

Георгес Циссис (Georges Zissis)

Пульсации светового потока светодиодных осветительных систем — проблема, требующая срочного решения

▶ Пульсации светового потока — это модуляция света лампы, вызванная колебаниями напряжения электрической сети. Недавние исследования показали, что организм более восприимчив к флуктуациям коротковолнового излучения и что пульсации светового потока могут оказывать огромное влияние на самочувствие конечных пользователей. В статье рассказывается о зависимости пульсаций светового потока от топологии драйверов, результатах исследований, метриках и стандартах в этой области.



Пульсации светового потока, относящиеся к так называемым временным артефактам светового излучения, определяются как нежелательные изменения в зрительном восприятии, вызванные световым стимулом, яркость или спектральный состав которого изменяются во времени, с точки зрения наблюдателя, в определенной среде. Другой временной артефакт светового излучения — стробоскопические эффекты, возникающие под действием пульсаций светового потока в сочетании с вращением, движением частей оборудования или регулярными пространственными структурами. Стробоскопические эффекты могут быть опасны для работников, находящихся поблизости от вращающихся машин, механизмов и инструментов. Стробоскопический эффект возникает, как правило, в диапазоне частот 80–2000 Гц.

Казалось бы, вследствие расширяющегося распространения в различных областях применения светодиодных ламп, отличающихся от традиционных режимом работы, проблема пульсаций светового потока должна исчезнуть. Однако недавние исследования показывают, что некоторые светодиодные светотехнические изделия могут демонстрировать аномально высокий уровень пульсаций, особенно при диммировании. В настоящее время отсутствуют обязательные к соблюдению нормы, касающиеся пульсаций светового потока, но есть рекомендации, которым нужно настоятельно следовать. Это важно с точки зрения как удовлетворенности потребителей, так и принятия ими полупроводниковых светотехнических изделий.

Пульсации светового потока и их влияние на здоровье и самочувствие

Пульсации светового потока ламп всегда представляли собой проблему, несущую потенциально серьезные последствия для здоровья. Нередко можно слышать от офисных работников, что у них болит и кружится голова, и это вызвано, по их мнению, люминесцентными лампами с электромагнитными ПРА [1, 2]. Однако исследования показали, что организм более восприимчив к флуктуациям коротковолнового излучения [3, 4].

Известно, что пульсации светового потока, особенно на частотах 3–55 Гц, способны вызывать приступы фотосенситивной эпилепсии в разных формах, в зависимости от индивидуальных особенностей человека,

его зрительной патологии, контрастности, длины волны и угла обзора или расстояния. Фотосенситивная эпилепсия встречается приблизительно у одного из 4000 человек. У женщин и пожилых людей восприимчивость к пульсациям выше, чем у мужчин и молодежи. Кроме того, известно, что лица, страдающие мигренями, более восприимчивы к пульсациям.

Вместе с тем импульсный свет может давать и положительный эффект. Сообщается, что импульсный режим работы ламп позволяет экономить энергию, благодаря феномену Брока — Зульцера, связанному с повышением субъективной яркости [5, 6]. Таким образом, утверждается, что использование светодиодов, питаемых импульсным током очень высокой частоты, потенциально позволяет экономить энергию. В этом контексте совершенно необходимо учитывать чувствительность людей к мерцанию света, чтобы избежать неблагоприятных последствий при использовании изделий, излучающих импульсный свет.

Определения, способы измерения и происхождение пульсаций светового потока

Пульсациями светового потока называют быстрые периодические изменения света лампы, выраженные в «модуляции яркостного контраста». Пульсации светового потока обусловлены флуктуациями потребляемой электрической мощности — главным образом из-за колебаний (модуляции) напряжения электрической сети. Поскольку в Европе частота напряжения сети равна 50 Гц, ожидаемая частота пульсаций составляет 100 Гц (при 60 Гц — соответственно 120 Гц). На рис. 1 представлены два общепринятых способа определения пульсаций светового потока [7].

Амплитуда колебаний светового потока (percent flicker) рассчитывается по наименьшей яркости L_{\min} и наибольшей яркости L_{\max} пульсирующего света с использованием формулы

$$F_m [\%] = 100 \times \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}} = 100 \times \frac{|\Delta L_{\min}|}{L_{\max} + L_{\min}}. \quad (1)$$

Коэффициент пульсаций светового потока (flicker index, FI) рассчитывается по площади областей 1 и 2, расположенных соответственно выше (S_{Z1}) и ниже (S_{Z2})

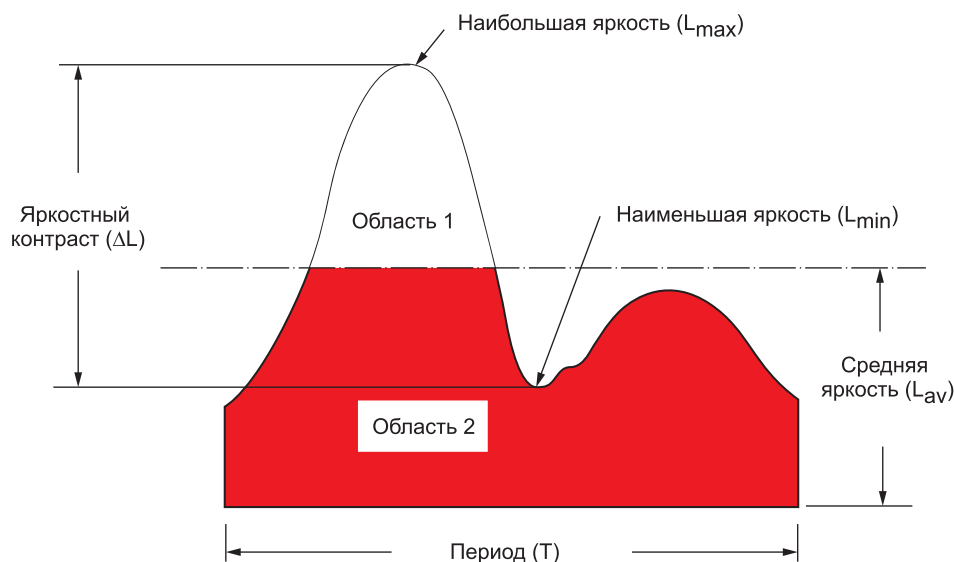


Рис. 1. Определение пульсаций светового потока

среднеквадратичного уровня яркости L_{av} (рис. 1):

$$FI = S_{Z1} / (S_{Z1} + S_{Z2}). \quad (2)$$

В светотехнике применяются оба подхода. Амплитуда колебаний светового потока позволяет дать точную оценку только для периодических сигналов, без учета формы колебаний. Коэффициент пульсаций светового потока, учитывающий очевидные различия формы колебаний, применим для полностью аperiodических сигналов.

Он принимает более высокие значения в случае крутых фронтов сигнала, а амплитуда колебаний светового потока не отражает этого эффекта. Майкл Поплавски (Michael Poplawski) отмечает: «Амплитуду колебаний светового потока определить чрезвычайно просто — достаточно измерить наибольшее и наименьшее значение относительно опорного уровня и произвести элементарные математические операции. Вычисление же коэффициента пульсаций светового потока требует точного измерения формы световых колебаний относительно

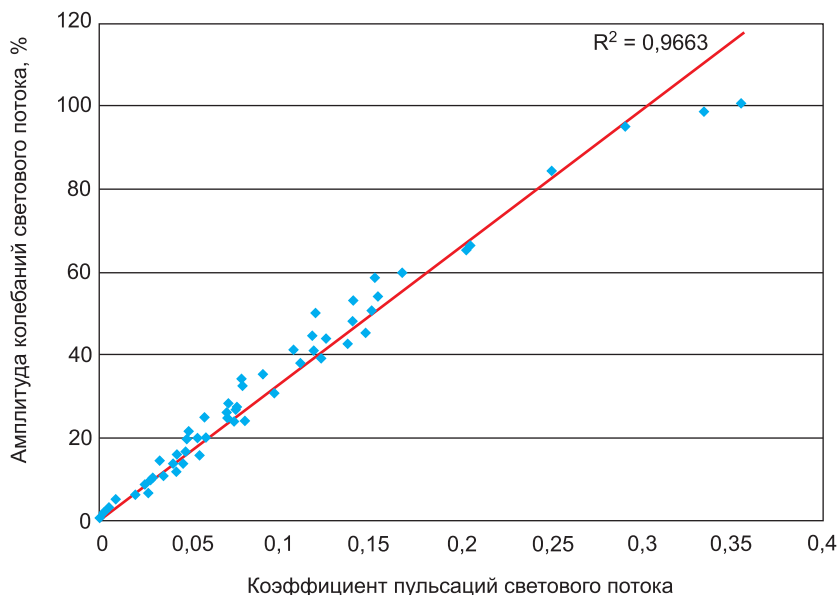


Рис. 2. Установленная опытным путем зависимость амплитуды колебаний светового потока от коэффициента пульсаций светового потока (R^2 — коэффициент детерминации для метода наименьших квадратов)

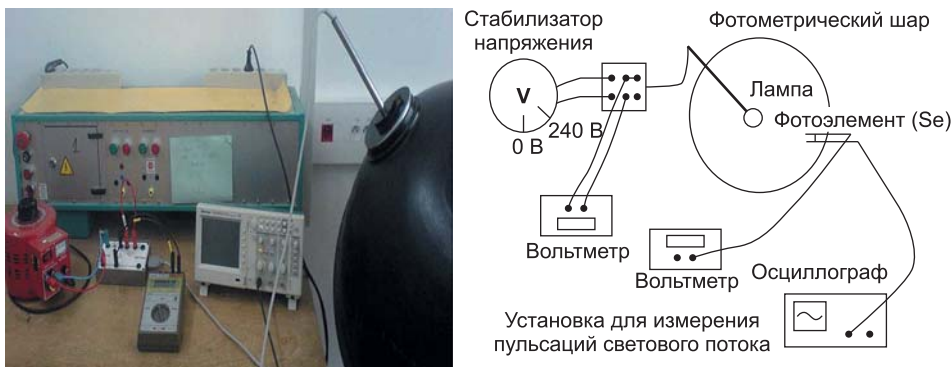


Рис. 3. Экспериментальная установка для измерения пульсаций светового потока в лаборатории LAPLACE

опорного уровня и куда более сложных интегральных вычислений» [8].

В настоящее время отсутствуют формальные доказательства того, что для периодических световых колебаний одна или другая метрика более точно описывает восприятие пульсаций светового потока пользователем. Более того, в работе [9] показано, что в случае близкого к синусоидальному напряжению, которым питается подавляющее большинство электрических ламп, имеет место сильная корреляция между амплитудой колебаний и коэффициентом пульсаций светового потока. Этот вывод проиллюстрирован на рис. 2. Если предположить, что коэффициент пульсаций светового потока равен нулю при нулевом значении амплитуды колебаний светового потока, получится следующее соотношение:

$$F_m/FI \approx 3,3. \quad (3)$$

В нем значение F_m выражено в долях единицы, а не в процентах.

Как уже отмечалось ранее, определение пульсаций светового потока базируется на модуляции (в общем случае — изменении) яркостного контраста.

Однако измерение яркости — довольно нелегкое дело. Поэтому Циссис [10] предложил измерять пульсации светового потока по изменению во времени светового потока как такового, а не по модуляции яркостного контраста. Это хорошая аппроксимация, так как она сглаживает пространственную неоднородность света, излучаемого лампой. В этом случае можно выполнить измерение с помощью фотометрического шара Ульбрихта, оснащенного фотодетектором с разрешением по времени.

На рис. 3 показана исходная схема соответствующей измерительной установки, расположенной в лаборатории LAPLACE в Тулузе. В примитивной версии данной установки фотометрический шар диаметром 80 см был оборудован исполняющим роль фотодетектора селеновым фотоэлементом, подключенным к осциллографу Tektronix 2002B для регистрации сигналов световых колебаний, а также вольтметром для независимого измерения среднего напряжения фототока (в милливольтках). Селеновый фотоэлемент отличается достаточно медленным откликом, поэтому позволяет обнаруживать только низкочастотные

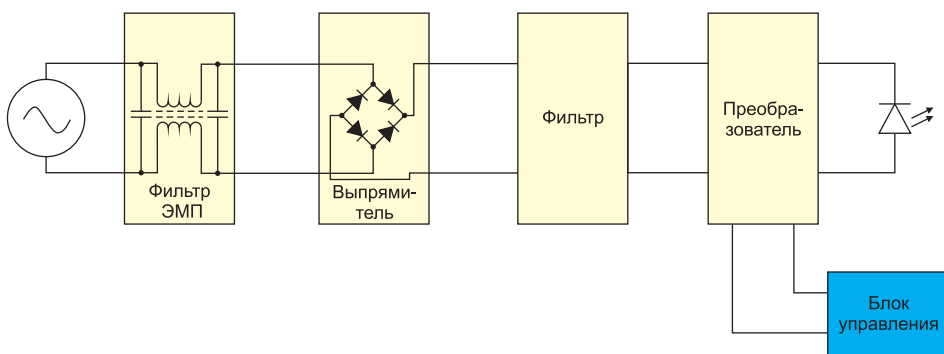


Рис. 4. Обычная схема светодиодного драйвера

пульсации (до 1 кГц). В настоящее время фотоэлемент заменен быстродействующим фотодиодом (SLD-70BG2) с логарифмическим усилителем, чтобы обеспечить возможность обнаружения более высокочастотных пульсаций (до 100 кГц).

За эталон для сравнения пульсаций светового потока источников света на основе различных технологий (особенно направленных и ненаправленных светодиодных ламп) была принята лампа накаливания мощностью 100 Вт с колбой типа А. Амплитуда колебаний светового потока эталонной лампы составила 10% на частоте 100 Гц, причем форма световых колебаний была близка к функции $\sin^2(2\pi ft)$, что совершенно логично. Флуктуации светового потока лампы накаливания, в конечном счете, обусловлены колебаниями температуры нити накаливания на протяжении периода частоты переменного тока. Эта температура, в соответствии с законом Джоуля — Ленца, пропорциональна $\sin^2(2\pi ft)$, а энергетическая светимость нити накаливания, согласно закону Стефана — Больцмана, пропорциональна ее температуре в 4-й степени. (Следовательно, небольшие колебания температуры на протяжении периода частоты переменного тока приводят к заметным изменениям светового потока с удвоенной частотой). Такой уровень пульсаций светового потока на частоте 100 Гц не воспринимается человеческим глазом.

Пульсации светового потока светодиодов определяются в основном драйвером (следует заметить, что официальный словарь терминов МКО предписывает пользоваться термином «пускорегулирующий аппарат», а не «драйвер»). Теоретически, у светодиодов не должно быть пульсаций, так как их требуется питать постоянным током. Но светодиодная лампа содержит драйвер, который служит промежуточным звеном между сетью переменного тока и светодиодами в составе лампы. На рис. 4 показана простая обобщенная схема пускорегулирующего аппарата (ПРА) для светодиодов. В этом случае пульсации светового потока могут быть вызваны двумя причинами:

- остаточными пульсациями за выпрямителем и фильтром;
- архитектурой последнего каскада преобразователя.

Остаточные пульсации вызывают мерцание на удвоенной частоте сети, а архитектура преобразователя обычно обуславливает высокочастотные пульсации (несколько десятков килогерц). Высокий уровень

пульсаций светового потока, как правило, свойственен дешевым низкокачественным ПРА с пассивными фильтрами. Как отмечается в отчете Министерства энергетики США [11], требование обеспечить низкую себестоимость малогабаритной светодиодной лампы может принуждать к фундаментальному компромиссу между уровнем пульсаций светового потока и коэффициентом мощности. К тому же очень часто пассивные элементы, используемые в качестве фильтров (например, химические конденсаторы), имеют короткий срок службы и чрезвычайно вредны для окружающей среды [11]. Учитывая все вышеприведенное, сильные пульсации светового потока на частоте 100 Гц — серьезное свидетельство неприемлемо низкого качества и низкой надежности ПРА.

Диммирование светодиодного источника света может привести к возникновению или усилению пульсаций, особенно если в драйвере для понижения среднего светового потока используются фазовое управление и/или широтно-импульсная модуляция (ШИМ).

Следует отметить, что в работе [13] предложен очень эффективный способ обнаружения пульсаций светового потока с помощью камеры мобильного телефона.

На рис. 5 показаны результаты, полученные этим методом. Благодаря его простоте он доступен широкому кругу потребителей: достаточно навести встроенную камеру смартфона на лампу и наблюдать за изображением на экране. Если вокруг лампы возникают темные полосы, это свидетельствует о наличии пульсаций светового потока. Пространственная частота полос связана с частотой пульсаций и частотой кадров камеры. Контраст между полосами поможет легко оценить амплитуду колебаний светового потока. Вообще-то, если полосы видны, амплитуда колебаний светового потока превышает 20%. Большие флуктуации (т. е. сильные пульсации) четко отображаются на экране смартфона в виде полос на изображении. Чем ниже амплитуда колебаний светового потока, тем менее заметны полосы, но их можно сделать отчетливее, изменив настройки камеры, например выдержку. Лампы, не имеющие пульсаций вообще или имеющие очень слабые, будут отображаться без полос на дисплее в режиме видеосъемки и на снимках.

Простое и быстрое тестирование с помощью такого широкодоступного средства будет полезно для потребителей,



Рис. 5. Обнаружение пульсаций светового потока с помощью камеры мобильного телефона (снимки получены в лаборатории LAPLACE). Пульсации приводят к появлению на снимке темных полос

желающих избежать неблагоприятного воздействия пульсаций даже на частотах, не воспринимаемых глазом.

Результаты измерения пульсаций светового потока

Во всем мире с помощью этой экспериментальной установки были про-

ведены испытания 26 ламп (главным образом светодиодных, а также компактных люминесцентных) в реальных условиях эксплуатации: 230 В, 50 Гц, чисто синусоидальное стабилизированное напряжение питания. Выдержка из результатов испытаний приведена на рис. 6.

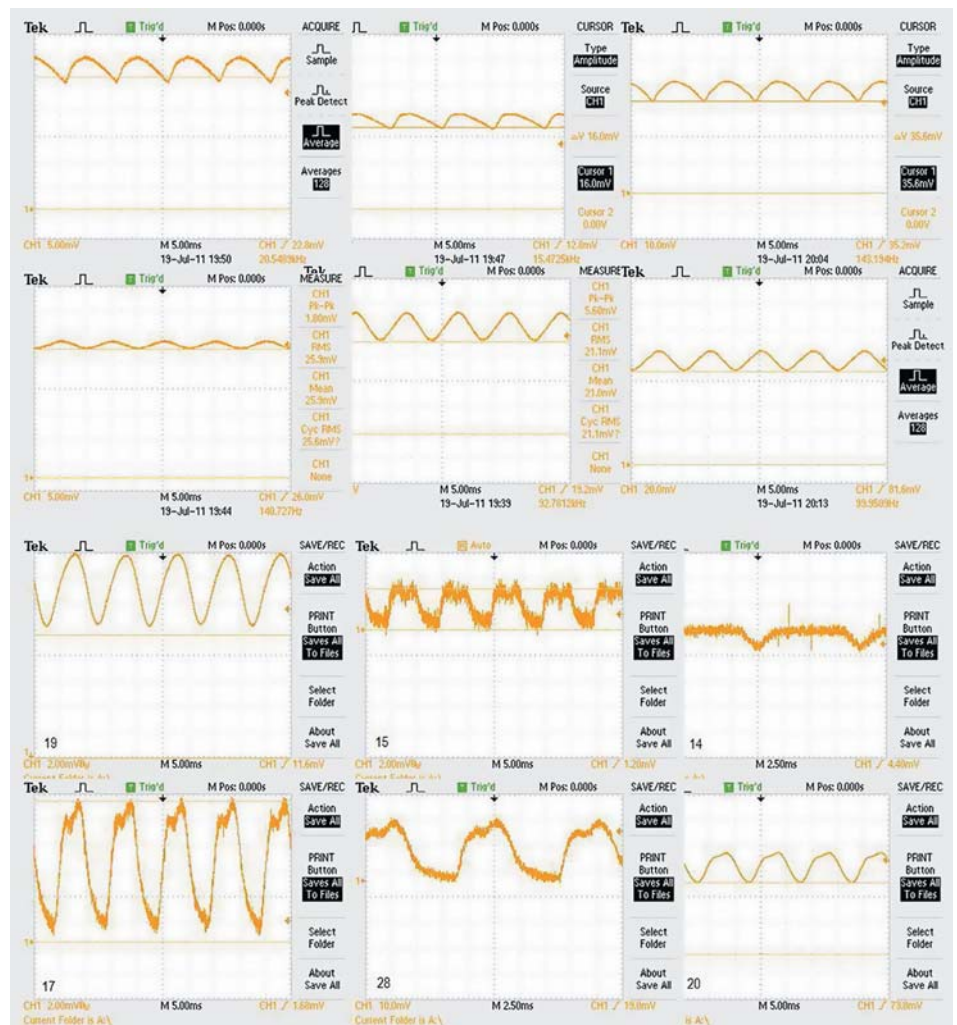


Рис. 6. Сигналограммы колебаний светового потока компактных люминесцентных (1-я строка), галогенных (2-я строка) и светодиодных (3-4-я строки) ламп

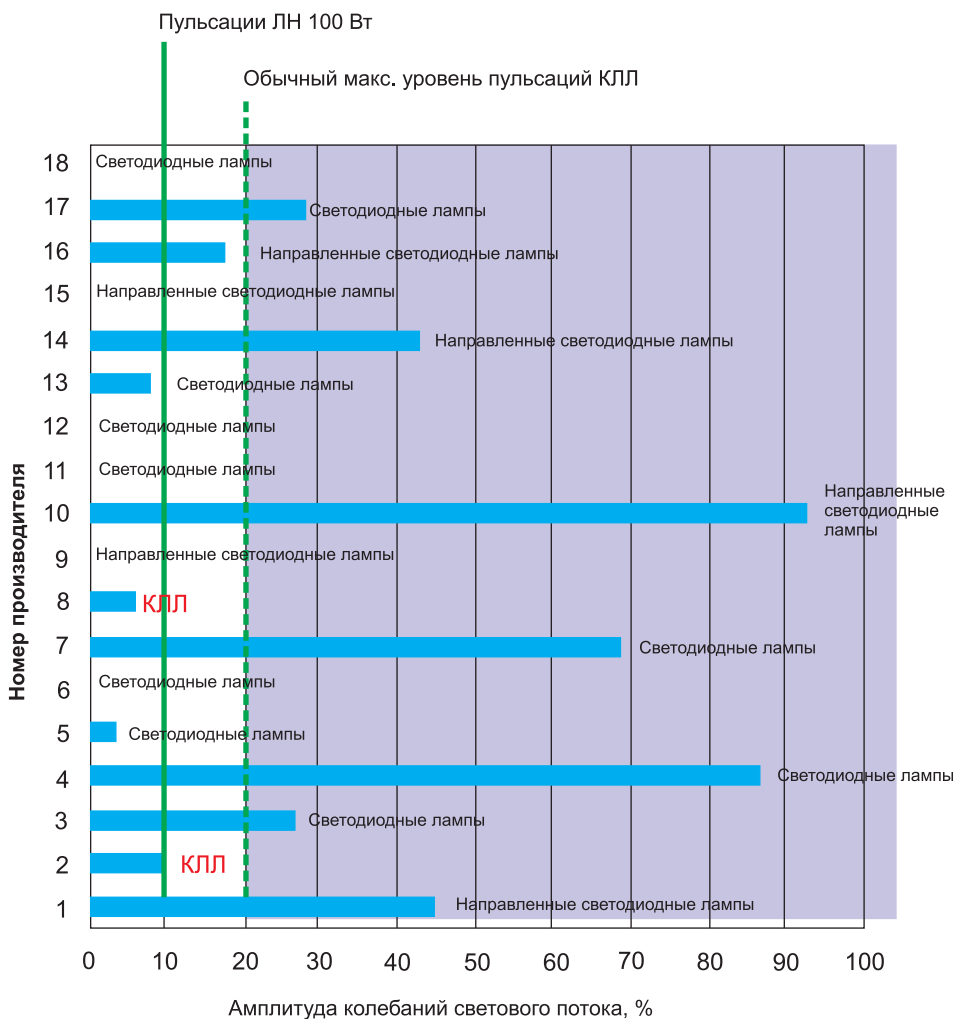


Рис. 7. Некоторые результаты экспериментальной оценки уровня мерцания (в процентах) для ламп различных типов в лаборатории LAPLACE

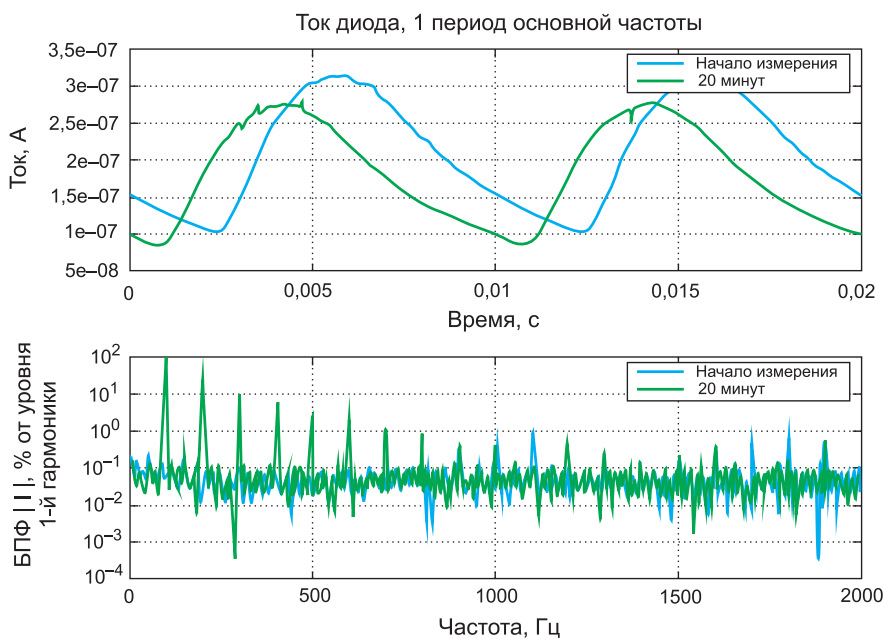


Рис. 8. Пульсации светового потока светодиодной лампы, измеренные по фототок фотодиодного детектора (верхний график) и его БПФ (нижний график) непосредственно после включения лампы (синяя линия) и через 20 мин работы (зеленая линия)

Все КЛЛ и лампы накаливания, как и ожидалось, демонстрировали сходное поведение в отношении пульсаций светового потока, а результаты для светодиодных ламп сильно различались — от нулевого до очень высокого (вплоть до 100%) уровня пульсаций. Более того, формы световых колебаний были не столь гладкими и симметричными, как в случае КЛЛ и ламп накаливания. Это явный признак того, что в разных светодиодных лампах использовались преобразователи различной архитектуры.

На рис. 7 приведены экспериментальные значения амплитуды колебаний светового потока для нескольких из испытанных ламп при номинальных условиях эксплуатации.

В совсем недавней работе Кукачки [14] сообщается об изменениях характера пульсаций в зависимости от времени работы лампы (например, при ее разогреве). На рис. 8 показаны результаты наших измерений (ток фотодиода и его БПФ) непосредственно после включения светодиодной лампы и через 20 мин после этого (лампа работала при фиксированной температуре окружающей среды ($25 \pm 0,5$) °C). Мы предполагаем, что некоторые компоненты ПРА чувствительны к росту температуры, и это свидетельствует о не слишком хорошем качестве ПРА.

Следует отметить, что лампа накаливания мощностью 100 Вт имеет амплитуду колебаний светового потока 10%, а у качественной КЛЛ она может достигать 20%, но в обоих случаях конечные пользователи не замечают пульсаций. Поэтому можно считать приемлемыми те пульсации, которые характеризуются значениями амплитуды колебаний светового потока до 20%. (Далее восприятие пульсаций светового потока обсуждается более подробно.) Таким образом, из рис. 7 можно сделать вывод о том, что многим изделиям, которые реализуются сегодня на восточных рынках, свойственны сильные низкочастотные пульсации светового потока.

Результаты испытаний также показывают, что у светодиодных ламп с заметными пульсациями светового потока понижение напряжения (диммирование) во многих случаях приводит к повышению уровня пульсаций. На рис. 9 приведены результаты для нескольких испытанных светодиодных ламп. Как можно видеть, в достаточно редких случаях амплитуда колебаний светового потока остается не-

изменной при понижении напряжения (лампы с номерами 10 и 17), пока лампа не выключается при напряжении ниже примерно 100 В.

Восприятие пульсаций светового потока

Согласно отчету Министерства энергетики США [11], при обсуждении потенциального воздействия пульсаций светового потока на человека важно понимать разницу между ощущением и восприятием. Ощущение — это физиологическая регистрация внешних условий, которые могут вызывать отклик в нервной системе, а восприятие — процесс интерпретации сенсорной информации мозгом.

На протяжении многих лет общепринятым было мнение, что люди не способны замечать пульсации светового потока на частоте, превышающей порог восприятия пульсаций (70 Гц). Однако недавние исследования показали, что организм более восприимчив к флуктуациям коротковолнового излучения [3, 4]. Например, лица, страдающие мигренями, с большей вероятностью обнаруживают чувствительность к высокочастотным пульсациям [15]. Здесь основной вопрос заключается в том, как люди воспринимают пульсации светового потока и считают ли они эти пульсации приемлемыми. Ответить на него трудно, так как восприятие пульсаций является по-настоящему многопараметрическим эффектом.

В работе [16] представлено восприятие пульсаций светового потока по двум параметрам: по частоте пульсаций и по их амплитуде при постоянном коэффициенте заполнения, равном 50%. Зрительной задачей, с помощью которой оценивалось восприятие пульсаций, служило наблюдение за колебаниями светлого стержня на темном фоне (близкий к наихудшему сценарию обнаружения стробоскопических эффектов).

Для световых колебаний прямоугольной формы, при которых на протяжении 50% времени вырабатывается максимальный световой поток, а в остальные 50% — минимальный, вероятность обнаружения в процентах можно оценить следующим образом:

$$d[\%] = 100 \times \frac{25F_m + 140}{f + 25F_m + 140} \quad (4)$$

Здесь f — частота пульсаций, Гц, а F_m — амплитуда колебаний светового потока

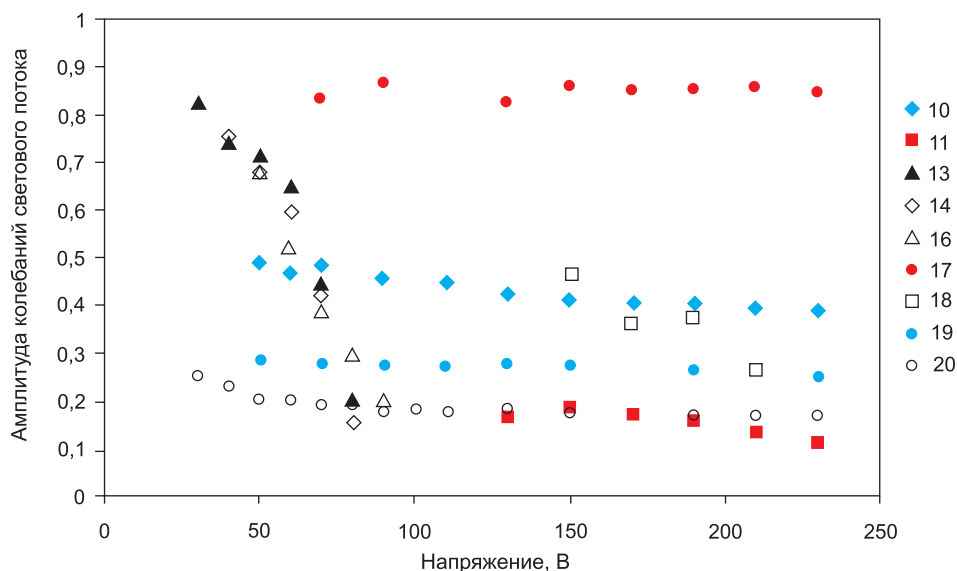


Рис. 9. Изменение амплитуды колебаний светового потока светодиодных ламп (с номерами от 10 до 20) при диммировании входного напряжения

в процентах. Эта формула справедлива на частотах от 100 Гц до 10 кГц и при значениях амплитуды колебаний светового потока 5–100%.

Приемлемость пульсаций светового потока, создающих заметные стробоскопические эффекты, оценивалась по пятибалльной шкале. Результаты эксперимента дают основания предполагать, что даже в случае уверенного обнаружения стробоскопических эффектов, обусловленных пульсациями светового потока, эти пульсации не всегда расценивались как неприемлемые. Показатель приемле-

мости a можно оценить по эмпирической формуле:

$$a[\%] = 2 - \frac{4}{1 + (f / f_b)} \quad (5)$$

Здесь f — частота пульсаций светового потока, Гц, а f_b — пороговая частота, Гц, которая определяет границу между приемлемыми и неприемлемыми пульсациями и задается формулой:

$$f_b[\text{Гц}] = 130 \log(F_m - 73) \quad (6)$$

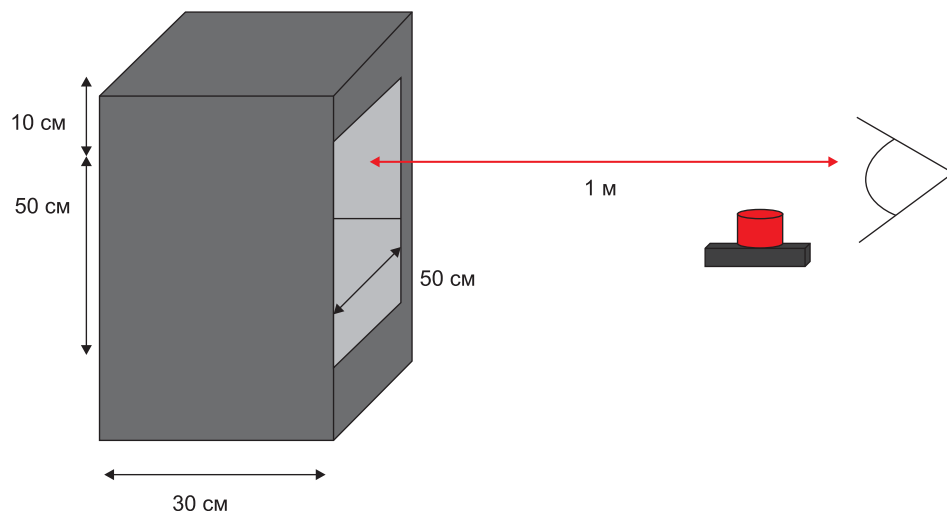


Рис. 10. Эксперимент по исследованию восприятия пульсаций светового потока в лаборатории LAPLACE

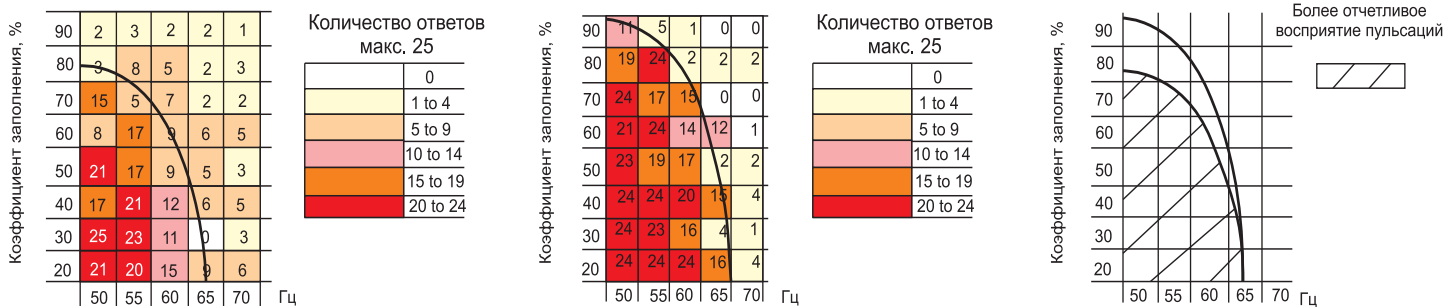


Рис. 11. Восприятие пульсаций (количество утвердительных ответов) на черном (слева) и белом (в центре) фоне, а также сравнение результатов для двух цветов фона (справа)

В своей работе [17] Арексис с коллегами описала новый эксперимент, проведенный в лаборатории LAPLACE, для того чтобы изучить совокупное влияние частоты и коэффициента заполнения (изучалась также амплитуда колебаний светового потока).

Черный ящик (рис. 10) был помещен в темную комнату. За пластиной из матового стекла был установлен светодиодный модуль высокой яркости с теплым белым цветом свечения (3000 К), который на всем протяжении эксперимента не был непосредственно виден наблюдателю. Светодиодный модуль, питаемый прямоугольными импульсами тока, вырабатывал световой поток 540 лм, создавая среднюю освещенность 167 лк на наблюдаемом фоне. Фон мог быть черным или белым, эксперимент проводился с обоими цветами фона. В ходе эксперимента частота варьировалась от 50 до 70 Гц, а коэффициент

заполнения изменялся от 20 до 90%. При этом в каждом цикле эксперимента поддерживалось постоянное значение средней освещенности.

Наблюдатели входили в помещение и усаживались на расстоянии 1 м от края светового короба. Они не могли непосредственно видеть источник света или рассеиватель. Их просили смотреть прямо на фон короба по оси зрения и не поворачивать голову. Затем воспроизводились 40 сценариев освещения длительностью по 5 с. По окончании каждого сценария наблюдателей просили нажать кнопку, если они воспринимали или чувствовали пульсации света. Других действий не требовалось.

Количество утвердительных ответов о замеченных пульсациях показано на рис. 11. При меньших значениях коэффициента заполнения и более низких частотах пульсации светового потока

определялись с большей легкостью. Что же касается разного цвета фона, то можно увидеть, что на белом фоне испытуемые обнаруживали пульсации в более широком диапазоне частот. Флуктуации на белом фоне воспринимаются отчетливее вследствие повышенного яркостного контраста. Следовательно, зрительное утомление испытуемых также было выше при использовании белого фона.

Кроме того, стояла задача определить, как испытуемые воспринимают наиболее сильные пульсации светового потока светодиодов, зафиксированные в ходе испытаний (100 Гц, амплитуда колебаний светового потока более 90%). Для этого использовались две лампы в сходных световых коробах, расположенные бок о бок. Одна из них питалась постоянным током без флуктуаций, а другая — импульсным током с частотой 100 Гц и коэффициентом заполнения 50%, в результате чего амплитуда колебаний светового потока составляла 100%. Здесь также применялись два цвета фона — черный и белый. Средняя мощность поддерживалась на уровне 2 Вт.

Получены следующие результаты.

- При черном и белом цвете фона 16 из 16 испытуемых отметили, что светодиодная лампа, работающая в импульсном режиме, светила ярче (эффект Брока — Зульцера).
- Из 16 испытуемых 15 человек не заметили пульсаций света, какой бы ни был цвет фона. В частности, 8 из 8 человек не заметили пульсаций на белом фоне и 7 из 8 человек не заметили пульсаций на черном фоне. Единственный испытуемый, заметивший пульсацию, правильно указал на лампу, работающую в импульсном режиме.

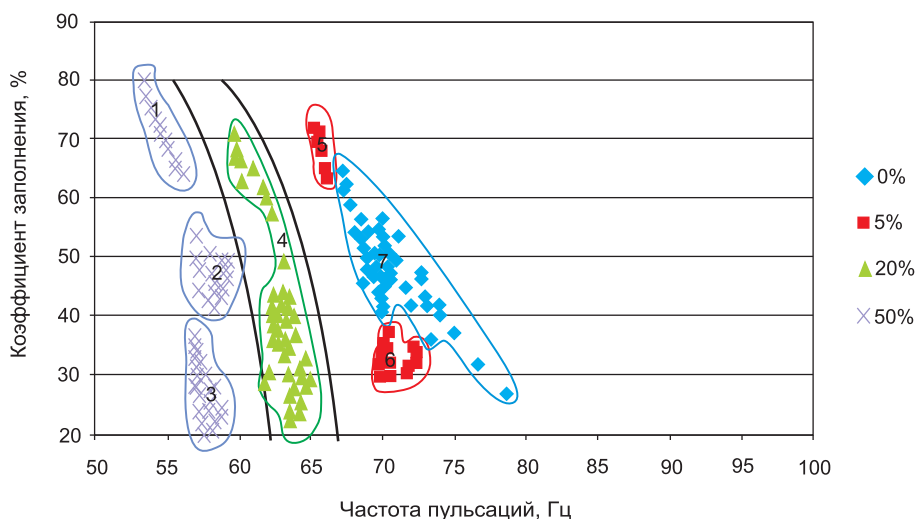


Рис. 12. Парето-оптимальные решения, полученные Арексис. Образуются отчетливые «островки» значений в пространстве (частота, коэффициент заполнения) исходя из предположения о четырех зонах (0, 5, 20 и 50%)

- Когда обе лампы были переведены в импульсный режим (частота 100 Гц, коэффициент заполнения 50%) и использовались разные цвета фона, все испытуемые согласились, что белый фон оставляет впечатление большей яркости, а двое заметили пульсации на черном фоне.

Здесь можно сформулировать два важных тезиса. Во-первых, импульсный режим работы светодиодных ламп действительно может дать экономию энергии, если люди воспринимают свет в этом режиме как более яркий при той же потребляемой мощности. Во-вторых, хотя в проведенном эксперименте по изучению зрительного восприятия белый фон и облегчил обнаружение пульсаций светового потока, в опыте с частотой пульсаций 100 Гц это уже не имело значения — камера мобильного телефона и трое испытуемых зарегистрировали пульсации на черном фоне.

В диссертации Арексис на соискание ученой степени PhD [18] была предпринята попытка определить комбинации значений частоты и коэффициента заполнения, при которых пульсации не воспринимались бы конечными пользователями (размер выборки составлял около 500).

Для этого были определены четыре случая:

- 0% конечных пользователей воспринимают пульсации;
- не более 5% конечных пользователей воспринимают пульсации;
- не более 20% конечных пользователей воспринимают пульсации;
- по крайней мере 50% конечных пользователей воспринимают пульсации.

К полученным ответам была применена процедура поиска парето-оптимальных решений для определения тех областей в пространстве [частота, коэффициент заполнения], где пульсации не воспринимаются. Оптимальность по Парето — такое распределение ресурсов, при котором невозможно улучшить положение какого-либо отдельно взятого индивидуума, не ухудшив при этом положение хотя бы одного индивидуума. Чтобы построить такую классификацию, Арексис воспользовалась результатами работы [19], базирующимися на генетическом алгоритме NSGA-II. На рис. 12 показаны результаты, полученные этим методом [17]. Как можно видеть, парето-оптимальные решения сгруппированы

по семи отчетливым «островкам»: 7-й островок соответствует случаю 1 (пульсации не воспринимаются), 5-й и 6-й островки — случаю 2 (пульсации почти не воспринимаются), 4-й островок — случаю 3 (пульсации воспринимаются ограниченно), а 1-й и 3-й островки — случаю 4 (пульсации вполне заметны). Подобная классификация позволяет выбирать характеристики источника питания таким образом, чтобы избежать пульсаций и добиться экономии энергии.

Пульсации светового потока и стандарты

Как явствует из сказанного выше, пульсации светового потока — важнейшая проблема, которая может создать препятствия для принятия полупроводниковой светотехники широкой общественностью. Тем не менее в настоящее время пульсации светового потока по-настоящему не регулируются нормативно-правовыми актами различных регионов мира. Соответствующие требования могли бы поспособствовать значительному улучшению методик оценки серийно выпускаемых ламп в отношении пульсаций светового потока, но положения стандарта Energy Star распространяются только на диммируемые лампы, отвечающие его требованиям [20]. Это неприемлемая ситуация, которую научное сообщество и директивные органы стремятся изменить.

В отсутствие метрик и сигналограмм пульсаций светового потока составители технических заданий могут пользоваться методиками качественной оценки пульсаций. Им следует рассмотреть, каким образом тип источника света, обстановка, аудитория и характер выполняемых задач влияют на риск возникновения проблем, связанных с пульсациями светового потока. На деле воздействие пульсаций может быть разным в зависимости от того, какую задачу выполняет конечный пользователь. Для статических задач или задач с умеренной интенсивностью движения глаз достаточно ограничить коэффициент пульсаций светового потока FI значением 0,5. В случае более сложных задач, предполагающих быстрое движение объектов или точек зрительной фиксации, значение параметра FI должно быть меньше 0,1. Случай замкнутых пространств необходимо рассматривать отдельно.

Первой попыткой сформулировать общепринятый стандарт было принятие критерия, устанавливающего максимально допустимое значение коэффициента пульсаций светового потока в линейной зависимости от частоты в диапазоне 100–800 Гц:

$$\max(FI) = 0,001f, \quad (7)$$

где f — частота пульсаций светового потока, Гц. Этот критерий дает значения $FI < 1,2$ для США при частоте 120 Гц и $FI < 1$ для Европы при частоте 100 Гц. При установке такого ограничения Агентство по охране окружающей среды США (EPA), по-видимому, исходило из результатов экспериментов с высококачественными традиционными источниками света (в том числе КЛЛ), выполненных Министерством энергетики США (DoE). В ходе этих исследований наивысшее значение FI составило 0,11 (для КЛЛ с ЭМПРА). Однако пока это требование еще не вошло в состав последней версии стандарта Energy Star [20].

Комитет P1789 Института инженеров по электротехнике и электронике (IEEE), уже в течение нескольких лет работающий над проблемами пульсаций светового потока, недавно опубликовал рекомендуемые метрики для амплитуды колебаний светового потока [21]. На рис. 13 показаны предельные уровни, предложенные Леманом и Уилкинсом [22]. Однако более корректно говорить о пульсациях светового потока, имея в виду преобладающую частоту пульсаций fd (термин «преобладающая частота» употребляется, например, в двух местах в Практической рекомендации №2 IEEE 1789 [25], но не определен в тексте). Кроме того, данная рекомендация IEEE устанавливает фиксированную частоту среза, равную 90 Гц. Такой выбор можно считать неудачным, поскольку он ведет к отклонению «европейской нормы» пульсаций для частоты 100 Гц, но не «американской нормы» для частоты 120 Гц. Исходя из этой рекомендации, максимально допустимая амплитуда колебаний светового потока равна 8% для частоты 100 Гц и 9,6% для частоты 120 Гц.

Следует подчеркнуть, что IEEE 1789 — всего лишь рекомендация, и ее в любом случае нельзя рассматривать как стандарт на измерение пульсаций светового потока. В действительности же мы не знаем, как обращаться с сигналами сложной формы, имеющими несколько фурье-компонентов

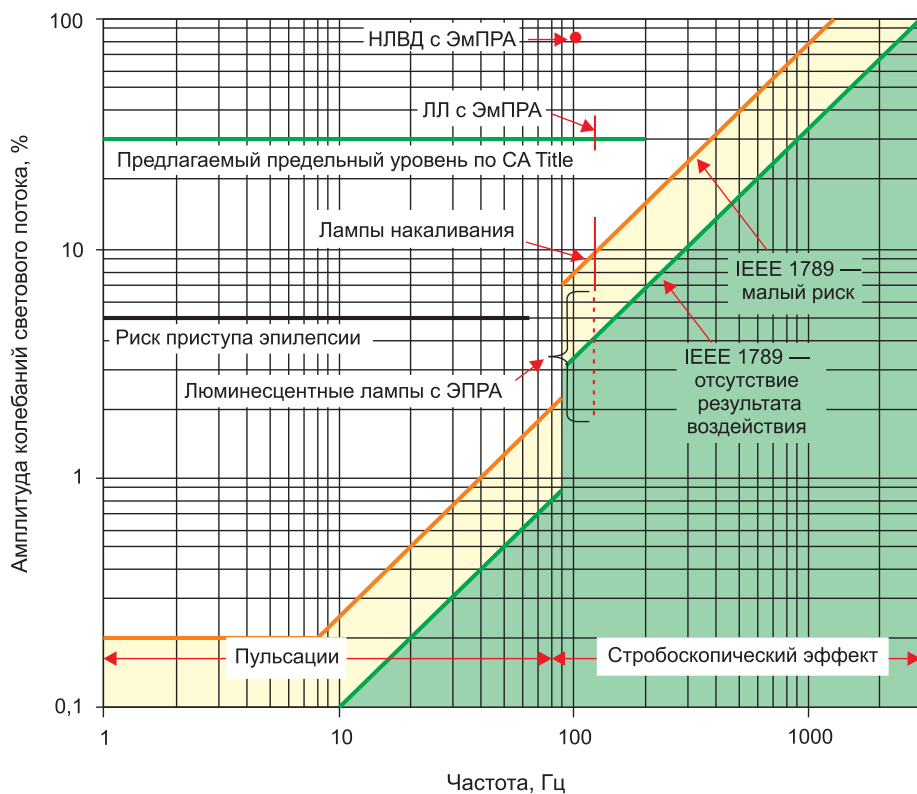


Рис. 13. Зависимость амплитуды колебаний светового потока от частоты пульсаций. Зеленый цвет — уровень отсутствия воздействия, желтый — уровень малого риска

на разных частотах. В IEEE 1789 предлагается применять анализ Фурье, но «интегральный критерий» по-прежнему остается широким полем для исследований. Кроме того, в IEEE 1789 предлагается использовать алгебраическую сумму, но упоминаются и другие методы интегрирования, например норма Минковского.

В настоящее время Сектор полупроводниковой светотехники Рабочего совета по энергоэффективному оборудованию промышленного назначения Международного энергетического агентства (4E-SSL) также работает над формулировкой критериев ограничения пульсаций светового потока в духе упомянутой выше рекомендации IEEE.

Эти критерии будут адаптированы к предлагаемой Сектором «системе уровней». Соответствующие рекомендации будут опубликованы в течение 2016 г. в следующей версии «Технических требований» (подробности на ssl.iea-4e.org).

Позже Буллоу и Маркус [23] провели исследование, в ходе которого были получены различные сигналограммы пульсаций светового потока на нескольких частотах, дававшие основания полагать, что коэффициент пульсаций светового потока больше подходит для характеристики стробоско-

пических эффектов, нежели амплитуда колебаний светового потока. Это задает направление, противоположное тому, в котором следует стандарт IEEE.

Кроме того, в аналитической записке Национальной ассоциации производителей электрооборудования США (NEMA) [24] утверждается, что стандартизации временных артефактов светового излучения в настоящее время препятствует отсутствие надлежащих метрик для оценки этих артефактов, и потому требуются новые метрики пульсаций светового потока и соответствующие методы светотехнических измерений. Подчеркивается также, что это может вести к неоправданному повышению себестоимости ЭПРА.

Согласно рекомендациям Министерства энергетики США [20], сегодня «в отсутствие метрик для пульсаций светового потока следует обязательно оценивать светодиодные системы визуальным методом, и лучше всего — на чувствительной к пульсациям клиентской аудитории. Быстрыми движениями пальца или карандаша в свете светодиодного источника или вращением стробоскопического диска можно выявить пульсации светового потока по стробоскопическому эффекту,

даже если у испытуемых нет природной восприимчивости к пульсациям». Остается надеяться, что общемировой формальный стандарт в этой области будет принят до того, как рынок наводнит «токсичная», низкокачественная продукция.

Оригинал статьи опубликован на www.led-professional.com

Литература

1. Berman S. M., Greenhouse D. S., Bailey I. L., Clear R. and Raasch T.W. Human electroretinogram responses to video displays, fluorescent lighting and other high frequency sources / *Optometry and Vision Science*, 68(8). 1990. P. 645–662.
2. Wilkins A. J., Nimmo-Smith I. M., Slater A. and Bedocs L. Fluorescent lighting, headaches and eye-strain / *Lighting Research and Technology*, 21(1). 1989. P.11–18,
3. Wilkins A. J., Clark C. Modulation from fluorescent lamps / *Lighting Research and Technology*, 22(2). 1990. P. 103–109.
4. Wilkins A. J., Wilkinson P. A tint to reduce eye-strain from fluorescent lighting, Preliminary observations / *Ophthalmic and Physiological Optics*, 11. 1991. P. 172–175,
5. Hart W. M. Jr. Adler's physiology of the eye. Clinical application / Editors R. A. Moses RA, Hart W.M. // The C. V. Mosby Company St Louis. 1987.
6. Jinno M., Morita K., Tomita Y., Toda Y., Motomura H. // *Journal of Light and visual environment*, 32(2). 2008.
7. Rea M. S. (editor). IESNA Lighting Handbook: Reference and Application, 9th edition / New York: Illuminating Engineering Society. 2000.
8. Poplawski M., Miller N. J. Exploring flicker in Solid-State Lighting: What you might find, and how to deal with it // Pacific Northwest National Laboratory. 2010. www.e3tnw.org/Documents/2011%20IES%20flicker%20paper%20poplawski-miller-FINAL.pdf
9. Kitsinelis S., Zissis G., Arexis L. A study of flicker of commercial lamps // *Light & Engineering*, 20(3). 2012. P. 25–33,
10. Zissis G., Kitsinelis S., Arexis L. Etude comparative des effets stroboscopiques d'un echantillon de systemes d'eclairage // Final Rapport, ANSES Convention 2010-CRD-22. 2011.
11. US Department of Energy, Solid-State Lighting Technology Fact Sheet: Flicker //

- Building Technologies Office. PNNL-SA-94791. 2013. March.
12. Tahkamo L., Bazzana M., Ravel P., Grannec F., Ch. Martinsons G. Zissis Life cycle assessment of light-emitting diode downlight luminaire — a case study // *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(1). DOI 10.1007/S11367-012-0542-4. 2013.
 13. Kitsinelis S., Zissis G. Proceedings of 13th Int. Symposium on the Science and Technology of Lighting Systems., Troy NY (USA). 24–29 July. 2012. P. 363–364.
 14. Kukacka L., Dupuis P., Zissis G., Kola T M. Retrofit LED Lamps – Photometric Flicker Analysis / Proceedings 50th IEEE IAS Annual Meeting. Dallas TX (USA). 18–22 October. 2015,.
 15. Shady S., MacLeod D. I. A., Fisher H. S. Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS). 101(14): 5170-5173. 2004.
 16. Bullough J. D., Hickcox K. Sweater, Klein T., Lok A., Narendran N. Flicker Parameters for Reducing Stroboscopic Effects from Solid-state Lighting Systems // ASSIST recommends, 11(1). 2012. May.
 17. Visual Perception of LED Flickering Controlled in a Colored Environment / L. Arexis-Boisson, S. Kitsinelis, G. Zissis, J. Salon, S. Martin, N. Ouahhabi, // *Journal Light & Visual Environment?* 37(4), DOI IEIJ130000504/ 2014. P. 183–188/
 18. Arexis L. Etude et optimisation d'un systeme d'eclairage efficace energetiquement et adapte aux besoins de ses utilisateurs (sante, securite et qualite de vie) / These de l'Universite de Toulouse. 19 June. 2014.
 19. Villa C., Labayrade R. Multiobjective optimisation of lighting installations taking into account user preferences – a pilot study, *Lighting Research and Technology*, 45(2). / DOI 10.1177/1477153511435629. 2013. P. 176–196.
 20. ENERGY STAR® Program Requirements for Lamps (Light Bulbs). V2.0-Draft 3. 4 September. 2015. www.energystar.gov/sites/default/files/ENERGY%20STAR%20Lamps%20V1%201_Specification.pdf
 21. IEEE. Standard 1789-2015 – IEEE Recommended Practices for Modulating Current in High-Brightness LEDs for Mitigating Health Risks to Viewers. June. 2015.
 22. Lehman B., Wilkins A. J. Designing to Mitigate the Effects of Flicker in LED Lighting: Reducing risks to health and safety // *IEEE Power Electronics Magazine*. DOI 10.1109/MPEL2014.2330442. September. 2014. P. 18–26,.
 23. Bullough, J. D., Marcus D. Influence of flicker characteristics on stroboscopic effects / *Lighting Research and Technology*, DOI 10.1177/1477153515599566. 2015.
 24. NEMA, Temporal Light Artifacts (Flicker and Stroboscopic Effects) / A NEMA Lighting Systems Division Position Paper. 15 June. 2015. www.nema.org/news/Pages/NEMA-Lighting-Systems-Division-Publishes-Position-Paper-on-Temporal-Light-Artifacts.aspx