

**ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМП НА ИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
И СВЕТОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ПРИ ПОСТЕПЕННОМ ИЗМЕНЕНИИ
ЧАСТОТЫ НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАНИЯ**

Докт. техн. наук ТАРАСЕНКО Н., асп. КОЗАК К.

Тернопольский национальный технический университет имени И. Пулюя, Украина

Постановка проблемы в общем виде. Известно, что совершенствование источников света обусловлено поиском путей снижения годовых затрат на электроэнергию. Именно поэтому в настоящее время наиболее распространенными источниками света стали люминесцентные лампы (ЛЛ). На смену обычным мощностью 20, 40, 65 Вт в колбе диаметром (Т12) 38 мм пришли более эффективные ЛЛ в колбах меньшего диаметра: (Т8) 26 мм, (Т5) 16 мм и (Т2) 7 мм.

Анализ последних исследований и публикаций [1–3] показал, что в процессе реализации мероприятий по энергосбережению ЛЛ занимают лидирующие позиции. Их усовершенствование происходит на основе подбора вариантов газового наполнения, создания многослойных редкоземельных люминофоров и уменьшения диаметра колб ЛЛ от 38 до 7 мм. Это привело к изменению их электрических и светотехнических характеристик. Несмотря на это, публикации, связанные с проведением комплексных сравнительных исследований поведения электрических и светотехнических характеристик обычных Т12, энергоэффективных Т8, тонких Т5 и супертонких Т2 ЛЛ при постепенном непрерывном изменении частоты напряжения питания от 50 Гц до 150 кГц, представлены недостаточно полно.

Именно поэтому целью данной статьи стало проведение исследований для определения поведения электрических и светотехнических характеристик ЛЛ в колбах Т12, Т8, Т5, Т2 разной длины, включая и специально изготовленные в колбе с внутренним диаметром 38 мм суперкороткие (СКЛ), с междуэлектродными расстояниями $l_{\text{ел}} = 4\text{--}11$ см лампы, при постепенном непрерывном изменении частоты напряжения питания от 50 Гц до 150 кГц.

Результаты исследований. Для определения изменения характеристик ЛЛ при постепенном непрерывном изменении частоты напряжения питания был использован ламповый усилитель мощности, который позволял осуществлять питание ламп в диапазоне частот от 50 Гц до 150 кГц от внешнего источника переменного напряжения (ГЗ-109). Токоограничивающим сопротивлением для ЛЛ выступало внутреннее сопротивление усилителя мощности, величину которого можно было регулировать в широких пределах. Для обеспечения воспроизводимости опытов количество ЛЛ, согласно статистическому G-критерию Кохрена, принимали равным шести.

На описанной установке были проведены следующие экспериментальные исследования: 1 – определены зависимости действующих значений

напряжений на ЛЛ ($U_{\text{л}}$) в колбах разного диаметра и длины от частоты синусоидального напряжения, которое прикладывалось к лампам, при: а) поддержании тока на номинальном уровне $I_{\text{л}} = I_{\text{лн}} = \text{const}$; б) изменении тока от $0,7I_{\text{лн}}$ до $1,3I_{\text{лн}}$ (где $I_{\text{лн}}$ – номинальный ток лампы); 2 – определено влияние длины и диаметра колб ЛЛ на прирост световой отдачи на высоких частотах.

По результатам измерений были построены зависимости нормированных значений напряжения на лампе $U_{\text{л.зв}} = U_{\text{л}} / U_{\text{лн}}$ от частоты напряжения питания f для ЛЛ: а) с одинаковым диаметром, но разной длины (рис. 1); б) почти одинаковой длины, но разного диаметра (рис. 2). Анализ рис. 1, 2 показал, что с ростом частоты напряжение на ЛЛ сначала падает медленно, а затем быстрее, достигая минимума на граничной частоте f_0 . После этого напряжение вновь начинает возрастать.

Полученные зависимости качественно, а не количественно, аналогичны тем, что опубликованы в [4, 5]. Авторы данной статьи предлагают следующее объяснение этим процессам, исходя из того, что напряжение на лампе $U_{\text{л}}$ определяется суммой четырех слагаемых, а именно

$$U_{\text{л}} = U_{\text{сп}} + U_{\text{к}} + U_{\text{а}} + U_{\text{р}}, \quad (1)$$

где $U_{\text{сп}}, U_{\text{к}}, U_{\text{а}}, U_{\text{р}}$ – падение напряжения на отработанных витках биспиралей катодов, катодное, анодное и на положительном столбе разряда ЛЛ – падение потенциала соответственно, В.

Падение напряжения на отработанных витках спиралей $U_{\text{сп}}$ не остается постоянным. Оно постепенно возрастает (на 400–450 % от исходного значения) по мере продвижения катодного пятна (КП) от сетевых до стартерных концов электродов. Это приводит к росту активных потерь мощности на электродах ЛЛ (на 23–8 % от мощности лампы), обуславливая уменьшение световой отдачи на 20–8 % соответственно.

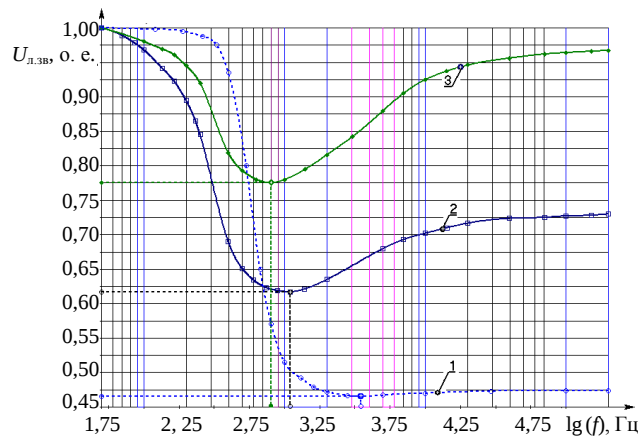


Рис. 1. Зависимость нормированного напряжения на ЛЛ с одинаковым внутренним диаметром колбы ($d_{\text{тр}} = 38$ мм), но разными междуэлектродными расстояниями ($l_{\text{эл}}$) (напряжениями): 1 – СКЛ, $l_{\text{эл}} = 11,0$ см, $P = 8$ Вт; 2 – ЛБ 20, $l_{\text{эл}} = 50,5$ см, $P = 20$ Вт; 3 – ЛБ 40, $l_{\text{эл}} = 112,5$ см, $P = 40$ Вт

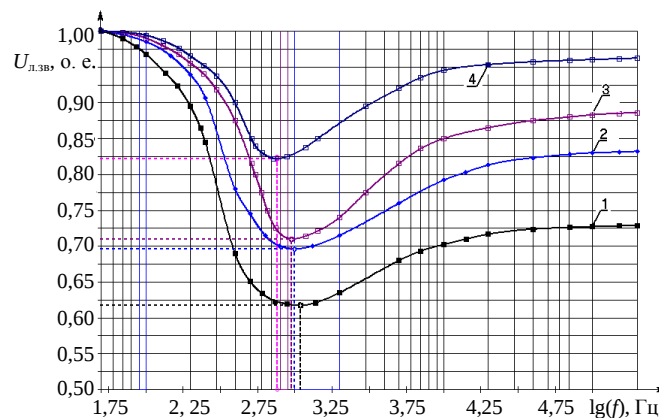


Рис. 2. Зависимость нормированного напряжения на ЛЛ с соизмеримыми значениями междуэлектродных расстояний ($l_{\text{эл}}$), но разными диаметрами колб: 1 – ЛБ 20, $l_{\text{эл}} = 50,5$ см, $P = 20$ Вт, $d_{\text{тр}} = 38$ мм; 2 – ТЛД 18, $l_{\text{эл}} = 51$ см, $P = 18$ Вт, $d_{\text{тр}} = 26$ мм; 3 – ТЛД 14, $l_{\text{эл}} = 48$ см, $P = 14$ Вт, $d_{\text{тр}} = 16$ мм; 4 – ТЛД 13, $l_{\text{эл}} = 46$ см, $P = 13$ Вт, $d_{\text{тр}} = 7$ мм

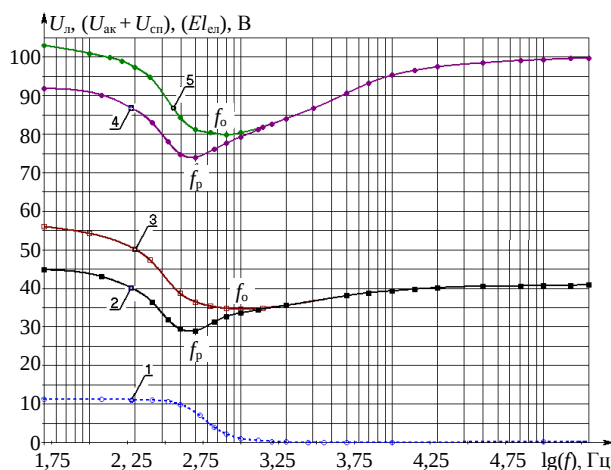


Рис. 3. Зависимости: 1 – суммы анодно-катодного падения потенциала и падения потенциала на отработанных витках спиралей ($U_{\text{ак}} + U_{\text{сп}}$) на СКЛ с $l_{\text{эл}} = 4$ см; 2, 4 – падение потенциала на положительном столбе разряда ($El_{\text{эл}}$) с минимумом на результирующей частоте f_p ; 3, 5 – напряжений на ЛЛ ($U_{\text{л}}$) ЛБ 20 и ЛБ 40 с минимумом на граничной частоте f_o от частоты напряжения питания соответственно

Катодное падение потенциала $U_{\text{к}}$ также не остается постоянным. Согласно [6], при увеличении частоты уменьшается не только анодное падение потенциала $U_{\text{а}}$, как об этом утверждается в [4], но и катодное. При этом их значения почти одинаковы и в сумме составляют, как показали исследования авторов данной статьи, около 10 В.

Предположив, что зависимость суммы анодно-катодного падения потенциала и напряжения на отработанных витках спиралей от частоты напряжения питания $(U_{\text{ак}} + U_{\text{сп}}) = \psi(\lg f)$ для ЛЛ в колбе с внутренним диаметром 38 мм является неизменной и такой, как это изображено на рис. 3 (кривая 1 для СКЛ), можно из (1) определить закон изменения напряжения, падающего на положительном столбе разряда, по выражению

$$U_{\text{р}} = El_{\text{эл}} = U_{\text{л}} - (U_{\text{ак}} + U_{\text{сп}}). \quad (2)$$

На рис. 3 в реальном масштабе построены зависимости $U_{\text{л}} = \gamma(\lg f)$ для ЛЛ мощностью 20 и 40 Вт, а также зависимость $(U_{\text{ак}} + U_{\text{сп}}) = \psi(\lg f)$. Для каждой из ЛЛ, согласно выражению (2), построены зависимости $U_{\text{р}} = El_{\text{эл}} = \chi(\lg f)$. Как видно из рис. 3, закон изменения напряжения (градиента потенциала E) для обеих ЛЛ одинаков и в некоторой степени совпадает с аналогичными зависимостями, описанными в [4, 5]. С ростом частоты напряжения питания, когда проводимость плазмы положительного столба разряда возрастает, падение потенциала на положительном столбе разряда ($El_{\text{эл}}$) сначала уменьшается медленно, а потом все быстрее, пока не станет минимальным на результирующей частоте $f_{\text{р}}$. Таким образом, именно благодаря тому, что $(U_{\text{ак}} + U_{\text{сп}})$ и градиент потенциала изменяются по разным законам, на зависимости $U_{\text{л}} = \gamma(\lg f)$ образуется минимум на граничной частоте $f_{\text{о}}$, который для каждой мощности ЛЛ имеет свое уникальное значение. Так, для СКЛ с $l_{\text{эл}} = 11$ см это происходит при $f_{\text{о}} = 3500$ Гц (рис. 1, кривая 1). Это не совпадает с утверждением, высказанным в [4] о том, что минимум напряжения на лампе определяется исключительно снижением прианодного падения потенциала и наблюдается на частотах, при которых продолжительность полупериода изменения напряжения на аноде становится меньше характерного времени амбиполярной диффузии τ_D

$$\tau_D = (D_a / \Lambda^2)^{-1}, \quad (3)$$

где $D_a = kT_e \mu_i / e$ – коэффициент амбиполярной диффузии, м²/с; T_e , k , μ_i , e – электронная температура плазмы, К, постоянная Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$), Дж/К, подвижность ионов, м²/(В·с) и заряд электрона, Кл, соответственно; R , $\Lambda = R/2,405$ – радиус и диффузионный размер колбы ЛЛ, м.

Если бы это было так, то исходя из условия о том, что $T/2 = 1/(2f_{\text{о}}) = \tau_D$, граничную частоту, исходя из (3), можно было бы определять по формуле

$$f_{\text{о}} = 1/(2\tau_D) = kT_e \mu_i \cdot 5,78 / (2\tau_D R^2). \quad (4)$$

При известных для низкотемпературной плазмы разряда низкого давления $T_e = 10^4$ К и $\mu_i = 0,33$ м²/(В·с) для основных диаметров разрядных трубок ЛЛ ее значение согласно (4) равно: а) для $R = 8$ мм – $f_{\text{о}} \approx 1300$ Гц; б) для $R = 13,5$ мм – $f_{\text{о}} \approx 450$ Гц; в) для $R = 19$ мм – $f_{\text{о}} \approx 230$ Гц; г) для $R = 26$ мм – $f_{\text{о}} \approx 115$ Гц, что плохо согласуется с полученными авторами статьи экспериментальными данными (рис. 1–3).

Анализ экспериментальных зависимостей $U_{\text{л.зв}} = \phi(\lg f)$ (рис. 1–3) показал, что граничная частота зависит не только от диаметра разрядной трубки, который определяет скорость амбиполярной диффузии и градиент потенциала плазмы разряда, но и от междуэлектродного расстояния ($l_{\text{эл}}$) и тока лампы ($I_{\text{л}}$). То есть $f_{\text{о}} = \psi(d_{\text{тр}}(E), l_{\text{эл}}, I_{\text{л}})$.

С увеличением расстояния между электродами (мощности ЛЛ), при неизменном диаметре колбы, уменьшается не только значение гранич-

ной частоты, но и величина относительного падения напряжения на ЛЛ (рис. 1). Большее относительное уменьшение напряжения на лампе на граничной частоте у коротких ЛЛ (до $\Delta U_{л.з} = 1 - 0,62 = 0,38$, кривая 2 на рис. 1) объясняется большим удельным весом анодно-катодного падения потенциала в структуре напряжения на лампе. Так, для ЛЛ мощностью 13 Вт с $U_{л} = 95$ В и $U_{ак} = 10$ В удельный вес анодно-катодного падения составляет $\approx 10\%$, в то время как для ЛЛ мощностью 4 Вт с $U_{л} = 29$ В – это $\approx 30\%$. Таким образом, на основании вышеизложенного можно констатировать следующее: а) диаметр разрядной трубки ЛЛ не является единственным и определяющим фактором, влияющим на величину граничной частоты; б) в связи с тем, что зависимости анодно-катодного падения и градиента потенциала положительного столба разряда от частоты напряжения питания для одного и того же диаметра трубки ЛЛ неизменны, их относительное влияние на ход зависимостей $U_{л.зв} = \varphi(\lg f)$ для разных мощностей ЛЛ оказалось разным. С ростом мощности (длины) ЛЛ на ход зависимости $U_{л.зв} = \varphi(\lg f)$ сильнее влияет падение напряжения на положительном столбе разряда, обуславливая уменьшение граничной частоты все дальше от значения 3500 Гц для $d_{тр} = 38$ мм (рис. 1–3). Относительное уменьшение напряжения на лампе $\Delta U_{л.зв}$ на граничной частоте с ростом ее мощности также уменьшается от максимального значения $\Delta U_{л.зв} = 1 - 0,465 = 0,535$ для СКЛ с $l_{ел} = 11$ см до минимального $\Delta U_{л.зв} = 1 - 0,775 = 0,225$ для ЛЛ мощностью 40 Вт с $l_{ел} = 112,5$ см. Заметное влияние на значения f_0 имеет и величина тока через лампу. При уменьшении (увеличении) тока через лампу уменьшается (увеличивается) и значение f_0 . Это объясняется тем, что с уменьшением (ростом) тока возрастает (падает) градиент потенциала, а значит, и влияние падения напряжения на положительном столбе разряда на ход зависимости $U_{л} = \gamma(\lg f)$. Чем меньше величина тока, тем меньше значение граничной частоты (рис. 4). При этом граничная частота не может быть меньше некоторого критического значения, характерного для данного диаметра колбы ЛЛ (для ЛЛ в колбе с внутренним диаметром 38 мм это 500 Гц).

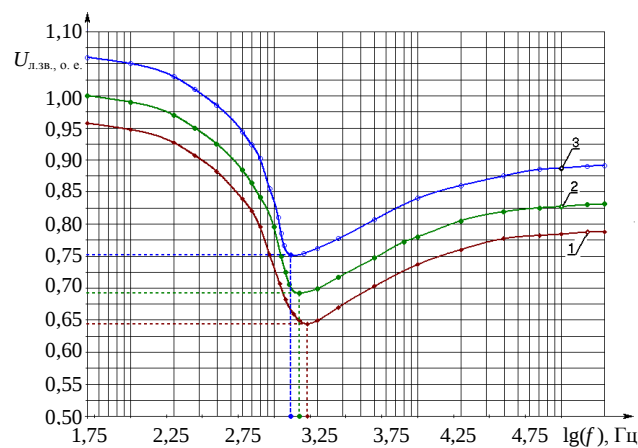


Рис. 4. Зависимость сводного напряжения на ЛЛ мощностью 8 Вт от частоты напряжения питания при различных токах лампы: 1 – на 30 % больше номинального $1,3I_{лн}$; 2 – номинальное; 3 – на 30 % меньше номинального $0,7I_{лн}$

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что значение граничной частоты зависит в основном от падения напряжения на положительном столбе разряда $U_p = E(I_{\text{л}})l_{\text{пс}}$, где $l_{\text{пс}}$ принято равным расстоянию между электродами $l_{\text{пс}} = l_{\text{эл}}$, как это имеет место при работе ЛЛ на высоких частотах; $E(I_{\text{л}})$ – градиент потенциала положительного столба разряда на частоте 50 Гц, который, в свою очередь, зависит от величины тока и диаметра разрядной трубки лампы.

Значения градиента потенциала для разных внутренних диаметров разрядных трубок ($d_{\text{тр}}$, мм), через которые протекают токи ($I_{\text{л}}$, А), равные номинальным для стандартного ряда мощностей ЛЛ, определяли по формуле (6), выведенной на основе экспериментальных исследований и данных, приведенных в [7]. Формула (6) позволяет с достаточной для практики точностью определять градиент потенциала плазмы разряда и строить его зависимости от тока для ЛЛ с диаметром разрядных трубок от 7 до 54 мм в диапазоне токов от 0,1 до 1,0 А для частоты 50 Гц:

$$E = (-9,26I_{\text{лн}}^3 + 26,07I_{\text{лн}}^2 - 22,9I_{\text{лн}} + 9,29)d_{\text{тр}}^{k(I)}, \quad (5)$$

где $k(I) = 0,206I_{\text{лн}}^3 - 0,8I_{\text{лн}}^2 + 0,7I_{\text{лн}} - 0,58$.

Формула (5) была использована при построении графиков, представленных на рис. 5. Анализ рис. 1 и 5 показал, что рост тока через лампу приводит к падению градиента потенциала положительного столба разряда и росту граничной частоты f_0 . В то время как увеличение длины разрядной трубки ЛЛ сдерживает этот рост. Это указывает на то, что между граничной частотой f_0 и падением напряжения на междуэлектродном промежутке ($E(I_{\text{л}})l_{\text{эл}}$) существует обратно пропорциональная зависимость, которая хорошо описывается следующим аналитическим выражением $f_0 = 31,6/(E(I_{\text{л}})l_{\text{эл}}) + 0,48$ кГц.

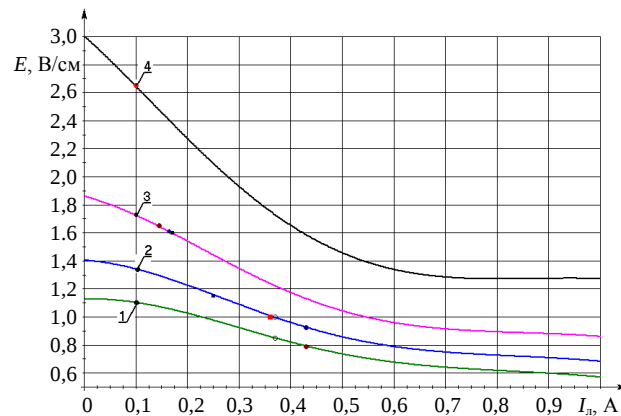


Рис. 5. Зависимость градиента потенциала положительного столба разряда ЛЛ от тока для разных внутренних диаметров колб: 1 – 38 мм; 2 – 26; 3 – 16; 4 – 7 мм

В процессе исследования частотных зависимостей осциллограмм мгновенных напряжений и токов ЛЛ различных мощностей было также установлено, что после 500 Гц (рис. 6б) исчезают анодные релаксационные колебания с амплитудой до 12 В, которые возникают на положительных полуволнах осциллограмм напряжений $u_{\text{л}}$ (рис. 6а), усиливая пульсации светового потока на промышленной частоте. А после достижения гранич-

ной частоты (на рис. 6 – $f_0 = 1500$ Гц) полностью исчезают и пики напряжения перезажигания разряда (точка «с» на рис. 6а, б). Формы кривых напряжения на лампе и тока через лампу становятся плавными.

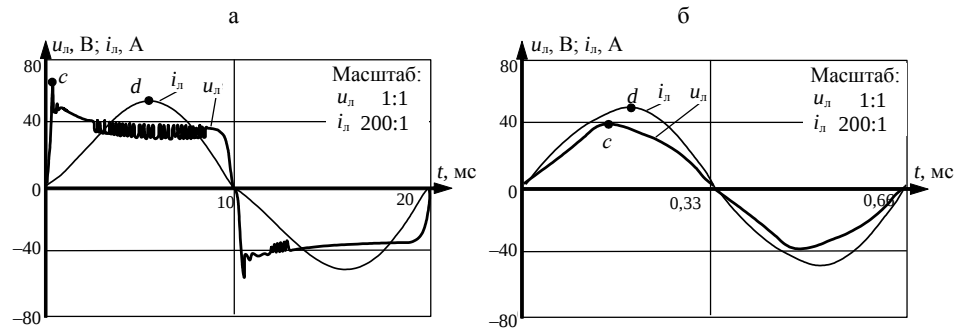


Рис. 6. Осциллограммы токов и напряжений ЛЛ мощностью 8 Вт ($d_{тр} = 16$ мм) в цепи с дросселем при номинальном токе лампы и разных частотах напряжения питания: а – 50 Гц; б – 1500 Гц

Анализ зависимости прироста световой отдачи $\Delta H_{вч}$ на высоких частотах ($f \geq 40$ кГц) показал, что наибольшие ее значения присущи коротким (маломощным) ЛЛ (рис. 7, кривая 1). При этом чем меньше внутренний диаметр колбы ЛЛ, тем меньше прирост. Так, для ЛЛ мощностью 20 Вт в колбе диаметром $d_{тр} = 16$ мм (рис. 7) прирост составляет 10 %, диаметром 26 мм – 20 %, а диаметром 38 мм – 23 %. При уменьшении длины (мощности) ЛЛ эти различия постепенно исчезают. Так, для ЛЛ мощностью 10 Вт прирост световой отдачи как для ламп в колбе 38 мм, так и для ламп в колбе 26 мм абсолютно одинаков и составляет $\Delta H_{вч} = 30$ %.

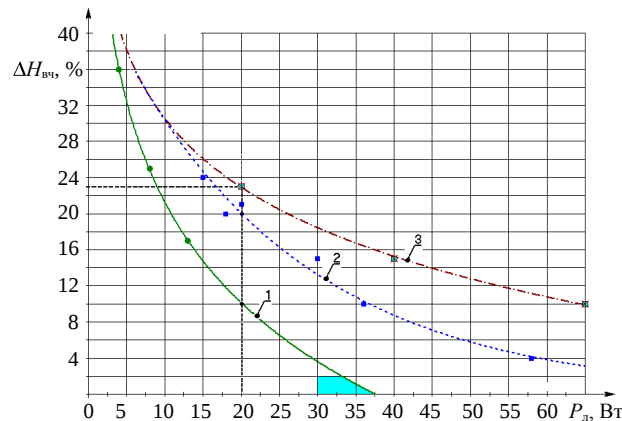


Рис. 7. Зависимость прироста световой отдачи ЛЛ на высоких частотах ($f_m \geq 40$ кГц) от мощности (длины) и диаметра колбы: 1 – $d_{тр} = 16$ мм; 2 – 26 мм; 3 – 38 мм

Следует также отметить, что чем меньше диаметр колбы ЛЛ, тем скорее исчезают преимущества высокочастотного питания с ростом мощности лампы. Так, у ЛЛ с диаметром колбы 16 мм прирост световой отдачи для мощностей более 35 Вт равен нулю. У супертонких ЛЛ ($d_{тр} = 7$ мм) прирост световой отдачи отсутствует для всех мощностей.

Одновременное уменьшение диаметра колбы ЛЛ и тока через них приводит к заметному росту градиента потенциала положительного столба разряда (рис. 6, кривая 4). Это существенно увеличивает напряжения на ЛЛ,

ограничивая предельное значение их мощностей. Например, абсолютное напряжение на тонкой ЛЛ типа TLD 28 ($d_{\text{тр}} = 16$ мм, $I = 0,165$ А) составляет $U_{\text{лн}} = 166$ В. В результате относительная его величина $m = U_{\text{лн}}/U_{\text{м}} = 0,75$ (для ЛЛ типа TLD 35 – $I = 0,175$ А, $U_{\text{лн}} = 205$ В, $m = 0,93$) превышает максимально допустимое значение ($m \leq 0,65$), обуславливая необходимость изготовления специальных электронных пускорегулирующих аппаратов. Именно поэтому мощность супертонких ЛЛ ограничена 13 Вт ($I = 0,1$ А, $U_{\text{лн}} = 136$ В, $l_{\text{лл}} = 52,3$ см).

ВЫВОДЫ

1. Показано, что одновременное уменьшение диаметра разрядной трубки и тока через лампу приводит к существенному росту градиента потенциала в положительном столбе разряда, ограничивая возможности изготовления мощных (длинных) люминесцентных ламп.

2. Получено аналитическое выражение, которое позволяет с достаточной для практики точностью определять градиент потенциала положительного столба разряда и строить его зависимости от тока для люминесцентных ламп с внутренним диаметром разрядных трубок от 7 до 54 мм в диапазоне токов от 0,1 до 1,0 А.

3. Наглядно доказано, что релаксационные анодные колебания с амплитудой до 12 В, которые возникают на положительных полуволнах осциллограмм напряжений на люминесцентных лампах, усиливая пульсации светового потока в цепях промышленной частоты, окончательно исчезают на частотах, превышающих 500 Гц.

4. Установлена обратно пропорциональная связь между граничной частотой f_0 и падением напряжения на положительном столбе разряда $(E(I_{\text{л}})l_{\text{ел}})$ люминесцентных ламп, что дало возможность получить аналитическое выражение для ее определения.

5. Экспериментально доказано, что именно после достижения граничной частоты полностью исчезают пики перезажигания разряда и осциллограммы напряжения на лампе и тока через люминесцентную лампу приближаются к синусоидальной форме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Айзенберг, Ю. Б. Энергосбережение – одна из важнейших проблем современной светотехники / Ю. Б. Айзенберг // Светотехника. – 2007. – № 6. – С. 6–10.
2. Osram Product Catalog [Электронный ресурс]. – OSRAM GmbH. – 2010. – Режим доступа: <http://catalog.myosram.com>.
3. Охонская, Е. В. Характеристики разряда в тонких и супертонких люминесцентных лампах / Е. В. Охонская, А. В. Пантелеев, В. К. Самородов // Светотехника. – 2000. – № 5. – С. 21–22.
4. Гарьковец, А. М. Работа маломощных люминесцентных ламп на повышенной частоте / А. М. Гарьковец, В. Ф. Рой // Светотехника. – 1983. – № 10. – С. 10–11.
5. О влиянии тока и геометрии сечения на электрические характеристики люминесцентных ламп при питании их от сети повышенной частоты / А. С. Федоренко [и др.] // Труды ВНИИМС. – 1974. – Вып. 6. – С. 64–69.
6. Тарасенко, М. Прианодні процеси в люмінесцентних лампах / М. Тарасенко // Вісник Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя. – 2011. – Том 16, № 2. – С. 152–159.
7. Пляскин, П. В. Основы конструирования электрических источников света / П. В. Пляскин, В. В. Федоров, Ю. А. Буханов. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 360 с.

Представлена кафедрой энергосбережения
и энергетического менеджмента

Поступила 19.03.2013