

УДК 621.383.52

ОТКАЗЫ СВЕТОДИОДНЫХ СВЕТОВЫХ ПРИБОРОВ И СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ИХ НАДЕЖНОСТИ

Кузьма А. Ю.

Научный руководитель – к.т.н, доцент Радкевич В.Н.

Светодиодный светильник — это электромеханическая система, в которую помимо источника света входят теплоотвод, блоки электрического управления и формирования оптического сигнала, опорная механическая конструкция и система защиты, а также элементы дизайна. В силу того, что светодиоды характеризуются продолжительным сроком службы, другие компоненты светильника должны служить так же долго. Качественные светодиоды, установленные в плохо спроектированных приборах, могут быстро выйти из строя.

В настоящий момент не существует стандартов, определяющих срок службы и критерии надежности для светодиодов, хотя имеются предложения авторитетных организаций считать сроком службы время, в течение которого световой поток деградирует до некоторого значения (30%) от начальной величины. Даже при использовании высококачественных компонентов, уменьшение светового потока неизбежно, что связано с множеством факторов, таких как условия отвода теплоты, температура окружающей среды, вентиляция, влажность и другие параметры. Надежность самих светодиодов, особенно в части скорости деградации, зависит от качества компонентов. Условия эксплуатации, такие как величина и нестабильность тока могут существенно сократить срок службы [3].

Деградация кристалла. Излучение света в светодиоде происходит в результате рекомбинации инжектированных носителей в активной области. Дефекты кристаллической структуры приводят к деградации внутренней части этой области. Высокая плотность инжектированного тока, нагрев из-за инжектированного тока и тока утечки, а также испускаемый свет ускоряют развитие дефекта, который ведет себя как неизлучающий центр, препятствующий естественной излучающей рекомбинации и в результате генерирующий дополнительное тепло внутри активного слоя. В связи с этим выбор материала имеет огромное значение [2].

Деградация электродов. Деградация электродов в светодиодах в основном имеет место на электроде *p*-области (обычно прибор состоит из подложки *n*-типа и электрод *p*-области формируется вблизи активной области прибора). Основная причина деградации электрода заключается в диффузии металла во внутреннюю область (так называемая периферийная диффузия) полупроводника. Диффузия усиливается с увеличением инжектированного тока и температуры [2].

Термическая деградация. Теплота, выделяющаяся при работе светодиодов, требует их монтажа на радиатор или теплопоглощающую подложку, часто с помощью припоя. Если дефекты в припое создают условия для недостаточного теплоотвода, возникающие горячие точки приводят к тепловой деградации и отказу. Тепловая деградация из-за дефектов в припое часто доминирует в светодиодах в первые 10000 часов работы [2].

Когда в металле протекает достаточно большой ток, ионы металлов мигрируют к противоположным полюсам, приводя к образованию кристаллов и бугорков. Их рост, который может начаться под действием внутренних напряжений, температуры, влажности и особенностей материала, обычно происходит на границе между припоем и радиатором и может привести к короткому замыканию [2].

Электростатический разряд и электрическая перегрузка. Полупроводники чувствительны к дефектам, вызванным электростатическим разрядом. Видами отказа из-за электростатических разрядов могут быть внезапный отказ, параметрические сдвиги или внутреннее повреждение, приводящее к деградации в процессе последующей эксплуатации. Пробои из-за перегрузки и электростатических разрядов являются существенной проблемой

для светодиодов. Большинство коммерческих светодиодов формируется на сапфировых подложках, не имеющих электрической проводимости. Это приводит к появлению остаточного электрического заряда в приборе, что делает его более чувствительным к повреждениям, вызванным электростатическим разрядом и перегрузкой [2].

Термическая усталость. Термические напряжения в герметике являются наиболее частой причиной отказа в светодиодах. Если, вследствие электрической перегрузки или высокой внешней температуры, температура корпуса достигает температуры перехода стеклянного наполнителя герметика, смола начинает быстро расширяться. Разница в коэффициенте термического расширения внутренних компонентов светодиода может привести к механическому повреждению. При очень низких температурах может произойти растрескивание эпоксидной композиции, из которой изготовлены линзы. Высокая температура, вызванная внутренним нагревом и неизлучающей рекомбинацией, и достигающая 150°C, приводит к пожелтению эпоксидной композиции, что в результате меняет выходную оптическую мощность или цвет излучаемого света. Если индекс преломления герметика не соответствует индексу преломления полупроводникового материала, индуцированный свет остается в полупроводнике, в результате чего возникает дополнительный источник тепла. В результате перегрева эпоксидной композиции может происходить разрыв или отделение электродного вывода и снижение прочности соединения кристалла с подложкой. Эти проблемы в свою очередь могут привести к отслоению кристалла и эпоксидной композиции [2].

Также имеют место внезапные отказы, основной причиной которых является выход из строя компонентов блока питания из-за превышения температуры. С помощью математических моделей рассчитывается срок службы в зависимости от температуры эксплуатации. Упрощенная электрическая схема блока питания светодиодного светильника отображена на рисунке 1.

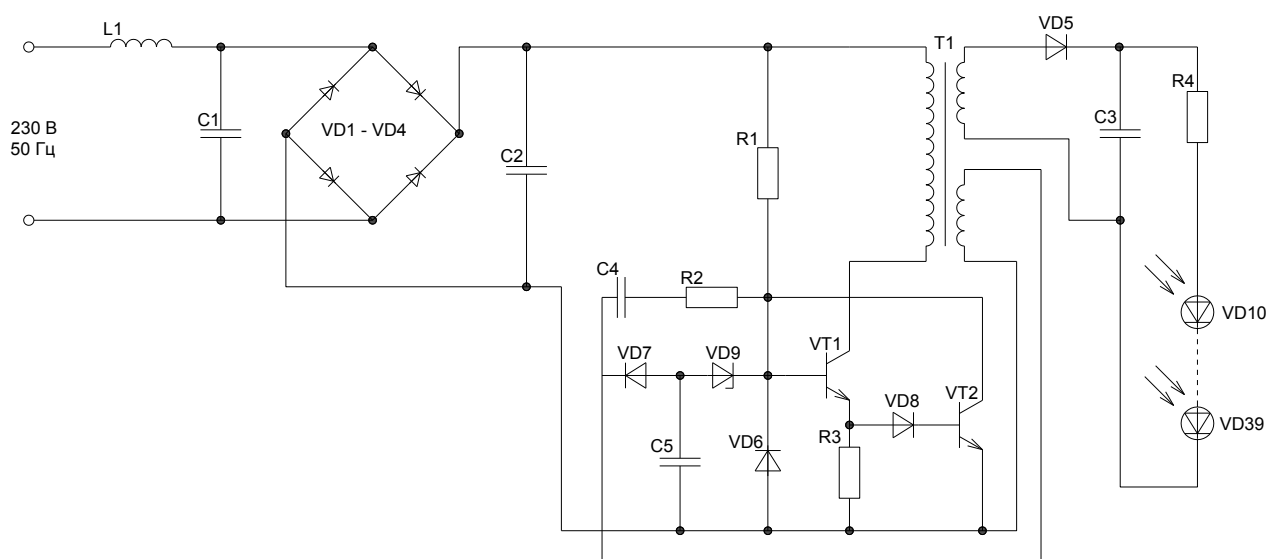


Рисунок 1. Упрощенная электрическая схема блока питания светодиодного светильника

Для элементов схемы модель для расчета эксплуатационной интенсивности отказов будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \text{диоды } VD1-VD8: & \lambda_{\text{э}} = \lambda_{\text{Б}} K_{\text{Р}} K_{\text{Ф}} K_{\text{Д}} K_{\text{У}} K_{\text{Э}} K_{\text{П}}; \\ \text{стабилитрон } VD9: & \lambda_{\text{э}} = \lambda_{\text{Б}} K_{\text{Р}} K_{\text{Э}} K_{\text{П}}; \\ \text{конденсаторы электролитические } C1-C5: & \lambda_{\text{э}} = \lambda_{\text{Б}} K_{\text{Р}} K_{\text{С}} K_{\text{Э}} K_{\text{П}}; \\ \text{транзисторы биполярные } VT1-VT2: & \lambda_{\text{э}} = \lambda_{\text{Б}} K_{\text{Р}} K_{\text{Ф}} K_{\text{Д}} K_{\text{У}} K_{\text{Э}} K_{\text{П}}; \\ \text{резисторы } R1-R4: & \lambda_{\text{э}} = \lambda_{\text{Б}} K_{\text{Р}} K_{\text{R}} K_{\text{Э}} K_{\text{П}}; \end{aligned}$$

дроссель $L1$: $\lambda_{\text{э}} = \lambda_{\text{Б}} K_P K_{\text{э}} K_{\text{П}}$;
 трансформатор $T1$: $\lambda_{\text{э}} = \lambda_{\text{Б}} K_P K_{\text{э}} K_{\text{П}}$;
 светодиоды $VD10$ - $VD39$: $\lambda_{\text{э}} = \lambda_{\text{Б}} K_P K_{\text{э}} K_{\text{П}}$,

где $\lambda_{\text{э}}$ – базовая интенсивность отказов (при температуре окружающей среды $+25^{\circ}\text{C}$ и номинальной электрической нагрузке); K_P – учитывает значение мощности рассеивания и температуры в рабочем режиме; $K_{\text{Ф}}$ – учитывает функциональное назначение элемента; $K_{\text{Д}}$ – учитывает максимально допустимую нагрузку по мощности (току); K_U – учитывает отношение рабочего напряжения к максимально допустимому; K_C – учитывает значение номинальной емкости; K_R – учитывает значение номинального сопротивления; $K_{\text{э}}$ – учитывает жесткость условий эксплуатации; $K_{\text{П}}$ – учитывает степень жесткости требований к контролю качества и правил приемки элементов в условиях производства [1].

Значения этих параметров сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Значения параметров математической модели

Группа элементов	Параметры, входящие в математическую модель							
	$\lambda_{\text{э}} \cdot 10^{-6}, \text{ч}^{-1}$	$K_{\text{Ф}}$	$K_{\text{Д}}$	K_U	K_C	K_R	$K_{\text{э}}$	$K_{\text{П}}$
$VD1$ - $VD8$	0,091	1,5	0,6	1			1,5	5,5
$VD9$	0,0041						1,7	5,5
$C1$ - $C5$	0,173				0,6		1,5	5
$VT1$ - $VT2$	0,044	1,5	0,5	3,03			1,5	5,5
$R1$ - $R3$	0,034					1	1,5	3
$R4$	0,034					2	1,5	3
$L1$	0,033						1,6	5
$T1$	0,0035						1,6	20
$VD10$ - $VD39$	0,034						1,3	5,5

Коэффициент режима работы K_P зависит от температуры окружающей среды. Его значения могут быть рассчитаны с помощью следующих математических моделей [1]:

для диодов $VD1$ - $VD8$, стабилитрона $VD9$, транзисторов $VT1$ - $VT2$

$$K_P = A \cdot \exp \left[\frac{N_T}{273 + t_{\text{окп}} + \Delta t} + \left(\frac{273 + t_{\text{окп}} + \Delta t}{T_M} \right)^L \right]; \quad (1)$$

для электролитических конденсаторов $C1$ - $C5$

$$K_P = A \cdot \left[\left(\frac{K_H}{N_S} \right)^H + 1 \right] \cdot \exp \left[B \left(\frac{273 + t_{\text{окп}}}{N_T} \right)^G \right]; \quad (2)$$

для резисторов $R1$ - $R4$

$$K_P = A \cdot \exp \left[B \left(\frac{273 + t_{\text{окп}}}{N_T} \right)^G \right] \cdot \exp \left\{ \left[\left(\frac{K_H}{N_S} \right) \left(\frac{273 + t_{\text{окп}}}{273} \right) \right]^{0,886} \right\}; \quad (3)$$

для дросселя $L1$

$$K_P = 0,46 + 0,012(t_{\text{окп}} - 50)^{1,3} + 0,54 K_H^{3,5} \exp [0,2(t_{\text{окп}} - 50)^{0,8}]; \quad (4)$$

для трансформатора $T1$

$$K_p = A \cdot \exp \left[\left(\frac{273 + 13,75(3K_H^2 + 1) + t_{окр}}{T_M} \right)^G \right]; \quad (5)$$

для светодиодов $VD10$ - $VD39$

$$K_p = (K_H)^{1,5} \cdot \exp \left[\frac{0,6}{8,625 \cdot 10^{-5}} \left(\frac{1}{273 + 45} - \frac{1}{t_{окр} + 295} \right) \right], \quad (6)$$

где $A, N_T, T_M, L, \Delta t, N_S, B, G$ – постоянные коэффициенты; K_H – коэффициент нагрузки по току (для конденсаторов по напряжению) [1].

Значения коэффициентов, используемых в формулах (1)-(6), приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения констант и коэффициента K_H математической модели для расчета K_p

Группа элементов	A	N_T	T_M	L	Δt	K_H	N_S	B	G
Диоды $VD1$ - $VD8$	44,1025	-2138	448	17,7	150				
Стабилитрон $VD9$	2,1935	-800	448	14,0	150				
Конденсаторы электролитические $C1$ - $C5$	0,0359	358				0,6	0,55	4,09	5,9
Транзисторы биполярные $VT1$ - $VT2$	5,2	-1162	448	13,8	150				
Резисторы $R1$ - $R4$	0,26	343				0,6	0,878	0,5078	9,278
Дроссель $L1$						0,6			
Трансформатор $T1$	0,81		329			0,6			15,6
Светодиоды $VD10$ - $VD39$						0,6			

Результаты расчета коэффициента K_p по формулам (1) – (6) в зависимости от температуры сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Результаты расчета коэффициента K_p в зависимости от температуры

Группа элементов	n , шт	K_p в зависимости от температуры, °С				
		40	50	60	70	80
$VD1$ - $VD8$	8	0,26	0,32	0,40	0,55	0,80
$VD9$	1	0,38	0,44	0,52	0,64	0,85
$C1$ - $C5$	5	0,53	0,77	1,19	1,98	3,56
$VT1$ - $VT2$	2	0,37	0,43	0,52	0,66	0,89
$R1$ - $R3$	3	0,72	0,80	0,90	1,03	1,24
$R4$	1	0,72	0,80	0,90	1,03	1,24
$L1$	1	0,55	0,55	1,02	1,86	3,35
$T1$	1	4,89	13,58	63,78	646,49	19954,69
$VD10$ - $VD39$	20	3,50	6,39	11,28	19,30	32,08

Суммарная интенсивность отказов устройства определяется по выражению

$$\Lambda_3 = \sum_{i=1}^N \lambda_{3i} n_i, \quad (7)$$

где n_i – количество элементов i -й группы [1].

Наработка на отказ

$$T = 1/\Lambda_{\Sigma}. \quad (8)$$

Результаты расчета показателей надежности блока питания в зависимости от температуры сведены в таблицу 4.

Таблица 4 – Результаты расчета показателей надежности блока питания

Показатели надежности	Температура, °С				
	40	50	60	70	80
$\Lambda_{\Sigma} \cdot 10^{-6}, 1/\text{ч}$	22,31	38,77	70,64	179,28	2 412,40
$T, \text{ч}$	44 815,09	25 793,07	14 156,68	5 577,85	414,53

На основании расчетов можно сделать вывод о том, что увеличение температуры внутри блока питания существенно снижает надежность компонентов схемы и всего светодиодного светильника в целом. Поэтому при проектировании и выборе светодиодных световых приборов нужно уделять особое внимание разработке эффективной системы теплоотвода, чтобы обеспечить максимальный срок службы светильника.

Литература

1. Боровиков С.М. Расчет показателей надежности радиоэлектронных средств/ С.М. Боровиков, И.Н. Цырельчук, Ф.Д. Троян – Минск: БГУИР, 2010. -68 с.: ил.
2. Годовицын, И. В. Срок службы сверхярких светодиодов. Причины отказов/ Годовицын И. В.// [Электронный ресурс] URL: <http://led22.ru/ledstat/otkazi-svetodiiodov/otkazi-svetodiiodov.html> (дата обращения 11.04.2017).
3. Срок службы светодиодных светильников: рекомендации по тестированию [Электронный ресурс] URL: <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/2195/doc/53575/> (дата обращения 10.04.2017).