

В.Ф. Денник, В.Е. Михайлов

ИССЛЕДОВАНИЕ БЕСТРАНСФОРМАТОРНЫХ СХЕМ ПИТАНИЯ СВЕТОДИОДНЫХ ЛАМП

Особенности бестрансформаторной схемы питания светодиодных ламп, методика ее расчета, экспериментальное подтверждение ее корректности. Мероприятия по улучшению работы светодиодных ламп с бестрансформаторным питанием.

Ключевые слова: светодиод, лампа, методика расчета.

Особливості безтрансформаторної схеми живлення світлодіодних ламп, методика її розрахунку, експериментальне підтвердження її коректності. Заходи щодо поліпшення роботи світлодіодних ламп з безтрансформаторним живленням.

Ключові слова: світлодіод, лампа, методика розрахунку.

Постановка проблемы. В последнее время все большее и большее распространение получают светодиодные лампы (СДЛ) и светильники. По прогнозам специалистов рынок светодиодной продукции с течением времени возрастает в геометрической прогрессии. Это обусловлено многими их преимуществами по сравнению с другими источниками света [1,2], из которых особо выделим:

а) длительный срок службы (50000 ч эксплуатации, что составляет от 6 лет при их использовании 24 часа в сутки и до 50 лет при использовании три часа в сутки);

б) высокую светоотдачу (световой поток по отношению к потребляемой мощности) светодиодов (СД);

в) низкие затраты на техобслуживание;

г) низкую пожароопасность.

При питании СД от источника постоянного тока проблем практически не возникает. А вот при их питании от сети переменного тока возникает целый ряд сложностей, связанных с особенностями СД. Это прежде всего их «неприязнь» к обратным напряжениям, а также высокая (опасная) чувствительность к токовым перегрузкам. В этом случае питание СД осуществляется через драйверы, большинство из которых содержит понижающий трансформатор, выпрямитель и стабилизатор напряжения или силы тока. Простейшие расчеты показывают, что из-за потерь мощности в этих элементах коэффициент полезного действия (КПД) драйвера при мощности нагрузки 5...20 Вт составляет 60...70 %. Это приводит к существенному снижению светоотдачи СДЛ.

В данной работе рассматривается и исследуется одна из схем питания СДЛ (рисунок 1), которая, на наш взгляд, наиболее перспективна, поскольку имеет следующие преимущества перед трансформаторными схемами: а) более высокая энергоэффективность (выше КПД); б) низкая стоимость; в) простота реализации; г) практически синусоидальный ток сети, имеющей емкостный характер.

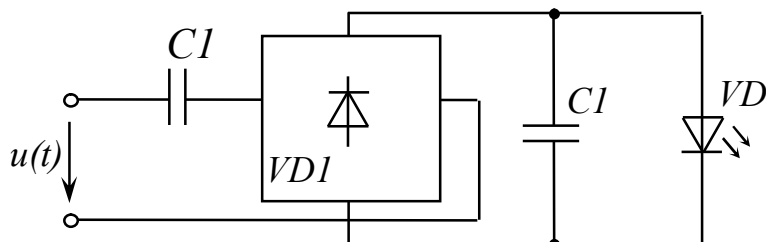


Рисунок 1 – Принципиальная схема питания СД

лампами накаливания (ЛН) и энергосберегающими лампами (ЭСЛ) при изменении питающего напряжения в пределах, установленных стандартами (–15... +10 %).

Анализ исследований и публикации. Светодиоды и лампы на их основе получили сравнительно широкое распространение недавно. Однако публикаций на эту тему уже достаточно много. В публикациях СД описаны как основа освещения будущего [1, стр.2-7]. Исследуются свойства СД [2,3], освещены вопросы их конструирования и производства и систем на их основе [4], приведены методики расчета схем питания СД и другие результаты исследования свойств СДЛ с помощью этих методик.

Цель статьи. Исследование бестрансформаторной схемы питания СД от сети переменного тока, разработка уточненной методики ее расчета для случая широкого изменения параметров СД и их количества (а также рекомендаций по ее улучшению), исследование зависимости светового протока различного типа ламп от напряжения.

Результаты исследований. Для реализации указанной цели в первую очередь исследованы характеристики СД. Для этого экспериментальным путем сняты статические вольт-амперные характеристики (ВАХ) целого их ряда. Поскольку таких типов очень много, то эти ВАХ сгруппированы по размеру кристалла, а точнее по его номинальной (каталожной) силе тока. На рисунке 2 приведены ВАХ для одного кристалла. На 2,а – СД с силой номинального тока 20 мА, а на 2,б – 300 мА. Именно на таких кристаллах построено подавляющее большинство выпускающихся в настоящее время СД. Например, СД типа PLCC5050W (обозначим его как SMD) содержит 3 кристалла на силу тока 20 мА каждый, СД с параметрами 10 Вт и 30 В содержит 9 последовательно соединенных кристаллов на силу тока 300 мА каждый, а СД 30 Вт и 30 В состоит из 3 параллельных ветвей, в каждой из которых последовательно включено по 10 кристаллов на силу тока 300 мА.

На своих рабочих участках (в окрестностях, близких к номинальной

Попутно потребовалось исследовать ряд смежных вопросов, относящихся не только к рассматриваемой схеме, а именно сравнение светового потока и освещенности СДЛ с

силе тока) все ВАХ мало отличаются от прямолинейных. Это позволяет при расчетах представлять СД схемой замещения, состоящей из последовательно соединенных электродвижущих сил (ЭДС) E_d и динамического сопротивления R_d диода на рабочем участке его ВАХ [5]. С помощью графиков рисунка 2 определены значения E_d (точка пересечения прямолинейного участка с осью ординат) и $R_d = \Delta U / \Delta I$ (здесь ΔU и ΔI разность напряжений и разность силы тока между крайними точками выбранного прямолинейного участка ВАХ) для всех исследованных СД. Они приведены в таблице 1.

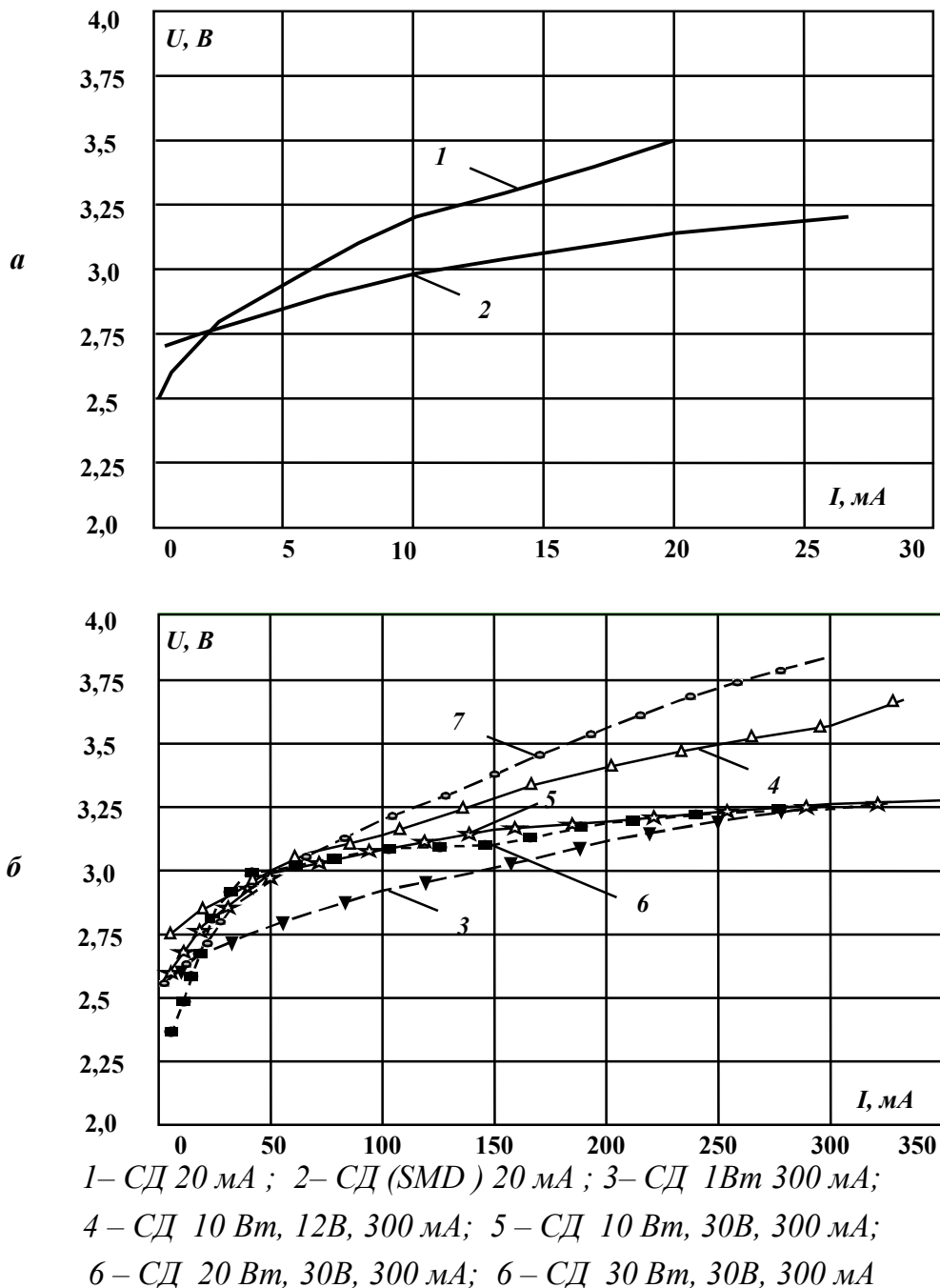


Рисунок 2 – Вольт-амперные характеристики СД

Таблица 1

Параметры СД	20 мА	SMD	1 Вт	10 Вт 12 В	10 Вт 30 В	20 Вт 30 В	30 Вт 30 В
E_d , В	2,87	2,97	2,81	3,25	3,09	3,1	3,26
R_d , Ом	30	12	1,5	1,7	0,55	0,8	3

Из таблицы 1 следует, что для этих СД параметр E_d изменяется незначительно, а R_d колеблется в широких пределах. Однако дальнейшие исследования показали, что хотя значения R_d существенно влияют на колебания силы тока СД, они практически не оказывают влияния на ее среднее значение, которое определяет световой поток СД.

Одним из недостатков схемы рисунка 1 является очень большая сила пускового тока, которая ограничивается лишь сопротивлением диодов выпрямителя (напряжение на конденсаторах $C1$ и $C2$ равно нулю) и поэтому может быть очень высокой, хотя и кратковременной. Это может приводить к выходу из строя диодов моста и подгоранию контактов выключателя. Данный недостаток можно устранить, если в схеме рисунка 1 включить индуктивность L между выпрямителем и конденсатором $C2$. Для такого случая (начальная стадия переходного процесса) составлена расчетная схема (рисунок 3), в которой C – это эквивалентная емкость последовательно соединенных $C1$ и $C2$, а диоды моста представлены в виде опорной ЭДС E и динамического сопротивления r . Процессы в схеме рисунка 3 описываются нелинейным дифференциальным уравнением

$$L \frac{di}{dt} + u_c + E + i \cdot r = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega t + \psi),$$

где U – напряжение питающей сети;

ω и ψ – его угловая частота и начальная фаза.

Решение этого уравнения выполнено с помощью ПЭВМ. В таблице 2 в качестве примера приведены максимальные за время процесса значения силы тока I_{max} , полученные при следующих исходных данных: $U = 220$ В, $\psi = \pi/2$, $C = 4,34$ мкФ, $E = 1$ В, $r = 3$ Ом.

Таблица 2

L , мкГн	50	100	200	400	600	800	1000
I_{max} , А	52,8	42,8	33,7	25,8	21,9	19,4	17,7

Данные таблицы 2 свидетельствуют о том, что при допустимой силе тока выпрямительного моста, равной одному амперу, достаточно использовать индуктивность $L = 200 \dots 400$ мкГн. Следует заметить, что индук-

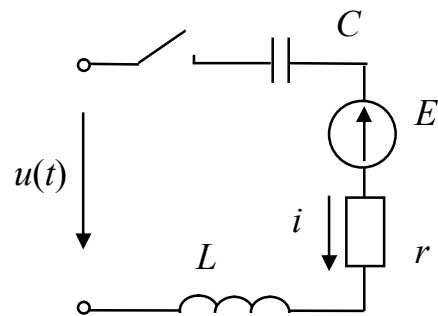


Рисунок 3 – Схема для расчета начальной стадии переходного процесса

тивность L можно и не включать. По крайней мере, нами не обнаружено случаев выхода из строя оборудования, связанных с отсутствием L . Такая же ситуация имеет место и в ЭСЛ, у которой зачастую индуктивность L отсутствует.

В [6] освещена одна из возможных методик расчета установившегося режима в схеме рисунка 1. В этой методике питающая сеть, конденсатор $C1$ и выпрямитель представлены источником тока $j(t) = \sqrt{2} \cdot U \cdot \omega \cdot C_1 \cdot |\sin(\omega t)|$. Такой подход дает вполне удовлетворительные результаты в случае, если последовательно включено небольшое количество СД и напряжение на них составляет 6...8% от напряжения сети. В противном случае (при большом количестве СД) эта методика, которую в дальнейшем будем называть М6, становится некорректной. В связи с этим нами разработана уточненная методика (УМ). В отличие от М6 в УМ питающая сеть представлена источником ЭДС с напряжением $u(t) = \sqrt{2} \cdot U \cdot |\sin(\omega t)|$, а диоды моста и сопротивление конденсатора $C1$ нашли свое отражение в нелинейном элементе X . Исходя из этих соображений составлена эквивалентная расчетная схема (рисунок 4), в которой L – упомянутая выше индуктивность, а СД представлены элементами E_d и R_d .

Процессы, происходящие в схеме рисунка 4, описываются следующей системой нелинейных дифференциальных уравнений:

$$L \frac{di}{dt} + u_d + i \cdot X = \sqrt{2} \cdot U \cdot |\sin(\omega t)|;$$

$$u_d - i_d \cdot R_d = E_d; \quad i_d + C_2 \cdot \frac{du_d}{dt} = i,$$

причем $X=10^6$ Ом, если $i \leq 0$ (диоды моста закрыты) и $X=XC_1/\kappa_\phi$, (здесь XC_1 – сопротивление конденсатора C_1 переменному току, а κ_ϕ – коэффициент формы тока сети $\kappa_\phi \approx 1,11$) при $i \geq 0$ (диоды открыты).

Решение этой системы произведено с помощью ПЭВМ, для чего разработана программа, позволяющая производить расчет схемы рисунка 4 при любых исходных данных.

Результаты, полученные с помощью УМ, совпали с результатами, которые даёт М6 (в том числе и приведенные там выводы). Это и понятно, т.к. с помощью М6 исследованы схемы с небольшим числом СД. В связи с этим осветим результаты новых исследований, выполненных на математической модели и с помощью М6, и с помощью УМ. Некоторые из них, полученные при $U = 220$ В и $f = 50$ Гц, приведены в таблице 3, в которой I_{cp} – среднее значение силы тока СД, I – действующее значение силы тока сети (эти величины являются определяющими и контролируются). Там же при-

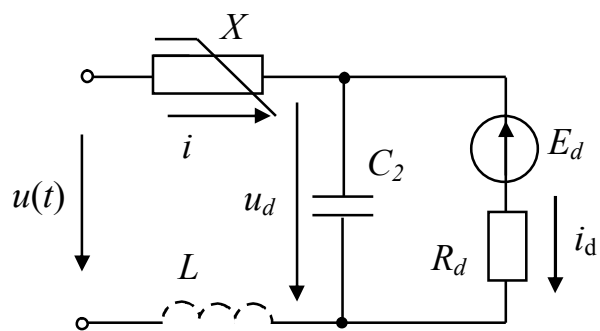


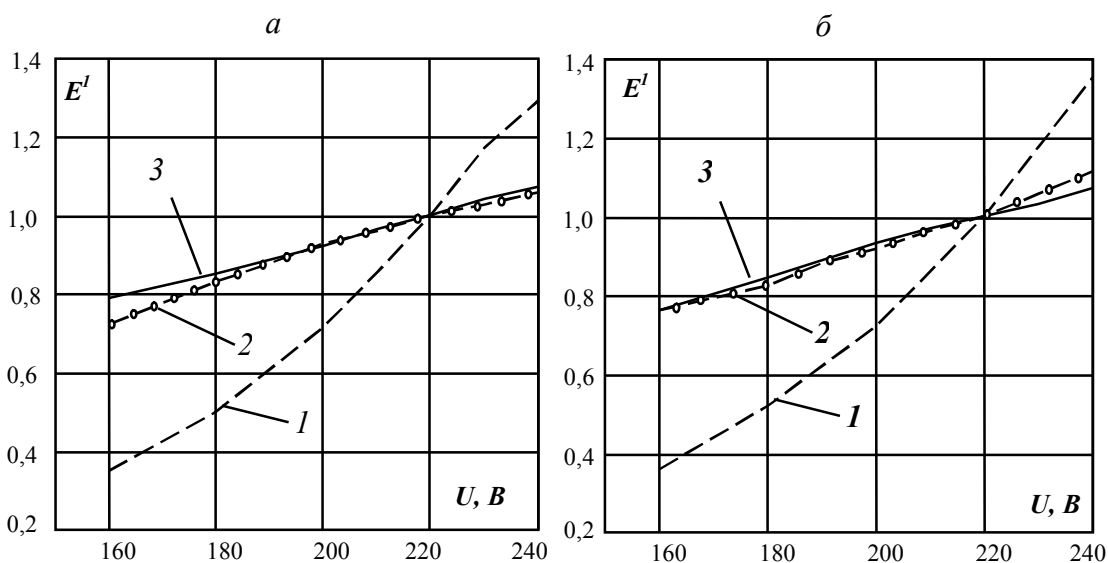
Рисунок 4 – Расчетная схема

ведены экспериментальные значения этих величин. Как следует из данных таблицы 3, расчеты по УМ более точны и дают результаты, незначительно отличающиеся от экспериментальных.

Таблица 3

Тип СД	I_{cp} , мА			I , мА		
	М6	УМ	Эксперим.	М6	УМ	Эксперим.
6 SMD, $C_I=1,7$ мкФ	98	93	92	114	105	108
24 SMD, $C_I=2,5$ мкФ	145	109	110	156	133	130
49 SMD, $C_I=4,4$ мкФ	196	108	120	312	145	150
10 Вт 30В, $C_I=4,7$ мкФ	274	260	255	398	285	290
30 Вт 36 В, $C_I=14,2$ мкФ	880	742	732	978	903	910

Одним из недостатков схемы рисунка 1 является зависимость освещенности СДЛ от напряжения сети. Эта зависимость была установлена экспериментальным путем и в одних и тех же условиях произведено ее сравнение с зависимостями для других источников света (ЛН и ЭСЛ). Освещенность измерялась люксметром типа LX 1330В. Согласно нормам напряжение бытовой осветительной сети может колебаться в пределах от -15 до +10% по сравнению с номинальным значением, однако реально этот диапазон может быть и шире. В наших исследованиях напряжение питающей сети изменялось в диапазоне $U=160\dots 240$ В. Исследованию подвергались следующие источники света: светодиодные типа 15SMD 5Вт и 10 Вт и 30 В, энергосберегающие 23 и 36 Вт, накаливания 75 и 150 Вт. Полученные результаты отражены на графиках рисунка 5, где освещенность представлена в относительных единицах (E^I), а в качестве базовой взята освещенность при номинальном напряжении сети ($U=220$ В).



1 – лампа накаливания 75 Вт (а), 150 Вт (б); 2 – энергосберегающая лампа 23 Вт (а), 36 Вт (б); 3 – светодиодная лампа 5 Вт (а), 10 Вт (б)

Рисунок 5 – Зависимость освещенности от напряжения сети

Анализируя графики рисунка 5, можно сделать следующие выводы:

а) при колебаниях напряжения сети больше всего изменяется освещенность ЛН. Так, при $U=180$ В она падает на 50 % по сравнению с базовой, а при $U=240$ В возрастает на 29 %;

б) при $U=180$ В освещенность СДЛ падает на 15,3% по сравнению с базовой, а при $U=240$ В возрастает на 7,6%;

в) при $180 \leq U \leq 240$ В освещенности ЭСЛ и СДЛ изменяются практически одинаково, т.е. по стабильности освещенности при колебаниях напряжения сети СДЛ не уступают ЭСЛ и намного превосходят ЛН.

Выводы:

1. Для большого числа СД экспериментально определены их вольт-амперные характеристики. Выяснено, что в окрестностях номинальной силы тока эти характеристики мало отличаются от прямолинейных. Это позволяет при расчетах представлять СД схемой замещения, состоящей из последовательно соединенных ЭДС E_d и динамического сопротивления R_d , которые определены количественно.

2. Исследована возможность снижения силы пускового тока при бестрансформаторной схеме питания СД и рекомендован путь ее реализации.

3. Разработана уточненная методика расчета установившегося режима работы бестрансформаторной схемы питания СД, корректность которой подтверждена экспериментально.

4. Показано, что по изменению освещенности при колебаниях напряжения сети СДЛ не уступают ЭСЛ и намного превосходят ЛН.

Список литературы

1. Юнович А.Э. Светодиоды как основа освещения будущего / А.Э.Юнович // Светотехника.– 2003.– № 3.– С. 2–7.

2. Никифоров С.Г. Температура в жизни и работе светодиодов / С.Г.Никифоров // Компоненты и технологии.–2005.– № 9.

3. Бочкарева Н.И. Неоднородность инжекции носителей заряда и деградация голубых светодиодов / Н.И.Бочкарева, А.А.Ефремов, Ю.Т.Ребане [и др.] // Физика и техника полупроводников.– 2006.– Т. 40.– Вып. 6.

4. Агафонов Д.Р. Вопросы конструирования и производства светоизлучающих диодов и систем на их основе /Д.Р.Агафонов, П.П.Анкин, С.Г. Никифоров // Светотехника.–2002.– № 6.

5. Рибалко Н.П. Нелінійні електричні та магнітні кола в усталених і перехідних режимах / Н.П.Рибалко, В.О.Есауленко.–К.: ІСДО, 1994.–196 с.

6. Денник В.Ф. Методика расчета бестрансформаторных схем питания светодиодных ламп и светильников/В.Ф.Денник, В.Е. Михайлов // Наукові праці Донецького національного університету.–Донецьк: ДонНТУ, 2012.– №1(12)-2(13).– С.73-77.