

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«ЧЕЧЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**Зубхаджиев М.-А., Иванов И. Г., Наскалова О. В.,  
Усаев А. А.**

**ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ**

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ  
к специальному лабораторному практикуму  
«Радиофизика и электроника»  
(специальность 03.03.03 «Радиофизика»)

Грозный – 2016

УДК 621.37  
ББК 32.84  
391

*Печатается по решению Ученого совета  
Чеченского государственного университета*

Рецензенты:

Зав. кафедрой общей физики ЧГУ, д.ф.-м.н., профессор Р.М. Магомадов;  
профессор кафедры прикладной электродинамики и компьютерного  
моделирования ЮФУ, д.ф.-м.н. А.М. Лерер

Учебно-методическое пособие разработали:

зав. кафедрой «Физическая электроника», к. ф.-м. н. М.-А. Зубхаджиев;  
профессор кафедры «Квантовая радиофизика» ЮФУ,  
д. ф.-м. н., профессор И. Г. Иванов;  
доцент кафедры «Физическая электроника», к. ф.-м. н. О. В. Наскалова;  
старший преподаватель кафедры «Физическая электроника» А. А. Усаев

Изучение электрических характеристик нелинейных цепей на переменном токе : учебно-методическое пособие / М.-А. Зубхаджиев, И. Г. Иванов, О. В. Наскалова, А. А. Усаев ; Чеченский государственный университет. – Грозный : Издательство Чеченского государственного университета, 2016. – 31 с.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальности «Радиофизика», и содержит рекомендации к выполнению лабораторной работы по изучению электрических характеристик нелинейных цепей на переменном токе.

УДК 621.37  
ББК 32.84

© Чеченский государственный университет, 2016  
© Зубхаджиев М.-А., Иванов И. Г.,  
Наскалова О. В., Усаев А. А. 2016

## Лабораторная работа

### ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

*Цель работы* Знакомство с основными закономерностями протекания переменного тока низкой частоты по электрической цепи, составленной из линейных и нелинейных элементов (в качестве нелинейных элементов использованы индуктивность и газоразрядный источник света низкого давления); а также знакомство с физикой и техникой газового разряда и газоразрядных источников света, питающихся от сети переменного тока.

#### *Подготовка к работе*

– изучить основные физические величины (заряд, электрическое поле, магнитное поле, электрический ток, сила тока, потенциал, напряжение и др.), описывающие электрические процессы в электрических цепях, схемные элементы, их соединение и классификацию. Иметь понятие о гармонической функции, операциях над гармоническими функциями; о средних, и действующих значениях токов и напряжений; физических процессах, происходящих при зажигании самостоятельного электрического разряда в газе;

– познакомиться с принципом действия осциллографа, предназначенного для наблюдения временных зависимостей электрических величин.

## 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

К газоразрядным источникам света (ГИС) относят большую группу газоразрядных приборов (ламп), предназначенных для получения некогерентного оптического излучения с помощью электриче-

ского разряда в газах, парах металлов и их смесях. История ГИС берет своё начало с дуговых угольных ламп П. Н. Яблочкова (1876 г.).

*Газовым разрядом* называют совокупность процессов, сопровождающих приобретение газом свойств электропроводности под действием приложенного электрического поля, т. е. протекание через газ электрического тока. При разряде происходит образование газоразрядной плазмы, служащей рабочей средой в ГИС.

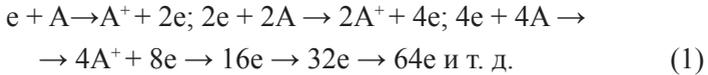
*Газоразрядная плазма* – это ионизированный газ, обладающий свойством электронейтральности (суммарный заряд единицы объема равен нулю) и занимающий объём, размер которого превышает дебаевскую длину. Плазма состоит в общем случае из невозбужденных и возбужденных нейтральных частиц (атомов, молекул), электронов и положительно заряженных ионов. Электроны и ионы плазмы, перенося электрический заряд, обеспечивают протекание тока. Газоразрядная плазма, как правило, низкотемпературная, слабоионизированная, и является источником оптического излучения. Вольт-амперная характеристика газового разряда существенно нелинейная. Для повышения электрического КПД источников света, питающихся переменным током, в качестве балластных элементов используется дроссель, обладающий индуктивностью и активным сопротивлением.

## 2. ЗАЖИГАНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РАЗРЯДА В ГИС

### 2.1. Электронная лавина. Зажигание самостоятельного разряда

Самостоятельный электрический разряд в газе при давлении  $p$  и расстоянии  $L$  между электродами разрядной трубки (рис. 1) возникает, когда приложенное к электродам напряжение  $U$ , равно или превышает напряжение зажигания  $U_{\text{заж}}$ :  $U \geq U_{\text{заж}}$ . При этом свободный электрон в электрическом поле разрядного промежутка напряжённостью  $E = U_{\text{заж}}/L$  на длине свободного пробега  $\lambda$  набирает энергию  $\varepsilon_\lambda = e_\lambda U_{\text{заж}}/L$ , равную (или большую) энергии ионизации газа  $\varepsilon_\lambda \geq \varepsilon_i(A)$ . В результате происходит размножение в геометрической прогрессии заряженных частиц: электронов, движущихся «навстречу» электрическому полю  $E$  (от катода к аноду), а также ионов, дви-

жущихся «по» полю (к катоду):



Данный процесс (1) размножения заряженных частиц называется *электронной лавиной*.

Электронную лавину удобно описывать, введя ионизационный коэффициент Таунсенда  $\alpha$ , равный числу пар заряженных частиц (электронов и положительных ионов), создаваемых движущимся в электрическом поле  $E$  электроном на пути в 1 см. Полуэмпирическая формула для  $\alpha$  имеет вид:

$$\alpha = ap \exp\left(-\frac{bp}{E}\right).
 \tag{2}$$

Константы  $a$  и  $b$  в (2) зависят от рода газа, при этом  $a$  имеет смысл эффективного сечения ионизации газа, а  $b - (e\lambda p)^{-1}$ . Важно, что  $\alpha$  так же, как и коэффициент  $\gamma$  ионно-электронной эмиссии (ИЭЭ), является возрастающей функцией  $E/p$ .

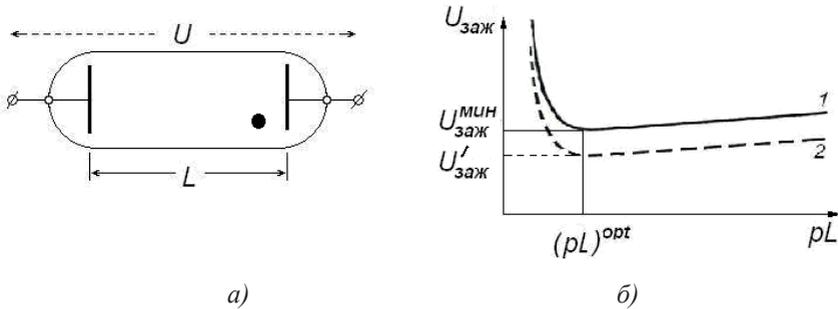


Рис. 1. Зажигание газового разряда низкого и среднего давления  
 $a$  – трубка с «холодными» электродами;  $b$  – кривые Пашена.

1 – при действии только естественного источника начальной ионизации газа; 2 – при наличии дополнительного «внешнего» источника ионизации газа (разогретый катод с термоэлектронной эмиссией и(или) наличие «остаточных» электронов при неполном распаде плазмы от предыдущего импульса тока и др.)

## 2.2. Напряжение зажигания самостоятельного разряда

До возникновения электронной лавины связь величины полного тока  $j$ , протекающего через промежутки, с плотностью тока  $j_0$  с поверхности катода за счет внешнего фотоэффекта, а также с плотностью тока  $\gamma(j_{i,k})$  за счет ионно-электронной эмиссии будет

$$j = j_0 \frac{e^{\alpha L}}{1 - \gamma(e^{\alpha L} - 1)} = j_0 \cdot K_{GV}, \quad (3)$$

где  $K_{GV}$  – коэффициент газового усиления.

С ростом  $E$  при  $U \rightarrow U_{заж}$  имеет место рост как  $\alpha$  и  $\gamma$ , так и  $K_{GV}$ . Очевидно, что  $j$  перестает зависеть от  $j_0$  при неограниченном увеличении  $K_{GV}$ , т. е. когда  $K_{GV} \rightarrow \infty$  в результате возникновения лавины. При этом в знаменателе (3)  $\gamma(e^{\alpha L}) \rightarrow 1$ , и зажигается *самостоятельный разряд*. При равенстве нулю знаменателя (3):  $1 - \gamma(e^{\alpha L} - 1)$ , получим *условие возникновения* самостоятельного разряда в виде:

$$\alpha L = \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right). \quad (4)$$

Подставив в (4) выражение для  $\alpha$  в виде (2), найдем величину  $U_{заж}$  как функцию параметров разряда (*закон Пащенко–Таунсенда*):

$$U_{заж} = \frac{b(pL)}{\ln \frac{a(pL)}{\ln(1 + 1/\gamma)}}. \quad (5)$$

Видно, что  $U_{заж}$  растет как при росте  $b$ , так и при снижении  $a$  и  $\gamma$ . При наличии источника дополнительной ионизации газа  $U_{заж}$  снижается (рис. 1б).

При повышении тока самостоятельного разряда с холодными электродами можно наблюдать все виды разрядов: тёмный (таунсендовский) разряд, тлеющий разряд (нормальный и аномальный) и дуговой разряд. Тлеющий разряд характеризуется ионно-электронной эмиссией и относительно большой величиной катодного падения потенциала (несколько сотен Вольт). Дуговой разряд происходит при высокой температуре катода, характеризуется термоэлектронной эмиссией (ТЭЭ) и малым (порядка нескольких десятков Вольт) катодным падением

потенциала. В тлеющем и в дуговом разрядах возникает свечение различных пространственных зон между электродами. Однородная плазменная зона – *положительный столб* (ПС) с интенсивным свечением, может неограниченно удлиняться путём увеличения расстояния между электродами  $L$ , и поэтому является источником излучения в большинстве ГИС. Вторая плазменная область – *отрицательное* (катодное) *свечение* используется в ГИС менее широко.

В самостоятельных газовых разрядах величина тока является нелинейной функцией напряжения. Для стабилизации величины тока при работе на постоянном токе применяют активное «*балластное*» сопротивление (резистор), а на переменном токе – реактивные элементы, чаще индуктивность (*балластный дроссель*), реже ёмкость (*балластный конденсатор*), включаемые последовательно с каждым разрядным промежутком (разрядной лампы).

### 3. ТИПЫ И УСТРОЙСТВО ГИС

По своей физической природе ГИС подразделяются на лампы с непосредственным излучением света из газоразрядной плазмы положительного столба (ПС) разряда, *люминесцентные* лампы, а также лампы, использующие сочетание двух указанных типов излучения. Излучение ГИС может быть как непрерывным (стационарным во времени), так и импульсным, а его спектр как линейчатым (при низком и среднем давлении газа), так и сплошным (при высоком давлении), при этом путём подбора среды и режима работы можно получить необходимый спектральный состав излучения (цветовую температуру). ГИС существенно превосходят тепловые источники света по светоотдаче и сроку службы, и как следствие – имеют всё большее распространение.

ГИС всех видов имеют проницаемую для оптического излучения вакуумно-плотную оболочку (колбу) из стекла, кварца или керамики, цилиндрической, сферической или иной формы, обеспечивающую герметичность при рабочей температуре. В колбу впаяны два основных электрода, между которыми происходит разряд. В ряде случаев для облегчения зажигания вплавляют и дополнительные (так называемые «поджигающие») электроды.

Внутреннее пространство колбы после удаления воздуха и тщательного «обезгаживания» лампы при помощи нагрева под откачкой (удаления сорбированных в материале колбы и электродах паров воды и других газов), наполняется определённым газом (чаще всего инертным) или смесью инертного газа и небольшого количества металла с необходимой упругостью паров, чаще ртути, натрия и др. или их химического соединения. В настоящее время широкое распространение получили лампы, в которые кроме инертного газа и ртути ещё вводят излучающие добавки, представляющие собой большей частью галогениды различных металлов. Существует категория ГИС с электродами, работающими в «открытой» воздушной атмосфере, у которых разряд происходит в парах вещества электродов (например, дуговые лампы с угольными электродами).

#### 4. СПЕКТР ИЗЛУЧЕНИЯ РАЗРЯДА И ВОЗБУЖДЕНИЕ СПЕКТРА

ГИС, использующие ПС разряда в инертных газах низкого давления (несколько Тор), излучают *линейчатый* дискретный спектр, состоящий из узких линий (шириной доли нанометра), разделённых темными промежутками. Каждый газ или пар даёт совершенно определённое, характерное только для него расположение линий (длин волн, частот) в спектре.

*Линейчатый* спектр возникает в результате излучения возбуждённых атомов, образующихся из невозбуждённых, «нормальных» атомов в процессе самого разряда. При достаточно низких давлениях газа и малых плотностях тока возмущающее действие соседних атомов и частиц друг на друга (и уширение спектральных линий) пренебрежимо малы, а наблюдаемый спектр излучения представляет собой результат излучения большого числа независимых частиц.

##### *4.1. Графическое изображение энергетических уровней и спектральных линий атомов*

Возбуждённые состояния атомов принято изображать графическими схемами (см., например, рис. 2). По вертикальной оси от-

кладываются значения энергии возбужденных состояний, причем за начало отсчета принимается энергия нормального (невозбужденного) состояния. Рядом со значением энергии пишется обозначение данного уровня. Квантовые переходы между уровнями (линии спектра атома), подчиняющиеся правилам отбора, на графической схеме уровней будут изображаться отрезками прямых, соединяющих энергетические уровни «наискосок».

#### 4.2. Преобразование излучения разряда в слое люминофора

В люминесцентных ГИС используется явление *фотолюминесценции* в твердых кристаллических веществах, называемых *люминофорами* и представляющих собой порошки, состоящие из отдельных зерен (размерами от 3 до 20 мкм). Люминофор наносится на внутреннюю поверхность стеклянной оболочки лампы, и облучается УФ-излучением газоразрядной плазмы (резонансными линиями ртути с длинами волн 253,5 и 184,9 нм).

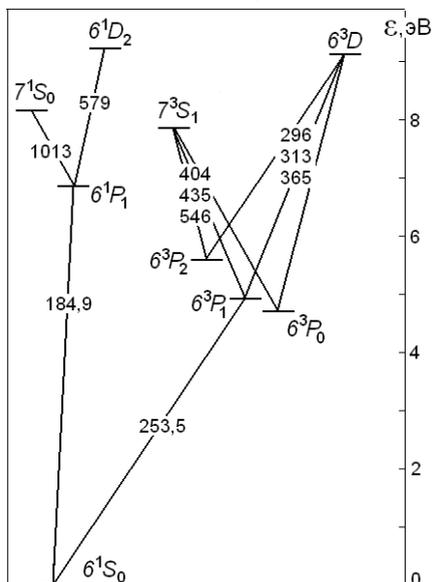


Рис. 2. Диаграмма энергетических уровней атома ртути. Приведены значения длин волн переходов в нанометрах

В люминофоре происходит поглощение УФ-излучения, далее безызлучательная релаксация молекул люминофора «вниз» по уровням энергии и, наконец, люминесцентное излучение в видимом диапазоне света, испускаемое наружу. Люминофор должен обладать полосой поглощения, совпадающей по длине волны (частоте) с излучением накачивающего разряда, иметь желаемый спектр излучения (люминесценции), а также быть химически нейтральным и прочно удерживаться на поверхности оболочки ГИС. Наиболее широкое применение нашли люминофоры для преобразования в видимую область УФ-излучения разряда в парах ртути низкого давления (резонансных линий ртути с длинами волн 253,5 и 184,9 нм) (рис. 2). Спектры излучения люминофоров различного химического состава имеют отличающиеся распределения интенсивности по видимого спектру.

#### 4.3. Возбуждение (накачка) энергетических уровней атомов в плазме газового разряда

Основным механизмом накачки возбужденного энергетического уровня атома газа является ударное возбуждение электронами:  $e + A_0 \rightarrow A^* + e$ . Таким способом возбуждаются с той или иной вероятностью все без исключения уровни атома, так как спектр энергий электронов в плазме разряда простирается от нуля до очень высоких значений. Далее происходит *релаксация* данного возбужденного состояния атома (квантовые переходы «вниз по шкале энергий») с испусканием квантов света – фотонов (совокупность которых и образует спектр излучения). Интегральная интенсивность излучения столба  $J$  складывается из интенсивности излучения на всех переходах между возбужденными энергетическими уровнями данного газа:

$$J = \sum_{k,l} J_{kl} = \sum_{k,l} h\nu_{kl} \cdot N_k A_{kl} V,$$

где  $V$  – объем ПС,  $N_k$  – усредненная по сечению ПС концентрация возбужденных частиц газа в квантовом состоянии « $k$ », выраженная через скорость накачки  $F_k$  этого состояния:

$$N_k = F_k \cdot \tau_k, \quad (6)$$

где  $\tau_k$  – время жизни состояния « $k$ ».

Выражение для  $F_k$  в случае, если состояние « $k$ » возбуждается непосредственно электронным ударом из основного энергетического состояния частицы, можно записать через концентрацию частиц в этом состоянии  $N_0$ , концентрацию электронов  $n_e$  и константу возбуждения данного состояния  $K_{0k}$ , зависящую от температуры электронов и параметров квантового перехода « $0$ » → « $k$ »:

$$F_k = n_e N_0 K_{0k}. \quad (7)$$

Диаграмма энергетических уровней атомарной ртути, пары которой наиболее широко используются в газоразрядных источниках света, и возможные квантовые излучательные переходы между уровнями показаны на рис. 2.

## 5. ГИС (ЛАМПЫ) НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПАРАХ РТУТИ

### 5.1. Описание лампы

Для ГИС предпочтительно использовать дуговой режим работы катода с малым значением величины катодного падения, что по сравнению с тлеющим разрядом, значительно повышает КПД лампы. Поэтому в подавляющем большинстве ГИС с дуговым разрядом используются горячие катоды, электронная эмиссия которых является главным образом термоэлектронной эмиссией (ТЭЭ), повышенной за счет ускоряющего поля у поверхности катода. Как известно, плотность тока термоэлектронной эмиссии резко возрастает с ростом температуры поверхности катода и с уменьшением работы выхода  $e\varphi_k$ .

Активная среда ртутной лампы низкого давления в рабочем режиме – плазма ПС разряда в смеси из аргона при давлении в несколько Тор и паров ртути при давлении около 20 мТор. Пары образуются при нагреве металлической ртути, содержащейся внутри лампы, за счет «саморазогрева» лампы протекающим током разряда со сред-

ней плотностью в сечении ПС  $j = 10 \dots 40 \text{ мА} \cdot \text{см}^{-2}$ , напряженность электрического поля ПС составляет  $E_z = 1 \dots 1,5 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$ .

Питание ГИС с парами ртути осуществляется переменным током частотой от 50 Гц (промышленная частота) до нескольких десятков килогерц (инверторные схемы с преобразованием частоты в так называемых «энергосберегающих» лампах), т. е. через каждые полпериода функции электродов меняются, и разряд «перезажигается» в обратном направлении. При этом балластным элементом служит либо дроссель, либо выходная обмотка силового трансформатора, чем исключаются активные потери в балласте и повышается КПД источника света. Электрод, который в данные полпериода является катодом, работает в дуговом режиме с термоэлектронной эмиссией. Поэтому в лампе используются активированные барием (с пониженным значением  $e\varphi_k$ ) вольфрамовые электроды в виде «триспирали», нагрев которых в дуговом разряде до необходимой температуры осуществляется за счет энергии, выделяемой на электродах в процессе самого разряда (*самонакаливающиеся* электроды) при величине катодного падения в несколько десятков вольт, что обеспечивает в общей сложности высокий электрический КПД лампы.

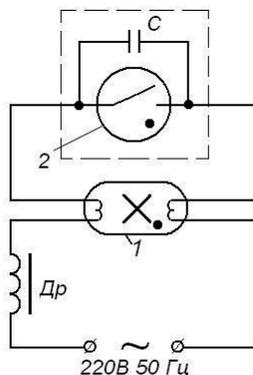
УФ-излучение паров ртути при низком давлении (с  $\lambda = 253,5 \text{ нм}$  и  $\lambda = 184,9 \text{ нм}$ ) может выходить из ПС через прозрачную стенку лампы (в так называемой «бактерицидной» ртутной лампе), либо осуществлять накачку слоя люминофора, покрывающего внутреннюю поверхность стенки, с последующим «переизлучением» в видимой области спектра (в люминесцентной ртутной лампе). Простейшая схема включения лампы в сеть переменного тока промышленной частоты со «стартерным пуском» показана на рис. 3.

### *5.2. Стартерный пуск (зажигание) лампы, питаемой переменным током*

Для облегчения зажигания ламп, работающих от сети 220 В без дополнительной трансформации напряжения, широко применяется предварительный нагрев электродов до температуры, обеспечивающей ТЭЭ, достаточную для зажигания разряда при более низких напряжениях (кривая 2 на рис. 1). При «стартерном пуске» нагрев

Рис. 3. Схема включения ртутной лампы низкого давления, питаемой от сети переменного тока промышленной частоты, со «стартерным пуском».

$l$  – лампа,  $2$  – стартер тлеющего разряда с биметаллическим электродом,  
 $Dr$  – балластный дроссель,  $C$  – пусковой конденсатор



электродов лампы осуществляется путем их кратковременного включения в цепь тока. При последующем размыкании контакта возникает импульс напряжения, превышающий напряжение сети. Этот импульс, приложенный к лампе с еще не успевшими остыть электродами, и зажигает в ней разряд. Стартерный пуск, т. е. зажигание самостоятельного дугового разряда в лампе через несамостоятельный дуговой разряд, осуществляется с помощью так называемого стартера тлеющего разряда и реактивных элементов в цепях питания (схема на рис. 3) и состоит из трех фаз:

1) *подготовительной*, начинающейся в момент подачи напряжения питания, что приводит к возникновению тлеющего разряда в стартере, разогреву и изгибу биметаллического электрода стартера. Данная фаза заканчивается в момент замыкания электродов стартера;

2) фазы *разогрева электродов лампы экстра-током*, протекающим по цепи: балластный дроссель–электроды лампы–замкнутые электроды стартера. В течение этой фазы (продолжающейся около секунды) электроды лампы нагреваются, а электроды стартера – остывают, и данная фаза заканчивается в момент размыкания электродов стартера;

3) фазы *зажигания лампы*, начинающейся в момент размыкания электродов стартера при разогретых электродах лампы, когда возникает короткий (длительностью около 1 мс) импульс высокого напряжения в последовательном колебательном контуре, образован-

ном конденсатором  $C$  и балластным дросселем  $Dp$ . Это напряжение превышает напряжение зажигания лампы и, поскольку электроды лампы предварительно разогреты экстратоком и имеет место ТЭЭ, то возникает несамостоятельный дуговой разряд, переходящий в самостоятельный с саморазогревающимися электродами. После зажигания лампы напряжение на ней становится ниже  $U_{заж}$  стартера.

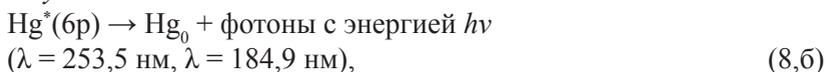
### 5.3. Возбуждение спектра разряда

При горении разряда рабочая температура электродов лампы, необходимая для поддержания ТЭЭ, поддерживается за счет их «саморазогрева» бомбардировкой ионами газа, и разряд становится самостоятельным дуговым с ТЭЭ и малой величиной катодного падения потенциала, необходимой для поддержания температуры электродов. Также за счёт саморазогрева, температура стенок лампы (и металлической ртути) постепенно увеличивается и достигает оптимального значения, что обеспечивает оптимальное давление паров ртути, а также максимальную скорость накачки и интенсивность излучения (рис. 4). В самом деле, кинетика процессов в лампе, приводящих к излучению, может быть описана следующими двумя реакциями:

*накачка* (ударное возбуждение атома ртути):



*излучение:*



где  $\text{Hg}_0$  – атом ртути в основном энергетическом состоянии с электронной конфигурацией  $(1s^2 \dots 5d^{10})6s^2$ ,  $\text{Hg}^*(6p)$  – возбужденный атом ртути в состоянии с электронной конфигурацией  $(1s^2 \dots 5d^{10})6s6p$ ;  $e(\text{ПС})$  – электрон, ускоренный в электрическом поле ПС и обладающий энергией, равной или превышающей энергию возбуждения  $\epsilon^*$  состояния  $\text{Hg}^*(6p)$ .

Запишем выражение для интенсивности излучения плазмы ПС на УФ-квантовых переходах  $6p \rightarrow 6s$  с длинами волн 253,5 нм и 184,9 нм –  $J$  через концентрацию возбужденных атомов ртути  $N(\text{Hg}^*6p)$  и скорость накачки  $F$  состояния  $\text{Hg}^*(6p)$ :

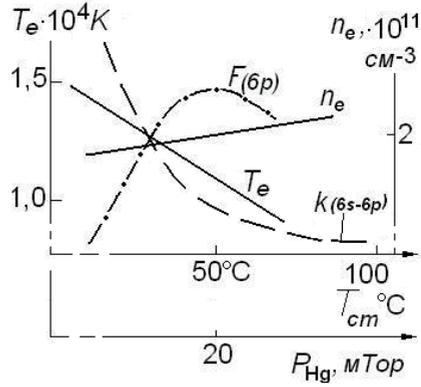


Рис. 4. Зависимости параметров плазмы ПС в ртутной лампе низкого давления от температуры стенки лампы (давления паров ртути) в газовой смеси

$$J(6p \rightarrow 6s) \propto h\nu \cdot N(Hg^* 6p) \propto h\nu \cdot F(6p), \quad (9)$$

где  $N(Hg^* 6p) = F(6p) \cdot \tau^{-1}$ .

Выражение для скорости накачки состояния  $Hg^*(6p)$  будет:

$$F(6p) = n_e N(Hg_0) K(6s - 6p), \quad (10)$$

где  $N(Hg_0)$  и  $n_e$  – концентрации атомов ртути в основном энергетическом состоянии и электронов соответственно,  $K(6s - 6p)$  – константа ударного возбуждения  $Hg^*(6p)$  из  $Hg_0(6s)$ , зависящая от электронной температуры  $T_e$  в смеси, а также от параметров квантового перехода  $6s \rightarrow 6p$ .

Значение константы  $K(6s - 6p)$  можно вычислить, используя полуэмпирическое выражение:

$$K(6s \rightarrow 6p) = 2,5 \cdot 10^8 \cdot Q^{\max} (\varepsilon^*)^{1/2} Ry^{-1/2} \exp\left\{-\frac{\varepsilon^*}{kT_e}\right\} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}, \quad (11)$$

где  $Q^{\max}$  – эффективное сечение возбуждения электронным ударом уровня  $6p$  из  $6s$ ;  $Ry = 13,6$  эВ – постоянная Ридберга.

Значение электронной температуры  $T_e$ , входящей в (11), находится из решения уравнения диффузии с источниками, описывающее процессы появления и разрушения заряженных частиц в плазме ПС, которое для цилиндрического ПС имеет вид:

$$\Delta_r N_i + \frac{v_{0i}}{D_a} n_e = 0, \quad (12)$$

где  $\Delta_r$  – радиальная часть оператора Лапласа,  $v_{0i}$  – частота ионизации газа с энергией ионизации  $\varepsilon_i$ ,  $D_a$  – коэффициент амбиполярной диффузии.

С учетом нейтральности плазмы ( $N_i = n_e$ ) из решений уравнения (12):

$$N_i(r) = N_i(0)J_0\left(r\sqrt{\frac{v_{0i}}{D_a}}\right) \text{ и } n_e(r) = n_e(0)J_0\left(r\sqrt{\frac{v_{0i}}{D_a}}\right) \quad (13)$$

можно получить *условие самоподдержания (независимости) ПС* в виде:

$$v_{0i} = 2,405^2 \frac{D_a}{R^2}, \quad (14a)$$

откуда, разделяя переменные получим

$$\frac{v_{0i}}{D_a}(T_e, \varepsilon_i) = \psi(cpR) \text{ или } \frac{T_e}{\varepsilon_i} = f(cpR). \quad (14б)$$

Из (14) численным методом находят значение электронной температуры  $T_e$ , обеспечивающей необходимую частоту ионизации. Оказывается, что для большинства газов при конкретном для каждого газа значении константы  $c$  и энергии его ионизации  $\varepsilon_i$ , зависимость (14б) имеет одинаковый вид, показанный на рис. 5. Видно, что в одном и том же газе  $T_e$  снижается с ростом произведения ( $pR$ ).

*Методика определения  $T_e$  в ПС по заданным параметрам ПС при малом токе:*

Если заданы параметры разряда: род и давление газа, радиус ПС, то  $T_e$  можно найти, воспользовавшись рис. 5 в следующей последовательности:

а) находим значение ( $cpR$ ) с размерностью Тор·см (константу « $c$ » берем из [1]),

б) по графику на рис. 5б находим отношение  $T_e/\varepsilon_i$  и далее, зная энергию ионизации газа  $\varepsilon_i$ , – искомую величину  $T_e$  в Кельвинах (1 эВ = 11 600 К).

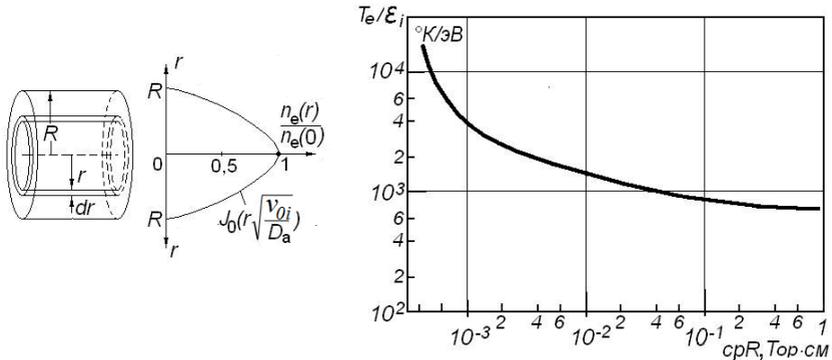


Рис. 5. Концентрация и температура электронов в плазме ПС в диффузионном режиме: а – распределение  $n_e$  по радиусу ПС; б – зависимость  $T_e/\epsilon_i = f(cpR)$  для определения электронной температуры  $T_e$

Зависимости параметров плазмы ПС ртутной лампы низкого давления от давления паров ртути (температуры стенки лампы) показаны на рис. 4. Видно, что скорость накачки уровня  $6p - F(6p)$ , так же как и интенсивность излучения на линиях 253,5 нм и 184,9 нм, максимальны при температуре  $T \approx 50^\circ\text{C}$ , что соответствует давлению паров ртути около 20 мТор. Начальный рост  $F(6p)$  определяется повышением концентрации атомов ртути при «саморазогреве» лампы, а насыщение и последующее снижение  $F(6p)$  при  $T > 50^\circ\text{C}$  определяется главным образом снижением константы возбуждения  $k(6s \rightarrow 6p)$  за счет снижения электронной температуры  $T_e$  в плазме ПС (см., рис. 4). Несмотря на то, что, как видно из (10), зависимость скорости накачки от  $n_e$  (и от плотности тока  $j$ ) близка к линейной, оптимальная величина  $j$  (и полного тока) разряда определяется оптимальным тепловым режимом лампы, а также её ресурсом и составляет ламп различных конструкций порядка  $j \sim 10 \dots 40 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ .

Температурный режим лампы зависит от вкладываемой активной мощности, внешних условий (температуры окружающей среды и др.), и, в свою очередь, определяет накачку рабочего перехода и интенсивность излучения.

Распределение интенсивности излучения лампы по спектру является её важной характеристикой. Это распределение можно характе-

ризовать так называемым «красным отношением»:

$$f_{кр} = \frac{J(610 - 720 \text{ нм})}{J(380 - 780 \text{ нм})}, \quad (15)$$

где  $J(610-720 \text{ нм})$  – интенсивность излучения лампы в красной области спектра,  $J(380-780 \text{ нм})$  – интенсивность излучения лампы во всей видимой области спектра.

#### 5.4. Работа лампы на переменном токе

Стабилизация разряда при помощи резистора связана с большими потерями энергии. При работе на переменном токе в качестве стабилизирующего элемента применяют главным образом индуктивные сопротивления – дроссели (см. рис. 3). Поскольку активное сопротивление дросселя, как правило, много меньше его индуктивного сопротивления, активные потери мощности в дросселе оказываются небольшими. При этом появляется сдвиг фаз между напряжением сети и током лампы (рис. 6). Главные же преимущества использования индуктивного балласта заключаются в следующем. К моменту прохождения тока через нуль напряжение сети уже имеет некоторую величину (с обратным знаком), и, таким образом, разряд «перезажигается» в обратном направлении, едва успев погаснуть. Благодаря этому уменьшаются «паузы» тока и излучения, и обеспечиваются благоприятные условия для работы катодов.

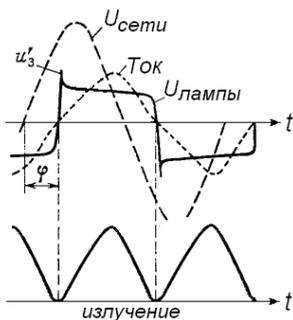


Рис. 6. Типичные временные зависимости электрических характеристик и интенсивности излучения лампы при питании от сети переменного тока промышленной частоты

Связь между мгновенным значением тока в цепи и её параметрами дается уравнением

$$U_0 e^{j\omega t} = L \frac{di}{dt} + iR + U(i), \quad (16)$$

решив которое можно найти зависимость  $i(t)$ .

## 6. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Экспериментальная установка включает:

- стенд для измерения параметров газоразрядной ртутной лампы при её питании переменным током промышленной частоты с гальванической развязкой от сети;
- двухлучевой осциллограф;
- фотокамеру для регистрации осциллограмм с экрана осциллографа;
- набор светофильтров – цветных оптических стекол со стандартизованным коэффициентом пропускания (поглощения) в различных интервалах длин волн видимого спектра.

Схема стенда показана на рис. 7. Стенд состоит из:

- газоразрядной ртутной лампы низкого давления;
- балластного дросселя с индуктивностью  $L_0$ ;
- стартера тлеющего разряда  $СТлР$  для пуска лампы;
- резистора  $R$  номиналом 150 Ом – датчика тока разряда (с него снимается сигнал напряжения, пропорциональный току разряда в лампе);
- фотодиода  $\PhiД$  с известной спектральной характеристикой для измерений интенсивности излучения лампы,
- одного (или двух) входного трансформатора  $Тр$  с коэффициентом трансформации  $K = 1$ , обеспечивающего гальваническую развязку стенда от сети.

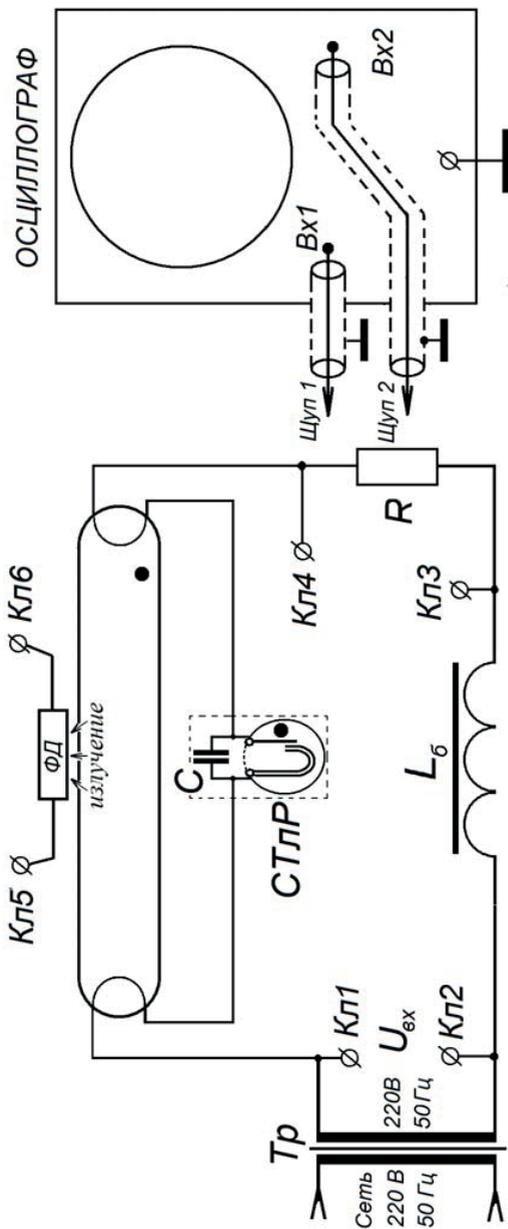


Рис. 7. Схема оборудования, используемого в работе (стенд с газоразрядной лампой низкого давления и осциллограф)

## 7. ПОДГОТОВКА К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

- изучить правила техники безопасности при работе с электроустановками;
- познакомиться с принципом действия, техническими характеристиками используемых электро- и радиоизмерительных приборов и инструкцией по их эксплуатации.

## 8. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### ВНИМАНИЕ

Работу выполнять только под руководством и при непосредственном участии преподавателя

В процессе работы категорически запрещается производить какие-либо переключения приборов стенда, не предусмотренные данным пособием

Каждый раз перед подачей напряжения убедиться, закрыты ли клеммы стенда изоляторами

1. **Отключить щит электропитания.**
2. **Заземлить корпуса стенда и осциллографа, соединив их с клеммой заземления на щите электропитания.**
3. Выполнить измерения временной зависимости падения напряжения на балластном дросселе  $U_L(t)$  одновременно с измерением зависимости от времени входного напряжения  $U_{ex}(t)$ , для этого:
  - ПРОВЕРИТЬ ОТКЛЮЧЁН ЛИ ЩИТ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ
  - подключить первичную обмотку трансформатора  $Tr$  к сетевым клеммам 220 В 50 Гц, ;
  - включить осциллограф и добиться наличия на его экране развертки с двумя лучами;
  - подключить разъёмы кабелей со щупами к входам 1-го и 2-го каналов на осциллографе;
  - соединить клемму «Кл 2» с клеммой **ЗАЗЕМЛЕНИЯ** на щите электропитания;

– подключить кабель от 1-го канала осциллографа к клеммам «Увх» стенда, причем оплетку кабеля подключить к клемме «Кл 2», а потенциальный вывод шупа кабеля – к клемме «Кл 1»;

– подключить кабель от 2-го канала осциллографа для измерений напряжения на балластном дросселе  $L_b - U_L(t)$  – к соответствующим клеммам стенда, причем оплетку кабеля подключить к клемме «Кл 2», а потенциальный вывод шупа кабеля – к клемме «Кл 3»;

– включить щит электропитания и пронаблюдать процедуру (этапы) «стартерного пуска» (зажигания) лампы;

– переключателями чувствительности входных усилителей осциллографа добиться необходимого отклонения (размаха) лучей по вертикали;

– с помощью цифровой камеры сфотографировать (или зарисовать в рабочую тетрадь) с экрана осциллографа осциллограммы сигналов входного напряжения  $U_{ax}(t)$  и напряжения на балластном дросселе  $U_L(t)$ ;

– вывести изображения сигналов на компьютер;

– определить по осциллограммам сдвиг по фазе напряжения на балластном дросселе  $U_L(t)$  относительно входного напряжения  $U_{ax}(t)$ ;

– **ОТКЛЮЧИТЬ ЩИТ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ и отсоединить входные кабели-шупы осциллографа от клемм стенда.**

4. Выполнить измерения временной зависимости тока разряда  $I(t)$  одновременно с измерением зависимости от времени падения напряжения на балластном дросселе  $U_L(t)$ , для этого:

– отключить **ЗАЗЕМЛЯЮЩИЙ** провод щита электропитания от клеммы «Кл 2» и присоединить его к клемме «Кл 3»;

– подключить кабель от 1-го канала осциллографа для измерений тока  $I$  к соответствующим клеммам стенда, причем оплетку кабеля – к клемме «Кл 3», а потенциальный вывод шупа кабеля – к клемме «Кл 4»;

– подключить кабель от 2-го канала осциллографа для измерений напряжения на балластном дросселе  $L_b - U_L(t)$  – к соответствующим клеммам стенда, причем оплетку кабеля подключить к клемме «Кл 3», а потенциальный вывод шупа кабеля – к клемме «Кл 2»;

– включить щит электропитания и пронаблюдать процедуру (этапы) «стартерного пуска» (зажигания) лампы;

- переключателями чувствительности входных усилителей осциллографа добиться необходимого отклонения (размаха) лучей по вертикали;
- с помощью цифровой камеры сфотографировать (или зарисовать в рабочую тетрадь) с экрана осциллографа осциллограммы сигналов тока  $I(t)$  и напряжения на балластном дросселе  $U_L(t)$ ;
- поставив потенциометр входного усилителя 1-го канала осциллографа в положение «калибровано», найти амплитудное значение тока разряда;
- вывести изображения сигналов на компьютер;
- определить по осциллограммам сдвиг по фазе тока  $I(t)$  и напряжения на балластном дросселе  $U_L(t)$ ;
- **ОТКЛЮЧИТЬ ЩИТ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ и отсоединить входные кабели-щупы осциллографа от клемм стенда.**

5. Выполнить измерения зависимости от времени тока разряда  $I(t)$  одновременно с измерением зависимости от времени падения напряжения на лампе  $U_{\text{л}}(t)$ , для этого:

- отключить **ЗАЗЕМЛЯЮЩИЙ** провод щита электропитания от клеммы «Кл 3» и присоединить его к клемме «Кл 4»;
- подключить кабель от 1-го канала осциллографа для измерений тока  $I(t)$  к соответствующим клеммам стенда, причем оплетку кабеля – к клемме «Кл 4», а потенциальный вывод щупа кабеля – к клемме «Кл 3»;
- подключить кабель от 2-го канала осциллографа для измерений падения напряжения на лампе  $U_{\text{л}}$  к соответствующим клеммам стенда, причем оплетку кабеля – к клемме «Кл 4», а потенциальный вывод щупа кабеля – к клемме «Кл 1»;
- включить щит электропитания и пронаблюдать процедуру (этапы) «стартерного пуска» (зажигания) лампы;
- переключателями чувствительности входных усилителей осциллографа добиться необходимого отклонения (размаха) лучей по вертикали;
- с помощью цифровой камеры сфотографировать (или зарисовать в рабочую тетрадь) с экрана осциллографа осциллограммы сигналов тока  $I(t)$  и напряжения на лампе  $U_{\text{л}}(t)$ ;
- поставив потенциометр входного усилителя 2-го канала осцил-

логафа в положение «калибровано», найти амплитудное значение напряжения на лампе в момент «перезажигания» разряда в лампе через каждые полпериода, а также напряжения на лампе при максимальном значении тока;

– вывести изображения сигналов на компьютер;

– **ОТКЛЮЧИТЬ ЩИТ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ и отсоединить входные кабели-щупы осциллографа от клемм стенда.**

6. Выполнить измерения зависимости от времени интенсивности излучения лампы  $J(t)$  одновременно с измерением зависимости от времени тока разряда  $I(t)$ , для этого :

– убедиться в том, что **ЗАЗЕМЛЯЮЩИЙ** провод присоединён к клемме «Кл 4»;

– убедиться в том, что кабель от 1-го канала осциллографа подключён для измерений тока  $I$  к соответствующим клеммам стенда, причем оплетка кабеля должна быть подключена к клемме «Кл 4», а потенциальный вывод щупа кабеля – к клемме «Кл 3»;

– подключить кабель от 2-го канала осциллографа для измерений интенсивности светового потока  $J$  лампы к клеммам «Кл 5» и «Кл 6»;

– включить щит электропитания;

– после зажигания лампы переключателем чувствительности входного усилителя 2-го канала осциллографа увеличить чувствительность и добиться необходимого отклонения по вертикали луча, показывающего интенсивность излучения;

– с помощью цифровой камеры сфотографировать (или зарисовать в рабочую тетрадь) с экрана осциллографа осциллограммы сигналов тока  $I(t)$  и интенсивности излучения  $J(t)$ ;

– **ОТКЛЮЧИТЬ ЩИТ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ и отсоединить входные кабели-щупы осциллографа от клемм стенда.**

7. Выполнить измерения временной зависимости падения напряжения на балластном дросселе  $U_L(t)$  одновременно с измерением зависимости от времени напряжения на лампе  $U_L(t)$ , для этого:

– **ПРОВЕРИТЬ ОТКЛЮЧЁН ЛИ ЩИТ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ.**

– убедиться в том, что **ЗАЗЕМЛЯЮЩИЙ** провод щита электропитания присоединён к клемме «Кл 4»;

– подключить кабель от 1-го канала осциллографа для измерений напряжения на балластном дросселе  $U_L(t)$ , причем оплетку кабеля подключить к клемме «Кл 4», а потенциальный вывод щупа кабеля – к клемме «Кл 2»;

– подключить кабель от 2-го канала осциллографа для измерений напряжения на лампе  $U_{л}(t)$  – к соответствующим клеммам стенда, причем оплетку кабеля подключить к клемме «Кл 4», а потенциальный вывод щупа кабеля – к клемме «Кл 1»;

– включить щит электропитания и пронаблюдать процедуру (этапы) «стартерного пуска» (зажигания) лампы;

– переключателями чувствительности входных усилителей осциллографа добиться необходимого отклонения (размаха) лучей по вертикали;

– с помощью цифровой камеры сфотографировать (или зарисовать в рабочую тетрадь) с экрана осциллографа осциллограммы сигналов напряжения на лампе  $U_{л}(t)$  и напряжения на балластном дросселе  $U_L(t)$ ;

– вывести изображения сигналов на компьютер;

– определить по осциллограммам сдвиг по фазе напряжения на балластном дросселе  $U_L(t)$  относительно напряжения на лампе  $U_{л}(t)$ ;

– **ОТКЛЮЧИТЬ ЩИТ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ и отсоединить входные кабели-щупы осциллографа от клемм стенда.**

8. Выведите фото осциллограмм на компьютер, совместите сигналы тока полученные в пунктах 4, 5 и 6 и получите таким образом на одних осях осциллограммы тока  $I(t)$ , напряжения на лампе  $U_{л}(t)$  интенсивности излучения  $J(t)$ ;

– определите по осциллограммам сдвиг по фазе тока  $I(t)$ , напряжения на лампе  $U_{л}(t)$  и интенсивности излучения  $J(t)$ ;

– определить по осциллограммам относительные сдвиги по фазе тока  $I(t)$ , напряжения на лампе  $U_{л}(t)$ , входного напряжения  $U_{ex}(t)$  и напряжения на дросселе  $U_L(t)$ ;

9. Объясните ход всех полученных осциллограмм.

10. Воспользовавшись осциллограммами тока  $I(t)$  и напряжения на лампе  $U_{л}(t)$  постройте в относительном масштабе вольт-амперную характеристику лампы, и определите значение статического сопротивления разряда при максимальном токе.

11. Воспользовавшись осциллограммами, определите время паузы у излучения при «перезажигании» разряда.

12. Воспользовавшись калиброванными фильтрами и кривой чувствительности фотодиода определите для исследуемой лампы значение «красного отношения».

13. Воспользовавшись методикой, изложенной в разделе 5.3 и графиком на рис. 5 найдите значение электронной температуры в плазме ПС ртутной люминесцентной лампы, считая, что в оптимальном тепловом режиме лампы по сравнению с разрядом в холодной лампе (т. е. в аргоне без паров ртути) электронная температура снижается на 20 %. Параметры лампы:  $R = 2$  см,  $P(\text{Ar}) = 5$  Тор, для аргона: значение константы  $c = 4 \cdot 10^{-2}$ , энергия ионизации  $\varepsilon_i = 15,8$  эВ.

## 9. УКАЗАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЁТА

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- название и цель лабораторной работы,
- схему лабораторной установки,
- схему стенда для измерения параметров элементов цепи,
- перечисление и краткую характеристику использованных в работе методов исследований,
- осциллограммы и результаты измерений,
- выводы по работе (письменно).

## 10. ТЕСТ САМОКОНТРОЛЯ

(прочитайте вопрос и выберите из нескольких предложенных правильный, с Вашей точки зрения, ответ; его номер сравните с номером в списке правильных ответов в разделе 12)

1. Закон Пашена связывает:

- А.  $U_{заж}$  с  $p$ ;      Б. величину тока с величиной  $U_{заж}$ ;  
В.  $U_{заж}$  с  $(pL)$ ;    Г.  $U_{заж}$  с ионизационным коэффициентом.

2. Закон Пашена представляет собой:

- А. монотонно возрастающую функцию;  
Б. функцию с экстремумом (максимумом);  
В. монотонно убывающую функцию;  
Г. функцию с экстремумом (минимумом).

3. Электронная лавина развивается в направлении:

- А. от катода к аноду;      Б. в обоих направлениях;  
В. от анода к катоду;      Г. в направлении поля

4. Разряд, для горения которого необходимы дополнительные источники ионизации, называется:

- А. самостоятельным;      Б. несамостоятельным;  
В. Пристеночным;      Г. импульсным.

5. Самостоятельный разряд возникает когда:

- А. имеется только электрическое поле;  
Б. имеется электрическое поле и подогрев катода;  
В. имеются электрическое и магнитное поля;  
Г. имеется электрическое поле и дополнительный источник ионизации.



11. Функция стартера тлеющего разряда при зажигании лампы низкого давления напряжением промышленной частоты состоит в:

- А. предварительном нагреве электродов;
- Б. предварительном нагреве электродов и создании импульса напряжения;
- В. нагреве всей лампы;
- Г. «шунтировании» лампы в процессе работы.

12. При повышении температуры лампы низкого давления электронная температура в плазме ПС:

- А. снижается;                      Б. возрастает;
- В. не изменяется;                Г. возрастает, а затем снижается.

13. При повышении температуры лампы низкого давления константа возбуждения энергетических уровней электронным ударом  $k$ :

- А. возрастает;                      Б. снижается;
- В. не изменяется;                Г. возрастает, а затем снижается.

14. При повышении температуры лампы низкого давления концентрация электронов плазмы ПС:

- А. возрастает;                      Б. снижается;
- В. не изменяется;                Г. снижается, а затем растет.

15. При повышении температуры лампы низкого давления скорость возбуждения энергетических уровней электронным ударом  $F$ :

- А. возрастает;                      Б. снижается;
- В. не изменяется;                Г. возрастает, а затем снижается.

16. Использование в цепи питания газоразрядной лампы вместо резистора – балластного дросселя, приводит к:

- А. повышению КПД лампы;
- Б. сглаживанию «пульсаций» тока;
- В. снижению активных потерь;
- Г. уменьшению реактивной составляющей тока.

17. Функция люминофорного покрытия изнутри колбы ртутной лампы состоит в:

- А. дополнительном нагреве лампы;
- Б. охлаждении лампы
- В. преобразовании УФ-излучения плазмы в видимое излучение;
- Г. преобразовании видимого излучения плазмы в УФ-излучение.

18. С точки зрения воздействия на организм человека крайне вредным является:

- А. излучение Hg-лампы низкого давления без люминофорного покрытия;
- Б. излучение Na-лампы высокого давления;
- В. излучение Hg-лампы низкого давления с люминофорным покрытием;
- Г. излучение Hg-лампы высокого давления с люминофорным покрытием.

## 11. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Иванов И. Г.* Газовый разряд и его применение в фотонике: учебное пособие. – Ростов-на-Дону: Изд. ЮФУ, 2009. – 96 с.
2. *Попов В. П.* Основы теории цепей. – М.: Высшая школа, 2007.
3. *Фриск В. В.* Основы теории цепей. – М.: РадиоСофт, 2002.
4. *Рохлин Г. Н.* Разрядные источники света. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 720 с.

## 12. ПРАВИЛЬНЫЕ ОТВЕТЫ К ТЕСТОВЫМ ВОПРОСАМ САМОКОНТРОЛЯ

1В; 2Г; 3В; 4Б; 5А, 6В; 7А, 8В, 9А, 10А, 11Б,  
12А; 13Б, 14А, 15Г, 16А, 17В, 18А