

УДК 621.383
EDN: DHPVJB

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

Анализ надежности фотомодуля инфракрасного диапазона с режимом временной задержки и накопления с цифровыми выходами

© Е. К. Романов*, В. И. Бурлаков, Д. Д. Чеботаренко, А. Д. Юдовская

АО «НПО «Орион», Москва, 111538 Россия
* E-mail: robogear0@gmail.com

Статья поступила в редакцию 25.03.2025; после доработки 9.04.2025; принята к публикации 2.06.2025
Шифр научной специальности: 2.2.6

Рассмотрен принцип работы и надежность фотомодулей (ФМ) формата 1024×10 элементов на основе кадмий-ртуть-теллура (КРТ), чувствительных в инфракрасном (ИК) диапазоне, предназначенных для построения многорядного крупноформатного фотоприёмного устройства (ФПУ), разработанного для бортовой аппаратуры сканирующего типа, предназначенной для гидрометеорологических исследований и другого гражданского применения в части космического мониторинга Земли. Построена структурная схема надежности ФМ, проведен расчет надежности ФМ, подтверждающий достаточное время безотказной работы ФМ на протяжении более 10 лет на геостационарной орбите (ГСО).

Ключевые слова: фотомодуль; инфракрасный диапазон; режим временной задержки и накопления; надежность; фотоприёмные устройства.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-3-25-33

Введение

ИК ФПУ с режимом ВЗН активно используются в составе космических систем мониторинга (КСМ) Земли. Ключевым элементом таких ИК ФПУ являются ИК ФМ с режимом ВЗН, в каналах которых имеются фоточувствительные элементы (ФЧЭ), формирующие фоточувствительный слой (ФЧС) ФПУ. ФЧЭ определяют фотоэлектрические характеристики (ФЭХ) каналов ИК ФМ, в том числе и пороговые, такие как шум, SNR , D^* и другие. ФЭХ каналов фотомодуля определяют ФЭХ фотоприёмного устройства.

Система КСМ длительное время эксплуатируется на орбите Земли под постоянным воздействием ионизирующего излучения космического пространства (ИИКП). Последнее провоцирует деградацию полупроводниковых материалов ФЧЭ и больших интегральных схем (БИС) считывания. В процессе создания современных КСМ Земли было спроектирова-

но два основных вида ФМ: ФМ с аналоговыми выходами и ФМ с цифровыми выходами [3]. Для современных ФПУ перспективнее использование ФМ с цифровыми выходами, но для подтверждения возможности их применения остается важным вопрос надежности подобных ФМ.

Актуальность темы

Актуальность работы обусловлена следующими тремя основными причинами:

- 1) появление принципиально нового ФМ с цифровыми выходами;
- 2) работы, проведенные ранее по анализу надежности матричных фотоприемников, имеют общий вид и для использования в расчете надежности ИК ФПУ космического базирования недостаточны [1];
- 3) определение достигнутого уровня показателей надежности современных ФМ.

Особенности расчета надежности

Расчет надежности ФМ-Д предусматривает идентификацию аппаратуры, подлежащей расчету, выбор метода расчета с учетом особенностей аппаратуры и исходными данными, составление расчетных моделей для каждого рассчитываемого показателя надежности, а также оценка принципиальной возможности обеспечения требований по надежности. Дополнительным параметром, влияющим на эксплуатацию ФМ-Д является рабочая температура, равная минус 100 °С. Ее влияние также необходимо учесть, используя соответствующий коэффициент.

За исходные данные примем вероятность безотказной работы ФМ-Д на геостационарной орбите в течение 11 лет должна быть не менее 0,99.

Расчет надежности основывается на следующих допущениях:

- каждый элемент ФМ-Д может находиться в одном из двух состояний – работоспособность или отказ;
- интенсивности отказов ЭРИ и их соединений в условиях эксплуатации λ_3 и хранения $\lambda_{хр}$ не зависят от времени, справедлив экспоненциальный закон распределения отказов;
- отказы ЭРИ и их соединений являются событиями случайными и независимыми;
- отказ любого не резервируемого ЭРИ или их соединений приводит к отказу ФМ-Д;
- доля конструкционных отказов пренебрежимо мала в сравнении с общей долей отказов ЭРИ и их интенсивность в условиях эксплуатации и хранения можно считать равной нулю;
- закон распределения времени между отказами элементов экспоненциальный;
- при экспоненциальном законе распределения времени между отказами интенсивность отказов является величиной постоянной;
- при расчете учитываются только внезапные отказы;
- отказы, связанные с процессами износа и старения, в расчете не рассматриваются;

– нагрузки, действующие на рассматриваемом этапе, не влияют на интенсивность отказов на последующих этапах;

– при расчетах надежности структур, содержащих средства программируемой автоматки и/или вычислительной техники, предполагается безошибочность системного и прикладного программного обеспечения;

– соединения компонентов последовательное.

Структурное представление ФМ-Д

В целях упрощения процедуры расчета и определения понятия отказа составных частей и аппаратуры в целом используется структурная схема надежности изделия и составных частей. Структурная схема надежности (ССН) ФМ-Д приведена на рисунке 1.

Отказом ФМ-Д считается выход из строя канала передачи информации (КПИ), а также отказ более двадцати каналов ВЗН или отказа трех и более соседних каналов ВЗН.

Критериями отказа ФМ-Д являются следующие требования:

- ФМ-Д становится неработоспособным, если число неработоспособных ФЧЭ в нем $N_{деф} \geq 2 \%$;
- канал ФМ-Д становится неработоспособным, если величина его ПЧ возрастает до $P_{пор_кан} \geq 2 \times P_{порТЗ}$.

В состав фоточувствительного модуля формата 1024×10 входит матрица фоточувствительных элементов из КРТ, состыкованная с кремниевой большой интегральной схемой (БИС) считывания. Структура БИС показана на рисунке 2. В её состав входит матрица входных ячеек размером 60×45 мкм, которая имеет топологию из четырёх субматриц, сдвинутых на 15 мкм поперек направления сканирования, далее сигнал коммутируется в блок ВЗН суммирования, после которого следует блок «1024 каналов дельта-сигма АЦП с разрешением 14 бит». После преобразования сигнал с каждого канала записывается в блок статической памяти и далее последовательно выводится через 2 выхода.

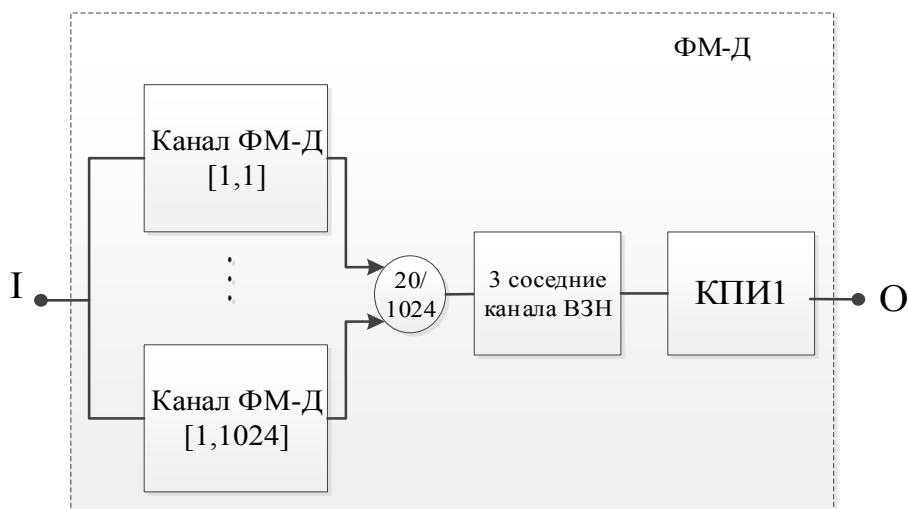


Рис. 1. Структурная схема надежности ФМ-Д

Структура одного канала с электронным трактом мультиплексора приведена на рисунке 3. В него входят 10 входных ячеек, расположенных вдоль направления сканирования, с электронным трактом мультиплексора и схем ВЗН преобразования и считывания (в соответствии с разделом 3 технического задания).

Структура АЦП с памятью для вывода результата предыдущего преобразования в момент пока производится текущее, приведена на рисунке 4.

Формулы расчетов эксплуатационных интенсивностей отказов компонентов и вспомогательные коэффициенты получены из справочника [4]. Справочник содержит сведения, предназначенные для использования при расчетах показателей надёжности радиоэлектронной аппаратуры военного назначения в соответствии с требованиями основополагающих нормативных документов, а также формулы, коэффициенты и характеристики элементов, применяемые в расчетах.

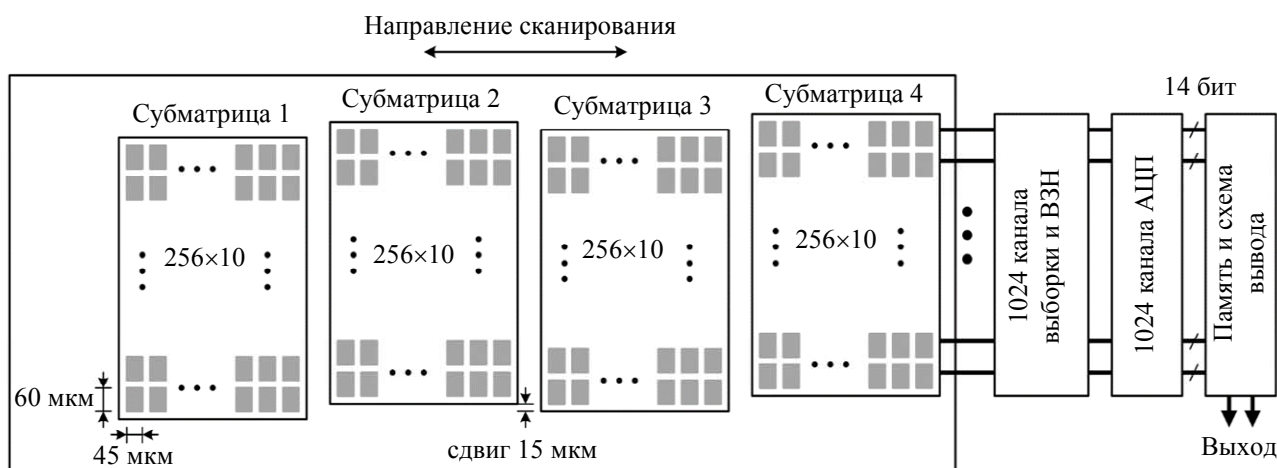


Рис. 2. Блок-схема БИС считывания

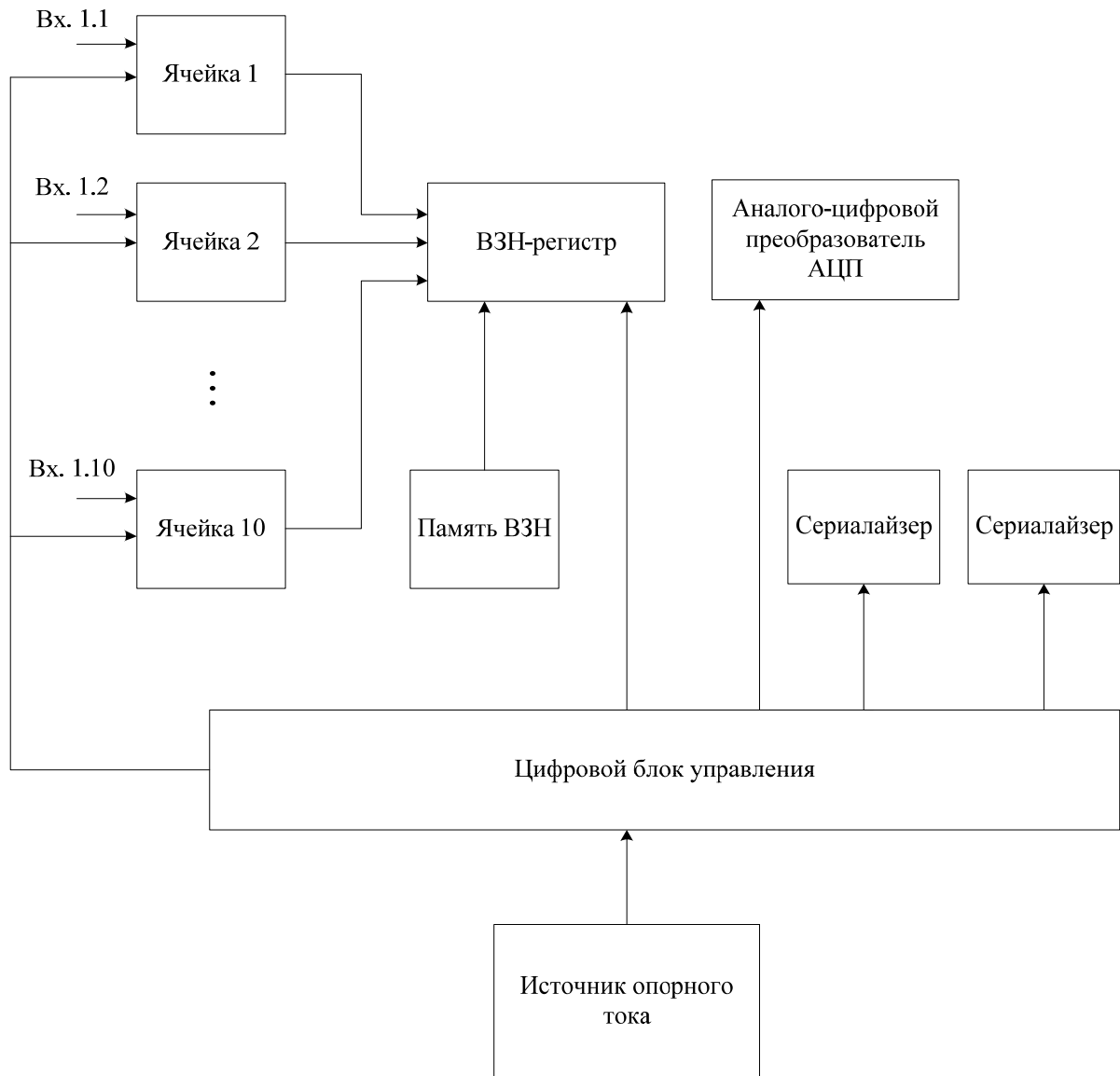


Рис. 3. Структурная схема канала с электронным трактом мультиплексора

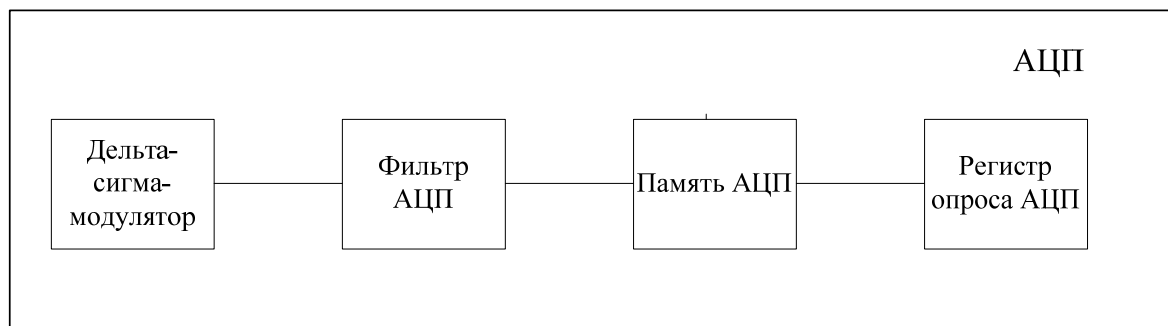


Рис. 4. Структура АЦП

Расчет надежности

Вероятность безотказной работы (ВБР) матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ) из материала $Cd_xHg_{x-1}Te$ (КРТ) 1:

$$P_{крт0}(t) = e^{-\lambda_{э1крт} \cdot t \cdot Ka}, \tag{1}$$

где $\lambda_{э1крт}$ – эксплуатационная интенсивность отказов фотоприемников из КРТ; по результатам испытаний на безотказность матричного

фотоприемного устройства (МФПУ) ФУК10М формата 256×256 № 832/05-08, изготовленного по ОКР «Сеанс» в 2007 г.; $\lambda_{\text{бкрт}}$ – базовая интенсивность отказов, равная $3,8 \times 10^{-6}$ (1/ч); t – время работы, равное 113880 ч; K_a – коэффициент качества производства аппаратуры, определенное в справочнике [4]. K_a учитывает уровень требований к разработке и изготовлению аппаратуры. Коэффициент K_a отражает среднестатистическую разницу в интенсивности отказов ЭРИ в аппаратуре и равен 0,2.

Для заданных условий применения и эксплуатации фотоприемников $K_{\text{пркрт}} = 1,0$, $K_{\text{экрт}} = 1$, группа 5.3 (см. рис. 5) (2):

$$\lambda_{\text{элкрт}} = \lambda_{\text{бкрт}} \times K_{\text{экрт}} \times K_{\text{пркрт}} + \lambda_{\text{ячейка}} + \lambda_{\text{эллипчип}} + \lambda_{\text{эсварка}} = 3,60588674 \times 10^{-6} [1/\text{ч}], \quad (2)$$

где $K_{\text{экрт}}$ – коэффициент эксплуатации КРТ, равный 0,9997193785; $K_{\text{пркрт}}$ – коэффициент приемки КРТ, равный 0,9992362709; $\lambda_{\text{ячейка}}$ – эксплуатационная интенсивность отказов ячейки, равная 0,999844089; $\lambda_{\text{эллипчип}}$ – эксплуатационная интенсивность отказов метода корпусирования, равный 0,99987527; $\lambda_{\text{эсварка}}$ –

эксплуатационная интенсивность отказов сварки, равная 0,99987527.

С учетом формулы (2), получаем $P_{\text{крт0}}$ по формуле (3):

$$P_{\text{крт0}}(113880) = 0,9211543415269. \quad (3)$$

Канал ВЗН включает десять ФЧЭ. Работоспособность сохраняется при работе в канале трех ФЧЭ. Согласно формуле Бернулли ВБР канала ВЗН за время $t = 113880$ ч при отказе семи и более ФЧЭ из 10 ФЧЭ (4):

$$P_{\text{крт1}} = \sum_{j=0}^7 \frac{10!}{j!(10-j)!} \cdot P_{\text{крт0}}^{10-j} \cdot (1 - P_{\text{крт0}})^j = 0,9999999418765. \quad (4)$$

На рисунке 5 приведена ССН канала ФМ-Д.

Flip-chip – это метод корпусирования интегральной схемы, при котором механическое и электрическое поэлементное соединение каждой пары МФЧЭ и БИС осуществляется с помощью стыковки индиевых столбиков.

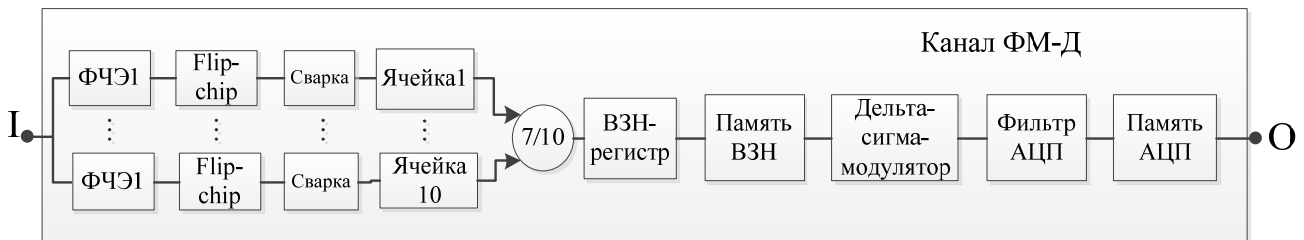


Рис. 5. Структурная схема надежности канала ФМ-Д

К отказу ФЧЭ приводит потеря контакта индиевых столбиков. Отказы ФЧЭ, в свою очередь, приводят к потере сигнала и как следствие к отказу канала ВЗН. Соединение внешних выводов фоточувствительного модуля с коммутационной платой осуществляется с помощью сварки. Механическое и электрическое поэлементное соединение каждой пары МФЧЭ и БИС осуществляется с помощью

стыковки индиевых столбиков. Соединение контактных площадок БИС с токоведущими дорожками выходных контактов МФЧЭ осуществляется с помощью сварки.

Для расчета надежности БИС считывания используются данные по элементам, из которых состоит БИС считывания. Исходные данные по элементам основных узлов БИС считывания приведены в таблице 1.

Таблица 1

Количество элементов в основных узлах БИС считывания

Наименование элемента	nmos	pmos	nmos+pmos
Ячейка	32	16	48
ВЗН (1 канал)	107	24	131
Дельта-сигма модулятор (1 канал)	89	86	175
Фильтр АЦП (1 канал)	542	542	1084
Регистр опроса АЦП (1 канал)	45	45	90
Память ВЗН (1 канал)	184	184	368
Память АЦП (1 канал)	320	320	640
Сериалайзер (2 канала)	1410	1410	2820
Цифровой блок управления	13750	13750	27500
Источник опорного тока	297	383	680

ВБР БИС считывания рассчитывается по формуле (5):

$$P_{\text{крг2}} = P_{\text{крг1}} \times P_{\text{взрег}} \times P_{\text{дельтасигма}} \times P_{\text{фильтраци}} \times P_{\text{памятьвзн}} \times P_{\text{памятьаци}} \quad (5)$$

С учетом пересчета на минус 100 °С ВБР БИС считывания и с учетом K_a (6):

$$P_{\text{крг2}} = 0,9990494517125. \quad (6)$$

Базовая интенсивность λ_b по основным узлам БИС считывания, полученная при расчете с помощью программы АСРН исходя из данных таблицы 1.

ФМ-Д включает 1024 ВЗН-канала, не допускается отказ более 20 каналов ВЗН и при этом отказа трех соседних каналов ВЗН. ВБР каналов ФМ-Д рассчитывается по формуле (7):

$$P_{\text{крг3}} = \sum_{l=0}^n P(B_l) \times P(A/B_l), \quad (7)$$

где B_l – событие, заключающееся в том, что в модуле из n каналов ВЗН число отказавших каналов ВЗН равно l ($l = 0, 1, 2, \dots, n$); $P(B_l)$ – вероятность события B_l ; $P(A/B_l)$ – условная вероятность того, что ФМ-Д работоспособен, когда число его отказавших каналов ВЗН равно одному (в нашем случае 20).

Вероятность события B_l описывается выражением (8):

$$P(B_l) = C_n^l \times Q_{\text{крг3}}^l \times P_{\text{крг2}}^{1024-l}. \quad (8)$$

Условная вероятность того, что модуль работоспособен, когда число его отказавших каналов ВЗН равно одному, находится как отношение числа исходов, благоприятствующих событию A , равному $n(l)$, к общему числу исходов при событии $B(l)$, равному C_n^l .

Количество комбинаций $n(l)$, благоприятствующих работоспособному состоянию модуля, при числе отказавших каналов равном одному, рассчитанное по индукции (9):

$$P(B_l) = C_{n+2-1}^l \text{ для } l \leq L \leq \left[\frac{n+2}{3} \right], \quad (9)$$

и $n(l) = 0$ для $l > L$, поскольку элементарные исходы, благоприятствующие событию A , отсутствуют.

ВБР каналов ВЗН (10):

$$P_{\text{крг3}} = \sum_{l=0}^{\left[\frac{n+2}{3} \right]} C_{n+2-1}^l \times P_{\text{крг2}}^{n+2-1} \times Q_{\text{крг2}}^l. \quad (10)$$

ВБР каналов ВЗН ФМ-Д с отказами не более 20 каналов ВЗН, из которых не должно быть три подряд расположенных (11):

$$P_{\text{крг3}} = 0,9981187355381. \quad (11)$$

Далее необходимо найти ВБР функционального устройства, которое имитирует КПИ. В состав канала входят два сериалайзера, цифровой блок управления, источник опорного тока, регистр опроса АЦП. Компо-

ненты КПИ соединены последовательно (см. рис. 6), что означает, если один из компонентов выходит из строя, отказывает фотомодуль. ВБР КПИ с учетом $P_{крт3}$ рассчитывается по формуле (12).

На рисунке 6 приведена ССН канала передачи информации (КПИ).

Согласно ССН за $t = 113880$ с учетом коэффициента K_a и пересчетом на минус 100 °С ВБР (12):

$$P_{крт4} = P_{СЕРИАЛ} \times P_{СЕРИАЛ} \times P_{ЦИФРЬЛУПР} \times P_{ИСТОПОРТОКА} \times P_{РЕГОПРАЦП} \times P_{крт3} \tag{12}$$

где $P_{СЕРИАЛ} = 0,9997193785$; $P_{ЦИФРЬЛУПР} = 0,9992362709$; $P_{ИСТОПОРТОКА} = 0,999844089$; $P_{РЕГОПРАЦП} = 0,99987527$.

В таблице 2 отдельно приведены промежуточные значения, использовавшиеся в расчете.

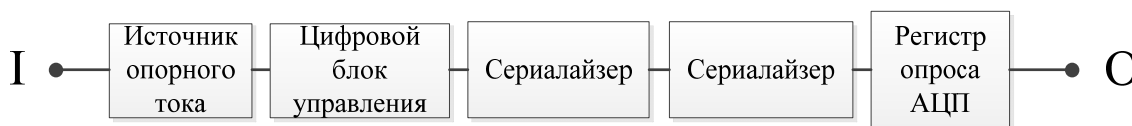


Рис. 6. Структурная схема надежности КПИ

Таблица 2

Промежуточные значения ВБР составных компонентов ФМ-Д

Характеристика	Обозначение	Значение ВБР
ВБР фотоэлемента на основе КРТ	$P_{крт0}$	0,9211543415269
ВБР канала ВЗН при отказе не более 7 ФЧЭ	$P_{крт1}$	0,9999999418765
БИС считывания		
ВБР ВЗН-регистра	$P_{взрег}$	0,9997975735809
ВБР дельта сигма модулятора	$P_{дельтасигмамод}$	0,9998440894814
ВБР фильтра АЦП	$P_{фильтрацп}$	0,9997193775666
ВБР памяти ВЗН	$P_{памятьвзн}$	0,9998440894814
ВБР памяти АЦП	$P_{памятьацп}$	0,9998440894814
ВБР БИС считывания с учетом $P_{крт1}$	$P_{крт2}$	0,9990494517125
ВБР ФМ-Д с отказами не более 20 каналов, из которых не должно быть 3 подряд расположенных		
ВБР при не более 20 отказавших каналов ВЗН и при этом не более 3 расположенных рядом	$P_{крт3}$	0,9981187355381
Канал передачи информации		
ВБР сериалайзера	$P_{СЕРИАЛ}$	0,9997193785
ВБР сериалайзера	$P_{СЕРИАЛ}$	0,9997193785
ВБР цифрового блока управления	$P_{ЦИФРЬЛУПР}$	0,99923627
ВБР источника опорного тока	$P_{ИСТОПОРТОКА}$	0,999844089
ВБР регистра опроса АЦП	$P_{РЕГОПРАЦП}$	0,9998752696

Таким образом, на основе промежуточных вычислений, приведенных в таблице 2, получено значение ВБР ФМ-Д $P_{крт4}$ (13):

$$P_{крт4} = 0,9965170398001. \tag{13}$$

Заключение

В настоящей работе был проведен анализ структуры современных ИК ФМ с цифровыми выходами для ИК ФПУ, используемых

для КСМ Земли, составлена структурная схема надежности для ФМ с цифровыми выходами, на основе которой был проведен расчет надежности ФМ для подтверждения возможности его эксплуатации на ГСО в течении длительного периода.

В ходе анализа структуры ИК ФМ была разработана структурная схема надежности канала ФМ. Структурная схема надёжности канала ФМ позволила определить элементы и структуры, выход из строя которых приведет к отказу ИК ФМ. Выход из строя трех ФЧЭ, в том числе элементов соединения ФЧЭ с БИС, или входной ячейки ФЧЭ в БИС приводит к выходу из строя ФМ. Выход из строя ВЗН-регистра, памяти ВЗН, дельта-сигма-модулятора, фильтра АЦП или памяти АЦП тоже приводит к выходу из строя ФМ. В таблице 2 приведены промежуточные значения вероятности безотказной работы составных компонентов ФМ.

Исходя из ВБР всех составных элементов ФМ была рассчитана ВБР ФМ равная 0,9965170398001, что позволяет говорить о высокой степени безотказной работы ФМ в течении 96 360 часов на ГСО. Для дальнейшего увеличения ВБР ФМ необходимо улучшение материала КРТ для изготовления фоточувствительных матриц.

Для подтверждения проведенной оценки надежности будут проведены ресурсные ис-

пытания для подтверждения возможности безотказной работы на протяжении 11 лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патрашин А. И., Бурлаков И. Д. / Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 3. С. 287–300.
2. Романов Е. К., Хрущев А. О., Бурлаков В. И. / Тезисы докладов XIV научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Фотосенсорика: новые материалы, технологии, приборы, производство». – Москва, 2025. С. 112–114.
3. Бурлаков В. И., Гапонов О. В., Морковников Н. И. / Российский форум «Микроэлектроника 2024». 10-я научная конференция «ЭКБ и микроэлектронные модули». Сборник тезисов. – М.: Издательство «ТЕХНОСФЕРА», 2024. С. 789–791.
4. Справочник «Надежность электрорадиоизделий». – М.: МО РФ, 2006.
5. Автоматизированная система расчета надежности. Надежность электрорадиоизделий. Разработан ГУП «22 ЦНИИ» МО РФ, РНИИ «Электронстандарт» и ОАО «Электронстандарт», 2002.
6. ГОСТ 25.504-84. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости. – М.: Издательство стандартов, 1982.
7. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2016.
8. ГОСТ 27.301-95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1996.
9. ГОСТ Р 59606-2021. Оптика и фотоника. Устройства фотоприёмные второго и последующего поколения. Методы измерений фотоэлектрических параметров и определение характеристик. – М.: Российский институт стандартизации, 2021.

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

Analysis of the reliability of the infrared focal plane array with time delay integration with digital outputs

E. K. Romanov*, V. I. Burlakov, D. D. Chebotarenko and A. D. Yudovskaya

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

** E-mail: robogear0@gmail.com*

Received 25.03.2025; revised 9.04.2025; accepted 2.06.2025

The operating principle and reliability of focal plane array (FPA) of 1024×10 format elements based on cadmium-mercury-tellurium (CMT), sensitive in the infrared (IR) range, intended for the construction of a multi-row large-format photodetector (PD) developed for on-board scanning equipment intended for hydrometeorological research and other civil applications in terms of space monitoring of the Earth are considered. A structural diagram of the reliability

of the FPA is constructed, the reliability of the FPA is calculated, confirming sufficient time of failure-free operation of the FPA for more than 10 years in the geostationary orbit (GEO).

Keywords: focal plane array; infrared range; time delay integration mode; deselection; reliability; photodetector.

REFERENCES

1. Patrashin A. I. and Burlakov I. D., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **3** (3), p. 287–300 (2015) [in Russian].
2. Romanov E. K., Khrushchev A. O. and Burlakov V. I. Proc. XIV scientific and practical conference of young scientists and specialists “Fotosensorika: novye materialy, tekhnologii, pribory, proizvodstvo”. Moscow, 2025, pp. 112–114 [in Russian].
3. Burlakov V. I., Gaponov O. V. and Morkovnikov N. I. Russian forum “Mikroelektronika 2024”. 10th scientific conference “EKB i mikroelektronnyye moduli”. Collection of abstracts, Moscow, Publishing house “TEHNOSFERA”, pp. 789–791 (2024) [in Russian].
4. Directory “Nadezhnost elektroradioizdelij”, Moscow, MD RF, 2006 [in Russian].
5. Avtomatizirovannaya sistema rascheta nadezhnosti. Nadezhnost elektroradioizdelij. Developed by SUE “22 CNII” MD RF, RSRI “Electronstandart” & JSC “Electronstandart”, 2002 [in Russian].
6. GOST 25.504-84, Raschety i ispytaniya na prochnost. Metody rascheta karakteristik soprotivleniya ustalosti, Moscow, Izdatelstvo standartov, 1982 [in Russian].
7. GOST 27.002-2015, Nadezhnost v tekhnike. Terminy i opredeleniya, Moscow, Standartinform, 2016 [in Russian].
8. GOST 27.301-95, Nadezhnost v tekhnike. Raschet nadezhnosti. Osnovny`e polozheniya, Moscow, IPK Izdatelstvo standartov, 1996 [in Russian].
9. GOST R 59606-2021, Optika i fotonika. Ustrojstva fotopriyomnye vtorogo i posleduyushchego pokoleniya. Metody izmerenij fotoelektricheskikh parametrov i opredelenie harakteristik, Moscow, Rossijskij institut standartizacii, 2021 [In Russian].

Об авторах

Романов Евгений Константинович, инженер 2 категории, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9). E-mail: robogear0@gmail.com SPIN-код РИНЦ 2791-2916, Author ID 1256220

Бурлаков Владислав Игоревич, начальник отдела, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9). E-mail: vlad-burlakov@mail.ru SPIN-код РИНЦ 5697-4861, Author ID 1152653

Чеботаренко Даниил Дмитриевич, инженер, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9). E-mail: moifoto2014@yandex.ru

Юдовская Александра Дмитриевна, ведущий инженер, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9). E-mail: tigris_kisa@mail.ru SPIN-код РИНЦ 9887-4230, Author ID 1227585