

УДК 621.363

Микросистема терморегуляции малых космических аппаратов

А.Е. Ануров

Аннотация

Одной из главных тенденций развития бортовой аппаратуры РКТ является уменьшение массогабаритных характеристик при расширении функциональных возможностей и увеличении срока активного существования. Однако при этом возникают новые проблемы, такие как теплозащита и тепловые режимы в процессе эксплуатации аппаратуры в космическом пространстве, от которых существенно зависят ее надежность и стоимостные характеристики. Массогабаритные характеристики известных теплоотводящих систем при снижении массогабаритных характеристик изделий РКТ (бортовой аппаратуры, конструкций микроплатформ, наноспутников и т.п.) весьма значительны. В этой связи становится привлекательным использование новых технологий, и, прежде всего технологий МОЭМС, обеспечивающих инновационное решение данного технического противоречия.

В работе представлен прототип конструкции и технология изготовления отечественной микросистемы терморегуляции микро- и наноспутников, основанный на анализе технического уровня конструкций импортных образцов систем терморегуляции, используемых для малых космических аппаратов

Также проведен расчет экономической эффективности проекта, представлены ожидаемые результаты и предполагаемые эффекты.

Ключевые слова

космический аппарат; микросистемная техника; микрооптоэлектромеханическая система; микроэлектромеханическая система; поверхностная микрообработка; подвижный элемент; терморегуляция; variable emittance coating (Vari-E).

Введение

В настоящее время основной тенденцией развития бортовой аппаратуры ракетно-космической техники (РКТ) является улучшение массогабаритных характеристик при расширении функциональных возможностей и увеличении срока активного существования. Развитие указанных тенденций для аппаратуры РКТ существенно ограничивают вопросы, связанные с широким температурным диапазоном эксплуатации. Известно, что в космическом пространстве передача тепла может осуществляться только за счет теплопроводности и излучения в открытое пространство. При этом возникает техническое противоречие, связанное с тем, что массогабаритные характеристики известных теплоотводящих систем при снижении массогабаритных характеристик изделий РКТ (микроплатформы и наноспутники) весьма значительны. В США с 2006 года в лабораториях NASA проводятся работы по созданию электрорегулируемых покрытий с изменяемой отражающей способностью (Variable Emittance Coating) на основе МЭМС (микроэлектромеханическая система) - технологий, обеспечивающих существенное снижение массогабаритных характеристик теплоотводящих систем [1]. В России существуют разработки технологий изготовления адаптивных микросистем, функционирующих на основе эффекта памяти формы и предназначенных для эксплуатации на поверхности наноспутников (для случая внешнего источника тепла). Однако, при эксплуатации аппаратуры в изделиях РКТ имеются два источника тепла – внутренний (связанный с работой аппаратуры) и внешний (от солнечного излучения), при этом для выбора режима терморегуляции возникает необходимость обеспечения активной обратной связи – электроуправления [2].

Для решения вышеупомянутых противоречий и создания перспективной отечественной микросистемы терморегуляции космических аппаратов (КА) проведен анализ уровня технического развития существующих образцов микросистем, их конструктивно-технологических особенностей, разработан прототип конструкции и технология изготовления электроуправляемой микрооптоэлектромеханической системы (МОЭМС) с изменяемым коэффициентом отражения.

Анализ конструктивно-технологических особенностей терморегулирующих микросистем

Выделяют три большие группы систем терморегуляции малых КА: МОЭМС, микрожидкостные системы (МЖС) и электрохромные покрытия. МЖС и электрохромные покрытия хорошо зарекомендовали себя при терморегуляции КА при внешнем источнике тепла. Однако в случае наличия двух источников тепла, внутреннего и внешнего, для терморегуляции КА предпочтительно использовать МОЭМС.

В ходе анализа литературы и патентов выявлено, что наибольшее распространение получили МОЭМС основанные на микропереключателях и актюаторах, благодаря своим показателям надежности, простоте конструкции и технологии производства.

В качестве исполнительного элемента микросистем чаще всего применяют балочные и мембранные актюаторы, действие которых основано на электростатическом эффекте или тепловой активации движения балки [3].

Электротермическая активация применяется в основном в пассивных системах терморегуляции. Электростатические исполнительные механизмы применяются в микросистемах с активной системой управления, что делает такие системы более “гибкими” и функциональными. Также электростатические механизмы удовлетворяют принципам энергосбережения, так необходимым при эксплуатации приборов в условиях космоса [3,4]. На основе вышеизложенного автором выбрана МОЭМС на электростатическом принципе действия.

На основе проанализированных данных сделан вывод, что для создания электроуправляемых терморегулирующих покрытий основной тенденцией остается получение матричной структуры, выполненной с повышенными (до 85-95 %) коэффициентами отражения, поглощения и заполнения, содержащей систему обратной связи на основе контроля температуры поверхности. Для снижения теплоемкости и, как следствие, времени срабатывания системы необходимо одновременно уменьшать массогабаритные характеристики. Указанные характеристики могут быть достигнуты путем применения групповой МЭМС-технологии поверхностной и объемной микрообработок, обеспечивающей воспроизводимое получение МОЭМС и совместимой с технологией КМОП СБИС [2].

Наиболее перспективной, на взгляд автора, иностранной системой терморегуляции является патент US6899170 от 31.05.05 «Electrostatic switched radiator for space based thermal control». Патент посвящен микромеханическому устройству, обеспечивающему изменение коэффициента излучения поверхности КА. Устройство для терморегуляции КА представляет

собой электростатический переключатель с возможностью менять в широком диапазоне свою излучательную способность (рис. 1).

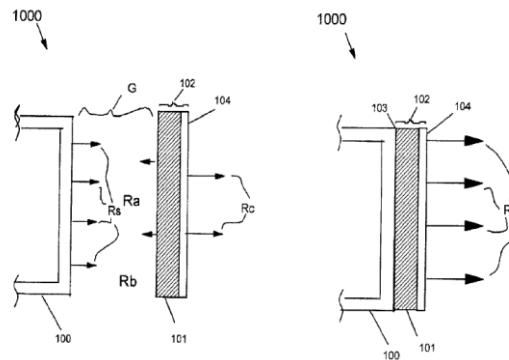


Рис. 1 - Адаптивная микросистема терморегуляции на основе управляемого зазора с использованием электростатических актюаторов [5]

Рассмотренная конструкция имеет ряд недостатков, таких как высокое напряжение управления и возможность терморегуляции КА только в случае внешнего источника тепла (пассивный принцип работы).

Разработка прототипа конструкции микросистемы терморегуляции малых КА

За последние два года автор участвовал в нескольких ОКР, направленных на разработку базовых технологий и конструкций МЭМС. Накоплен богатый опыт в части:

- разработки маршрутных технологий и технологических процессов объемной и поверхностной микрообработки изготовления компонентов МЭМС и МОЭМС;
- разработки методик испытаний МЭМС по определению физико-механических, теплофизических свойств
- разработки и создания стендов для проведения испытаний.

Предложенная в работе конструкция микросистемы терморегуляции малых космических аппаратов лишена указанных в предыдущем разделе недостатков. Для активной, автоматически управляемой, терморегуляции КА и поддержания комфортной температуры внутри КА предусмотрено размещение устройства управления, позволяющего использовать изделие не только для отражения внешнего тепла, но и для выведения за пределы КА излишек внутреннего тепла.

Чертеж микросистемы терморегуляции представлен на рисунке 2. В состав микросистемы терморегуляции входят кристаллы с подвижными элементами (поз. 1), установленные на основаниях (поз. 3) из материала, согласованного по КТЛР с материалом кристаллов, схема управления и датчики контроля температуры (поз. 5). Дополнительно были разработаны коммутационная плата из поликора (поз. 2) и пластина для монтажа микросистемы на поверхности КА (поз. 4).

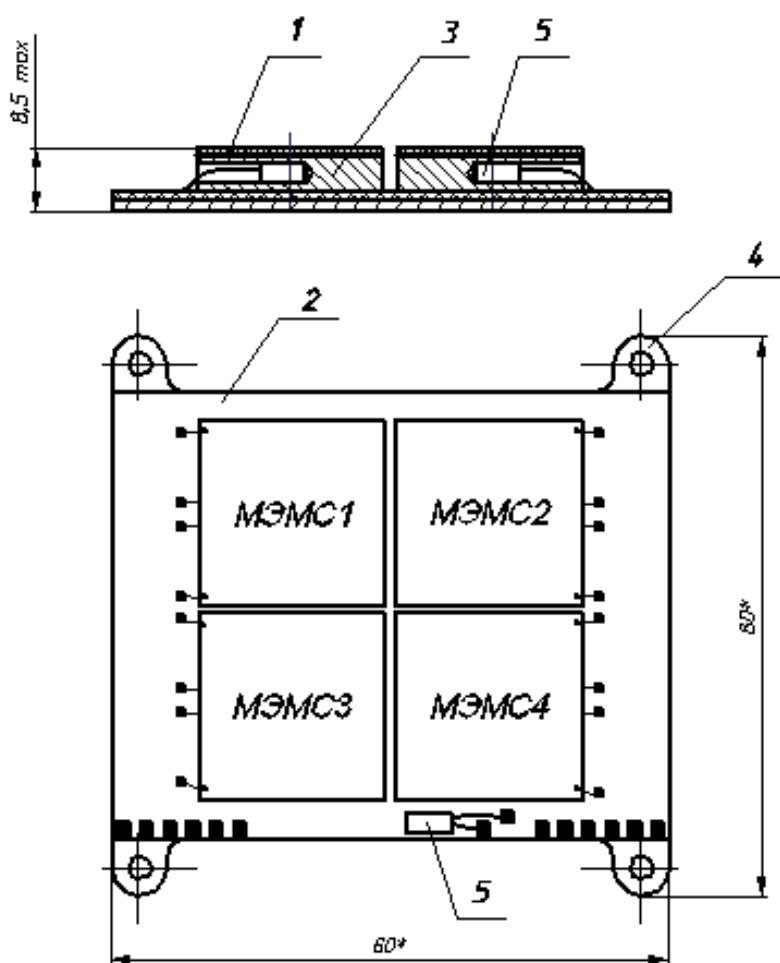


Рис. 2 - Микросистема терморегуляции малых КА

Для размещения системы на поверхности КА предполагается использовать титановую пластину. На пластине планируется изготовить четыре отверстия под винты для непосредственного монтажа на поверхность КА. Для лучшей теплопроводности на поверхность контакта наносят теплопроводящую пасту.

Ключевым элементом микросистемы терморегуляции является полупроводниковый кристалл, на поверхности которого сформирована МОЭМС с подвижными элементами

сложной формы (рис. 3). В ходе разработки микросистемы смоделированы 2 варианта конструкции подвижных элементов. В настоящее время проводятся исследовательские работы по выбору оптимальной конструкции и размеров подвижных элементов микросистемы.

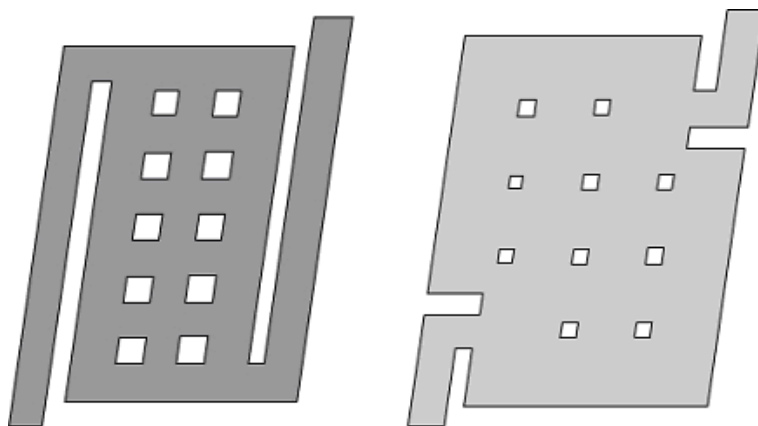


Рис. 3 – Варианты подвижных элементов микросистемы терморегуляции

Для контроля температуры предполагается использовать набор датчиков – термосопротивлений заводского изготовления. Датчики планируется размещать под кристаллами МОЭМС, на поверхности КА, и внутри корпуса КА вблизи основных источников тепла. Данная схема размещения термосопротивлений позволяет контролировать температуру КА и аппаратуры, размещенной в нем, во многих точках, и поддерживать заданный разработчиками КА температурный режим.

Разработку устройства управления планируется произвести в соответствии со стандартной для электростатических МЭМС электрической принципиальной схемой управляющих устройств. Устройство управления будет состоять из микроконтроллера на базе БМК отечественной разработки, который принимает информацию с датчиков температуры, осуществляет сравнение температур, выбирает режим работы МОЭМС и выдает сигнал на каскад формирования управляющего напряжения. В дальнейшем предполагается провести работу по размещению устройства управления внутри КА, и его интеграции в состав аппаратуры контроля микроклимата, либо аппаратуры системы управления КА.

Автором разработаны два режима работы микросистемы терморегуляции. В случае преобладания внешнего источника тепла и нагрева КА извне, подвижные элементы МОЭМС размыкаются, образуется вакуумный зазор между подвижными элементами и корпусом КА, теплоперенос с поверхности МОЭМС на корпус КА прекращается и, следовательно,

прекращается нагрев КА и аппаратуры в нем. В случае преобладания внутреннего источника тепла, т.е. перегрева аппаратуры, подвижные элементы МОЭМС замыкаются, появляется тепловой контакт между корпусом КА и поверхностью МОЭМС, излишки тепла стекают через элементы корпуса и крепления аппаратуры на поверхность МОЭМС и излучаются в открытый космос.

Выбор технологии изготовления микросистемы терморегуляции малых КА

Выбор технологии изготовления микросистемы терморегуляции основывался на подходе максимальной совместимости с технологией КМОП СБИС, что позволит резко сократить затраты на создание и внедрение в производство предлагаемого изделия. Был проведен анализ известных материалов, технологий и методов изготовления МОЭМС.

В качестве подложки был выбран монокристаллический кремний, так как этот материал наиболее часто используется в МЭМС и СБИС – устройствах, легко поддается плазмохимической и жидкостной обработкам, используется в открытом космосе и является одним из самых дешевых материалов для полупроводниковой промышленности.

Так как в разрабатываемой системе планируется использовать набор мембран сложной формы, расположенных над поверхностью подложки со строго определенным зазором, для формирования подвижных элементов была выбрана технология поверхностной микрообработки кремния (рис. 4).

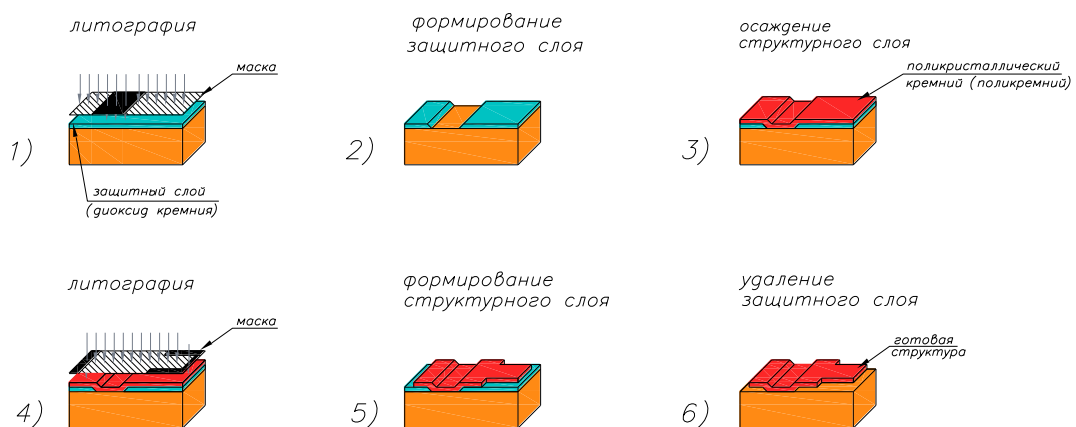


Рис. 4 - Последовательность этапов технологии поверхностной микрообработки [6]

Для изготовления микросистемы терморегуляции автором определена последовательность технологических операций и предложена возможность изготовления микросистемы на имеющихся технологических мощностях опытно-экспериментального

завода ОАО «Российские космические системы» и, в перспективе, на производственных мощностях большинства российских производителей микроэлектроники.

Расчет экономической эффективности проекта

Расчет экономической эффективности инновационной работы представлен в таблице 1.

Таблица 1. Экономическая эффективность инновационной работы

Наименование	Обозначение	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
План производства микросистем	шт		100	500	1 500	2 000	3 000	3 000
Инвестиционные затраты	тыс. руб.	3 000	5 000					
Операционные затраты	тыс. руб.	0	90	450	1 350	1 800	2 700	2 700
Доход от продажи микросистем	тыс. руб.	0	1 000	3 500	7 500	10 000	12 000	9 000
НДС	18%	0	180	630	1 350	1 800	2 160	1 620
Прибыль	тыс. руб.	-3 000	-4 090	3 050	6 150	8 200	9 300	6 300
Налог на прибыль	24%			732	1 476	1 968	2 232	1 512
Чистая прибыль	тыс. руб.	-3 000	-4 090	2 318	4 674	6 232	7 068	4 788
Коэффициент дисконтирования		1,00	0,91	0,83	0,75	0,68	0,62	0,56
Чистый дисконтированный поток	тыс. руб.	-3000	-3718	1916	3512	4257	4389	2703
Чистая приведенная прибыль	тыс. руб.	-3000	-6718	-4802	-1291	2966	7354	10057
Накопленная прибыль	тыс. руб.	-3000	-7090	-4772	-98	6134	13202	17990

На первом этапе предполагается финансирование за счет средств предприятия (подразделения).

На втором этапе (при получении работоспособных макетных образцов) планируется привлечение средств инвестиционных фондов и частного капитала.

Основные экономические показатели работы приведены в таблице 2.

Таблица 2. Экономические показатели работы

Инвестиционные затраты на проект	8000
Ставка дисконтирования	20%
Период оценки проекта	7 лет
Внутренняя норма доходности	44%
Чистая приведенная прибыль, тыс. руб	10057,1
Срок окупаемости, лет	3,98

График динамики чистой приведенной прибыли представлен на рисунке 5.

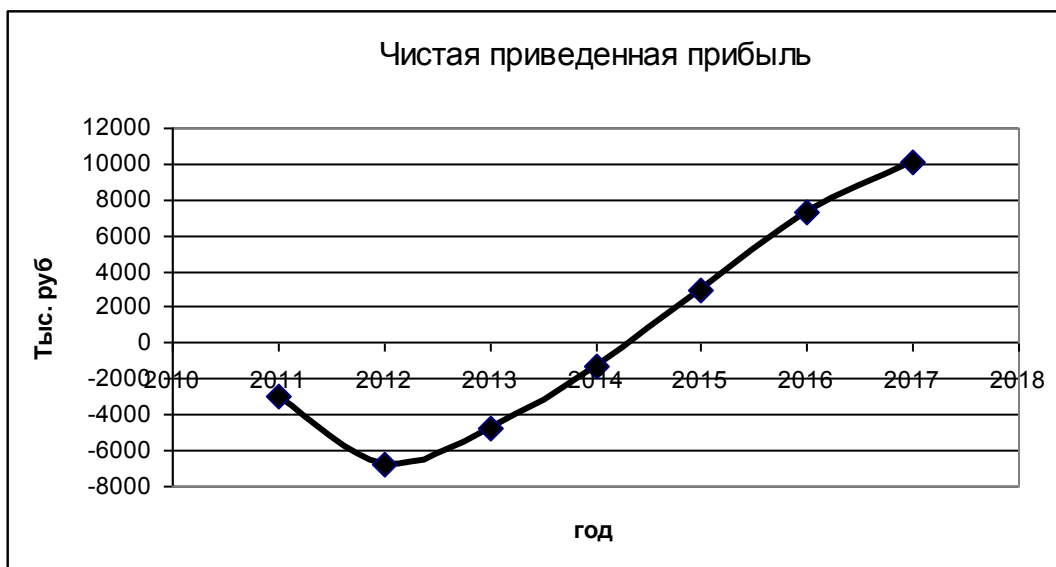


Рис. 5 - Динамика чистой приведенной прибыли

Ожидаемые результаты:

1. Технология и изготовленные макетные образцы микросистем терморегуляции КА.
2. Методики испытаний микросистем терморегуляции КА по определению их оптических и теплофизических характеристик.
3. Объекты интеллектуальной собственности (предлагаемые технические решения являются, по оценке, патентоспособными).

Предполагаемый эффект:

1. Применение микросистем терморегуляции КА позволит увеличить отвод тепла от малых КА в 2 - 3 раза. Предложенные технологии могут быть использованы в КА с массой менее 20 кг.
2. Разработанные, в ходе запуска в производство, технологические процессы могут быть использованы для создания целого ряда оптических микросистем для особо жестких условий эксплуатации.

Выводы и рекомендации

Инновационная работа посвящена созданию прототипа отечественной микросистемы терморегуляции основанной на активном управлении, которая позволяет эффективно поддерживать заданную температуру изделий РКТ.

На основе обзора зарубежных и отечественных аналогов, выбран электростатический принцип действия исполнительных элементов микросистемы, предложен прототип

конструкции и технология изготовления микросистемы терморегуляции для малых КА, в том числе микро- и наноспутников. Применение оригинальных конструктивных и технологических решений позволит добиться увеличения количества отводимого от КА тепла и улучшения его массогабаритных показателей.

Инновационная работа будет иметь большое значение для ОАО «Российские космические системы» и для всей космической отрасли в целом.

Библиографический список

1. www.nasa.gov. Air force engineers create thermal control system for space use. US air force, 2008, 2 с.
2. А.А.Жуков, А.Е.Ануров, Д.В.Козлов, А.Г.Макян. Отчет о патентных исследованиях. «Разработка технологических процессов изготовления электроуправляемых микрооптоэлектромеханических систем с изменяемым коэффициентом отражения для аппаратуры и изделий РКТ», Москва, 2009, 45 с.
3. Prof. Dr. Ing. Kasper, *Microsystem Engineering, Chapter 13: Sensors*.
4. Trimmer, William S.: *Microrobots and Micromechanical Systems. Sensors and Actuators*, 19 (1989) p. 267-287.
5. Electrostatic switched radiator for space based thermal control, US006899170B2, May 31, 2005, 9 с.
6. В.Варадан, К.Виной, К.Джозе. ВЧ МЭМС и их применение, Москва: Техносфера, 2004, 528 с.

Сведения об авторе

Ануров Алексей Евгеньевич, инженер-исследователь ОАО «Российские космические системы»,

тел.: 8-(916)-365-22-85, e-mail: anurov_aleksey@mail.ru.