспечении высоких требований по стабильности АСЧ вклад ТКЧ становится преобладающим (до  $1 \cdot 10^{-13}$  о.е./градус). На данное время обеспечение прецизионной термостабилизации существующего АСЧ находится на уровне  $\pm(0,1 \div 0,5)$  °С, доведение его до уровня 0,01 °С и менее – одна из основных задач системы терморегулирования КА [1].

В основу системы прецизионной термостабилизации (СПТ) были положены следующие основные принципы [4; 5; 7]:

- обеспечение пространственной неоднородности тепловых потоков на основании АСЧ

✉ chebotarev@iss-reshetnev.ru

© Чеботарев В. Е., Деревянко В. А., Макуха А. В., Бакиров М. Т., 2018

с использованием гипертеплопроводящих пластин (ГТП), имеющих эффективную теплопроводность  $\geq (50 \div 100)$  теплопроводности алюминия;

- организация управляемых с высокой точностью дозированных тепловых воздействий обогревателей, учитывающих изменение внешнего теплового потока от вращающейся солнечной батареи (СБ) и изменение внутреннего теплового потока, обусловленного колебаниями напряжения питания;
- повышение точности измерения температур (абсолютных и относительных) с помощью бортового стандарта температуры (БСТ), использующего эффект стабильности температуры фазовых переходов плавящихся веществ.

### 1. Подготовка космического эксперимента на спутниках ГЛОНАСС по отработке системы прецизионной термостабилизации

Наземные и натурные испытания СПТ проводились АО «ИСС» и ИВМ СО РАН на основании Решения №110-01/10 «О подготовке, проведении и порядке финансирования работ космического эксперимента на базе гипертеплопроводящих пластин» Федерального космического агентства и МО РФ от 12.02.2010 г. Для его реализации была разработана программа по созданию составных частей СПТ и математических моделей их функционирования (ГТП, БСТ, ...), алгоритмов и программ управления процессом прецизионной термостабилизации [8–10].

#### *Гипертеплопроводящая пластина*

ГТП – это не новый материал со сверхвысокой теплопроводностью, а компактное теплое устройство со сложной внутренней структурой, работающее по принципу тепловой трубы (ТТ), но в другом конструктивном исполнении (двухмерная плоская ТТ). Между двумя тонкими плоскими панелями размещается пористый материал, выполняющий роль фитиля, заполненный жидким теплоносителем. В пористой структуре имеются каналы для движения пара. При этом внутренняя структура фитиля и каналов такова, что теплоноситель способен перемещаться в любом направлении вдоль всей плоскости панели, обеспечивая перенос тепла. Одновременно с этим конструкция ГТП должна оставаться герметичной, прочной и обеспечивать дозированную заправку теплоносителем [1; 7].

Технология изготовления ГТП и их изготовление реализовано Уральским электрохимическим комбинатом, а разработка тепловой модели ГТП, технологии ее дозированной заправки и наземная тепловая отработка осуществлены

ИВМ СО РАН. Создано несколько вариантов конструктивного исполнения ГТП с использованием порошковых технологий из меди для применения в радиоэлектронной аппаратуре (в платах) и для АСЧ – размер  $78 \times 364 \times 2,5$ , масса 0,26 кг. В качестве теплоносителя для ГТП из меди используется вода. Испытания медных ГТП в термобарокамере подтвердили моделируемую зависимость перепада температуры ГТП и соответствующую эффективную теплопроводность от температуры области отвода тепла. С ростом температуры эффективность теплопередачи резко возрастает. При температуре более  $25^\circ\text{C}$  перепад температур не превышает  $2^\circ\text{C}$ . При этом эффективная теплопроводность достигает величины  $17000 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ . Для ГТП из титана используется ацетон, но по тепловым характеристикам они хуже медных, однако легче их в два раза [6].

#### *Бортовой стандарт температуры*

Трудности создания прецизионных систем термостабилизации АСЧ во многом связаны с отсутствием высокоточных датчиков температуры, не имеющих дрейфа номинала в режиме длительного функционирования. Поэтому ИВМ СО РАН совместно с АО «ИСС» был разработан БСТ, предназначенный для обеспечения высокостабильной (реперной) температуры на борту КА, относительно которой могут быть измерены температуры всех элементов КА.

В основе работы БСТ лежит принцип стабильности температуры на границе раздела фаз рабочего вещества. Этот же принцип положен в основу Международной практической температурной шкалы (МПТШ-68), принятой на основе международных соглашений. При точности измерения температуры фазового перехода БСТ  $\pm 0,001^\circ\text{C}$ , точность поддержания градиентов температуры может быть доведена до  $\pm 0,01^\circ\text{C}$ .

В данном случае используется один из эвтектических сплавов Ga-In с температурой плавления  $T_{пл} = 15,3^\circ\text{C}$  или Ga-Sn ( $T_{пл} = 20,4^\circ\text{C}$ ). Особенностью эвтектических сплавов является равенство температур плавления и отвердевания, поэтому если образцовый температурный датчик помещается на границу (или вблизи границы) раздела фаз «жидкость–твердое тело», то его температура будет постоянна с высокой степенью точности. Задача устройства – поддержание существования стабильной границы раздела фаз.

#### *Алгоритмы и программное обеспечение*

Принцип действия системы динамической термостабилизации следующий. Сопанель отделяет прибор от теплового воздействия внешних потоков. При этом на одну (внутреннюю) сторону панели поступает суммарный тепловой поток от прибора и от компенсационного нагре-

вателя. На другую (внешнюю) сторону попадает внешний поток, кроме того эта поверхность излучает энергию во внешнее пространство [8].

Основная задача системы прецизионного терморегулирования заключается в том, чтобы удержать температуру на внутренней поверхности в заданном интервале путем периодического кратковременного включения компенсационного нагревателя по показаниям датчиков температуры. Мощность компенсационного нагревателя должна быть сопоставима с мощностью внешнего теплового потока. Длительность импульса нагрева вычисляется по формулам теплового баланса в зависимости от отклонения температуры стабилизации основания АСЧ от заданного с учетом отклонения выделяемой мощности от средней.

Возникающие на основании АСЧ и на внутренней стороне сотопанели пространственные и временные неоднородности температуры сглаживаются в несколько раз при помощи ГТП.

Разработанные алгоритмы и программное обеспечение апробированы в процессе измерения теплофизических характеристик лабораторной модели АСЧ и при наземных испытаниях модуля системы прецизионной термостабилизации (МСПТ), создаваемого для космического эксперимента.

В состав МСПТ вошли: ГТП, БСТ, тепло-массовый имитатор АСЧ, обогреватели ГТП, блок коммутации нагревателями (БКН-Э).

## 2. Результаты космического эксперимента по отработке системы прецизионной термостабилизации

Запуск космического аппарата «Глонасс-М» №54 осуществлен 24.03.2014 г, включение МСПТ в работу прошло по штатной схеме.

Проводилась отработка получения всей доступной телеметрической информации по МСПТ за один виток со скважностью 5 минут.

БСТ показал устойчивую работу, однако в экспериментах опорная температура БСТ не использовалась для расчета температурных отклонений.

Выявлено гистерезисное влияние угла поворота СБ на ухудшение точности термостабилизации. Временная нестабильность на полностью солнечных участках орбиты не превышала  $\pm 0,025$  °С. На теневых участках орбиты не превышала  $\pm 0,065$  °С.

Было доработано программное обеспечение МСПТ с целью повышения точности термостабилизации с учетом влияния угла поворота СБ. Удалось сузить диапазон термостабилизации на теневых участках орбиты до уровня  $\pm 0,04$  °С, а на полностью солнечных участках орбиты до диапазона  $\pm 0,015$  °С.

По результатам анализа данных космического эксперимента разработаны мероприятия по повышению точности прецизионной термостабилизации до  $\pm 0,01$  °С на всех участках орбиты:

- необходимо разработать алгоритмы термостабилизации на теневых участках орбиты;
- систему прецизионной термостабилизации необходимо дополнить измерением величины теплового потока путем измерения перепада температур на сотопанели;
- повысить точность измерения температур термодатчиками путем постоянной калибровки их по БСТ.

## Заключение

Результаты лабораторного, наземного и космического эксперимента показывают:

- принцип прецизионной термостабилизации работает в части учета отклонения температуры от заданной и учета влияния нестабильности питания бортовой сети;
- обеспечена точность термостабилизации с учетом угла поворота солнечных батарей от  $0,025$  °С (на солнечных участках орбиты) до  $0,04$  °С (на теневых участках орбиты);
- при применении ГТП улучшена пространственная нестабильность термоплиты в 6 раз;
- разработаны мероприятия по повышению точности прецизионной термостабилизации до  $0,01$  °С.

## Список литературы

- [1] Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения : учеб. пособие ; Сиб. гос. аэрокосм. ун-т. Красноярск, 2011. 488 с., [24] с ил.
- [2] Харисов В. Н. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. В. Н. Харисова [и др.]. М. : Радиотехника, 2010. 800 с.
- [3] Косенко В. Е., Фаткулин Р. Ф., Звонарь В. Д., Ильин М. А., Чеботарев В. Е. Прецизионные космические платформы навигационных КА // Научные технологии. 2017. Т. 18. № 12. С. 5–8.
- [4] Васильев Е. Н., Деревянко В. А., Нестеров Д. А., Косенко В. Е., Чеботарев В. Е. Вычислительное моделирование процессов теплообмена в системах терморегулирования космических аппаратов // Вычислительные технологии. 2009. Т. 14. Вып. 6. С. 19–28.

- [5] Звонарь В. Д., Косенко В. Е., Бартенев В. А., Чеботарев В. Е., Васильев Е. Н., Деревянко В. А., Макуха А. В. Нестационарная тепловая модель и алгоритм управления системой термостабилизации атомного стандарта частоты навигационного КА «Глонасс-К» // Тез. докл. XV Междунар. научн. конф. «Системный анализ, управление и навигация». Украина, Евпатория. 2010. С. 101–102.
- [6] Звонарь В. Д., Чеботарев В. Е., Мокляк В. И. Основные результаты космических экспериментов на КА «Глонасс-М» // Тез. докл. XV Междунар. научн. конф. «Системный анализ, управление и навигация». Украина, Евпатория. 2010.
- [7] Косенко В. Е., Деревянко В. А., Звонарь В. Д., Чеботарев В. Е., Бакиров М. Т., Васильев Е. Н., Макуха А. В. Устройство термостабилизации радиоэлектронной аппаратуры. Пат. № 2408919, Российская Федерация, 2011, бюл. № 2.
- [8] Звонарь В. Д., Чеботарев В. Е., Фаткулин Р. Ф., Деревянко В. А., Васильев Е. Н., Деревянко В. В. Пакет прикладных программ для моделирования тепловых режимов приборных панелей космического аппарата негерметичного исполнения // XVI Междунар. науч. конф. «Системный анализ, управление и навигация». Украина, Евпатория. 2011. С. 99–100.
- [9] Косенко В. Е., Звонарь В. Д., Сунцов С. Б., Деревянко В. А., Васильев Е. Н., Нестеров Д. А. Применение гипертеплопроводящих структур при разработке негерметичных космических аппаратов повышенной мощности и ресурса // Тез. докл. XVII Междунар. науч. конф. «Системный анализ, управление и навигация». Украина, Евпатория. 2012. С. 20–22.
- [10] Косенко В. Е., Звонарь В. Д., Сунцов С. Б., Чеботарев В. Е., Фаткулин Р. Ф., Бакиров М. Т., Деревянко В. А., Макуха М. В. Результаты применения гипертеплопроводящих структур в аппаратуре космических аппаратов // Тез. докл. XXI Междунар. науч. конф. «Системный анализ, управление и навигация». МАИ. 2016. С. 45–47.

## SPACE EXPERIMENT FOR PRECISION THERMAL STABILIZATION OF QUANTUM FREQUENCY STANDARDS FOR NAVIGATION SATELLITES

V. E. Chebotarev<sup>1</sup>, V. A. Derevyanko<sup>2</sup>, A. V. Makukha<sup>2</sup>, M. T. Bakirov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation

<sup>2</sup>Institute of Computational Modelling SB RAS, FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russian Federation

*The basis of space navigation systems are highly stable atomic frequency standards, which form a highly accurate satellite time scale and a highly stable frequency grid, providing output accuracy characteristics of space systems as a whole. To basis of the precision thermostabilization system is the following basic principles: ensuring the spatial heterogeneity of heat fluxes based on atomic frequency standards using hyper-heat-conducting plates; organization of high precision controlled thermal effects of heaters; improving the accuracy of temperature measurement (absolute and relative) using the onboard temperature standard.*

*The results of laboratory, ground-based and space experiments showed that the principle of precision thermostabilization works in terms of taking into account the deviation of temperature from a given one and taking into account the influence of instability of the on-board power supply, and the accuracy of thermostabilization was also ensured taking into account the angle of rotation of solar cells from 0,025 °C up to 0,04 °C (in the shadow areas of the orbit). In addition, the using of hyper-conductive plates improved spatial instability of the thermoplate 6 times. As a result, the developed measures make it possible to increase the accuracy of precision thermostabilization to 0,01 °C.*

*Keywords: space navigation systems, navigation satellite, atomic frequency standards, precision thermostabilization, hyper heat-conducting plate, space experiment.*

## References

- [1] Chebotarev V. E., Kosenko V. E. *Osnovy proektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo obespecheniya* [Fundamentals of spacecraft design information support]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2011. 488 p. (In Russian)
- [2] Kharisov V. N., Perov A. I., Boldin V. A. *GLONASS. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya* [GLONASS. Construction principles and operation]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2010. 800 p. (In Russian)
- [3] Kosenko V. E., Fatkulin R. F., Zvonar V. D., Ilyin M. A., Chebotarev V. E. *Precizionnye kosmicheskie platformy navigacionnyh KA* [Precision space platforms of navigation satellites] // *Science-intensive technologies*, 2017, vol. 18, no. 12, pp. 5–8. (In Russian)

- [4] Vasilyev E. N., Derevyanko V. A., Nesterov D. A., Kosenko V. E., Chebotarev V. E. *Vychislitel'noe modelirovanie processov teploobmena v sistemah termoregulirovaniya kosmicheskikh apparatov* [Computational modeling of heat exchange processes in thermal control systems of spacecraft] // *Computational technologies*, 2009, vol. 14, issue 6, pp. 19–28. (In Russian)
- [5] Zvonar V. D., Kosenko V. E., Bartenev V. A., Chebotarev V. E., Vasilyev E. N., Derevyanko V. A., Makukha A. V. *Nestacionarnaya teplovaya model' i algoritm upravleniya sistemoy termostabilizacii atomnogo standarta chastoty navigacionnogo KA «Glonass-K»* [The non-stationary thermal model and control algorithm of the thermal stabilization system of the atomic frequency standard of the navigation satellite Glonass-K] // *Tezisy dokladov 15-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Sistemnyj analiz, upravlenie i navigaciya»* [Abstracts of the 15th International Scientific Conference «System analysis, management and navigation»]. Evpatoria, 2010, pp. 101–102. (In Russian)
- [6] Zvonar V. D., Chebotaryov V. E., Moklyak V. I. *Osnovnye rezul'taty kosmicheskikh ehksperimentov na KA «Glonass-M»* [The main results of space experiments on the spacecraft Glonass-M] // *Tezisy dokladov 15-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Sistemnyj analiz, upravlenie i navigaciya»* [Abstracts of the 15th International Scientific Conference «System analysis, management and navigation»]. Evpatoria, 2010. (In Russian)
- [7] Chebotarev V. E., Zvonar V. D., Kosenko V. E., Bakirov M. T., Derevyanko V. A., Makukha A. V., Vasilyev E. N. *Ustrojstvo termostabilizacii radioehlektronnoj apparatury* [The device thermal stabilization of electronic equipment]. Patent RU 2408919, 2011, bulletin no. 2.
- [8] Zvonar V. D., Chebotaryov V. E., Fatkulin R. F., Derevyanko V. A., Vasilyev E. N., Derevyanko V. V. *Paket prikladnykh programm dlya modelirovaniya teplovykh rezhimov pribornykh panelej kosmicheskogo apparata negermetichnogo ispolneniya* [Application software package for modeling thermal modes of instrument panels of unsealed spacecraft] // *Tezisy dokladov 15-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Sistemnyj analiz, upravlenie i navigaciya»* [Abstracts of the 15th International Scientific Conference «System analysis, management and navigation»]. Evpatoria, 2011, pp. 99–100. (In Russian)
- [9] Kosenko V. E., Zvonary V. D., Suntsov S. B., Derevyanko V. A., Vasilyev E. N., Nesterov D. A. *Primenenie giperteploprovodyashchih struktur pri razrabotke negermetichnykh kosmicheskikh apparatov povyshennoj moshchnosti i resursa* [The use of hyper-heat-conducting structures in the development of leaky space vehicles of increased power and resource] // *Tezisy dokladov 15-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Sistemnyj analiz, upravlenie i navigaciya»* [Abstracts of the 17th International Scientific Conference «System analysis, management and navigation»]. Evpatoria, 2012, pp. 20–22. (In Russian)
- [10] Kosenko V. E., Zvonary V. D., Suntsov S. B., Chebotarev V. E., Fatkulin R. F., Bakirov M. T., Derevyanko V. A., Makukha M. V. *Rezul'taty primeneniya giperteploprovodyashchih struktur v apparature kosmicheskikh apparatov* [The Results of Using Heat-Conductive structures in the apparatus of spacecraft] // *Tezisy dokladov 21-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Sistemnyj analiz, upravlenie i navigaciya»* [Abstracts of the 21st International Scientific Conference «System analysis, management and navigation»]. MAI, 2016, pp. 45–47. (In Russian)