

Результаты модернизации модуля охлаждения фотоприемников 2 класса типа МКС МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000.

М.В. Липин, А.В.Смирнов, Е.А. Лохман, Е.В. Забенкова
ООО «НТК «Криогенная техника», Омск, Россия

Конструкция микрокриогенной системы (МКС) «Модуль – Авиа» МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000 (модуль охлаждения фотоприемника, МОФ) разработана ООО «НТК «Криогенная техника» (г. Омск) в 2000 г. в рамках ОКР «Разработка и изготовление унифицированной микрокриогенной системы (модуля охлаждения фотоприёмника – МОФ) для охлаждения субматричных фотоприёмных устройств тепловизионного канала II-го поколения для вертолётных обзорно – прицельных круглосуточных станций» по договору с ФГУП «НПО «ГИПО» (г. Казань) в интересах Минобороны России.

МКС типа МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000 имеет улучшенные характеристики энергопотребления и предназначена для работы в более широком диапазоне рабочих температур (от -60 °С до $+65$ °С) по сравнению с ранее разработанной нашим предприятием по заданию Минобороны России в рамках Федеральной комплексно – целевой программы развития систем тепловидения и приборов ночного видения базовой МКС Сплит-Стирлинг с линейным приводом (ОКР «Оператор-Ф») МСМГ-3А-0,6/80 КВО.0730.000 2-го класса, предназначенной для криостатирования многоэлементных фотоприемников (ФП) перспективных модульных тепловизионных приборов (ТВП) наблюдения и прицеливания для всех родов войск.

Полученные в процессе испытаний параметры и технические характеристики МКС соответствовали заданным в ЧТЗ, отказов МКС при испытаниях не зафиксировано. По результатам успешно проведенных автономных предварительных испытаний [1] и государственных испытаний в составе ТПВК-24Н рабочей конструкторской документации МКС МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000 в 2006 году присвоена литера «О₁».

Разработанная базовая конструкция позволила в короткий срок создать несколько модификаций МКС, учитывающих особенности применения в конкретных образцах военной техники.

В 2006 – 2007 г.г. по СЧ ОКР «Адаптация модуля охлаждения фотоприемника для работы с модулями фотоприемных устройств форматов 4х288 и 384х288 элементов в тепловизионных каналах «Веко-2» разработана и успешно прошла типовые испытания модификация МКС МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000-03.

Необходимость разработки модификации вызвана ужесточением требований к МКС, основными из которых является увеличение тепловой нагрузки на МКС от ФП (теплоприток $0,5^{+0,05}$ вместо $0,3^{+0,05}$ Вт, охлаждаемая масса 8 г вместо 6 г), расширение допуска по напряжению электропитания (22...29 В вместо 24,0...29,4 В), снижению виброактивности МКС (среднеквадратическое значение виброускорения на фланце охладителя ГKM ($19,6$ м/с² (2g) вместо $29,4$ м/с² (3g)). Модифицированная МКС адаптирована для использования в тепловизионных каналах «Веко-2» в части длины и конфигурации трубопровода между

компрессором и охладителем, а также в части конструкции заправочного клапана.

Как и базовая конструкция, МКС предназначена для охлаждения МФПУ с колодцем фотоприемника (ФП) диаметром 6 и глубиной 71 мм.

Основные характеристики модификаций МКС представлены в таблице.1.

Таблица 1

| Наименование параметра | Значение параметра | |
|---|----------------------|----------------------|
| | КВО.0733.000 | КВО.0733.000-03 |
| Температура криостатирования (Тк), К | 80 ₋₅ | 80 ₋₅ |
| Максимальная тепловая нагрузка от ФП при заданной температуре криостатирования, Вт | 0,3 ^{+0,05} | 0,5 ^{+0,05} |
| Приведенная к температуре криостатирования суммарная охлаждаемая масса ФП, г, не более | 6 | 8 |
| Время выхода на режим (τ), мин, не более | 8 | 8 |
| Потребляемая мощность (N), Вт, не более: – в пусковом режиме, N _{пуск} – в стационарном режиме, N _{реж} | 60 35 | 60 35 |
| Питание от сети постоянного тока, напряжением, В | 24,0...29,4 | 22...29 |
| Масса, кг, не более | 3 | 3 |
| Средняя наработка на отказ, ч | 4000 | 4000 |
| Средний срок сохраняемости, лет | 10,5 | 10,5 |
| Рабочая температура окружающей среды, °С | от –60 до +65 | от –60 до +65 |
| Условия эксплуатации МКС – по ГОСТ РВ 20.39.304-98 | группа 3.2.3 | группа 3.2.3 |

На рис. 1 представлен внешний вид МКС МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000-03.



Рис. 1 Унифицированный модуль охлаждения фотоприёмника 2 класса МКС МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000-03.

В состав МКС входит газовая криогенная машина (ГКМ), которая, в свою очередь состоит из охладителя и компрессора, соединённых между собой трубопроводом, и блок управления (БУ) КВО.8039.000, служащий для управления приводом компрессора и регулирования температуры криостатирования.

ГКМ работает по замкнутому обратному газодинамическому циклу Стирлинга с внутренней регенерацией тепла и с использованием постоянного количества рабочего газа (криоагента) – гелия газообразного высокой чистоты. Охлаждение МКС комбинированное: естественной конвекцией и теплопроводностью с отводом теплоты в количестве 35 Вт на корпусные детали аппаратуры, имеющие температуру не выше +70°C. Трубопровод позволяет изменять ориентацию охладителя относительно компрессора, облегчает компоновку ГКМ в аппаратуре, и позволяет снизить вибрации холодной головки охладителя за счет её удаления от компрессора.

БУ КВО.8039.000 питается от сети постоянного тока напряжением 27 В и служит для поддержания заданной температуры криостатирования. При отклонении температуры криостатирования, измеряемой датчиком температуры в МФПУ, происходит изменение хода (амплитуды перемещения) компрессорных поршней приводящее к изменению холодопроизводительности ГКМ, что позволяет стабилизировать температуру криостатирования в заданном интервале во всех условиях эксплуатации.

При автономных испытаниях МКС время выхода на рабочий режим и ее другие технические характеристики измеряются с технологическим приспособлением КВО.4554.010 с вакуумным криостатом, разработанным ООО «НТК «Криогенная техника».

В 2006 – 2008 г.г. испытания МКС проводились с технологическими приспособлениями (имитаторами тепловой нагрузки), имеющими минимальные значения теплопритока 0,3 Вт, затем минимальные значения теплопритока были увеличены до 0,5 Вт.

Холодопроизводительность МКС определяется по формуле

$$Q = Q_1 + Q_2,$$

где Q – холодопроизводительность МКС, Вт;

Q_1 – мощность на нагревателе, эквивалентная избыточной холодопроизводительности МКС, Вт;

Q_2 – теплоприток по приспособлению КВО.4554.010 измеренный по РТМ 3-1033-77.

Модификация МКС МСМГ – 3В – 1/80 КВО.0733.000-03 пользуется устойчивым спросом. С 2006 года эта модификация выпускалась ежегодно партиями по 10 - 15 штук.

Результаты испытаний МКС МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000-03 (средние значения по партиям выпуска 2006 – 2009 г.г.) представлены в таблице 2.

Результаты испытаний партии МКС выпуска 2009 г. представлены в таблице 3.

Таблица 2

| Год выпуска партии | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | Требование ТУ |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------------------|
| Температура окружающей среды | +65 °С | | | | |
| Время достижения температуры, мин: 100К 80К | 4'19" 5'11" | 3'58" 4'43" | 4'16" 5'06" | 4'50" 5'55" | не более 8 |
| Потребляемая мощность МКС, Вт: в пусковом режиме в рабочем режиме | 56,7 16,0 | 54,6 14,7 | 55,7 15,9 | 56,3 19,3 | не более 60 не более 35 |
| Температура окружающей среды | +23 °С | | | | |
| Время достижения температуры, мин: 100К 80К | 3'53" 4'37" | 3'39" 4'27" | 3'54" 4'39" | 4'26" 5'23" | |
| Потребляемая мощность МКС, Вт: в пусковом режиме в рабочем режиме | 39,3 10,5 | 37,4 10,4 | 39,0 10,9 | 38,8 12,1 | |
| Температура окружающей среды | -60 °С | | | | |
| Время достижения температуры, мин: 100К 80К | 3'05" 3'51" | 3'38" 4'29" | 3'17" 4'12" | 3'40" 4'39" | |
| Потребляемая мощность МКС, Вт: в пусковом режиме в рабочем режиме | 26,9 6,7 | 23,0 6,9 | 26,8 6,9 | 24,0 7,2 | |

Таблица 3

| Зав. № МКС | 081292 | 081293 | 081294 | 081295 | 081291 | 081296 | 081297 | 041325 | 081021 | 081298 | Среднее значение | Требование ТУ |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------------------|----------------------------|
| Температура окружающей среды | +65 °С | | | | | | | | | | | |
| Время достижения температуры, мин: 100К 80К | 4'11" 5'23" | 4'49" 5'36" | 5'01" 6'30" | 4'55" 5'55" | 4'48" 5'36" | 4'30" 5'34" | 5'16" 6'20" | 4'51" 5'52" | 5'21" 6'28" | 4'42" 5'56" | 4'50" 5'55" | не более 8 |
| Потребляемая мощность МКС, Вт: в пусковом режиме в рабочем режиме | 56,7 17,6 | 57,8 19,4 | 55,0 19,4 | 58,9 19,7 | 56,2 19,4 | 53,5 18,6 | 54,0 18,9 | 56,2 17,6 | 58,9 20,0 | 57,2 20,0 | 56,3 19,3 | не более 60 не более 35 |
| Температура окружающей среды | +23 °С | | | | | | | | | | | |
| Время достижения температуры, мин: 100К 80К | 4'06" 4'55" | 4'05" 4'45" | 4'37" 5'31" | 3'37" 4'28" | 4'30" 5'35" | 4'10" 5'02" | 4'56" 5'56" | 4'40" 5'38" | 4'53" 5'55" | 4'49" 5'50" | 4'26" 5'23" | |
| Потребляемая мощность МКС, Вт: в пусковом режиме в рабочем режиме | 40,2 11,1 | 37,8 11,1 | 37,0 12,2 | 40,2 12,7 | 38,1 12,4 | 42,9 12,7 | 36,5 11,3 | 38,1 11,6 | 38,1 12,4 | 39,2 13,0 | 38,8 12,1 | |
| Температура окружающей среды | -60 °С | | | | | | | | | | | |
| Время достижения температуры, мин: 100К 80К | 3'20" 4'16" | 3'40" 4'39" | 3'53" 4'53" | 3'35" 4'27" | 3'30" 4'20" | 2'50" 3'53" | 3'43" 4'47" | 3'53" 4'42" | 4'02" 5'15" | 4'13" 5'22" | 3'40" 4'39" | |
| Потребляемая мощность МКС, Вт: в пусковом режиме в рабочем режиме | 22,6 6,8 | 23,8 6,8 | 23,5 7,0 | 26,2 7,3 | 23,8 7,6 | 28,6 8,0 | 25,9 6,8 | 21,6 7,0 | 23,0 7,0 | 20,8 7,9 | 24,0 7,2 | |

Наиболее сложным является стабильность обеспечения заданного в ТУ на МКС требования по холодопроизводительности МКС не менее 1 Вт при температуре окружающей среды +65 °С при ограничении потребляемой мощности не более 60 Вт в период выхода на рабочий режим. На рисунках 2 и 3 приведены экспериментально полученные зависимости холодопроизводительности от потребляемой мощности для МКС МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000-03 при температуре окружающей среды +65 °С.

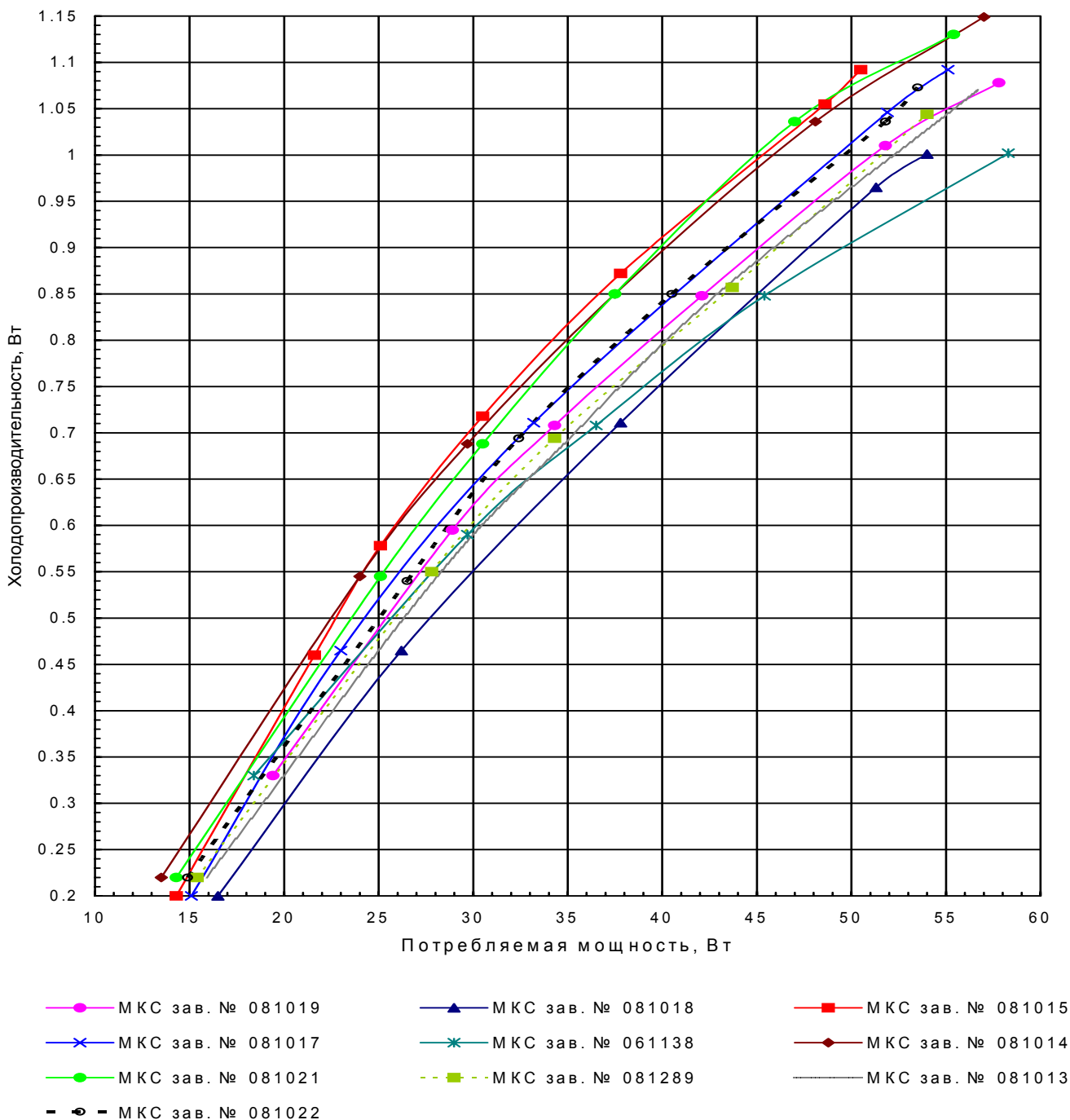


Рис. 2. Зависимости холодопроизводительности от потребляемой мощности при + 65 °С для партии МКС КВО.0733.000-03 выпуска 2008 г.

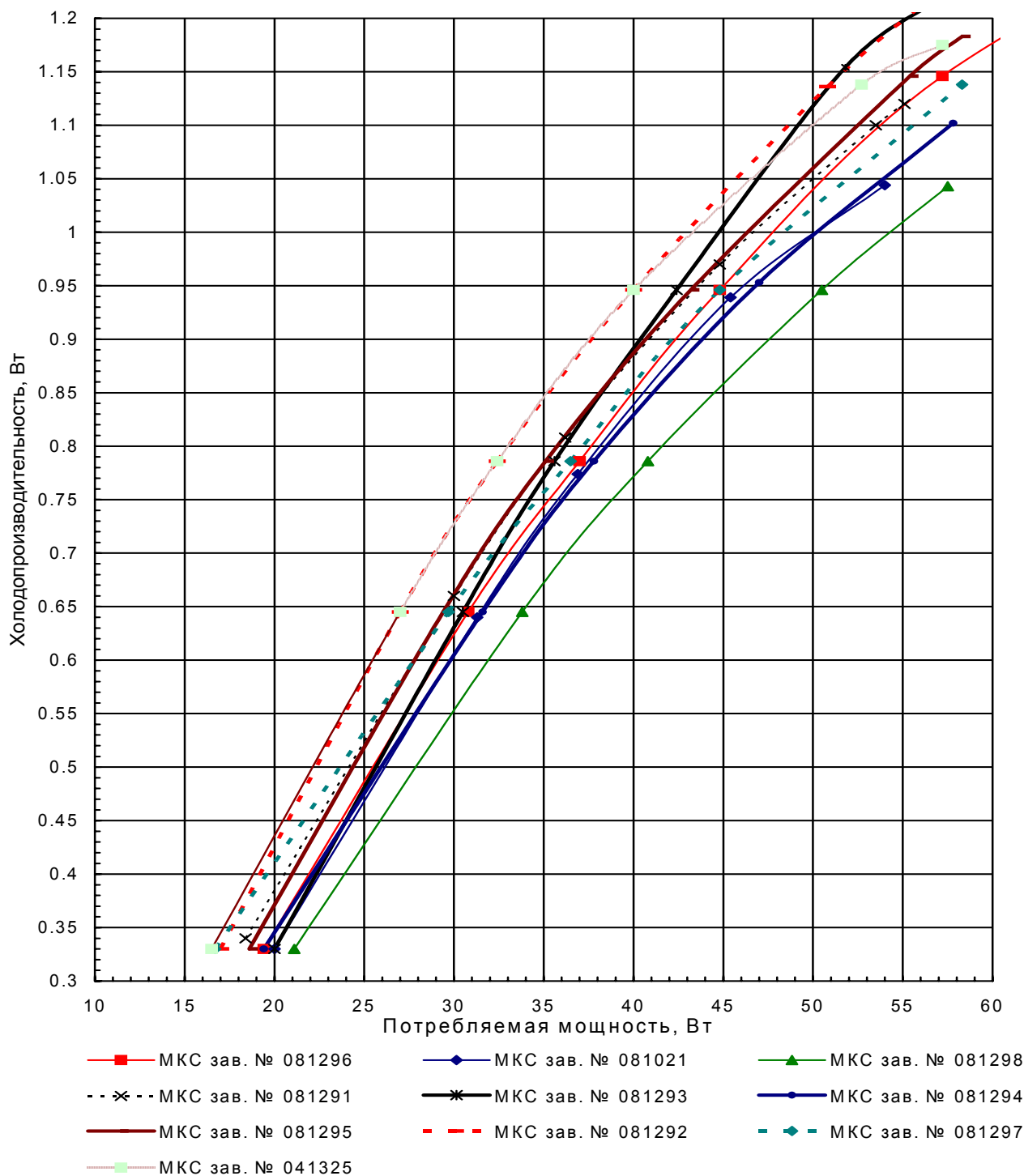


Рис. 3. Зависимости холодопроизводительности от потребляемой мощности при + 65 °С для партии МКС КВО.0733.000-03 выпуска 2009 г.

Характеристики МКС, приведенные в таблицах 2 и 3 и на рисунках 2 и 3, подтверждают, что получен достаточно стабильный результат, удовлетворяющий условиям их применения.

Препятствием для расширения области применения МКС типа МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000 является их довольно высокая стоимость, которая в значительной мере зависит от стоимости примененных материалов и комплектующих электрорадиоизделий отечественного производства. Для улучшения коммерческой

привлекательности МКС ООО «НТК «Криогенная техника» с использованием ЭРИ иностранного производства разработан новый блок управления КВО.8056.000, применение которого в МКС типа МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000 позволит снизить стоимость МКС в среднем на 10%.

Применение в БУ КВО.8056.00 высокотехнологичных ЭРИ и цифрового сигнального процессора иностранного производства позволило сократить количество печатных плат до двух (в БУ КВО.8039.000 пять плат) и упростить сборку блока. БУ КВО.8056.000 имеет объем 320 см³ и массу 260 г, БУ КВО.8039.000 800 см³ и 930 г соответственно (см. рис. 4).



Рис. 4. БУ КВО. 8056.000 (слева) и БУ КВО.8039.000

В [2] подробно описаны функции, выполняемые БУ КВО.8039.000, применение более гибкой цифровой системы управления позволило дополнительно реализовать в БУ КВО.8056.000 новую функцию – регулятор сдвига фаз питающих напряжений электродвигателей.

БУ КВО.8056.000 состоит из силовой платы и платы контроллера. Силовая плата предназначена для формирования токов в фазах линейных двигателей. На силовой плате выполнены:

- входной и выходные фильтры для обеспечения требований по ЭМС;
- узел защиты от переплюсовки;
- два однофазных мостовых инвертора;
- драйвер для управления полевыми транзисторами инверторов;
- вторичный источник питания - обратногоходовой преобразователь формирующий стабилизированные постоянные напряжения +15 В для драйвера и ±5В для питания платы управления.

Плата контроллера обеспечивает выполнение задач управления МКС в соответствии с заданной программой. На плате управления выполнены:

- синхронные выпрямители для демодуляции сигнала с датчиков положения;
- дифференциальные усилители для нормирования сигналов с датчиков положения;
- датчики тока и напряжения;
- источник опорного напряжения, обеспечивающий напряжение 3,3 В;

-источник тока, который обеспечивает ток $(100 \pm 0,5)$ мкА в датчике температуры аппаратуры заказчика и в датчике температуры окружающей среды (в БУ);

-инструментальный усилитель, обеспечивающий получение с заданной точностью разностного сигнала из напряжения уставки и напряжения, пропорционального температуре, поступающего с датчиков температуры;

-цифровой сигнальный процессор со встроенным программным обеспечением для выполнения задач управления;

-энергонезависимая память для хранения уставок, коэффициентов и т.д.

На МКС МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000-03 зав. №081298 проведены сравнительные испытания с цифровым блоком управления КВО.8056.000 и аналоговым КВО.8039.000 в объеме основных требований проекта КВО.0733.000-03 ТУ по стойкости, прочности и устойчивости МКС к внешним воздействующим факторам.

Результаты сравнительных испытаний представлены на рисунках 5-8 и в таблице 4.

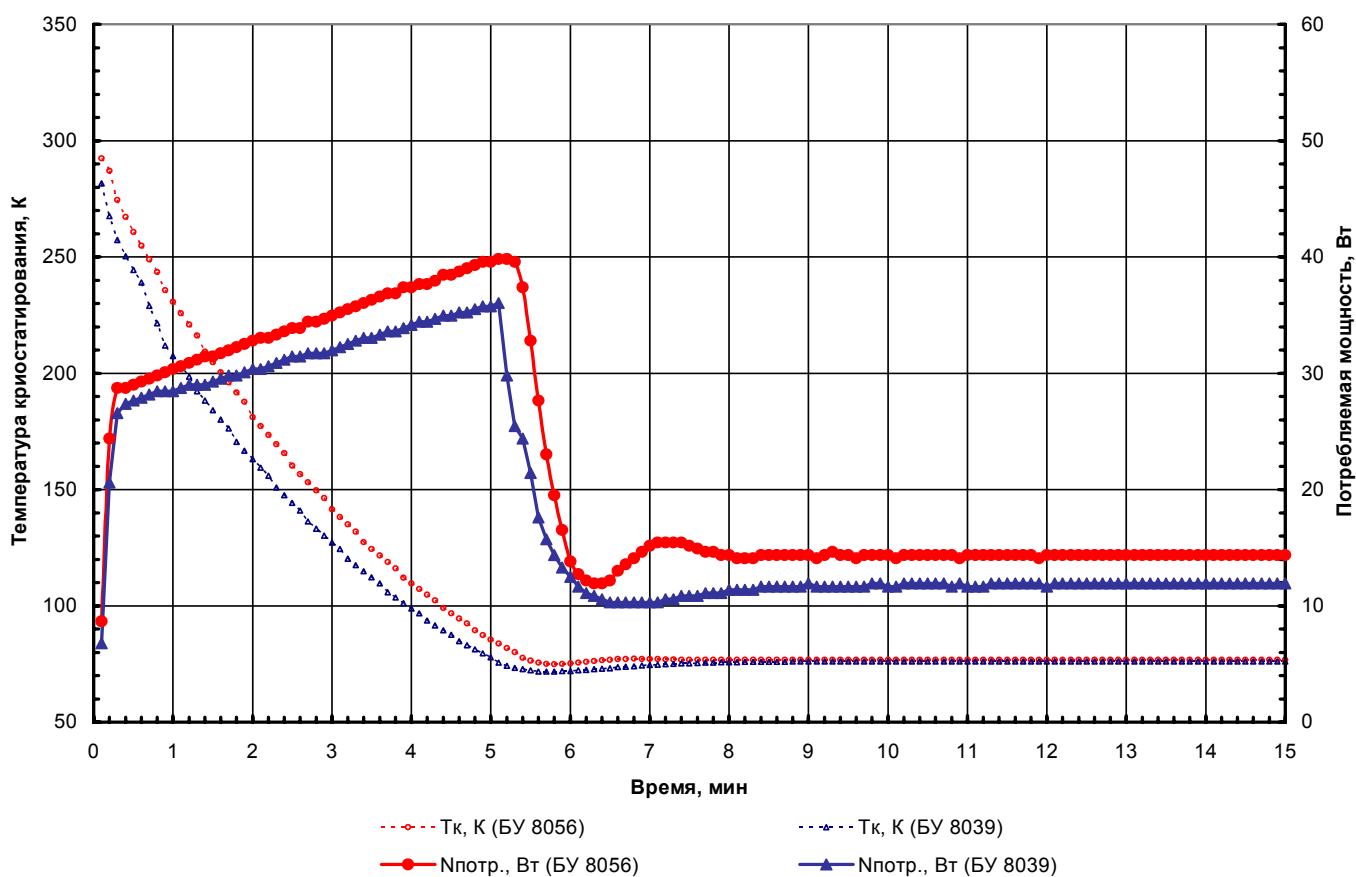


Рис. 5. Изменение потребляемой мощности и температуры криостатирования от времени работы для МКС МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000-03 в н.к.у.

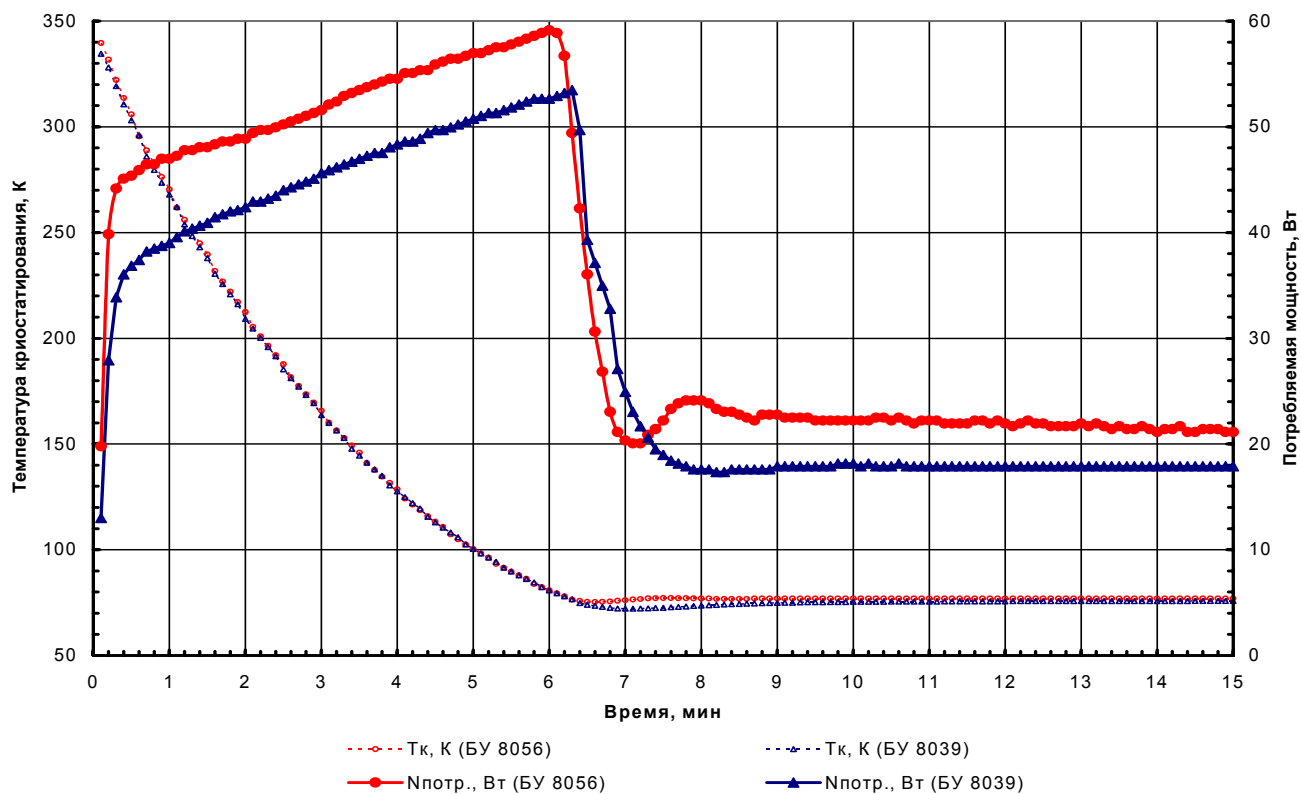


Рис. 6. Изменение потребляемой мощности и температуры кристаллирования от времени работы для МКС МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000-03 при +65 °С

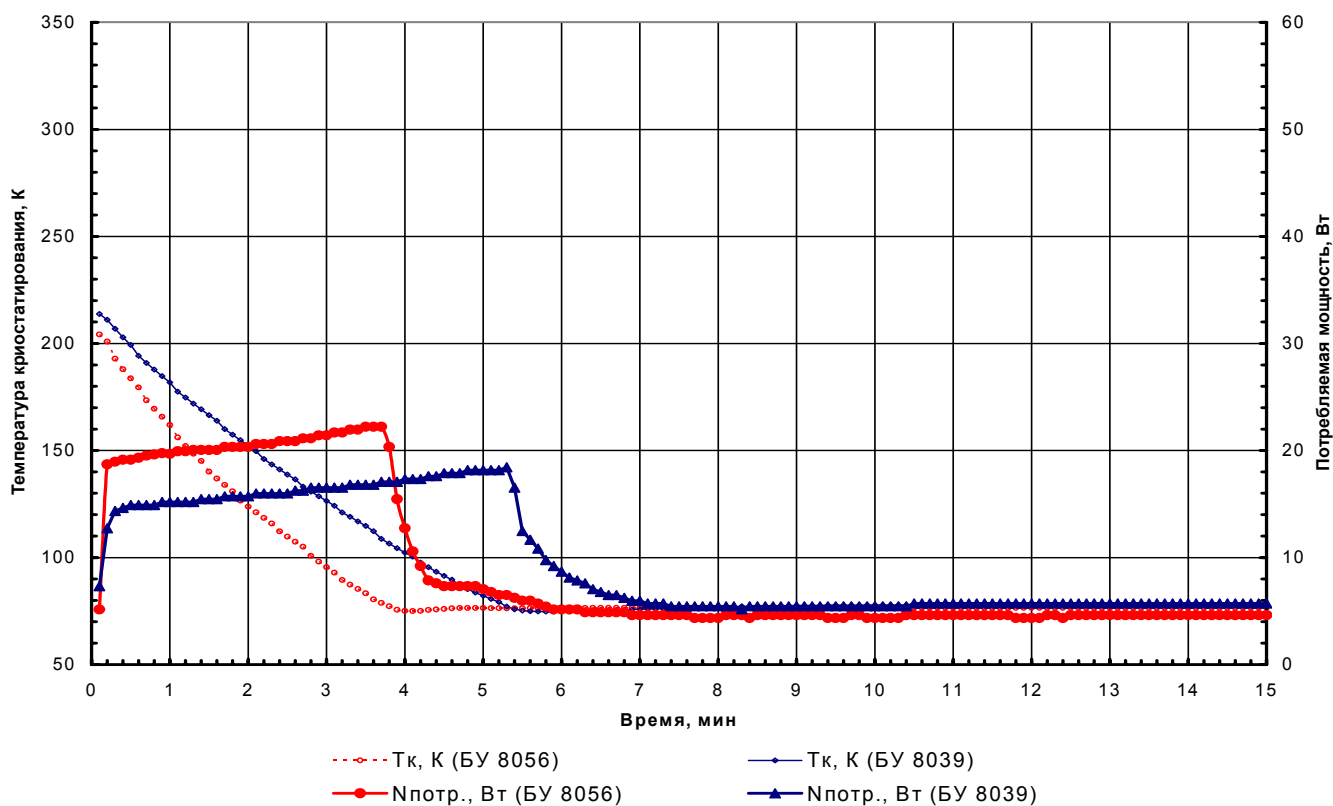


Рис. 7. Изменение потребляемой мощности и температуры кристаллирования от времени работы для МКС МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000-03 при -60 °С

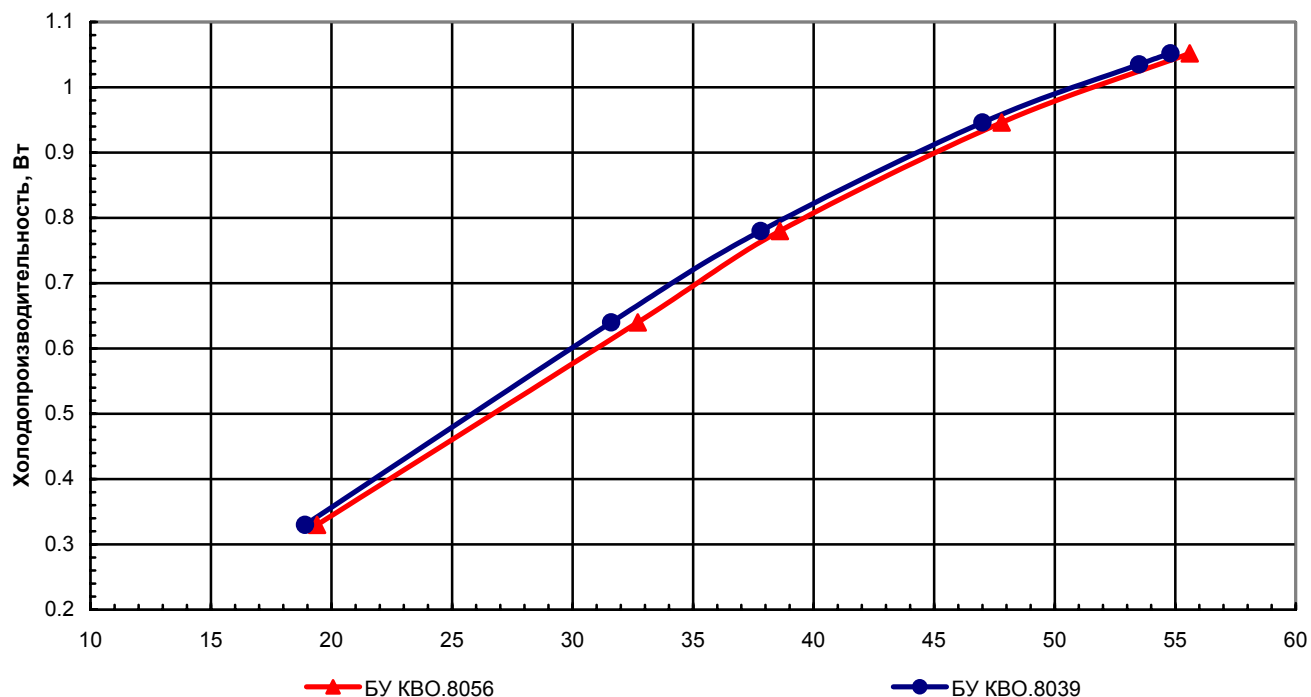


Рис. 8. Зависимость холодопроизводительности от потребляемой мощности для МКС МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000-03 при +65 °C.

Таблица 4

| | МКС с БУ КВО.8039.000 | МКС с БУ КВО.8056.000 |
|--|--------------------------|--------------------------|
| Температура окружающей среды | +23 °C | |
| Время выхода на раб. режим, мин | 5'26" | 5'30" |
| Потребляемая мощность в пуск. режиме, Вт | 35,6 | 35,9 |
| Потребляемая мощность в раб. режиме, Вт | 11,6 | 11,8 |
| Ход поршней в пуск. режиме, мм | 13,0 | 12,8 |
| Ход поршней в раб. режиме, мм | 7,1 | 7,2 |
| Температура криостатирования, К | 77 | 78 |
| Температура окружающей среды | +65 °C | |
| Время выхода на раб. режим, мин | 5'57" | 6'00" |
| Потребляемая мощность в пуск. режиме, Вт | 55,1 | 54,0 |
| Потребляемая мощность в раб. режиме, Вт | 18,6 | 18,9 |
| Ход поршней в пуск. режиме, мм | 13,0 | 13,0 |
| Ход поршней в раб. режиме, мм | 7,9 | 8,2 |
| Температура криостатирования, К | 77 | 78 |
| Температура окружающей среды | -60 °C | |
| Время выхода на раб. режим, мин | 5'00" | 4'01" |
| Потребляемая мощность в пуск. режиме, Вт | 19,2 | 24,0 |
| Потребляемая мощность в раб. режиме, Вт | 6,2 | 6,2 |
| Ход поршней в пуск. режиме, мм | 13,0 | 12,5 |
| Ход поршней в раб. режиме, мм | 5,9 | 5,6 |
| Температура криостатирования, К | 79 | 77 |

Дополнительно для расширения области применения МКС МСМГ – 3В – 1/80 КВО.0733.000-03 были успешно проведены испытания по требованиям группы 1.5, ГОСТ РВ 20.39.304-98: испытание на прочность при воздействии синусоидальной вибрации, испытание на прочность при воздействии механических ударов многократного действия, испытание на устойчивость при воздействии синусоидальной вибрации, испытание на устойчивость при воздействии механических ударов многократного действия.

В настоящее время разрабатывается новая модификация блока управления имеющая объем менее 250 см³, в перспективе планируется переход на отечественные полные аналоги комплектующих ЭРИ по мере их освоения промышленностью РФ.

Литература

1. М. В. Липин, А. В. Смирнов, Е. В. Забенкова Результаты испытаний микрокриогенной системы МСМГ-3В-1/80 – унифицированного модуля межвидового применения для тепловизионного канала 2-го поколения. //Прикладная физика № 3, 2008, с. 128-133.
2. М.В. Липин, А.В. Громов Результаты разработки ряда модульных МКС Сплит – Стирлинг для криостатирования ФПУ 1 – го и 2 – го поколений. //Прикладная физика, №2, 2007г., с. 110 – 119.