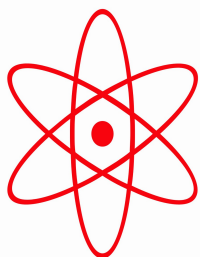


НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО ПО ВЫПОЛНЕНИЮ
ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ



ФЭЛ-16

ИЗУЧЕНИЕ РЕЛАКСАЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ

Тула, 2010 г

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА.

ИЗУЧЕНИЕ РЕЛАКСАЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ

Цель работы: создание релаксационных колебаний при помощи полупроводникового разрядника, изучение основных характеристик релаксационных колебаний.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ.

МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ РЕЛАКСАЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ

Релаксационные колебания в схеме с газовым разрядником (тиратроном, неоновой лампой).

Простейший тиратрон - это трехэлектродная лампа, наполненная газом при низком давлении. Если анодное напряжение недостаточно для ионизации газа в нем, то ток через тиратрон подчиняется законам, справедливым для вакуумного триода. При повышении анодного напряжения до напряжения зажигания в тиратроне возникает дуговой разряд. Развитие дугового разряда происходит с нарастающей скоростью - лавиной. Однако для возникновения лавины необходимо наличие некоторой определенной начальной ионизации. Когда анодное напряжение близко к напряжению зажигания, в тиратроне существует предразрядный ток. Этот ток создается за счет электронной эмиссии катода, а также за счет начальной ионизации газа - тихий или тлеющий разряд.

Так как электрическое поле в тиратроне определяется не только его анодным напряжением, но и его сеточным напряжением, то и напряжение зажигания U_3 зависит от сеточного напряжения U_c тиратрона. Кривая зависимости напряжения зажигания от сеточного напряжения называется пусковой характеристикой тиратрона. Она имеет вид, показанный на Рис.1.

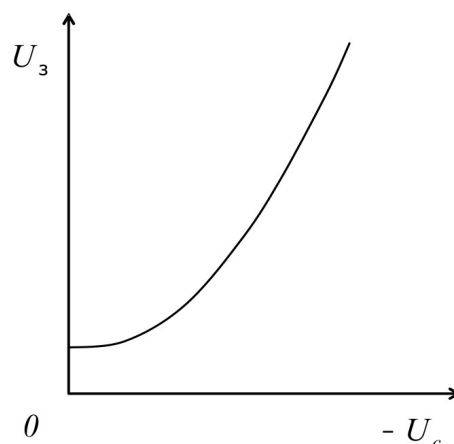


Рис.1. Пусковая характеристика тиратрона.

Анодное напряжение «горящего» тиратрона U_T не сильно отличается от потенциала ионизации газа и почти не зависит от тока через тиратрон. В процессе зажигания анодное напряжение падает от напряжения зажигания U_3 до значения U_T . Следовательно, сопротивление тиратрона в стадии зажигания отрицательное, а в стадии горения близко к нулю.

Анодное напряжение, при котором в тиратроне прекращается дуговой разряд, называется напряжением гашения. Напряжение гашения слабо зависит от сеточного напряжения. Это объясняется тем, что при наличии разряда ионный слой, создающийся у поверхности отрицательно заряженных проводников сетки, экранирует их от окружающего поля. При погасании тиратрон еще некоторое время сохраняет способность проводить ток за счет оставшихся после разряда ионов. Процесс исчезновения такой проводимости называется **деионизацией** тиратрона.

Токковая проводимость тиратрона за счёт оставшихся после разряда ионов способна вызвать так называемые релаксационные колебания напряжения на конденсаторе, который входит в состав изображённой на Рис. 2а схемы, использующейся для изучения релаксационных колебаний.

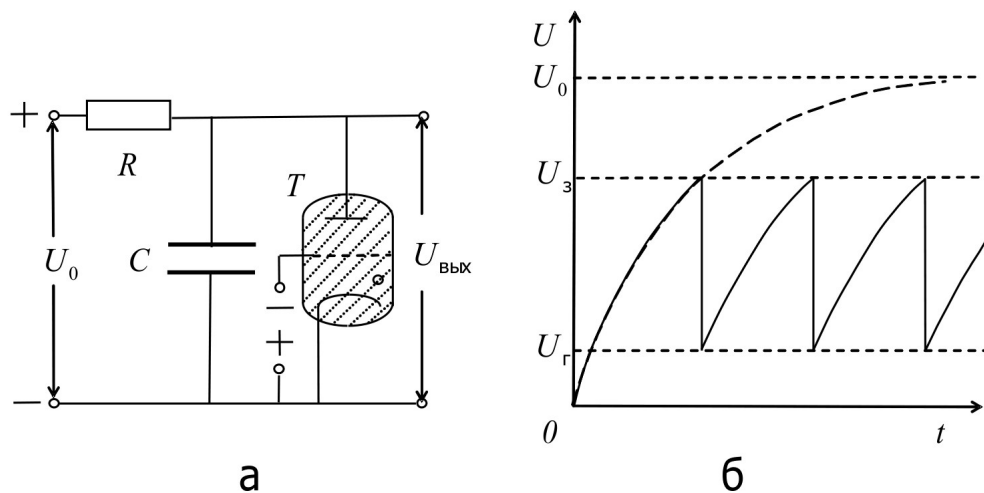


Рис.2. Схема генератора релаксационных колебаний на тиратроне (а); характер изменения напряжения в схеме (б)

Принцип действия генератора релаксационных колебаний на тиратроне состоит в следующем: при подключении к схеме источника постоянного электрического напряжения U_n конденсатор C заряжается через сопротивление R . Когда напряжение на конденсаторе U_c станет равным напряжению зажигания U_3 , тиратрон зажжется, и конденсатор практически мгновенно разрядится через него до напряжения гашения U_T . При этом тиратрон погаснет, и конденсатор снова станет заряжаться. Описанный процесс будет повторяться периодически. График зависимости напряжения на конденсаторе от времени представлен на Рис. 2б.

Колебания подобного вида, сильно отличающиеся по своей форме от гармонических, часто называют срывными или релаксационными.

Для возникновения и существования колебаний в рассмотренной схеме необходимо выполнение следующих условий (условий самовозбуждения):

$$U_3 < U_0 \quad U_0 - I_0 R < U_r,$$

где I_0 - величина установившегося тока через сопротивление R при горящем тиратроне, U_0 - напряжение источника питания.

Первое из этих условий очевидно. Второе условие равносильно утверждению, что в генераторе не может существовать такой стационарный режим, при котором напряжение на конденсаторе было бы выше напряжения гашения тиратрона. Последнее условие для генераторов с тиратроном всегда выполняется, так как сопротивление горящего тиратрона весьма мало. Период колебаний генератора τ , как видно из Рис. 2б, равен времени зарядки конденсатора C через сопротивление R от напряжения U_r до напряжения U_3 .

Для вычисления периода напишем второе правило Кирхгофа для цепи генератора при погашенном тиратроне:

$$U_0 = IR + U_c = RC \frac{dU_c}{dt} + U_c \quad (1.1)$$

Преобразовав это выражение, получим:

$$-RC \frac{d(U_0 - U_c)}{U_0 - U_c} = dt \quad (1.2)$$

Проинтегрировав в пределах от U_r до U_3 , получим выражение для периода:

$$\tau = RC \ln \left(\frac{U_0 - U_r}{U_0 - U_3} \right) \quad (1.3)$$

Следует отметить, что полученная формула является неточной. У реальных генераторов период всегда несколько больше вычисленного (расхождение может доходить до 15-20%). Такое расхождение объясняется тем, что при вычислении периода не были учтены предразрядные токи тиратрона. Действительно, когда напряжение на конденсаторе становится близким к напряжению зажигания, часть тока, проходящего через сопротивление R , ответвляется через тиратрон (предразрядный ток) и зарядка конденсатора замедляется.

Кроме того, на величине периода колебаний сказывается также и то, что при релаксационных колебаниях разрядка конденсатора происходит до напряжения более низкого, чем напряжение гашения тиратрона, определенное из измерений в статическом режиме.

Наряду с трёхэлектродными лампами, содержащим управляющий электрод, используют также двухэлектродные газонаполненные лампы либо разрядники. Отличие заключается лишь в том, что в двухэлектродном разряднике напряжение зажигания (пробоя) фиксировано, в трехэлектродной лампе, как было сказано выше, им можно управлять, подавая определенный потенциал на сетку лампы.

Типичная схема релаксационного генератора на неоновой двухэлектродной лампе (разряднике) показана на рис. 3 и практически не отличается от схемы рис. 2а, а физические процессы полностью идентичны.

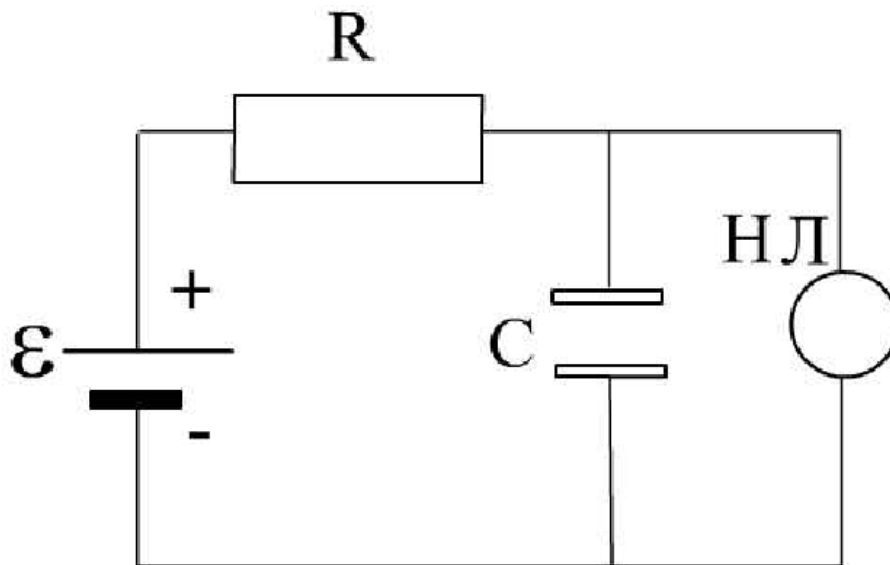


Рис. 3. Схема генератора релаксационных колебаний на двухэлектродной неоновой лампе (разряднике).

Зависимость тока от напряжения для газоразрядной лампы не подчиняется закону Ома и характеризуется рядом особенностей при малых напряжениях (идеализированная характеристика изображена на рис. 4). При напряжениях $U < U_3$ лампа не пропускает тока (не горит). Ток в лампе возникает только в том случае, когда напряжение между электродами лампы достигает напряжения зажигания U_3 . При этом величина тока скачком устанавливается равной I_1 , которая при дальнейшем увеличении напряжения U растет по закону, близкому к линейному. При уменьшении напряжения на горячей лампе до U_3 лампа еще не гаснет, и сила тока продолжает уменьшаться. Лампа перестает пропускать ток лишь при напряжении гашения $U_Г$, которое обычно существенно ниже U_3 . Сила тока при этом скачком падает от значения I_2 до нуля.

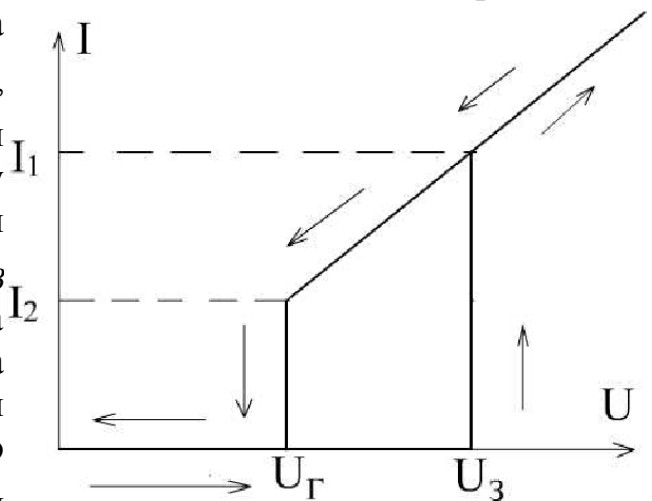


Рис. 4. Идеализированная ВАХ газоразрядной лампы.

Релаксационные генераторы на полупроводниковых разрядниках.

Основной недостаток описанных выше схем — относительно ненадежный элемент: газонаполненная лампа, срок службы которой в режиме постоянного перезажигания довольно ограничен. Поэтому для большей стабильности работы устройств сейчас используются полупроводниковые элементы.

В данной лабораторной установке в качестве полупроводникового разрядника используется динистор.

Динистор — это двухэлектродный вариант полупроводникового трехэлектродного прибора — тиристора. (Иногда тиристор называют управляемым динистором.) Динистор принадлежит классу полупроводниковых диодов с S-образной вольтамперной характеристикой. На такой характеристике имеется участок с отрицательной дифференциальной проводимостью, и благодаря этому при определенной конфигурации цепи энергия источника напряжения (постоянного во времени) может преобразовываться в энергию колебательного процесса. Напряжение на динисторе и ток, протекающий через него, принимают весьма специфическую форму, существенно отличную от синусоидальной.

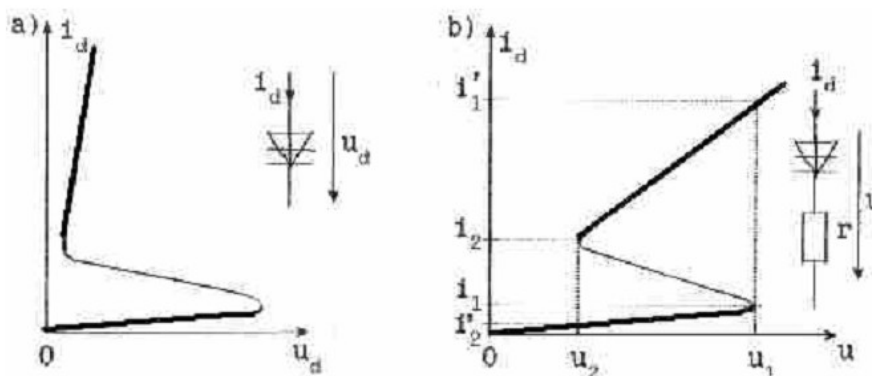


Рис. 5 Вольтамперные характеристики динистора (а) и составного двухполюсника (б). Толстыми сплошными линиями выделены восходящие ветви ВАХ.

Другой известный полупроводниковый диод, имеющий на вольтамперной характеристике участок с отрицательной дифференциальной проводимостью, — туннельный диод. Однако его характеристика является N-образной. Отметим, что вольтамперная характеристика с «падающей» ветвью присуща и некоторым другим приборам, функционирующим на иной физической основе. Это, например, рассмотренные выше газоразрядные лампы с тлеющим разрядом, инжекционно-полевой транзистор, диод Ганна.

Важной отличительной чертой вольт-амперной характеристики (ВАХ) динистора (рис. 5, а) является наличие падающего участка, в пределах которого дифференциальное сопротивление $\frac{dU_d}{dI_d}$ отрицательно. Именно то обстоятельство, что динистор относится к числу приборов с отрицательным

сопротивлением, дает возможность при соответствующих комбинациях напряжения питания E и параметров пассивных элементов цепи реализовать в установке режим релаксационных колебаний.

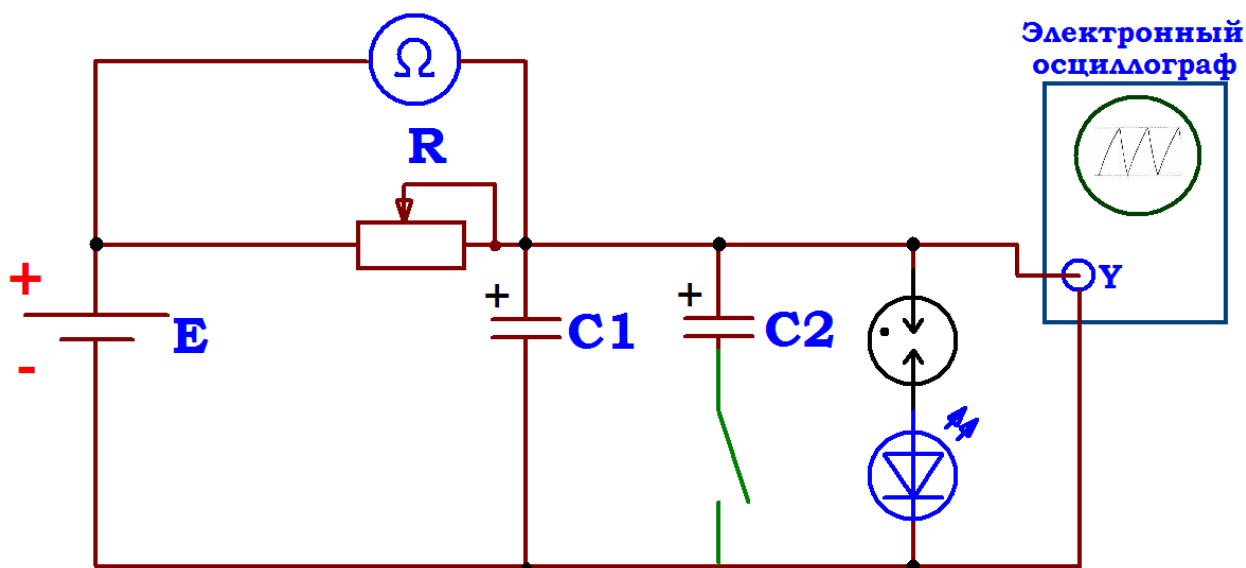


Рис. 6. Схема генератора релаксационных колебаний на разряднике (газовый либо полупроводниковый), реализованная в учебной установке.

Принципиальная схема для реализации релаксационных колебаний с помощью полупроводникового разрядника — динистора приведена на рис. 6.

Вольтамперная характеристика динистора либо полупроводникового разрядника, представленная на рис. 5 идентичная ВАХ газоразрядной лампы тлеющего разряда, при этом напряжение u_1 называют напряжением включения тиристора (разрядника) $U_{вкл}$ (аналог напряжения зажигания лампы), ток тиристора при этом скачком изменяется практически от близкого к нулю значения i_1 до тока i_2 .

Таким образом, если увеличивать напряжение источника питания, ток динистора увеличивается незначительно, пока это напряжение не приблизится к некоторому критическому значению, равному напряжению включения $U_{вкл}$. При напряжении $U_{вкл}$ в динисторе (разряднике) создаются условия для лавинного размножения носителей заряда в области коллекторного перехода. Происходит обратимый электрический пробой коллекторного перехода (точка u_1 на рис. 5). В n -области коллекторного перехода образуется избыточная концентрация электронов, а в p -области — избыточная концентрация дырок. С увеличением этих концентраций снижаются потенциальные барьеры всех переходов динистора. Возрастает инжекция носителей через эмиттерные переходы. Процесс носит лавинообразный характер и сопровождается переключением коллекторного перехода в открытое состояние. Рост тока происходит одновременно с уменьшением сопротивлений всех областей прибора. Поэтому увеличение тока через прибор сопровождается уменьшением

напряжения между анодом и катодом. На ВАХ этот участок обозначен тонкой линией. Здесь прибор обладает отрицательным дифференциальным сопротивлением.

После перехода коллекторного перехода в открытое состояние ВАХ имеет вид, соответствующий прямой ветви диода. После переключения напряжение на динисторе снижается до ~ 1 В. Если и дальше увеличивать напряжение источника питания или уменьшать сопротивление резистора R , то будет наблюдаться рост выходного тока, как в обычной схеме с диодом при прямом включении. При уменьшении напряжения источника питания восстанавливается высокое сопротивление коллекторного перехода – это напряжение аналогично напряжению гашения для газоразрядной лампы и обозначено на рис. 5 как u_2 .

Таким образом, анализ схемы рис. 6 электрически полностью эквивалентен анализу схем релаксационных генераторов на газовых разрядниках рис.2, 3.

Из этого следует, что основная расчетная формула для определения периода релаксационных колебаний эквивалентна формуле (1.3):

$$\tau = RC \ln \left(\frac{U_0 - U_2}{U_0 - U_3} \right)$$

При расчетах следует учесть, что для используемого в установке динистора напряжение «зажигания» (включения) $U_3 \approx 3,3$ В, напряжение питания схемы $U_0 \approx 5$ В, напряжение «гашения» для всех современных динисторов и разрядников составляет $U_2 \sim 0,1 - 0,3$ В. Таким образом $U_0 \gg U_2$ и формулу (1.3) для расчета периода можно упростить:

$$\tau = RC \ln \left(\frac{U_0}{U_0 - U_3} \right) \quad (1.4)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ. Приборы и оборудование.

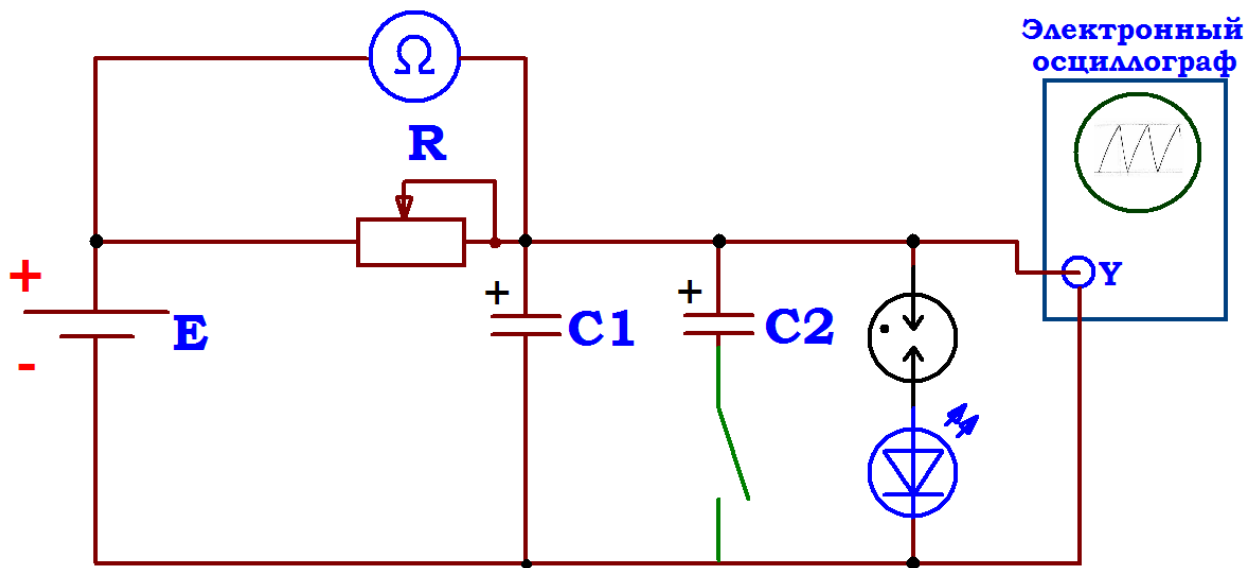


Рис. 7. Принципиальная электрическая блок-схема учебной установки.

Упрощенная блок — схема учебной установки для исследования релаксационных колебаний приведена на рис. 7.

Питание генератора осуществляется от выпрямителя E , с выходов которого на схему подаётся постоянное напряжение $U_0 \approx 5$ В.

В установке используются: осциллограф универсальный и электронный частотомер.

В установке предусмотрена возможность плавной регулировки активного сопротивления схемы R (ручка «СОПРОТИВЛЕНИЕ») и ступенчатого изменения ёмкости конденсатора. С помощью кнопки «ЁМКОСТЬ» в цепь параллельно включенной ёмкости $C1$ подключается ёмкость $C2$. При этом $C1 = 330$ нФ $= 330 \cdot 10^{-9}$ Ф $C2 = 10$ мкФ.

Таким образом, суммарная ёмкость цепи при отжатой кнопке «ЁМКОСТЬ» равна $C1 = 330$ нФ, при нажатой кнопке «ЁМКОСТЬ» общая ёмкость будет составлять $C1 + C2 = 10,33$ мкФ.

Значение установленного активного сопротивления генератора измеряется встроенным Омметром и выводится вместе с другими параметрами эксперимента на ЖКД LCD индикатор.

Сигнал с конденсаторов подаётся на резистивный вход Y электронного осциллографа для наблюдения формы и измерения периода импульсов.

Учебная установка снабжена микропроцессорной системой управления, измерения и контроля необходимых параметров. Для визуализации разряда и подсчета числа импульсов на низких частотах последовательно с разрядником включен излучающий светодиод.

Порядок выполнения.

1. Перед началом работы ознакомится с принципиальной схемой учебной установки рис. 7, разобраться в назначении ручек, кнопок и измерительного прибора. Проверить целостность сетевого провода и соединительных проводов.

2. Подключить электронный осциллограф соединительным кабелем к выходу «ВЫХОД Y» учебной установки. Для визуального наблюдения колебательного процесса с малым периодом (большой частотой) удобно пользоваться электронным осциллографом. Для колебаний с низкой частотой, удобнее измерять частоту визуально по индикатору «РАЗРЯД» разряда конденсатора через диностор с помощью встроенного в установку секундомера.

3. Подготовить осциллограф к наблюдению релаксационных колебаний. Для этого поставить ручки в рекомендуемые положения: ручкой ВОЛЬТ/ДЕЛ (VOLTS/DIV) оси Y установить уровень сигнала, обеспечивающий наилучший масштаб для наблюдения колебательного процесса - рекомендуемое значение **0.5 ВОЛЬТ/ДЕЛ**). Ручка ПЛАВНО VOLT VAR. при этом должна быть повернута до упора по часовой стрелке, так как только в этом положении показания чувствительности K_y канала Y определяются подписями около ручки ВОЛЬТ/ДЕЛ оси Y осциллографа. Ручка плавной регулировки TIME VAR также должна быть повернута до упора по часовой стрелке - только в таком положении показания ручек «VOLTS/DIV» и «TIME/DIV» соответствуют надписям у этих ручек. Ручку ступенчатой регулировки «TIME/DIV» установить в положение 1 - 5 ms/DIV (от 1 до 5 миллисекунд на одно большое деление шкалы). Ручку «AUTO NORM TV» (режим развертки) поставить в положение «AUTO». Переключатель «+ - XY» в положение «+» или «-». Ручку «DC $\frac{\perp}{\parallel}$ AC» поставить в положение «AC». Переключатель «Y LINE EXT» слева от входа X осциллографа в положение «Y» (режим внутренней синхронизации).

4. Отжать кнопку «ЁМКОСТЬ», если она находится в нажатом положении. Тем самым в схеме рис. 7 остается один конденсатор $C1=4,7$ мкФ.

5. Повернуть ручку «АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ» на панели учебной установки до упора против часовой стрелки, установив минимально возможное значение сопротивления R в цепи генератора.

6. Вращением ручек «POSITION» оси Y и X установить картинку в центральную часть экрана симметрично относительно центра так чтобы наблюдалось 2 — 3 колебания. Для синхронизации сигнала плавно вращать ручку LEVEL электронного осциллографа. Должен наблюдаться сигнал аналогично рис 2б. и рис. 8, при этом, так как конденсатор разряжается практически мгновенно луч осциллографа не успевает прочертить линию разряда (линии параллельные оси U на рис. 2б и линии между точками 1-2 и 3-4 на рис. 8).

7. Срисовать полученный сигнал по клеткам на миллиметровую бумагу.

8. Определить период сигнала как расстояние по оси X (время) между

точками 2 и 4 либо 1 и 3 на рис. 8. Согласно установленному коэффициенту TIME/DIV выразить период в секундах и определить частоту импульсов $\nu = \frac{1}{T}$ [Гц].

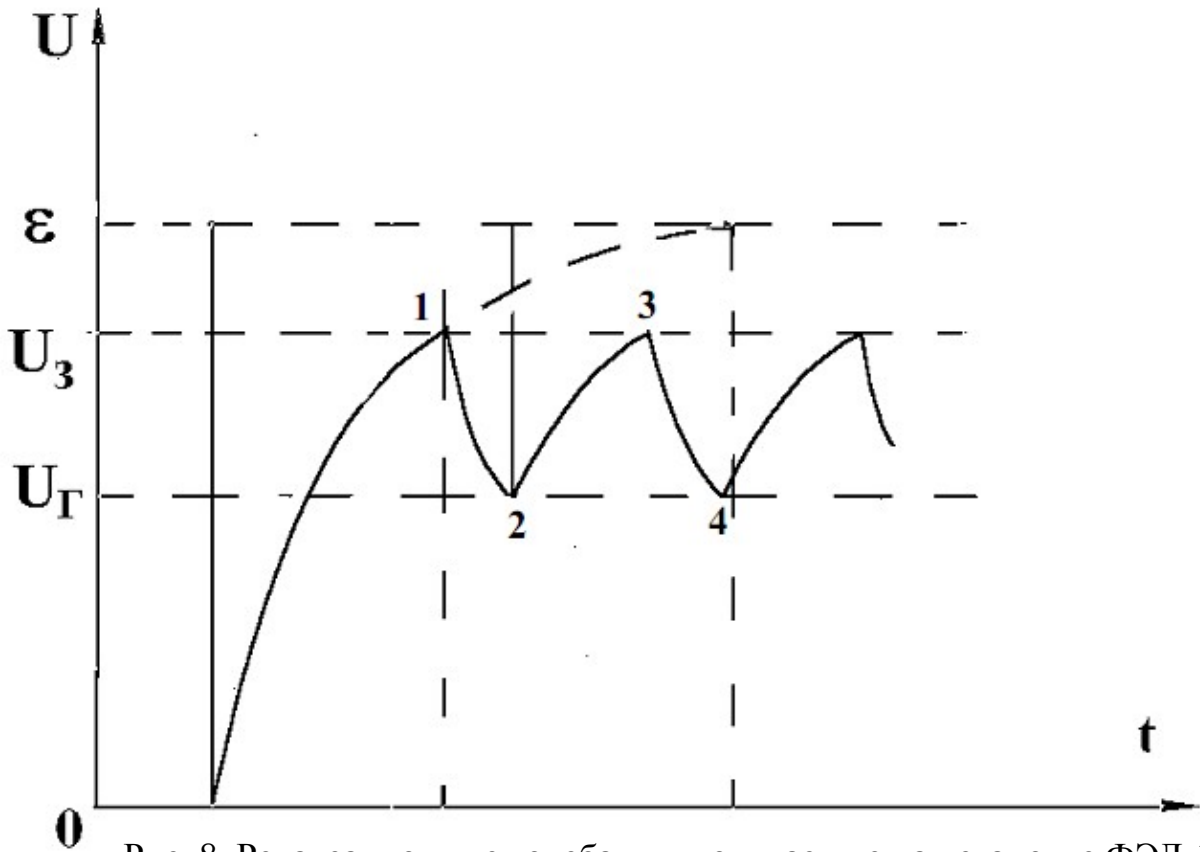


Рис. 8. Релаксационные колебания, получаемые на установке ФЭЛ-16.

9. Оценить «размах» колебаний $A = U_3 - U_{\Gamma}$ как наибольшее изменение напряжения на конденсаторе, т. е. расстояние по оси Y (ось напряжений) между точками 1-2. рис. 8. Согласно установленному коэффициенту VOLTS/DIV выразить размах колебаний в вольтах.

10. Принимая напряжение «гашения» полупроводникового разрядника равным нулю $U_{\Gamma} = 0$ В, оценить напряжение включения динистора как $U_3 = U_{\text{вкл.}} = A$ и сравнить полученное значение с паспортными данными на разрядник, применяемый в данном опыте (напряжение включения разрядника $U_{\text{вкл.}} = 3,3$ В).

11. По формуле (1.4) теоретически оценить период релаксационных колебаний и сравнить полученное значение с экспериментальными оценками. Измеренное Омметром значение активного сопротивления R генератора выводится на ЖКД дисплей.

12. Нажать кнопку «ЁМКОСТЬ», подключив тем самым в схему параллельно конденсатору C1 конденсатор C2. Тем самым общая емкость цепи будет составлять 10,33 мкФ и проделать действия, аналогичные описанным в пп.6-12.

13. Вращая ручку «АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ» по часовой стрелке установить значение $R \sim 100$ кОм. При этом будут отчетливо видны одиночные разряды конденсатора по индикатору «РАЗРЯД».

14. По встроенному в установку секундомеру измерить число N разрядов за время $t=60$ сек., определить частоту колебаний как $\nu = \frac{N}{t}$ [Гц] и период

$$T = \frac{1}{\nu} \text{ [сек].}$$

15. По формуле (1.4) теоретически оценить значение периода и сравнить его с определенным вами экспериментальным значением в п. 15.

16. Повторить эксперименты для других значений емкости и активного сопротивления R .

17. По окончании работы поставьте все переключатели в положение «ВЫКЛ» и выньте вилки из розетки.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Как устроен тиратрон? Каковы его основные параметры и как они определяются?
2. Почему напряжение гашения тиратрона меньше напряжения зажигания?
3. Почему неоновая лампа зажигается только при достижении определенного значения U_3 ?
4. Дайте определение релаксационного процесса.
5. От каких параметров схемы зависит период релаксационных колебаний?
6. Как изменяется период релаксационных колебаний при уменьшении сопротивления R ?
7. Начертите электрическую схему для получения релаксационных электрических колебаний.
8. Какими процессами определяются электрические релаксационные колебания в схеме?
9. Что такое динистор? Начертите и объясните вольт-амперную характеристику динистора.
10. Выведите формулу (1.4) для теоретической оценки периода колебательного процесса.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики, книга 2. Электричество и магнетизм.– М.: «Наука». 2003 г.
2. Детлаф А.А., Яворский В. М. Курс физики. М.: «Высшая школа», 1999 г.
3. Калашников С.Г. Электричество.– М.: Физматлит, 2004 г.
4. Трофимова Т.И. Курс физики.– М.: «Высшая школа», 2003г.
5. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М. 2005.
6. Кацнельсон Б. В., Калугин А. М., Ларионов А.С., Электровакуумные электронные и газоразрядные приборы, М., Радио и связь, 1985.

**ДЛЯ СВОБОДНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ
НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»**