

УДК 383
EDN: UCJTON

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp

Стенд для проведения ресурсных испытаний в форсированных режимах фотомодуля из состава фотоприемного устройства космического базирования© Д. Г. Соловьев¹, В. В. Буравцова¹, А. А. Красавин¹, К. Д. Кочнов^{1,*}, В. Б. Куликов²¹ АО «НПО «Орион», Москва, 111538 Россия

* E-mail: kir.nekko@gmail.com

² АО «ЦНИИ «Циклон», Москва, 107497 Россия

Статья поступила в редакцию 25.08.2025; после доработки 22.09.2025; принята к публикации 20.10.2025

Шифр научной специальности: 2.2.6

Спроектирован стенд для проведения ресурсных испытаний в форсированных режимах фотомодуля (ФМ) инфракрасного диапазона (ИК) с режимом временной задержки и накопления (ВЗН) из состава фотоприемного устройства космического базирования. Особенностью разработки является возможность получения экспериментальных данных об отказах, возникающих при длительном функционировании ФМ, которые оказывают влияние на пороговые характеристики устройства. Стенд позволяет подтвердить достаточность мер для обеспечения долговечности и безотказности работы фотомодуля, а также оценить надежность всей аппаратуры применения в целом. Апробация стенда будет проведена посредством запланированных испытаний.

Ключевые слова: стенд; фотоприемное устройство; фотомодуль; надежность.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-5-94-99

Введение

При изготовлении аппаратуры дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), применение которой подразумевается в космическом пространстве, на этапе разработки предусматривается проведение расчетов и оценки надежности, особенно в случаях сверхдлительной эксплуатации порядка 10–15 лет под постоянным воздействием ионизирующего излучения космического пространства [1]. На основании расчетов и оценок надежности, а также требований к аппаратуре ДЗЗ определяются также схемотехнические и конструкционные решения по изготовлению.

Ключевым элементом аппаратуры ДЗЗ являются фотоприемные устройства (ФПУ), работающие в инфракрасном (ИК) диапазоне спектра. Наиболее перспективными типами

ИК ФПУ с точки зрения надёжности и радиационной стойкости считаются ИК ФПУ сканирующего типа с режимом временной задержки и накопления заряда (ВЗН), используемые в качестве фотоприёмника фотомодули с цифровыми выходами (ФМ-Д). Надёжность и радиационная стойкость таких ИК ФПУ обусловлена тем, что аналого-цифровое преобразование сигнала осуществляется внутри большой интегральной схемы (БИС) считывания в составе ФМ-Д [2].

В составе рассматриваемого фотоприемного устройства была определена самая критичная составная часть – ФМ-Д, матрица фоточувствительных элементов (ФЧЭ) которого представлена фотодиодами на основе HgCdTe (кадмий-ртуть-теллур) [3]. В указанной работе был проведён расчет надежности фотомодуля.

Описание объекта измерения

Фотомодуль состоит из коварового основания, на которое установлен мультиплексор с 1024 ВЗН-каналами со встроенными в каждый канал 14-разрядными аналого-цифровыми преобразователями с присоединенными ФЧЭ формата (1024×10), топологически представляющих собой четыре субматрицы [4, 5]. Материал фоточувствительных элементов кадмий-ртуть-теллур. Каждый фотомодуль формирует на своих выходах цифровые последовательности, представляющие собой результаты аналого-цифрового преобразования сигналов с 1024 ВЗН-каналов мультиплексора.

Методика испытаний

Ресурсные испытания проводят с целью отработки и подтверждения надежности аппаратуры, выявления и устранения потенциальных схемо-конструктивных дефектов, проявляющихся при длительном функционировании аппаратуры за сроки службы (назначенный ресурс) по техническому заданию, и оценки (прогнозирования) характеристик надежности по результатам ресурсных испытаний. Для сокращения сроков проведения ресурсных аппаратуры с длительными сроками активного существования космического аппарата (3 года и более) допускается проводить испытания в форсированных режимах.

Форсированные ресурсные испытания содержат четыре процедуры:

– Процедура 1 – термоциклирование, 1120 часов, состоит из 70 термоциклов;

– Процедура 2 – испытание на воздействие пониженной рабочей температуры минус 110 °С, 150 часов, состоит из 3 циклов;

– Процедура 3 – длительная работа фотомодуля при рабочей температуре минус (103±2) °С в режиме питания «Включено-Выключено», 2676 часов, состоит из 2676 циклов «фотомодуль включен»-«фотомодуль выключен»;

– Процедура 4 – испытание на воздействие повышенной температуры + 35 °С, 604 часа, состоит из 2 циклов.

Стенд для проведения испытаний

Для проведения ресурсных испытаний в форсированных режимах фотомодуля из состава фотоприемного устройства космического базирования разработан стенд, позволяющий оценить долговечность и безотказность работы фотомодуля. В состав стенда (см. рисунок) входят:

– криостат с системой охлаждения жидким азотом, обеспечивающий охлаждение внутренней конструкции, к которой крепится измерительная оснастка фотомодуля;

– блок управления и питания в составе:

1) блок управления, обеспечивающий:

– контроль величин установленных значений питающих напряжений;

– установку режимов работы фотомодуля;

– вывод в аналоговой форме, для осциллографического контроля, сигналов, представляющих собой последовательности выборок 512-ти четных или 512-ти нечетных каналов с выходов OUT1, OUT2 фотомодуля;

– вывод в аналоговой форме, для осциллографического контроля, сигналы, представляющие собой последовательности выборок с одного из 512-ти четных или 512-ти нечетных каналов фотомодуля;

– установку режима синхронизации сканера внешней засветки и мультиплексора;

– измерение суммарного тока потребления фотомодуля;

– контроль импульсов управления фотомодуля;

– организацию взаимодействия с управляющей ПЭВМ.

2) блок связи, обеспечивающий связь между фотомодулем в измерительной оснастке и блоком управления и контроль работоспособности, чем достигается выполнение следующих проверок:

– проверка диапазонов изменения напряжений питания и управления фотомодуля;

– проверка канала измерения суммарного тока потребления фотомодуля;

– проверка временных диаграмм импульсов управления фотомодулем;

– проверка канала вывода аналоговой информации для осциллографического контроля;

– проверка целостности цепей датчиков температуры;

– проверка исправности USB-канала передачи информации из блока управления и питания в ПЭВМ.

3) кабель, соединяющий блок управления с блоком связи;

4) USB-кабель, соединяющий блок управления с ПЭВМ;

5) сетевой кабель.

– термодат-17Е6 TD13303625 (предназначен для измерения и регулирования температуры по нескольким каналам одновременно);

– лабораторный источник питания MATRIX VPS-3005L-3 (используется для нагревания элементов (резисторов) и поддержания температуры в измерительной оснастке и блоке связи);

– лабораторный источник питания АКТАКОМ АТН-3335 (используется для нагревания элементов (резисторов) и поддержания температуры в блоке связи);

– измеритель температуры многоканальный прецизионный МИТ 8.03 (предназначен для прецизионных измерений температуры и измерения температурных полей);

– вольтметр универсальный АКИП В7-78/1 (позволяет с высокой точностью определить силу переменного и постоянного тока, сопротивление, напряжение, частоту и температуру при подключении внешних датчиков);

– осциллограф Tektronix MDO4054B-3 (обеспечивает регистрацию аналоговых, цифровых и радиочастотных сигналов с корреляцией по времени, позволяет исследовать сигнал и осуществлять измерения в частотной и временной областях одновременно);

– насос турбовакуумный Agilent TPS-mini (создает разреженное пространство внутри криостата);

– вакуумметр электронный TELEVAK СС-10 (предназначен для точного измерения абсолютного давления);

– модуль абсолютно черного тела М305 (является источником излучения);

– модулятор с блоком управления New Focus, модель 3502 (модулирует поток излучения от абсолютно черного тела);

– ПЭВМ;

– программное обеспечение, предназначенное для обработки информации, идущей от фотомодуля, и вывода информационных кадров вместе с результатами расчёта характеристик фотомодуля на экран монитора ПЭВМ.

ФМ-Д устанавливается в измерительную оснастку, которая вместе с блоком связи размещаются в охлаждаемой зоне криостата. Затем внутри криостата с помощью высоковакуумного насоса снижается давление до сверхвысокого вакуума (меньше 10^{-5} Па), уровень давления контролируется соответствующим датчиком внутри криостата. Затем ФМ-Д охлаждается с помощью жидкого азота до рабочей температуры, контроль которой выполняется соответствующим датчиком внутри криостата. К примеру, рабочая температура составляет порядка 80 К для фотомодуля, фоточувствительные элементы которого представляют собой фотодиоды, изготовленные из CdHgTe длинноволнового инфракрасного диапазона спектра. Затем выполняется питание и первичная настройка ФМ-Д посредством блока управления и питания [6].

Блок связи снабжен термодатчиком и резисторами-нагревателями (НГ2 и НГ3), предназначенными для поддержания положительной температуры на блоке связи.

Криостат имеет две зоны:

– откачиваемую с помощью насоса герметизированную зону, с установленными в ней измерительной оснасткой с фотомодулем и блоком связи (охлаждаемая зона);

– зона для заливки жидкого азота (камера для азота).

Оснастка с фотомодулем в охлаждаемой зоне устанавливается на медную пластину, которая прикрепляется к теплопроводу, идущему в камеру для азота. Для регулировки температуры на фотомодуле на пластину устанавливаются резистор-нагреватель (НГ1) и датчик температуры (Т1), в качестве которого используется чувствительный элемент платиновый ЧЭПТ-50П. Изменяя ток через резистор-нагреватель (НГ1), устанавливаются заданные температуры охлаждения или нагрева фотомодуля. Блок связи не имеет теплового контакта с медной пластиной. Тепловой поток от блока связи к фотомодулю идет по соединяющему их кабелю. Для поддержания на блоке связи положительной температуры при всех видах испытаний фотомодуля блок связи снабжен двумя резисторами-нагревателями (НГ2 и НГ3) и датчиком температуры LN222Pt100, с помощью которого выводится температура с блока связи (Т4). Дополнительно в измерительную оснастку с фотомодулем

встроены два датчика температуры LN222Pt100, формирующие температуры T2 и T3. Нагрев резистора-нагревателя (НГ1) осуществляется от лабораторного источника (И1). Управляющие и питающие напряжения на фотомодуль, а также съём с него информационных сигналов осуществляется с помощью блока связи и блока управления из состава блока управления и питания. С помощью вольтметра и осциллографа, подключенных к блоку управления, осуществляется контроль группового тока потребления и сигналов на выходе фотомодуля. В блоке управления информационные сигналы с выходов фотомодуля преобразовываются в единый цифровой поток, который по USB – каналу поступает для обработки и индикации в ПЭВМ. Для фотомодуля внутри криостата должно поддерживаться пониженное давление, ($10^{-6} \div 10^{-4}$ мм. рт. ст), создаваемое с помощью электровакуумного насоса «Agilent TPS-mini». Давление внутри

криостата должно контролироваться с помощью вакуумметра TELEVAC CC-10. С помощью нагревательных элементов (резисторов) НКЗ, НГ3 и двух-канального источника АКТАКОМ АТН-3335 температура блока связи (Т4) должна поддерживаться в диапазоне ($10 \div 30$) °С. Контроль рабочей температуры фотомодуля осуществляется с помощью трех датчиков температуры:

- датчика T1, установленного на пластине с оснасткой;
- датчиков T2, T3 типа LN222Pt100, установленных внутри оснастки.

Термодатчики, формирующие данные температур T2, ..., T4 подключаются к четырехканальному регулятору (измерителю температур) термодату-17Е6. Значения T2, ..., T4 выводятся на индикаторное табло измерителя и, одновременно, передаются в ПЭВМ по интерфейсному каналу, сформированному с помощью преобразователя RS-232/USB типа МОХА.

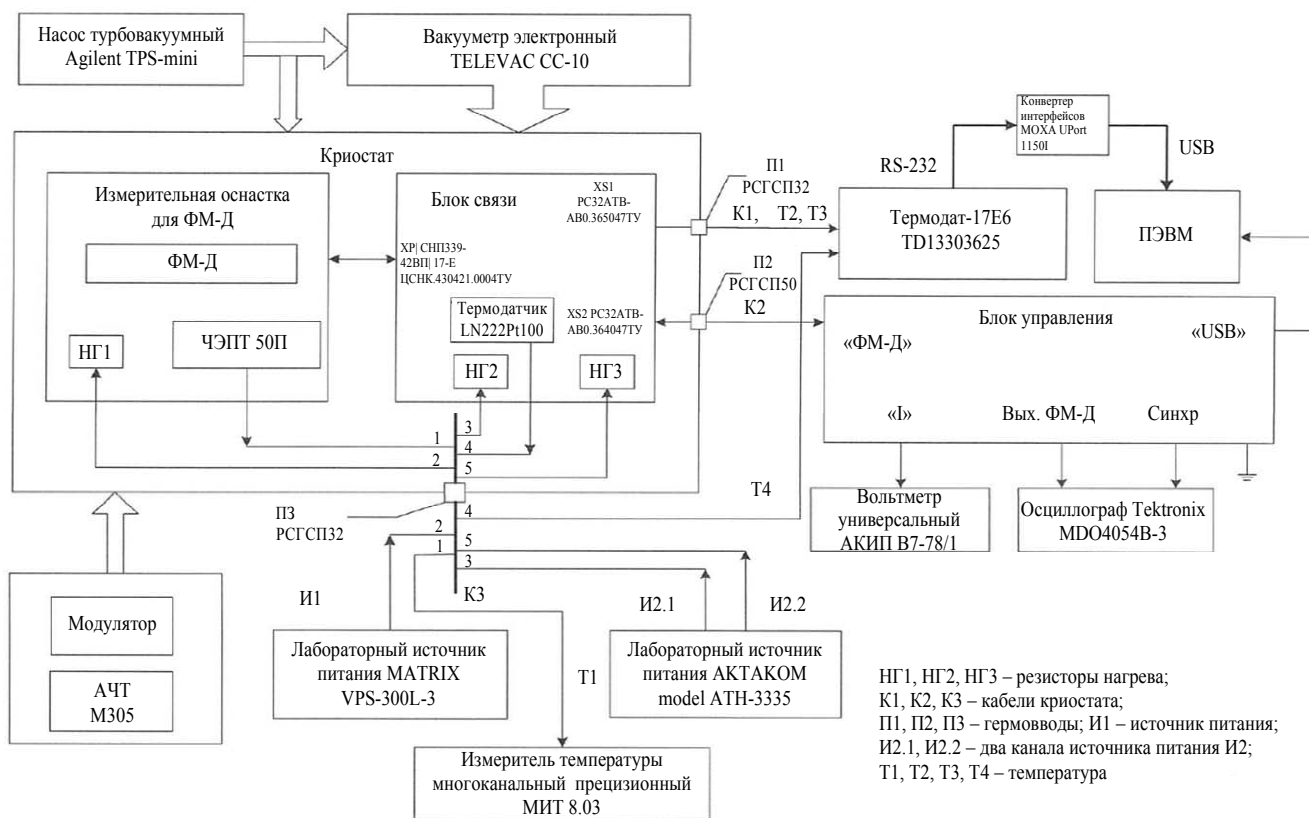


Рисунок. Структурная схема стенда

Заключение

Стенд для проведения ресурсных испытаний в форсированных режимах фотомодуля из состава фотоприемного устройства косми-

ческого базирования позволяет выявить и устранить дефекты и отказы при длительном функционировании фотомодуля, осуществить контроль и подтверждение достаточных мер по обеспечению заданной вероятности без-

отказной работы и назначенного ресурса, реализуемого в форсированном режиме по воздействию факторам, подтвердить неразрушающий характер электротренировки фотомодуля. Для подтверждения оценки надежности, проведенной в статье [3] на данном стенде будут проведены ресурсные испытания в форсированных режимах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гапонов О. В., Сокольский М. А., Романов Е. К. / Успехи прикладной физики. 2024. Т. 12. № 6. С. 501–530.
2. Козлов К. В., Патрашин А. И., Бурлаков И. Д., Бычковский Я. С., Дразников Б. Н., Кузнецов П. А. / Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 1. С. 63–78.

3. Романов Е. К., Бурлаков В. И., Чеботаренко Д. Д., Юдовская А. Д. / Прикладная физика. 2025. № 3. С. 25–33.

4. Ларионов Н. А., Якимов Ю. А., Моцев И. С., Храпунов М. Л., Стрельцов В. А., Кузнецов П. А. / Тезисы докладов XXVI международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – Москва, 2022. С. 216–218.

5. Якимов Ю. А., Ларионов Н. А., Кузнецов А. Н. / Тезисы докладов X научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Фотосенсорика: новые материалы, технологии, приборы, производство». – Москва, 2021. С. 45–48.

6. Гапонов О. В., Бурлаков В. И., Власова О. И. Способ деселекции последовательностей избыточно шумящих элементов в каналах инфракрасного фоточувствительного модуля с режимом временной задержки и накопления. Патент на изобретение № 2805779 (РФ). 2023.

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp

The stand for conducting resource tests in forced modes of a photosensitive element from a space-based photodetector device

D. G. Solovyov¹, V. V. Buravtsova¹, A. A. Krasavin¹, K. D. Kochnov^{1,*}
and V. B. Kulikov²

¹RD&P Center ORION, JSC, Moscow, 111538 Russia

* E-mail: kir.nekko@gmail.com

²Joint Stock Company “Central Scientific-Research Institute “Cyclone”, Moscow, 107497 Russia

Received 25.08.2025; revised 22.09.2025; accepted 20.10.2025

A stand has been designed for carrying out resource tests in forced modes of a photomodule (FM) of the infrared range (IR) with a temporary hold and accumulation mode (VZN) from a space-based photodetector. A feature of the development is the possibility of obtaining experimental data on failures that occur during prolonged operation of the FM, which affect the threshold characteristics of the device. The stand allows us to confirm the sufficiency of measures to ensure the durability and reliability of the photomodule, as well as to assess the reliability of all equipment used in the whole. The stand will be tested through scheduled tests.

Keywords: stand; photodetector device; photosensitive element.

REFERENCES

1. Gaponov O. V., Sokolsky M. A. and Romanov E. K., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **12** (6), 501–530 (2024) [in Russian].
2. Kozlov K. V., Patrashin A. I., Burlakov I. D., Bychkovsky Ya. S., Drazhnikov B. N. and Kuznetsov P. A. (Advances in Applied Physics) **5** (1), 63–78 (2017) [in Russian].
3. Romanov E. K., Burlakov V. I., Chebotarenko D. D. and Yudovskaya A. D. Applied Physics, № 3, 25–33 (2025) [in Russian].
4. Larionov N. A., Yakimov Yu. A., Moshev I. S., Khrapunov M. L., Streltsov V. A. and Kuznetsov P. A. Abstracts of the XXVI international scientific and technical conference on Photoelectronics and night vision devices. Moscow, 2022, pp. 216–218 [in Russian].

5. Yakimov Yu. A., Larionov N. A. and Kuznetsov A. N. / Proc. X scientific and practical conference of young scientists and specialists "Fotosensorika: novye materialy, tekhnologii, pribory, proizvodstvo". Moscow, 2021, pp. 45–48 [in Russian].
6. Gaponov O. V., Burlakov V. I. and Vlasova O. I. Method for deselection of sequences of excessively noisy elements in the channels of an infrared photosensitive module with a time delay and accumulation mode. Patent for invention № 2805779 (RF). 2023.

Об авторах

Соловьев Дмитрий Георгиевич, начальник отдела, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: sol.discovery@yandex.ru

Буравцова Вера Валерьевна, главный специалист, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: vera_bur@rambler.ru

Красавин Александр Александрович, ведущий инженер, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: meeting62@inbox.ru

Кочнов Кирилл Дмитриевич, инженер, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: kir.nekko@gmail.com

Куликов Владимир Борисович, д.т.н., начальник отдела, АО «ЦНИИ «Циклон» (107497, Россия, Москва, Щелковское ш., 77). E-mail: v.kulikov@cyclone-jsc.ru SPIN-код: 2840-0055, AuthorID: 1017695