

Московский физико-технический институт
(государственный университет)

Лабораторная работа по общему курсу физики
Электричество и магнетизм

3.2.8. Релаксационные колебания

Глаз Роман Сергеевич
Группа Б01-007

Долгопрудный
2021

Содержание

1	Теоретическое введение	1
2	Ход работы	3
2.1	Характеристика стабилитрона	3
2.2	Времена гашения и зажигания	5
2.3	Критический случай	6
2.4	Исследование зависимости периода колебания цепи от её параметров	6
2.5	Фазовые траектории релаксационных колебаний	9
3	Заключение	10
4	Список используемой литературы	10

Цель работы: изучение вольт-амперной характеристики нормального тлеющего разряда; исследование релаксационного генератора на стабилитроне.

Используемое оборудование: стабилитрон СГ-2 (газонаполненный диод) на монтажной панели, магазин ёмкостей, магазин сопротивлений, источник питания, амперметр, вольтметр, осциллограф.

1. Теоретическое введение

Принципиальная схема релаксационного генератора, представляющего собой электрический контур, состоящий из ёмкости C , резистора R и газоразрядного диода с S -образной вольт-амперной характеристикой, изображена на рис. 1. Релаксационные колебания в этом случае являются совокупностью двух аperiодических процессов – зарядки конденсатора и его разрядки. В рассматриваемой установке роль «ключа», обеспечивающего попеременную зарядку и разрядку конденсатора, играет газоразрядный диод.

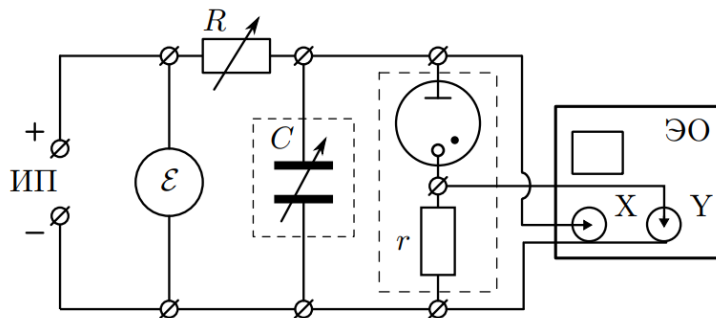


Рис. 1: Схема релаксационного генератора

Зависимость тока от напряжения для газоразрядной лампы не подчиняется закону Ома и характеризуется рядом особенностей, представленных в упрощённом виде на рис. 2 вместе с нагрузочной прямой $I = I_0 (1 - U/\varepsilon)$, где ε — постоянное напряжение внешнего источника питания.

Ток в лампе возникает только в том случае, если разность потенциалов на её электродах достигает напряжения зажигания U_1 . При этом скачком (участок ab) устанавливается конечная сила тока I_1 — в лампе возникает нормальный тлеющий разряд. При дальнейшем незначительном увеличении напряжения сила тока заметно возрастает по закону, близкому к линейному.

Если начать уменьшать напряжение на горячей лампе, то при напряжении U_1 лампа ещё не гаснет, и сила тока продолжает уменьшаться (участок bc на рис. 2). Лампа перестаёт пропускать ток лишь при напряжении

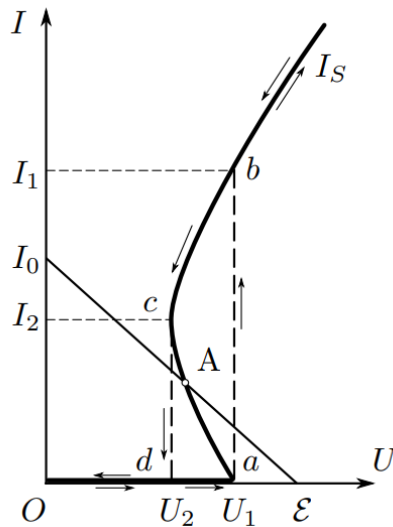


Рис. 2: Упрощённая вольт-амперная характеристика стабилизатора

гашения U_2 , которое обычно существенно меньше U_1 . Сила тока при этом скачком падает от значения $I_2 < I_1$ до нуля (участок cd).

В стационарном режиме, когда напряжение U на конденсаторе постоянно и $dU/dt = 0$, ток через лампу равен

$$I_{\text{ст}} = \frac{\varepsilon - U}{R + r} \quad (1)$$

При этом возбуждение автоколебаний возможно только при выполнении условия

$$R + r < -\frac{1}{I'_S(U_A)} \quad (2)$$

При зарядке конденсатора через сопротивление R напряжение на нём увеличивается (рис. 3). Как только оно достигнет напряжения зажигания U_1 , лампа начинает проводить ток, причём прохождение тока сопровождается разрядкой конденсатора. В самом деле, батарея ε , подключённая через большое сопротивление R , не может поддерживать необходимую для горения лампы величину тока. Во время горения лампы конденсатор разряжается, и когда напряжение на нём достигнет потенциала гашения U_2 , лампа перестанет проводить ток, а конденсатор вновь начнёт заряжаться. Возникают релаксационные колебания с амплитудой $U_1 - U_2$.

Полное время одного периода колебаний T состоит из суммы времени зарядки τ_z и времени разрядки τ_r . Однако если сопротивление R существенно

превосходит сопротивление зажжённой лампы, то $\tau_3 \gg \tau_p$ и $T \cong \tau_3$, что подтверждается в нашем эксперименте. Во время зарядки конденсатора лампа не горит ($I(U) = 0$), и уравнение цепи приобретает вид

$$RC \frac{dU}{dt} = \varepsilon - U \quad (3)$$

Результат этого уравнения с учётом начальных условий имеет вид

$$T \cong \tau_3 = RC \ln \frac{\varepsilon - U_2}{\varepsilon - U_1} \quad (4)$$

Развитая выше теория является приближенной. Ряд принятых при расчётах упрощающих предположений оговорён в тексте. Следует иметь в виду, что мы полностью пренебрегли паразитными ёмкостями и индуктивностями схемы. Не рассматривались также процессы развития разряда и деионизация при гашении. Поэтому теория справедлива лишь в тех случаях, когда в схеме установлена достаточно большая ёмкость и когда период колебаний существенно больше времени развития разряда и времени деионизации (практически $\cong 10$ с).

2. Ход работы

2.1. Характеристика стабилитрона

Установка со стабилитроном имеет встроенное сопротивление $r = 5,4$ кОм.

С помощью приведённой ниже схемы можно получить ВАХ стабилитрона, в частности измерить напряжения зажигания и гашения (с учётом петли Гистерезиса).

Для этого снимем часть данных с приборов для построения ВАХ:

Здесь синяя кривая отвечает за увеличение напряжения, а оранжевая за уменьшение (рис. 4).

При этом график ВАХ стабилитрона без встроенного резистора имеет немного другой вид:

Видно, что график вышел схожим по своей сути с теоретическим графиком. Из него можно оценить напряжения зажигания и гашения, но для более точных значений проведём для этого несколько экспериментов и посчитаем среднее значение:

Итого имеем:

$$U_1 = 100,1\text{В}, \Delta U_1 = 1,08\text{В} \quad (5)$$

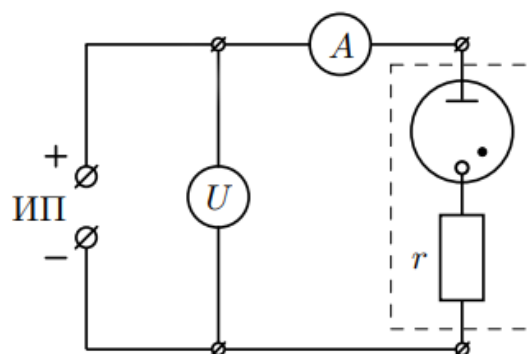


Рис. 3

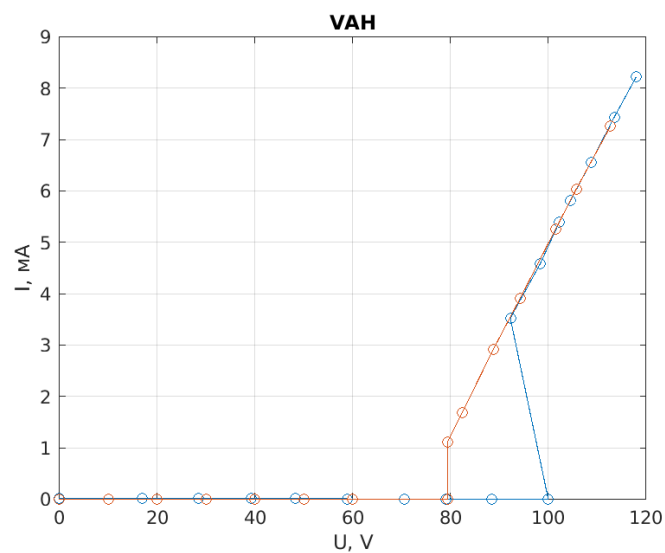


Рис. 4: ВАХ стабилитрона

$$U_2 = 74,79\text{В}, \Delta U_2 = 0,95\text{В} \quad (6)$$

$$I_1 = 3,407\text{мА}, \Delta I_1 = 0,058\text{мА} \quad (7)$$

$$I_2 = 0,411\text{мА}, \Delta I_2 = 0,032\text{мА} \quad (8)$$

Погрешности были найдены через стандартное отклонение (среднеквадратичное значение) и являются погрешностями отдельного измерения. Также было

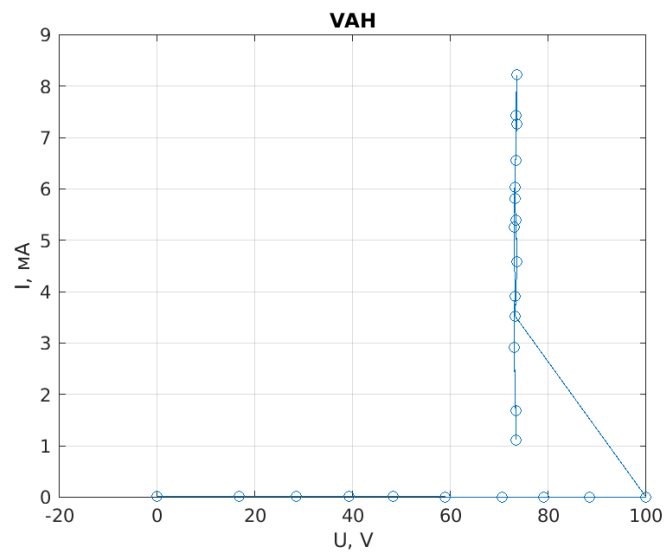


Рис. 5: ВАХ стабилитрона без учёта резистора

U_1 ,	99,70	100,3	101,1	99,70	99,70
U_2 ,	75,27	73,98	74,78	74,89	75,01
I_1 ,	3,387	3,354	3,415	3,449	3,432
I_2 ,	0,427	0,410	0,408	0,394	0,414

Таблица 1: Значения зажигания и гашения

учтено, что в статическом режиме измерения значение напряжения колебалось в пределах 0,46 В, а значение силы тока в пределах 0,021 мА.

2.2. Времена гашения и зажигания

Собрав схему, изображённую на рис. 1, установим сопротивление реостата $R = 900$ кОм, а ёмкость конденсатора 50 нФ. Установив выходное напряжение источника питания $\varepsilon = 121 \pm 1$ В, установим по осциллограмме значения времён зарядки и разрядки:

$$\tau_z = 39,5 \pm 0,5 \text{ мс} \quad (9)$$

$$\tau_p = 0,65 \pm 0,05 \text{ мс} \quad (10)$$

Погрешности были учтены с помощью цены деления экрана осциллографа (в зависимости от масштаба развёртки – 5 мс/div и 0,5 мс/div – половина цены деления).

Для отношения времён имеем

$$\frac{\tau_z}{\tau_p} = 60,7 \pm 1,2 \quad (11)$$

Очевидно, что суммарное время практически совпадает со значением времени зарядки $T = 40,15 \pm 0,55$ мс (погрешность посчитана по формуле косвенной погрешности через частные производные).

2.3. Критический случай

Определим критическое сопротивление реостата, при котором пропадают колебания в цепи: $R_{\text{крит}} = 138 \pm 1$ кОм.

При этом если сохранять значение сопротивления постоянным, а менять (уменьшать) значение исходного напряжения источника, то колебания тоже пропадут при достижении некоторого значения.

2.4. Исследование зависимости периода колебания цепи от её параметров

Зафиксируем сопротивление реостата $R = 300$ кОм, вычислим, как зависит период колебания цепи от ёмкости конденсатора. В этом случае напряжение источника держим постоянным. Зафиксировали экспериментальные значения и посчитав нужные теоретические значения, строим график.

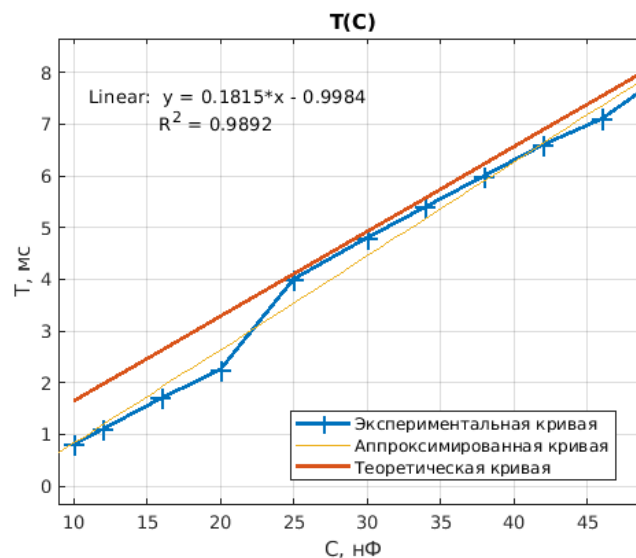
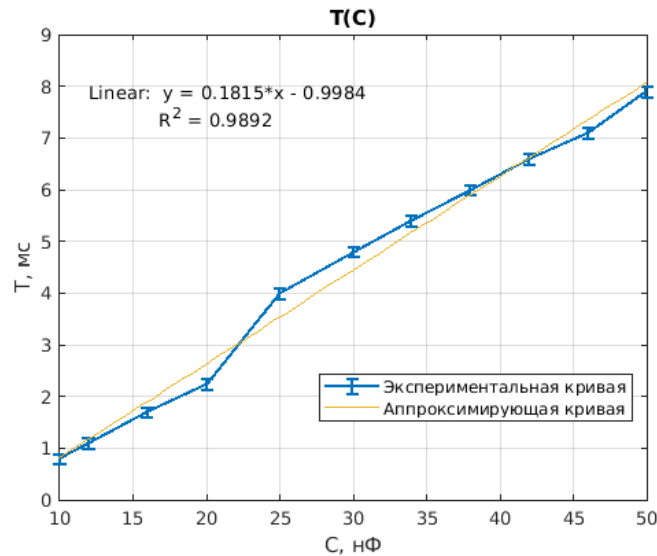


Рис. 6: Зависимость $T(C)$

Рис. 7: Зависимость $T(C)$ с ошибками измерения

Видно, что вблизи центра рассмотренного набора значений графики почти совпадают, но на более низких ёмкостях происходит некоторый резкий спад периода. Возможно, он обусловлен неточностью осциллографа. Значения ниже 10 нФ не были рассмотрены, так как уже на этом этапе амплитуда колебаний на осциллографе заметно падает (вплоть до прекращения автоколебаний).

Для теоретической кривой коэффициент наклона равен $k = 0,158 \cdot 10^6$ с/Ф, для экспериментальной $(0,182 \pm 0,012) \cdot 10^6$ с/Ф. Значения различаются даже с учётом погрешности. В этом случае посчитаем динамический потенциал гашения U_2 , воспользовавшись экспериментальной кривой и формулой:

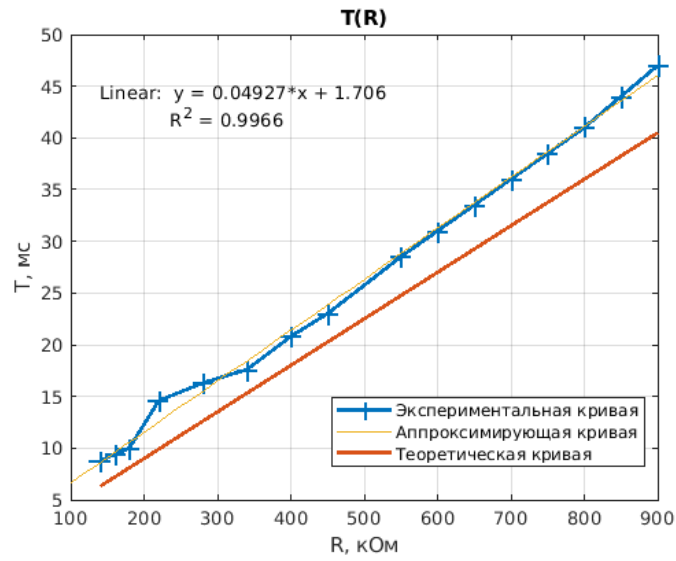
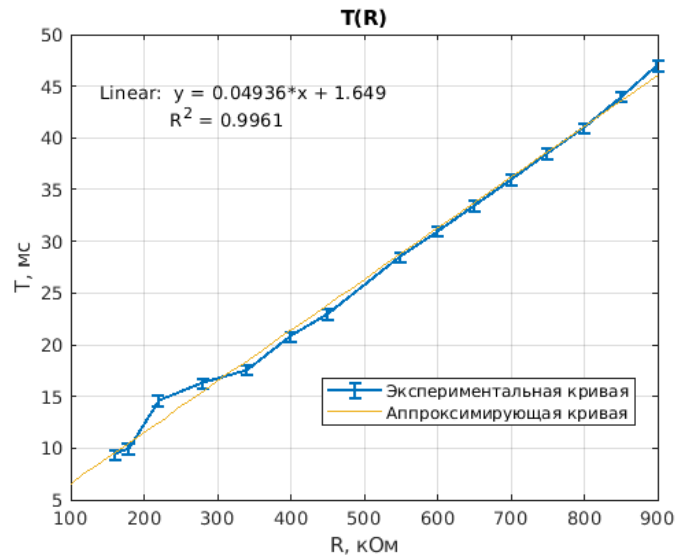
$$T = RC \ln \frac{\varepsilon - U_2}{\varepsilon - U_1} \Rightarrow U_2 = 82,3 \text{ В}, \Delta U_2 = 2,1 \text{ В} \quad (12)$$

Погрешности для значения динамического потенциала гашения были найдены с помощью погрешности измерения ε , k и стандартной формулы для погрешностей косвенных измерений.

Далее фиксируем ёмкость конденсатора $C = 50$ нФ, напряжение источника то же, что и было. Исследуем зависимость $T(R)$.

Видны флуктуации от прямой линии в районе 300 кОм, которые не влияют на общий характер зависимости. Опять же, экспериментальная кривая почти совпадает с теоретической (характер зависимостей одинаков).

Для теоретической кривой коэффициент наклона равен $k = 44,5 \cdot$

Рис. 8: Зависимость $T(R)$ Рис. 9: Зависимость $T(R)$ с ошибками измерения

10^{-9} с/Ом, для экспериментальной $(49,3 \pm 2,1) \cdot 10^{-9}$ с/Ом. Значения аналогично различаются даже с учётом погрешности, как и для предыдущей зависимости. Посчитаем динамический потенциал гашения U_2 :

$$T = RC \ln \frac{\varepsilon - U_2}{\varepsilon - U_1} \Rightarrow U_2 = 84,8 \text{ В}, \Delta U_2 = 1,7 \text{ В} \quad (13)$$

2.5. Фазовые траектории релаксационных колебаний

Установим параметры цепи $R = 900 \text{ кОм}$, $C = 50 \text{ нФ}$. Подключим генератор к осциллографу способом, указанном на рис. 8.

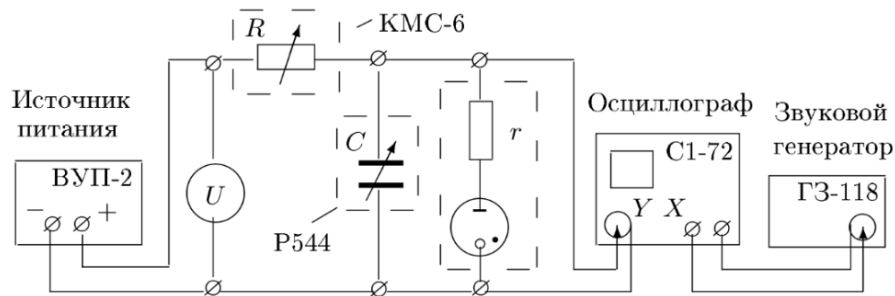


Рис. 10: Схема подключение генератора

Установим по осям координат сдвиги и коэффициенты усиления, подходящие для наблюдения фазовой траектории релаксационных колебаний.

Получим с помощью генератора фигуру Лиссажу 1:1, при этом с помощью фигур Лиссажу можно измерять частоту автоколебаний (через количество пересечений прямой линии – свойства фигур Лиссажу).

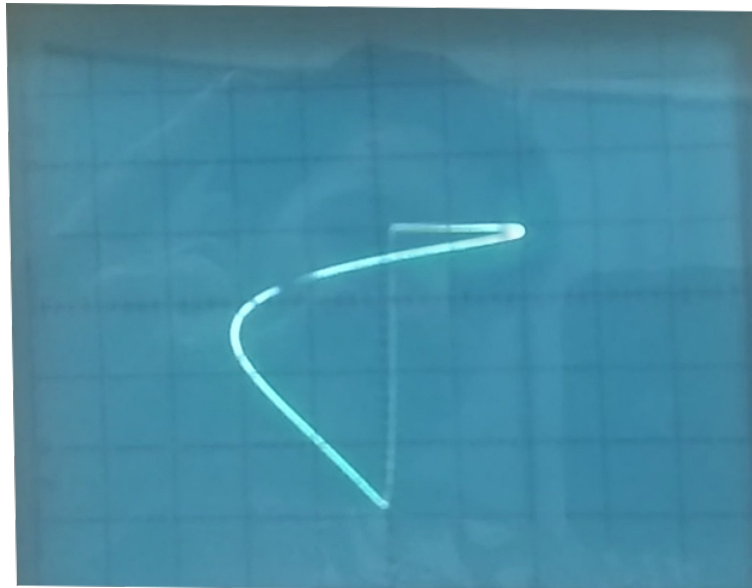


Рис. 11: Фигура Лиссажу 1:1

Аналогично получим фигуру Лиссажу для соотношения 1:2.

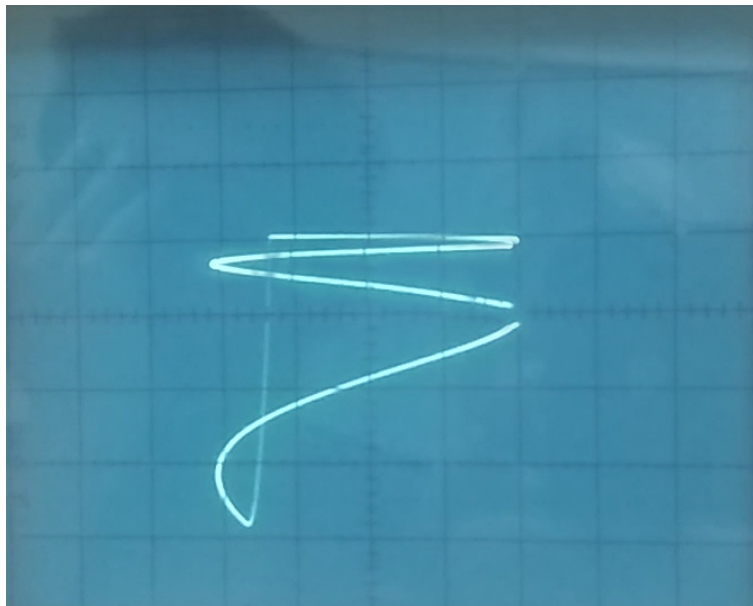


Рис. 12: Фигура Лиссажу 1:2

3. Заключение

Были найдены значения напряжения и силы тока для зажигания и гашения для стабилитрона.

С помощью осциллографа были найдены значения времён автоколебаний (в том числе отдельно для зажигания и гашения), в том числе зависимость времени автоколебания от ёмкости или сопротивления реостата в схеме.

Также частота могла быть найдена через фигуры Лиссажу, но в этом случае затруднительно найти отношения времён зажигания и гашения стабилитрона.

4. Список используемой литературы

- Лабораторный практикум по общей физике. Электричество и магнетизм
- [Описание лабораторных работ на кафедре общей физики МФТИ](#)