

7. ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ИСТОЧНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

- Электрический разряд в газах и парах металлов
- Условия зажигания и стабилизации дугового разряда
- Влияние вида балластного сопротивления на работу газоразрядных ламп

7.1. Электрический разряд в газах и парах металлов

Одним из путей повышения эффективности источника света является применение электрического разряда в газах и парах металлов.

В нормальном состоянии газы являются изолятором и в них отсутствуют носители тока — электроны и ионы. При создании особых условий в них могут появляться заряды и тогда может возникнуть разряд.

Разряд может быть несамостоятельным и самостоятельным. Несамостоятельный разряд появляется тогда, когда имеется внешнее воздействие и заряды появляются не под действием поля, а, например, под действием высокой температуры, космического излучения, радиации земли или ионизирующего излучения.

Если же заряды появляются под действием электрического поля, то разряд называется самостоятельным.

Характер газового разряда в этом случае зависит от многих факторов: от температуры и давления газа, от химической природы газов и электродов; от расположения электродов, их формы и размеров; от напряженности поля в газовом промежутке.

Вспомним из курса физики процессы, происходящие при электрическом разряде в газе, на примере баллона, заполненного газом с двумя электродами (рис. 43). Из баллона откачаем газ до давления 10 Па.

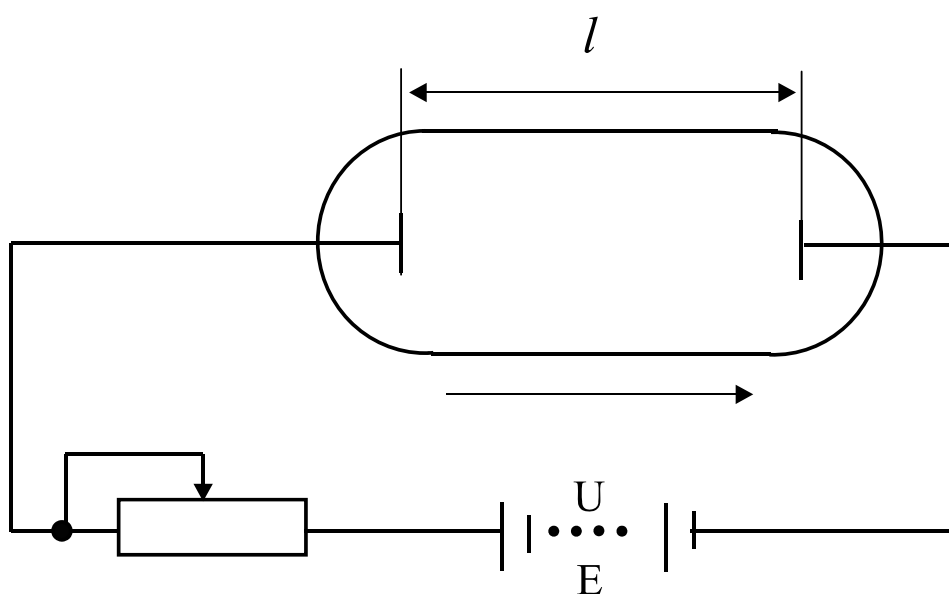


Рис. 43. Схема включения газоразрядной лампы

К электродам приложено напряжение от батареи с ЭДС E . В разрядном промежутке существует небольшое количество ионов под действием космического излучения, радиации земли и других воздействий. Если напряжение на электродах лампы $U = 0$, то образованные ионы и электроны рекомбинируют и ток равен нулю. Если напряжение выше нуля, то появляется напряженность поля $\vec{E} = \frac{\vec{U}}{l}$ и на заряды будет действовать сила $\vec{F} = \vec{E}q = m\vec{a}$. Заряды начнут перемещаться ускоренно — электроны навстречу полю, а положительные ионы — в направлении поля. Из-за различия в массах скорость электронов будет выше, чем положительных ионов, и электронный ток будет больше, чем ионный. Общий ток будет равен сумме этих токов, т.к. заряды перемещаются навстречу друг другу. Вследствие того, что из разрядного промежутка в единицу времени уходит больше электронов, чем ионов, то в приборе образуется объемный положительный заряд.

При движении электронов к аноду, а ионов к катоду возможны их взаимодействия с молекулами газа. Характер этих взаимодействий во многом зависит от скорости электронов и ионов. Молекулы газа, электроны и ионы, как известно, участвуют в двух движениях — хаотическом (тепловом), с некоторой средней скоростью $u \approx 10^5$ м/с, и упорядоченным под действием поля \vec{E} , со скоростью $v \ll u$. Скорость хаотического движения определяется формулой

$$\frac{mu^2}{2} = \frac{3}{2}kT,$$

где m — масса молекулы;

Электрон между двумя последовательными столкновениями проходит в среднем путь λ — длина свободного пробега. И поле совершает работу

$$A = qEl_F,$$

где l_F — путь частицы под действием силы F (рис. 44).

В процессе перемещения электрона поле совершает работу, в результате чего скорость его возрастает. Если скорость электрона невелика, то происходит упругое столкновение с молекулой газа, в результате чего энергии частиц практически не изменяются, т.е. электрон отскакивает от молекулы, как мяч от стенки.

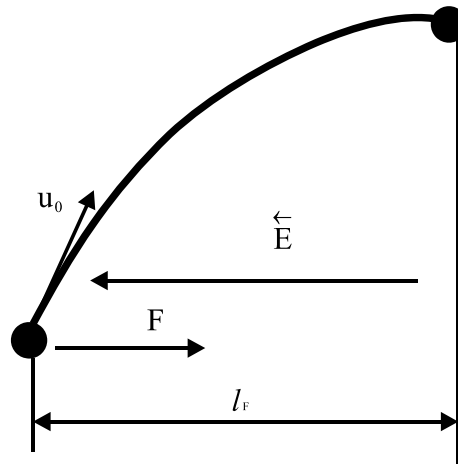


Рис. 44. Схема движения заряда в электрическом поле

При большей скорости электрона возможно неупругое столкновение, в результате которого изменяются скорости частиц и изменяется внутренняя энергия хотя бы одной из них. Если изменилась энергия атома, то он, увеличивая свою скорость, может перейти в возбужденное состояние или даже ионизироваться. Увеличение скорости приводит к увеличению температуры. В возбужденном состоянии атом может находиться порядка 10^{-8} с, а потом переходит в обычное состояние, испуская излишек энергии в виде кванта. Необходимо помнить, что в разреженном газе, когда длина свободного пробега велика и при достаточно большой напряженности поля, работа поля может быть больше энергии, передаваемой в среднем молекуле при каждом столкновении. В результате энергия хаотического движения электронов быстро растет, и доля энергии, передаваемой при каждом столкновении, будет также расти и может достичь энергии возбуждения или ионизации. Чаще всего энергию, необходимую для ионизации, электроны приобретают не за один свободный пробег, а постепенно накапливают за несколько пробегов.

В процессе ионизации образуются новые электроны, которые, в свою очередь, разгоняются и участвуют в процессе объемной ионизации. Таким образом, по мере приближения к аноду число электронов лавинообразно растет (рис. 45). Положительные ионы, попадая на катод, выбивают из него новые электроны, которые могут участвовать в процессе ионизации. В результате образуется лавина заряженных частиц.

Однако не все образующиеся электроны и ионы достигают электродов. При встрече положительного иона с электроном может произойти рекомбинация, в результате которой образуется нейтральный атом, а излишек энергии излучается в виде кванта.

Различают четыре вида электрического разряда в газе — тихий, нормально тлеющий, аномально тлеющий и дуговой разряд.

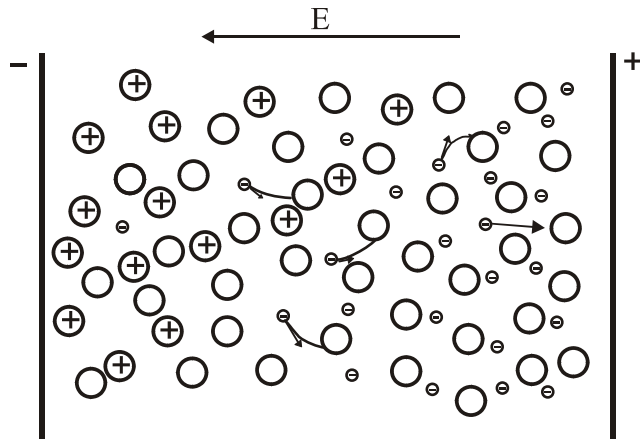


Рис. 45. Механизм образования ионов

Рассмотрим эти виды разрядов на примере лампы с давлением $(5...6)10^3$ Па, которое будем уменьшать.

Если все вышеперечисленные факторы, влияющие на характер разряда, будут постоянными, за исключением напряжения, приложенного к электродам, то процессы, происходящие в разрядном промежутке, можно охарактеризовать вольт-амперной характеристикой (рис. 46).

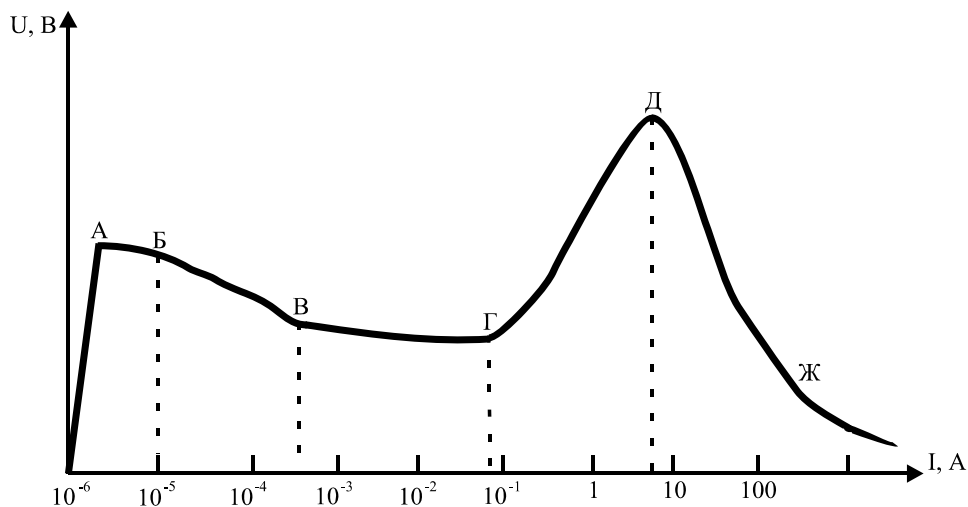


Рис. 46. Вольт-амперная характеристика разряда

Область АБ — тихий разряд или начало самостоятельного разряда — характеризуется очень малым количеством ионов. Здесь в основном происходит ионизация, свечение отсутствует. По мере увеличения тока тихий разряд переходит в тлеющий — область ВГ — и газ начинает светиться. В переходной области БВ, начиная с точки Б, начинается эмиссия электронов с катода под воздействием ударов ионов, количество электронов увеличивается и происходит более интенсивная ионизация газа и проводимость увеличивается. При тлеющем разряде (область ВГ) все процессы стабилизируются. У катода появляется положительный объемный заряд и газоразрядный промежуток разбивается на несколько участков (рис. 47).

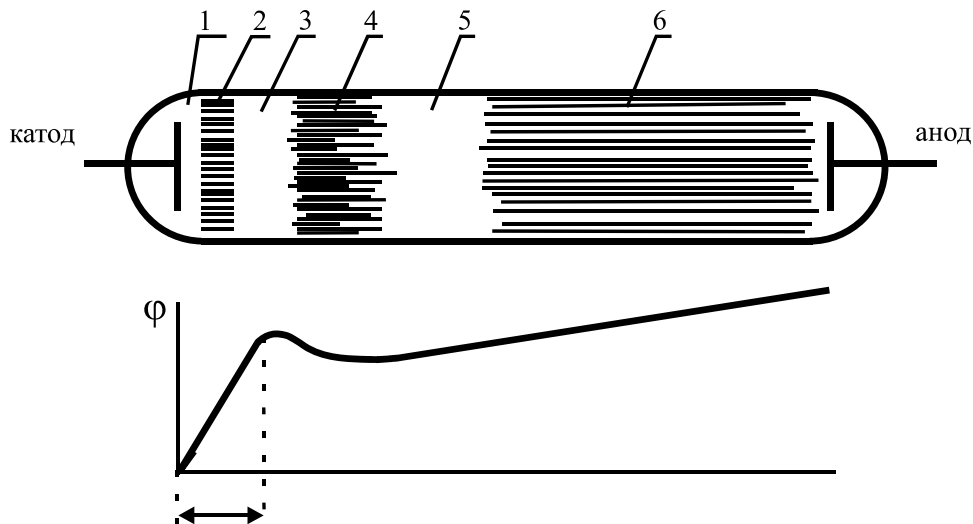


Рис. 47. Распределение потенциала в лампе

- 1 — Астоново темное пространство; 2 — катодная светящаяся пленка;
 3 — катодное темное пространство; 4 — тлеющее свечение;
 5 — Фарадеево темное пространство; 6 — положительный столб

Чем это можно объяснить?

1. Астоново темное пространство. Здесь электроны еще не получили энергию для возбуждения атомов. Свечение отсутствует.

2. В этой области электроны уже получают эту энергию, т.к. они разогнались в Астоновом пространстве, появляется свечение.

3. Опять темное пространство, но менее темное, чем Астоново, имеется слабое свечение. Это объясняется тем, что здесь накапливается положительный объемный заряд и количество возбужденных молекул меньше. Свечение же происходит за счет рекомбинации ионов.

4. Тлеющее свечение. В этой области электроны разгоняются до энергии возбуждения. Появляется свечение.

5. Темное Фарадеево пространство, свечение уменьшается, т.к. концентрация электронов снижается, а скорость их возрастает. Здесь начинается усиленная ионизация и преимущественное движение зарядов переходит в хаотическое. Свечение незначительно, т.к. возбужденных молекул недостаточно.

6. Положительный столб представляет собой газоразрядную плазму, где в основном происходит возбуждение и где большое количество ионов и электронов, а их количество примерно равно. Поэтому объемный заряд практически равен нулю. Здесь создается хороший проводник. Свечение вызвано в основном переходом возбужденных молекул в стационарное. Эта область и является источником света.

Потенциал изменяется вдоль трубки неравномерно. Основное падение потенциала приходится на первые три участка. Эта часть называется катодным падением потенциала.

В области тлеющего разряда потенциал практически не изменяется.

Такое распределение потенциала вызвано образованием в области катодного пространства повышенной концентрацией положительных ионов.

Положительные ионы бомбардируют катод и выбивают из него электроны, которые, разогнавшись в Астоновом пространстве, начинают возбуждать молекулы и возникает катодное свечение. Часть электронов, пролетая без столкновения в области темного катодного пространства, чаще ионизируют молекулы, чем возбуждают и возникает Фарадеево пространство.

При нормальном тлеющем разряде (см. рис. 46) светящаяся часть пространства пропорциональна току, протекающему через разрядный промежуток.

Для дальнейшего повышения тока необходимо увеличить напряжение, что приведет к образованию новых ионов. Такой разряд называется аномальным тлеющим разрядом. В точке Д напряженность поля настолько велика, что скорость ионов возрастает, и при бомбардировке катода ионами он разогревается и с его поверхности возникает термоэлектронная эмиссия. В приборах со ртутью происходит испарение ртути, увеличивается число столкновений электронов с их атомами, это приводит к новому увеличению количества электронов и ионов. Образуется у катодного пространства большая плотность положительных ионов, что вызывает электростатическую электронную эмиссию — электроны просто вырываются этим полем из катода. В результате всего этого количество электронов резко возрастает. Возникает дуговой разряд (область ДЖ). В результате этого разряда образуется интенсивная ионизация и возбуждение молекул. Вследствие этого возникает сильное свечение. Дуговой разряд является основным рабочим режимом всех газоразрядных источников излучения.

Сопротивление межэлектродного промежутка уменьшается, а значит, уменьшается и напряжение. Вольтамперная характеристика является падающей и электрический ток имеет тенденцию к неограниченному возрастанию. Для ограничения тока мы вынуждены последовательно с лампой включать какое-то ограничивающее сопротивление.

7.2. Условия зажигания и стабилизации дугового разряда

Что необходимо иметь, чтобы возник газовый разряд?

В первую очередь — наличие соответствующей напряженности поля $E = \frac{U}{d}$, которое способно разогнать заряды до энергий ионизации. Но так как $E \approx U$ и $E \approx \frac{1}{d}$, то, видимо, для каждого конкретного газоразрядного прибора, у которого имеется определенное межэлектродное расстояние, необходимо соответствующее напряжение зажигания U_3 . U_3 — наименьшее напряжение, при котором возникает самостоятельный разряд.

Второе условие зажигания — наличие определенной длины свободного пробега электронов λ , при которой электрон может получить энергию ионизации при данной напряженности поля. Длина свободного пробега определяется давлением газа и его температурой. Следовательно, одним из условий зажигания являются температура и давление.

Если нет свободных зарядов, то не будет и ударной ионизации. Значит, третьим условием зажигания является наличие свободных зарядов.

Свободные заряды в газоразрядных лампах получают различными путями:

- внешний источник ионизирующего излучения;
- покрытие электродов специальным слоем, который будет эмиссировать электроны;
- нагрев электродов, который уменьшает работу выхода электронов из электродов.

Так как при дуговом разряде электрический ток резко возрастает, то его необходимо ограничить. Для этой цели в цепях постоянного тока последовательно с лампой включают активное сопротивление, а в цепях переменного тока — активное, индуктивное, емкостное сопротивление или их комбинации. Главный вопрос состоит в выборе величины сопротивления.

Рассмотрим это на примере питания газоразрядной лампы от сети постоянного тока (рис. 48).

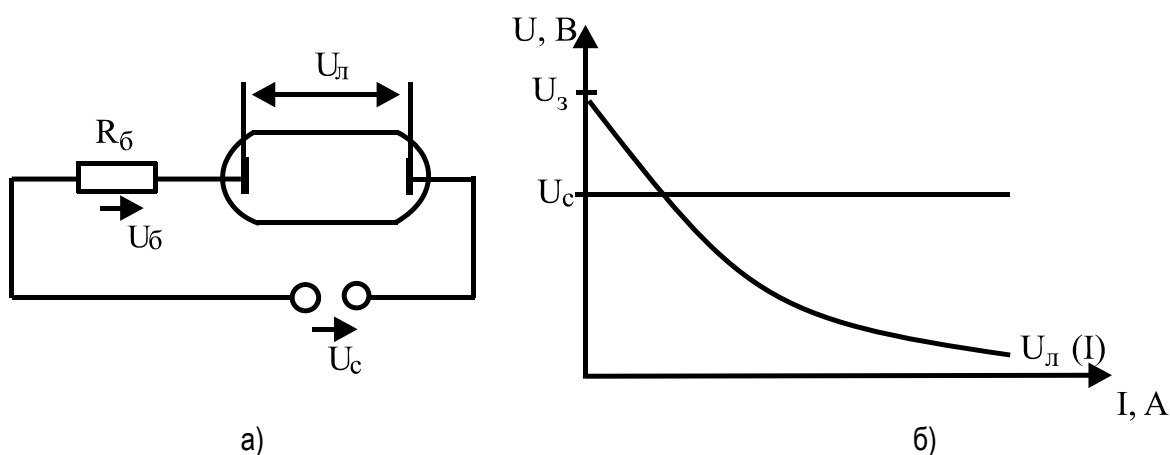


Рис. 48. Схема стабилизации дугового разряда (а) и ВАХ дугового разряда (б)

Рассмотрим дуговой разряд. Устойчивый режим работы электрического разряда может быть выполнен по второму закону Киргофа: $U_c = U_{л}$ (рис. 48, б). Если по какой-либо причине возрастет ток, то это приведет к снижению напряжения на лампе и $U_c > U_{л}$, а это приведет к дальнейшему росту тока, а значит, температуры и давления, что может привести к взрыву колбы.

Поэтому в дуговых лампах ток ограничивают путем последовательного включения балласта. На основании второго закона Кирхгофа имеем:

$$U_c = U_B + U_L$$

и ВАХ лампа-балласт будет иметь следующий вид (рис. 49).

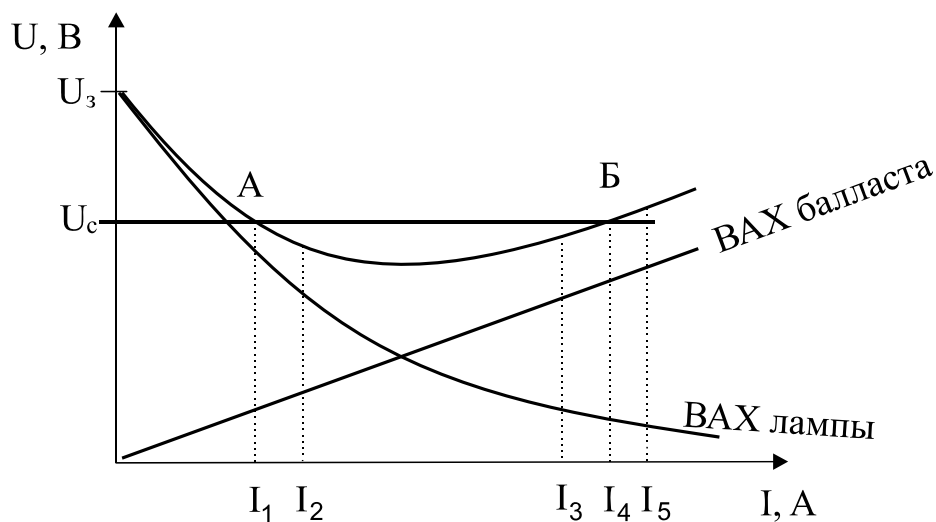


Рис. 49. Вольт-амперная характеристика лампы – балласта

Этот закон может соблюдаться в двух точках — А и Б. Устойчива ли будет работа в этих точках? При случайном увеличении тока в точке А напряжение сети будет больше напряжения $U_{Л+Б}$ и электрический ток будет возрастать до тех пор, пока не будет выполняться второй закон Кирхгофа. При случайном увеличении напряжения сети в возрастает ток, увеличивается падение напряжения на балласте, увеличится ток в лампе и падение напряжения на ней, устанавливается новое равновесие.

При снижении напряжения сети снижается ток, падение напряжения на лампе и снова устанавливается равновесие.

Сопротивление балласта выбирают таким, чтобы были минимальными потери энергии в балласте и работа лампы была устойчивой. На практике сопротивление балласта выбирают таким, чтобы $U_L \approx (0,5...0,65)U_c$.

7.3. Влияние вида балластного сопротивления на работу газоразрядных ламп

Только что рассмотренные основные положения стабилизации дугового разряда для постоянного тока будут справедливы и при питании ламп переменным током. Однако переменный ток оказывает свое влияние на работу газоразрядных ламп в зависимости от вида балластного сопротивления.

Рассмотрим стабилизацию разряда активным сопротивлением (см. рис. 48, а и рис. 50).

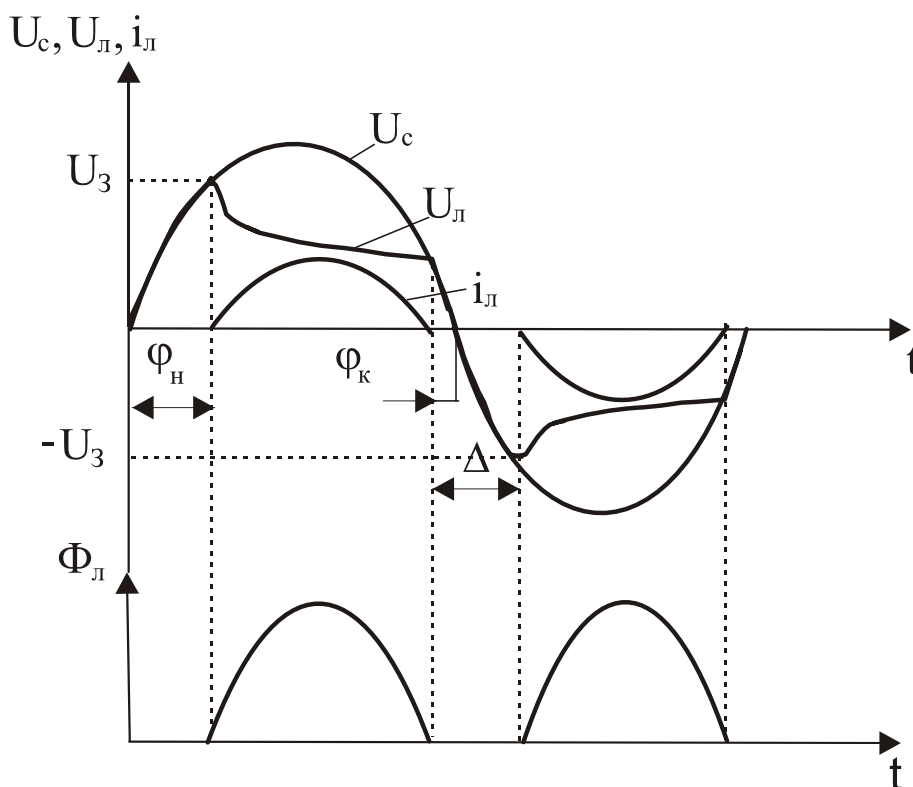


Рис. 50. Мгновенные значения напряжения, тока и потока излучения при активном балласте

При подаче напряжения на схему (см. рис. 48, *a*), лампа не горит, нет тока и нет падения напряжения на балласте. Все напряжение подается на лампу. При достижении напряжения зажигания U_3 (см. рис. 50), по лампе пойдет ток, сопротивление лампы уменьшится, а напряжение на балластном сопротивлении возрастет. Напряжение на лампе будет снижаться до тех пор, пока напряжение на лампе не снизится до напряжения погасания, лампа погаснет, прекратится ток и все напряжение сети будет подано на лампу. Все процессы повторятся во втором полупериоде. Как видно из рисунка, процесс перезажигания повторяется два раза за период, наблюдаются паузы тока и потока излучения. Общая пауза $\varphi_{нач} + \varphi_K$ может достигать $1/3$ периода. Как видим, электрический ток и напряжение на лампе далеки от синусоиды, а поток излучения имеет пульсирующий характер, что приводит к утомляемости глаза, стробоскопическому эффекту и быстрому износу электродов.

Недостатки активного балласта:

- 1) кривые тока и потока излучения несинусоидальны;
- 2) большая пульсация тока и потока излучения;
- 3) снижается срок службы лампы вследствие ускоренного распыления оксидного слоя электродов и потери эмиссионных свойств;
- 4) большие потери энергии ($\approx 50\%$) в активном балласте.

Преимущества активного балласта:

- 1) наиболее дешевый и легкий балласт;
- 2) коэффициент мощности $\cos \varphi$ практически равен 1.

Работа газоразрядной лампы с индуктивным балластом

Этот балласт имеет ряд преимуществ перед активным балластом и широко применяется на практике.

Рассмотрим более подробно работу газоразрядной лампы с индуктивным балластом (рис. 51).

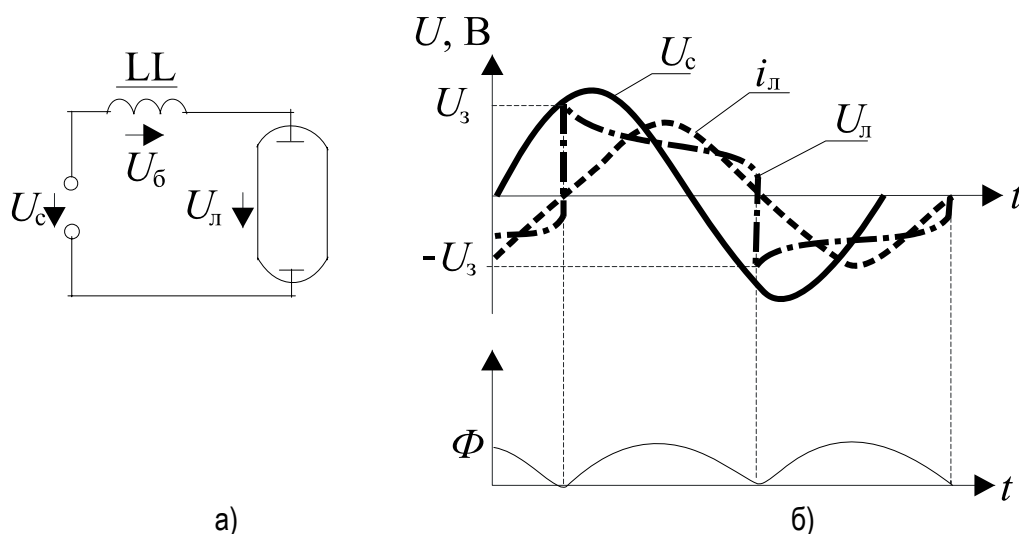


Рис. 51. Схема включения в сеть газоразрядной лампы с индуктивным балластом (а) и кривые мгновенных значений тока, напряжения и потока излучения лампы (б)

При включении лампы в момент времени $t = 0$ тока в ней нет и лампа не работает. При достижении напряжения сети напряжения зажигания лампы в лампе появится разряд и по ней пойдет ток. Ток пойдет и в индуктивном балласте и в нем возникнет ЭДС самоиндукции, препятствующего изменению тока. Возникнет переходный процесс. Однако напряжение сети растет, что приводит к увеличению тока и напряжения на балласте и снижению напряжения на лампе. В то время, когда напряжение сети достигнет максимума, ток еще не достиг его из-за влияния ЭДС самоиндукции. В дальнейшем мгновенное напряжение сети снижается и ток, достигнув максимального значения, начнет тоже снижаться, снижается и ЭДС самоиндукции. При достижении напряжения сети нулевого значения напряжение на лампе не равно нулю из-за той же ЭДС самоиндукции, которая теперь стремится поддержать уменьшающийся ток. И только тогда, когда напряжение сети достигнет напряжения перезажигания ($-U_3$), лампа загорается снова и все процессы повторяются. Как видим из рис. 51, ток по своей форме уже близок к синусоидальному, а поток излучения похож на полусинусоиду. Паузы тока и потока излучения почти отсутствуют.

Преимущества индуктивного балласта:

- паузы тока и излучения отсутствуют, снижается пульсация излучения;
- режим работы электродов облегчается;
- потери в балласте незначительны (10...35%);
- схема не нуждается в специальном зажигающем устройстве.

Недостатки индуктивного балласта:

- низкий $\cos \varphi$;
- большой расход стали и цветного металла, поэтому он дорогой и тяжелый.

Работа газоразрядной лампы с емкостным балластом

Этот балласт применяется очень редко. Рассмотрим его работу при стабилизации дугового разряда (рис. 52).

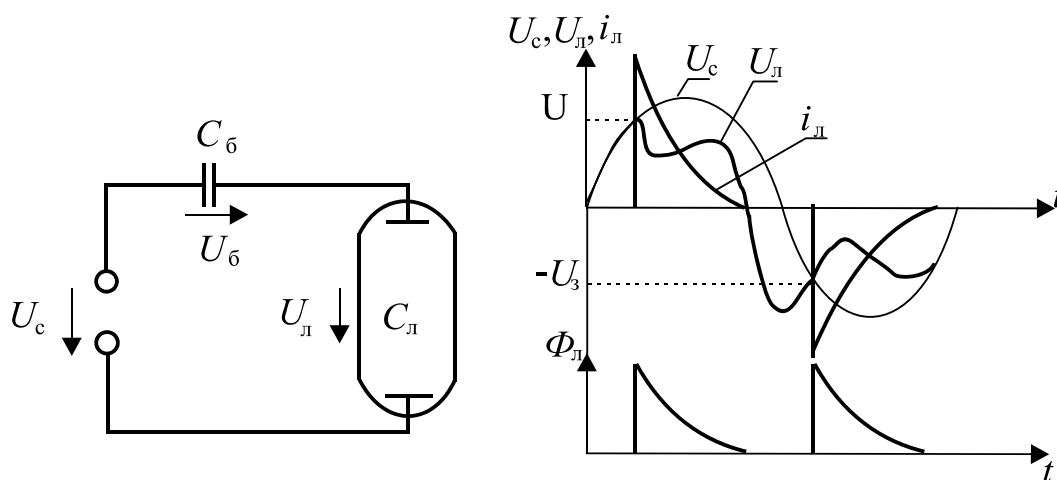


Рис. 52. Стабилизация дугового разряда емкостным балластом

Включаем лампу так же в момент времени $t = 0$. Лампа не работает и ее тоже можно считать емкостью очень маленькой величины. Таким образом, в цепь включено последовательно две емкости.

При увеличении напряжения сети оно перераспределяется обратно пропорционально емкостям. Так как $C_l \ll C_b$, то все напряжение будет приложено к лампе. При достижении сети напряжения зажигания лампы она из емкостного сопротивления превращается в активное и ток резко возрастает, снижается падение напряжения на лампе, начинает заряжаться конденсатор C_b . Напряжение на нем растет, а ток падает. Это говорит о том, что проводимость лампы снижается и напряжение на ней растет. При дальнейшем увеличении заряда на конденсаторе практически все напряжение сети прикладывается к нему, а напряжение на лампе снижается до нуля. Изменение потока излучения пропорционально току. Как видим, ток и поток излучения имеют очень сильные толчки.

Отсюда и недостатки:

- кривые тока и потока излучения очень искажены;
- срок службы лампы снижается;
- снижаются светотехнические показатели лампы.

Но есть и преимущества:

- потерь энергии практически нет;
- балласт малогабаритный и очень дешевый;
- нагрузка имеет емкостный характер.

Особенности работы лампы на переменном токе и влияние частоты тока на их работу

В процессе работы газоразрядной лампы она перезажигается за период два раза. Процессы же, происходящие в лампе в каждом полупериоде, такие же, как при постоянном токе.

Необходимо отметить, что поток излучения получается пульсирующим; искажаются форма тока и потока излучения. Однако сдвиг по фазе между током и напряжением на лампе при всех видах балластного сопротивления отсутствует. Но мощность лампы не равна произведению действующих напряжений и токов, как при простом включении R, L, C в сеть переменного тока. Это объясняется тем, что кривые тока и напряжения отличаются от синусоиды и для нахождения мощности разряда необходимо разложить кривые тока и напряжения в ряд, а мощность разряда определить как сумму мощностей каждой из гармоник. Чтобы этого не делать, вместо коэффициента мощности применяют коэффициент искажения:

$$k_{II} = \frac{P_L}{U_L I_L}.$$

Физический смысл имеет такой же, как коэффициент мощности.

Этот коэффициент зависит от вида балластного сопротивления.

При увеличении частоты процесс перезажигания лампы ускоряется. Так как электроды лампы не успевают остыть, в разрядном промежутке не успевает произойти деионизация и при большой частоте процесс перезажигания становится мгновенным. Кроме этого, значения тока и напряжения на лампе уже не будут зависеть от рода балластного сопротивления и при частотах 0,8...1 кГц будут иметь одинаковую форму — напряжение на лампе близкое к треугольной, а ток — синусоиду. Это объясняется тем, что процессы ионизации и деионизации уравниваются и проводимость лампы становится постоянной.

Преимущества питания лампы повышенной частотой:

- световая отдача ламп увеличивается на 15...25% по сравнению с 50 Гц;
- срок службы ламп увеличивается на 20...30%;
- пульсации светового потока резко снижаются и уже при 600 Гц практически отсутствуют;
- при повышенных частотах можно применять любой балласт, и это будет одинаково;
- масса индуктивного балласта значительно меньше, чем при 50 Гц.

Есть и недостатки:

- у индуктивного балласта во избежание увеличения потерь в стали необходимо применять специальные ферромагнитные материалы;
- тангенс угла потерь конденсаторов начинает возрастать и поэтому приходится применять конденсаторы со специальным диэлектриком;
- необходимы специальные схемы преобразования частоты.

Пульсация светового потока

Работа люминесцентной лампы сопровождается их погасанием и зажиганием в каждый полупериод переменного тока. В связи с этим возникают пульсации светового потока. Освещение объектов пульсирующим световым потоком утомляет зрение, так как мышцы зрачка сокращаются в два раза за период, и вызывает стробоскопический эффект (кажущаяся неподвижность объекта при совпадении или кратности частоты пульсации светового потока и частоты вращения или колебания объекта наблюдения).

Пульсация светового потока оценивается коэффициентом пульсации.

Коэффициент пульсации — отношение изменения потока излучения к двойному среднему:

$$K_{II} = \frac{\Phi_{\text{МАКС}} - \Phi_{\text{МИН}}}{2\Phi_{\text{СР}}} 100 = \frac{\Phi_{\text{МАКС}} - \Phi_{\text{МИН}}}{\Phi_{\text{МАКС}} + \Phi_{\text{МИН}}} 100.$$

Величина K_{II} определяется составом люминофора, видом балластного сопротивления и схемой включения лампы в сеть.

Для снижения коэффициента пульсации необходимо подобрать люминофор с большим временем послесвечения (с хорошей фосфоресценцией), подобрать вид балластного сопротивления, заставить работать лампы в разное время (схемы включения, разные фазы), увеличить частоту или питать постоянным током.

С увеличением частоты (до 800 Гц и выше) глаз человека не реагирует на пульсации светового потока. При высоких частотах перезажигание не требуется (деонизация не возникает), существует возможность применения малогабаритных балластов.

Вопросы для самопроверки

1. Как происходит электрический разряд в газе? 2. Перечислите виды электрического разряда в газе. 3. Перечислите условия зажигания разряда в газе. 4. Расскажите о процессе стабилизации разряда в газе. 5. Расскажите о работе газоразрядной лампы с активным, индуктивным и емкостным балластами. 6. Перечислите особенности работы газоразрядной лампы при переменном токе. 7. Назовите причины пульсации светового потока. 8. Как влияет пульсация светового потока на зрение? 9. Какова сущность стробоскопического эффекта? 10. Как определить коэффициент пульсации? 11. Почему отсутствует для газоразрядных ламп $\cos \varphi$? 12. Назовите преимущества питания газоразрядных ламп повышенной частотой.