

УДК 658.5.012.14

DOI: 10.22213/2413-1172-2025-4-12-21

Модель оценки срока службы светодиодных осветительных приборов с учетом системных факторов эксплуатации

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

В работе представлена концепция многоуровневой модели прогнозирования срока службы осветительных приборов на основе полупроводниковых источников света, учитывающая системные факторы эксплуатации и деградацию сопряженных компонентов. В отличие от стандартных методик оценки, ограничивающих анализ снижения светового потока светодиода, предложенный подход охватывает также изменения координат цветности, уровень пульсаций светового излучения и отказоустойчивость узла питания. Модель строится на физически обоснованных законах и включает оценку деградации кристаллической структуры, фотолюминесцентных материалов, оптических элементов, а также ресурсоопределяющих компонентов источника питания. Ключевым элементом является переход от ускоренных испытаний к реальным условиям эксплуатации с использованием приведенного времени, рассчитываемого на основе температурной, электрической, влажностной и ультрафиолетовой нагрузки. Интегральная функция надежности формируется на основе совместного учета частных критериев отказа, что позволяет учитывать статистическую зависимость между механизмами деградации. Модель валидирована с использованием экспериментальных данных, полученных в серии испытаний при различных нагрузках. Приведены результаты численного моделирования, подтверждающие корректность методики согласования форм деградации и коэффициентов ускорения. Предложенный подход обеспечивает как воспроизведимость результатов для целей серийного контроля, так и применимость для расчета ожидаемых затрат на гарантитное обслуживание. Разработанная концепция модели может быть интегрирована в практику управления качеством на производстве осветительных приборов с целью повышения точности оценки ресурса и выявления конструктивно уязвимых элементов на этапе проектирования.

Ключевые слова: светодиодные осветительные приборы, светодиодный источник света, оценка качества, срок службы, моделирование ресурса изделия.

Введение

Современные осветительные приборы на основе полупроводниковых твердотельных источников света – светодиодов – характеризуются потенциально высокой энергоэффективностью и сроком службы. Однако в реальных условиях эксплуатации срок службы данных изделий ограничивается не только определенным порогом деградации светового потока, но и отклонениями координат цветности, пульсациями света, а также отказами сопряженных компонентов изделия – светодиодного драйвера, оптических материалов и других компонентов изделия. Это обуславливает необходимость комплексного подхода к управлению качеством и оценке долговечности осветительных приборов на основе светодиодных источников света (ОПСИС), учитывающих весь спектр деградационных процессов, в том числе тех, которые не связаны напрямую с полупроводниковой структурой самого источника света.

В контексте данной работы под качеством светодиодного осветительного прибора понимается его способность сохранять в течение срока службы установленные значения ключевых эксплуатационных параметров: светового потока, координат цветности, уровня пульсаций светового излучения, а также сохранять работоспособность всех компонентов системы.

Большая часть нормативных документов, используемых в практике управления качеством и оценки

надежности ОПСИС, в первую очередь ориентированы на метрологическое обеспечение сопоставимых измерений и экстраполяцию отдельных эксплуатационных характеристик. За основу берутся данные нормативные документы, устоявшиеся международные методы и методики оценки и прогнозирования светотехнических параметров светодиодных источников света.

Для производителей светодиодных источников света (СИС) точное прогнозирование срока службы их изделий является критически важной задачей в рамках системы управления качеством продукции. Оно позволяет оптимизировать риски по гарантитным обязательствам, рекламациям, планировать жизненный цикл выпускаемой продукции на основе СИС и обосновывать соответствие требованиям стандартов LM-80 и TM-21 [1–3].

В настоящее время актуальные методы оценки качества и прогнозирования срока службы СИС можно разделить на две группы: 1) традиционные, основанные на физико-статистических моделях ускоренных испытаний; 2) более современные, использующие алгоритмы машинного обучения с применением больших наборов данных, если это возможно [4–6].

Традиционные подходы, регламентированные описанными выше стандартами и методиками, хорошо formalизованы, но зачастую не учитывают сложные нелинейные эффекты деградации. Это связано с тем, что существующие общепринятые стан-

дартизированные методики позволяют с высокой точностью прогнозировать деградацию светового потока отдельного светодиода, но не дают комплексной оценки надежности готового осветительного прибора. Это могут быть отказы драйвера, деградация оптических элементов и люминофора и не в полной мере учитываться комплексные мультифакторные эффекты от воздействия нагрузок температуры, влажности, УФ-излучения, электрических перегрузок, которые чаще всего носят нелинейный характер [7–9]. То есть традиционные модели ускоренных испытаний часто экстраполируют данные с учетом одного-двух доминирующих факторов (например, температуры p - n -перехода), не учитывая синергетического нелинейного воздействия совокупности эксплуатационных стрессов, что может приводить к завышенным оценкам срока службы. Таким образом, проблема заключается в отсутствии согласованного описания совокупного влияния деградационных механизмов на уровне законченного изделия.

Применяемые алгоритмы и методы машинного обучения демонстрируют более высокую точность и гибкость, но требуют как больших объемов данных, так и вычислительных ресурсов, и могут оказаться сложны для унификации внедрения в производственные процессы контроля качества СИС [10–12].

При этом стоит отметить, что надежность и долговечность СИС во многом зависят не только от электронных компонентов, но и от качества функциональных покрытий, обеспечивающих защиту и теплоотвод, совершенствование которых активно развивается в смежных областях, таких как лазерные технологии нанесения покрытий [13, 14].

Из проведенного анализа вытекает вывод, что современная практика оценки качества и прогнозирования срока службы ОПСИС характеризуется некоторым методологическим разрывом, а именно:

1. При стандартизации и управлении качеством СИС доминируют детальные, но узкоспециализированные и компонентно-ориентированные методики (LM-80, TM-21). Они обеспечивают воспроизводимость и сопоставимость данных на уровне источника света, но не дают адекватную оценку для всей сложной системы осветительного прибора, частично игнорируя межкомпонентные взаимодействия и деградацию компонентов светодиодного драйвера, материалов оптики и реальных тепловых режимов изделия.

2. При актуальных научных исследованиях и новых подходах предлагаются мощные системно-ориентированные модели и методики на основе машинного обучения, стохастических и мультифакторных подходов и гибридных моделей. Эти решения позволяют описывать сложные нелинейные зависимости и учитывать множественные факторы воздействия на изделие и протекание внутренних процессов. Вместе с тем подобные модели часто опираются на индивидуальные наборы данных, которые не позволяют формализовать связь между результатами моделирования и параметрами технологического процесса.

Таким образом, актуальной научно-практической проблемой является отсутствие целостного подхода к управлению качеством и оценке срока службы ОПСИС, который бы сочетал физическую обоснованность и интерпретируемость стандартизованных методов с точностью и адаптивностью современных методов прогнозирования срока службы именно на уровне ОПСИС.

Представленное исследование направлено на формирование интегральной модели, описывающей совместное изменение параметров светового потока, цветовых координат, пульсаций и исправности драйвера в зависимости от эксплуатационных факторов. Такое описание позволяет перейти от компонентного к системному уровню анализа надежности и обеспечить сопоставимость результатов моделирования с процедурами производственного и приемочного контроля.

Цель данного исследования – разработка многоуровневой модели оценки срока службы ОПСИС, направленной на преодоление указанного методологического разрыва и обеспечение возможности интеграции компонентных испытаний и системного мониторинга для повышения точности оценки качества и прогноза срока службы ОПСИС, выявления слабых звеньев конструкции для целей управления качеством ОПСИС на этапах проектирования и производства.

Материалы, методы и постановка задачи

Работоспособность осветительного прибора как системы определяется достижением установленных предельных состояний по световому потоку, стабильности координат цветности, пульсациям излучения и исправности узла питания (см. Чирков О. Н., Антиликаторов А. Б., Шкаровский К. М., Тамбовцев М. Н. DOI: 10.36622/1729-6501.2025.21.1.012). Для партии образцов при дискретном наблюдении вводится время наступления отказа:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{сист,обр,реж}} = \inf \{t_{\text{отс}} \geq 0: \Phi_{\text{обр,реж}}(t_{\text{отс}}) \leq \Phi_{\text{обр,реж}}(0)\alpha_{\Phi} \vee \\ \vee \Delta u' v_{\text{обр,реж}}'(t_{\text{отс}}) \geq \alpha_c \vee F_{\text{обр,реж}}(t_{\text{отс}}) \geq \alpha_F \vee \\ \vee Z_{\text{драйв,обр,реж}}(t_{\text{отс}}) \leq \alpha_{\text{драйв}}\}, \end{aligned}$$

где $\tau_{\text{сист,обр,реж}}$ – время до отказа системы, с; $t_{\text{отс}}$ – дискретный момент наблюдения, с; $\Phi_{\text{обр,реж}}(t_{\text{отс}})$ – световой поток, лм; $\Phi_{\text{обр,реж}}(0)$ – начальный световой поток, лм; α_{Φ} – допустимая доля поддержания светового потока (например, 0,70 для уровня L70), безразмерная; $\Delta u' v_{\text{обр,реж}}'(t_{\text{отс}})$ – модуль сдвига хроматичности в пространстве CIE 1976, безразмерный; α_c – предельный сдвиг хроматичности по техническим условиям, безразмерный; $F_{\text{обр,реж}}(t_{\text{отс}})$ – метрика пульсаций светового излучения (например, индекс кратковременной видимости или эквивалент в используемом измерительном тракте), безразмерная; α_F – предельно допустимая пульсация, безразмерная; $Z_{\text{драйв,обр,реж}}(t_{\text{отс}})$ – функция исправности драйвера питания (запас по электрическим показателям), безразмерная; $\alpha_{\text{драйв}}$ – минимально допустимый запас исправности драйвера, безразмерный; обр – номер

образца в партии; реж – испытательный режим (комбинация тока, температуры, влажности, ультрафиолетового облучения); отс – номер временного отсчета.

Такой критерий непосредственно согласуется с измеряемыми характеристиками по утвержденным методам испытаний и допускает сопоставление с нормативными уровнями поддержания светового потока и стабильности цветности. Включение пульсаций и исправности драйвера обеспечивает системный уровень оценки, выходящий за рамки исключительно полупроводникового кристалла.

Излучаемый световой поток представляется произведением радиативной (кристаллной), конверсионной (люминофор/связующее) и оптической (линза – рассеиватель – поверхность) составляющих:

$$\begin{aligned}\Phi_{\text{обр, реж}}(t_{\text{отс}}) &= \Phi_{\text{обр, реж}}(0) \times \\ &\times M_{\text{радиац, обр, реж}}(t_{\text{отс}}, T_{j, \text{обр, реж}}, I_{f, \text{обр, реж}}) \times \\ &\times M_{\text{люм, обр, реж}}(t_{\text{отс}}, T_{j, \text{обр, реж}}, I_{f, \text{обр, реж}}) \times \\ &\times M_{\text{опт, обр, реж}}(t_{\text{отс}}, \Theta_{\text{пов, обр}}),\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\eta_{\text{внешн, обр, реж}}(t_{\text{отс}}) &= \frac{B_{\text{обр, реж}}(t_{\text{отс}}) n_{\text{обр, реж}}^2(t_{\text{отс}})}{A_{\text{обр, реж}}(t_{\text{отс}}) n_{\text{обр, реж}}(t_{\text{отс}}) + B_{\text{обр, реж}}(t_{\text{отс}}) n_{\text{обр, реж}}^2(t_{\text{отс}}) + C_{\text{обр, реж}}(t_{\text{отс}}) n_{\text{обр, реж}}^3(t_{\text{отс}})}, \\ M_{\text{радиац, обр, реж}}(t_{\text{отс}}) &= \frac{\eta_{\text{внешн, обр, реж}}(t_{\text{отс}})}{\eta_{\text{внешн, обр, реж}}(t_0)}.\end{aligned}$$

где $\eta_{\text{внешн}}$ – внешняя квантовая эффективность, безразмерная; $n_{\text{обр, реж}}(t_{\text{отс}})$ – эффективная плотность носителей, см^{-3} ; $A_{\text{обр, реж}}(t_{\text{отс}})$ – коэффициент нерекомбинационных потерь (процессы захвата на дефектах), с^{-1} ; $B_{\text{обр, реж}}(t_{\text{отс}})$ – коэффициент излучательной рекомбинации, $\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$; $C_{\text{обр, реж}}(t_{\text{отс}})$ – коэффициент многочастичной (ожеровской) рекомбинации, $\text{см}^6 \cdot \text{с}^{-1}$; t_0 – начальный момент наблюдения, с.

Эволюция параметров A , B , C обусловлена термически активируемыми и токозависимыми процессами, что описывается законом с экспонентой Аррениуса и многофакторным множителем стрессов:

$$\begin{aligned}\frac{d\theta_{\text{обр, реж}}}{dt} &= k_{0,0} e^{-\frac{E_{a,0}}{k_B T_{j, \text{обр, реж}}(t)}} g_0(I_{f, \text{обр, реж}}(t), H_{\text{реж}}(t)), \\ \theta_{\text{обр, реж}}(t_{\text{отс}}) &= \theta_{\text{обр, реж}}(t_0) + \int_{t_0}^{t_{\text{отс}}} \dots d\xi,\end{aligned}$$

где $\theta_{\text{обр, реж}} \in \{A_{\text{обр, реж}}, B_{\text{обр, реж}}, C_{\text{обр, реж}}\}$ – соответствующий параметр с указанными выше единицами; $k_{0,0}$ – предэкспоненциальный множитель, в единицах $\theta/\text{с}$; $E_{a,0}$ – энергия активации для процесса θ , эВ; k_B – постоянная Больцмана, эВ·К $^{-1}$; g_0 – безразмерная функция влияния электрических и климатических стрессов; $H_{\text{реж}}(t)$ – вектор внешних воздействий (влажность, ультрафиолет, вибрации), безразмерный.

Выражение для квантовой эффективности отражает фундаментальную тройственную природу рекомбинации в полупроводнике. Возрастная динами-

где $M_{\text{радиац, обр, реж}}$ – относительное поддержание радиативной составляющей (кристалл) светового потока, безразмерное; $M_{\text{люм, обр, реж}}$ – относительное поддержание люминофорной составляющей вследствие люминофорного преобразования светового потока, безразмерное; $M_{\text{опт, обр, реж}}$ – относительное светопропускание оптической части прибора по световому потоку, то есть доля суммарного (кристалльного + люминофорного) светового потока, проходящая через капсулянт, первичную/вторичную оптику, защитное стекло/рассеиватель и наружную поверхность прибора; $T_{j, \text{обр, реж}}$ – температура $p-n$ -перехода, К; $I_{f, \text{обр, реж}}$ – прямой ток через светодиодный чип/модуль данного образца, А; $\Theta_{\text{пов, обр}}$ – параметры поверхности и покрытий (шероховатость, эмиссионная способность, склонность к загрязнению) ОПСИС, безразмерные.

Относительное поддержание радиативной составляющей связывается с внешней квантовой эффективностью, зависящей от плотности носителей и трех элементарных каналов рекомбинации [15, 16]:

ка A , B , C через закон Аррениуса обеспечивает переносимость между температурными режимами и допускает калибровку по многостressesовым испытаниям.

Координаты цветности в системе СИЕ 1976 (u' , v') могут быть строго вычислены на основе спектрального распределения мощности источника, используя стандартные цветосообразующие функции и соответствующие преобразования тристимулов [17, 18].

Координаты цветности определяются из текущего спектра на выходе оптики:

$$c_{\text{обр, реж}}(t_{\text{отс}}) = \tau \left(\frac{\int S_{\text{обр, реж}}(\lambda, t_{\text{отс}}) \bar{z}(\lambda) d\lambda}{\int S_{\text{обр, реж}}(\lambda, t_{\text{отс}}) d\lambda} \right),$$

$$S_{\text{обр, реж}} = S_{\text{обр, реж}}^{\text{крист}} + S_{\text{обр, реж}}^{\text{люм}},$$

где $c_{\text{обр, реж}} = (u_{\text{обр, реж}}, v_{\text{обр, реж}})$ – координаты цветности в пространстве СИЕ 1976, безразмерные; T – преобразование координат тристимулов в пространство $u'v'$, безразмерное; $S_{\text{обр, реж}}(\lambda, t_{\text{отс}})$ – спектральная распределенная мощность, Вт·нм $^{-1}$; крист, люм – вклад кристалла и люминофора соответственно; $\bar{z}(\lambda)$ – стандартные цветосообразующие функции, безразмерные; λ – длина волны, нм.

Вычисление цветности из измеренного спектра снимает неоднозначности, связанные с раздельным мониторингом каналов и позволяет строго сопоставлять прогноз со спецификацией допусков цветности.

Наблюдаемое во времени снижение эффективности фотолюминесцентного преобразования и изменения свойств органического/силиконового связующего описываются обобщенным законом с характеристическим временем, зависящим от температуры перехода и климатических факторов:

$$\eta_{\text{люм, обр, реж}}(t_{\text{отс}}) = \eta_{\text{люм, обр, реж}}(t_0) e^{-\left[\left(\frac{t_{\text{отс}} - t_0}{\tau_{\text{люм, обр, реж}}(T_j, H_{\text{пер}})}\right)^{\beta_{\text{люм, обр}}}\right]},$$

$$\tau_{\text{люм, обр, реж}}^{-1} = A_{\text{люм, обр}} e^{\left(-\frac{E_{\text{люм, обр}}}{k_B T_j}\right)} h(RH_{\text{реж}} UV_{\text{реж}}),$$

где $\eta_{\text{люм, обр, реж}}$ – относительная квантовая эффективность люминофора, безразмерная; $\tau_{\text{люм, обр, реж}}$ – характеристическое время деградации, с; $\beta_{\text{люм, обр}}$ – показатель формы распределения времени до деградации (параметр устойчивости), безразмерный; $A_{\text{люм, обр}}$ – предэкспоненциальный множитель скорости снижения квантовой эффективности люминесцентного преобразования в системе «люминофор – связующее» для данного образца, с⁻¹; $E_{\text{люм, обр}}$ – энергия активации фотодеградации, эВ; $h(RH_{\text{реж}}, UV_{\text{реж}})$ – безразмерная функция влияния влажности и ультрафиолетового облучения.

Такая математическая форма позволяет описывать широкий спектр наблюдаемых закономерностей изменения во времени: как близкую к экспоненциальной динамику при $\beta_{\text{люм, обр}} \approx 1$, так и замедляющиеся ($0 < \beta_{\text{люм, обр}} < 1$) либо ускоряющиеся ($\beta_{\text{люм, обр}} > 1$) режимы изменения эффективности. Это согласуется с физической природой термически и светоиндуцированно инициируемых процессов в системе «люминофор – связующее» и обеспечивает корректную идентификацию параметров по данным испытаний в различных условиях.

Потери в оптических элементах и на поверхностях вследствие загрязнения, ультрафиолетового облучения и абразивного износа описываются кратной экспонентой по накопленным дозам:

$$M_{\text{опт, обр, реж}}(t_{\text{отс}}) = e^{-k_{1, \text{обр}} \Gamma_{\text{реж}}^{\text{саж}}(t_{\text{отс}}) - k_{2, \text{обр}} \Gamma_{\text{реж}}^{\text{УФ}}(t_{\text{отс}}) - k_{3, \text{обр}} \Gamma_{\text{реж}}^{\text{абр}}(t_{\text{отс}})},$$

где $k_{1, \text{обр}}$, $k_{2, \text{обр}}$, $k_{3, \text{обр}}$ – коэффициенты чувствительности материала/покрытий образца к соответствующим дозам, в единицах, обратных дозам; $\Gamma_{\text{реж}}^{\text{саж}}$ – накопленная загрязненность, г·м⁻²; $\Gamma_{\text{реж}}^{\text{УФ}}$ – накопленная ультрафиолетовая доза, Дж·м⁻²; $\Gamma_{\text{реж}}^{\text{абр}}$ – интегральная мера абразивного износа, безразмерная.

Температура p - n -перехода связывается с рассеиваемой мощностью через стационарно-нестационарную тепловую схему замещения:

$$T_{j, \text{обр, реж}}(t_{\text{отс}}) = T_{\text{ср, реж}}(t_{\text{отс}}) + R_{\theta, \text{обр}}^{\text{п-ср}} P_{\text{расс, обр, реж}}(t_{\text{отс}}) +$$

$$+ \sum_{3\text{вн}=1}^{N_3} G_{\theta, \text{обр}}^{(3\text{вн})} \Delta P_{\text{расс, обр, реж}}(t_{\text{отс}}, \tau_{\text{обр}}^{(3\text{вн})}),$$

$$P_{\text{расс, обр, реж}}(t_{\text{отс}}) = I_{f, \text{обр, реж}}(t_{\text{отс}}) U_{f, \text{обр, реж}}(t_{\text{отс}}) - \frac{\Phi_{\text{обр, реж}}(t_{\text{отс}})}{V_{\text{свет, обр}}}.$$

где $T_{\text{ср, реж}}(t_{\text{отс}})$ – температура окружающей среды в режиме, К; $R_{\theta, \text{обр}}^{\text{п-ср}}$ – тепловое сопротивление «переход – среда», К·Вт⁻¹; $G_{\theta, \text{обр}}^{(3\text{вн})}$ – вес экспоненциального звена импульсной характеристики теплового тракта, К·Вт⁻¹; $\tau_{\text{обр}}^{(3\text{вн})}$ – постоянная времени звена, с; $P_{\text{расс, уров, обр, реж}}(t_{\text{отс}})$ – рассеиваемая тепловая мощность на выбранном уровне, Вт; $\Delta P_{\text{расс, уров, обр, реж}}$ – сверточный вклад изменения рассеиваемой мощности, в системе по уровням (кристалл, модуль, корпус) Вт; I_f , U_f – ток и прямое напряжение, А и В; $V_{\text{свет, обр}}$ – эквивалентный световой коэффициент перевода «люмен → ватт оптической мощности», лм·Вт⁻¹.

Для ресурсоопределяющих элементов светодиодного драйвера, представляющего собой узел питания, интенсивность отказов описывается термически активируемой зависимостью с учетом электрической нагрузки и климатических факторов:

$$\lambda_{\text{драйв, обр, реж}}(t_{\text{отс}}) = \lambda_{0, \text{обр}} \left(\frac{U_{\text{реж}}^{\text{пульс}}(t_{\text{отс}})}{U_0} \right)^{m_{\text{обр}}} \times$$

$$\times \left(\frac{RH_{\text{реж}}(t_{\text{отс}})}{RH_0} \right)^{n_{\text{обр}}} e^{-\frac{E_{a, \text{драйв, обр}}}{k_B} \left(\frac{1}{T_{\text{опор}}} - \frac{1}{T_{\text{конд, обр, реж}}(t_{\text{отс}})} \right)},$$

$$R_{\text{драйв, обр, реж}}(t_{\text{отс}}) = e^{-\sum_{\text{отс}'=1}^{\text{отс}} \lambda_{\text{драйв, обр, реж}}(t_{\text{отс}'}) \Delta t_{\text{отс}'}}.$$

где $\lambda_{\text{драйв, обр, реж}}$ – интенсивность отказов драйвера, ч⁻¹; $\lambda_{0, \text{обр}}$ – базовый уровень интенсивности для образца, ч⁻¹; $U_{\text{реж}}^{\text{пульс}}(t_{\text{отс}})$ – амплитуда пульсаций выходного напряжения, В; U_0 – опорная амплитуда пульсаций, В; $m_{\text{обр}}$, $n_{\text{обр}}$ – показатели чувствительности к пульсациям и влажности, безразмерные; $RH_{\text{реж}}(t_{\text{отс}})$ – относительная влажность, доля единицы; RH_0 – опорная влажность, доля; $E_{a, \text{драйв, обр}}$ – энергия активации деградации ресурсоопределяющего элемента узла питания, эВ; $T_{\text{опор}}$ – опорная температура, К; $T_{\text{конд, обр, реж}}(t_{\text{отс}})$ – температура корпуса конденсатора, К; $\Delta t_{\text{отс}}$ – шаг дискретизации по времени, ч.

Описанное выше выражение соответствует принятой в инженерной практике модели ускоренного старения компонентов по температуре и влажности (температурачная часть по закону Аррениуса, влажно-

стная – по типу зависимости Пека) и позволяет явно учитывать влияние пульсаций тока и напряжения на долговечность узла питания, в первую очередь на ресурс ресурсоопределяющих элементов (например, выходного электролитического конденсатора).

Функция надежности изделия в целом (на уровне готового осветительного прибора) формируется из частных функций надежности по каждому механизму отказа (поддержание светового потока, стабильность цветности, уровень пульсаций, работоспособность узла питания) с учетом возможной статистической зависимости между этими механизмами. По структуре принятия отказа изделие рассматривается как объект последовательного типа: нарушение любого из указанных критериев означает отказ изделия. Поэтому агрегирование выполняется через совместную вероятность одновременного выполнения всех критериев (то есть через модель совместного распределения частных показателей), а не через простое произведение. В случае независимости механизмов допускается произведение частных функций надежности; при наличии зависимости используется мо-

дель совместной вероятности (например, параметризованная функция сцепления), калибруемая по данным испытаний и эксплуатации с учетом возможной статистической зависимости:

$$R_{\text{сист, обр, реж}}(t_{\text{отс}}) = C(R_{\Phi, \text{обр, реж}}(t_{\text{отс}}), R_{c, \text{обр, реж}}(t_{\text{отс}}), R_{F, \text{обр, реж}}(t_{\text{отс}}), R_{\text{драйв, обр, реж}}(t_{\text{отс}})),$$

где $R_{\text{сист, обр, реж}}$ – системная функция надежности, безразмерная; $R_{\Phi, \text{обр, реж}}$, $R_{c, \text{обр, реж}}$, $R_{F, \text{обр, реж}}$ – частные функции надежности по критериям светового потока, цветности и пульсаций; получаются из данных испытаний по временем достижения порога или по модели деградации; $R_{\text{драйв, обр, реж}}$ – частная функция надежности узла питания (по времени отказа узла питания/ресурсоопределяющего элемента); C – оператор совместного учета зависимости между критериями (совместная вероятность одновременного выполнения всех критериев), безразмерный.

Для сопоставления ускоренных испытаний с эксплуатационными условиями вводится приведенное время деградации:

$$t_{\text{обр, реж}}^{\text{прив}}(t_{\text{отс}}) \sum_{\text{отс}'=1}^{\text{отс}} \Lambda\left(T_{j, \text{обр, реж}}(t_{\text{отс}}), I_{f, \text{обр, реж}}(t_{\text{отс}}), RH_{\text{реж}}(t_{\text{отс}}), UV_{\text{реж}}(t_{\text{отс}})\right) \Delta t_{\text{отс}'},$$

$$\Lambda = e^{-\frac{E_{a, \text{эфф, обр}}}{k_b} \left(\frac{1}{T_{\text{опор}}} - \frac{1}{T_{j, \text{обр, реж}}(t_{\text{отс}})} \right)} I_{f, \text{обр, реж}}^p RH_{\text{реж}}^q UV_{\text{реж}}^r, \frac{\Phi}{\Phi_0} = \Psi(t^{\text{прив}}),$$

где $t_{\text{обр, реж}}^{\text{прив}}(t_{\text{отс}})$ – приведённое время деградации для образца и режима, с; Λ – коэффициент ускорения деградации, безразмерный; $E_{a, \text{эфф, обр}}$ – эффективная энергия активации образца, эВ; $T_{\text{опор}}$ – опорная температура, К; $I_{f, \text{обр, реж}}$ – прямой ток через светодиодный модуль данного образца, А; $RH_{\text{реж}}$ – относительная влажность в зоне образца, доля; $UV_{\text{реж}}$ – нормированная ультрафиолетовая нагрузка либо удельная доза, безразмерная или $\text{Дж}\cdot\text{м}^{-2}$ (после нормировки); $p_{\text{обр}}, q_{\text{обр}}, r_{\text{обр}}$ – показатели чувствительности образца к току, влажности и УФ, безразмерные; Ψ – сводная опорная кривая деградации по приведенному времени, безразмерная, определяется как единственная монотонно не возрастающая зависимость нормированного показателя качества от приведенного времени, согласующая между собой наблюдения, полученные в разных режимах после приведения времени по ранее оцененным параметрам чувствительности и энергии активации

Показатели $p_{\text{обр}}, q_{\text{обр}}, r_{\text{обр}}$ оцениваются по результатам многофакторных ускоренных испытаний, в которых уровни воздействий нормированы на опорные значения [19, 20]. Для каждого сочетания факторов определяется скорость изменения контролируемого показателя качества на начальном участке наблюдений. При фиксированной температуре p - n -перехода логарифм этой скорости аппроксимируется линейной функцией логарифмов нормированных факторов; коэффициенты при соответствующих логарифмах интерпретируются как оценки p , q и r . Эффективная энергия активации вычисляется из темпе-

ратурной зависимости той же скорости на основе линейной регрессии логарифма скорости на обратную температуру.

Для целей управления качеством вводится интегральная оценка ожидаемой стоимости отказов на горизонте гарантийных обязательств:

$$P_{\text{гарант}} = \sum_{t_{\text{отс}} \leq T_{\text{гарант}}} (1 - \bar{R}_{\text{сист}}(t_{\text{отс}})) w(t_{\text{отс}}) \Delta t_{\text{отс}},$$

$$\bar{R}_{\text{сист}}(t_{\text{отс}}) =$$

$$= \frac{1}{|M_{\text{обр}}||M_{\text{эксп}}|} \sum_{\text{обр} \in M_{\text{обр}}} \sum_{\text{реж} \in M_{\text{эксп}}} R_{\text{сист, обр, реж}}(t_{\text{отс}}),$$

где $P_{\text{гарант}}$ – ожидаемая стоимость гарантийных отказов, условные денежные единицы; $T_{\text{гарант}}$ – длительность гарантийного периода, ч; $w(t_{\text{отс}})$ – весовая функция стоимости отказа во времени (например, возрастающая функция по мере эксплуатации), $\text{у.е.}\cdot\text{ч}^{-1}$; $\bar{R}_{\text{сист}}(t_{\text{отс}})$ – усредненная по выборке образцов и набору эксплуатационных сценариев функция надежности, безразмерная; $M_{\text{обр}}$ – множество образцов; $M_{\text{эксп}}$ – множество эксплуатационных режимов.

Практическая идентификация параметров модели проводится по совокупности измерений: световой поток и спектр при помощи интегрирующей сферы, координаты цветности, метрика пульсаций, температура перехода (джанкшен-термометрия, или метод мерного коэффициента напряжения), а также электрические характеристики. Для компонентного уровня (образцы кристаллов/модулей) используется

набор фиксированных токов и температур; для системного уровня – реальные тепловые пути, оптика и драйвер. Прогноз переносится на эксплуатационные условия через приведенное время по описанной выше формуле.

Для обработки временных рядов допускается использование модели состояния с фильтрацией (например, по методу Калмана в расширенной или несмещенной постановке либо частично-аппаратной фильтрации для нелинейных случаев) при наложении физически обоснованных ограничений монотонности для оптических потерь и деградации люминофора. Такой подход повышает устойчивость оценок при коротких рядах и снижает воздействие измерительного шума, сохраняя интерпретируемость введенных параметров.

Моделирование и анализ результатов

Для проверки работоспособности предложенной концепции прогноза и переноса результатов ускоренных испытаний на эксплуатационные условия выполнено численное моделирование производственного контура «испытания – приведение времени – опорная кривая – частные функции надежности – надежность изделия». Моделирование реализовано в среде Python 3.12 с использованием NumPy и Matplotlib; расчеты проводились на равномерной временной сетке с шагом $\Delta t = 100$ ч при длительности серии $t_{\max} = 1,2 \cdot 10^4$ ч на режим и повторялись для набора режимов, перечисленных ниже. Использовались экспериментальные данные ускоренных испытаний, выполненных на одной партии из 25 светодиодных осветительных приборов встраиваемого типа (точечный круглый светильник в подвесной потолок) мощностью 12 Вт каждый, предназначенных для работы от сети переменного тока 220 В. Каждый осветительный прибор был оснащен одним светодиодным модулем на базе белых InGaN-излучателей, рассчитанным на ток 0,85 А в зависимости от режима. Расчеты деградации выполнялись на уровне p - n -перехода внутри модуля в соответствии с физической структурой модели. Конструкция прибора включала алюминиевый корпус с теплоотводом, линзированную первичную оптику, вторичный поликарбонатный рассеиватель, защитное стекло, а также встроенный источник питания (светодиодный драйвер). Испытания проводились в термобарокамере с независимым управлением температурой, влажностью и УФ-нагрузкой. Каждый образец эксплуатировался на фиксированном режиме в течение 12 000 часов с шагом дискретизации $\Delta t = 100$ с. Регистрировались параметры светового потока, координат цветности (u' , v'), индекса пульсаций, параметры прямого тока (I_p) и напряжения (U), относительная влажность (RH), нормированная накопленная УФ-нагрузка (UV).

В таблице представлены параметры испытательных режимов, используемые при моделировании, которые также применялись для вычисления коэффициента ускорения и построения шкалы приведенного времени, на которой согласуются временные ряды показателей качества; опорный режим служит

базой нормирования, а вариативные режимы – для оценивания чувствительностей к току, влажности и УФ-нагрузке и для проверки переносимости опорной кривой.

При проведении численного моделирования, ориентированного на верификацию концепции, использовалась часть параметров модели, наиболее существенных для демонстрации работоспособности предложенного подхода к оценке системной надежности и переносу результатов ускоренных испытаний. Представленная численная модель обладает модульной структурой, где каждый компонент (деградация кристалла, люминофора, оптики, драйвера) может быть использован независимо. Для демонстрации работоспособности предложенного подхода к оценке системной надежности и метода приведения времени достаточно рассмотреть ключевые компоненты, определяющие динамику деградации в условиях варьируемых факторов – температуры, тока, влажности и УФ-нагрузки. Остальные параметры модели, не использованные в данном численном эксперименте, сохраняют свою значимость при адаптации модели к конкретным типам осветительных приборов и условиям эксплуатации и могут быть активированы при наличии соответствующих экспериментальных данных без изменения общей структуры модели.

Параметры испытательных режимов для расчета коэффициента ускорения и условия моделирования

Test mode parameters for calculating the acceleration coefficient and simulation conditions

Режим	(T_p) , К	(I_p) , А	(RH) , доля	(UV) , норм
R1 (опорный)	313	0,70	0,50	1,0
R2	333	0,80	0,50	1,0
R3	333	0,90	0,70	1,0
R4	353	0,90	0,70	1,2
R5	333	0,60	0,30	0,8

В каждом из пяти (R1–R5) испытательных режимов, приведенных в таблице, исследовались по 5 осветительных приборов. Опорный режим R1 использовался для нормирования и построения сводной опорной кривой деградации светового потока. Нормированная накопленная ультрафиолетовая доза $UV(t)$ – рассчитывалась на основе измерений плотности УФ-излучения в диапазоне 280...400 нм с использованием УФ-сенсора, с последующей временной интеграцией и нормированием на опорное значение в режиме R1.

Остальные режимы применялись для оценки чувствительности модели к вариациям параметров внешней нагрузки и верификации переносимости временной зависимости на шкале приведенного времени. Полученные ряды нормированных характеристик использовались для построения частных функций надежности и последующего агрегирования интегральной функции отказа изделия.

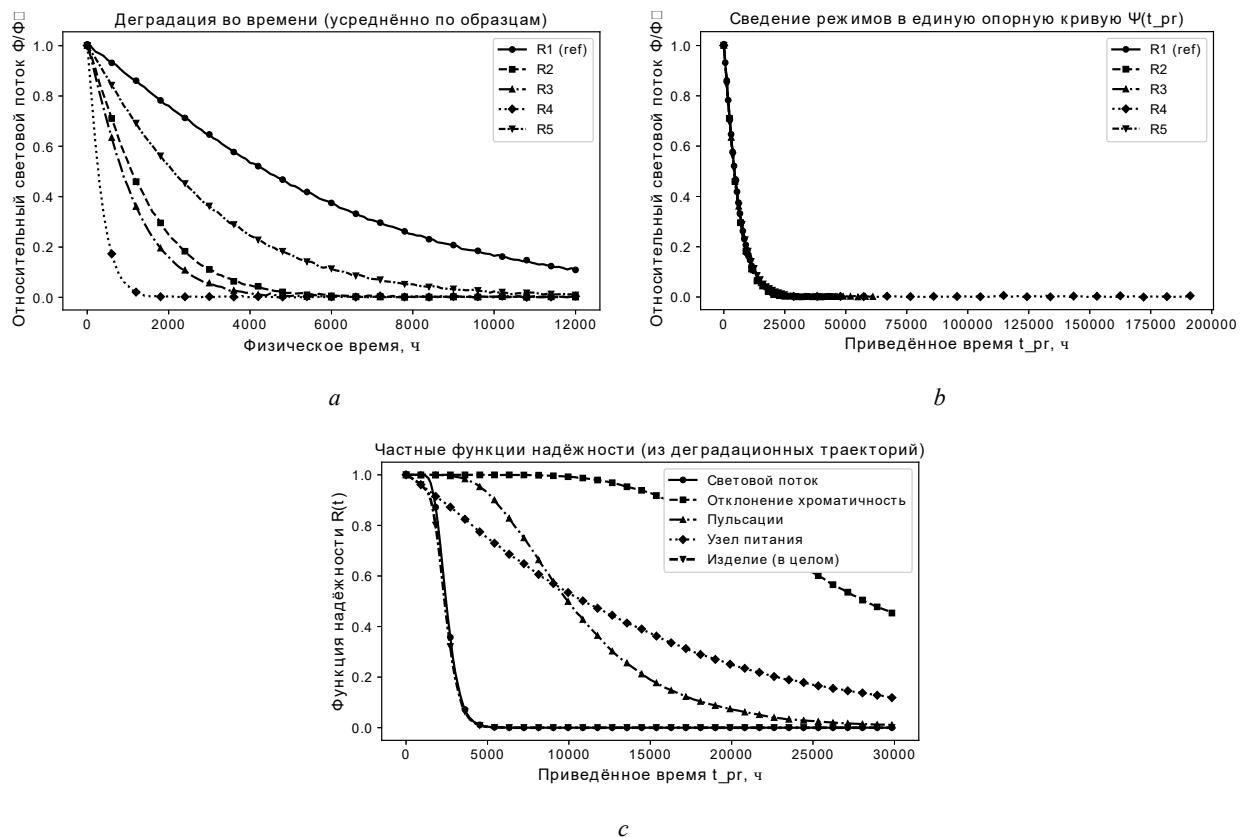
Для свертки режимов в единую шкалу использовалась конструкция приведенного времени с температурной частью по закону Аррениуса и степенными

показателями чувствительности к электрической и климатической нагрузке. Опорные значения зафиксированы как $T_{\text{опор}} = 313\text{K}$ (40°C); $I_0 = 0,7\text{A}$; $RH_0 = 0,50$; $UV_0 = 1,0$. Эффективная энергия активации и показатели чувствительности ($E_{\text{a, эффективн}}, p, q, r$) задавались по результатам многофакторных испытаний и далее принимались постоянными для данного типоразмера изделия на интервале условий моделирования. Нормированный световой поток Φ/Φ_0 сводился на опорную кривую $\Psi(t_{\text{прив}})$, трактуемую как монотонно не возрастающую зависимость от приведенного времени; в расчетах использована экспоненциально-степенная аппроксимация, что обеспечивает корректное описание как близкой к экспоненциальной, так и «растянутой» кинетики. Проверка переносимости выполнялась в отложенном режиме: точки «приведенное время – Φ/Φ_0 » должны укладываться в допуск относительно Ψ , что подтверждает инвариантность формы и корректность разнесения «форма/ускорение».

Порог по световому потоку задан уровнем поддержания L_{70} ($\Phi/\Phi_0 = 0,70$); для цветности использован допустимый сдвиг в uv' по техническим условиям, для пульсаций – предельно допустимое значение

принятой метрики, для узла питания – порог исправности по электрическим показателям. Частные функции надежности по критериям определялись как вероятность невыполнения порога к моменту приведенного времени $t_{\text{прив}}$ для рассматриваемого сценария условий. Приведенное время в данном контексте – это пересчитанная шкала времени, в которой каждый отрезок реального времени «взвешивается» по степени жесткости условий относительно фиксированного опорного режима. Идея простая: если в данный момент изделие работает тяжелее опорных условий, этот интервал засчитывается как более длинный, если легче – как более короткий. В итоге получаем эквивалент «сколько времени это было бы при опорных условиях».

На рисунке ниже представлены результаты моделирования деградации параметров исследуемого осветительного прибора. Положительная оценка срока службы изделия в целом трактовалась как вероятность одновременного выполнения всех критериев; при отсутствии статистически значимой зависимости между механизмами использовано произведение частных функций (последовательный критерий), при наличии общей причины допускается учет совместности по наблюдаемому фактору.



Результаты моделирования деградации параметров исследуемого осветительного прибора: *a* – снижение светового потока во времени; *b* – приведение времени и опорная убывающая кривая деградации нормированного показателя со временем; *c* – частные функции надежности по критериям (поддержание светового потока, стабильность координат цветности, уровень пульсаций, работоспособность узла питания) и интегральная надежность изделия при последовательном критерии отказа

Results of modeling the degradation of the parameters of the lighting device under study: *a* - decrease in luminous flux over time; *b* - time conversion and reference decreasing curve of the normalized indicator degradation over time; *c* - partial reliability functions according to criteria (maintenance of luminous flux, stability of color coordinates, ripple level, power supply unit performance) and integral reliability of the product according to the sequential failure criterion

В части (a) упорядочение кривых соответствует следующей нагрузке режимов. Наиболее быстрый спад наблюдается при сочетании повышенной температуры перехода, тока, влажности и УФ-нагрузки (R4), наименьший – при щадящих параметрах (R5). Это подтверждает, что сравнение в физических часах ведет к разному темпу «старения» и не пригодно для переноса к эксплуатации без пересчета.

В части (b) те же данные после приведения времени согласуются на одной монотонной опорной зависимости в пределах допуска, что валидирует разнесение «форма деградации – факторы ускорения». Практически важно, что пороговые уровни (например, поддержание 70%-го светового потока) считаются единожды на этой кривой в приведенном времени, а различие режимов сводится к горизонтальному сдвигу по шкале: режим R4 достигает порога раньше опорного, R5 – позже, причем соотношения сроков строго определяются коэффициентом ускорения. Тем самым перенос результатов ускоренных испытаний к реальным условиям не требует переобучения формы зависимости.

В части (c) частные функции надежности показывают, какая подсистема лимитирует ресурс на разных горизонтах. На раннем времени ограничение задается порогом по световому потоку (момент достижения уровня поддержания), на среднем чаще проявляется стабильность цветности и уровень пульсаций, на длинном – надежность узла питания. Интегральная кривая расположена ниже каждой из частных и следует за «худшей» из них, что позволяет адресно расставлять приоритеты. Если системная кривая идет ближе к функции надежности узла питания, целесообразно снижать тепловую и пульсационную нагрузку драйвера; если ближе к цветности – работать с рецептурой «люминофор – связующее» и УФ-защитой оптики; если ближе к световому потоку – оптимизировать теплопуть и токовую политику. Таким образом, три подрисунка совместно дают воспроизводимый переход от наблюдаемых рядов к эксплуатационным срокам и показывают, какое звено конструкции определяет ресурс в интересующем диапазоне времени.

Каждая частная функция надежности получена на основе экспериментально зафиксированной траектории соответствующего параметра (световой поток, координаты цветности, индекс пульсаций, стабильность выходного напряжения драйвера) с пороговыми значениями, определяющими момент функционального отказа по каждому механизму. Таким образом, даже те параметры, которые не использовались для построения шкалы приведенного времени, участвуют в расчете надежности изделия как части интегральной модели. Это подтверждает необходимость полной формализации всех механизмов деградации на этапе постановки задачи и оправдывает использование широкого набора характеристик в математическом описании модели.

Выводы

В результате проведенного исследования разработана и научно обоснована многоуровневая модель

для оценки ресурса светодиодных осветительных приборов. Ключевой особенностью модели является учет системного характера эксплуатации и сопряженной деградации ключевых компонентов: кристалла, люминофорно-связующей системы, оптического тракта и источника питания. Модель интегрирует ключевые метрики, определяющие эксплуатационный ресурс изделия: сохранение светового потока, стабильность цветовых характеристик и уровень световых пульсаций, а также учитывает надежность драйвера как критического, ресурсоопределяющего узла. По результатам численного моделирования получены конкретные прогнозные оценки: достижение порога отказа по световому потоку ($\Phi/\Phi_0 < 0,7$) в опорном режиме соответствует приведенному времени $t_{\text{прив}} \approx 24500$ ч, по хроматичности $t_{\text{прив}} \approx 16500$ ч, по пульсациям $t_{\text{прив}} \approx 12800$ ч, а по драйверу $t_{\text{прив}} \approx 11500$ ч. Совокупная функция надежности изделия достигает уровня $R(t_{\text{прив}}) = 0,5$ на горизонте эксплуатации порядка 10500 ч, что определяет типовой ресурс прибора по совокупности критериев отказа. Полученные значения светового потока, цветности и пульсаций, пересчитанные по шкале приведенного времени, укладываются в доверительную зону опорной функции $\Psi(t_{\text{прив}})$, что подтверждает корректность выбранной модели приведения и устойчивость к вариациям температурной, электрической, влажностной и УФ-нагрузки.

Результаты работы подтверждают достижение поставленной цели исследования.

Предложенная концепция объединяет:

- раздельную, физически мотивированную факторизацию источников деградации;
- перенос между режимами через приведенное время с явной температурно-климатической зависимостью;
- системную агрегацию механизмов с учетом возможной зависимости;
- интегральную оценку гарантийного риска для принятия решений в контуре управления качеством.

Такой подход обеспечивает как прозрачность и воспроизводимость расчетов для целей серийного контроля, так и переносимость между партиями и условиями эксплуатации.

Библиографические ссылки

1. Ahmad A.E.-B.A., Ghazal M.G.M. (2020) Exponentiated additive Weibull distribution // Reliability Engineering & System Safety, vol. 193, 106663. DOI: 10.1016/j.ress.2019.106663
2. Albassam M., Ahsan-Ul-Haq M., Aslam M. (2023) Weibull distribution under indeterminacy with applications // AIMS Mathematics, vol. 8, pp. 10745–10757. DOI: 10.3934/math.2023545
3. ANSI/IES TM-28-20. Projecting Long-Term Luminous Flux Maintenance of LED Lamps and Luminaires. New York: Illuminating Engineering Society, 2020 (Technical Memorandum).
4. Cao Y., Yuan W., Chen W., Li M., Fan J., Zhang G. (2020) Predicting of luminous flux for a LED array using artificial neural network // IEEE Proceedings of the 2020: 21st International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and

- Microsystems (EuroSimE), Cracow. DOI: 10.1109/EuroSimE48426.2020.9152620
5. Zhou Z.H., Ma J.M., Liu Q.Q., Zeng Q., Tian X. (2022) A kind of fast Gaussian particle filter based on artificial fish school algorithm // *Journal of Control and Decision*, vol. 9, pp. 175–185. DOI: 10.1080/23307706.2021.1934129
6. Кузьменко В. П., Солёный С. В. Модель предиктивного обслуживания для управления качеством сетей светодиодного освещения // Вестник ИжГТУ им. Г. И. Носова. 2023. № 3 [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/model-prediktivnogo-obsluzhivaniya-dlya-upravleniya-kachestvom-setey-svetodiodnogo-osvescheniya> (дата обращения: 03.09.2025).
7. Кузьменко В. П., Солёный С. В., Солёная О. Я. Управление качеством светодиодных осветительных приборов : монография. Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный аэрокосмического приборостроения (ГУАП), 2024. 184 с. ISBN 978-5-8088-1907-8
8. Кораблев В. А., Минкин Д. А. Исследование влияния теплового режима на интенсивность излучения полупроводниковых источников света // Приборостроение. 2025. № 4 [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyanija-teplovogo-rezhima-na-intensivnost-izlucheniya-poluprovodnikovyh-istochnikov-sveta> (дата обращения: 03.09.2025).
9. Rocchetta R., Dersin P., Perrone E. (2024) A survey on LED Prognostics and Health Management and uncertainty reduction // *Microelectronics Reliability*, vol. 157, 115399. DOI: 10.1016/j.microrel.2024.115399
10. Чирков О. Н., Антиликаторов А. Б., Шкаровский К. М., Тамбовцев М. Н. Оптимизация оценки качества полупроводниковых пластин с помощью нейротехнологий CNN // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2025. Т. 21, № 1. С. 81–87. DOI: 10.36622/1729-6501.2025.21.1.012
11. La Q.T., Vintr Z., Vališ D., Žák L., Kohl Z. (2025) Reliability testing and machine learning approach for modelling high-power light-emitting diode reliability // *MATEC Web of Conferences*, vol. 413, 03005. DOI: 10.1051/matecconf/202541303005
12. Tan K.-Z., Lee S.-K., Low H.-C. (2021) LED lifetime prediction under thermal-electrical stress // *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, vol. 21, no. 3, pp. 310–319. DOI: 10.1109/TDMR.2021.3085579
13. Палабугин М. В., Калюжный Д. Г. Современное состояние лазерных технологий в области нанесения функциональных покрытий // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2023. Т. 26, № 1. С. 13–22. DOI: 10.22213/2413-1172-2023-1-13-22
14. Кузьменко В. П. Контроль качества светодиодных источников света на основе фрактального моделирования температурного поля // Известия Самарского научного центра РАН. 2025. Т. 27, № 3. С. 99–109. DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3-99-109
15. Vyas R., Navin K., Tripathi G.K., Kurchania R. (2021) Structural, magnetic, photocatalytic, and electrochemical studies of the mesoporous nickel oxide (NiO) nanostructures // *Optik*, vol. 231, 166433. DOI: 10.1016/j.jleo.2021.166433
16. Маняхин Ф. И., Мокрецова Л. О. Закономерность снижения квантового выхода светодиодов с квантовыми ямами при длительном протекании тока с позиции модели ABC // Светотехника. 2021. № 3. С. 29–35.
17. Электрофизические причины ограничения эксплуатационных режимов светодиодов с квантовыми ямами / Ф. И. Маняхин, Л. О. Мокрецова, А. А. Скворцов, Д. О. Варламов // Светотехника. 2025. № 3. С. 20–26.
18. Lokesh J., Kini S., Padmasali A. (2025) Color-Based Lifetime Estimation of LEDs Using Spectral Power Distribution Prediction Through Analytical and Machine Learning Models // *IEEE Access*, vol. 13, 61665–61674. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3558559
19. Ke X., Wang X., Qin H., Liang J. (2023) Experimental Study on Chromaticity Control in Visible Light Communication Systems // *Photonics*, vol. 10, 1013. DOI: 10.3390/photonics10091013
20. Ibrahim M.S., Fan J., Yung W.K.C., Jing Z., Fan X., Van Driel W., Zhang G. (2021) System-level reliability assessment for high-power light-emitting diode lamp based on a Bayesian network method // *Measurement*, vol. 176, 109191. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.109191

References

1. Ahmad A.E.-B.A., Ghazal M.G.M. (2020) Exponentiated additive Weibull distribution. *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 193, 106663. DOI: 10.1016/j.ress.2019.106663
2. Albassam M., Ahsan-Ul-Haq M., Aslam M. (2023) Weibull distribution under indeterminacy with applications. *AIMS Mathematics*, vol. 8, pp. 10745–10757. DOI: 10.3934/math.2023545
3. ANSI/IES TM-28-20. Projecting Long-Term Luminous Flux Maintenance of LED Lamps and Luminaires. New York: Illuminating Engineering Society, 2020 (Technical Memorandum).
4. Cao Y., Yuan W., Chen W., Li M., Fan J., Zhang G. (2020) Predicting of luminous flux for an LED array using artificial neural network. *IEEE Proc. 21st Int. Conf. on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE)*, Cracow, 2020. DOI: 10.1109/EuroSimE48426.2020.9152620
5. Zhou Z.H., Ma J.M., Liu Q.Q., Zeng Q., Tian X. (2022) A kind of fast Gaussian particle filter based on artificial fish school algorithm. *Journal of Control and Decision*, vol. 9, pp. 175–185. DOI: 10.1080/23307706.2021.1934129
6. Кузменко В.П., Солонин С.В. (2023) [Predictive maintenance model for quality management of LED lighting networks]. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, no. 3 [Electronic resource]. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/model-prediktivnogo-obsluzhivaniya-dlya-upravleniya-kachestvom-setey-svetodiodnogo-osvescheniya> (accessed: 22.10.2025) (in Russ.).
7. Кузменко В.П., Солонин С.В., Солонина О.Я. (2024) [Quality Management of LED Lighting Devices]. St. Petersburg: Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUA), 2024, 184 p. (in Russ.)
8. Кораблев В.А., Минкин Д.А. (2025) [Study of the effect of thermal regime on the radiation intensity of semiconductor light sources]. *Priborostroenie (Instrument Making)*, no. 4 [Electronic resource]. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyanija-teplovogo-rezhima-na-intensivnost-izlucheniya-poluprovodnikovyh-istochnikov-sveta> (accessed: 03.09.2025) (in Russ.)
9. Rocchetta R., Dersin P., Perrone E. (2024) A survey on LED Prognostics and Health Management and uncertainty reduction. *Microelectronics Reliability*, 157, 115399. DOI: 10.1016/j.microrel.2024.115399
10. Чирков О.Н., Антиликаторов А.Б., Шкаровский К.М., Тамбовцев М.Н. (2025) [Optimization of semiconductor wafer quality assessment using CNN neurotechnologies]. *Vestnik of Voronezh State Technical University*, vol. 21, no. 1, pp. 81–87. DOI: 10.36622/1729-6501.2025.21.1.012 (in Russ.).

11. La Q.T., Vintr Z., Vališ D., Žák L., Kohl Z. (2025) Reliability testing and machine learning approach for modelling high-power light-emitting diode reliability. *MATEC Web of Conferences*, 413, 03005. DOI: 10.1051/matecconf/202541303005
12. Tan K.-Z., Lee S.-K., Low H.-C. (2021) LED lifetime prediction under thermal-electrical stress. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, vol. 21, no. 3, pp. 310-319. DOI: 10.1109/TDMR.2021.3085579
13. Palabugin M.V., Kalyuzhny D.G. (2023) [Current state of laser technologies for functional coatings]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 26, no. 1, pp. 13-22. DOI: 10.22213/2413-1172-2023-1-13-22 (in Russ.).
14. Kuzmenko V.P. (2025) [Quality control of LED light sources based on fractal modeling of the temperature field]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, vol. 27, no. 3, pp. 99-109. DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3-99-109 (in Russ.).
15. Vyas R., Navin K., Tripathi G.K., Kurchania R. (2021) Structural, magnetic, photocatalytic, and electrochemical studies of mesoporous nickel oxide (NiO) nanostructures. *Optik*, 231, 166433. DOI: 10.1016/j.ijleo.2021.166433
16. Manyakhin F.I., Mokretsova L.O. (2021) [Regularity of quantum efficiency reduction in QW LEDs under prolonged current from the ABC-model standpoint]. *Svetotekhnika (Light & Engineering)*, no. 3, pp. 29-35 (in Russ.).
17. Manyakhin F.I., Mokretsova L.O., Skvortsov A.A., Varlamov D.O. (2025) [Electrophysical causes limiting operating modes of quantum-well LEDs]. *Svetotekhnika (Light & Engineering)*, no. 3, pp. 20-26 (in Russ.).
18. Lokesh J., Kini S., Padmasali A. (2025) Color-Based Lifetime Estimation of LEDs Using Spectral Power Distribution Prediction Through Analytical and Machine Learning Models. *IEEE Access*, 13, 61665-61674. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3558559
19. Ke X., Wang X., Qin H., Liang J. (2023) Experimental study on chromaticity control in visible light communication systems. *Photonics*, 10, 1013. DOI: 10.3390/photonics10091013
20. Ibrahim M.S., Fan J., Yung W.K.C., Jing Z., Fan X., Van Driel W., Zhang G. (2021) System-level reliability assessment for high-power LED lamp based on a Bayesian network method. *Measurement*, 176, 109191. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.109191

Evaluation Model for LED Lighting Device Service Life in Terms of System Operating Conditions

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

This paper presents the concept of a multi-level model for service life predicting of lighting devices based on semiconductor light sources, with respect to systemic operational factors and the degradation of the associated components. Unlike standard assessment methods limited to analyzing the reduction the light-emitting diode luminous flux, the proposed approach also considers shifts in chromaticity coordinates, light emission flicker levels, and the failure resistance of the power supply unit. The model is grounded in physically justified laws and includes the degradation evaluation in the crystal structure, photoluminescent materials, optical elements, and life-limiting components of the power unit. Transition from accelerated testing to actual operating conditions using reference time, calculated on thermal, electrical, humidity, and ultraviolet exposure level basis is the key element. The integral reliability function is generated by considering partial failure criteria, allowing statistical dependencies between degradation mechanisms to be taken into account. The model is validated by experimental data obtained from various stress conditions runoff. Numerical modeling results, confirming the validity of the methodology for aligning degradation patterns and acceleration factors, are provided. The proposed approach ensures both result reproducibility for serial quality control purposes and applicability in estimating expected warranty-related costs. The developed modeling concept can be integrated into quality management practices in lighting device manufacturing to enhance service life prediction accuracy and identify structurally vulnerable components at the design stage.

Keywords: LED lighting devices, LED light source, quality assessment, service life, product life cycle modeling.

Получено 09.09.2025

Образец цитирования

Кузьменко В. П. Модель оценки срока службы светоиздийных 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

For Citation

Kuzmenko V.P. (2025) [Evaluation Model for LED Lighting Device Service Life in Terms of System Operating Conditions]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 28, no. 4, pp. 12-21. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-4-12-21 (in Russ.).