

Разработка малогабаритной микрокриогенной системы для охлаждения фотоприемных устройств в температурном диапазоне (110–150) К

Д. А. Сысоев, В. К. Тресак

Выполнен анализ перспективных малогабаритных систем охлаждения ФПУ, работающих при температуре криостатирования (110–150) К. Существенными достоинствами таких систем являются сниженные массогабаритные характеристики и пониженное энергопотребление, что позволяет находить новые мобильные области применения для компактных MWIR-модулей. Приведены результаты разработки и моделирования высокотемпературной микрокриогенной системы (МКС) для охлаждения МФПУ.

Ключевые слова: газовая криогенная машина, цикл Стирлинга, фотоприемное устройство, температура криостатирования, высокотемпературные фотоэлектронные модули.

DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-1-83-89

Введение

Одним из перспективных направлений развития современных МФПУ в настоящее время является разработка на их основе тепловизионного канала, работающего при температуре криостатирования (110–150) К. Использование в составе таких систем интегральных роторных криогенных машин Крио 1000, Крио 2000 производства АО «НПО «Орион» (Россия), К508, К548 производства Ricog (Израиль) [1], либо RM3,

RM4 производства Thales (Франция) [2] и аналогичных, является нецелесообразным в связи с высокими массогабаритными характеристиками и завышенным энергопотреблением для реализации поставленных задач, поскольку вышеприведенные системы рассчитаны для эксплуатации на уровне температур криостатирования (65–80) К.

В связи с этим актуальной задачей является создание высокоэффективной малогабаритной микрокриогенной системы, выполненной на отечественной элементной базе. Применение таких систем, с учетом прогресса в области разработки ФПУ с высокой рабочей температурой (HOT) в сочетании с уменьшением размера шага, позволит осуществить серийный запуск компактных MWIR-модулей, сохраняя при этом высокие электрооптические характеристики. Такие модули уже успешно рекомендовали себя для применения в FLIR

Сысоев Дмитрий Анатольевич, начальник НТЦ № 1.

E-mail: diima1989@yandex.ru

Тресак Виктория Константиновна, инженер-конструктор.

АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

Статья поступила в редакцию 16 декабря 2020 г.

© Сысоев Д. А., Тресак В. К., 2021

системах (forward-looking infrared), ручных и наблюдательных камерах [3]. Один из таких типов МФПУ применяется в последнем AGILE (airborne gyro stabilized IR light equipment – воздушное бортовое гиросtabilизированное легкое ИК-оборудование), в беспилотных летательных аппаратах [4]. Ведущие зарубежные производители (Sofradir, GST и др.) используют для охлаждения МФПУ МКС (Ricor, Thales, GST и др.) [2], обладающие массой не более 300 г.

Обзор зарубежных микрокриогенных систем, функционирующих в диапазоне температур криостатирования (90–150) К

Для решения поставленной задачи был проведен обзор зарубежных достижений в области разработок аналогичных систем, проанализированы технические возможности и характеристики криогенных машин. Все рассмотренные микрокриогенные системы представляют собой замкнутую систему с замкнутым циклом Стирлинга. Система приводится в движение электродвигателем постоянного тока. [5]. Контроллер настраивается в соответствии с потребностями пользователя. Ведущим разработчиком в области создания микрокриогенных систем для комплектации фотоприемных устройств для тепловизионной техники является фирма RICOR – Cryogenic & Vacuum Systems (Израиль), общая доля на рынке составляет порядка 48 %. Технические характеристики криогенных машин зарубежных производителей стабильно высоки. Несмотря на то, что базовые конструктивные принципы и схемы реализации цикла известны, системы непрерывно совершенствуются за счет внедрения новых технологий обработки поверхностей, новых материалов уплотнений и покрытий. Новые области применения также ставят целью совершенствование конструкций в части снижения

энергопотребления и массогабаритных характеристик, например, во множестве носимых тепловизоров, наблюдательных системах в составе бортовой аппаратуры ЛА, прицелов, системах неразрушающего контроля, а также для беспилотных летательных аппаратов.

Высокотемпературные МФПУ позволяют осуществлять криостатирование на более высоких рабочих температурах, что напрямую влияет на энергопотребление всего изделия и энергопотребление МКС в частности. Рассмотренные SWaP (Size, weight and power) МКС специально предназначены для охлаждения высокотемпературных ФПУ, их основные технические параметры представлены в таблице 1.

По результатам анализа было выявлено, что зарубежные ведущие производители также стремятся при разработке своих систем к уменьшению массогабаритных и энергетических характеристик [1–3, 6, 7].

Разработка системы криостатирования

Все рассмотренные системы работают по обратному одноступенчатому циклу Стирлинга. Такой выбор обусловлен, в первую очередь, высоким эксергетическим КПД системы для заданного температурного диапазона работы. Также системы, в основе которых лежит вышеописанный цикл работы, обладают высокой надежностью (что подтверждается на примере продукции зарубежных производителей, чьи системы обладают повышенным ресурсом работы, а именно более 10 000 часов), также конструктивно такие системы хорошо поддаются процессу минитюаризации, что является безусловным преимуществом для применений в системах с ограниченными массогабаритными характеристиками. На основе проведенного анализа характеристик МКС, и с учетом перспективных работ по разработке ФПУ с высокой рабочей температурой (HOT), создание высокоэффективных малогаба-

ритных высокотемпературных МКС является весьма востребованной задачей [8]. С учетом вышесказанного в процессе про-

ектирования были определены технические требования к конструкции разрабатываемой МКС.

Таблица 1

Основные технические характеристики

Параметр	K563, Ricor (Израиль)	C363 (Китай)	RM2, Thales (Франция)	Крио 1000 (АО «НПО «Орион»)	SCR40I (Китай)	RM4, Thales (Франция)
Габаритные размеры МКС, не более, мм	95,5×46,5×66,2	96×46,5×67	94×46×83	118×56×72	118×56×72	76×51×26
Холодопроизводительность МКС, не менее, Вт	0,160 (110К/250J)	0,160 (110К/250J)	0,400 (77К/150J)	0,500 (77К/250J)	0,500 (80К/250J)	0,850 (77К/250J)
Температура криостатирования, К	80–110	70–110	65–110	80 ± 5	70–110	70–110
Время достижения температуры криостатирования, не более, мин	4'30''	4'00''	5'00''	5'00''	5'20''	3'30''
Масса МКС, не более, г	290	310	275	450	450	480
Потребляемая мощность при НКУ МКС, не более, Вт: в форсированном режиме в стационарном режиме	18 4	16 4	9 2,9	18 5,5	15 9	19 3,4
Диапазон рабочих температур окружающей среды, °С	–40 – +71	–40 – +70	–40 – +70	–55 – +85	–40 – +70	–46 – +70
Напряжение питания, В	5–16	10–16	18–28	18–29	24 ± 1	18–28

Исходными данными для разработки микрокриогенной системы (МКС) являлись следующие характеристики:

- требуемая температура криостатирования $T_{кр}$ и точность ее поддержания ΔT ;
- внутреннее тепловыделение (теплоприток ФПУ) $Q_{фпу}$;
- теплопритоки из окружающей среды $Q_{окр}$;
- минимальная холодопроизводительность МКС в стационарном режиме;

- время выхода на рабочий режим t ;
- масса и габаритные размеры;
- энергопотребление.

Также проектирование МКС выполнялось с учетом того, что разрабатываемое изделие должно быть стойким к воздействию внешних воздействующих факторов и иметь высокие показатели надежности [9]. Основные предъявляемые требования к разрабатываемой МКС представлены в таблице 2.

Таблица 2

Основные технические характеристики

Параметр	Единица измерения	Значение параметра
Габаритные размеры МКС	мм	95,5×46,5×66,2
Холодопроизводительность МКС, не менее	Вт	0,165
Диапазон температур криостатирования	К	110–150
Время достижения температуры криостатирования, не более	мин	4
Потребляемая мощность при НКУ МКС, не более: в форсированном режиме в стационарном режиме	Вт	18 10
Масса МКС, не более	г	290
Напряжение питания	В	12 ± 1

Интегральная МКС состоит из трех основных блоков: блока электродвигателя с управляющим контроллером (электропривода), компрессорного блока и блока вытеснителя («холодного пальца»). Основные элементы проектируемой системы представлены на рисунке 1.

Точность поддержания температуры криостатирования определяется параметрами электронного блока управления МКС, и как правило, точность поддержания температуры ΔT принимают приблизительно ± 1 К. Внутреннее тепловыделение $Q_{\text{фпу}}$ определяется типом используемого ФПУ и в среднем не превышает 200 мВт. Минимальная допустимая холодопроизводительность МКС в стационарном режиме,

определяется суммой тепловых потоков $Q_{\text{фпу}}$ и $Q_{\text{окр}}$. Время выхода на рабочий режим определяется теплоемкостью и массой охлаждаемых элементов, суммарными теплопритоками и холодопроизводительностью МКС. Отвод теплоты от МКС будет осуществляться путем естественной конвекции, для этого в конструкции предусмотрена развитая монтажная поверхность. Стоит обратить внимание, что такой компоновке ось вращения двигателя расположена перпендикулярно плоскости крепления, соответственно и оси ФПУ; такое решение позволило сократить конечный габарит системы и снизить влияние вибраций, возникающих в системе [10].

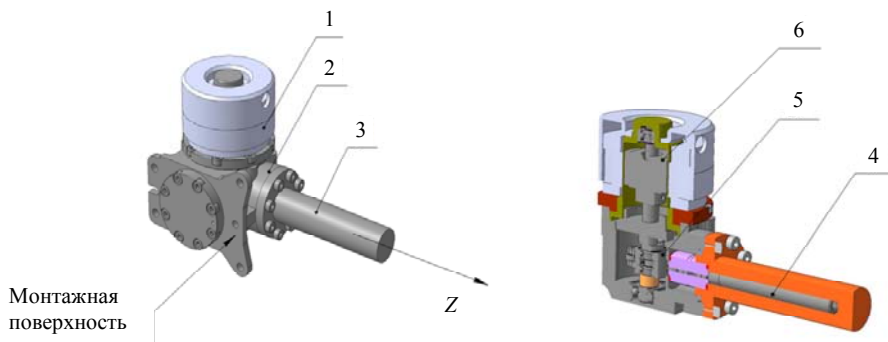


Рис. 1. Модель МКС: 1 – электродвигатель; 2 – корпус ГKM; 3 – колпак; 4 – ре-генератор; 5 – кривошипно-шатунная группа; 6 – коленвал с ротором.

Особенностью конструкции МКС является комбинированный подвижный поршень-регенератор. Функция поршня-регенератора заключается в перенаправлении рабочего газа в замкнутом объеме цилиндра «холодного пальца» от теплого конца до холодного в «прямом» такте и от холодного конца к теплому в «обратном» такте. Такой вариант комбинированного подвижного регенератора позволяет осуществить обратный цикл Стирлинга посредством наиболее простой в конструктивном исполнении шатунно-поршневой схемы.

Простота конструкции является хорошим преимуществом, однако, накладывает жесткие требования к необходимости обеспечения высокой точности механической обработки поверхностей контакта в

зонах трения пар «гильза-поршень» и «втулка-расширитель» и ужесточает требования к технологии сборки машины. Такие требования оказывают существенное влияние на стоимость входящих в состав МКС деталей.

Результаты разработки

В основе поставленной задачи был заложен принцип выполнения конструкции, позволяющий максимально уменьшить габариты и вес системы. В результате технического проектирования удалось оптимизировать конструкцию МКС Крио 1000 и МКС Крио 2000 (АО «НПО «Орион»), уменьшив общий габарит системы, за счет модернизации кривошипно-шатунной группы. Использование моноблочного ис-

полнения электродвигателя в таких системах, по результатам обзора требований потребителя, является не принципиальным. Создание выносного блока управления электродвигателя позволило дополнительно минимизировать габариты МКС и уменьшить тепловыделения от электроники.

По результатам проведенных исследований и разработок в АО «НПО «Орион» был собран макетный образец высокотемпературной МКС для охлаждения МФПУ с характеристиками, близкими к зарубежным аналогам (рис. 2). Образец выполнен с учетом вышеприведенных требований. Также для разрабатываемой МКС была подобрана новая электроника привода, оптимизированная для низких требований к потребляемой мощности.



Рис. 2. Макетный образец высокотемпературной МКС.

При сравнении с предыдущим поколением интегральных роторных систем можно отметить, что вес полученной системы стал на 50 % меньше, а общий габарит системы уменьшился на 25 %. Сравнение габаритных размеров разработанной МКС и МКС предыдущего поколения приведено на рисунке 3.

Разработанная МКС имеет два режима работы: рабочий и стационарный. В рабочем режиме достигается температура криостатирования ФПУ, что характеризуется максимальным числом оборотов коленвала. При стационарном режиме МКС

работает на пониженных оборотах вращения коленвала для компенсации теплопритоков и тепловыделений, с целью поддержания температуры криостатирования МФПУ.



Рис. 3. Макетный образец высокотемпературной МКС в сравнении с МКС предыдущего поколения.

Принцип работы конструкции заключается в следующем: на коленвал МКС (рис. 4, а) установлен ротор с шестью магнитами, выполненными из сплава NdFeB, с чередующейся полярностью, приводимый в движение статором с платой управления. Кривошипно-шатунная группа (рис. 4, б), преобразующая движение вращающегося коленвала в возвратно-поступательное движение пар трения, расположена на эксцентрик коленвала. Для компенсации вибраций, возникающих при движении внутренних узлов МКС, на коленвал установлен противовес, выполненный из вольфрамового сплава [5].

Сборочные единицы устанавливаются в корпус микрокриогенной системы (рис. 4, в), обеспечивающий отвод тепла. В микрокриогенной системе используются пять типов подшипников: корпусной подшипник, экраный подшипник и подшипники кривошипно-шатунной группы. Корпусной подшипник устанавливается в корпус МКС и служит первой опорой коленчатого вала. Экраный подшипник – устанавливается в титановый экран (рис. 4, г) и служит второй опорой коленчатого вала, устанавливается в свободной

посадке и обеспечивает совместно с коленным подшипником ось вращения коленвала. От точности изготовления подшипников и коленвала зависит баланс работы всей системы. Подшипники кривошипно-шатунной группы устанавлива-

ются на прессовую посадку в шатуны и внутренней обоймой на эксцентрик коленвала. Благодаря эксцентрику и кривошатунному механизму преобразуется вращательное движение коленвала в поступательное движение пар трения МКС.

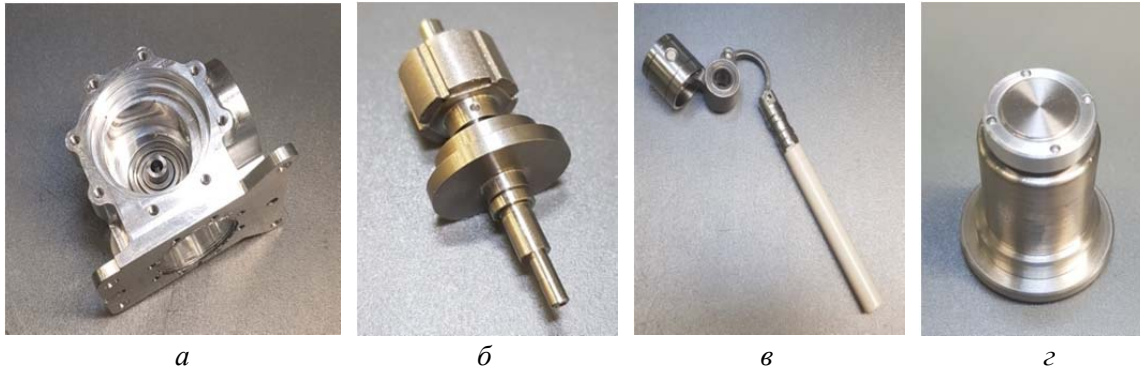


Рис. 4. Внутренние узлы МКС: а – коленвал МКС в сборе с ротором; б – кривошипно-шатунная группа; в – корпус МКС; г – экран.

Достигнутая компактность системы была определена как оптимальный компромисс между массой и объемом в сравнении с соответствующими производственными затратами.

В процессе разработки были проведены испытания микрокриогенной системы на соответствие предъявляемым техническим требованиям. Испытания проводились при НКУ. В процессе испытаний контролировались: потребляемая мощность, температура криостатирования и время выхода на режим. По результатам испытаний разработанная микрокриогенная система соответствует предъявляемым требованиям.

Выводы

В настоящее время наиболее сложными аспектами создания высокоэффективных машин Стирлинга продолжают оставаться вопросы расчета и проектирования, комплексного анализа специфики конструктивного исполнения, подбора материалов, и оценка влияния целого комплекса внешних факторов и особенностей

технологии производства на время безотказной работы и КПД. При этом многократно возрастают требования к микрокриогенной технике по массогабаритным, энергетическим, вибрационным, акустическим и ресурсным характеристикам, а также предъявляются дополнительные и повышенные требования к удобству монтажа в составе тепловизионной аппаратуры и уровню воздействия электромагнитных наводок от работающей МКС на криостатируемый объект. В результате проведенной работы был изготовлен макетный образец высокотемпературной микрокриогенной системы.

Проведенные испытания макетного образца показали, что МКС соответствует предъявляемым техническим требованиям. Дальнейшим направлением разработки МКС является проведение испытаний полученной системы на безотказность для определения критических узлов. Также будут проработаны требования стойкости МКС к внешним воздействующим факторам. По результатам проведенных испытаний будут внесены корректировки в конструкцию МКС для увеличения ресурса работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. <https://www.ricor.com/product/> (Израиль)
2. <http://thales-cryogenics.com/product/> (Франция)
3. <https://www.flir.com/browse/industrial/unmanned-ground-systems/>
4. <https://www.pilotopolicial.com.br/> (Бразилия)
5. Грезин А. К., Зиновьев В. С. Микрокриогенная техника. – М.: Машиностроение, 1977.
6. Колесников А. М., Самвелов А. В., Словеснов К. В. // Прикладная физика. 2010. № 2. С. 80.
7. Филачев А. М., Таубкин И. И., Тришеников М. А. // Современное состояние и магистральные направления развития современной фотоэлектроники. – М.: Физматкнига, 2010.
8. Григорьев В. А., Крохин Ю. И. Тепло-массообменные аппараты криогенной техники. – М.: Энергоиздат, 1982.
9. Архаров А. М., Марфенина И. В., Микулин Е. И. Теория и расчет криогенных систем. – М.: Машиностроение, 1978.
10. Козырев М. Е. Основы теплофизики и прочности деталей, ВКК и МФПУ. Практические занятия. – М.: МИСиС, 2012.

PACS: 85.60.Gz, 42.30.Lr, 42.79.Pw

Development of a miniature integral closed-cycle Stirling cooler operating in the temperature range (110–150) K

D. A. Sysoev and V. K. Tresak

Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia

Received December 16, 2020

The results of the analysis in the field of developing the integral closed-cycle Stirling cooler operating in the temperature range (110–150) K are presented. The achievements of the development and modeling of a high-temperature cooler system for photodetector devices are presented.

Keywords: cooler, Stirling's cycle, photodetector, cold temperature, cold tip temperature, hot detector.

REFERENCES

1. <https://www.ricor.com/product/> (Israel)
2. <http://thales-cryogenics.com/product/> (France)
3. <https://www.flir.com/browse/industrial/unmanned-ground-systems/>
4. <https://www.pilotopolicial.com.br/> (Brazil)
5. A. K. Grezin and V. S. Zinoviev, *Mikrokriogennaya tekhnika* (Mashinostroenie, Moscow, 1977).
6. A. M. Kolesnikov, A. V. Samvelov, and K. V. Slovesnov, *Applied Physics*, No. 2, 80 (2010) [in Russian].
7. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Current state and main directions of development of modern photoelectronics* (Fizmatkniga, Moscow, 2010) [in Russian].
8. V. A. Grigoriev and Yu. I. Krokhin, *Heat and mass transfer apparatuses of cryogenic equipment* (Energoizdat, Moscow, 1982).
9. A. M. Arkharov, I. V. Marfenina, and E. I. Mikulin, *Theory and calculation of cryogenic systems* (Mashinostroenie, Moscow, 1978).
10. M. E. Kozyrev, *Foundations of physics and the strength of the parts, MCC and FPA. Practical classes* (MISIS, Moscow, 2012).