

Усовершенствование методов прогнозирования ресурса светодиодных ламп по результатам регистрации светового потока в ходе испытаний

А. Л. Гурский¹, Н. В. Машедо²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск,

²ОАО «Испытания и сертификация бытовой и промышленной продукции «БЕЛЛИС»,
Минск, Беларусь; e-mail: n.mashedo@gmail.com

Предложена модификация методов прогнозирования ресурса светодиодных ламп по данным их испытаний на основе регистрации зависимости полного светового потока TLF от времени, аппроксимации этой зависимости экспоненциальными функциями и экстраполяции этих зависимостей в область больших времен. Рассмотрен модифицированный метод аппроксимации моноэкспоненциальной функцией с исключением из рассмотрения начального участка экспериментальной зависимости, определяемого путем вычисления коэффициентов детерминации. При аппроксимации функцией, описывающей процессы разгорания и тушения люминесценции, предложен этап подбора начальных условий по результатам анализа области экстраполяции полученной функции в область больших времен.

Ключевые слова: светодиодные лампы, коэффициент детерминации, ресурсные испытания, прогнозирование ресурса, аппроксимация

Введение

Широкое распространение осветительных ламп на основе светодиодов белого свечения обусловлено такими их преимуществами, как высокая энергоэффективность и экологичность. В то же время эти источники света все еще имеют ряд недостатков. К их числу относится изменение ряда параметров ламп, в частности, полного светового потока (total luminous flux, TLF), в процессе эксплуатации [1, 2]. Поэтому прогнозирование ресурса ламп на основе данных испытаний, фиксирующих изменения светового потока в процессе старения ламп, остается актуальной задачей. Решение этой задачи в настоящее время основано на подходе, при котором экспериментально определяется зависимость TLF от времени в течение относительно небольшого срока (6000 часов), а затем осуществляется ее аппроксимация экспоненциальными функциями, экстраполяция этих функций в область больших времен и нахождение координат точки пересечения с линией, соответствующей минимально допустимому значению TLF , например, 50% или 70% от начального значения [2]. При этом основную сложность представляет точное определение вида зависимости, поскольку от этого будут сильно зависеть результаты прогнозирования. Предложено осуществлять прогнозирование по данным аппроксимации полученной экспериментальной зависимости моноэкспоненциальным законом затухания [3]. В настоящее время этот метод стандартизован [4]. Его недостаток определяется тем, что реальные зависимости светового потока от времени носят более сложный и часто немонотонный характер [5–7], что снижает надежность прогнозирования. В работе [6] предложена аппроксимация биэкспоненциальным законом затухания. Такая аппроксимация также не учитывает в полной мере сложный характер экспериментальных зависимостей и на практике часто вырождается в моноэкспоненциальную. В случае аппроксимации мультиэкспоненциальным законом затухания неясен критерий выбора количества экспонент. Для увеличения точности прогнозирования предлагалось исключать из рассмотрения начальный участок зависимости [5], однако не было предложено никаких критериев, позволяющих объективно определить размер исключаемого участка. Для учета вклада увеличения квантового выхода люминесценции ламп на начальном этапе наработки предложена аппроксимация мультиэкспоненциальной зависимостью,

содержащей функцию вида $[1-\exp(t/\tau)]$ [7]. Цель данной работы – усовершенствование методов аппроксимации экспериментальных зависимостей светового потока от времени для повышения надежности прогнозирования ресурса ламп.

1. Эксперимент

В экспериментах использовались выборки коммерческих светодиодных ламп различных производителей. Установки для ресурсных испытаний и измерения параметров ламп, а также особенности измерений описаны в [8]. Объем выборок ламп, методы измерений и обработки данных отвечали рекомендациям соответствующих международных стандартов. Относительная расширенная неопределенность измерения значений полного светового потока не превышала 5 %.

2. Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведена зависимость светового потока от времени для одного из экземпляров испытуемых ламп (черные точки) и аппроксимация этой зависимости по моноэкспоненциальному закону согласно [4] (кривая 1). Видно, что данная кривая не очень хорошо соответствует набору экспериментальных данных, и можно ожидать более сильного ее отклонения от эксперимента в области больших времен. Исключение начального участка приближает экспоненциальную кривую к совокупности экспериментальных точек. В качестве параметра, определяющего оптимальное количество исключаемых точек, можно предложить коэффициент детерминации R^2 , являющийся мерой точности описания экспериментальных данных рассматриваемой моделью. В этом случае при аппроксимации начальное значение светового потока не фиксируется. При таком подходе при последовательном исключении начальных точек зависимости находят такое их количество, при котором величина R^2 наиболее близка к единице (критерий R^2). Набор кривых, полученных при исключении 1, 2, и 4 точек, показан на рис. 1 (кривые 2–4 соответственно. Для случаев исключения 0, 1, 2, 3 и 4 точек получены значения R^2 , равные 0,971; 0,954; 0,988; 0,976 и 0,964 соответственно.

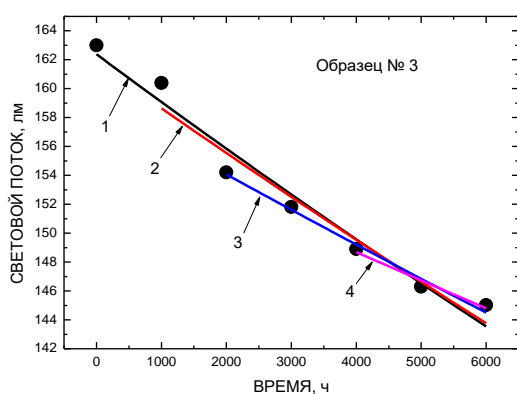


Рис. 1. – Экспериментальная зависимость светового потока от времени (черные кружки) и аппроксимация различных ее участков моноэкспоненциальной функцией затухания (1–4).

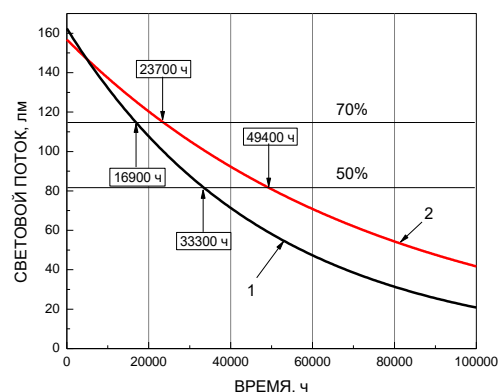


Рис. 2. – Определение прогнозного ресурса лампы при аппроксимации моноэкспоненциальной зависимостью по [4] (кривая 1) и с исключением данных на основе критерия R^2 (кривая 2).

Поэтому в качестве прогнозной функции предлагается выбрать экспоненту с параметрами, полученными после исключения двух начальных точек экспериментальной зависимости. На рис. 2 показаны результаты прогнозирования

ресурса путем экстраполяции найденных функций в область больших времен согласно [4] и с помощью предлагаемой методики. Поскольку для модифицированной методики значение R^2 ближе к 1, что означает большую близость модели к набору экспериментальных данных, можно полагать, что результаты прогноза во втором случае более надежны. Недостаток метода – неполный учет совокупности экспериментальных данных, что может снизить надежность прогнозирования. Указанный недостаток отсутствует при использовании методики [7]. Аналитическое выражение, описывающее вклады процессов, приводящих к увеличению и убыванию светового потока, в общую его зависимость от времени $I(t)$ при этом имеет вид

$$I(t) = \left(I_0 + \left(1 - A e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) \right) \left(B e^{-\frac{t}{\tau_2}} + C e^{-\frac{t}{\tau_3}} \right), \quad (1)$$

где I_0 – начальная величина светового потока, равная его значению в начале испытаний и фиксируемая в процессе аппроксимации; τ_1 – постоянная времени увеличения; τ_2 – постоянная времени быстрого процесса убывания; τ_3 – постоянная времени медленного процесса убывания; A, B, C – коэффициенты, характеризующие вклад каждого из процессов. Результаты аппроксимации экспериментальных данных для одного из исследованных образцов зависимостью (1) показаны на рис. 3.

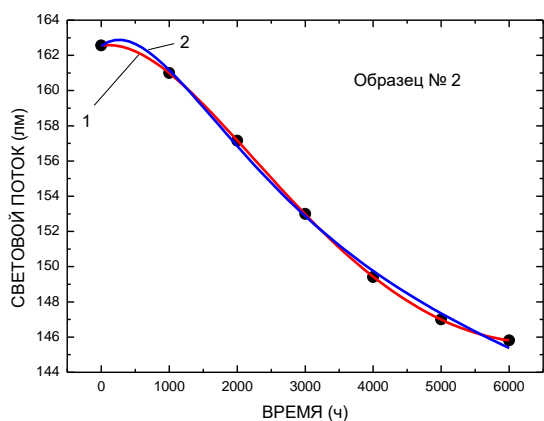


Рис. 3. – Экспериментальная зависимость светового потока от времени (черные кружки) и аппроксимация различных ее участков выражением (1) с различными начальными условиями (кривые 1, 2).

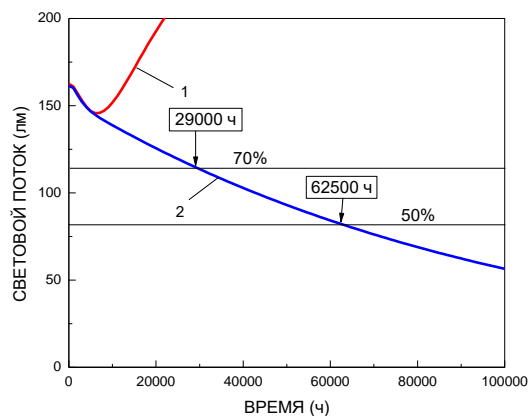


Рис. 4. – Определение прогнозного ресурса лампы при аппроксимации моноэкспоненциальной зависимостью по [4] (кривая 1) и с исключением данных на основе критерия R^2 (кривая 2).

Видно, что в этом случае аппроксимирующая функция ближе к набору экспериментальных данных, чем в случае моноэкспоненциальной зависимости. Однако, в данном методе проявляется зависимость результатов аппроксимации от начальных условий (кривые 1, 2). При этом возможно получение неадекватного результата, когда, например, при экстраполяции в область больших времен появляется возрастающий участок зависимости, что невозможно (рис. 4, кривая 1, соответствующая кривой 1 на рис. 3). Поэтому при использовании формулы (1) обязателен дополнительный контроль хода экстраполированной кривой и при необходимости проведение повторной процедуры аппроксимации с подбором начальных условий. В результате получены кривые 2 на рис. 3 и рис. 4, хорошо соответствующие экспериментальным данным и не содержащие возрастающих участков в области больших времен. Прогнозное значение ресурса, полученное с их использованием (рис. 4), близки к полученным при

исключении начальных участков зависимостей на основе R^2 -критерия, что может служить дополнительным обоснованием применимости данного метода.

Заключение

Таким образом, предложены модифицированные методы прогнозирования ресурса светодиодных ламп по данным измерений зависимости величины светового потока от времени, позволяющие повысить надежность прогнозирования ресурса ламп. Определены значения прогнозного ресурса для исследованных экземпляров ламп.

Литература

1. Meneghini M., Dal Lago M., Trivellin N., Mura G., Vanzi M., Meneghesso G., Zanoni E. Chip and package-related degradation of high power white LEDs. *Microelectronics Reliability*. 2012. Vol. 52, No. 5. P. 804–812
2. Chang M.-H., Das D., Varde P. V., Pecht M. Light emitting diodes reliability review. *Microelectronics Reliability*. 2012. Vol. 52, No. 5. P. 762–782.
3. Huang J., Golubovic D. S., Koh S., Yang D., Li X., Fan X., Zhang G. Q. Rapid degradation of mid-power white-light LEDs in saturated moisture conditions. *IEEE Trans. Device Mater. Reliab.* 2015. Vol. 15, No. 4. P. 478–485.
4. IES 21-11. Projecting Long Term Lumen Maintenance of LED Light Sources. Illuminating Engineering Society of North America, New York 10005, 2011. P. 10–47.
5. Cai M., Yang D., Tian K., Chen W., Chen X., Zhang P., Fan X., Zhang G. A hybrid prediction method on luminous flux maintenance of high-power LED lamps. *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 95, No 2. P. 482–490.
6. Fan J. J., Yung K. C., Pecht M. Lifetime estimation of high-power white LED using degradation-data-driven method. *IEEE Trans. Device Mater. Reliab.* 2012. Vol. 12, No. 2. P. 470–477.
7. Gurskii A. L., Masheda M. V. Color and spectral characteristics of white light emitting diodes and their variation during aging. *Doklady BGUIR*. 2019. No 7(125). P. 39–45.
8. Гурский А. Л., Машеда Н. В. Взаимосвязь между колориметрическими и спектральными параметрами светодиодных ламп белого свечения. *ЖПС*. 2020. Т. 87, No. 6. С. 997–1004.

Improving LED lamps lifetime prediction methods based on results of lumen maintenance registration during testing

A.L. Gurskii¹, M.V. Masheda²

¹ *Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk,*

² *BELLIS Testing and Certification of Home Appliances and Industrial Products, Minsk, Belarus; e-mail: n.mashedo@gmail.com*

A modification of methods for predicting the life of LED lamps based on their test data is proposed based on recording the time dependence of the total luminous flux *TLF*, approximating this dependence with exponential functions and extrapolating these dependencies to the region of large times. A modified method of approximation by a monoexponential function is considered with the exception of the initial section of the experimental dependence determined by calculating the determination coefficients. When approximating by a function describing the processes of increasing and quenching of luminescence, the stage of selecting initial conditions based on the results of the analysis of the region of extrapolation of the obtained function to the region of large times is proposed.

Keywords: LED lamps, determination coefficient, resource tests, lifetime prediction, approximation.