

УДК 658.562.4

DOI: 10.22213/2413-1172-2026-1-35-43

Структурно-функциональная модель управления качеством светодиодных источников света, используемых в малых космических аппаратах*

В. П. Кузьменко, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

С. В. Солёный, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

Е. А. Фролова, доктор технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

А. П. Бобрышов, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

Статья посвящена разработке и обоснованию структурно-функциональной модели управления качеством светодиодных источников света (СИС), применяемых в составе малых космических аппаратов форм-фактора CubeSat. Цель исследования заключалась в формировании сквозного подхода к управлению качеством СИС в экстремальных условиях эксплуатации и создании методической основы для последующей стандартизации процедур контроля пригодности применения СИС для малых космических аппаратов. В работе выполнен сравнительный анализ открытой нормативно-методической документации из области светотехники и радиотехники, применительно к аэрокосмическим условиям и космической технике, по результатам которого выявлены ключевые методические разрывы: отсутствие согласованной сквозной процедуры оценки пригодности (квалификации) сложных изделий СИС для экстремальных условий эксплуатации или циклических экстремальных воздействий отдельных эксплуатационных факторов, таких как резкие скачки температуры окружающей среды, влажности, радиоактивных излучений, а также ограниченная переносимость моделей прогнозирования деградации светотехнических характеристик на условия эксплуатации космических миссий. В качестве решения предложена модель управления качеством СИС, выстроенная по принципам V-модели и замкнутой обратной связи в логике цикла Деминга. Предлагаемый подход детализирует этапы жизненного цикла (отбор компонентов и входной контроль, расчетно-экспериментальная увязка с тепловыми и механическими режимами, квалификационные и приемо-сдаточные испытания, интеграция в состав малых космических аппаратов), определяет контрольные точки, информационные потоки и минимально необходимый набор регистрируемых светотехнических показателей (световой поток, спектральные и цветовые параметры, электрические и тепловые режимы). Обоснована роль цифрового паспорта СИС как инструмента отслеживаемости и накопления данных контроля, испытаний и эксплуатации. В ходе исследования использованы методы системного анализа, сравнительного анализа нормативно-методических источников и функционально-структурного моделирования процессов управления качеством на стадиях жизненного цикла изделия. Полученные результаты формируют основу для унификации критериев приемки и повышения воспроизводимости оценки качества СИС при экстремальных воздействиях.

Ключевые слова: светодиодные источники света, малые космические аппараты, управление качеством продукции, цифровой паспорт изделия, деградация светового потока, экстремальные условия эксплуатации.

Введение

Активное развитие программ запуска малых космических аппаратов (МКА), в особенности форм-фактора типа CubeSat, является одним из ключевых направлений современной космической отрасли, так как данные проекты имеют относительно невысокую стоимость и широкий исследовательский и научно-образовательный потенциал [1].

В настоящее время уже известны примеры применения неорганических светодиодных источников света (СИС), являющихся основой светодиодных модулей для навигационно-сигнальных систем МКА формата CubeSat [2].

Функциями СИС в данном случае может являться не только индикация или подсветка, но и обеспечение оптической связи для решения задач навигации МКА, что может являться критически важным для

успешного выполнения миссии. Однако обеспечение и подтверждение требуемого уровня качества СИС в данном случае затруднительно ввиду отсутствия единых, скоординированных требований при проектировании, производстве и приемке СИС для применения в жестких условиях аэрокосмической эксплуатации. Сложность данных процессов заключается не столько в применении СИС в экстремальных условиях эксплуатации, сколько в междисциплинарной природе изделия, так как СИС должен одновременно соответствовать: 1) светотехническим требованиям, таким как стабильность светового потока, точность цветовых координат, уровень силы света; 2) удовлетворять жестким условиям эксплуатации для аэрокосмического применения, таким как стойкость к ионизирующему излучению, термоциклированию, механическим воздействиям, работа в глубоком вакууме [3]. При этом в существующих на данный мо-

© Кузьменко В. П., Солёный С. В., Фролова Е. А., Бобрышов А. П., 2026

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003 «Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга».

мент нормативных документах нет полноценных комплексных решений для контроля такого соответствия. В связи с этим, как потребители, так и производители СИС, в случаях применения изделия в условиях экстремальной эксплуатации вынуждены руководствоваться не до конца согласованными стандартами и требованиями, что может приводить к разработке «суррогатных» технических условий (ТУ), которые не в полной мере позволяют обеспечить необходимую оценку и предсказуемость заданных показателей качества СИС. Усугубляет ситуацию малосерийный характер производства МКА, при котором традиционные, основанные на выборочном статистическом контроле правила приемки компонентов становятся не до конца релевантными и не всегда экономически целесообразными [4, 5].

Цель исследования – разработка и обоснование структурно-функциональной модели управления качеством СИС, применяемых в составе малых космических аппаратов форм-фактора CubeSat, с формированием методической основы для последующей стандартизации процедур контроля пригодности и оценки деградации светотехнических параметров СИС в условиях экстремальной эксплуатации.

Задачи и методы исследования. Для достижения поставленной цели в работе решены следующие исследовательские **задачи**: выполнен аналитический обзор и сопоставление требований нормативно-методических документов светотехнической и аэрокосмической отраслей применительно к контролю качества СИС в контексте экстремальных условий эксплуатации; выявлены ключевые методические несоответствия и нормативные разрывы, возникающие при переносе типовых процедур контроля СИС в область экстремальных условий эксплуатации; определен состав критических показателей качества и деградации светотехнических характеристик СИС и их привязка к контрольным точкам на стадиях жизненного цикла изделия; разработана структурно-функциональная модель сквозного управления качеством СИС с формализацией входов и выходов процессов, информационных потоков и контуров корректирующих воздействий; сформированы требования к информационному обеспечению модели, включая принципы ведения цифрового паспорта изделия для накопления и прослеживаемости данных контроля, испытаний и эксплуатации.

В ходе исследования использованы **методы** системного анализа, сравнительного анализа нормативных требований и процессного подхода к управлению качеством, а также функционально-структурное моделирование процессов в логике цикла Деминга.

Аналитический обзор стандартов и существующих процедур контроля качества светодиодных источников света в экстремальных условиях эксплуатации

Со стороны светотехнической отрасли ключевыми являются стандарты, регламентирующие фотометрические параметры, их измерения и прогнозирование их заданного уровня. Известен стандарт IES LM-80-21, который детально описывает методику

измерения уровня деградации светового потока СИС, однако сфера применения данного стандарта ограничена заданными лабораторными условиями без моделирования каких-либо экстремальных или жестких эксплуатационных воздействий [6, 7]. Метод экстраполяции данных уровня деградации светового потока, регламентированный в IES TM-21-21, несмотря на математическую строгость, содержит некоторые ограничения. Стандарт предписывает использовать для прогноза лишь данные, полученные в ходе испытаний по IES LM-80, продолжительность которых, как правило, составляет 6000–10000 часов, что в условиях многих космических миссий МКА может оказаться довольно коротким сроком [8].

Для аэрокосмических применений, где срок активного существования (САС) аппарата может составлять 5–7 лет и более, данное ограничение делает прямое применение методики TM-21 неприемлемым по двум ключевым причинам:

1. Прогноз на весь САС часто требует экстраполяции за пределы шестикратного лимита, что прямо ограничено стандартом.

2. Даже если бы экстраполяция была допустима, математическая модель TM-21 (экспоненциальная аппроксимация уровня деградации светового потока) основана на данных, полученных в стабильных земных условиях, то есть она не учитывает ускоренную деградацию, вызванную постоянным воздействием ионизирующей радиации и/или циклическими термомеханическими нагрузками, что может давать заведомо оптимистичный прогноз.

Помимо зарубежных стандартов, ориентированных на контроль качества и прогнозирование деградации светового потока СИС, важно отметить отечественную нормативную базу в области СИС и осветительных приборов на их основе. Она характеризуется значительной степенью системности и детализированности, однако при анализе всё же обнаруживаются методические разрывы, влияющие на полноту оценки параметров СИС при их применении в экстремальных условиях эксплуатации. В качестве базовых документов, определяющих требования к светотехническим характеристикам СИС, можно выделить ГОСТ Р 54350–2015 «Приборы осветительные. Светотехнические требования и методы испытаний»; ГОСТ Р 59294–2021 «Источники света, осветительные приборы и системы искусственного освещения. Показатели энергоэффективности и требования»; ГОСТ Р 8.971–2019 «Государственная система обеспечения единства измерений. Лампы, светильники и модули светодиодные. Методы измерения фотометрических и колориметрических характеристик»; ГОСТ Р 55703–2013 «Источники света электрические. Методы измерений спектральных и цветовых характеристик».

Актуальные научные публикации подтверждают, что, несмотря на развитую и детализированную нормативную базу (включая ГОСТ Р 54350–2015, ГОСТ Р 59294–2021, ГОСТ Р 8.971–2019 и ГОСТ Р 55703–2013), сохраняются методические разрывы в измерениях, прогнозировании деградации и оценке

СИС в сложных условиях эксплуатации, что полностью подтверждается в [9–12].

Каждый из вышеперечисленных стандартов задает определенную совокупность метрологических, энергетических и эксплуатационных параметров для СИС. Однако в соответствии с областью применения указанные стандарты не в полной мере указывают на положения, касающиеся изменения светотехнических параметров и характеристик изделия в процессе длительной эксплуатации. Соответственно, отсутствие методик учета деградационных процессов не является недостатком данных стандартов, но требует обязательного дополнения иного рода нормативами в случаях, когда речь идет о системах с более высокой целевой длительностью эксплуатации или экстремальными условиями применения, как, например, в случаях аэрокосмического применения.

Немного иной подход демонстрирует доступная нормативная база стандартов из серии аэрокосмического приборостроения. Известны зарубежные стандарты типа ECSS-Q-ST, которые формируют жесткие требования к надежности электронных компонентов для аэрокосмического применения. Стандарты серии ECSS-Q-ST – это отраслевые стандарты Европейской кооперации по космической стандартизации (European Cooperation for Space Standardization, ECSS). Они применяются в основном в европейских космических проектах и в контрактах Европейского космического агентства, национальных агентств стран Европы учитываются как обязательный норматив для пайки высоконадежных электрических соединений на летной и наземной электронной аппаратуре и связанных с ними производственных операций при изготовлении такой компонентной базы.

Например, стандарт ECSS-Q-ST-70-08C задает условия и критерии качества пайки: микроклимат участка (около 22 ± 3 °C и 55 ± 15 % влажности, без сквозняков, с освещенностью не ниже 1080 лк), чистые рабочие зоны, защиту от статического электричества, калибровку инструмента; выбор припоя и флюсов, запрет прямой пайки по золоту с предписанием снятия золота и последующего лужения, требования к геометрии выводов и количеству припоя, читаемости контура проводника и низкому углу смачивания и др.

Вместе с тем стандарты типа ECSS не лишены ограничений. Они ориентированы прежде всего на свинцовые припои и ручные операции, а цифровая прослеживаемость и автоматизированная аналитика отражены лишь частично [13, 14].

Анализ доступной в открытой печати отечественной нормативной базы для электронных средств, применяемых в аэрокосмической области, показывает, что современные стандарты формируют прочный каркас требований к надежности, но пока не охватывают специфику СИС для аэрокосмического применения. Так, ГОСТ Р 59312–2021 «Ракетно-космическая техника. Электронная компонентная база. Порядок выбора, применения и проведения испытаний»

и ГОСТ Р 58857–2020 «Ракетно-космическая техника. Электронная компонентная база. Общие положения» регламентируют выбор и квалификацию электронной компонентной базы, в том числе по радиационной стойкости и уровням отказов, но не содержат методик оценки деградации именно СИС при терморadiационном воздействии [15]. В международной практике аналогичные задачи решаются с использованием моделей IES LM-80 и TM-21, также имеющих недостатки, описанные выше [16].

Таким образом, анализ научных публикаций и отраслевой нормативной документации подтверждает, что при наличии развитой отечественной нормативной базы в области надежности электронной компонентной базы для ракетно-космической техники, включая ГОСТ Р 59312–2021 и ГОСТ Р 58857–2020, в настоящее время не в полной мере используются специализированные методики оценки деградации светодиодных источников света при комбинированном терморadiационном воздействии, а используемые в международной практике модели стандартов IES LM-80 и TM-21 не в полной мере обеспечивают корректное и достаточное описание условий аэрокосмической эксплуатации СИС [17].

Таким образом, можно сделать вывод, что для организации качественного подхода по внедрению и разработке уточненных процедур контроля качества и оценки пригодности СИС для аэрокосмического применения необходимо формирование методик, обеспечивающей воспроизводимость характеристик и оценку функциональной надежности и постоянства светотехнических параметров СИС в экстремальных условиях эксплуатации [18, 19].

Структурно-функциональная модель и методика стандартизации и управления качеством светодиодных источников света в экстремальных условиях эксплуатации аэрокосмического применения

Проведенный выше анализ показывает, что в текущих условиях развития нормативной базы стандартизации СИС проблематично установить прочную связь между этапами жизненного цикла СИС, предназначенных для экстремальных условий эксплуатации.

На рисунке 1 представлена структурно-функциональная схема управления качеством СИС, предназначенных для условий экстремальной эксплуатации.

Представленная схема описывает комплексную систему менеджмента качества, построенную по принципу V-модели и цикла Деминга, с замкнутой петлей обратной связи [20].

Предлагаемая структурно-функциональная модель ориентирована на случаи разработки и применения СИС в составе малых космических аппаратов при мелкосерийном и единичном производстве, когда традиционные процедуры выборочного статистического контроля имеют ограниченную применимость и требуют адаптации с учетом высокой стоимости отказа и ограниченного объема партий.

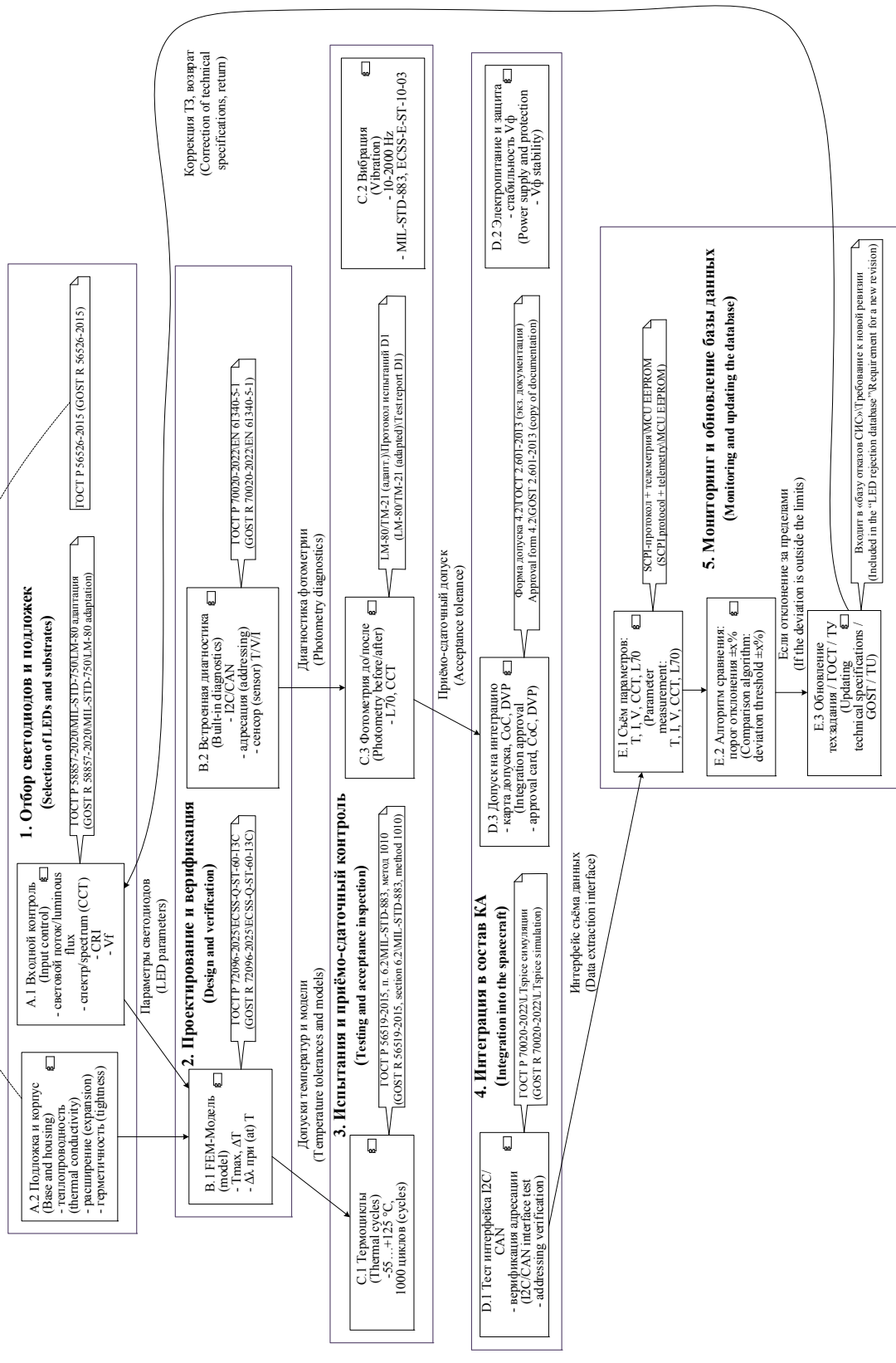


Рис. 1. Структурно-функциональная схема управления качеством светодиодных источников света

Fig. 1. Structural and functional diagram of LED light source quality control

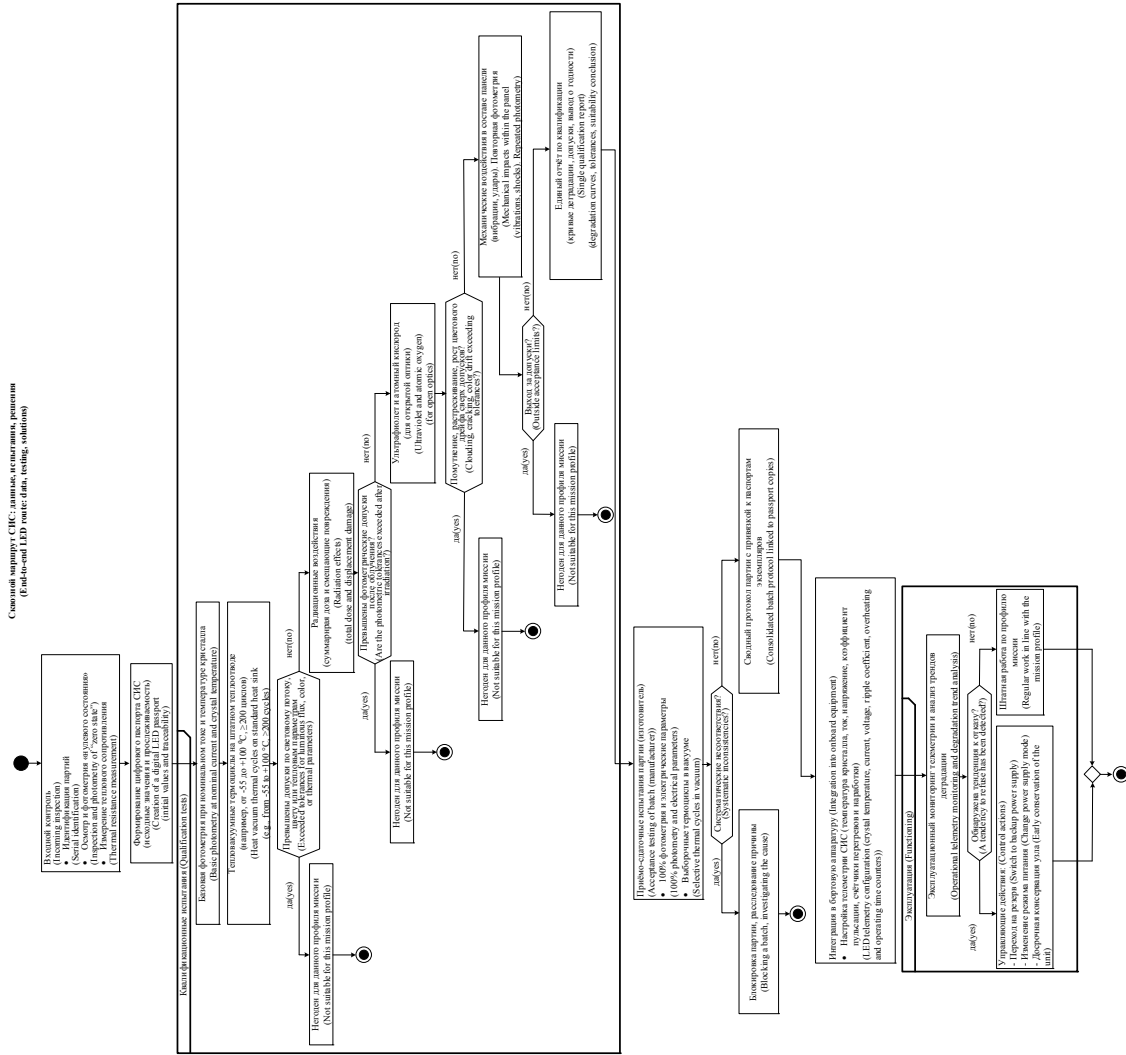


Рис. 2. Схема сквозного управления жизненным циклом СИС на основе данных испытаний и эксплуатационного мониторинга

Fig. 2. End-to-end management scheme for the life cycle of an LED light source based on test data and operational monitoring

Результативность модели предлагается оценивать по совокупности управленческих и инженерных критериев: по достижению воспроизводимости контролируемых светотехнических параметров СИС при заданных профилях испытаний и эксплуатации (стабильность светового потока, спектральных и цветовых параметров при контролируемых электрических и тепловых режимах); снижению доли несоответствий, выявляемых на поздних стадиях жизненного цикла за счет переноса контроля и верификации на ранние этапы (раннее планирование испытаний в логике V-модели); полноте и прослеживаемости данных контроля и испытаний, фиксируемых в цифровом паспорте изделия (однозначная связь «требование – испытание – протокол – решение»); эффективности корректирующих воздействий, формируемых по данным эксплуатационного мониторинга и возвращаемых в контур входного контроля и квалификационных процедур.

Первый этап, связанный с отбором светодиодов и подложек, является базовым, так как именно качество этих компонентов определяет надежность изделия. В блоке А.1 осуществляется входной контроль светового потока, коррелированной цветовой температуры, индекса цветопередачи и прямого падения напряжения с опорой на ГОСТ Р 58857–2020 и методики IES LM-80/TM-21. Параллельно блок А.2 оценивает подложку и корпус СИС по параметрам теплопроводности, коэффициента теплового расширения и герметичности.

Этап 2 связывает характеристики компонентов СИС с эксплуатационными свойствами изделия. Здесь блок В.1 формирует FEM-модель тепловых и механических процессов, позволяющую прогнозировать максимальную температуру (T_{\max}), температурные градиенты и спектральные сдвиги, используя требования ГОСТ Р 72096–2025 «Средства орбитальные. Обеспечение стойкости автоматических космических аппаратов к воздействию факторов электризации. Общие требования» и ECSS-Q-ST-60-13С. Блок В.2 отвечает за реализацию протоколов обмена данными I2C/CAN, архитектуры адресации и интеграции датчиков, что обеспечивается требованиями ГОСТ Р 70020–2022.

Этап 3 посвящен испытаниям и приемо-сдаточному контролю.

Этап 4 связан с интеграцией в состав космического комплекса по ГОСТ Р 70020–2022 и с ГОСТ 2.601–2019 «Единая система конструкторской документации. Эксплуатационные документы».

Этап 5 замыкает систему через орбитальный мониторинг, запись параметров и их сравнение с эталонными. Обратная связь от блока Е.3 к блоку А.1 отражает итерационный цикл: данные о реальной деградации возвращаются в систему контроля компонентов, обеспечивая непрерывное совершенствование всей петли качества.

На рисунке 2 представлена предлагаемая схема процесса управления жизненным циклом СИС для аэрокосмического применения – от этапа входного

контроля до предлагаемых процедур эксплуатационного мониторинга параметров СИС.

Роль начального этапа заключается в формировании объективной базы данных о параметрах компонентов, что обеспечивает основу для решений на всех стадиях жизненного цикла. Квалификационные испытания, выполняемые по серии стандартов ECSS, но с учетом ГОСТ Р 56519–2015, позволяют обеспечить валидацию технических решений, однако дублирование процедур приведет к росту сроков и затрат. Рационализация возможна через систему взаимного признания протоколов между изготовителями и независимыми центрами на основе унифицированных методик. Приемо-сдаточные испытания, регламентированные ГОСТ Р 2.601–2019, выявляют производственные дефекты, но не имеют четких правил перехода от выборочного к 100%-му объему контроля всех изделий, что необходимо в случаях мелких серий. Дополнительным перспективным направлением является разработка математических моделей деградации, учитывающих реальные условия и данные ускоренных испытаний.

Выводы

Предложены структурно-функциональная модель и методика управления качеством СИС ориентированы на инженерную воспроизводимость результатов и возможность последующей стандартизации процедур. Подход основан на согласовании этапов верификации и валидации (в логике V-модели) и вводит замкнутый контур обратной связи между входным контролем, испытательными проверками и эксплуатационным мониторингом. В рамках модели уточнены состав и роль контрольных точек, определены информационные потоки и набор ключевых метрик, которые должны измеряться и фиксироваться для оценки качества и деградации СИС (световой поток, спектральное распределение мощности и показатели цветности/стабильности, а также электрические и тепловые режимы). Тем самым сформирована методическая основа для унификации критериев приемки и сопоставимости результатов между партиями изделий и профилями миссий.

Таким образом, цель исследования, заключавшаяся в разработке структурно-функциональной модели управления качеством светодиодных источников света для малых космических аппаратов и в формировании основы для последующей стандартизации сквозной оценки их пригодности к работе в экстремальных условиях, достигнута. Выполненное сопоставление подходов светотехнической и аэрокосмической нормативно-методической базы показало отсутствие единой сквозной методики, которая одновременно задавала бы контролируемые показатели, контрольные точки жизненного цикла, правила сопоставимости результатов испытаний и эксплуатации и процедуру принятия решений по качеству при совокупности воздействий (термоциклирование, вакуум, радиация, вибрация).

При этом проведенный анализ показал, что действующая нормативная база светотехнических и аэро-

космических стандартов задает требования и методики преимущественно фрагментарно, не обеспечивая единой сквозной схемы, в которой были бы одновременно регламентированы контрольные точки, правила сопоставимости результатов испытаний и эксплуатационных данных, а также механизмы принятия корректирующих решений при выявлении деградиационных изменений в условиях совокупного воздействия вакуума, радиации, термоциклирования и вибрационных нагрузок.

Дальнейшее развитие и направление исследования может быть связано с формализацией структуры цифрового паспорта, регламентацией состава данных миссии и телеметрии и построением моделей деградации, обеспечивающих риск-ориентированное управление качеством и квалификацию СИС для экстремальных условий эксплуатации.

Библиографические ссылки

1. Doyle M. (2022) Design, development, and testing of flight software for EIRSAT-1: a university-class Cube Sat enabling astronomical research. *Proc. of SPIE*, vol. 12189, pp. 1218915-1–1218915-19. DOI: 10.1117/12.2627464
2. Piergentili F. (2022) Satellite early identification through LED observations: First in-orbit results from WildTrackCube-SIMBA. *Acta Astronautica*. DOI: 10.1016/j.actaastro.2022.01.014
3. Вострецова Л. Н., Адамович А. А. Влияние γ -облучения на электрические и оптические характеристики светодиодов на основе InGaN/GaN // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки*. 2020. № 4 (56). С. 69–79.
4. Королёв П. С. Комплексный метод оценки показателей безотказности радиотехнических устройств космической аппаратуры // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2021. Т. 64, № 4. С. 316–328.
5. Кузьменко В. П., Солёный С. В. Моделирование освещенности от светодиодного осветительного прибора для системы визуального контроля герметизации корпуса малого космического аппарата // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. 2025. Т. 28, № 3. С. 4–14. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-3-4-14
6. Управление качеством на основе цикла Деминга – Шухарта в условиях изменений / В. В. Филатов, И. А. Рамазанов, В. В. Безпалов, С. Ю. Федорук // *Журнал прикладных исследований*. 2022. Т. 4, № 8. С. 336–341.
7. Lee C.-C., Huang C.-W., Liao P.-H., Huang Y.-H., Huang C.-L., Lin K.-H., Wu C.-C. (2023) Comprehensive investigation of electrical and optical characteristics of InGaN-based flip-chip micro-light-emitting diodes. *Micromachines*, vol. 14. DOI: 10.3390/mi14010009
8. Сравнение эффективности отбраковки потенциально ненадежных светодиодов по пороговому току и прямому падению напряжения / О. А. Радаев, И. В. Фролов, В. А. Сергеев, С. А. Зайцев // *Контроль. Диагностика*. 2025. № 7. С. 61–66. DOI: 10.14489/td.2025.07.pp.061-066
9. Skarżyński K., Żagan W., Krajewski K. (2021) LED luminaires: Many chips-many photometric and lighting simulation issues to solve. *Energies*. DOI: 10.3390/en14154646
10. Valetti L., Piccablotto G., Taraglio R., Pellegrino A. (2023) Long-term monitoring campaign of LED street lighting systems: Focus on photometric performances, maintenance and energy savings. *Sustainability*. DOI: 10.3390/su152416910
11. Ferrero A., Velazquez J., Pons A., Campos J. (2018) Index for the evaluation of the general photometric performance of photometers. *Optics Express*, vol. 26, pp. 18633–18643. DOI: 10.1364/OE.26.018633
12. Ikonen E. (2023) Recent advances and perspectives in photometry in the era of LED lighting. *Measurement Science and Technology*, vol. 35. DOI: 10.1088/1361-6501/ad0de6
13. Hong Y., Kwak M., Jeon S. (2025) Study on reliability of lead-free mixed BGA soldering process for application of space-grade PBA. *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*. DOI: 10.9766/kimst.2025.28.1.052
14. Brinlee S., Popelar S. (2023) A physics-of-failure investigation of flip chip reliability based on lead-free solder fatigue modeling. *IMAP Source Proceedings*. DOI: 10.4071/001c.74728
15. Вострецова Л. Н., Махмуд-Ахунев М. Ю., Чулакова А. А. Деградация структур на основе InGaN/GaN под действием γ -облучения // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки*. 2022. № 3 (63). С. 72–84.
16. Методы и инструменты управления рисками на высокотехнологичном машиностроительном предприятии, оснащённом виброактивным оборудованием / П. А. Лончих, Е. Ю. Головина, Н. П. Лончих, И. И. Лившиц // *Вестник МГТУ имени Г. И. Носова*. 2024. № 2 [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-i-instrumenty-upravleniya-riskami-na-vysokotekhnologichnom-mashinostroitelnom-predpriyatii-osnaschennom-vibroaktivnym> (дата обращения: 23.11.2025).
17. Ikonen E. (2023) Recent advances and perspectives in photometry in the era of LED lighting. *Measurement Science and Technology*, vol. 35. DOI: 10.1088/1361-6501/ad0de6
18. Кузьменко В. П. Модель оценки срока службы светодиодных осветительных приборов с учетом системных факторов эксплуатации // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. 2025. Т. 28, № 4. С. 12–21. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-4-12-21
19. Baba T., Javed Y., Khan Z., Ali T., Hasbullah N. (2024) Investigation of proton radiation effect on indium gallium nitride light emitting diodes. *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 68, pp. 223–231. DOI: 10.3311/ppce.23515
20. Кунаков Е. П. Применение новых подходов к циклу Деминга // *Вестник МГТУ имени Г. И. Носова*. 2022. № 1 [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-novykh-podhodov-k-tsiklu-deminga> (дата обращения: 23.11.2025).

References

1. Doyle M. (2022) Design, development, and testing of flight software for EIRSAT-1: a university-class Cube Sat enabling astronomical research. *Proc. of SPIE*, vol. 12189, pp. 1218915-1–1218915-19. DOI: 10.1117/12.2627464
2. Piergentili F. (2022) Satellite early identification through LED observations: First in-orbit results from WildTrackCube-SIMBA. *Acta Astronautica*. DOI: 10.1016/j.actaastro.2022.01.014
3. Vostretsova L.N., Adamovich A.A. (2020) [Influence of γ -irradiation on the electrical and optical characteristics of InGaN/GaN-based LEDs]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Povolzhskii Region. Fiziko-Matematicheskie Nauki*, no. 4 (56), pp. 69-79 (in Russ.).
4. Korolev P.S. (2021) [Comprehensive method for assessing reliability indicators of radio engineering devices for spacecraft equipment]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Priborostroenie*, vol. 64, no. 4, pp. 316-328 (in Russ.).
5. Kuzmenko V.P., Solyony S.V. (2025) [Illuminance modeling from an LED luminaire for a visual inspection sys-

tem of sealing the small spacecraft body]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 28, no. 3, pp. 4-14. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-3-4-14 (in Russ.).

6. Filatov V.V., Ramazanov I.A., Bezpalyov V.V., Fedoruk S.Yu. (2022) [Quality management based on the Deming - Shewhart cycle under changes]. *Zhurnal Prikladnykh Issledovaniy*, vol. 4, no. 8, pp. 336-341 (in Russ.).

7. Lee C.-C., Huang C.-W., Liao P.-H., Huang Y.-H., Huang C.-L., Lin K.-H., Wu C.-C. (2023) Comprehensive investigation of electrical and optical characteristics of InGaN-based flip-chip micro-light-emitting diodes. *Micromachines*, vol. 14. DOI: 10.3390/mi14010009

8. Radaev O.A., Frolov I.V., Sergeev V.A., Zaitsev S.A. (2025) [Comparison of screening efficiency for potentially unreliable LEDs by threshold current and forward voltage drop]. *Kontrol. Diagnostika*, no. 7, pp. 61-66. DOI: 10.14489/td.2025.07.pp.061-066 (in Russ.).

9. Skarżyński K., Żagan W., Krajewski K. (2021) LED luminaires: Many chips-many photometric and lighting simulation issues to solve. *Energies*. DOI: 10.3390/en14154646

10. Valetti L., Piccablotto G., Taraglio R., Pellegrino A. (2023) Long-term monitoring campaign of LED street lighting systems: Focus on photometric performances, maintenance and energy savings. *Sustainability*. DOI: 10.3390/su152416910

11. Ferrero A., Velazquez J., Pons A., Campos J. (2018) Index for the evaluation of the general photometric performance of photometers. *Optics Express*, vol. 26, pp. 18633-18643. DOI: 10.1364/OE.26.018633

12. Ikonen E. (2023) Recent advances and perspectives in photometry in the era of LED lighting. *Measurement Science and Technology*, vol. 35. DOI: 10.1088/1361-6501/ad0de6

13. Hong Y., Kwak M., Jeon S. (2025) Study on reliability of lead-free mixed BGA soldering process for application of space-grade PBA. *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*. DOI: 10.9766/kimst.2025.28.1.052

14. Brinlee S., Popelar S. (2023) A physics-of-failure investigation of flip chip reliability based on lead-free solder fatigue modeling. *IMAP Source Proceedings*. DOI: 10.4071/001c.74728

15. Vostretsova L.N., Makhmud-Akhunov M.Yu., Chulakova A.A. (2022) [Degradation of InGaN/GaN-based structures under γ -irradiation]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Povolzhskii Region. Fiziko-Matematicheskie Nauki*, no. 3 (63), pp. 72-84 (in Russ.).

16. Lontsikh P.A., Golovina E.Yu., Lontsikh N.P., Livshits I.I. (2024) [Methods and tools of risk management at a high-tech machine-building enterprise equipped with vibration-active equipment]. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*, no. 2 [Electronic resource]. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-i-instrumenty-upravleniya-riskami-na-vysokotekhnologichnom-mashinostroitelnom-predpriyatii-osnashchennom-vibroaktivnym> (accessed: 23.11.2025) (in Russ.).

17. Ikonen E. (2023) Recent advances and perspectives in photometry in the era of LED lighting. *Measurement Science and Technology*, vol. 35. DOI: 10.1088/1361-6501/ad0de6

18. Kuzmenko V.P. (2025) [Model for service life assessment of LED luminaires considering system-level operational factors]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 28, no. 4, pp. 12-21. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-4-12-21 (in Russ.).

19. Baba T., Javed Y., Khan Z., Ali T., Hasbullah N. (2024) Investigation of proton radiation effect on indium gallium nitride light emitting diodes. *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 68, pp. 223-231. DOI: 10.3311/ppee.23515

20. Kunakov E.P. (2022) [Application of new approaches to the Deming cycle]. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova* [Electronic resource]. No. 1. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-novyh-podhodov-k-tsiklu-deminga> (accessed: 23.11.2025) (in Russ.).

Structural and Functional Quality Control Model of Led Light Sources Used in Small Spacecrafts

V.P. Kuzmenko, PhD in Engineering, Associate Professor, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia

S.V. Solyoniy, PhD in Engineering, Associate Professor, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia

E.A. Frolova, DSc in Engineering, Associate Professor, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia

A.P. Bobryshov, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia

The work is devoted to the development and justification of a structural and functional model for quality control of LED light sources used for small CubeSat spacecraft and methods for its application, taking into account the multifactorial nature of LED light sources and the extreme operating conditions of small spacecraft. Based on a comparative analysis of lighting and aerospace open regulatory documentation, methodological gaps have been identified: the lack of an end-to-end procedure for assessing the suitability (qualification) of LED light sources, the limited applicability of earth-based models for predicting the degradation of product light characteristics in relation to possible long-term space missions of small spacecraft, as well as the limited relevance of selective statistical control, which is characteristic of small spacecrafts. As a solution, a structural-functional model for quality control of LED light sources used for small spacecrafts is proposed, built on the principles of the V-model, where each stage of development on the left side of the letter V (from requirements to detailed design) has a corresponding testing and verification/validation stage on the right side (from component to acceptance testing), ensuring early test planning, strict quality control, and compliance with requirements, but low flexibility. The results of the study form the basis for the development of new approaches to control the quality of semiconductor light sources used in aerospace systems.

Keywords: LED light sources, small spacecrafts, product quality control, digital product passport, light flux degradation, extreme operating conditions.

Получено 16.01.2026

Образец цитирования

Структурно-функциональная модель управления качеством светодиодных источников света, используемых в малых космических аппаратах / В. П. Кузьменко, С. В. Солёный, Е. А. Фролова, А. П. Бобрышов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2026. Т. 29, № 1. С. 35–43. DOI: 10.22213/2413-1172-2026-1-35-43.

For Citation

Kuzmenko V.P., Solyoniy S.V., Frolova E.A., Bobryshov A.P. (2026) [Structural and Functional Quality Control Model of Led Light Sources Used in Small Spacecrafts]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 29, no. 1, pp. 35-43. DOI: 10.22213/2413-1172-2026-1-35-43 (in Russ.).