

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ЛАМПЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Инж. А. Е. НОВИК и канд. техн. наук В. П. САСОРОВ
Московский электроламповый завод

Существующий в настоящее время ассортимент отечественных люминесцентных ламп и соответствующей пускорегулирующей аппаратуры предназначен исключительно для работы в сетях переменного тока¹. В результате этого ряд областей народного хозяйства, в которых преимущественно используется постоянный ток (железнодорожный и городской транспорт, флот, горнорудная промышленность) лишен возможности использовать люминесцентные лампы.

При питании постоянным током люминесцентные лампы имеют несколько большую световую отдачу, чем при работе на переменном токе, такой же срок службы при полном отсутствии стробоскопического эффекта и резком снижении уровня излучаемых радиопомех. Эти преимущества в значительной степени компенсируют основной недостаток люминесцентных ламп постоянного тока — потерю активной мощности в балластном сопротивлении, приблизительно равную мощности самой лампы. Даже при этих условиях световая отдача комплекта лампа — балласт достигает значений 25—30 лм/вт, что значительно выше световой отдачи ламп накаливания, используемых на транспорте (порядка 7—10 лм/вт).

Однако эксплуатация ламп на постоянном токе осложняется специфическими трудностями, обусловленными некоторыми физическими особенностями разряда в смеси инертного газа сарами металла. Основной особенностью является наличие в лампах катафореза, т. е. перегонки ртути под действием разряда к катоду лампы. В результате катафореза через некоторое время после зажигания разряда, измеряемое в обычных условиях несколькими часами, вся ртуть собирается у катода. Это приводит к потемнению анодного конца лампы, так как ртуть играет решающую роль в формировании излучения.

Конкретное проявление катафореза зависит от конструктивных параметров лампы (длины и диаметра колбы, рода и давления наполняющего газа, плотности разрядного тока) и внешних условий — температуры окружающей среды и скорости ветра при использовании ламп в установках наружного освещения. У ламп мощностью 15 вт, работающих

в течение 24 ч при номинальном токе 0,3 а и температуре воздуха 22°С световой поток в результате катафореза снижается в среднем до половины начального.

При переключении полярности лампы процесс идет в обратном направлении, причем восстановление светового потока до начального происходит, как правило, в течение нескольких минут.

Для выяснения сущности процесса предположим, что температура колбы во всех точках одинакова и поддерживается постоянной. Это предположение близко к действительности, так как только в электродных областях имеется заметный температурный градиент. Температура колбы определяет плотность паров ртути, причем жидкую ртуть равномерно распределена по длине трубки. При зажигании разряда поток ионов ртути начнет двигаться к катоду, снижая плотность рутного пара у анода. Электронный ток, направленный к аноду, не может существенно затормозить встречный поток ионов, так как ионы и электроны в основном соударяются лишь с атомами инертного газа, плотность которого на 2—3 порядка выше плотности паров ртути. Следовательно, плотность рутных паров у катода станет выше плотности насыщенного пара и ниже последней у анода. Это вызовет конденсацию жидкой ртути в катодных частях колбы и испарение ее у анода.

Таким образом, ртуть будет постепенно перегоняться к катоду. Перегонка будет происходить до тех пор, пока не исчерпаются запасы жидкой ртути у анода. В процессе перегонки плотность рутных паров будет практически постоянной по длине и мало отличаться от плотности насыщенных паров, следовательно, в течение перегонки световой поток лампы почти не изменится по сравнению с начальным.

Как только запасы жидкой ртути у анода окажутся исчерпанными, плотность паров у анода начнет резко падать. При этом возникнет значительный градиент плотности по длине, который вызовет диффузионный поток нейтральных атомов в обратном направлении. Спустя некоторое время после окончания перегонки ртути, между диффузией нейтральных атомов и ионным током установится динамическое равновесие. Как показывает ориентировочный расчет, это время измеряется десятками секунд.

¹ За границей ассортимент люминесцентных ламп, работающих на постоянном токе, представлен в основном тремя близкими по мощности (14, 15 и 20 вт) лампами типа „TL“С фирмы Филипс [Л. 1].

Для равновесного состояния Дрюйвестейнса еще в 1935 г. была выведена формула для концентрации атомов металла N_a в функции расстояния от катода x [Л. 2]:

$$N_a = N_0 - 8,3 \cdot 10^{10} \frac{\mu_+ V_0 i}{\lambda D R^2} x, \quad (1)$$

где N_0 — концентрация атомов у катода, заданная температурой самой холодной точки за катодом, $1/cm^3$;

μ_+ — подвижность ионов металла в инертном газе, $cm^2/сек \cdot в$;

x — расстояние по оси от катодной границы положительного столба, $см$;

D — коэффициент взаимной диффузии атомов металла и атомов инертного газа, $cm^2/сек$;

λ — средняя длина свободного пробега электронов, $см$;

R — радиус разрядной трубки, $см$;

V_0 — средняя энергия электронов, $в$;

i — разрядный ток, $а$.

Формула (1) была выведена для положительного столба разряда при следующих упрощающих предположениях: концентрация атомов металла по радиусу постоянна; концентрации ионов и электронов равны; ионы и электроны соударяются только с атомами инертного газа.

Формула (1) позволяет вычислить градиент концентрации ртутных паров, что дает возможность сделать качественные выводы о степени проявления катафореза в лампах различной конструкции. Очевидно, что в узких и длинных трубках катафорез будет выражен особенно сильно. Род наполняющего газа практически не влияет на катафорез. Это связано с тем, что длины свободного пробега электронов в инертных газах в условиях люминесцентной лампы (электронная температура порядка $10\ 000—12\ 000^\circ К$) мало отличаются друг от друга², а коэффициент диффузии атомов ртути и подвижность ионов ртути меняются почти одинаково при изменении молекулярного веса наполняющего газа.

С уменьшением давления газа диффузионный поток возрастает, а ионный ток остается почти неизменным, что ведет к снижению градиента концентрации ртутных паров. Однако при этом резко сокращается срок службы ламп и поэтому снижение давления наполняющего газа не может быть рекомендовано как метод борьбы с катафорезом. Потемнение анодного конца лампы связано не с относи-

тельной разницей в плотностях паров ртути у анода и катода, а является следствием резкого падения экономичности ртутного разряда, определяемой абсолютным давлением паров ртути.

Поэтому температура окружающей среды существенно влияет на катафорез, так как она определяет давление насыщенных паров ртути. С ростом температуры концентрация атомов ртути (N_0) резко растет. Так, при $20^\circ C$ $N_0 = 4 \cdot 10^{13}$ атомов/ $см^3$, а при $50^\circ C$ $N_0 = 3,8 \cdot 10^{14}$ атомов/ $см^3$. Градиент давления паров ртути по длине практически не изменится, но вследствие большей концентрации ртути у катода заметное обеднение анодной части ртутью будет происходить лишь при очень больших длинах колбы. При понижении температуры давление ртутных паров резко уменьшается и катафорез становится заметным даже в коротких трубках.

Проведенные нами расчеты по формуле (1) показывают, что в обычных условиях (температура окружающего воздуха $20^\circ C$) катафорез будет приводить к заметному снижению светового потока во всех типах люминесцентных ламп, выпускаемых в СССР, за исключением ламп мощностью 10 и 20 вт, у которых отношение длины к площади поперечного сечения наименьшее. Этот вывод подтверждается на практике. Из тех же расчетов следует, что при снижении температуры окружающего воздуха заметный катафорез будет иметь место у всех ламп, включая лампы мощностью 10 и 20 вт, а при повышении температуры до $+45 \div 50^\circ C$ катафорез вообще не должен сказываться на световых и электрических характеристиках всех типов ламп. Однако последнее предположение необходимо проверить экспериментально.

Следует также отметить, что катафорез влияет не только на световой поток ламп, но и на их электрический режим. При наполнении аргоном падение напряжения на лампах снижается в результате катафореза приблизительно на 8—15%, а при наполнении неоном — увеличивается на 20—25%. Это происходит в результате того, что градиент потенциала E в чистом инертном газе отличается от градиента потенциала в смеси газ — пары ртути, причем в чистом аргоне E ниже, чем в смеси аргон — ртуть, а в неоне — выше.

Время, отсчитываемое от момента включения лампы до момента потемнения ее анодного конца (которое мы условно назовем временем катафореза), фактически определяется временем перегонки жидкой ртути от анода к катоду. В первом приближении время катафореза обратно пропорционально плотности тока.

² Имеются в виду неон, аргон и криpton. Остальные газы не пригодны для использования в люминесцентных лампах.

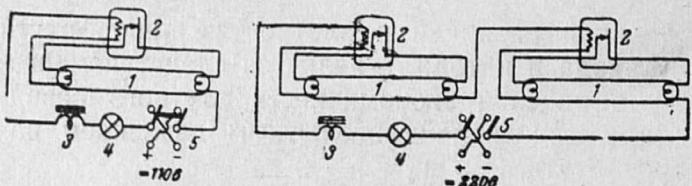


Рис. 1. Одноламповая и двухламповая схемы включения люминесцентных ламп на постоянном токе.
1 — люминесцентная лампа; 2 — тепловой стартер; 3 — дроссель;
4 — балластная лампа накаливания; 5 — переключатель полярности.

Расчет показывает, что при определенном количестве ртути в лампах (20 мг) время катафореза составляет десятки часов для коротких ламп с трубками большого диаметра и несколько часов — для длинных и узких ламп³.

Результаты экспериментов качественно согласуются с данными расчетов. Количественного соответствия нельзя ожидать, так как доизировка ртути в лампах колеблется в широких пределах и, кроме того, нам неизвестно, какой процент ионов от общего числа принадлежит ртути.

Следует подчеркнуть, что из-за широкого изменения условий, в которых работают люминесцентные лампы (колебания температуры, напряжения сети и т. п.), катафорез во всех типах ламп постоянного тока может иметь место и пока нет методов борьбы с ним путем изменения конструкции ламп. Поэтому в процессе эксплуатации необходимо периодически менять полярность включения ламп, что проще всего можно осуществить применением комбинированного переключателя полярности и выключателя сети. Цикл переключения зависит от наблюдаемого времени катафореза, но обычно выбирается порядка 12 или 24 ч (т. е. одно или два переключения в сутки).

Другой особенностью работы люминесцентных ламп на постоянном токе является ухудшение зажигания. При плавном повышении напряжения на холодных электродах лампы мощностью 15 вт газовый промежуток пробивается лишь при 1000 в постоянного тока, в то время как на переменном токе достаточно напряжения 400 в . По-видимому, механизм зажигания ламп на постоянном и переменном токе различен. Отметим также, что на постоянном токе не удается наблюдать одноэлектродный разряд, играющий основную роль в зажигании лампы на переменном токе [Л. 3]. Существующие стартеры тлеющего разряда неудовлетворительно работают на постоянном токе при напряжении ниже 200 в .

Надежное зажигание лампы на постоянном токе даже при напряжении 90 в достигается

³ При расчете принималось, что все ионы в люминесцентной лампе принадлежат ртути.

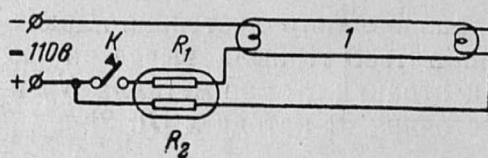


Рис. 2. Схема включения люминесцентной лампы типа „TL“ С фирмы Филипс.

при помощи теплового стартера, конструкция которого уже описывалась на страницах журнала [Л. 4 и 5]. Промышленный образец теплового стартера для зажигания ламп мощностью 10 и 15 вт был разработан инж. Г. И. Горбулевым.

Для создания импульса напряжения на лампе в момент размыкания контактов стартера необходимо наличие в цепи дросселя (индуктивности). Интересно отметить, что взаимное расположение элементов схемы в цепи (дроссель, балластное сопротивление, подогреватель стартера) существенно влияет на зажигание (рис. 1).

Наилучшим условиям для зажигания соответствует случай, когда дроссель находится в катодной цепи лампы и подключен одним из концов непосредственно к катоду лампы. Этот вывод хорошо согласуется с данными статьи Уайта и Уилчера, в соответствии с которыми для зажигания лампы мощностью 15 вт требуется отрицательный импульс порядка 280 в и положительный импульс порядка 400 в [Л. 6]. Аналогичное замечание имеется в работе В. М. Скобелева и Л. Н. Туницкого [Л. 7], в которой определено, что при отрицательном потенциале поджигающего электрода (а поджигающим электродом является электрод, непосредственно соединенный с дросселем) требуется меньший импульс для зажигания, чем при положительном потенциале.

За границей в настоящее время используется схема включения ламп, изображенная на рис. 2. В этой схеме удовлетворительно зажигаются только короткие лампы с трубками большого диаметра (длиной менее 50 см). Уже для зажигания лампы мощностью 20 вт длиной 60 см требуется внутренняя проводящая полоса, соединенная с катодом. Для зажигания лампы необходимо нажать и отпустить кнопку K . В других модификациях схем эта функция осуществляется магнитным реле при стабилизированном напряжении питания. Невозможность переключения полярности в данной схеме несущественна, так как в широких и коротких трубках, как уже указывалось, катафорез не играет большой роли. Сопротивления R_1 и R_2 выполнены в виде вольфрамовых спиралей, заключенных в одну колбу.

Напряжение сети постоянного тока, особенно на транспорте, подвержено большим колебаниям. В частности, при полной нагрузке напряжение может упасть до 75—80% номинального или увеличиться на 10—20% при зарядке аккумуляторов. Так как вольт-амперная характеристика люминесцентных ламп очень полога (при изменении тока вдвое напряжение меняется всего на 10%), то изменение сетевого напряжения практически воспринимается только балластным сопротивлением. Это вызывает резкие колебания тока люминесцентных ламп в том случае, если балласт выполнен в виде омического сопротивления. Последнее наглядно иллюстрируется рис. 3, а, где

показано изменение электрических и световых характеристик люминесцентной лампы мощностью 15 вт при колебаниях напряжения сети. При снижении напряжения на 15% ток лампы уменьшается на 40%, а световой поток — на 30%. При повышении напряжения на 15% ток увеличивается на 35%. Такие колебания тока вредны не только для лампы, но и для других элементов схемы (стартеров, дросселей, балластов).

С другой стороны, при пусковом режиме, когда ток идет через балласт и стартер, почти все сетевое напряжение оказывается приложенным к балласту и пусковой ток почти вдвое превышает рабочий ток лампы. При стартерном зажигании пусковой ток люминесцентных ламп обычно не превосходит рабочий ток более чем в полтора раза. Поэтому при применении омического балласта приходится в пусковую цепь лампы (последовательно с контактами стартера) включать дополнительное сопротивление.

Значительно лучше обстоит дело при использовании в качестве балласта нелинейного элемента, у которого величина сопротивления возрастает с увеличением тока. Таким сопротивлением является, в частности, вольфрамовая спираль лампы накаливания, сопротивление которой сильно увеличивается с ростом тока благодаря большому температурному коэффициенту сопротивления вольфрама. При этом пусковой ток ограничивается до требуемых величин, а пределы изменения тока при колебаниях сетевого напряжения сокращаются. Это видно из рассмотрения рис. 4, б. Таким образом, лампа накаливания в значительной мере работает как стабилизатор тока. Применение для этой цели выпускаемых промышлен-

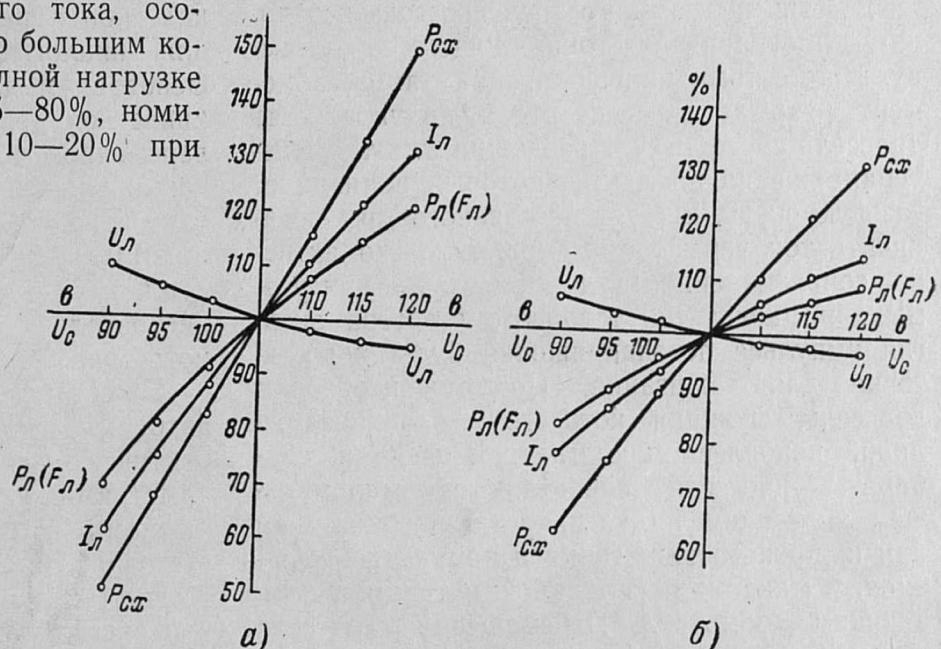


Рис. 3. Зависимость параметров люминесцентной лампы мощностью 15 вт от напряжения сети.
а — при омическом балласте; б — при балласте в виде лампы накаливания.
 U_L — напряжение на лампе; I_L — ток лампы; $P_L(F_L)$ — мощность лампы (световой поток); P_{CX} — общая мощность, потребляемая схемой.

ностью стабилизаторов тока (барретеров) не всегда может быть рекомендовано ввиду их большей инерционности и недостаточной механической прочности тела накала.

Возникает еще один вопрос при применении лампы накаливания: следует ли ее использовать как дополнительный источник света? Это зависит от конкретных условий эксплуатации и назначения данной осветительной установки. Если желательно иметь экономичную осветительную установку в условиях отсутствия тряски, ударов, вибрации и т. п., то спираль балластной лампы рассчитывается таким образом, чтобы в рабочем режиме температура ее была достаточно высока (порядка 2 000° К и выше). В пусковом режиме лампа будет сильно перегружаться, но ввиду его кратковременности это не скажется существенно на сроке службы лампы, который тем не менее будет значительно ниже, чем у люминесцентных ламп. Наоборот, на транспорте сильные механические воздействия заставляют снизить температуру спирали до 1 000—1 200° К. При этом световая отдача лампы снижается до 2—3 лм/вт, но срок службы в рабочем режиме будет исчисляться годами. Расположение тела накала диктуется также соображениями механической прочности. Промышленные образцы софитных балластных ламп были разработаны В. М. Сорокоумовым и В. Ф. Соустиным.

В сетях переменного тока дроссель необходим для ограничения тока, идущего через лампу. Кроме того, при зажигании лампы в момент разрыва цепи стартера индуктивность дросселя способствует созданию импульса перенапряжения на лампе, который ионизирует газовую среду. В сетях постоянного тока ограничить ток через лампу может только активное сопротивление. Но в этом случае при размыкании контактов теплового стартера энергия импульса перенапряжения будет недостаточна для зажигания. Поэтому необходим дроссель, функции которого ограничиваются лишь накоплением магнитной энергии. Габариты дросселя определяются минимальным значением индуктивности, необходимым для надежного зажигания в наихудших условиях, и максимальным рабочим током, нагревающим обмотку. Перемещение дросселя в пусковую цепь стартера позволило бы существенно уменьшить диаметр обмотки. Однако полярности импульсов стартера и дросселя обратны друг другу и при таком включении суммарный импульс на лампе оказывается равным нулю.

Промышленный образец дросселя для ламп мощностью 10 и 15 вт разработан сотрудниками светотехнической лаборатории завода А. Л. Вассерманом и Н. А. Рошиной. Его габариты без элементов крепления $50 \times 40 \times 30$ мм, вес около 200 г.

Основным конструктивным отличием люминесцентной лампы постоянного тока является наличие анода. Так как лампа должна быть рассчитана на переключение полярности, в ней применены аноды на каждом из концов. Материал и конструкция анода, как показали исследования Н. А. Неретиной, сильно влияют на величину и знак анодного падения [Л. 8]. Для ламп желательно иметь отрицательное анодное падение, так как в этом случае падение напряжения на лампе будет минимальным и мощность у анода не будет бесполезно затрачиваться. По сообщенной нам оценке А. В. Недоспасова и А. А. Зайцева в обычных люминесцентных лампах типа 15 вт анодное падение составляет около +5 в. Примененная нами конструкция анода в виде никелевых пластин размером 3×10 мм², расположенных вертикально и параллельно оси спирали, позволила снизить анодное падение до +1 ÷ +2 в для ламп мощностью 10 и 15 вт. Дальнейшее снижение анодного падения ограничивается технологическими соображениями.

Катод лампы на постоянном токе для ламп мощностью 10 и 15 вт не претерпел ка-

ких-либо изменений по сравнению с катодом для аналогичных ламп переменного тока. Основанием для этого послужили измерения яркостной температуры катодного пятна на переменном и постоянном токе. При одинаковых значениях тока эта температура практически одна и та же и колеблется в пределах 1 000—1 100° К в зависимости от индивидуальных свойств катода. Газовое наполнение осталось тем же, что и у ламп переменного тока.

В соответствии с техническим заданием авторами статьи были разработаны люминесцентные лампы мощностью 10 и 15 вт с параметрами, указанными в таблице. С этими лампами в одноламповой схеме включения световая отдача схемы в целом составляет соответственно 12 и 25 лм/вт. Низкая световая отдача ламп мощностью 10 вт обусловлена их малой длиной. Длина положительного столба, который является основным излучателем, в этих лампах составляет около половины всей ее длины. Для расширения ассортимента люминесцентных ламп постоянного тока необходимо разработать более мощные лампы (20, 30, 40 и 80 вт), что откроет широкие перспективы использования новых источников света на транспорте.

Параметры люминесцентных ламп постоянного тока
мощностью 10 и 15 вт

Тип лампы	Длина с цоколями без патрубков, мм	Диаметр, мм	Номинальный ток, а	Номинальное напряжение, в	Расчетная мощность, вт	Начальный световой поток, лм	Срок службы*, ч
ЛБП10	257 ₋₃	25	0,28	37	10	250	2 000
ЛБП15	436 ₋₃	25	0,28	56	15	560	2 000

* Данные предварительные.

Литература

1. P. Dam and D. Kolkmann. «Phil. tech. Rev.», 1957, № 1.
2. M. Druyvesteyn. «Physica», 1935, т. II, № 2.
3. Л. Н. Тунецкий и А. И. Игнашков. «Светотехника», 1955, № 2.
4. В. И. Сасоров. «Светотехника», 1957, № 7.
5. Я. Б. Зильберблат и В. Г. Корягин. «Светотехника», 1957, № 9.
6. D. T. Waigh, L. C. Wiltshire. «Trans. of the III. Eng. Soc.», 1957, № 5.
7. В. М. Скобелев, Л. Н. Тунецкий. «Светотехника», 1955, № 4.
8. Н. А. Неретина. Диссертация. ВЭИ, 1949.