

# Независимая от мощности модель КЛЛ с выносным электромагнитным ПРА, основанная на динамической проводимости\*

Б.Г. БАКШИ<sup>1</sup>, А. ДУТТА<sup>2</sup>, Б. РОЙ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Калькуттский производственно-управленческий институт, Колката, Индия

<sup>2</sup> Компания *AWA Lighting Designers*, Нью-Дели, Индия

<sup>3</sup> Электротехнический факультет Джадавпурского университета, Колката, Индия

E-mail: broy@ee.jdvu.ac.in

## Аннотация

В статье представлена независимая от мощности математическая модель компактных люминесцентных ламп (КЛЛ), работающих с внешним электромагнитным пускорегулирующим аппаратом (ЭмПРА) на частоте 50 Гц. Эта модель, сформированная в «*Matlab-Simulink*», воспроизводит изменение электрических характеристик системы КЛЛ-ЭмПРА во времени и представляет собой модифицированный вариант существующей модели динамической электрической проводимости, в которой скорость изменения носителей заряда внутри разрядной трубки определяется на основе рассмотрения физических процессов, таких как ионизация, рекомбинация и диффузия на стенке. В качестве входного параметра модели выступает напряжение сети. В исходной, привязанной к конкретной мощности лампы, модели для описания этих физических процессов используются четыре коэффициента (*A*, *B*, *C* и *D*). При этом в модели не учитываются электрические параметры ЭмПРА, который заменён на источник синусоидального тока. В предлагаемой независимой от мощности модифицированной модели, применимой к лампам мощностью 7–18 Вт, учитывается влияние ЭмПРА. Полученные с помощью этой модели результаты сравниваются с результатами испытаний лампы мощностью 9 Вт, проведённых в широком диапазоне изменения напряжения сети (200–260 В). Результаты расчётов демонстрируют хорошее совпадение с характеристиками реальной системы лампа-ПРА, так что разработанную модель можно использовать при конструировании ПРА.

**Ключевые слова:** независимая от мощности модель, электромагнитный пускорегулирующий аппарат, КЛЛ не для прямой замены ламп накаливания, динамическая электрическая проводимость.

## 1. Введение

Линейные люминесцентные лампы (ЛЛ) и КЛЛ, относящиеся к ртутным лампам НД, широко используются в качестве источников света для внутреннего искусственного освещения из-за хорошей световой отдачи и приемлемой цветопередачи. Благодаря низкой стоимости, хорошим эксплуатационным характеристикам и большой продолжительности горения эти лампы остаются самыми популярными в развивающихся странах, таких как Индия, источниками света даже после появления доступных светодиодов [1]. В идущем в этих разрядных лампах процессе генерации света задействованы сложные физические процессы. Математическое моделирование подобных ламп предоставляет многочисленные возможности, в том числе в моделировании электрических характеристик, исследовании сложных вольт-амперных характеристик, конструировании ПРА и исследовании качества электрической энергии [2, 3].

Один из наиболее широко используемых методов моделирования основан на уравнениях теплового баланса лампы [4–9]. При этом подходе изменение температуры дуги описывается, исходя из мощности, потребляемой лампой, и потерь энергии из-за теплового излучения и теплопроводности. Модель теплового баланса обычно реализуется в «*PSPice*» и включает в себя катодное падение напряжения и стадию разогрева [6, 7]. Недавно эта модель была модифицирована с целью получения теоретико-

экспериментальной модели, которая включала бы в себя процесс светорегулирования и влияние температуры разрядной трубки [8, 9]. Правильность этой модели была подтверждена результатами испытаний различных ЛЛ и КЛЛ.

Более простая, чем модель на тепловом балансе, модель на основе электрической проводимости лампы была впервые предложена в докладе [10]. Эта модель «исходила» из уравнения баланса энергии Фрэнсиса [11] и меняющейся во времени проводимости столба дугового разряда. Чем больше концентрация носителей заряда внутри разрядной трубки, тем больше проводимость и тем меньше сопротивление дуги. Первую модель динамической проводимости назвали «квадратичной моделью» (*quadratic model*), так как правая часть уравнения представляет собой квадратный трёхчлен [12]. Эта квадратичная модель была преобразована в полиномиальную, позволяющую лучше моделировать разрядные лампы ВД [13]. И в квадратичной, и в полиномиальной моделях рекомбинационные потери внутри разрядной трубки меняются как квадрат проводимости. Впоследствии авторы решили [13], что более точной аппроксимацией рекомбинационных потерь была бы экспонента от проводимости [14]. Впоследствии была подтверждена применимость экспоненциальной модели к работе как на низкой, так и на высокой частоте [2].

Было предложено несколько основанных на уравнении баланса энергии Фрэнсиса физических моделей разрядной лампы, связывающих электрические характеристики лампы с её геометрией, температурой холодной точки и составом наполнения [15–17]. В них упор делался на микроуровневых характеристиках разряда, таких как подвижность ионов, скорость переноса и коэффициент ам-

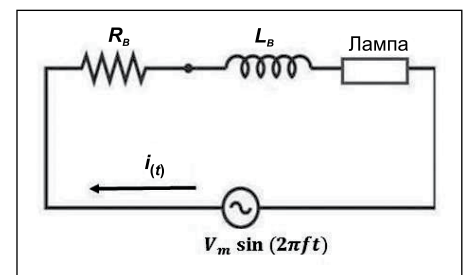


Рис. 1. Электрическая схема с лампой и электромагнитным ПРА

\* Перевод с англ. Е.И. Розовского

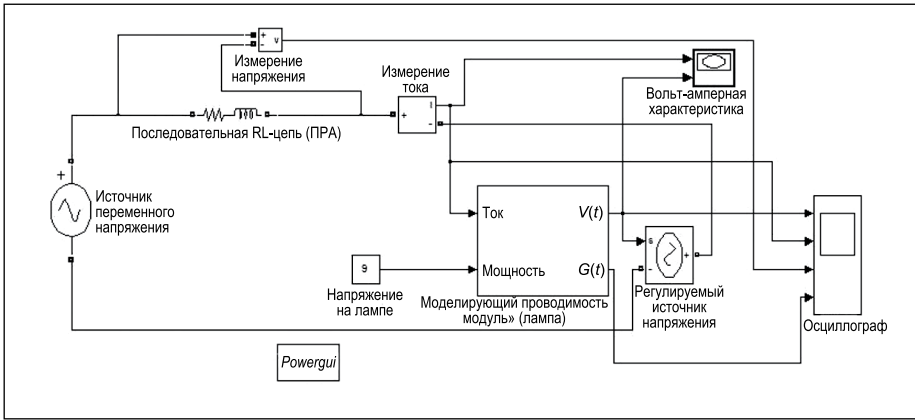


Рис. 2. Воплощение полной системы лампа–ПРА в «Simulink»

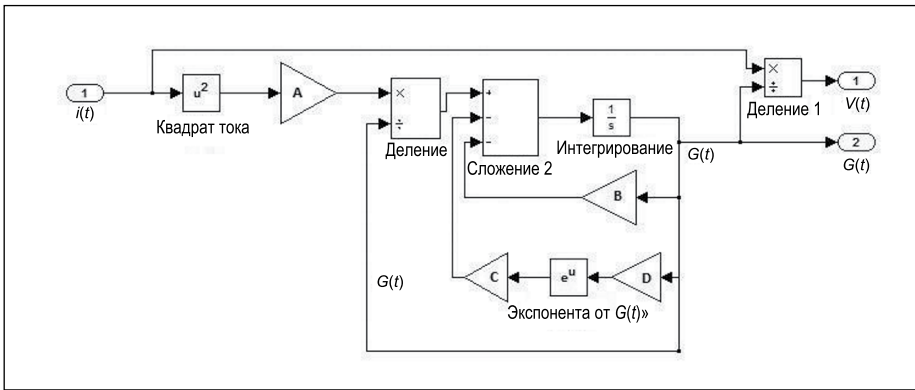


Рис. 3. Формирование подсистемы «Моделирующий проводимость модуль» (МПМ) на основе моделирующей лампы уравнения (1)

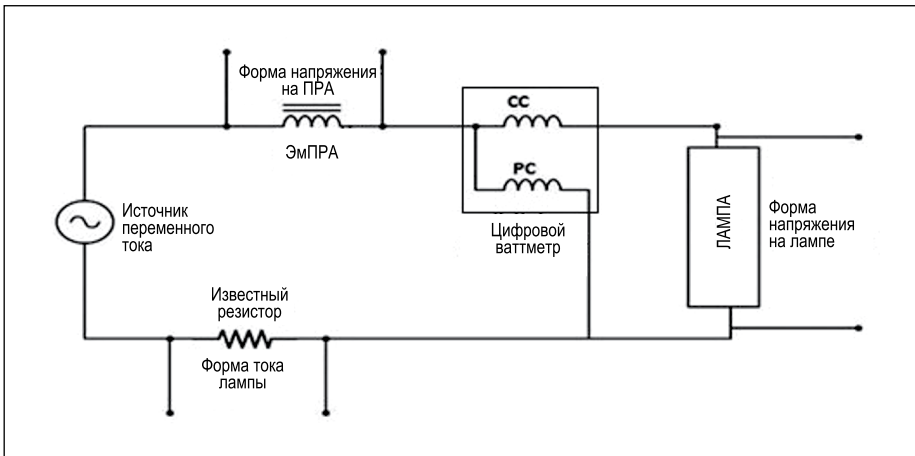


Рис. 4. Электрическая схема, использовавшаяся для определения коэффициентов и проверки модели

биполярной диффузии, что делало невозможным построение модели на основе выходных электрических характеристик разряда.

Реализация экспоненциальной модели проводимости [2] связана с тремя основными проблемами:

- в исходной модели физические характеристики ПРА были заменены на питание лампы от источника синусоидального тока. Однако на практике из-за сильной нелинейно-

сти лампы форма тока отличается от синусоидальной;

- входным параметром модели лампы было нормированное значение синусоидального тока, а не напряжения;

- существующие модели проводимости зависят от мощности, то есть полученные экспериментально коэффициенты модели описывают только конкретную лампу и не могут использоваться для ламп другой мощности.

Для создания предлагаемой независимой от мощности лампы модели была использована модифицированная модель динамической проводимости [2, 10–14]. От других методов моделирования тепловых и физических процессов отказались из-за их сложности и потребности в данных, которые очень трудно получать экспериментально, таких как температура и электронная температура дуги, давление газа, подвижность электронов [4–9, 15–17]. В отличие от этих методов, для создания модели динамической проводимости требуются только выходные характеристики лампы [18]. В разработанной независимой от мощности модели зависимые от мощности коэффициенты  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  заменены на задаваемые пользователем функции, полученные на основе результатов измерений пяти ламп (7–18 Вт). После программной реализации предложенная модель была проверена на КЛЛ компании *Osram* мощностью 9 Вт.

## 2. Существующая модель динамической проводимости разрядных ламп НД

Проводимость (или сопротивление) внутреннего объема горелки лампы прямо пропорциональна плотности носителей заряда (в основном, электронов) внутри горелки [10]. Горелка содержит газы (такие как аргон, криптон и т.д.) и пары металлов при определенном низком давлении. При приложении к электродам напряжения электроны устремляются от катода к аноду, сталкиваясь при этом с атомами инертного газа и металлов и ионизируя их [19]. Этот процесс ионизации приводит к увеличению проводимости лампы, так как чем больше количество носителей заряда, тем больше проводимость дуги. С другой стороны, часть электронов рекомбинирует с ионами с образованием нейтральных атомов. Эта рекомбинация приводит к уменьшению проводимости лампы [10, 13]. Кроме рекомбинации, часть электронов диффундирует на стенки лампы, не участвуя в разряде. В целом проводимость лампы представляет собой «динамическую» величину, зависящую от трёх основных факторов: ионизации, рекомбинации и потерь на стенках трубки [2].

С учётом трёх этих факторов основанная на динамической проводимости математическая модель [2, 14] имеет вид:

$$\frac{dG(t)}{dt} = A \cdot i(t) \cdot v(t) - B \cdot G(t) - C \cdot \exp[D \cdot G(t)], \quad (1)$$

где  $G(t)$  – динамическая проводимость лампы,  $i(t)$  – мгновенное значение тока лампы,  $v(t)$  – мгновенное значение напряжения на лампе,  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  – коэффициенты модели лампы.

Дифференциальное уравнение первого порядка (1) – основное уравнение модели лампы, справедливое для разрядных ламп НД, то есть для ЛЛ и КЛЛ [2]. В предшествующих работах компьютерную реализацию уравнения (1) называли «моделирующим проводимостью модулем» (МПМ) [2, 14], в котором уравнение (1) решается относительно  $G(t)$  при токе  $i(t)$ , выступающем в качестве входного параметра. Затем ток  $i(t)$  делят на  $G(t)$ , получая в результате напряжение на лампе  $v(t)$ . Электрические характеристики лампы заданной мощности целиком зависят от коэффициентов  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$ . Связь этих коэффициентов с протекающими в разряде физическими процессами обсуждается в следующем разделе.

### 3. Физические основы определения коэффициентов модели

В современной литературе создание модели динамической проводимости разрядов основано на уравнении баланса энергии Фрэнсиса [11]:

$$\frac{d\eta_e}{dt} = P_e + L_e, \quad (2)$$

где  $\eta_e$  – средняя плотность свободных электронов,  $P_e$  – скорость образования электронов,  $L_e$  – скорость потери электронов.

Скорость образования электронов прямо пропорциональна мгновенному значению подводимой электрической мощности [2]:

$$P_e = k_1 i(t) \cdot v(t). \quad (3)$$

Скорость потери электронов можно разделить на две составляющие:

$$L_e = L_W + L_R, \quad (4)$$

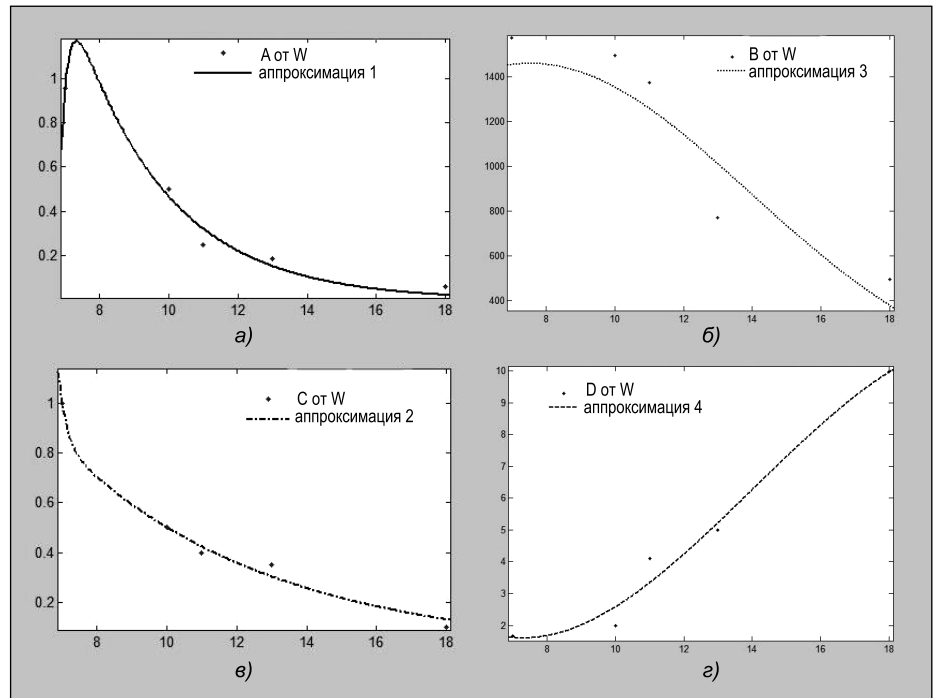


Рис. 5. Кривые, аппроксимирующие зависимости коэффициентов  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  от мощности лампы (рисунки а), б), в) и г) соответственно)

где  $L_W$  – скорость потери на стенках,  $L_R$  – скорость потери в результате рекомбинации.

Эти скорости можно выразить через среднюю плотность свободных электронов  $\eta_e$  как [2]

$$L_W = -k_2 \eta_e, \quad (5)$$

$$L_R = -k_3 \exp(k_4 \eta_e). \quad (6)$$

Знак «минус» в правых частях уравнений (5) и (6) означает уменьшение плотности электронов. Динамическую проводимость  $G(t)$  можно выразить как

$$G(t) = \frac{i(t)}{v(t)} = k_5 \eta_e. \quad (7)$$

Входящие в уравнения (3)–(7) параметры  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$  и  $k_5$  представляют собой коэффициенты пропорциональности [2]. Подставив в уравнение (2) значения  $P_e$  и  $L_e$ , получаем:

$$\frac{d\eta_e}{dt} = k_1 i(t) v(t) - k_2 \eta_e - k_3 \exp(k_4 \eta_e). \quad (8)$$

Заменив  $\eta_e$  на  $G(t)$  и умножив обе части уравнения (8) на  $k_5$ , получаем результирующее уравнение

$$\frac{dG(t)}{dt} = k_1 k_5 i(t) v(t) - k_2 G(t) - k_3 k_5 \exp\left[\left(\frac{k_4}{k_5}\right) G(t)\right]. \quad (9)$$

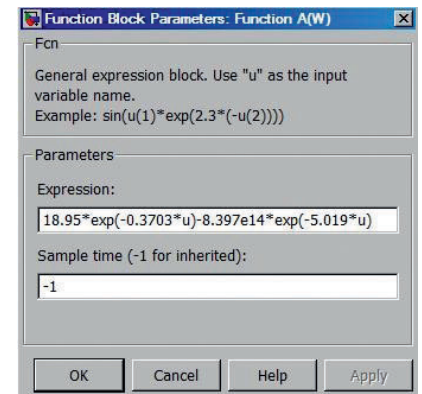


Рис. 6. Задание входного параметра функции  $A(W)$  при проверке корректности модели

Сравнив уравнения (1) и (9), получим:  $A = k_1 \cdot k_5$ ,  $B = k_2$ ,  $C = k_3 \cdot k_5$ ,  $D = k_4 / k_5$ .

Так что можно заключить: коэффициенты  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  адекватны протекающим в разряде процессам. Скорости образования электронов и их потери в результате диффузии на стенки связаны с коэффициентами  $A$  и  $B$  соответственно, а скорость рекомбинации связана с коэффициентами  $C$  и  $D$ .

### 4. Предлагаемая модель системы КЛЛ-электромагнитный ПРА

Разработка модели всей системы лампа-ЭмПРА проводилась при следующих допущениях:

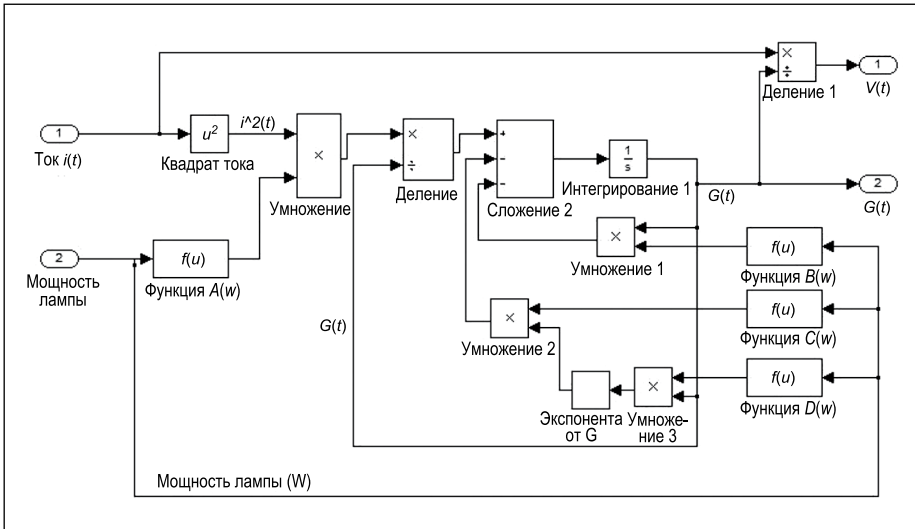


Рис. 7. Модифицированный МПМ (независимая от мощности модель лампы)

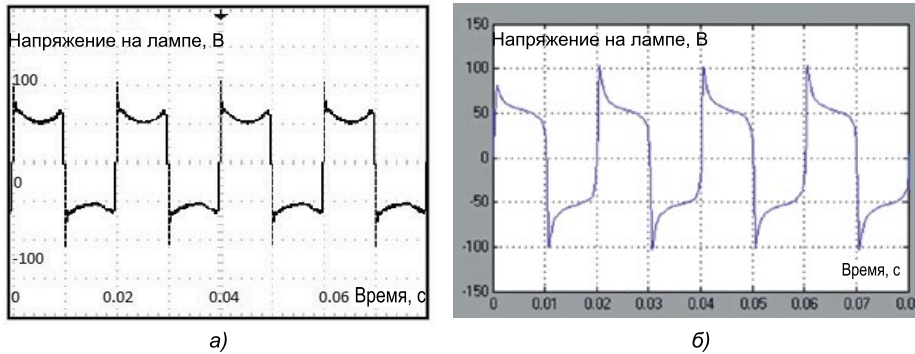


Рис. 8. Форма напряжения на КЛЛ мощностью 9 Вт при напряжении сети 240 В, 50 Гц: а – измеренная; б – расчётная

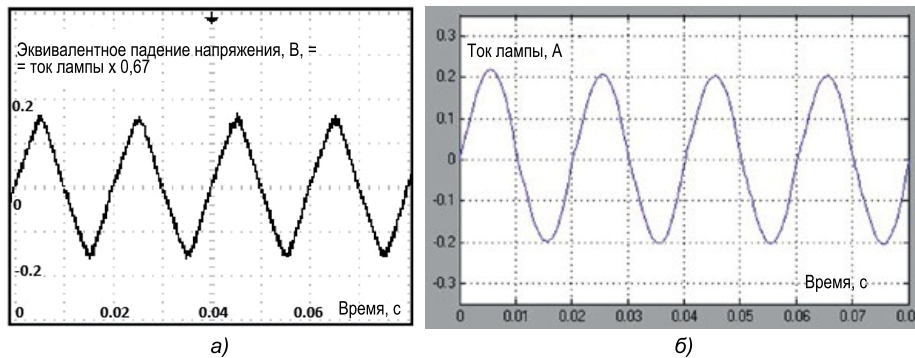


Рис. 9. Форма тока КЛЛ мощностью 9 Вт при напряжении сети 240 В, 50 Гц: а – измеренная; б – расчётная

- работа лампы описывается экспоненциальной моделью динамической проводимости (уравнение (1));
- лампа работает с ЭМПРА, представленном индуктивностью  $L_B$  и внутренним сопротивлением  $R_B$ ;
- напряжение питания имеет синусоидальную форму и частоту 50 Гц.

Моделируемая система лампа-ЭМПРА, которая показана на рис. 1, фактически является последовательной цепью переменного тока [20, 21].

Воплощение системы лампа-ЭМПРА в «*Matlab-Simulink*» отражено на рис. 2. Блок измерения тока определяет ток системы, и полученный результат передаётся в подсистему (модуль), названную, см. выше, МПМ. Этот модуль, который, в сущности, моделирует саму горелку, показан на рис. 3. МПМ содержит четыре усилительных блока (*gain block*), соответствующих коэффициентам  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$ . Выходной сигнал МПМ –

значение  $v(t)$ . Смоделированное  $v(t)$  объединяется с напряжениями на последовательно соединённых с лампой источнике переменного тока и ПРА в блоке «Регулируемый источник напряжения», заимствованном из библиотеки «*SimPowerSystems*». Для выполнения расчётов эта библиотека запрашивает дополнительный блок «*Powergui*» [22]. Для получения форм сигналов используется блок «Осциллограф», а вольт-амперную характеристику лампы  $v(t)-i(t)$  получают с помощью двукоординатного графопостроителя.

### 5. Разработка и реализация независимой от мощности модели системы лампа-электромагнитный ПРА

При разработке независимой от мощности модели системы лампа-ПРА в первую очередь рассчитывались коэффициенты  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  для пяти КЛЛ разной мощности (7–18 Вт), не предназначенных для прямой замены ламп накаливания. При этом:

- дифференциальное уравнение первого порядка преобразовывалось по методу Эйлера [2] в дифференциально-алгебраическое уравнение

$$\frac{G(t_n) - G(t_{n-1})}{t_n - t_{n-1}} = A \cdot i(t_n) \cdot v(t_n) - B \cdot G(t_n) - C \cdot \exp(D \cdot G(t_n)), \quad (10)$$

где  $t_n$  – момент времени, которому соответствуют значения  $v(t)$  и  $i(t)$ ;  $i(t_n)$  и  $v(t_n)$  – значения тока и напряжения в момент времени  $t_n$ ;  $G(t_n) = i(t_n)/v(t_n)$  – проводимость лампы в момент времени  $t_n$ ;

- для аппроксимации уравнение (10) представлялось как

$$y = A \cdot V^2 \cdot x - B \cdot x - C \cdot \exp(D \cdot x), \quad (11)$$

где  $x = G(t_n)$  – независимая переменная,  $y = [G(t_n) - G(t_{n-1})] / (t_n - t_{n-1})$  – зависимая переменная,  $V$  – среднее значение  $v(t_n)$ , которое определяется применительно к установившемуся режиму работы лампы;

- при конкретном значении мощности лампы на основе измеренных при нормированном напряжении сети тока лампы и напряжении на лампе определялись зависимости  $x$  и  $y$  от

времени. Соответствующая электрическая схема представлена на рис. 4. Формы напряжения и тока (в формате.csv и в формате изображений) определялись с помощью цифрового запоминающего осциллографа *Tektronix 1012B*. Для косвенного (через эквивалентное падение напряжения) получения формы тока использовался низкоомный резистор с известным сопротивлением (0,66 Ом). Для измерения действующих значений напряжения на лампе, потребляемой мощности, коэффициента мощности и напряжения на ПРА использовался цифровой ваттметр *Yokogawa WT 210*;

– и наконец, с помощью пакета программ аппроксимации кривых в «*Matlab*» [22] рассчитывались численные значения коэффициентов *A*, *B*, *C* и *D* для конкретной мощности лампы. Затем на основе экспериментальных данных формировался ряд зависимостей *y* от *x*, после чего уравнение (11) использовалась в качестве базового. Затем выбиралась наилучшая аппроксимирующая кривая и определялись коэффициенты модели (табл. 1). Одновременно с последними табулировались и измеренные значения параметров ПРА (табл. 2).

Как следует из табл. 1, при изменении мощности лампы меняются и значения коэффициентов модели *A*, *B*, *C* и *D*, чего и следовало ожидать, так как эти коэффициенты, как указывалось в разделе 3, определяются протекающими в лампах процессами. Таким образом, изменения коэффициентов модели отражают изменения электрических и фотометрических характеристик системы лампа-ПРА, таких как ток, напряжение, падение напряжения на ПРА, световой поток. Учитывая это обстоятельство, изменения коэффициентов описываются посредством аппроксимации соответствующих кривых с помощью пакета программ аппроксимации кривых «*Matlab*» [23]. Аппроксимирующие кривые приведены на рис. 5 и в табл. 3.

Четыре полученные в итоге функции позволяют определить коэффициенты модели для любой КЛЛ, мощность которой лежит в охваченном диапазоне. Это приводит к изменению модели лампы в «*Simulink*» путём модификации МПМ заменой четырёх усилительных блоков на четыре задаваемых пользователем функции *A(W)*, *B(W)*, *C(W)* и *D(W)*. Для этого исполь-

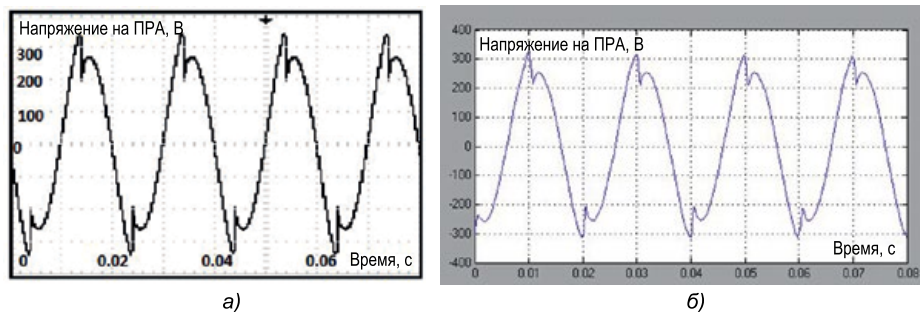


Рис. 10. Форма напряжения на ЭмПРА в цепи с КЛЛ мощностью 9 Вт при напряжении сети 240 В, 50 Гц: а – измеренная; б – расчётная

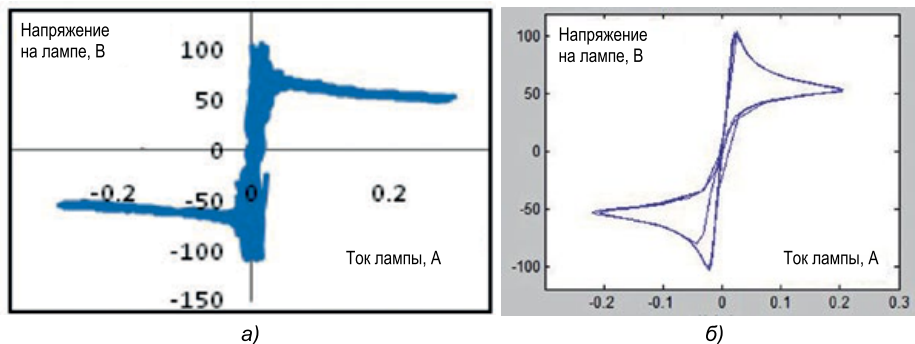


Рис. 11. Вольт-амперная характеристика КЛЛ мощностью 9 Вт при напряжении сети 240 В, 50 Гц: а – измеренная; б – расчётная

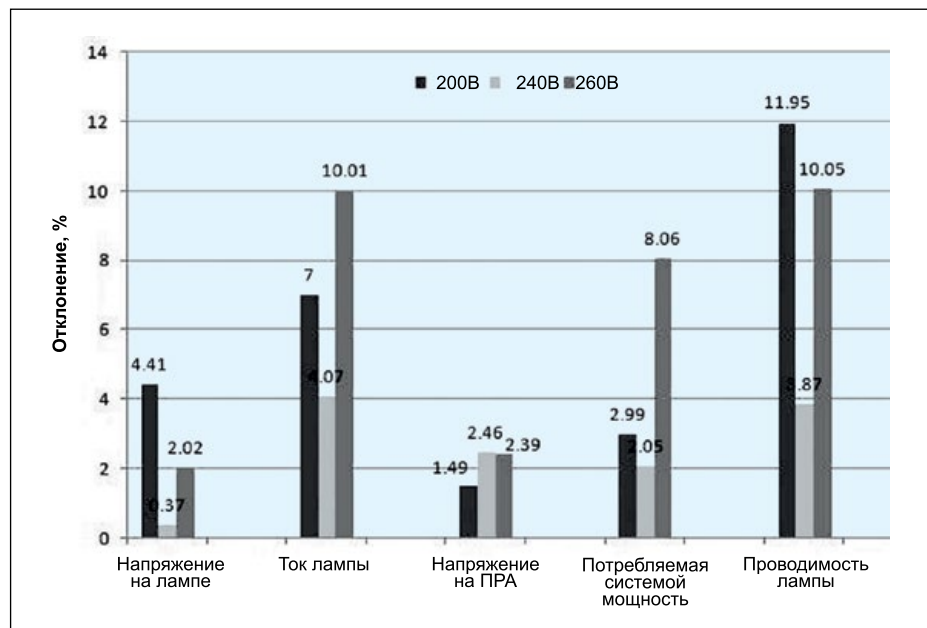


Рис. 12. Относительное отклонение результатов расчётов от результатов измерений (см. табл. 4)

зуются четыре «блока функций», которые при заданной мощности лампы генерируют коэффициенты *A*, *B*, *C* и *D* модели именно этой лампы. Пример задания входного параметра функции *A(W)* приведён на рис. 6. Выходные данные блоков функций преобразуются так, чтобы обеспечивать возможность математических расчётов. МПМ, модифицирован-

ный применительно к независимой от мощности модели, показан на рис. 7.

## 6. Экспериментальная проверка разработанной независимой от мощности модели

Реализованная в «*Simulink*» независимая от мощности модель лампы проверялась путём сравнения резуль-

Расчётные значения коэффициентов модели лампы (получены для напряжения сети 240 В, 50 Гц)

Мощность лампы, Вт	Изготовитель и модель	Расчётные значения коэффициентов			
		<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
7	<i>Osram Dulux S</i>	0,9559	1574	1	1,671
10	<i>Osram Dulux S</i>	0,503	1497	0,5	2
11	<i>Osram Dulux S</i>	0,2514	1374	0,4	4,095
13	<i>Osram Dulux S</i>	0,1884	771,7	0,35	5,003
18	<i>Osram Dulux D</i>	0,06	494,2	0,1	9,99

Таблица 2

Измеренные значения параметров ЭмПРА

Мощность лампы, Вт	ЭмПРА		
	Параметр		Изготовитель
	Сопротивление $R_B$ , Ом	Индуктивность $L_B$ , Гн	
7	139,15	3,88	<i>ECB</i>
10	195,36	4,48	<i>Philips</i>
11	138,82	4,84	<i>ECB</i>
13	195,25	4,03	<i>Philips</i>
18	104,39	3,51	<i>Philips</i>
9 (для проверки модели)	123,5	4,245	<i>Philips</i>

татов расчётов с экспериментальными данными, полученными с реальной лампой. Для проверки использовалась КЛЛ компании *Osram* мощностью 9 Вт, и в окне модели задавалось значение мощности 9 Вт. Вначале было проведено сравнение форм тока и напряжения, полученных в результате моделирования и измеренных с помощью цифрового запоминающего осциллографа *Tektronix 1012B* (рис. 8–10). Расчётная форма напряжения на лампе хорошо согласуется с экспериментальной, которую можно описать как переменное прямоугольное напряжение с ярко выраженными пиками переза зажигания при каждом переходе через ноль. Формы тока лампы (как расчётная, так и экспериментальная) несколько отклоняются от чистой синусоиды (из-за наличия нелинейности в системе с разрядной лампой). В отличие от предшествующих работ, в этой работе была рассчитана и сопоставлена с экспериментальной также форма напряжения на ПРА. Можно заметить, что перемен-

ное напряжение на ПРА имеет два следующих друг за другом пика, первый из которых выше второго, причём весь цикл продолжительностью 20 мс соответствует частоте сети (50 Гц). Кроме того, амплитуда напряжения на ПРА и его действующее значение почти в четыре раза превышают соответствующие параметры лампы. В дополнение к этому, на рис. 11 приведены вольт-амперные характеристики лампы  $v(t)-i(t)$ , на которых наблюдаются «петли» в зонах положительного и отрицательного пиков тока лампы.

Приведённые на рис. 8–10 формы тока и напряжения соответствуют нормированному напряжению питания (240 В, 50 Гц). При изменении последнего они, в принципе, не меняются — меняются лишь амплитуды (при условии постоянства частоты питающего напряжения). Было проведено сравнение измеренных и расчётных значений напряжения на лампе, тока лампы, потребляемой мощности, напряжения на ПРА и проводимости лампы при минимальном (200 В),

нормированном (240 В) и максимальном (260 В) значениях напряжения питания и номинальной частоте 50 Гц (табл. 4). Были рассчитаны относительные отклонения результатов расчётов от результатов измерений,

$$\text{Отклонение (\%)} = \left| \frac{\text{Измерение} - \text{Расчёт}}{\text{Измерение}} \right| \cdot 100\%,$$

которые представлены на рис. 12.

Приведённые на рис. 12 результаты говорят о том, что минимальные отклонения имеют место при нормированном значении напряжения питания (240 В) и не превышают 5% для всех электрических параметров. При наименьшем и наибольшем напряжениях питания (200 и 260 В соответственно) эти отклонения возрастают. Максимальное отклонение (11,95%) наблюдалось у проводимости лампы при напряжении питания 200 В.

Последний этап процесса проверки модели предусматривал построение графиков зависимостей разных

Сводка результатов подбора аппроксимирующей кривой

Коэффициенты	Аппроксимирующая кривая	Тип кривой	Значения коэффициентов
$A(W)$	$A(W) = a \cdot \exp(b \cdot W) + c \cdot \exp(d \cdot W)$	Экспонента	$a = 18,95; b = -0,3703;$ $c = -0,387 \cdot 10^{14}; d = -5,019$
$B(W)$	$B(W) = a_1 \exp\left[-\left(\frac{W - b_1}{c_1}\right)^2\right]$	Гаусса	$a_1 = 1460; b_1 = 7,55; c_1 = 9$
$C(W)$	$C(W) = a_2 \cdot \exp(b_2 \cdot W) + c_2 \cdot \exp(d_2 \cdot W)$	Экспонента	$a_2 = 4,7 \cdot 10^{12}; b_2 = -4,42;$ $c_2 = -2,6; d_2 = -0,167$
$D(W)$	$D(W) = p_1 W^3 + p_2 W^2 + p_3 W + p_4$	Кубический многочлен	$p_1 = -0,0078; p_2 = 0,3273;$ $p_3 = -3,536; p_4 = 13,01$

Таблица 4

Параметры системы лампа-ЭмПРА (измеренные и расчётные)

Параметр	Напряжение питания					
	200 В		240 В (нормированное)		260 В	
Напряжение на лампе, В (эффективное)	Измеренное	55,1	Измеренное	51,2	Измеренное	49,4
	Расчётное	52,67	Расчётное	51,01	Расчётное	50,4
Ток лампы, А (эффективный)	Измеренный	0,1243	Измеренный	0,172	Измеренный	0,206
	Расчётный	0,133	Расчётный	0,165	Расчётный	0,186
Напряжение на ЭмПРА (эффективное)	Измеренное	182	Измеренное	227	Измеренное	248
	Расчётное	179,3	Расчётное	221,42	Расчётное	242,1
Мощность системы, Вт	Измеренная	9,7	Измеренная	12,7	Измеренная	15,75
	Расчётная	9,41	Расчётная	12,44	Расчётная	14,25
Проводимость лампы, мСм	Измеренная	2,26	Измеренная	3,36	Измеренная	4,18
	Расчётная	2,53	Расчётная	3,23	Расчётная	3,76

электрических параметров системы лампа-ПРА от напряжения питания, для чего напряжение питания изменяли в интервале 200–260 В с шагом в 5 В при неизменной частоте 50 Гц. Полученные при этом результаты, представленные на рис. 13, говорят о том, что при увеличении напряжения питания падает напряжение на лампе, а ток лампы и напряжение на ПРА при этом растут. Средние значения мощности, потребляемой лампой и ПРА, с ростом напряжения питания также растут вследствие увеличения омических потерь и потерь в сердечнике ЭмПРА. Результаты расчётов близки к результатам измерений, особенно в обычном для КЛЛ диапазоне изменения напряжения питания (220–250 В). Для лучшей демонстрации точности модели на рис. 13, е приведены зависимости от напряжения питания расхожде-

ний между расчётными и измеренными значениями таких параметров системы лампа-ПРА, как напряжение на лампе, ток, напряжение на ПРА и средняя потребляемая мощность.

## 7. Заключение

Была предложена, реализована и проверена независимая от мощности модель разрядной лампы, применимая к КЛЛ малой мощности без встроенного ЭмПРА (т.е. с выносным ЭмПРА), работающим на низкой (50 Гц) частоте. Расчётные формы тока, напряжения и вольт-амперные характеристики хорошо согласуются с измеренными. Наиболее точное прогнозирование электрических параметров имеет место при напряжениях питания, близких к нормированному (240 В): отклонение от ре-

зультатов измерений в этом случае не превышает 5%.

К основным достоинствам предложенной модели можно отнести то, что, во-первых, она применима в широком диапазоне изменения мощности КЛЛ (7–18 Вт), что облегчает расчёт коэффициентов модели, во-вторых, она не требует от производителей ламп предоставления какой бы то ни было конфиденциальной информации и, в-третьих, её легко понять и применять, так как в неё не входят такие физические характеристики разряда, как подвижность ионов или распределение электронов по энергии. Однако подобные упрощения могут приводить к определённой неточности модели, особенно вблизи верхней (260 В) и нижней (200 В) границ диапазона изменения питающего напряжения.

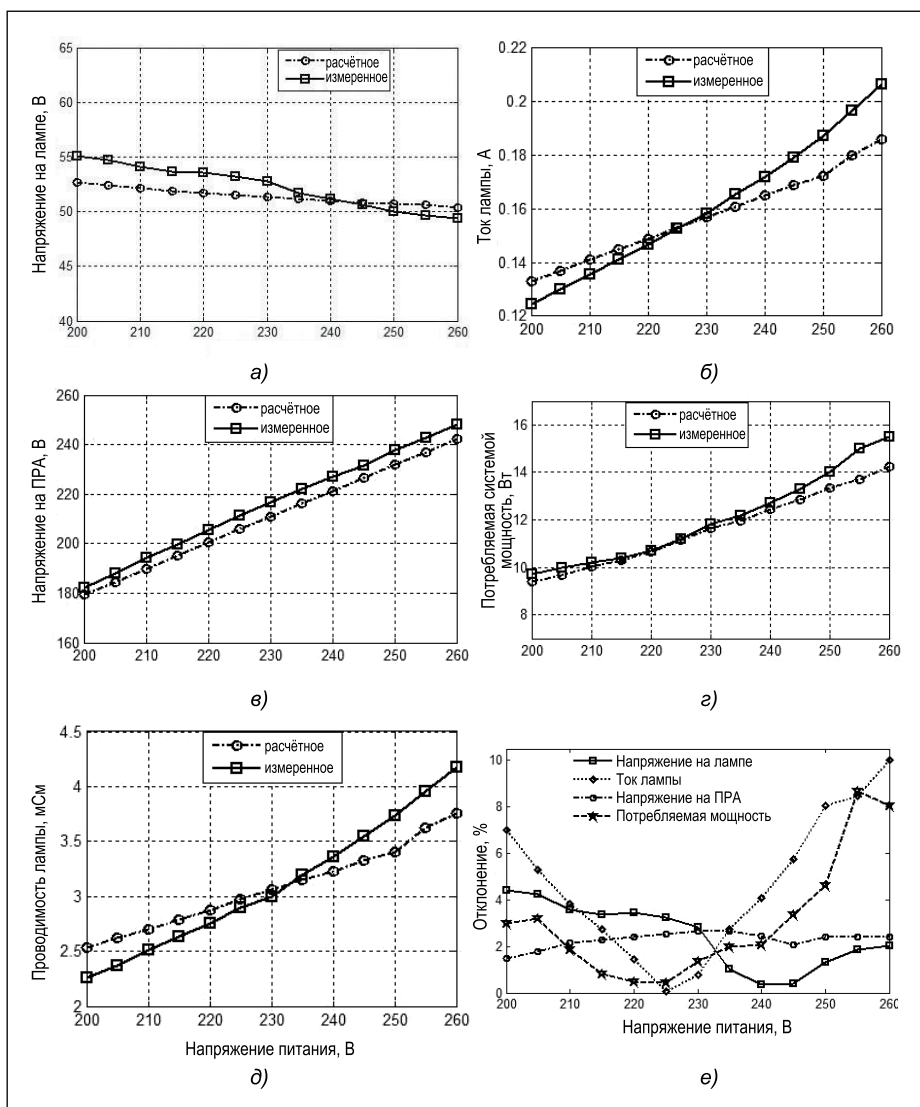


Рис. 13. Изменение электрических характеристик КЛЛ мощностью 9 Вт при изменении напряжения сети: а – напряжение на лампе (действующее), б – ток лампы (действующий), в – падение напряжения на ЭмПРА (действующее), г – средняя мощность, потребляемая системой лампа-ПРА, д – средняя проводимость лампы, е – отклонение расчётных значений параметров системы лампа-ЭмПРА от измеренных

Основным назначением разработанной модели является облегчение процесса конструирования ПРА, и хотя предложенная нами модель разработана для низких частот питания, аналогичную модель можно создать и для работы на высоких частотах. В настоящее время исследования в области качества энергии должны охватывать и системы лампа-ПРА, которые считаются основным источником появления гармоник. При этом может оказаться полезной и предложенная модель. Представленный здесь исключаящий зависимость от мощности подход к моделированию применим и к разрядным лампам ВД.

Экспериментальная часть этой работы выполнялась в светотехнической лаборатории Джадавпурского

университета, Колката, Индия. Приборы были получены в рамках индийских правительственных программ «TEQIP-I» и «-II».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Griffiths, A. 21<sup>st</sup> Century Lighting Design / 1<sup>st</sup> Ed. – Bloomsbury Publication, UK, 2014. – P. 160–200.
2. Blanco, C., Antón, J.C., Robles, A., et al. A discharge lamp model based on lamp dynamic conductance / IEEE Trans. Power Electron. – 2007. – Vol. 22, No. 3. – P. 727–734.
3. Yan, W., Hui, S.Y.R., Chung, H., Cao, X.H. Genetic algorithm optimized high-intensity-discharge lamp model// IEE Electronic Letters. – 2002. – Vol. 38, No. 3. – P. 110–112.
4. Laskowski, E.L., Donoghue, J.F. A Model of Mercury Arc Lamp's Terminal V-I behavior// IEEE Trans. on Industry Applications. – 1981. – Vol. IA-17, No. 4. – P. 419–426.

5. Yan, W., Hui, S.Y.R. A universal PSpice model for HID lamps// IEEE Trans. Ind. Appl. – 2005 – Vol. 41. – P. 1594–1602.

6. Yan, W., Hui, S.Y.R., Chung, H. Nonlinear high-intensity discharge lamp model including a dynamic electrode voltage drop// IEE Proc. Sci. Meas. Technol. – 2003. – Vol. 130, No. 4. – P. 161–167.

7. Lin, D., Yan, W., Hui, S.Y.R. Modelling the warm-up phase of the starting processes of high-intensity discharge lamps// IET Sci. Meas. Technol. – 2011. – Vol. 5, No. 6. – P. 199–205.

8. Lin, D., Yan, W., Hui, S.Y.R. Modeling of Dimmable Fluorescent Lamp Including the Tube Temperature Effects// IEEE Trans. on Ind. Electronics. – 2011. – Vol. 58, No. 9. – P. 4145–4152.

9. Yan, W., Tam, E., Hui, S.Y.R. A Semi-Theoretical Fluorescent Lamp Model for Time-Domain Transient and Steady-State Simulations// IEEE Trans. on Power Electronics. – 2007. – Vol. 22, No. 6. – P. 2106–2115.

10. Zissis, G., Damelincoart, J.J., Bezanahary, T. Modelling discharge lamps for electronic circuit designers: A review of the existing methods// IEEE Proceedings of the Industrial Application Society, 2001, P. 1260–1262.

11. Francis, V.J. Fundamentals of Discharge Tube Circuits. London: Methuen and Co. LTD, 1948. – P. 39–48.

12. Koprnický, J. Electric Conductivity Model Of Discharge Lamps – Self Report of PhD Thesis// Technical University of Liberec and University Paul Sabatier Toulouse, Laboratory of Plasma and Energy Conversion, 2007. – P. 21–22.

13. Antón, J. C., Blanco, C., Ferrero, F., Roldán, P., Zissis, G. An equivalent conductance model for high intensity discharge lamps / Proc. IEEE IAS Conf., 2002. – P. 1494–1498.

14. Antón, J. C., Blanco, C., Ferrero, F., Roldán, P., Zissis, G. Simulation of the dynamic behavior of HID lamps based on electrical conductance// in Proc. IEEE IECON, 2002. – P. 462–467.

15. Loo, K.H. et al. A Dynamic Collisional-Radiative Model of A Low-Pressure Mercury-Argon Discharge Lamp: A Physical Approach to Modeling Fluorescent Lamps for Circuit Simulations// IEEE Trans. on Power Electronics. – 2004. – Vol. 19, No. 4. – P. 1117–1129.

16. Loo, K.H. et al. A Dynamic Conductance Model of Fluorescent Lamp for Electronic Ballast Design Simulation// IEEE Trans. on Power Electronics. – 2005. – Vol. 20, No. 5. – P. 1178–1185.

17. Holloway, A.J. et al. A Physically Based Fluorescent Lamp Model for a SPICE or a Simulink Environment// IEEE Trans. on Power Electronics. – 2009. – Vol. 24, No. 9. – P. 2101–2110.

18. Blanco, C., Antón, J.C., Robles, A., et al. Comparison between Different Discharge Lamp Models Based on Lamp Dynamic Conductance// IEEE Trans. Industry Applications. – 2011. – Vol. 47, No. 4. – P. 1983–1991.



19. Coaton, J.R., Marsden, A.M. Lamps and Lighting, 3<sup>rd</sup> Edition, Wiley Publication, 1996. – P. 12, 57–69.

20. Spreadbury, F.G. Electric Discharge Lighting. Sir I. Pitman & Sons Ltd., 1946. – P. 57–98.

21. Gupta Bakshi, B., Roy, B. Simulink simulation and experimental verification of magnetic ballast driven Compact Fluorescent Lamps// Proc. IEEE CALCON, 2014.

22. MATLAB SimPowerSystems, a toolbox product of Mathworks dedicated to electrical circuit and system simulation: <http://in.mathworks.com/products/simpower/> (last accessed on 31.10.2015).

23. MATLAB Curve Fitting Toolbox by Mathworks: <http://in.mathworks.com/help/curvefit/cftool.html> (last retrieved on 01.10.2015).



**Бисвадип Гунта Бахши (Biswadeep Gupta Bakshi), М.Е.**

(2013 г.). Доцент Калькуттского производственно-управленческого института. Область научных ин-

тересов: математическое моделирование систем с разрядными лампами, светотехнические электронные приборы и качество энергии, потребляемой бытовыми осветительными установками



**Апараджита Дутта (Aparajita Dutta).**

Окончила в 2012 г. Индийский технический университет и в 2014 г. – аспирантуру Джадавпурского университета. Проектировщик

освещения в компании AWA Lighting Designers



**Бисванат Рой (Biswanath Roy), Ph.D. (1999 г.).**

Профессор электротехнического факультета Джадавпурского университета. Пожизненный действительный член

Индийского общества инженеров-светотехников, пожизненный член Общества инженеров (Индия) и член Светотехнического общества Северной Америки

## Письмо в редакцию

### По статье Нилова Е.Е. и Степанова В.Н.

«Дизайн освещения: трудности перевода и критерии оценки» // Светотехника. – 2016. – № 2. – С. 62–65

Авторы статьи считают, что осуществление заложенного в термине «светодизайн» («световой дизайн») смысла требует создания новой школы проектирования искусственного освещения, что, по их мнению, может привести к качественному улучшению искусственной световой среды, в которой мы живём.

В связи с этим хочу выдать несколько реплик и одно предложение.

- Согласно Советскому энциклопедическому словарю 1988 года издания, дизайн (от англ. *design* – замысел, проект, чертёж, рисунок) – термин, обозначающий различные виды проектировочной деятельности, имеющей целью формирование эстетических и функциональных качеств предметной среды. В узком смысле дизайн – художественное конструирование (вид художественной деятельности, проектирование промышленных изделий, обладающих эстетическими свойствами).

- В 1979 году вышел в свет «Международный светотехнический словарь», содержащий около 900 терминов и определений на 4 языках: трёх официальных языках МКО (французском, английском, немецком) и русском. Он явился результатом многолетней и фундаментальной работы крупных специалистов многих стран. Из советских светотехников в его подготовку внесли свой вклад 18 человек. При этом термин «световой дизайн» в нём отсутствует. Очевидно, его не будет и в очередном издании этого словаря – свода международно согласованной терминологии на базе рекомендуемых МКО единиц, величин, обозначений, формули-

ровок основных понятий. Словарь предназначен как пособие в работе и способствует употреблению единой терминологии при проектировании освещения. Термин же «светодизайн» появился относительно недавно и в разряд основных понятий ещё не вошёл.

- Вместе с тем мы сегодня встречаем много удачных примеров светодизайна (в громадных универсалах, высокочеловеческих гостиницах, на международных выставках и так далее).

- В Санкт-Петербурге 8–9 октября прошлого года прошла Международная конференция «Световой дизайн – 2015», организованная Высшей школой светового дизайна Университета ИТМО и Творческим объединением светодизайнеров *RULD*. На ней были рассмотрены многочисленные вопросы создания и восприятия произведений светового дизайна. В эти же дни в Александровском парке города проводился Фестиваль световой культуры «LumiFest». (Об этих мероприятиях прекрасно рассказано в статье Н.В. Быстрынецовой в журнале «Светотехника» № 6 за 2015 год.)

С учётом вышесказанного считаю целесообразным предложить авторам статьи «Дизайн освещения: трудности перевода и критерии оценки» отказаться от идеи создания новой школы проектирования художественного искусственного освещения, ибо она есть и прекрасно себя проявляет в произведениях светового дизайна. И можно лишь пожелать ей дальнейшего многогранного развития.

*Е.А. Лесман, инженер, корреспондент журнала «Светотехника», Санкт-Петербург*