

7. 3G28 Triple-Junction Solar Cell Datasheet [Electronic resource]. URL: <http://azurspace.de> (date of visit: 02.11.2012).

8. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей : справ. кн. 3-е изд., перераб. и доп. Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986.

A. V. Gordeev, N. N. Goryashin, A. S. Sidorov

ANALYSIS OF POWER LOSSES IN SWITCHING SHUNT REGULATOR

The paper presents the results of power losses analysis in switching shunt regulator versus harness length and duty cycle, got by means of P-Spice simulation. The authors show that the power losses in switching shunt regulator are about 30 % of total power losses. The rest of losses are the share of shunt and blocking diodes of a solar array, slip rings of solar array drive and harness.

Keywords: shunt regulator, solar array, power losses.

© Гордеев А. В., Горяшин Н. Н., Сидоров А. С., 2012

УДК 621.314

Н. Н. Горяшин, А. С. Сидоров

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ СОВМЕСТНО С ИМПУЛЬСНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ*

Представлены результаты экспериментов по работе светодиодных элементов большой мощности совместно с импульсным преобразователем. Исследованы инерционные свойства светодиодных элементов двух типов. Проанализировано их влияние на режимы работы выходного фильтра.

Ключевые слова: светодиод, импульсный преобразователь напряжения.

Импульсные преобразователи электроэнергии лежат в основе источников вторичного электропитания для светодиодных осветительных систем, длительность работы которых во многом зависит от обеспечения стабильности тока, протекающего через светодиодный элемент. Таким образом, при использовании в качестве первичного источника электроэнергии (ПИЭ) для питания светодиодных осветителей сети переменного тока общего назначения или источников постоянного тока, например аккумуляторных батарей и других электрогенерирующих устройств, необходимо промежуточное преобразование электроэнергии. В результате ресурс осветительной системы в целом, включая источник вторичного электропитания, будет определяться не только ресурсом светодиодных элементов, но и ресурсом элементов энергопреобразующего устройства.

Ведущие производители мощных светодиодных элементов заявляют, что ресурс (срок службы) этих элементов может достигать 100 тыс. ч, т. е. около 11 лет непрерывной работы с 30%-м падением яркости. Следовательно, необходимо обеспечить такой же длительный ресурс и для вторичных преобразователей. Как правило, такие преобразователи выполняются по классическим схемам с широтно-импульсной модуляцией и индуктивно-емкостным выходным

фильтром с частотами преобразования в несколько десятков килогерц, массогабаритные характеристики которого и определяют массу всего преобразователя. В качестве емкостных фильтров используются оксидные или электролитические конденсаторы, ресурс которых варьируется от 2 до 5 тыс. ч, после чего они существенно теряют свою емкость, что приводит к увеличению пульсаций выходного напряжения и тока и, следовательно, к ухудшению как светоизлучающих, так и ресурсных характеристик светодиодов вплоть до выхода их из строя [1; 2]. Таким образом, длительный ресурс светодиодных источников света может быть обеспечен только за счет соответствующего ресурса элементов вторичного источника электропитания. Особенно актуально это для светодиодных осветителей большой мощности, отличающихся сравнительно высокой стоимостью.

Данная проблема может быть решена за счет повышения частот преобразования импульсных преобразователей напряжения до нескольких сотен килогерц, благодаря чему станет возможным применение входных и выходных фильтрующих конденсаторов малой емкости – пленочных или керамических конденсаторов, имеющих малую удельную емкость и высокую удельную стоимость, но гораздо больший ресурс по сравнению с электролитическими конденсаторами.

* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение 14.В.37.21.1507 «Исследование и разработка перспективных импульсных высокочастотных вторичных преобразователей электроэнергии для светодиодных осветителей большой мощности»).

При частотах, близких к 1 МГц, из схемы можно будет исключить выходной фильтрующий конденсатор, а современная элементная база и схемотехнические решения, использующие в том числе и резонансные режимы работы импульсных элементов, позволят увеличить частоту преобразования до нескольких сотен килогерц с сохранением высокого КПД.

В данной статье представлено исследование динамических свойств светодиодных элементов большой мощности, которые могут быть использованы совместно с элементами выходного фильтра импульсного высокочастотного источника вторичного электропитания (ИВЭП).

Для оценки динамических параметров светодиодных элементов используются два способа.

Первый способ применяется для качественной оценки динамических свойств в режиме большого сигнала и заключается в экспериментальном построении

динамических вольт-амперных характеристик (ВАХ) светодиодного элемента для ряда частот. Изменение формы такой ВАХ позволяет судить об инерционных свойствах прибора, обусловленных емкостью перехода и паразитной индуктивностью.

Эксперименты со светодиодной матрицей (рис. 1) и однокристалльным светодиодным модулем (рис. 2), характеристики которых приведены в таблице, проводились на специально разработанном стенде, где в качестве сигнала развертки использовался синусоидальный сигнал тока.

Вторым способом оценки динамических параметров светодиодов является определение модуля импедансной частотной характеристики (ИЧХ) в рабочей точке ВАХ (рис. 3). Данный способ позволяет оценить характер реактивных составляющих цепи, т. е. емкость светодиодного элемента.

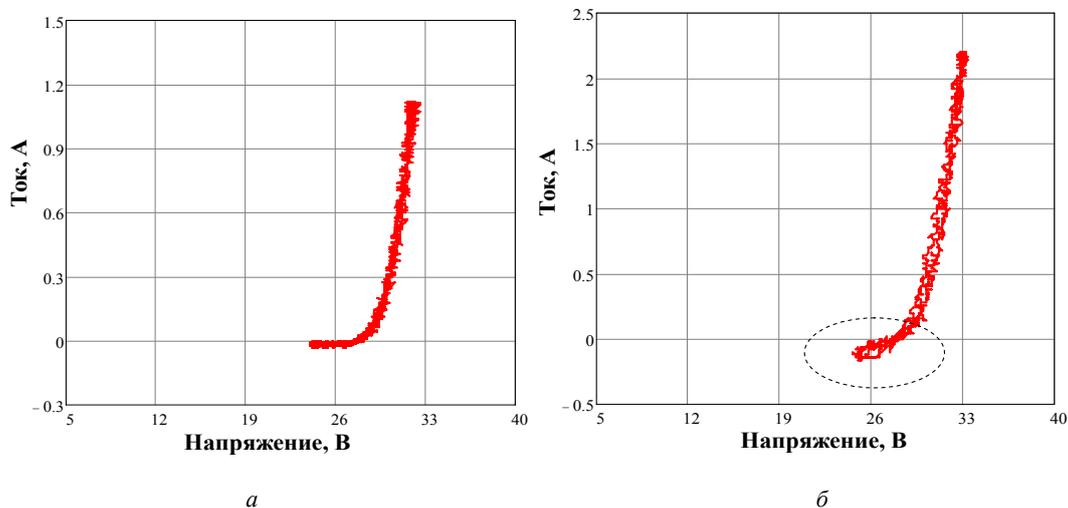


Рис. 1. Экспериментальные динамические ВАХ светодиодной матрицы Epistar:
a – при частоте 100 кГц; *б* – при частоте 1 МГц

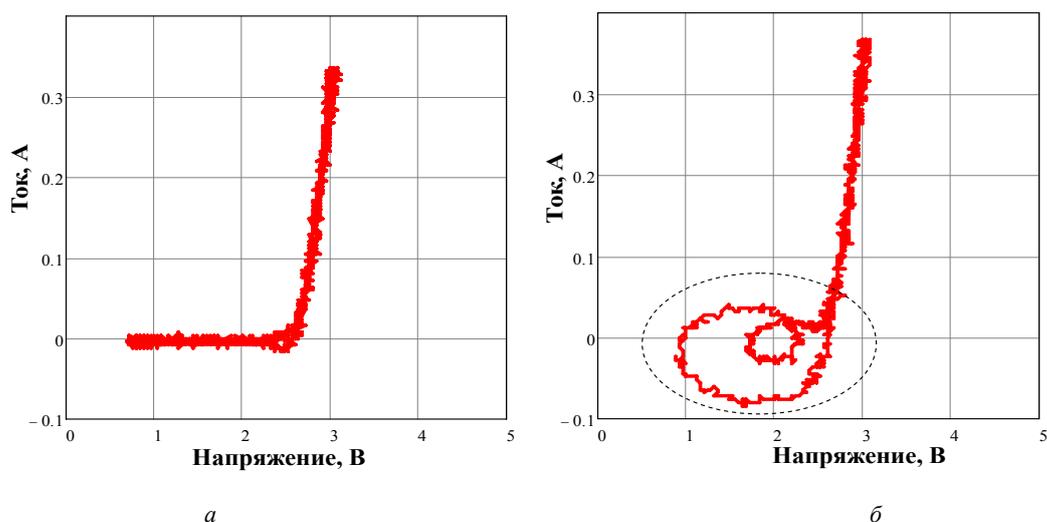


Рис. 2. Экспериментальные динамические ВАХ светодиода XREWHT-L1-0000-005:
a – при частоте 100 кГц; *б* – при частоте 1 МГц

Таблица

Тип светодиодного элемента	Цвет	Материал чипа	Электрическая мощность, Вт	Световой поток, Лм	Описание
XREWHT-L1-0000-005	Белый (теплый)	InGaN на SiC подложке	1,15	56,8...62	Однокристалльный светодиод
Epistar 10X10	Белый (холодный)	InGaN	110	7 500...8 500	Светодиодная матрица 10X10

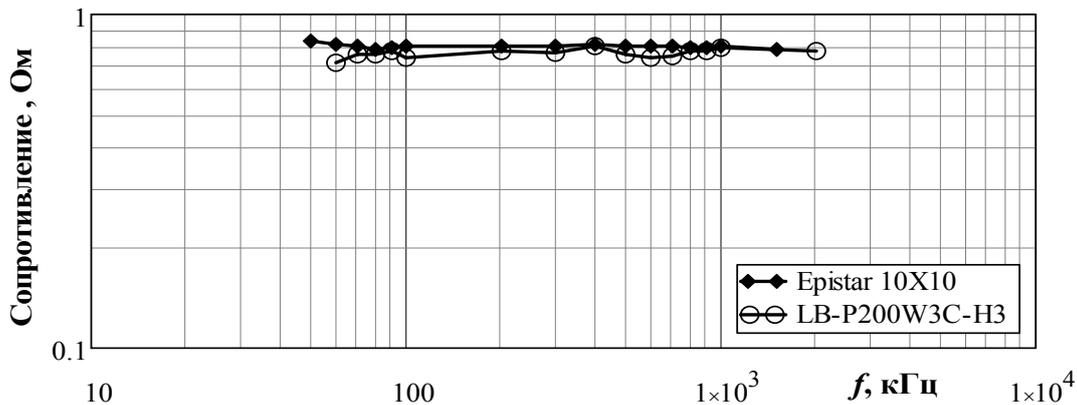


Рис. 3. Графики модулей ИЧХ светодиодных элементов Epistar 10X10 и LB-P200W3C-H3, полученных на экспериментальном стенде

Полученные экспериментальные результаты показывают, что исследуемые светодиодные элементы обладают малой емкостью на рабочем участке, являющейся следствием излучательной рекомбинации диффузионного заряда в базе перехода. Так, при частоте 1 МГц (на рис. 1, б и 2, б они выделены пунктиром) диффузионная емкость становится заметной в области малых токов с небольшой интенсивностью излучательной рекомбинации. Таким образом, эффект от использования собственной емкости светодиодного элемента в заданном диапазоне частот в качестве составляющей выходного фильтра проектируемого преобразователя напряжения (ПН) является несущественным. С другой стороны, условная безынерционность в таком диапазоне частот исключает динамические потери мощности при пульсирующем питающем токе на высокой частоте, по крайней мере до 1 МГц. Это в свою очередь допускает питание светодиодных элементов импульсным током и дает возможность оптимизировать параметры сглаживающего фильтра.

Как отмечалось выше, использование оксидных и электролитических конденсаторов большой емкости в качестве фильтрующих элементов ИВЭП светодиодных элементов не желательно с точки зрения надежности и обеспечения длительного ресурса.

Эксплуатационная надежность конденсаторов в аппаратуре во многом определяется воздействием ряда факторов, которые по своей природе можно разделить на следующие группы: электрические нагрузки; климатические нагрузки; механические нагрузки; радиационное воздействие [2]. Под влиянием этих нагрузок происходит изменение параметров конден-

саторов. В условиях эксплуатации светодиодных осветительных систем одним из главных требований к ним является длительный ресурс в широком диапазоне климатических факторов и нестабильности первичной сети электропитания. Таким образом, главными факторами, влияющими на ресурс конденсаторов, будут климатические и электрические нагрузки.

Наибольшие необратимые изменения параметров вызываются длительным воздействием электрической нагрузки, при котором происходят процессы старения, ухудшающие электрическую прочность. Основной причиной старения при постоянном напряжении являются электрохимические процессы, возникающие в диэлектрике под действием постоянного поля и усиливающиеся с повышением температуры и влажности окружающей среды, а при переменном напряжении и импульсных режимах работы – ионизационные процессы, происходящие внутри диэлектрика или у краев обкладок, преимущественно в местах газовых включений. Напряжение электрического поля в диэлектрике конденсатора при его испытаниях выбирается с некоторым запасом, однако эксплуатация под электрической нагрузкой, превышающей номинальное напряжение, резко снижает надежность конденсаторов [2]. В этом случае наилучшим способом повышения надежности исследуемых устройств будет сокращение количества оксидных и электролитических конденсаторов в силовых цепях схемы. Однако если принять во внимание тот факт, что при работе от первичной сети переменного тока необходимо использовать низкочастотные фильтры, неотъемлемой частью которых являются оксидные и электролитические

конденсаторы, то полное их исключение представляется не всегда возможным. Поэтому далее мы будем рассматривать возможность исключения из выходного фильтра конденсаторов большой емкости.

Уменьшение выходной емкости фильтра или ее полное исключение зависит от двух факторов: повышения частоты преобразования, что впоследствии влияет на увеличение динамических потерь в полупроводниковых и магнитных элементах преобразователя, и сопротивления нагрузки в рабочей точке, т. е. при постоянном номинальном токопотреблении. Это обусловлено тем, что при использовании индуктивного фильтра индуктивность дросселя совместно с активным сопротивлением нагрузки образует LR -цепь с постоянной времени L/R . Таким образом, опираясь на экспериментальные данные по определению внутреннего сопротивления, можно сделать вывод о том, что малое дифференциальное сопротивление светодиодного элемента на рабочем участке ВАХ позволяет использовать безъёмкостной фильтр (или, по сути, L -фильтр).

Для расчета параметров LR -фильтра необходимо знать размах пульсаций тока $\Delta I_{L\phi}$, протекающего через дроссель и светодиодный элемент. Для исследуемых образцов светодиодных элементов было установлено, что на частоте до 1 МГц электрические инерционные свойства проявляются в пренебрежимо малой степени. Допустимые пульсации светового потока в различных нормативных документах рассматриваются только для низких частот (50 Гц для люминесцентных ламп без активного балласта, до 30 кГц – с активным балластом), при этом их уровень не должен превышать 10 %. К тому же в этих документах нет сведений о нормах пульсаций светового излучения на частотах выше 30 кГц. Таким образом, для определения такого начального расчетного параметра, как $\Delta I_{L\phi}$, необходимо:

– связать $\Delta I_{L\phi}$ с магнитными потерями мощности и массогабаритными характеристиками сердечника дросселя выходного фильтра, что предполагает возможность оптимизации последнего известными способами;

– принять максимально допустимое периодическое отклонение светового потока от среднего значения, характерного для низкочастотной области.

Возьмем за основу нормативные показатели из СНиП 23-05-95 «Естественное и искусственное освещение», где коэффициент пульсаций освещенности определяется как

$$K_{пЕ} = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{2E_{\text{ср}}}, \quad (1)$$

где E_{\max} и E_{\min} – максимальное и минимальное значение освещенности за период колебаний соответственно, лк; $E_{\text{ср}}$ – среднее значение освещенности за тот же период, лк.

Относительный световой поток светодиодного элемента связан с током, протекающим через него, как правило, линейной зависимостью в окрестности рабочей точки ВАХ (рис. 4). Если принять, что $E_{\text{ср}}$ соответствует 100%-й освещенности при некотором номинальном токе $I_{\text{ном}}$, то справедливо следующее соотношение:

$$K_{пЕ} = k_{EI} I_{\text{ном}} K_{пI}, \quad (2)$$

где k_{EI} – коэффициент связи относительного светового потока с током, протекающим через светодиод; $K_{пI} = \Delta I_{L\phi} / (2I_{\text{ср}})$ – относительный коэффициент пульсаций тока.

При нормальной освещенности $I_{\text{ном}} = I_{\text{ср}}$, однако, изменяя $I_{\text{ср}}$, можно регулировать световой поток (например, для режима дежурного освещения).

Выражая из (2) $\Delta I_{L\phi}$, получим

$$\Delta I_{L\phi} = \frac{2I_{\text{ср}} K_{пЕ}}{k_{EI} I_{\text{ном}}}. \quad (3)$$

При заданном $K_{пЕ}$ для светодиодного элемента с параметрами $I_{\text{ном}}$ и k_{EI} расчет $\Delta I_{L\phi}$ производится для минимального $I_{\text{ср}}$, определяемого техническим заданием.

После определения $\Delta I_{L\phi}$ необходимо рассчитать индуктивность дросселя фильтра с учетом дифференциального сопротивления светодиодного элемента в рабочей точке ВАХ.

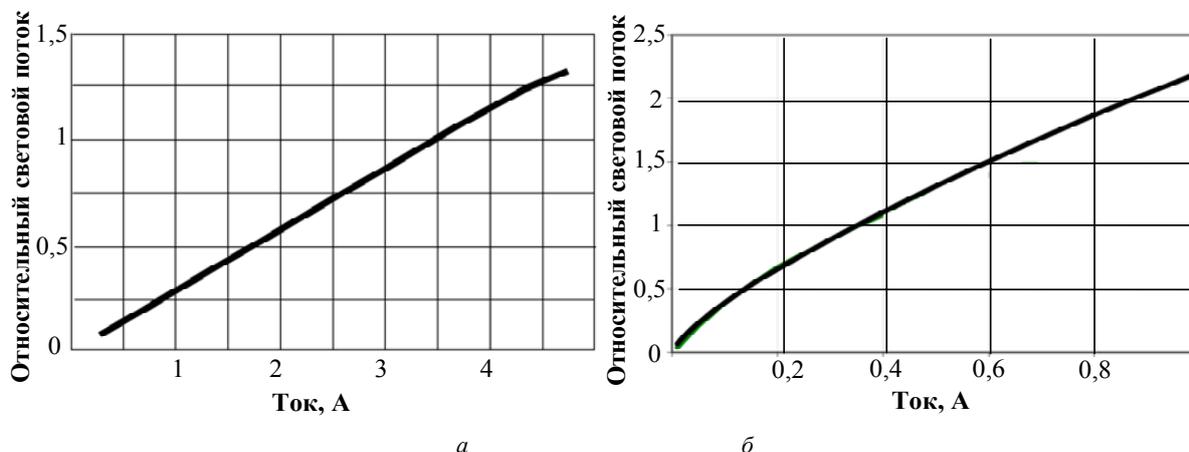


Рис. 4. Зависимость относительного светового потока от протекающего тока: а – для светодиодной матрицы Epistar 10X10; б – для светодиода XREWHT-L1-0000-005

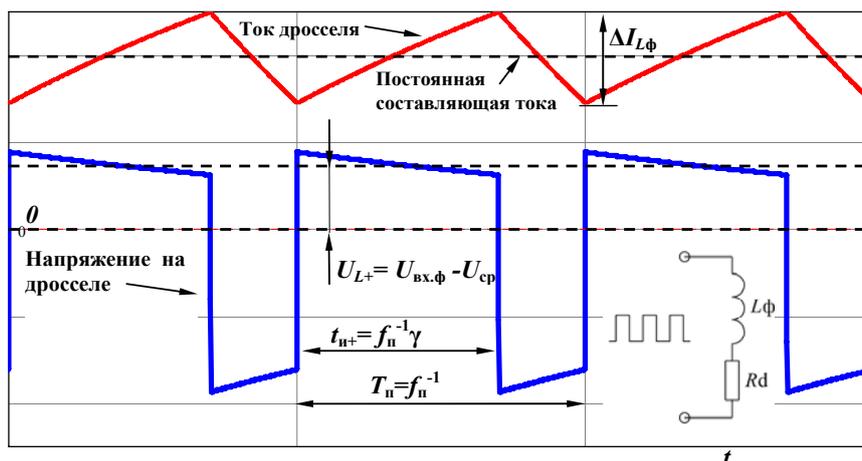


Рис. 5. Временные диаграммы тока и напряжения LR -цепи при входном импульсном напряжении прямоугольной формы

Для более наглядного представления о методике расчета индуктивности дросселя фильтра рассмотрим временные диаграммы тока и напряжения дросселя LR -цепи, полученные при воздействии входного периодического однополярного сигнала прямоугольной формы с частотой 100 кГц, индуктивностью дросселя фильтра $L_\phi = 200$ мкГн и дифференциальным сопротивлением диода $R_d = 1$ Ом (рис. 5).

Установим связь размаха пульсаций тока $\Delta I_{L\phi}$, протекающего через светодиодный элемент и дроссель, с частотой преобразования f_n , параметрами импульсов напряжения (длительностью импульса и амплитудой) на входе фильтра и индуктивностью дросселя фильтра L_ϕ .

Для периодического сигнала произвольной формы справедливы следующие соотношения:

$$\Delta I_{L\phi} = \frac{\int_0^{t_{и+}} U_{L\phi}(t) dt}{L_\phi}, \quad (4)$$

$$I_{ср} = f_n \int_0^{f_n^{-1}} I_{L\phi}(t) dt = \frac{f_n \int_0^{f_n^{-1}} U_{вх.ф}(t) dt}{R_d}, \quad (5)$$

где $U_{L\phi}(t)$ – напряжение на дросселе за время $t_{и+}$, соответствующее длительности положительной части полуволны за период.

Для сигнала прямоугольной формы соотношения (4) и (5) можно записать в приближенном виде:

$$\Delta I_{L\phi} = \frac{\int_0^{t_{и+}} I_{L\phi}(t) dt}{L_\phi} \approx \frac{t_{и+} (U_{вх.ф} - U_{ср})}{L_\phi}, \quad (6)$$

$$I_{ср} \approx \frac{U_{ср}}{R_d} \approx \frac{U_{вх.ф} \gamma}{R_d}, \quad (7)$$

$$f_n = \frac{\gamma (U_{вх.ф} - U_{ср})}{\Delta I_{L\phi} L_\phi}, \quad (8)$$

где $\gamma = t_{и+} / T_n$; $U_{вх.ф}$ – амплитуда напряжения на входе фильтра; $U_{ср}$ – усредненное по времени напряжение на светодиодном элементе.

В качестве примера рассмотрим экспериментальное исследование режимов работы светодиодных элементов при питании от импульсного стабилизатора тока с широтно-импульсной модуляцией и частотой импульсов на входе индуктивного фильтра 200 кГц.

Расчет индуктивного фильтра проводился по предложенной выше методике для сигнала прямоугольной формы и светодиодной матрицы Epistar 10X10. При этом принималось, что относительный коэффициент пульсаций светового потока не должен превышать 10 %. Используя соотношение (3), было получено значение $\Delta I_{L\phi} = 0,8$ А. При $U_{ср} = 31$ В, $U_{вх.ф} = 84$ В, $t_{и+} = 2,04$ мкс и заданной частоте преобразования 200 кГц минимальное значение индуктивности фильтра согласно (6) составило 130 мкГн. Аналогичным образом выполнялись расчеты для светодиода XREWHT-L1-0000-005 с индуктивностью дросселя фильтра 159 мкГн.

Дроссель на тороидальном сердечнике МП-60 был изготовлен таким образом, чтобы обмотка укладывалась в один слой по всей длине магнитопровода с некоторым запасом. В результате индуктивность дросселя увеличилась до 209 мкГн. Задача эксперимента заключалась в подтверждении малой инерционности исследуемых светодиодных элементов и возможности использования чисто безъемкостного выходного фильтра.

Экспериментальные осциллограммы (рис. 6, 7) были сняты при помощи разработанного стенда для исследования светодиодных элементов.

На приведенных графиках сопоставлены временные диаграммы тока, протекающего через светодиодный элемент, и относительный световой поток. Относительный световой поток измерялся с помощью фотодетектора, построенного на основе фотодиода ФД256 и операционного усилителя AD8066 в соответствии с методикой, описанной в [3].

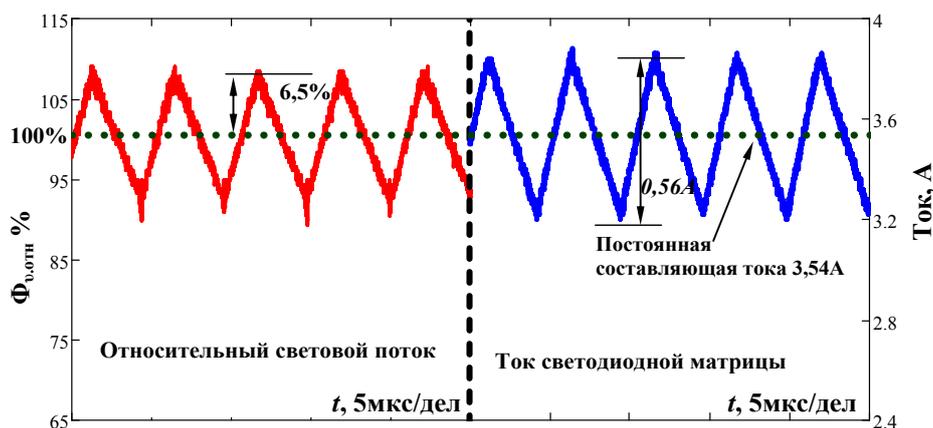


Рис. 6. Осциллограммы тока и относительный световой поток светодиодной матрицы Epistar 10X10 при питании от импульсного стабилизатора тока с ШИМ и L -фильтром

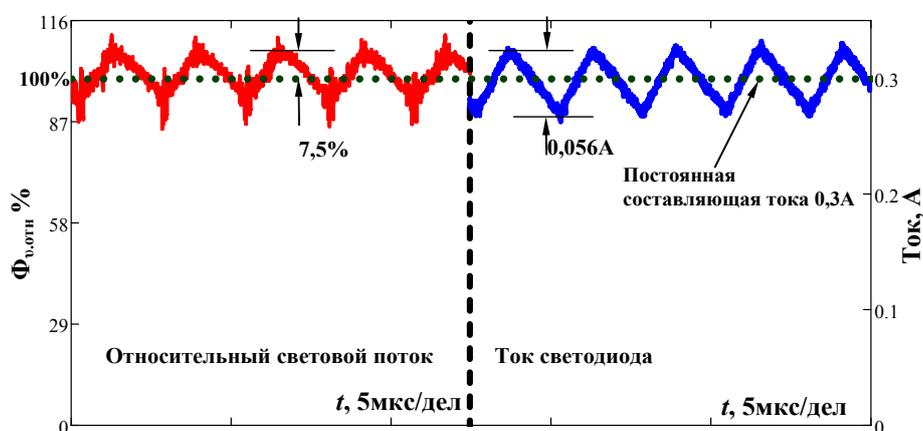


Рис. 7. Осциллограммы тока и относительный световой поток однокристального светодиода XREWHT-L1-000-005 при питании от импульсного стабилизатора тока с ШИМ и L -фильтром

Графики этого светового потока были получены путем математического преобразования экспериментальных осциллограмм напряжения фотодетектора, снятых по точкам при помощи цифрового запоминающего осциллографа. Это преобразование осуществлялось с помощью соотношения

$$\Phi_{\text{в,отн}}(t) = \left(\frac{U_{\phi}(t) - U_{\phi,\text{ср}}}{U_{\phi,\text{ср}}} + 1 \right) 100\%, \quad (7)$$

где $\Phi_{\text{в,отн}}$ — относительный световой поток; U_{ϕ} — напряжение на выходе фотодетектора; $U_{\phi,\text{ср}}$ — среднее за период значение напряжения на выходе фотодетектора, полученного на основании того, что в рабочей точке зависимость тока, протекающего через светодиодный элемент, и излучаемого светового потока можно считать линейной.

Пилообразная форма тока, проходящего через светодиодный элемент, практически без искажений преобразуется в световой поток. Расчетный коэффициент пульсаций для светодиодной матрицы Epistar 10X10 при $L_{\phi} = 209$ мкГн составляет 6,53 % (экспериментальный коэффициент — 6,5 %), для светодиодного элемента XREWHT-L1-000-005 — 7,2 % (экспериментальный коэффициент — 7,5 %).

Таким образом, по результатам проведенных экспериментальных исследований можно сделать вывод, что рассматриваемые светодиодные элементы обладают незначительной оптической и электрической инерционностью, по крайней мере в диапазоне частот до 1 МГц, что допускает наличие пульсаций тока без дополнительных динамических потерь в цепи светодиодного элемента.

Эти исследования также подтверждают возможность использования в качестве выходного фильтра только индуктивного элемента, что в свою очередь позволяет исключить конденсатор в выходном фильтре и повысить надежность и ресурс работы импульсного преобразователя.

Библиографические ссылки

1. Радужкин О. Методы оценки срока эксплуатации электролитических конденсаторов // Силовая электроника. 2010. № 5. С. 19–22.
2. Юшков А. Конденсаторы Electronicon для силовой электроники // Компоненты и технологии. 2005. № 9. С. 10–14.
3. Jonson M. Photodetection and Measurement Maximizing Performance in Optical Systems. New York : McGraw-Hill Professional, 2004.

ANALYSIS OF OPERATING MODES OF HIGH POWER LED LIGHT SOURCES SUPPLIED BY SWITCHING CONVERTER

The paper presents results of experimental investigation of operation of high power LEDs supplied by switching converter with output current regulation. Dynamic performance of two LEDs is investigated. Influence of LED dynamic characteristics on operating mode of converter output filter is analyzed.

Keywords: LED, switching power converter.

© Горяшин Н. Н., Сидоров А. С., 2012

УДК 681.3

В. Г. Жуков, Д. А. Шеенок, В. А. Терсков

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Описывается модель оценки надежности программного обеспечения со сложной архитектурой, а также возможные варианты построения мультиверсионных модулей. Рассматриваются изменяемые характеристики программной архитектуры, оценивается мощность пространства ее оптимизации.

Ключевые слова: оптимизация, программное обеспечение, надежность, информационная безопасность.

Основное внимание в теории и практике обеспечения информационной безопасности (ИБ) применения информационных технологий и систем сосредоточено на защите от деструктивных действий злоумышленника, искажения и хищения программных средств и информации баз данных. Однако при любом виде деятельности людям в процессе создания или применения изделий или систем свойственно непредумышленно ошибиться. В общем случае под ошибкой подразумевается дефект, погрешность или неумышленное искажение объекта или процесса. При этом предполагается, что известно правильное, эталонное состояние объекта, по отношению к которому может быть определено наличие отклонения – ошибки. В связи с этим дефекты функционирования информационных систем (ИС), которые не связаны с действиями злоумышленника и проявляются внешне как случайные, имеют разную природу и последствия, вплоть до катастрофических, соответствующих нарушению информационной безопасности использования ИС.

Наиболее полно ИБ ИС характеризует величина ущерба, который может возникнуть при проявлении дестабилизирующих факторов и реализации конкретных угроз ИБ, а также среднее время между проявлениями угроз. Однако описать и измерить в достаточно общем виде возможный ущерб при нарушении ИБ для критических ИС разных классов очень сложно, поэтому реализации угроз целесообразно характеризовать интервалами времени между их проявлениями, или наработкой на отказы. Это сближает понятия и характеристики степени защищенности с показателями надежности ИС.

Наиболее общим видом ресурсов, используемых при создании ИС, являются допустимые финансово-экономические затраты, или сметная стоимость разработки. При анализе защищенности этот показатель может применяться или как вид ресурсных ограничений, или как критерий оптимизации [1].

В настоящее время в качестве возможной альтернативы методам тестирования и верификации программ можно рассматривать подход мультиверсионного отказоустойчивого программирования, который обеспечивает высокий уровень надежности функционирования критичного программного обеспечения (ПО). Использование систем поддержки принятия решений при мультиверсионном программировании на этапе формирования надежного ПО позволяет уделять основное внимание формированию требований к его качеству. Однако улучшение характеристик надежности ПО с применением избыточности требует дополнительных временных и финансовых затрат. Поэтому основной вопрос на этом этапе заключается в том, каким образом, используя избыточность в архитектуре ПО, можно максимизировать надежность и снизить стоимость разработки. Этот вопрос может быть решен с помощью многочисленных методов многокритериальной поддержки принятия решений, ориентированных на задачи с дискретным пространством решений и учитывающих различные уровни информации о предпочтениях эксперта. Существующие методы определения глубины мультиверсионности и многокритериального принятия решений при выборе архитектуры позволяют спроектировать программную систему, отвечающую предъявляемым к ней требованиям [2].