Прогнозирование технического ресурса светильников со светодиодами[1]

Р.И. СТОЛЯРЕВСКАЯ

ООО «ВНИСИ им. С.И. Вавилова», Москва
E-mail: stoly@rambler.ru

Аннотация

Публикация посвящена краткому обзору международных разработок в области определения полезного срока службы светодиодных источников света и осветительных приборов на их основе. Выполнен анализ материалов Североамериканского светотехнического общества (*IESNA*) под рубрикациями *LM* и *TM*, стандартизирующих методы определения изменений во времени световых и цветовых характеристик осветительных приборов со светодиодами и рекомендующих методики обработки результатов с целью прогнозирования срока службы осветительных приборов.

Ключевые слова: технический ресурс, полезный срок службы, спад светового потока, коррелированная цветовая температура (КЦТ), распределение Вейбулла, соотношение Аррениуса.

1. Процессы деградации

Полезный срок службы или технический ресурс – это продолжительность функционирования изделия до достижения им предельного состояния, при котором его дальнейшая эксплуатация нежелательна или невозможна из-за снижения эффективности или возросшей опасности для среды обитания. Изменение основных характеристик осветительных приборов (ОП) с любыми источниками света (ИС), а не только со светодиодами (СД), происходит из-за процессов деградации, имеющих различную физическую и химическую природу. Исследования, выполненные в Светотехническом центре Ренсселеровского политехнического института (*Rensselaer Polytechnic Institute*) в США (данные ещё 2006–2008 г.г.) [1], это очень наглядно демонстрируют (рис. 1).

1.1. Светодиод и процессы его деградации

Физические основы работы полупроводниковых источников света позволяют весьма оптимистично говорить о их долгосрочном техническом ресурсе как об одном из основных преимуществ внедрения ОП с СД. Изменение эффективности СД ИС (имеются в виду преимущественно белые СД на основе кристалла и люминофора) связано с процессами деградации. Рис. 2 демонстрирует, насколько это сложный прибор, содержащий большое количество элементов, процессы старения которых могут подчиняться совершенно разным закономерностям.

Основными элементами СД, влияющими на его ресурс, являются:

Кристалл, который кроме собственно способности излучать свет с высокой эффективностью, должен иметь хорошую оптическую прозрачность (для обеспечения свободного выхода квантов излучения из активной области) и хорошую электрическую проводимость (для снижения активных потерь при прохождении тока), а также удовлетворять многим критериям технологичности производства.

Слой люминофора или смеси люминофоров, который подбирается весьма тщательно, так как кроме достаточно широкого спектра излучения, активный материал и вещество, которое играет роль носителя, должны обеспечивать минимальный уровень безызлучательных рекомбинаций. Особое внимание уделяется температурной стойкости и стабильности при длительной работе [2] (рис. 3). Способ нанесения люминофора во многом определяет цветовые и фотометрические характеристики, в том числе пространственное распределение цветовых характеристик и яркости.

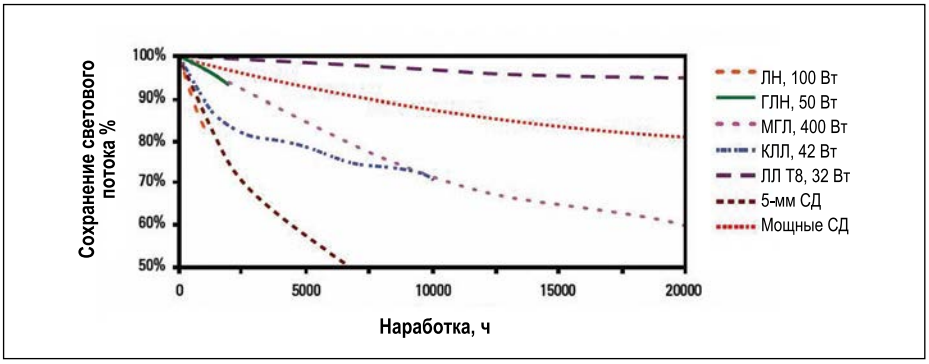

Рис. 1. Типичные спады световых потоков различных ИС [1]

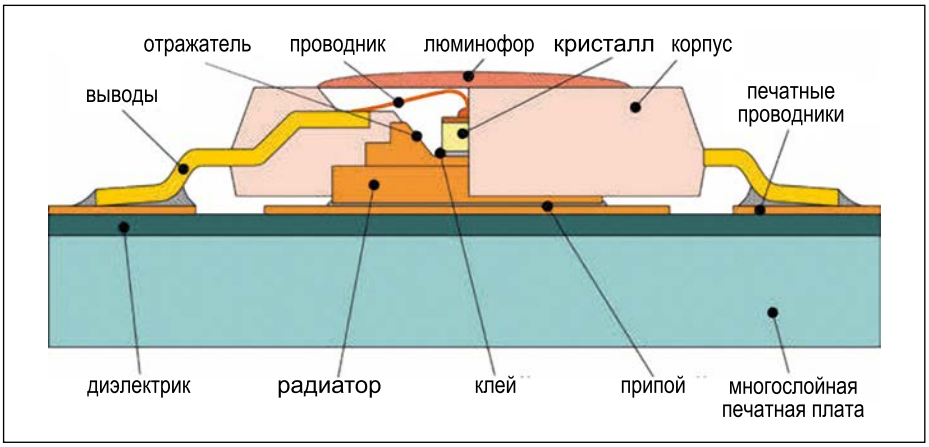

Рис. 2. Элементная база белого СД

[1] Публикация подготовлена на основе доклада на конференции, проводившейся в рамках выставки *Interlight Moscow powered by Light+Building*, 10.11.2016

Кристаллодержатель на основе меди или другого материала, который обрабатывается специальным образом для создания хороших отражающих свойств и максимальной теплопроводности. Современные конструкции СД позволяют обеспечить достаточно низкое тепловое сопротивление, например, за счёт поверхностного монтажа (*SMD* технология) теплопроводного элемента корпуса светильника. Кристаллодержатель обычно сочетает в себе и функцию отражателя света, поскольку часть излучения кристалла, а также часть рассеянного в слое люминофора света возвращается обратно.

Клей или эвтектический сплав, который служит для крепления кристалла СД в корпусе и должен обеспечивать прочность соединения, хороший и равномерный электрический контакт и отличную теплопроводность. Кроме этого, он должен иметь хорошую отражающую способность и выдерживать длительное воздействие высокой температуры.

Отражатель, форма и размеры которого выбираются так, чтобы совместно с оптической линзой он формировал необходимое пространственное распределение силы света прибора. Для увеличения отражающей способности, поверхности кристаллодержателя, отражателя и токоподводящих элементов могут иметь специальные покрытия из различных материалов, от простых вариантов из серебра и алюминия до сложных композитных покрытий.

Защитный компаунд, который защищает структуру СД и линзу (в случае необходимости фокусирования светового потока) от коррозии и воздействия окружающей среды.

Токоподводящие элементы, которые подводят ток к верхней, направленной наружу, стороне полупроводникового кристалла. Эти элементы и способы их крепления должны, с одной стороны, обеспечить хороший контакт и низкое активное сопротивление току, а с другой стороны, не должны препятствовать выходу излучения.

Под действием теплового и электрического перенапряжения во всех элементах СД ИС могут происходить те или иные процессы деградации: образование ядра и рост дислокаций несоответствия на дефекте кристалла; образование дислокаций в основании прибора; переход полимерной субстанции из состояния стеклования в фазу вязкой жидкости с расширением; деградация люминофоров самой разной природы, например, в результате окислении; изменения в кристаллической решётке, обусловленные диффузией; химическое взаимодействие с окружающей средой; температурный эффект (перегрев).

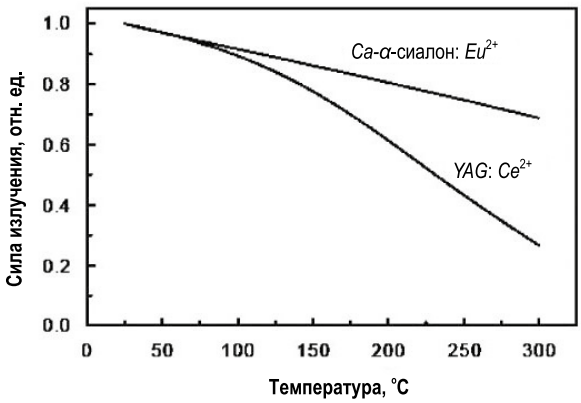

Рис. 3. Изменение силы излучения люминофора при повышении температуры

1.2. Технический ресурс и программы Министерства энергетики США

Внедрение ОП с СД в системы внутреннего и внешнего освещения в США идёт быстрыми темпами. При этом Министерство энергетики США уделяет большое внимание оценке качества этого продукта на рынке страны через различные программы поощрения производителя и потребителя, а также посредством государственных вложений в оценку качества продукции [3]. Одновременно осуществляется и программа поддержки институтов, разрабатывающих методики измерений, оценки и прогнозирования. В табл. 1 приведён перечень разработанных *NIST* (Национальный институт стандартов и технологий США) и *ANSI* (Североамериканский институт стандартов) и одобренных и утверждённых *IESNA* меморандумов-рекомендаций типа *LM* для сбора данных по спаду светового потока и изменению цветности и типа *TM* по методикам прогнозирования технического ресурса на основе этих данных.

Если до недавнего времени в практике измерений фотометрических и колориметрических характеристик приборов с СД рекомендовалось обращаться к документу *IESNA LM-79*, то сегодня основополагающим стандартом международного ранга является стандарт МКО *S025/E:2015* «Методы испытаний СД ламп, ОП с СД и СД модулей» [4]. Этот стандарт определяет условия выполнения воспроизводимых световых и цветовых измерений характеристик СД ламп, СД модулей и ОП с СД (далее – приборы с СД), регламентирует формы отчётов и таблиц для образования базы данных. Доступность надёжных и точных значений характеристик приборов с СД – основное требование для проектирования систем освещения и оценки исполнения этих проектов.

Получая данные посредством измерений в определённых нормализованных условиях, их можно сопоставлять в рамках сличений между различными лабораториями (в пределах заявленной неопределённости или погрешности измерений). Стандарт регламентирует требования к измерениям электрических, фотометрических и колориметрических характеристик СД ламп, ОП с СД и СД модулей при работе на переменном или постоянном токе. СД генераторы света (*light engines*) по процедуре испытаний приравниваются к СД модулям. Характеристики испытываемых приборов с СД включают в себя полный световой поток, световую отдачу, парциальный световой поток, распределение силы света, осевую силу света, яркость и распределение яркости, координаты цветности, КЦТ, индекс цветопередачи, угловую однородность цветовых характеристик. Стандарт не распространяется на СД источники света (ИС) и органические СД. Практически все методики серии *LM*, кроме введённых в действие в 2015 г., в которых дополнительно рассматриваются вопросы измерения энергетического потока излучения и фотонного потока, соответствуют методикам измерений этого стандарта МКО.

Таблица 1

Нормативная база оценки технического ресурса ОП с СД в США

IES LM-79–08: *Electrical and Photometric Measurements of Solid-State Lighting Products* ***IES LM-80–08:*** *Methods for Measuring Lumen Maintenance of LED Light Sources* ***IES LM-85–14:*** *High Power LED Electrical and Photometric Test* ***IES LM-82–12:*** *Characterization of LED Light Engines and LED Lamps for Electrical and Photometric Properties as a Function of Temperature* ***IES LM-84–14:*** *Measuring Luminous Flux and Color Maintenance of LED Lamps, Light Engines, and Luminaires* ***IES LM-86–15:*** *Measuring Luminous Flux and Color Maintenance of Remote Phosphor Components*	***LM-79–08:*** *Электрические и фотометрические измерения светотехнических изделий с СД* ***LM-80–08:*** *Методы измерения спада светового потока СД ИС* ***LM-85–14:*** *Электрические и фотометрические испытания мощных СД* ***LM-82–12:*** *Оценка температурных зависимостей электрических и фотометрических характеристик СД генераторов света и СД ламп* ***LM-84–14:*** *Измерения спада светового потока и изменения цветности СД ламп, СД генераторов света и ОП с СД* ***LM-86–15:*** *Измерения спада светового потока и изменения цветности деталей с отдалённым люминофором*
TM-21–11*: Projecting Long Term Lumen Maintenance of LED Light Sources* ***TM-28–14****: Projecting Long Term Luminous Flux Maintenance of LED Lamps and Luminaires.* ***TM-26–15****: Methods for Projecting Catastrophic Failure Rate of LED Packages*	***TM-21–11:*** *Долгосрочное прогнозирование сохранения светового потока СД ИС* ***TM-28–14****: Долгосрочное прогнозирование сохранения светового потока СД ламп и ОП с СД* ***TM-26–15****: Методы прогнозирования катастрофических отказов СД сборок*

Необходимо отметить, что в арсенале российских документов в части определения деградации ОП имеется ГОСТ Р 54350–2015 и его пункт 10.15 [5]. Это испытание не даёт никаких прогнозов. Оно позволяет установить наличие или отсутствие существенных процессов деградации по результатам относительных измерений спада светового потока и изменения КЦТ в климатических камерах при заданных температурах наблюдения. Результаты относительных измерений сравниваются с измерениями в лабораторных условиях при температуре 25 °С. Основные особенности этой метрики ОП с СД – это использование методик абсолютной фотометрии и рекомендации – по широкому применению спектрорадиометрического подхода при измерениях световых и цветовых характеристик приборов с СД.

2. Методики определения стабильности фотометрических характеристик ОП с СД

2.1. Основополагающие методики серии *LM* (рис. 4)

Первая методика, скрупулёзно регламентирующая процедуру сбора данных по спаду светового потока для СД ИС, была создана в 2008 г. Сегодня этот документ (*LM-80*) переработан и принят в версии 2015 г. Помимо оценки стабильности светового потока, требования пополнились измерениями изменений цветности (МКО 1976 *u'*, *v'*), спада потока фотонов и стабильности потока излучения. Это связано с тем, что есть необходимость измерения как энергетических, так и фотонных характеристик излучения. Кроме того, документ 2008-го года распространяется только на СД ИС, тогда как документ 2015-го года регламентирует методы измерения и сбор данных по изменению фотометрических и фотонных характеристик как для СД ИС, так и для СД модулей и СД сборок. Помимо расширения задач в части определения изменения цветности во времени (МКО 1976 *u'*, *v'*), оценки спада потока фотонов и спада потока излучения, документ включает большую область применения систем питания СД: источник питания постоянного тока, источник питания постоянного напряжения, источник питания переменного тока с регулируемым напряжением, источник питания с ШИМ модуляцией тока. При этом процедура испытаний включает в себя прежние требования стандарта 2008-го года: продолжительность испытаний не менее 6000 ч (рекомендуется 10–15 тыс. ч), сбор данных минимум через каждые 1000 ч, и испытания должны выполняться при двух температурах отжига *Ts*, равных 55 и 85 °С. Основная задача документа – обеспечение жёсткого соблюдения единых условий выполнения измерений с целью достоверного и объективного сравнения результатов испытаний различными лабораториями одного и того же типа продукции.

Рис. 4. Стандарты *IESNA* серии *LM*

2.2. Принципиальные различия методик серии *LM*

Стандарт *IES LM 85–14* посвящён электрическим и фотометрическим испытаниям мощных СД. Основная проблема при этом – температурные нагрузки *p-n*-перехода при больших токах. Для получения достоверных результатов измерений в лабораторных условиях после извлечения приборов из климатической камеры необходим дополнительный отвод тепла или импульсный режим измерений, при котором нужно успеть измерить спектральное распределение источника излучения. Целью документа является создание методики воспроизводимых измерений полного светового потока, полного потока излучения, электрической мощности, световой отдачи и цветовых характеристик мощных СД, используемых в системах общего освещения. Метод распространяется на СД сборки и СД узлы (*LED assembly*) и не распространяется на СД модули и СД генераторы света. Методика включает процедуры измерений в импульсном и непрерывном режимах работы и не распространяется на УФ СД и СД, работающие на переменном токе.

Стандарт *IES LM-82–12* – это методика определения температурных зависимостей электрических и фотометрических характеристик СД генераторов света и СД-ламп с встроенными устройствами управления (УУ), т.е. с учётом УУ. Документ описывает процедуру проведения испытаний и условия обеспечения воспроизводимых и сопоставимых между лабораториями результатов при всех заданных температурах. Отчёт об испытаниях должен содержать данные о температуре, при которой проводились испытания, полном световом потоке испытываемого образца, потребляемой электрической мощности и цветности. При этом производитель изделия должен указать точки измерения температуры прибора с СД и его УУ, *Tb* и *Td* соответственно. Измерения выполняются в камерах тепла и холода, и полученные результаты сравниваются с результатами лабораторных измерений, выполненных при 25 °С.

Стандарт *IES LM-84–14* – это методика измерения спада светового потока и изменения цветности СД ламп, СД генераторов света и ОП с СД. Он, также как и все остальные стандарты серии *LM*, базируется на *LM 80* и *LM 79*. Методика распространяется на СД лампы как с встроенными УУ, так и без них, СД генераторы света и ОП с СД. Все измерения выполняются при температуре 25± 5 °С. В каждом интервале измерений, выполняемых в соответствии со стандартом *LM-79–08*, испытываемое устройство вынимается из испытательной камеры и переносится в лабораторию. После выполнения измерений прибор возвращается на место работы. Отчёт должен содержать: идентификацию испытательной лаборатории, условия выполнения испытаний (температура, влажность, ориентация прибора), информацию о времени проведения испытаний, описание измерительного оборудования, описание испытываемого прибора, таблицу результатов измерений, включающих: продолжительность наблюдения спада характеристик и все измеренные значения характеристик.

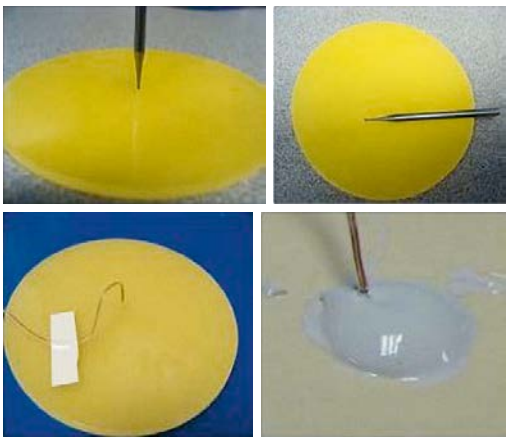

Рис. 5. Контактные методы измерения температуры поверхности люминофора

Стандарт *IES LM –86–15* рекомендует метод испытаний, соответствующий методике *LM-80*, с отличием в том, что объектом испытаний является люминофор, а не светодиод. Испытания включают в себя: измерение освещённости люминофора на специальной испытательной платформе; контроль температуры люминофора (рис. 5); измерения светового потока, излучаемого поверхностью люминофора.

Порядок выполнения измерений следующий:

– измерение температуры корпуса платформы;

– определение доминантной (пиковой или центроидной) длины волны излучения СД накачки;

– измерение облучённости на поверхности люминофора и определение падающего на люминофор потока излучения $\Phi_{e,\ incident}$, создаваемого СД накачки;

– измерение равномерности распределения облучённости (она должна быть не меньше, чем 0,6);

– определение светового потока $\Phi_{v,\ emit}$, создаваемого поверхностью люминофора;

– расчёт эффективности преобразования K_{conv} в определённый интервал времени:

$$K_{conv} = \Phi_{v,\ emit}/\Phi_{e,\ incident}. \qquad (1)$$

Таким образом, измеряются характеристики кристалла и равномерность облучённости, а также температуры корпуса, наружной поверхности люминофора и его внутренней поверхности. Характеристики СД накачки должны оставаться неизменными, а при существенных изменениях характеристик исходного кристалла он заменён на аналогичный источник света. Продолжительность испытания и требования к его условиям и отчётности такие же, как и в *LM-80*.

В рамках проекта Министерства энергетики США [3] устранение необходимости проверки продукта в целом обещает упростить испытания, требуемые для получения права на сертификат энергоэффективности *Energy Star*.

Что касается приборов с отдалённым люминофором, то результаты проведённых исследований говорят о том, что освещённость, создаваемая излучением синего кристалла, и температура поверхности люминофора являются ключевыми переменными, определяющими световой поток отдалённого люминофора. Если освещённость определена количественно, и поверхностная температура отдалённого люминофора измерена, то эффективность у СД

прибора с отдалённым люминофором может периодически измеряться, и долговременная стабильность или спад эффективности могут быть определены.

3. Прогнозирование полезного срока службы – технического ресурса

Арсенал методик прогнозирования срока службы на базе результатов наблюдения спада характеристик СД ИС и ОП с СД по методикам серии *LM* составляют в настоящее время три методики серии *TM* (табл. 1 и рис. 6). В них отражены вопросы прогнозирования долговременной стабильности светового потока СД ИС (основополагающий документ); прогнозирования долговременной стабильности светового потока СД ламп и ОП с СД и прогнозирования номинальных катастрофических отказов для СД ИС. Методики разработаны при участии ведущих экспертов *NIST*. Длительный эксперимент выполнялся с помощью специальной установки [6, 7], которая была собрана на базе интегрирующей сферы диаметром 1 м и позволяет проводить испытания на старение и измерение оптических характеристик 480-ти СД при шести условиях испытаний в диапазоне температур от 25 до 115 °С. Температура образцов при проведении испытаний и измерений поддерживается с точностью ± 0,05 °С. Стабильность температурного режима, а также возможность проводить частые измерения без изменения компоновки установки, позволяют получать обладающие высоким разрешением базы данных, что, в свою очередь, подтвердило допустимость применения выбранных моделей прогнозирования сроков службы изделий с СД.

Рис. 6. Стандарты *IESNA* серии *TM*

3.1. Теоретические основы прогнозирования технического ресурса в стандартах серии *TM*

Данные, полученные в результате проведённых в соответствии с *LM-80* испытаний спада светового потока СД ИС в течение не менее 6000 ч с интервалом 1000 ч (большее время испытания с меньшим интервалом между измерениями только приветствуется), представляются в виде таблицы для набора образцов. При этом рекомендуемый набор составляет 20 образцов, а значение светового потока для, например, 0 ч приравнивается к 1 для каждого образца. Далее фиксируются отклонения от 1 после каждого измерения, после чего эти отклонения суммируются и усредняются по всем образцам. Затем по усреднённым данным (за вычетом первых 1000 ч, т.е. времени первичного отжига, который, как правило, улучшает характеристику), методом наименьших квадратов выполняется аппроксимация экспоненциальной кривой (2) и определяется a –скорость спада светового потока.

$$\Phi_i(t) = B\exp(-\alpha\ t) \qquad (2)$$

где $\Phi_i(t)$ – усреднённый относительный световой поток, соответствующий времени наработки прибора t в часах, B – начальное значение светового потока, a скорость спада светового потока, определяемая по кривой спада методом наименьших квадратов. Используя выражение (3), можно прогнозировать срок службы L_p:

$$L_p = \frac{\ln(100x\frac{B}{p})}{\alpha}, \qquad (2)$$

где p – доля в процентах от первоначального значения светового потока.

L_{70} и даже L_{50} рекомендуется определять в предположении сохранения прибором характеристик, соответствующих требованиям полезного срока службы.

Если рассматривать спад светового потока во времени с точки зрения дополнительных температурных нагрузок, то скорость деградации моделируется уравнением, которое было получено шведским химиком Сванте Аррениусом на основе теории термодинамики применительно к температурной зависимости химической реакции:

$$\alpha_i = A\exp(\frac{-E_a}{k_B T_{s,i}}), \qquad (4)$$

где A –предэкспоненциальный множитель; E_a – энергия активации, эВ; $T_{s,\ 1}$ – температура в месте нахождения прибора, К; k_B –постоянная Больцмана ($8{,}6173 \cdot 10^{-5}$ эВ/К). Определив скорости спада потока a_1 и a_2 для двух соответствующих температур T_1 и T_2, можно определить отношение

$$\frac{E_a}{\kappa_B} = \frac{\ln a_1 - \ln a_2}{\frac{1}{T_{s,2}} - \frac{1}{T_{s,1}}}. \qquad (5)$$

По формуле (5) можно рассчитать предэкспоненциальный множитель A для температуры $T_{s,1}$

$$A = a_1\exp(\frac{E_a}{k_B Ts,i}). \qquad (6)$$

Зная предэкспоненциальный множитель, можно по формуле (5) рассчитать скорость реакции для любой температуры внутри диапазона температур $T_1 - T_2$. При этом, считая входящее в (2) начальное значение светового потока $B = \sqrt{B_1 B_2}$, можно рассчитать L_p по формуле (3) и световой поток $\Phi(t)$ по формуле (2) также для любой температуры внутри диапазона температур $T_1 - T_2$.

Стандарт *IES TM-28–14* рекомендует методику прогнозирования долговременной стабильности светового потока СД ламп и ОП с СД. Данные, на которых базируется прогнозирование, берутся из базы данных, полученных на основе *LM-80* и *LM-84*. Предлагаются два метода. Первый – это использование тех же самых соотношений, что и в *TM-21–11*, но для меньшего набора образцов (от 3 до 5). Второй – комбинированное использование данных для СД сборок по *LM-80* и *LM-84–14* для одних и тех же временных и температурных условий.

Если скорости изменения световой характеристики для СД ИС и для ОП с СД совпадают, можно смело прогнозировать для ОП с СД полезный срок службы, указанный производителем в спецификации для СД ИС, а если нет, то предлагается следующая модель оценки:

$$\Delta a = a_{LM-84} - a_{LM-80}; \quad (7)$$

$$\ln[r(t)] = \Delta a t + b;$$

$$\Phi(t) = B \cdot \frac{\exp[-(a+\Delta a)\cdot t]}{\exp(b)};$$

$$L_p = \frac{(100x\frac{B}{p}) - b}{a + \Delta a},$$

где *r(t)* – набор отношений, полученных для разного времени отжига *t* прибора с СД (*LM*-84) и СД (*LM*-80), использованного при создании этого прибора, *Δa* – наклон аппроксимирующей кривой, *b* – точка пересечения с осью координат.

3.2. Катастрофические отказы

Стандарт *IES TM-26–15* на прогнозирование катастрофических отказов базируется на теории надёжности динамических систем, теории отказов таких систем и математических моделях прогнозирования. Начальный участок типичной кривой катастрофических отказов связан с выявлением недостатков использованных компонентов, погрешностей проектирования и технологии изготовления, выявляющихся на стадии разработок, вторая часть – это нормальный период работы, а в третий период начинают сказываться процессы старения и деградация. Стандарт представляет собой объёмный документ, содержащий несколько методик оценки катастрофических отказов. Для проведения эксперимента также нужны климатические камеры и оборудование для измерения характеристик оптического излучения. Самые простые методы выявления катастрофических отказов за время нормального периода работы – это испытания при температурных нагрузках и повышении потребляемого тока. Частота проявления катастрофических отказов выражается числом отказов на 10^9 часов работы СД сборки (*IES TM*-26-15, п. 3.2). В период нормальной работы вероятность катастрофических отказов предлагается моделировать экспоненциальной кумулятивной функцией распределения во времени:

$$F(t) = 1 - \exp(-\lambda t), \quad (8)$$

где *t* – время, ч; *λ* – частота отказов, $ч^{-1}$. Самый простой предлагаемый метод сбора и обработки данных заключается в табличном представлении данных об отказах в зависимости от температуры *p-n*-перехода и тока питания (максимального, номинального и минимального) или температуры места нахождения прибора и максимального тока питания. Более сложные методы базируются на моделях, учитывающих температурные π_T и токовые π_I зависимости стресс-факторов [8–10]:

$$\lambda = \lambda_{ref} x\, \pi_I x\, \pi_T, \quad (9)$$

где λ_{ref} – число отказов при определённых условиях, например, при 45 °C и 50 % максимального тока.

4. Заключение

1. Предлагаемые *IESNA* методики сбора данных серии *LM* и методики прогнозирования на их основе полезного срока службы серии *TM* требуют больших временных, финансовых и трудовых затрат. Кроме того, к испытательным лабораториям предъявляются определённые требования в части их оснащения современными спектрорадиометрическими измерительными комплексами, климатическими камерами, гониофотометрами, фотометрами изображения и традиционными *V(λ)* фотометрами с высоким качеством коррекции ($f'_1 < 1$).

2. Необходима разработка ускоренных методов исследования деградации, например, отжиг при повышенных температурах, что позволит повысить скорость процессов деградации при условии сохранения её физико-химической природы, но требует на стадии разработки, практически, тех же затрат, что и по пункту 1 заключения.

3. Один из возможных подходов ускоренной методики – это возможность измерения температуры *p-n*-перехода готового СД прибора и его сравнение со спецификацией СД, входящего в его состав. Для этого необходимо, чтобы в конструкции ОП с СД были предусмотрены специальные точки доступа для контактного измерения температуры *p-n*-перехода и УУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Источник информации: Adapted from Bullough, JD. 2003. Lighting Answers: LED Lighting Systems. Troy, NY. National Lighting Product. Information Program, Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute.
2. *Xie, Rong-Jun* (2007). Silicon-based oxynitride and nitride phosphors for white LEDs. A review // Sci. Technol. Adv. Mater. – 2007. – No. 8. – P. 588.
3. https://energy.gov/energysaver/energy-saver (дата обращения 26.12.2016)
4. CIE standard IS025 2015 « Test Method for LED Lamps, LED Luminaires and LED Modules».
5. ГОСТ Р54350–2015 «Лампы, Светильники и Модули Светодиодные Методы измерения фотометрических и колориметрических характеристик».
6. *Зонг Ю., Хьюлетт Д.* Разработка полностью автоматизированной установки для испытаний светодиодов на срок службы // Светотехника. – 2013. – № 3. – С. 24–28.
7. *Zong, Y., Hulett, J.* Development of a Fully Automated LED Lifetime Test System // Light & Engineering. – 2013. – No. 2. – P. 47–56.
8. NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods. Chapter 8- Assessing Product Reliability. http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/index.htm
9. *Abernetty, R.B.* The New Weibull Handbook, 5th Ed., Published and Distributed by Dr. Robert Abernethy, 2006. ISBN: 09653062–3–2.
10. *Dodson, B.* The Weibull Analysis Handbook, 2nd Ed., 2006, ASQ Quality Press. ISBN: 978087389–667–2.

Столяревская Раиса Иосифовна, *доктор техн. наук. Окончила в 1968 г. физический факультет Казанского государственного университета. Научный редактор ООО «Редакция журнала «Светотехника», старший менеджер ВНИСИ им. С.И. Вавилова. Представитель Российского национального комитета МКО в Отделении 2 МКО*