

# Микрокриогенные системы Стирлинга в интегральном исполнении с повышенным ресурсом работы

*А. М. Колесников, А. В. Самвелов, К. В. Словеснов*

*Рассмотрены преимущества микрокриогенной системы (МКС), работающей по обратному циклу Стирлинга в интегральном конструктивном исполнении, и вопросы технологии ее изготовления.*

PACS: 85.60.Gz

*Ключевые слова:* цикл Стирлинга, микрокриогенная система, технология.

## Введение

В настоящей работе рассматриваются способы и технологические решения повышения эффективности и улучшения эксплуатационных показателей интегральных МКС малой холодопроизводительности, работающих по циклу Стирлинга с внутренней регенерацией тепла, предназначенных для охлаждения фоточувствительных структур фотоэлектронного модуля (ФЭМ) [1—6].

Микрокриогенная система представляет собой мини-установку, состоящую из поршневых систем и теплообменных аппаратов, объединенных в единую систему, в которой отсутствуют клапанные системы и запорная арматура. Благодаря этому

упрощена конструкция, уменьшены размеры и масса, улучшены ее эксплуатационные характеристики.

Для создания МКС, соответствующей требованиям ИК-техники нового поколения, связанными с одновременным улучшением энергомассовых характеристик и значительным повышением ресурса работы, практически необходимо для реализации новых конструктивных решений разработать усовершенствованную технологию изготовления МКС.

## Основополагающие технологические решения

Элементы технологии изготовления микрокриогенных устройств с повышенным ресурсом работы должны предусматривать создание МКС, обеспечивающих поддержание рабочей температуры криостатирования ФЭМ на уровне 70—85 К.

Вакуумная конструкция корпуса-криостата матричного фотоприемного устройства (ФПУ) позволит использовать МКС малой холодопроизводительности (0,5—0,75 Вт). Такая МКС должна оснащаться электродвигателем с регулируемым

---

**Колесников Александр Михайлович**, научный сотрудник.  
**Самвелов Андрей Витальевич**, начальник НТЦ-МКС.  
**Словеснов Кирилл Вячеславович**, научный сотрудник.  
ФГУП «НПО "Орион"».

Россия, 111402, Москва, ул. Косинская, 9.  
Тел. (495) 374-50-59. E-mail: orion@orion-ir.ru

*Статья поступила в редакцию 11 декабря 2008 г.*

числом оборотов. Это позволит в стационарном режиме поддерживать температуру криостатирования при незначительном энергопотреблении (менее 10 Вт), что в свою очередь отразится на повышении ресурса работы МКС и аппаратуры в целом, а также на уменьшении уровня вибровоздействия на матричное фотоприемное устройство (МФПУ). Это особенно важно для получения требуемых фотоэлектрических параметров.

По сравнению с МКС, работающей по циклу Сплит-Стирлинг, данная МКС имеет более высокий КПД за счет возможности подбора оптимального угла фазового сдвига, уменьшения "мертвого" объема полостей и гидравлических потерь. Вследствие этого у разрабатываемой конструкции снижены массогабаритные показатели.

Миниатюризация МКС, помимо основных трудностей, сдерживалась наличием газонаполненной конструкции МФПУ ввиду значительного роста теплопритоков (до 3 Вт) и приведенной охлаждаемой массы МФПУ (20—30 г), в связи с этим требуемую холодопроизводительность систем довести до 5 Вт.

В последние годы в ФГУП «НПО "Орион"» решили эту проблему, реализовав вакуумную конструкцию МФПУ, снизив требуемую холодопроизводительность до 0,5—0,75 Вт. В результате были изготовлены образцы ФЭМ, состоящие из МФПУ формата 256×256, состыкованными с МКС Сплит-Стирлинга.

Разработкам МКС в интегральном исполнении после реализации модификации Сплит-Стирлинга стали уделять меньше внимания. Однако переход на вакуумную конструкцию МФПУ и изготовление малогабаритных двигателей с возможностью изменения числа оборотов создали также условия, при которых целесообразно рассмотреть использование интегральных систем Стирлинга для охлаждения ФЭМ нового поколения.

Вакуумная конструкция МФПУ значительно снизит тепловую нагрузку на МКС, поскольку величина теплопритоков составила ~0,55 Вт, а приведенная охлаждаемая масса ~ 8 г. Это позволяет осуществлять интегральную стыковку (IDCA) с вакуумным криостатом. При этом исключаются конвективная составляющая теплопритоков к криостату и кондуктивная по длине держателя (так как держателем при такой стыковке является гильза) в отличие от традиционной стыковки [3], что в свою очередь приводит к снижению потребляемой мощности.

Реализация привода с изменяющимся числом оборотов и сопряжение МКС с МФПУ на единой гильзе системы даст возможность принципиально изменять рабочий цикл ФЭМ.

В качестве привода МКС предполагается использовать бесколлекторный двигатель постоян-

ного тока, который состоит из статора, содержащего три обмотки, и ротора, выполненного из редкоземельного магнитного материала.

На статоре установлены три датчика положения, принцип работы которых основан на эффекте Холла. Электронный блок управления регулирует работу двигателя посредством подачи питания на обмотки статора. В пусковой период система работает с максимальным числом оборотов, обеспечивая требуемое время готовности. При достижении рабочей температуры криостатирования система переходит на работу с числом оборотов, обеспечивающим покрытие теплопритоков, которое при таком сопряжении МКС и МФПУ составляет 0,2 Вт.

Таким образом, МКС практически работает в принципиально новых режимах, при гораздо более низком энергопотреблении. Это значительно снижает виброактивность МКС, что особенно важно для основного режима работы ФЭМ, а пониженное число оборотов, кроме того, открывает путь к совершенствованию конструкции и технологии в вопросах подбора антифрикционных материалов для доведения ресурса работы до 8000—10 000 ч.

Процесс миниатюризации МКС особенно тесно связан с технологией изготовления и сборки системы. Это особенно актуально, когда в задачу одновременно входит увеличение примерно в 2—3 раза ресурса работы системы. Поскольку система работает по обратному циклу Стирлинга с использованием постоянного количества криоагента, значительно вырастает влияние утечек и перетечек, газовыделений, "мертвого" объема, гидравлических потерь и др. В связи с этим используемые технологические процессы и приемы должны соответствовать возросшим требованиям, предъявляемым к производству МКС.

Важнейшими проблемами технологического обеспечения являются:

- усовершенствование технологии нанесения покрытий и выбор оптимальных материалов, обеспечивающих работу пар гильза—поршень и гильза—вытеснитель в течение всего срока службы в условиях сухого трения;
- обеспечение уравнивания привода и элементов двигателя с доведением общего уровня виброактивности до 0,5 g в стационарном режиме;
- выбор материалов деталей МКС, имеющих минимальное газосодержание;
- разработка технологических процессов обезгаживания и хранения деталей и сборок без контакта с окружающей средой, создание технологического стенда финишного обезгаживания МКС в сборе;
- разработка процесса "промывки" гелием требуемой кондиции, газовых полостей МКС с по-

следующей заправкой системы. Интегральный контроль герметичности МКС. Введение норм по негерметичности, обеспечивающей работоспособность системы в течение всего срока службы без дозаправок;

- технологический контроль правильности конструктивных решений всех мест герметизации элементов МКС и выбор материала резинотехнических изделий;

- разработка технологического процесса контроля герметичности гильзы вытеснителя с учетом реальных условий эксплуатации и необходимостью обеспечения поддержания требуемого вакуума в криостате МФПУ;

- разработка технологического процесса сборки регенератора и обеспечение контроля основных параметров, обеспечивающих требуемую эффективность работы;

- разработка технологических процессов сборки пар трения и сборки механизма движения;

- разработка технологии изготовления и сборки платы управления, контроль ее работы и стыковки с двигателем;

- разработка технологии сборки двигателя с защитным экраном, разделяющим газовую полость МКС и статор электродвигателя и препятствующим загрязнению рабочего газа.

### Требования к конструкционным материалам

Конструкционные материалы, используемые для деталей, обеспечивающих герметичность газовой полости системы, должны, наряду с традиционными прочностными и физико-химическими характеристиками, иметь минимальную проницаемость в рабочих условиях, обеспечивать плотность при малой толщине, быть коррозионно-стойкими, иметь повышенные пределы выносливости и ползучести.

Наибольшей вакуумной плотностью обладают материалы, подвергнутые переплаву в вакууме.

Требования коррозионной стойкости материалов обусловлены недопустимостью образования оксидов на поверхности, которые легко разлагаются и имеют более высокое давление паров, чем основной металл. В свою очередь ресурс работы МКС определяет износоустойчивость и долговечность пар трения.

Для реализации конструктивных решений, предусмотренных в разрабатываемой МКС, предполагается использовать несмазываемые пары, работающие в условиях сухого трения. Это позволит МКС работать на стационарном режиме, который составляет около 95 % всего времени работы, при

минимальном энергопотреблении, и обеспечит увеличение ресурса его работы [5].

Ресурс несмазываемых пар цилиндр—поршень и гильза—вытеснитель определяется износоустойчивостью поршневых уплотнений. Использование имеющихся в настоящее время износоустойчивых материалов для контактных уплотнений, работающих в условиях сухого трения, могут значительно повысить ресурс работы МКС. Для решения проблемы применяются методы напыления многослойных покрытий. Последовательность их нанесения обеспечивает постепенный переход от покрытия, обладающего хорошими адгезионными свойствами по отношению к подложке, к материалу с хорошими адгезионными свойствами по отношению к антифрикционному покрытию, и использование самосмазывающихся материалов, играющих роль твердой смазки.

В процессе проведенных работ были получены следующие результаты:

- в качестве оптимального антифрикционного и износоустойчивого материала в узлах сухого трения в паре поршень—цилиндр для обработки поршня рекомендуется нитрид молибдена. При этом в качестве материала цилиндра используется коррозионно-стойкая сталь X12M, гильза цилиндра изготавливается из высоколегированной коррозионно-стойкой стали марки 30X13;

- для дальнейшего понижения коэффициента трения и уменьшения изнашивания деталей в период приработки рекомендуется применять твердую смазку на основе дисульфида молибдена, который при высоких триботехнических свойствах химически неактивен по отношению к нитриду молибдена;

- для повышения адгезии нитрида молибдена к стали необходимо выделить материал для промежуточного слоя, который обладал бы хорошими адгезионными свойствами по отношению как к стали, так и нитриду молибдена. Этому критерию удовлетворяет молибден, являющийся переходным металлом, который наносится методом имплантации ионов для повышения адгезионной связи.

Получаемые покрытия отличает высокая адгезия с деталью, покрытия обладают высокой несущей способностью, хорошей прирабатываемостью и улучшенными антифрикционными свойствами. Использование такого метода позволит повысить ресурс цилиндропоршневой пары в два—три раза.

Весьма сложной технологической задачей является изготовление гильзы диаметром 8 мм и длиной ножки 50 мм при толщине стенки менее 0,2 мм, с достаточно жесткими требованиями к прямолинейности (менее 0,02 мм) и несоосности тонкостенной обечайки относительно посадочного диаметра гильзы (менее 0,03 мм).

Тонкостенная обечайка должна обладать абсолютной герметичностью при заполнении ее объема гелием до давления  $\sim 50$  атм в рабочем цикле, поскольку она является внутренним сосудом криостата МФПУ и должна обеспечивать сохранение вакуума примерно  $10^{-4}$  мбар в течение 10 лет. Расчеты показали, что допустимое натекание должно быть около  $1 \cdot 10^{-12}$  л·мбар/с. Основной причиной снижения эффективности МКС являются потери в регенераторе.

Наиболее распространен вариант размещения регенератора внутри вытеснителя. Такой вариант конструктивного решения используется в разрабатываемой МКС, это позволяет уменьшить поперечные размеры низкотемпературной части. Для увеличения срока службы системы уменьшены число циклов, ходы поршня и вытеснителя, что дает возможность несколько увеличить их диаметр и получить рациональные размеры регенератора.

### Вопросы уравнивания

Особенности эксплуатации МКС определяют жесткие требования ее виброактивности. Допустимые колебания холодного цилиндра системы в различных плоскостях не должны превышать 10—20 мкм, а в ряде случаев наличие вибраций недопустимо. Это требование стремятся обеспечить выбором соответствующих размеров механизма и максимальным уравниванием возникающих в нем сил инерции и моментов вращающихся масс. Правильный выбор кинематических соотношений механизма движения способствует улучшению габаритных и ресурсных характеристик систем.

В данной системе вопросы уравнивания играют важную роль, поскольку она конструктивно реализует интегральный цикл Стирлинга, не имеющий гибких развязок, и поэтому требуемые параметры по виброактивности должны соответствовать следующему:

общий уровень виброактивности (ОУВ) головки охлаждения МКС в диапазоне частот 10—10 000 Гц в осевом и радиальном направлениях не должен превышать 1 g;

максимальные монохроматические составляющие при спектральном анализе — не более 0,3—0,4 g.

Указанные параметры по виброактивности могут быть обеспечены правильным выбором кинематических составляющих механизма движения и тщательным уравниванием МКС.

Учитывая, что в состав МКС входит двухрядный кривошипно-шатунный механизм, обеспечивающий работу привода компрессорного поршня и вытеснителя, то для уравнивания в систему

вводят дополнительные массы: противовесы, создающие силы и моменты сил инерции, которые по значению равны уравниваемым и изменяются с той же частотой, но действуют в противоположном направлении [6].

Результаты работ по уравниванию МКС и возможность совместной работы системы с МФПУ определяются по оценке вибровоздействия МКС. Величина вибровоздействия регламентируется виброускорениями (среднеквадратичным и пиковым ударным значениями) холодной головки МКС. Уменьшение величин виброускорений улучшает фотоэлектрические параметры МФПУ и, помимо этого, способствует увеличению ресурса МКС.

### Вопросы обезгаживания

Важным моментом для нормальной работы МКС является необходимость обеспечения чистоты газовых полостей и работоспособность системы в течение всего срока службы без дозаправки и замены криоагента.

Все детали системы содержат растворенные в их глубине или адсорбированные на поверхности газы. Эти газы следует предварительно удалить, так как они будут выделяться в рабочий объем системы, загрязнять ее газовую полость, высаживаться в регенераторе, уменьшая тем самым холодопроизводительность МКС, а также долговечность и надежность работы системы.

Для удаления адсорбированных газов достаточно нагреть детали до 500—600 °С. При этих температурах десорбция адсорбированных газов происходит практически в течение нескольких секунд [4]. Для удаления растворенных газов детали нагревают до возможно более высоких температур. Время удаления этих газов зависит от материала детали и может достигать нескольких часов [4].

При сборке МКС необходимо построить технологический цикл таким образом, чтобы время контакта с окружающей средой было минимальным. При этом необходимо обеспечить хранение не только деталей, но и отдельных сборок и подборок в защищенных от влияния атмосферного воздуха камерах.

Обеспечение необходимых надежности и долговечности работы МКС предъявляет особые требования к кондиции криоагента. Проведенные работы показали, что наиболее полно соответствует требуемым нормам газообразный гелий высокой чистоты с объемной долей 99,9999 % по гелию [5].

Стенд заправки дает возможность в автоматическом режиме провести 20 циклов заполнения МКС и последующего сброса давления. Эта опе-

рация позволяет "промыть" газовые полости МКС, исключив при этом попадание воздуха и подготовить МКС к заправке гелием до давления, величина которого зависит от температуры окружающей среды. По проведенным расчетам МКС допускаемая негерметичность не должна превышать  $10^{-8}$  л·мбар/с. Это позволит эксплуатировать МКС в течение 10 лет без дозаправок.

### Интеграция МКС с объектом охлаждения

Полностью собранная и заполненная гелием МКС поступает на интеграцию с МФПУ.

Учитывая специфику узла сопряжения МКС с МФПУ, процесс интеграции достаточно сложен и представляет собой ответственный комплекс технологических операций, поскольку в его процессе нарушается герметичность МКС. Технология интеграции МКС требует более тщательного контроля, повышенного требования по чистоте помещения, проведения повторных операций по заправке МКС гелием и проверки герметичности системы.

МКС стыкуется с электроприводом, интегрируется с тепловой моделью МФПУ и поступает на комплексный стенд измерения основных параметров.

### Заключение

Приняв во внимание все основополагающие технологические моменты, МКС будет работать практически в принципиально новых режимах, когда энергопотребление составляет не 60—100 Вт в пуске и 35—50 Вт — на стационаре, а 20—25 Вт в пуске и 7—10 Вт — на установившемся режиме. Это значительно снизит виброактивность МКС, что особенно важно для основного режима работы ФЭМ, а пониженное число оборотов открывает путь к совершенствованию конструкции и технологии в вопросах подбора антифрикционных материалов для повышения ресурса работы до 8000—10 000 ч.

### Литература

1. Сулов А. Д. и др. Криогенные газовые системы. — М.: Машиностроение, 1982. — 211 с.
2. Вопросы криогенной техники/Под ред. Л. Л. Штейна. — М.: Цинтихимнефтомаш, 1968. — 91 с.
3. Грезин А. К., Зиновьев В. С. Микроригенная техника. — М.: Машиностроение, 1977. — 229 с.
4. Титушина В. П., Вальгина К. В. Расчет вакуумных систем. — М.: МЭИ, 1975. — 56 с.
5. Криогенное и холодильное оборудование и технологии. Ч. 1, 2/Под ред. А. К. Грезина. — г. Омск: АО "Сибкриотехника", 1997. — 134 с.
6. Пластинин П. И. Поршневые компрессоры. — М.: Колос, 2000. — 45 с.

## Microcryogenic systems Stirlings integrated witch long MTTF

*A. M. Kolesnikov, A. V. Samvelov, K. V. Slovesnov*

Orion Research-and-Production Association, 9 Kosinskaya str., Moscow, 111402, Russia

E-mail: orion@orion-ir.ru

*Advantages of microcryogenic system (MCS) integrated Stirling and questions technology manufacture.*

PACS: 85.60.Gz

*Keywords:* Stirling's circle, microcryogenic system, technology.

Bibliography — 6 references.

*Received 11 December 2008*