

М. В. Нечаев, В. Ю. Нечаев

**ОБОСНОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ КАПЕЛЬНОГО ХОЛОДИЛЬНИКА-ИЗЛУЧАТЕЛЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ЗАДАННОЙ ЦИКЛОГРАММЫ РАБОТЫ УСТАНОВКИ**

*Рассмотрена проблема сброса низкопотенциальной теплоты в безвоздушном пространстве. В качестве эффективного решения данной проблемы используется капельный холодильник-излучатель. Рассмотрены новый модуль капельного холодильника-излучателя и его прототип-предшественник, а также устройство и работа системы управления. Проведено сравнение систем управления нового модуля и его прототипа. Отмечен ряд ключевых усовершенствований современной системы управления нового модуля, позволивших значительно улучшить показатели работы агрегата в целом.*

**E-mail: nmw2000@mail.ru**

**Ключевые слова:** космический эксперимент, низкопотенциальная теплота, отвод теплоты, холодильник-излучатель, бортовая система управления.

Для отвода низкопотенциальной теплоты от энергетических установок (ЭУ) и систем энергообеспечения космических аппаратов в настоящее время используют проточные холодильники-излучатели (ХИ); наиболее известные и часто применяемые из них — трубчато-ребристые. В ХИ теплота отводится излучением. С ростом мощности и ресурса энергозависимых установок масса холодильников, выполненных по традиционным схемам и технологиям, увеличивается за счет увеличения необходимых поверхностей отвода теплоты и из-за необходимости их защиты (бронирования) в условиях метеоритной опасности. Масса материала бронирования может составлять более 1/3 массы холодильника в зависимости от мощности и ресурса установки. При больших мощностях энергетических установок традиционные системы отвода низкопотенциальной теплоты могут превышать по массе все остальные узлы ЭУ вместе взятые [1].

Используя для отвода теплоты в открытом космосе монодисперсионные капельные потоки, можно улучшить массо-габаритные характеристики ХИ. Комплекс выполненных расчетных исследований и наземных экспериментов значительно продвинул техническое обоснование капельных ХИ (КХИ), однако, одновременное воспроизведение условий микрогравитации и глубокого вакуума, характерных при работе КХИ на космических аппаратах, в земных условиях затруднительно. Научная бортовая аппаратура “Капля-2” для космического эксперимента на МКС разрабатывается в целях исследования рабочего процесса КХИ в реальных условиях эксплуатации изделий. Основу аппаратуры составляет экспериментальный модуль КХИ, в котором

воспроизведены все элементы системы отвода низкопотенциальной теплоты от энергетических установок с замкнутым контуром.

Для обеспечения функционирования научной аппаратуры была разработана бортовая система управления и защиты, которая конструктивно выполнена в виде пульта дистанционного управления (ПДУ), обеспечивающего выполнение циклограммы работы КХИ и предварительную тепловую стабилизацию параметров контура теплоносителя, а также поддержание температуры материала конструкции и теплоносителя в пределах  $80^{\circ}\text{C} < T < 90^{\circ}\text{C}$ . Поддержание такого теплового режима очень важно, так как теплоноситель в случае перегрева может коксоваться, а в случае недостаточного прогрева его текучесть будет слишком низкой для работы КХИ, при этом образование монодисперсионных потоков капель затруднено.

Прототипом ПДУ послужил пульт управления моделью КХИ, который успешно отработал циклограмму космического эксперимента в составе научной аппаратуры “Пелена-2” на станции “Мир” в 2000 г. [2]. Прототип современного ПДУ был спроектирован на базе цифроаналогового комплекта микросхем средней степени интеграции и состоял из четырех плат:

- платы питания, формирующей все необходимые питающие напряжения и обеспечивающей коммутацию управляющего напряжения на контакторы исполнительных механизмов системы управления;
- платы измерения, преобразующей и обрабатывающей аналоговые данные с датчиков температур и давлений;
- платы управления, вырабатывающей управляющие импульсы для платы питания в соответствии с циклограммой работы, а также обеспечивающей реакцию системы управления на нажатие кнопок передней панели ПДУ;
- платы генератора звуковой частоты (ГЗЧ), осуществляющей формирование меандра амплитудой 27 В для генераторов капель и формирование данных измерений в реальном масштабе времени для сброса в систему телеметрии.

Следует отметить, что форма управляющих импульсов ГЗЧ была определена в виде меандра не случайно. Прямоугольная форма сигнала, позволила существенно снизить тепловыделение усилительного каскада платы ГЗЧ, что очень важно в условиях космического эксперимента.

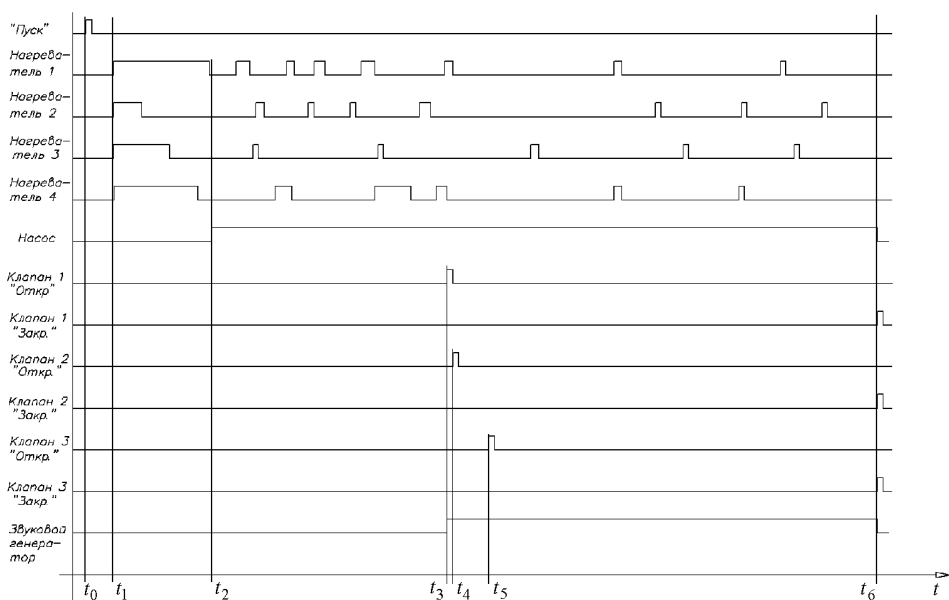
Обработку аналоговых сигналов с температурных датчиков и датчика давления КХИ, для обеспечения надежности и достоверности измерения, проводили по принципу два из трех. Это означает, что для измерения температуры в одной контрольной точке устанавливали три термометра сопротивления. Логика работы платы измерений заключалась в сравнении показаний трех датчиков. Если два датчика показывали недостаточный нагрев точки, то нагреватель включался, в

противном случае он выключался. В логике работы компаратора платы был введен гистерезис, соответствующий  $15^{\circ}\text{C}$ .

Таким образом, реакция на изменение температуры наступала при ее отклонении от заданного значения на гистерезис. Большой гистерезис ( $15^{\circ}\text{C}$ ) определялся точностью измерения температуры и быстродействием электромагнитных контакторов, включающих нагреватели. Циклограмма эксперимента, выполненного на орбитальной станции “Мир” в 2000 г., приведена на рис. 1.

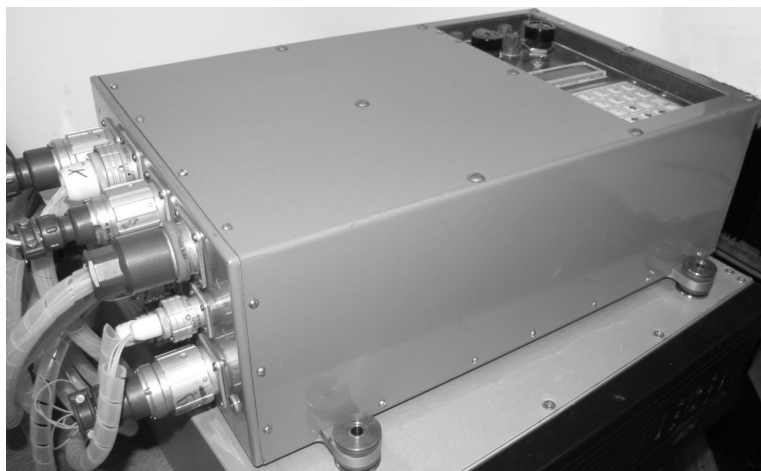
Современный ПДУ (рис. 2) отвечает следующим техническим требованиям:

- габаритные размеры прибора не более  $420 \times 380 \times 175$  мм;
- масса ПДУ 6,5 кг;
- сопротивление изоляции прибора при нормальных условиях не менее 20 МОм.



**Рис. 1. Циклограмма летного эксперимента на станции “Мир” в 2000 г.:**

$t_0$  — момент нажатия кнопки “Пуск” (начало эксперимента);  $t_0 - t_1$  — временной интервал, за который глубина вакуума достигает  $0,01$  мм рт. ст.;  $t_1$  — момент включения нагревателей;  $t_1 - t_2$  — временной интервал, в течение которого температура генератора капель, стенок заборника и рабочего тела достигнет значения  $70^{\circ}\text{C}$ ;  $t_2$  — момент включения насоса системы хранения и подачи;  $t_2 - t_3$  — временной интервал, за который достигается заданное давление рабочей жидкости за насосом;  $t_3$  — момент включения звукового генератора и клапана подачи рабочей жидкости в коллектор пленки заборника;  $t_3 - t_4$  — фиксированный временной интервал  $0,2$  с;  $t_4$  — момент включения клапана подачи рабочей жидкости в коллектор ускоряющего устройства заборника;  $t_4 - t_5$  — фиксированный временной интервал  $10$  с;  $t_5$  — момент включения клапана подачи рабочей жидкости в генератор капель;  $t_5 - t_6$  — временной интервал собственно эксперимента составляет либо  $130$  с, либо обрывается при падении давления рабочей жидкости за насосом ниже  $5$  кг/см $^2$ ;  $t_6$  — момент прекращения эксперимента



**Рис. 2. Пульт дистанционного управления**

Для управления работой КХИ система управления использует следующую информацию, получаемую с датчиков:

- давление в системе — аналоговый сигнал с двух датчиков;
- температура теплоносителя в системе — аналоговый сигнал с восьми датчиков;
- состояние электрогидроклапанов — дискретный сигнал типа “сухой контакт” с шести датчиков;

Конструкция ПДУ улучшена по сравнению со своим прототипом и имеет ряд важных отличий. В первую очередь была изменена электронно-вычислительная часть системы. Основным вычислительным устройством стал процессорный модуль, разработанный на базе PIC-контроллера. Использование программируемого микропроцессора позволяет существенно расширить возможности аппаратуры, реализуя несколько режимов работы, и существенно сократить время отладки рабочих циклограмм на начальном этапе испытаний. Коснулись изменения и внешнего вида современного ПДУ. Например, на переднюю панель ПДУ были выведены ЖК-табло и пленочная клавиатура, с помощью которых стало возможным управлять работой аппаратуры. Изменения коснулись и силовой части пульта. Вместо громоздких и тяжелых электромагнитных контакторов были использованы компактные твердотельные электрореле, что позволило существенно уменьшить массу ПДУ.

В состав ПДУ входит микропроцессорный набор модулей MCU4 (ООО “Фрактал” г. Зеленоград). Управляющей единицей в этом наборе является вычислительный модуль, построенный на базе микроконтроллера PIC24FJ64GA004, имеющий 2 Мб встроенной энергонезависимой программируемой памяти, в которой хранится рабочая программа ПДУ. На борту вычислительного модуля имеется порт шины USB для организации терминального режима с отладочным ПК и контроллер шины I2C, обеспечивающий взаимодействие модулей набора

между собой. Конструктивно модули объединяются посредством двухстороннего кросса по четыре модуля с каждой стороны. На функциональной блок-схеме (рис. 3) ПДУ показано взаимодействие модулей системы между собой, а также с внешними исполнительными механизмами и датчиками.

В набор системы управления вошли: микропроцессорный модуль, модуль индикации, два модуля 24-разрядных АЦП, модуль входов с гальванической развязкой, два модуля цифровых выходов с генератором ШИМ, модуль цифровых входов.

Диалоговый режим работы системы управления обеспечивается посредством двухстрочного алфавитно-цифрового табло и пленочной клавиатуры. С их помощью в интерактивном режиме оператор выбирает режимы работы и ввода команд. Система выводит на табло пункты управляющего меню, значения температур, датчиков давления и состояния ЭГК. За управление ЖК-табло отвечает индикаторный модуль. Вычислительный модуль осуществляет только передачу



Рис. 3. Функциональная блок-схема ПДУ

символьных строк для отображения на ЖК-табло в область памяти индикаторного модуля, условно называемую видеопамятью, и считывает декодированное значение нажатых клавиш из порта клавиатуры модуля индикации.

Считывание аналоговых сигналов обеспечивают два модуля аналого-цифрового преобразователя. Разрядность АЦП этих модулей составляет 24 бита, что позволяет оцифровывать аналоговые сигналы с термометров сопротивления ТП018-05 и ТП062-09 в диапазоне от 0 до +5 В с точностью, отвечающей техническим требованиям. Обмен информацией с этими модулями происходит с помощью интерфейса SPI, контроллер которого реализован в вычислительном модуле. Сигнал, поступающий на входы АЦП, проходит через RC-фильтр, сглаживающий высокочастотные помехи и обеспечивающий полосу пропускания сигнала порядка 10 Гц. Поскольку показания датчиков температуры меняются относительно медленно, выбранный диапазон позволяет уверенно считывать текущее значение температур.

Важной задачей при проектировании ПДУ было обеспечение устойчивой работы электронной части прибора. Для решения этой проблемы в состав пульта управления был включен модуль входов с гальванической развязкой, который аппаратно соединен с модулем цифровых входов. Его использование позволило гальванически отделить питание датчиков от питания микропроцессорного набора. Таким образом, были исключены помехи из цепей питания вычислителя и его модулей.

Для управления исполнительными элементами аппаратуры используются два модуля цифрового вывода. Они непосредственно соединены со входами управления твердотельных реле, коммутирующих напряжения питания исполнительных элементов аппаратуры. Каждый модуль вывода имеет возможность управлять 16 дискретными каналами. Важной особенностью этих модулей является наличие широтно-импульсного модулятора (ШИМ), имеющего два программируемых канала, что позволяет формировать импульсы с частотой в диапазоне от 1 до 12 кГц. Оба канала одного из модулей задействованы в работе генератора капель КХИ.

Программное обеспечение ПДУ разделено на два уровня. Низкоуровневые программы представляют собой блоки машинного кода, которые записываются во флэш-память периферийных контроллеров и обеспечивают их функционирование, согласно заданным алгоритмам. Такой подход к созданию ПО позволил упростить структуру основной программы, написанной на языке высокого уровня и зашитой в память процессорного модуля-вычислителя. Так, программа модуля цифровых входов циклически выполняет проверку состояния всех входов модуля и записывает результат опроса в массив ячеек памяти. Такое решение позволило разгрузить модуль вычислителя и обеспечить его достоверной информацией о состоянии входов.

Блоки машинных кодов формировались с помощью транслятора языка ассемблер для PIC-контроллеров, входящего в состав интегрированной среды разработки MPLAB.

Основная программа написана на языке высокого уровня Basic-Fractal, интерпретатор которого зашит в ППЗУ вычислителя. Использование языка высокого уровня сильно облегчило организацию интерфейса программы и математические вычисления.

Интерфейс программы выполнен в виде последовательности диалогов, в которых пользователю предлагается выбрать одну из команд. Аскетичность интерфейса объясняется ограниченными возможностями индикаторного табло, которое имеет всего две строки по 16 символов в каждой. Тем не менее, в ходе выполнения работы на это табло выводятся данные о состоянии аппаратуры и время выполнения этапов циклограммы.

В настоящее время в программе реализовано два режима работы ПДУ. Отладочный режим, в котором оператор может управлять любым исполнительным механизмом и считывать значение с любого датчика системы. Рабочий режим реализует выполнение циклограммы эксперимента. В циклограмме заложены две контрольные точки, когда оператору необходимо принимать решение о продолжении работы аппаратуры или прекращении эксперимента, также предусмотрена возможность корректного останова аппаратуры на протяжении всего рабочего цикла.

Силовая коммутационная часть пульта выполнена на базе твердотельных реле. Это позволило выиграть в размере и массе прибора по сравнению с его прототипом, в котором использовались электромагнитные контакторы. В силовом блоке используются 17 идентичных твердотельных реле с рабочим током 10 А для формирования импульсов открытия и закрытия клапанов и коммутации напряжения питания нагревателей и осветителей. Кроме того, в состав блока входят два твердотельных реле с рабочим током 40 А для питания электронагревательной аппаратуры и заборника капель. Применение твердотельных реле повысило надежность прибора и снизило его энергопотребление.

Система управления и защиты модуля КХИ выполнена на современном технологическом уровне. В конструкции ПДУ аппаратуры имеется ряд существенных нововведений, обеспечивающих по сравнению с его прототипом надежную работу КХИ на орбитальной станции "Мир". Благодаря переходу на микропроцессорное управление существенно увеличена точность измерения, что позволило уменьшить гистерезис до 5 °С. Новая платформа позволила реализовать алгоритм, согласно которому вышедшие из строя датчики исключаются из обработки. Число датчиков сокращено в 1,5 раза, и определение температуры контрольной точки теперь осуществляется по принципу два из двух. Температура вычисляется как среднее арифметическое показаний двух датчиков, если оба датчика признаны системой исправными.

Повышена эффективность ПДУ. В результате уменьшения гистерезиса снижено время выхода системы на заданную температуру теплоносителя. Организован интерактивный режим работы, когда испытатель получает в реальном масштабе времени информацию о состоянии системы и температуре теплоносителя. Появилась возможность управлять отдельными исполнительными механизмами КХИ вручную. Гибкость программного обеспечения позволяет без аппаратного вмешательства в схему ПДУ регулировать частоту и скважность импульсов ГЗЧ. Система защиты ПДУ имеет возможность расширения без изменения аппаратной части путем внедрения алгоритмов обработки внештатных ситуаций в программное обеспечение пульта. По отношению к своему прототипу система защиты была существенно дополнена новыми алгоритмами и обеспечивала безопасную и надежную работу современного ПДУ.

В настоящий момент опытный образец ПДУ успешно прошел приемо-сдаточные, конструкторско-доводочные [3] и ресурсные испытания [4].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. F e i g J. R. Radiator concepts for high power systems in space. Proc. 1-st symposium on space nuclear power systems, 1984. – Vol. 2.
2. К о н ю х о в Г. В., К о р о т е е в А. А., П о л у э к т о в В. П. Исследование рабочего процесса в капельном холодильнике-излучателе в условиях микрогравитации глубокого вакуума // Полет. – 2001. – № 4.
3. Н е ч а е в В. Ю., Т а б э р э А. Д., И в а н о в а Н. Н. Отчет о проведении конструкторско-доводочных испытаний ПДУ МКХИ № 01 // Препринт ФГУП “Центр Келдыша” 2009 г. Рег. № 8-20/88.
4. Н е ч а е в В. Ю., Н е ч а е в М. В., Т а б э р э А. Д. Отчет о ресурсных испытаниях ПДУ МКХИ № 01 // Препринт ФГУП “Центр Келдыша” 2010 г. Рег. № 8-20/6.

Статья поступила в редакцию 9.02.2010

Михаил Владимирович Нечаев родился в 1976 г., окончил МГТУ “Станкин” в 1999 г. Ведущий инженер ФГУП “Центр Келдыша”. Специализируется в области космической техники.

M.V. Nechaev (b. 1976) graduated from the Moscow State Technical University “Stankin” in 1999. Leading engineer of the Federal State Unitary Enterprise “Keldysh Center”. Specializes in the field of space technology.

Владимир Юрьевич Нечаев родился в 1953 г., окончил Московский электротехнический институт связи (МЭИС) в 1975 г. Начальник электротехнического сектора ФГУП “Центр Келдыша”. Автор пяти научных работ в области космической техники.

V.Yu. Nechaev (b. 1953) graduated from the Moscow Electrotechnical Institute of Communication (MEIS) in 1975. Head of electrotechnical sector of the Federal State Unitary Enterprise “Keldysh Center”. Author of 5 publications in the field of space technology.