

УДК 658.5.012.14

DOI: 10.22213/2413-1172-2026-3-22-32

Винеровская модель прогнозирования ресурса светодиодных источников света по деградации нормируемого показателя качества при ускоренных испытаниях

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

Представлена модель прогнозирования ресурса светодиодных источников света по деградации нормируемого показателя качества при ускоренных испытаниях на основе нелинейного процесса Винера со случайным коэффициентом дрейфа и учетом совместного действия температуры, относительной влажности и прямого питающего тока. Параметры разработанной модели прогнозирования ресурса определялись методом максимального правдоподобия, а точки переходов между стадиями изменения нелинейности и тренда деградации – минимизацией байесовского информационного критерия Шварца. Расчетная реализация и валидация модели выполнены по данным многострессовых ускоренных испытаний в пяти различных режимах воздействия температуры, влажности и питающего тока, в результате которых выделено три стадии изменения нелинейности и тренда деградации показателя качества светодиодного источника света. Получены значения показателя нелинейности тренда деградации 0,67...0,93 для первой стадии, 1,23...1,35 – для второй и 0,87...1,05 для третьей стадии. Дополнительно произведено сравнение линейного и нелинейного трендов деградации через среднюю абсолютную ошибку прогноза, которая для нелинейного варианта не превышала $1,9 \cdot 10^{-2}$, а для линейного – достигала $4,0 \cdot 10^{-2}$. Полученные результаты подтверждают применимость модели для прогнозирования ресурса светодиодных источников света по нормируемому показателю качества по данным ускоренных испытаний.

Ключевые слова: светодиодный источник света, прогнозирование ресурса, данные ускоренных испытаний, нормируемый показатель качества.

Введение

Светодиодные источники света (СИС) занимают доминирующее положение на мировом рынке осветительной продукции, вытесняя традиционные источники света вследствие высокой световой отдачи, более низкого энергопотребления и гибких способов управления световым потоком. Ключевым преимуществом, на котором основываются конкурентные предложения производителей СИС, является декларируемый ресурс до 50000 и более часов. При этом выход СИС из строя носит, как правило, деградационный характер – световой поток изделия снижается постепенно вплоть до достижения нормативного порога отказа, а не резко прекращается [1–3]. Именно поэтому в нормативных документах IEC 62717 и LM-80 понятие ресурса СИС нормируется через критерий L_{70} – наработку, при которой относительный световой поток снижается до 0,70 от начального значения.

Нормативные процедуры оценки качества изделия, регламентированные вышеописанными документами, предполагают проведение длительных испытаний СИС (не менее 6 000 ч) при фиксированных режимах воздействия температуры и питающего тока, после чего применяется экспоненциальная модель прогнозирования деградации нормируемого показателя качества (в данном случае это световой поток). Однако в рамках такого подхода не в полной мере получается учитывать явления стохастического разброса индивидуальных траекторий деградации нормируемого показателя качества изделия, а также нелинейного характера изменения скорости накопления деградации данного показателя во времени

и стадий деградации, на котором находится изделие к конкретному моменту эксплуатации [4–6].

Ограниченность стандартных методов прогнозирования деградации нормируемых показателей качества СИС стимулирует интерес и необходимость к развитию более сложных вероятностных моделей, обеспечивающих описание детерминированного тренда и стохастических отклонений процесса деградации СИС.

Среди вероятностных моделей деградации нормируемых показателей качества изделий в современных исследованиях широко применяются модели на основе процесса гамма-распределения, обратного гауссового процесса и процесса Винера [7, 8].

В случае с СИС наибольший интерес представляет процесс моделирования именно на основе нелинейного процесса Винера, поскольку он позволяет описывать случайные флуктуации траектории процесса деградации и определять распределение наработки до достижения предельного состояния через первый момент достижения порогового уровня [9, 10]. Для учета разброса параметров и нелинейности характерного тренда процесса деградации используются винеровские модели со случайными эффектами и преобразованием временной шкалы [11–13].

Многострессовые ускоренные испытания являются основным способом получения данных о процессах деградации СИС за ограниченное время при сохранении связи с условиями эксплуатации. В современных работах совместное воздействие температуры, относительной влажности и прямого питающего тока описывается многофакторными моделями ускорения, допускающими учет взаимодействия

ускоряющих воздействий [14–16]. Вместе с тем существующие подходы, как правило, рассматривают лишь отдельные аспекты задачи: многострессовое ускорение, нелинейность тренда процесса деградации, разброс параметров между изделиями одного типа и серии. Важно отметить, что единая процедура, объединяющая стадийное описание процесса деградации, случайный коэффициент дрейфа параметров и их зависимость от сочетания ускоряющих воздействий с учетом их взаимодействий для определения точек перехода стадий деградации по экспериментальным данным, в известных работах для СИС не представлена.

Целью настоящей работы является создание количественной основы для сокращения длительности нормативных испытаний светодиодных источников света и обеспечения соответствия их заявленному ресурсу требованиям ИЕС 62717 путем разработки и валидации стадийной винеровской модели деградации нормируемого показателя качества при многострессовых ускоренных испытаниях с учетом как попарных, так и тройного взаимодействий ускоряющих воздействий температуры, влажности и питающего тока, а также разброса параметров деградации.

Материалы, методы и постановка задачи

Задача прогнозирования ресурса СИС сводится к построению вероятностной модели процесса изменения величины $X(t)$, характеризующей состояние деградации изделия к моменту времени t , и определению зависимости параметров этой модели от температуры, относительной влажности и прямого питающего тока.

Поскольку в рассматриваемой постановке задачи моделирования достижение СИС предельного состояния по нормируемому показателю качества связывается с достижением величиной $X(t)$ порогового уровня D , случайная наработка рассматриваемого изделия до отказа определяется как первый момент достижения этого уровня D :

$$T_f = \inf \{t > 0 : X(t) \geq D\},$$

где T_f – случайная наработка до достижения светодиодным источником света предельного состояния по нормируемому показателю качества, ч; t – текущее время наработки рассматриваемого изделия, ч; $X(t)$ – величина, характеризующая деградационное состояние светодиодного источника света к моменту времени t ; D – пороговое значение величины $X(t)$, соответствующее достижению предельного состояния по рассматриваемому нормируемому показателю качества.

Случайная наработка до отказа T_f определяет функцию надежности СИС в соответствии с требованиями ГОСТ 27.002 как вероятность безотказной работы за время t .

Изменение величины $X(t)$, введенной для вероятностного описания деградации нормируемого по-

казателя качества светодиодного источника света, описывается нелинейным процессом Винера со степенным детерминированным трендом согласно выражению [17]

$$X(t) = X(0) + \mu t^\beta + \sigma W(t), \quad (1)$$

где $X(0)$ – начальное значение величины $X(t)$; μ – коэффициент дрейфа процесса деградации, характеризующий среднюю скорость изменения величины $X(t)$, ч^{-β}; $\beta > 0$ – показатель нелинейности тренда процесса деградации, определяющий, по какому закону во времени изменяется средняя скорость накопления деградации нормируемого показателя качества; $\beta = 1$ соответствует линейному тренду, $\beta \neq 1$ – нелинейному; безразмерная величина; $\sigma > 0$ – диффузионный коэффициент стохастической составляющей процесса деградации, характеризующий интенсивность случайных отклонений индивидуальной траектории деградации показателя качества от среднего тренда, обусловленных нестабильностью микроструктурных и технологических процессов старения, ч^{-1/2}; $W(t)$ – стандартный винеровский процесс, для которого $W(0) = 0$, $W(t) \sim N(0, t)$.

Из выражения (1) следуют выражения для условного математического ожидания (2) и дисперсии процесса деградации (3) нормируемого показателя качества при фиксированном $X(0) = 0$:

$$E[X(t)] = \mu t^\beta; \quad (2)$$

$$\text{Var}[X(t)] = \sigma^2 t. \quad (3)$$

Выражение (2) показывает, что средняя деградация нарастает по степенному закону, тогда как из выражения (3) следует, что дисперсия процесса деградации растет линейно по времени из-за свойства броуновской составляющей.

Для учета смены режима деградации временная ось разбивается точками переключения τ_1 и τ_2 :

$$0 = \tau_0 < \tau_1 < \tau_2 < \infty. \quad (4)$$

Разбиение временной оси точками переключения режима деградации τ_1 и τ_2 , согласно выражению (4), выделяет три стадии q деградации: стадию 1 – интервал $[\tau_0, \tau_1)$, стадию 2 – $[\tau_1, \tau_2)$ и стадию 3 – $[\tau_2, +\infty)$. На каждой стадии $q \in \{1, 2, 3\}$ изменение величины $X(t)$ описывается собственными параметрами (μ_q , β_q , σ_q) и задается в локальном времени, отсчитываемом от начала соответствующей стадии согласно выражению

$$X_q(t) = X(\tau_{q-1}) + \mu_q (t^{\beta_q} - \tau_{q-1}^{\beta_q}) + \sigma_q [W(t) - W(\tau_{q-1})], \quad t \in [\tau_{q-1}, \tau_q), \quad (5)$$

где $X(\tau_{q-1})$ значение величины $X(t)$ в начале q -й стадии деградации.

Такая запись обеспечивает непрерывность траектории в точках переключения стадий: $X_q(\tau_{q-1}) = X_{q-1}(\tau_{q-1})$.

Использование локального времени в выражении (5) позволяет интерпретировать параметр β_q как показатель формы деградационного тренда на q -й стадии. При этом значение β_q определяется законом изменения величины $X(t)$ на данной стадии, а не ее положением на общей временной оси. В отличие от одноэтапной модели выражение (5) описывает процесс деградации как последовательность стадий с различными параметрами тренда и случайной составляющей.

На практике деградация нормируемого показателя качества у отдельных светодиодных источников света одной партии протекает неодинаково вследствие технологического разброса параметров и структурной неоднородности изделий. Для учета этого различия коэффициент дрейфа на q -й стадии рассматривается как случайная величина. Тогда индивидуальное значение коэффициента дрейфа для i -го изделия на q -й стадии задается соотношением

$$\mu_{i,q} \sim N(\mu_{0,q}), \quad (6)$$

где $\mu_{0,q}$ – среднее значение коэффициента дрейфа на q -й стадии деградации, $\sigma_q^2 > 0$ – дисперсия коэффициента дрейфа на q -й стадии деградации, характеризующая разброс средней скорости деградации у отдельных изделий, $\sigma_q^{-2\beta_q}$.

Введение случайного коэффициента дрейфа позволяет разделить два источника неопределенности: случайные отклонения индивидуальной траектории величины $X(t)$ от среднего деградационного тренда и различие средней скорости деградации у отдельных светодиодных источников света одной партии. Пусть для i -го изделия на q -й стадии деградации измерения выполняются в моменты времени $u_{i1}, \dots, u_{in}$. Тогда вектор наблюдаемых значений величины $X(t)$ на данной стадии записывается в виде $Z_{i,q} = (X_i(u_{i1}), \dots, X_i(u_{in}))^T$, а при фиксированном значении параметра $\mu_{i,q}$ вектор $Z_{i,q}$ имеет многомерное нормальное распределение согласно выражению

$$Z_{i,q} | u_{i,q} \sim N(u_{i,q}, g_{\beta,i}, \sigma_q^2 M_{i,q}), \quad (7)$$

где $g_{\beta,i}$ – вектор временных функций, задающих средний тренд процесса деградации на q -й стадии деградации; σ_q^2 – параметр интенсивности случайной составляющей процесса деградации, $\sigma_q^{-1/2}$; $M_{i,q}$ – ковариационная матрица винеровской составляющей, элементы которой определяются минимальным из двух моментов наблюдения.

Структура, задаваемая выражениями (6), (7), вводится для отдельного учета двух источников неопределенности в процессе деградации. Разброс траекторий деградации у отдельных изделий одной партии не может быть корректно описан только увеличением диффузионного параметра σ_q^2 , поскольку в этом случае различие средних скоростей деградации у изделий и случайные отклонения траектории во времени объединяются в одном источнике случайности. Поэтому в предлагаемом подходе коэффициент дрейфа моделируется иерархически как случайная величина. Это позволяет отделить случайные флуктуации внутри конкретной траектории процесса деградации от разброса средней скорости деградации у изделий партии и тем самым обеспечить статистически обоснованную оценку стабильности их качества.

Выражения (6) и (7) задают вероятностное описание величины $X(t)$ на q -й стадии с отдельным учетом двух источников неопределенности в процессе деградации. Различие траекторий процессов деградации изделий одной партии нельзя корректно описать только коэффициентом диффузии σ_q^2 , поскольку в этом случае различие средних скоростей деградации и случайные отклонения траектории во времени объединяются в одном источнике случайности. Поэтому коэффициент дрейфа на q -й стадии деградации рассматривается как случайная величина. Это позволяет разделить разброс средней скорости деградации у изделий партии и случайные отклонения индивидуальной траектории величины $X(t)$.

После задания вероятностной модели изменения величины $X(t)$ необходимо определить зависимость ее параметров от условий ускоренных испытаний. Для этого вводятся безразмерные нормированные переменные ускоряющих воздействий ξ_1, ξ_2, ξ_3 , соответствующие температуре, относительной влажности и прямому питающему току согласно выражениям:

$$\begin{aligned} \xi_1 &= \frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_H} \right); \\ \xi_2 &= \ln \frac{RH_H}{RH_0}; \\ \xi_3 &= \ln \frac{I_H}{I_0}, \end{aligned} \quad (8)$$

где E_a – энергия активации деградационной реакции, эВ; $k_B = 8,617 \cdot 10^{-5}$ эВ/К – постоянная Больцмана; T_H и T_0 – температура ускоренного и нормального режимов соответственно, К; RH_H – относительная влажность при ускоренных испытаниях, %; RH_0 – относительная влажность при нормальных условиях эксплуатации, %; I_H – значение прямого питающего тока при ускоренных испытаниях, А; I_0 – значение прямого питающего тока при нормальных условиях эксплуатации, А.

Значения $\xi_1, \xi_2, \xi_3 = 0$ соответствуют нормальным условиям эксплуатации.

Скорость деградации показателя качества в условиях ускоренных испытаний описывается многофакторной зависимостью

$$k(\xi_1, \xi_2, \xi_3) = e^{(\alpha_0 + \alpha_1 \xi_1 + \alpha_2 \xi_2 + \alpha_3 \xi_3 + \alpha_4 \xi_1 \xi_2 + \alpha_5 \xi_1 \xi_3 + \alpha_6 \xi_2 \xi_3 + \alpha_7 \xi_1 \xi_2 \xi_3)}, \quad (9)$$

где $k(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ – функция, задающая среднюю скорость деградации при заданном сочетании температуры, относительной влажности и прямого питающего тока; α_0 – свободный член модели, определяющий логарифм средней скорости деградации в опорном режиме при $\xi_1, \xi_2, \xi_3 = 0$; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – коэффициенты индивидуального влияния температуры, относительной влажности и прямого питающего тока на среднюю скорость деградации; $\alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$ – коэффициенты парных взаимодействий указанных ускоряющих воздействий; α_7 – коэффициент тройного взаимодействия температуры, относительной влажности и прямого питающего тока.

Экспоненциальная форма выражения (9) выбрана с учетом зависимости скорости деградации от температуры, описываемой законом Аррениуса, и его расширения на случай совместного действия нескольких ускоряющих воздействий. В логарифмической форме такая запись приводит к линейной зависимости от нормированных переменных ξ_1, ξ_2, ξ_3 , что позволяет выполнять статистическое оценивание параметров модели по данным ускоренных испытаний [18, 19].

Ускоряющий коэффициент деградации показателя качества при переходе от ускоренного режима ξ к номинальному режиму ξ_μ определяется отношением

$$K(\xi, \xi_\mu) = \frac{k(\xi)}{k(\xi_\mu)}, \quad (10)$$

где $K(\xi, \xi_\mu)$ – ускоряющий коэффициент, показывающий, во сколько раз интенсивность процесса деградации в ускоренном режиме отличается от соответствующей интенсивности в номинальных условиях эксплуатации.

В ускоренных испытаниях непосредственно измеряется не величина $X_i(t)$, а контролируемый показатель качества изделия $Y_i(t)$. В зависимости от постановки задачи в качестве такого показателя может рассматриваться относительный световой поток, световая отдача, цветовая характеристика или иной нормируемый показатель качества, по значению которого оценивается достижение изделием предельного состояния функционирования.

Рассмотрим наиболее распространенный случай, когда в ускоренных испытаниях для каждого светодиодного источника света в дискретные моменты времени регистрируются значения относительного

светового потока $Y_{rel,i}(t)$ в дискретные моменты времени. Эти значения преобразуются в величину $X_i(t)$ по выражению (11) и далее используются для определения параметров стадийной модели:

$$Y_{rel,i}(t) = e(\delta X_i(t)), \quad \delta < 0, \quad (11)$$

где $Y_{rel,i}(t)$ – измеренный относительный световой поток СИС в процессе УИ; δ – параметр преобразования, определяющий связь между величиной $X_i(t)$ и относительным световым потоком; при $\delta < 0$ увеличение величины $X_i(t)$ соответствует уменьшению относительного светового потока [20, 21].

При заданном нормативном пороге отказа $Y_{rel} = 0,70$ граница отказа в пространстве $X(t)$ определяется из обратного преобразования как

$$D = \frac{\ln 0,7}{\delta}. \quad (12)$$

Далее для каждой стадии q по совокупности деградационных траекторий изделий определяется вектор параметров $\theta_q = \{\mu_{0,q}, \tau_q^2, \beta_q, \sigma_q\}$, задающих деградационный тренд рассматриваемого показателя качества на данной стадии.

Оценивание этих параметров выполняется по всем измеренным траекториям контролируемого показателя качества, относящимся к q -й стадии и представленным в виде значений величины $X_i(t)$ по выражению

$$l_q(\theta_q) = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_q} \left[\ln \det \sum_{q,i} (Z_{i,q} - \mu_{0,q} g_{\beta_q,i})^T \times \right. \\ \left. \times \sum_{q,i}^{-1} (Z_{i,q} - \mu_{0,q} g_{\beta_q,i}) + n_i \ln(2\pi) \right], \quad (13)$$

где $Z_{i,q}$ – вектор значений величины $X_i(t)$, относящихся к q -й стадии наработки для i -го изделия; $g_{\beta_q,i}$ – вектор значений функции среднего тренда на q -й стадии; $\sum_{q,i}$ – ковариационная матрица, определяемая параметрами σ_q и τ_q^2 ; N_q – число изделий, для которых на q -й стадии имеются измерения; n_i – число измерений для i -го изделия на q -й стадии.

Тогда по данным ускоренных испытаний решается задача параметрической идентификации винеровской модели прогнозирования ресурса светодиодных источников света по деградации нормируемого показателя качества. Задача заключается в совместном определении параметров процесса деградации на каждой стадии и параметров ускоряющей зависимости методом максимального правдоподобия и записывается в виде

$$\hat{\Theta} = \arg \max_{\Theta} \left[\sum_{q=1}^3 l_q(\theta_q) \right], \quad (14)$$

где Θ – полный вектор идентифицируемых параметров винеровской модели прогнозирования ресурса светодиодных источников света по деградации нормируемого показателя качества при ускоренных испытаниях; $l_q(\theta_q)$ – логарифмическая функция правдоподобия для данных, относящихся к q -й стадии деградации нормируемого показателя качества.

Точки перехода (переключения) стадий деградации τ_1 и τ_2 не заданы заранее и определяются по экспериментальным данным. Для этого рассматриваются различные варианты разбиения временного интервала наблюдений на три стадии, задаваемые парами значений τ_1^*, τ_2^* , где $\tau_1^* < \tau_2^*$ и обе точки принадлежат множеству моментов измерений.

Для этого рассматриваются различные пары значений τ_1^*, τ_2^* , в которых τ_1^* соответствует точке переключения между первой и второй стадиями деградации, а τ_2^* – точке переключения между второй и третьей стадиями деградации при условии $\tau_1^* < \tau_2^*$.

Для каждой такой пары значений τ_1^*, τ_2^* данные деградации разделяются на три стадии, после чего повторно определяются параметры вектора θ_q и вычисляется значение байесовского информационного критерия Шварца:

$$(\hat{\tau}_1, \hat{\tau}_2) = \arg \min_{\tau_1^*, \tau_2^*} BIC(\tau_1^*, \tau_2^*), \quad (15)$$

где BIC – байесовский информационный критерий Шварца.

Минимизация критерия (15) позволяет определить положение точек переключения стадий деградации τ_1 и τ_2 , при котором достигается наилучшее соотношение точности описания данных и сложности модели.

Таким образом, выражения (1)–(15) задают математическую постановку задачи прогнозирования ресурса светодиодных источников света по данным ускоренных испытаний. Выражения (1)–(3) задают вероятностное описание изменения величины $X(t)$, используемой для описания деградации нормируемого показателя качества. Выражения (4) и (5) задают разбиение деградации нормируемого показателя качества на три стадии. Выражения (6), (7) и (13) учитывают разброс параметров деградации между изделиями одной партии и случайные отклонения индивидуальных траекторий. Выражения (8)–(10) описывают зависимость средней скорости деградации от температуры, относительной влажности и прямого питающего тока. Выражение (11) связывает измеряемый нормируемый показатель качества с величиной $X(t)$. Выражения (12)–(15) задают границу отказа в пространстве величины $X(t)$, процедуру параметрической идентификации модели и определение точек переключения стадий деградации.

В совокупности это позволяет по данным ускоренных испытаний выполнять статистическое оценивание параметров винеровской модели прогнозирования ресурса светодиодных источников света по деградации нормируемого показателя качества при ускоренных испытаниях, прогнозировать ресурс светодиодных источников света и определять ресурс изделия по заданному показателю качества и для заданных условий эксплуатации.

Моделирование и анализ результатов

После задания математической постановки задачи прогнозирования ресурса светодиодных источников света по деградации нормируемого показателя качества при ускоренных испытаниях рассматривается расчетная реализация винеровской модели и ее валидация по экспериментальным данным. Общая схема выполнения модели приведена на рисунке 1.

Исходные данные, использованные при расчетной реализации винеровской модели, приведены в таблице. Обозначения S_1 – S_5 соответствуют условным номерам режимов многострессовых ускоренных испытаний и далее используются при изложении результатов моделирования. Для каждого режима в таблице указаны температура среды ускоренного режима, относительная влажность среды ускоренного режима, значение прямого питающего тока светодиодного источника света и число образцов, включенных в испытания. По данным каждого режима в дискретные моменты наработки регистрировались значения относительного светового потока $Y_{rel,i}(t)$, которые затем преобразовывались в величину $X(t)$ по выражению (11) и использовались при параметрической идентификации модели.

Расчетная реализация модели выполнена в среде Python 3.12 с использованием библиотек NumPy (v. 1.26.4) и Matplotlib (v. 3.8.0).

На рисунке 2 представлены траектории деградации $X(t)$, полученные для пяти режимов многострессовых ускоренных испытаний, с выделением стадийной структуры процесса, медианных и средних зависимостей, а также порогового уровня отказа.

Как видно из рисунка 2, с увеличением совокупного уровня ускоряющих воздействий сокращается интервал времени до достижения порогового состояния и возрастает скорость деградации на всех стадиях процесса.

На рисунке 3 представлены средние траектории деградации для режимов S_1 – S_5 в латентном пространстве величины $X(t)$ и в пространстве относительно светового потока $Y_{rel}(t)$, а также порог отказа, соответствующий условию $Y_{rel}(t) = 0,70$.

Из рисунка 3 следует, что с увеличением совокупного уровня ускоряющих воздействий средние траектории деградации быстрее достигают порогового уровня отказа, что соответствует сокращению ресурса светодиодных источников света в рассматриваемых режимах ускоренных испытаний.

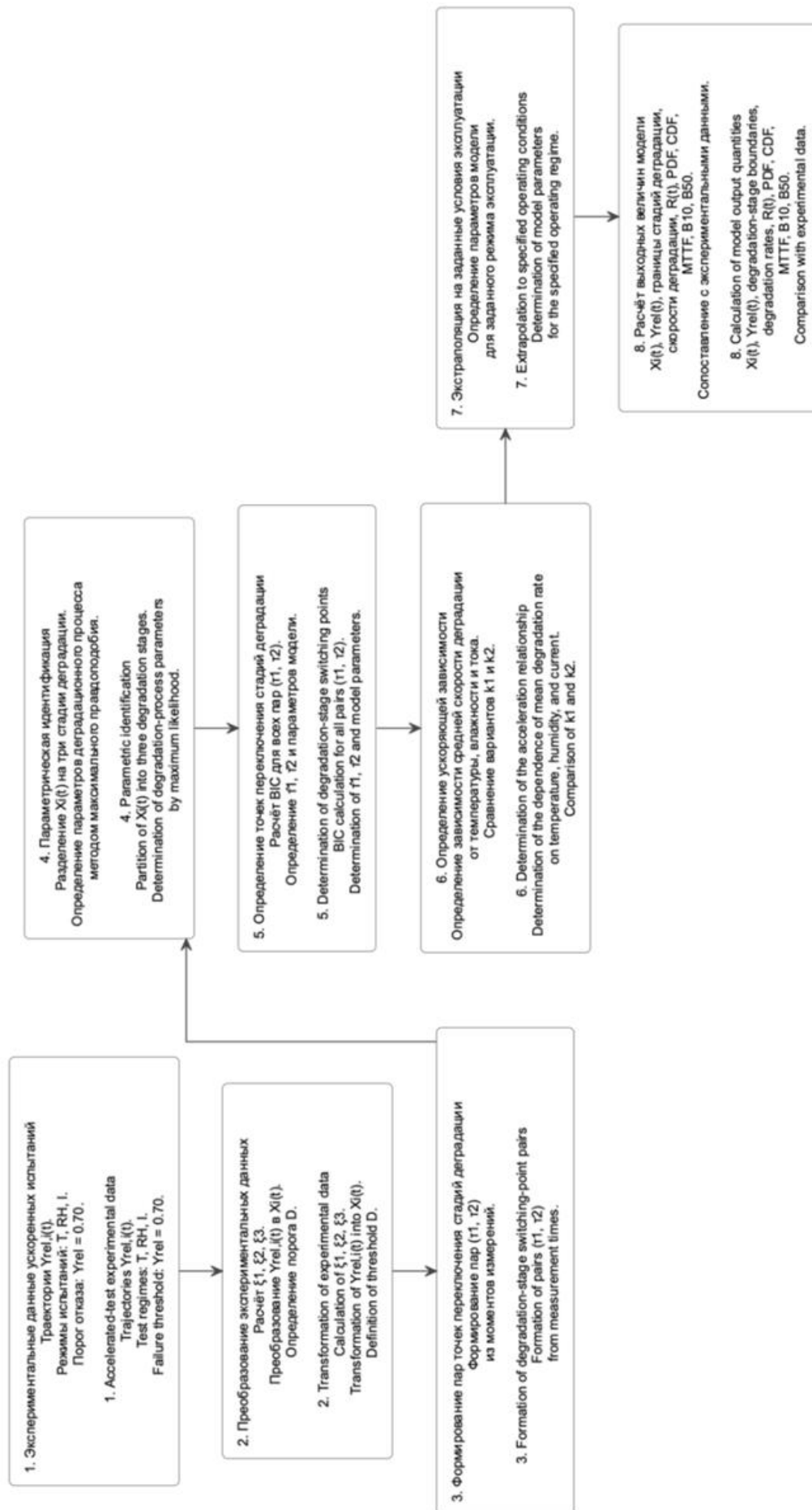


Рис. 1. Общая схема реализации винеровской модели прогнозирования ресурса светодиодных источников света при ускоренных испытаниях

Fig. 1. General scheme for implementation of the Wiener model for lifetime prediction of LED light sources under accelerated testing

Режимы многострессовых ускоренных испытаний светодиодных источников света
Multi-stress accelerated testing modes for LED light sources

Режим / Test condition	Температура окружающей среды / Ambient temperature, °C	Относительная влажность окружающей среды / Ambient relative humidity, %	Значение прямого питающего тока, мА / Forward current, mA	Кол-во образцов / Number of samples
S_1	85	45	20	60
S_2	85	85	20	60
S_3	85	85	220	60
S_4	95	45	525	60
S_5	150	45	300	60

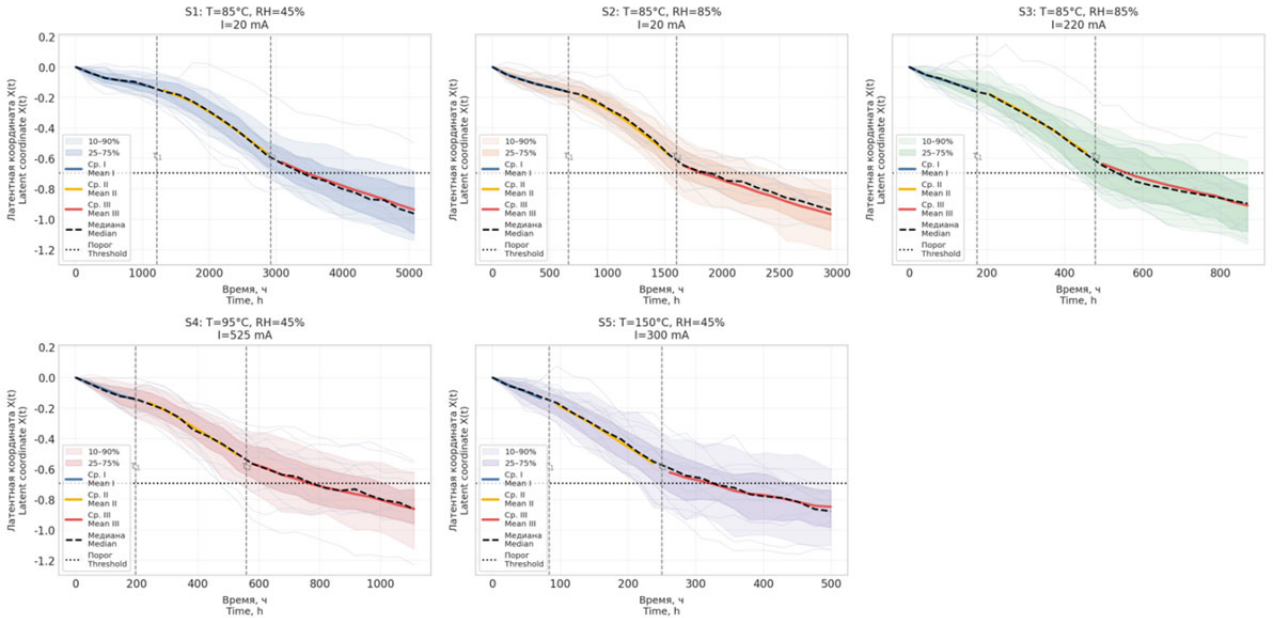


Рис. 2. Траектории деградации при различных режимах многострессовых ускоренных испытаний
Fig. 2. Degradation trajectories under different multistress accelerated test conditions

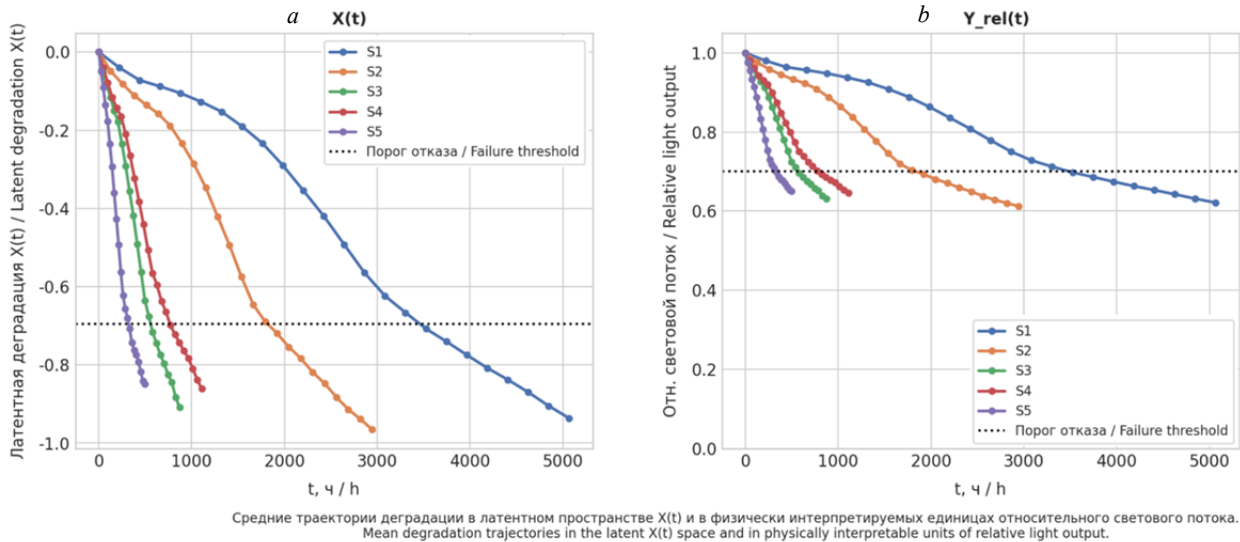


Рис. 3. Средние траектории деградации: a – в латентном пространстве $X(t)$, b – в единицах относительного светового потока $Y_{rel}(t)$ при различных режимах многострессовых ускоренных испытаний
Fig. 3. Mean degradation trajectories: a - in the latent $X(t)$ space, b - in relative light output units $Y_{rel}(t)$ under different multistress accelerated test conditions

На рисунке 4 приведено сопоставление фактических и предсказанных эффективных скоростей деградации светового потока для зависимостей k_1 и k_2

по трем стадиям деградации. Здесь k_1 обозначает зависимость средней скорости деградации от температуры, относительной влажности и прямого питающего

тока без учета попарных и тройного взаимодействия ускоряющих воздействий, k_2 – зависимость, дополни-

тельно учитывающую их попарное и совместное взаимодействие в соответствии с выражением (9).

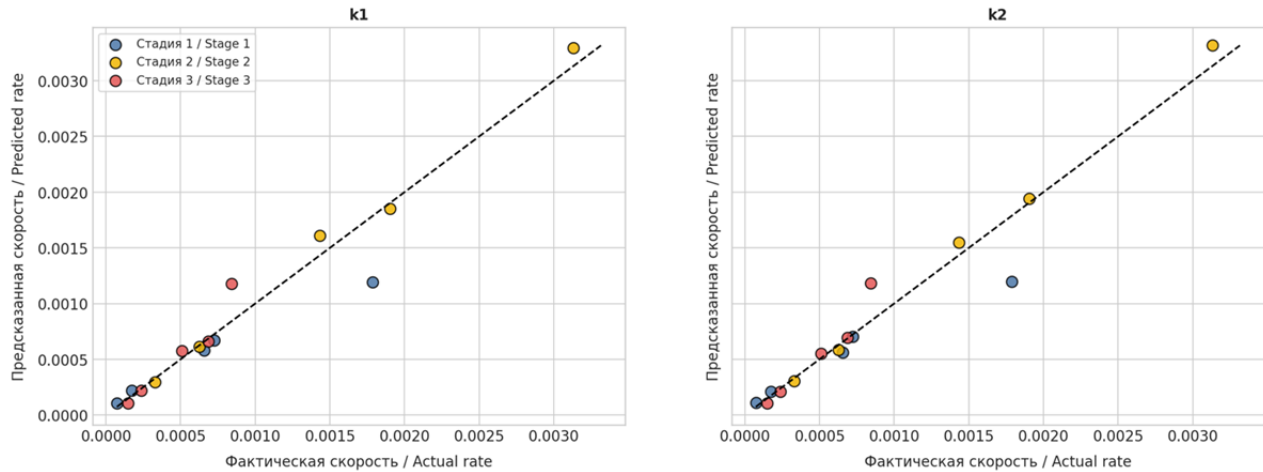


Рис. 4. Сопоставление фактических и предсказанных эффективных скоростей деградации для зависимостей k_1 и k_2 по трем стадиям деградации

Fig. 4. Comparison of actual and predicted effective degradation rates for the k_1 and k_2 dependencies over three degradation stages

Степень соответствия предсказанной и фактической скоростей деградации светового потока определяется положением точки относительно диагональной линии равенства. Чем ближе точка расположена к этой линии, тем меньше расхождение между фактической и предсказанной скоростями деградации для соответствующей стадии деградации и режима испытаний.

Как видно из рисунка 4, учет взаимодействия ускоряющих воздействий в зависимости k_2 обеспечивает более точное согласование расчетных и фактических значений эффективной скорости деградации по сравнению с зависимостью k_1 , особенно в области повышенных скоростей.

Для анализа результатов моделирования рассматривались плотность распределения случайной наработки T_f до достижения светодиодным источником

света предельного состояния по нормируемому показателю качества f_{Tf} и соответствующая функция распределения случайной наработки до достижения этого состояния.

На рисунке 5 представлены графики плотности распределения и функции распределения случайной наработки T_f для зависимостей k_1 и k_2 .

Как видно из рисунка 5, учет попарных и тройного взаимодействия ускоряющих воздействий в зависимости k_2 приводит к смещению распределения случайной наработки в область меньших значений по сравнению с зависимостью k_1 , что соответствует уменьшению средней наработки до достижения предельного состояния по нормируемому показателю качества.

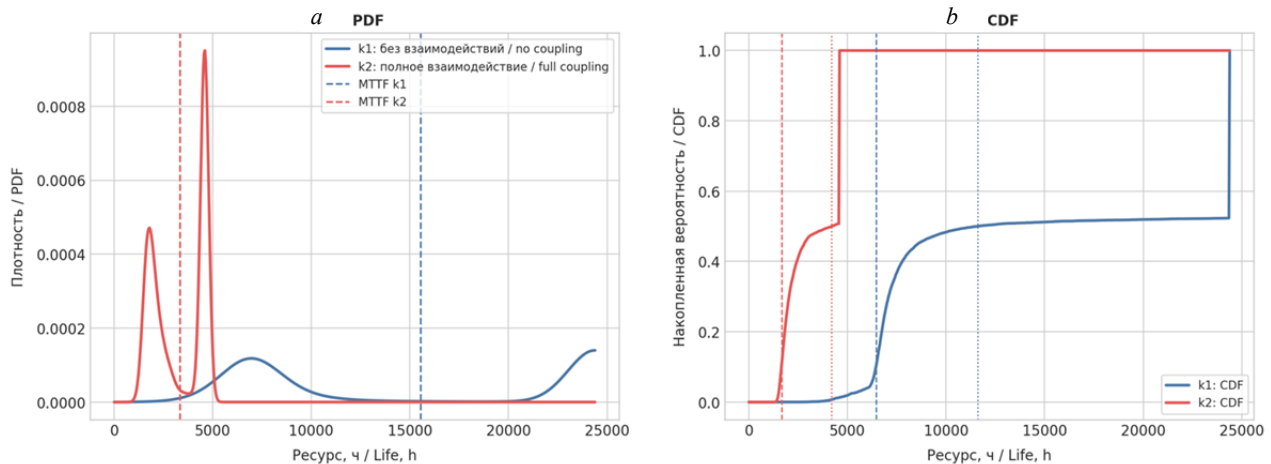
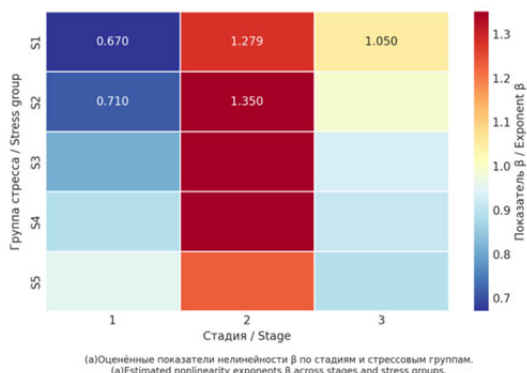


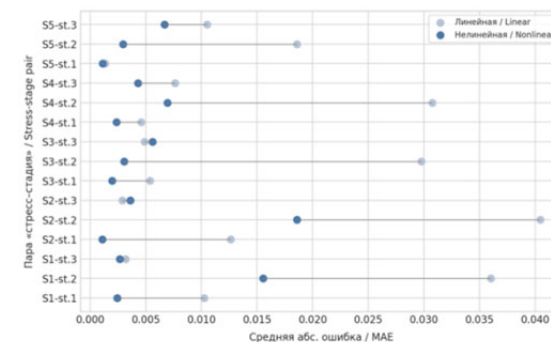
Рис. 5. Плотность распределения (a) и функция распределения (b) случайной наработки для зависимостей k_1 и k_2

Fig. 5. Probability density function (a) and cumulative distribution function (b) of the time for the k_1 and k_2 dependencies

На рисунке 5 PDF (probability density function) – плотность распределения случайной наработки T_f ; CDF (cumulative distribution function) – функция распределения случайной наработки; MTTF (mean time to failure) – средняя наработка до достижения предельного состояния по нормируемому показателю качества.



a



b

Рис. 6. Оцененные значения показателя нелинейности β_q по стадиям и стрессовым группам (a) и парное сопоставление средних абсолютных ошибок для линейного и нелинейного вариантов тренда процесса деградации (b)

Fig. 6. Estimated values of the nonlinearity exponent β_q across stages and stress groups (a) and paired comparison of mean absolute errors for the linear and nonlinear degradation-trend variants (b)

Как следует из рисунка 6, a, на первой стадии для всех стрессовых групп наблюдаются значения $\beta_q < 1$, на второй стадии – устойчиво $\beta_q > 1$, тогда как на третьей стадии значения β_q располагаются вблизи единицы. Из рисунка 6, b видно, что нелинейный вариант во всех рассмотренных сочетаниях «стрессовая группа – стадия» обеспечивает меньшую среднюю абсолютную ошибку по сравнению с линейным, причем наибольшее снижение ошибки наблюдается на второй стадии деградации.

Таким образом, выполненное моделирование и валидация по данным многострессовых ускоренных испытаний подтвердили работоспособность предложенной винеровской модели прогнозирования ресурса светодиодных источников света по деградации нормируемого показателя качества. Показано, что с увеличением совокупного уровня ускоряющих воздействий ускоряется деградация и сокращается случайная наработка до достижения предельного состояния. Учет попарных и тройного взаимодействия температуры, относительной влажности и прямого питающего тока в полной зависимости средней скорости деградации обеспечивает более точное согласование расчетных и фактических значений эффективной скорости деградации по сравнению с упрощенной зависимостью. Дополнительно установлено, что использование нелинейного степенного тренда на стадиях деградации является обоснованным, поскольку обеспечивает меньшее значение средней абсолютной ошибки по сравнению с линейным вариантом и согласуется с полученными оценками показателя нелинейности β_q для различных стадий и стрессовых групп.

Выводы

По результатам реализации разработанной модели и ее валидации на данных многострессовых ускоренных испытаний светодиодных источников света установлено, что предложенная винеровская модель корректно описывает деградацию нормируемого показателя качества и позволяет рассчитывать случайную наработку до достижения предельного состояния данного показателя.

Показано, что показатель нелинейности тренда процесса деградации β_q существенно зависит от стадии деградации: на первой стадии его значения составили 0,67...0,93, на второй стадии – 1,23...1,35, на третьей стадии – 0,87...1,05. Это подтверждает необходимость использования нелинейного степенного тренда вместо линейного приближения в моделях прогнозирования ресурса по нормируемым показателям качества изделия.

Во всех рассмотренных режимах испытаний нелинейный вариант прогнозирования обеспечил меньшую среднюю абсолютную ошибку по сравнению с линейным вариантом, при этом для линейного варианта средняя абсолютная ошибка достигала примерно $4 \cdot 10^{-2}$, а для нелинейного не превышала примерно $1,9 \cdot 10^{-2}$.

Установлено также, что учет попарных и тройного взаимодействия температуры, относительной влажности и прямого питающего тока в модели приводит к более точному согласованию расчетных и фактических эффективных скоростей деградации светового потока и уменьшению расчетной средней наработки до достижения предельного состояния: по результатам моделирования она составила порядка $1,55 \cdot 10^4$ ч для упрощенной зависимости k_1 и $3,3 \cdot 10^3$ ч для полной зависимости k_2 .

Библиографические ссылки

1. Борисов Д. С., Кузнецов Д. И. Понимание эволюции и применения светоизлучающих диодов (LED) // Современные инновации, системы и технологии. 2023. Т. 3, № 4. С. 0601–0614. DOI: 10.47813/2782-2818-2023-3-4-0601-0614
2. Кузьменко В. П., Солёный С. В. Исследование влияния светодиодных прожекторов на процессы управления качеством электрической энергии и энергоэффективностью // Омский научный вестник. 2021. № 2 (176). С. 15–19.
3. 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
4. Ibrahim M.S., Zhou Jing, Yung W.K.C., Fan Jiajie. (2021) Bayesian based lifetime prediction for high-power white LEDs. *Expert Systems with Applications*, vol. 185: 115627. DOI: 10.1016/j.eswa.2021.115627
5. Solyonyj S., Rabin A., Solenaya O.Y., Kuzmenko V.P., Rysin A.V. (2020) Definition and approximation of the light flux degradation of a LED lamp. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 734. Art. 012197. DOI: 10.1088/1757-899X/734/1/012197
6. 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
7. Zheng H., Yang J., Kang W., Zhao Y. (2025) Accelerated Degradation Data Analysis Based on Gamma Process With Random Effects. *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 41, no. 4, pp. 1250–1267. DOI: 10.1002/qre.3730
8. Xu A., Wang J., Tang Y., Chen P. (2025) Efficient online estimation and remaining useful life prediction based on the inverse Gaussian process. *Naval Research Logistics*, vol. 72, no. 3, pp. 319–336. DOI: 10.1002/nav.22226
9. Gao H., Cui L., Dong Q. (2020) Reliability modeling for a two-phase degradation system with a change point based on a Wiener process/s *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 193: 106601. DOI: 10.1016/j.res.2019.106601
10. Liao G., Yin H., Chen M., Lin Z. (2021) Remaining useful life prediction for multi-phase deteriorating process based on Wiener process. *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 207: 107361. DOI: 10.1016/j.res.2020.107361
11. Zhai Q., Li Y., Chen P. (2025) Modeling product degradation with heterogeneity: A general random-effects Wiener process approach. *IIE Transactions*, vol. 57, no. 12, pp. 1422–1435. DOI: 10.1080/24725854.2024.2434125
12. Muhammad I., Xiahou T., Liu Y., Muhammad M. (2024) A random-effect Wiener process degradation model with transmuted normal distribution and ABC-Gibbs algorithm for parameter estimation. *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 250: 110289. DOI: 10.1016/j.res.2024.110289
13. Осинцева Е. А., Чимитова Е. В. Оптимальное планирование эксперимента на основе винеровской деградационной модели с ковариатами с использованием условной информационной матрицы Фишера // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2024. № 67. С. 83–93. DOI: 10.17223/19988605/67/9
14. Truong M.-T., Do P., Mendizabal L., Iung B. (2022) An improved accelerated degradation model for LED reliability assessment with self-heating impacts. *Microelectronics Reliability*, vol. 128: 114428. DOI: 10.1016/j.microrel.2021.114428
15. Tian R., Li H., Wang H., et al. (2024) Optimization design method for multi-stress accelerated degradation test based on Tweedie exponential dispersion process. *Applied Mathematical Modelling*, vol. 136, pp. 1–22. DOI: 10.1016/j.apm.2024.115640
16. Rocchetta R., Khalid S., Mafi A., Mossad M., Eifert A., van Driel W.D. (2024) A survey on LED Prognostics and Health Management and uncertainty reduction. *Microelectronics Reliability*, vol. 157: 115399. DOI: 10.1016/j.microrel.2024.115399
17. Dong Y., Zhou Z., Dai H., Liu K. (2024) Reliability Evaluation of LED Lamp Beads Considering Multi-Stage Wiener Degradation Process Under Generalized Coupled Accelerated Stress. *Electronics*, vol. 13: 4724. DOI: 10.3390/electronics13234724
18. Sun G., Bai Y., Zhang Z. (2024) Overview of high-power LED life prediction algorithms. *Sustainable Energy Policy*, vol. 3: 1343339. DOI: 10.3389/fsuep.2024.1343339
19. Li C., Cheng J., Zhu H., Wen B., Zhao X., Kang W. (2025) Degradation modeling and remaining useful life prediction for electronic device under multiple stress influences. *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1: 19117. DOI: 10.1038/s41598-025-03786-y. PMID: 40450133; PMCID: PMC12126570
20. Miao H., Guo W. (2024) Lifetime prediction of UV LEDs based on Bayesian MCMC and other models. *Acta Optica Sinica*, vol. 44: 2223001.
21. Indmeskine F.E., Saintis L., Kobi A. (2023) Review on accelerated life testing plan to develop predictive reliability models for electronic components based on design-of-experiments. *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 39, pp. 2594–2607.

References

1. Borisov D.S., Kuznecov D.I. (2023) [Understanding the evolution and application of light-emitting diodes (LEDs)]. *Sovremennye innovacii, sistemy i tekhnologii*, vol. 3, no. 4, pp. 0601–0614. DOI: 10.47813/2782-2818-2023-3-4-0601-0614 (in Russ.).
2. Kuzmenko V.P., Soleny S.V. (2021) [Investigation of the influence of LED floodlights on the processes of power quality and energy efficiency management]. *Omskij nauchnyj vestnik*, no. 2 (176), pp. 15–19 (in Russ.).
3. Kuzmenko V.P., Solyonyj S.V., Frolova E.A., Bobryshov A.P. (2026) [Structural-functional quality management model of LED light sources used in small spacecraft]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 29, no. 1, pp. 35–43. DOI: 10.22213/2413-1172-2026-1-35-43 (in Russ.).
4. Ibrahim M.S., Zhou Jing, Yung W.K.C., Fan Jiajie (2021) Bayesian based lifetime prediction for high-power white LEDs. *Expert Systems with Applications*, vol. 185: 115627. DOI: 10.1016/j.eswa.2021.115627
5. Solyonyj S., Rabin A., Solenaya O.Y., Kuzmenko V.P., Rysin A. (2020) Definition and approximation of the light flux degradation of a LED lamp. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 734. Art. 012197. DOI: 10.1088/1757-899X/734/1/012197
6. Kuzmenko V.P. (2025) [Model for estimating the service life of LED lighting devices taking into account systemic operating 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.).
7. Zheng H., Yang J., Kang W., Zhao Y. (2025) Accelerated Degradation Data Analysis Based on Gamma Process With Random Effects. *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 41, no. 4, pp. 1250–1267. DOI: 10.1002/qre.3730
8. Xu A., Wang J., Tang Y., Chen P. (2025) Efficient online estimation and remaining useful life prediction based on the inverse Gaussian process. *Naval Research Logistics*, vol. 72, no. 3, pp. 319–336. DOI: 10.1002/nav.22226

9. Gao H., Cui L., Dong Q. (2020) Reliability modeling for a two-phase degradation system with a change point based on a Wiener process. *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 193: 106601. DOI: 10.1016/j.ress.2019.106601
10. Liao G., Yin H., Chen M., Lin Z. (2021) Remaining useful life prediction for multi-phase deteriorating process based on Wiener process. *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 207: 107361. DOI: 10.1016/j.ress.2020.107361
11. Zhai Q., Li Y., Chen P. (2025) Modeling product degradation with heterogeneity: A general random-effects Wiener process approach. *IIE Transactions*, vol. 57, no. 12, pp. 1422-1435. DOI: 10.1080/24725854.2024.2434125
12. Muhammad I., Xiahou T., Liu Y., Muhammad M. (2024) A random-effect Wiener process degradation model with transmuted normal distribution and ABC-Gibbs algorithm for parameter estimation. *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 250: 110289. DOI: 10.1016/j.ress.2024.110289
13. Osinceva E.A., Chimitova E.V. (2024) [Optimal experiment planning based on a Wiener degradation model with covariates using the conditional Fisher information matrix]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika*, no. 67, pp. 83-93. DOI: 10.17223/19988605/67/9 (in Russ.).
14. Truong M.-T., Do P., Mendizabal L., Iung B. (2022) An improved accelerated degradation model for LED reliability assessment with self-heating impacts. *Microelectronics Reliability*, vol. 128: 114428. DOI: 10.1016/j.microrel.2021.114428
15. Tian R., Li H., Wang H., et al. (2024) Optimization design method for multi-stress accelerated degradation test based on Tweedie exponential dispersion process. *Applied Mathematical Modelling*, vol. 136, pp. 1-22. DOI: 10.1016/j.apm.2024.115640
16. Rocchetta R., Khalid S., Mafi A., Mossad M., Eifert A., van Driel W.D. (2024) A survey on LED Prognostics and Health Management and uncertainty reduction. *Microelectronics Reliability*, vol. 157: 115399. DOI: 10.1016/j.microrel.2024.115399
17. Dong Y., Zhou Z., Dai H., Liu K. (2024) Reliability Evaluation of LED Lamp Beads Considering Multi-Stage Wiener Degradation Process Under Generalized Coupled Accelerated Stress. *Electronics*, vol. 13: 4724. DOI: 10.3390/electronics13234724
18. Sun G., Bai Y., Zhang Z. (2024) Overview of high-power LED life prediction algorithms. *Sustainable Energy Policy*, vol. 3: 1343339. DOI: 10.3389/fsuep.2024.1343339
19. Li C., Cheng J., Zhu H., Wen B., Zhao X., Kang W. (2025) Degradation modeling and remaining useful life prediction for electronic device under multiple stress influences. *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1: 19117. DOI: 10.1038/s41598-025-03786-y. PMID: 40450133; PMCID: PMC12126570
20. Miao H., Guo W. (2024) Lifetime prediction of UV LEDs based on Bayesian MCMC and other models. *Acta Optica Sinica*, vol. 44: 2223001.
21. Indmeskine F E., Saintis L., Kobi A. (2023) Review on accelerated life testing plan to develop predictive reliability models for electronic components based on design-of-experiments. *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 39, pp. 2594-2607.

The Weiner's Model for Predicting the Service Life of LED Light Sources Based on the Degradation of a Standardized Quality Indicator During Accelerated Testing

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

This paper presents a Wiener model for predicting the lifetime of LED light sources based on the degradation of a specified quality parameter during accelerated testing. The model is based on a nonlinear multistage Wiener process with a random drift coefficient, taking into account the combined effects of temperature, relative humidity, and forward current. The model parameters were determined using the maximum likelihood method, and the switching points of the stages of trend nonlinearity were determined by minimizing the Bayesian Schwarz information criterion. The computational implementation and validation of the model were performed using data from multi-stress accelerated tests under five different modes of temperature, humidity, and bias current exposure. It is shown that the values of the degradation trend nonlinearity index ranged from 0.67 to 0.93 in the first stage, 1.23 to 1.35 in the second, and 0.87 to 1.05 in the third. The model also compares linear and nonlinear degradation trends; for the nonlinear variant, the mean absolute prediction error did not exceed $1.9 \cdot 10^{-2}$, whereas for the linear variant it reached $4.0 \cdot 10^{-2}$. The results obtained confirm the applicability of the model for predicting the lifetime of LED light sources based on a normalized quality index using data from accelerated tests.

Keywords: LED light source, service life prediction, accelerated testing data, quality control index.

Получено 05.05.2026

Образец цитирования

Кузьменко В. П. Винеровская модель прогнозирования ресурса светодиодных источников света по деградации нормируемого показателя качества при ускоренных испытаниях // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2026. Т. 29, № 3. С. 22–32. DOI: 10.22213/2413-1172-2026-3-22-32

For Citation

Kuzmenko V.P. (2026) [The Weiner's Model for Predicting the Service Life of LED Light Sources Based on the Degradation of a Standardized Quality Indicator During Accelerated Testing]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 29, no. 2, pp. 22-32. DOI: 10.22213/2413-1172-2026-3-22-32 (in Russ.).