

Релаксационные колебания

Цель работы

Изучение вольт-амперной характеристики нормального тлеющего разряда; исследование релаксационного генератора на стабилитроне.

Оборудование

Стабилитрон СГ-2 (газонаполненный диод) на монтажной панели, амперметр, вольтметр, магазин сопротивлений, магазин ёмкостей, источник питания, осциллограф (ЭО), генератор звуковой частоты (ЗГ).

Экспериментальная установка

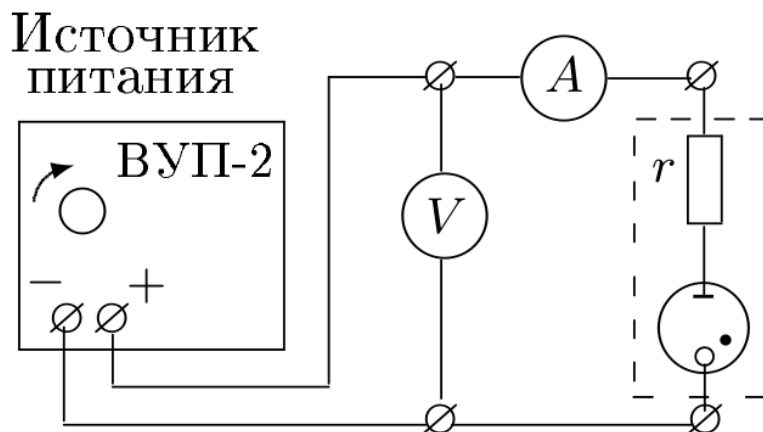


Рис. 1: Схема установки для изучения характеристик стабилитрона

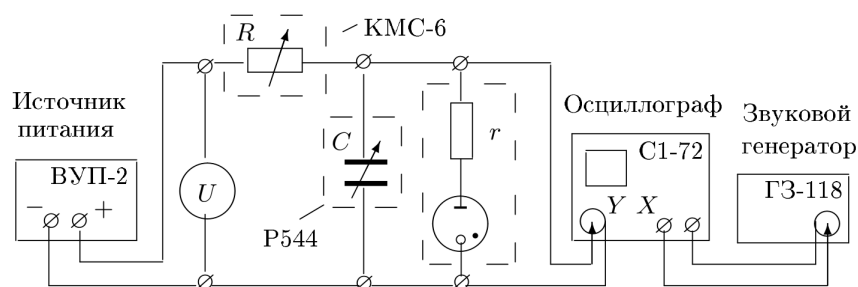


Рис. 2: Схема установки для исследования релаксационных колебаний

Теоретическая часть

Колебательные системы, как правило, имеют два накопителя энергии, между которыми происходит её перекачка. В контуре, содержащем конденсатор и катушку индуктивности, электрическая энергия переходит в магнитную и обратно.

Встречается, однако, колебательные системы, содержащие всего один накопитель энергии. Рассмотрим в качестве примера электрическую цепь, содержащую конденсатор и сопротивление без самоиндукции. Разряд конденсатора через сопротивление представляет собой аperiодический процесс. Разряду, однако, можно придать периодический характер, возобновляя заряд конденсатора через постоянные промежутки времени. Колебания в этом случае являются совокупностью двух аperiодических процессов — процесса зарядки конденсатора и процесса его разрядки.

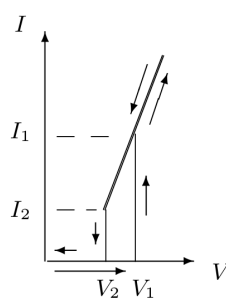


Рис. 3: Вольт-амперная характеристика стабилитрона с последовательно включённым резистором

В нашей установке роль «ключа», обеспечивающего попеременную зарядку и разрядку конденсатора, играет газоразрядный диод. Зависимость тока от напряжения для

газоразрядной лампы не подчиняется закону Ома и характеризуется рядом особенностей. При малых напряжениях лампа практически не пропускает тока. Ток в лампе возникает только в том случае, если разность потенциалов на её электродах достигает напряжения зажигания $V_1 = V_{\text{зж}}$. При этом скачком 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. Нормальный тлеющий разряд — стабилизатор напряжения, отсюда второе название лампы — стабилитрон.

Если начать уменьшать напряжение на горячей лампе, то при напряжении, равном $V_{\text{зж}}$, лампа ещё не гаснет, а сила тока продолжает уменьшаться. Лампа перестаёт пропускать ток лишь при напряжении гашения $V_2 = V_{\text{гаш}}$, которое обычно существенно меньше $V_{\text{зж}}$. Сила тока при этом скачком падает от значения I_2 ($I_2 < I_1$) до нуля.

Изображённая выше вольт-амперная характеристика несколько идеализированна. У реальной лампы зависимость $I(V)$ не вполне линейна. При $V > V_{\text{зж}}$ графики, соответствующие возрастанию и убыванию напряжения, не всегда совпадают. Эти отличия, впрочем, носят второстепенный характер и для нашей задачи несущественны.

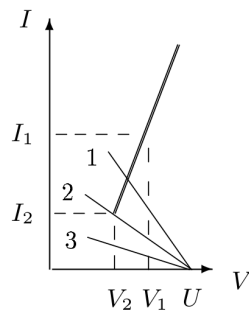


Рис. 4: Режимы работы релаксационного генератора

Рассмотрим схему релаксационного генератора. Пусть напряжение батареи U больше напряжения зажигания V_1 . В обозначениях, принятых на схеме, справедливо уравнение

$$I_C + I(V) = \frac{U - V}{R},$$

или

$$C \frac{dV}{dt} + I(V) = \frac{U - V}{R}.$$

В стационарном режиме работы, когда напряжение V у конденсатора постоянно и $dV/dt = 0$, ток через лампу равен

$$I_{\text{ст}} = \frac{U - V}{R}.$$

Это равенство представлено выше графически.

При разных R графики имеют вид прямых, пересекающихся в точке $V = U, I = 0$. Область, где эти нагрузочные прямые пересекают вольт-амперную характеристику лампы, соответствует стационарному режиму — при малых R (прямая 1) лампа горит постоянно, колебания отсутствуют. Прямая 2, проходящая через точку (I_2, V_2) , соответствует критическому сопротивлению

$$R_{\text{кр}} = \frac{U - V_2}{I_2}.$$

При сопротивлении $R > R_{\text{кр}}$ нагрузочная прямая 3 не пересекает характеристику лампы, поэтому стационарный режим невозможен. В этом случае в системе устанавливаются колебания.

Рассмотрим, как происходит колебательный процесс. Пусть вначале опыта ключ K разомкнут и $V = 0$. Замкнём ключ. Конденсатор C начинает заряжаться через сопротивление R , напряжение на нём увеличивается. Как только оно достигнет напряжения зажигания $V_{\text{зж}}$, лампа начинает проводить ток, причём прохождение тока сопровождается разрядкой конденсатора. В самом деле, батарея U , 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, лампа перестанет проводить ток, а конденсатор вновь начнёт заряжаться. Возникают релаксационные колебания с амплитудой, равной $(V_1 - V_2)$.

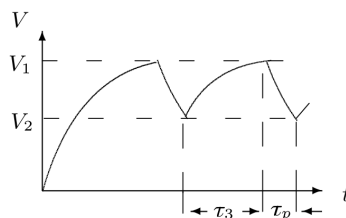


Рис. 5: Осциллограмма релаксационных колебаний

Рассчитаем период колебаний. Полное время одного периода колебаний T состоит из суммы времени зарядки τ_3 и времени разрядки τ_p , но если сопротивление R существенно превосходит сопротивление зажжённой лампы, то $\tau_3 \gg \tau_p$ и $T \approx \tau_3$. Во время зарядки конденсатора лампа не горит ($I(V) = 0$), и уравнение приобретает вид

$$RC \frac{dV}{dt} = U - V.$$

Будем отсчитывать время с момента гашения лампы, так что $V = V_2$ при $t = 0$. Решив это уравнение, найдём

$$V = U - (U - V_2)e^{-t/RC}.$$

В момент зажигания $t = \tau_3$, $V = V_1$, поэтому

$$V_1 = U - (U - V_2)e^{\tau_3/RC}.$$

Из этих двух уравнений нетрудно найти период колебаний:

$$T \approx \tau_3 = RC \ln \frac{U - V_2}{U - V_1}.$$

Обработка результатов измерений

Исследуем вольт-амперную характеристику стабилитрона и построим график режима работы релаксационного генератора ($I = f(V)$):

$$r = 5.1 \text{ кОм}$$

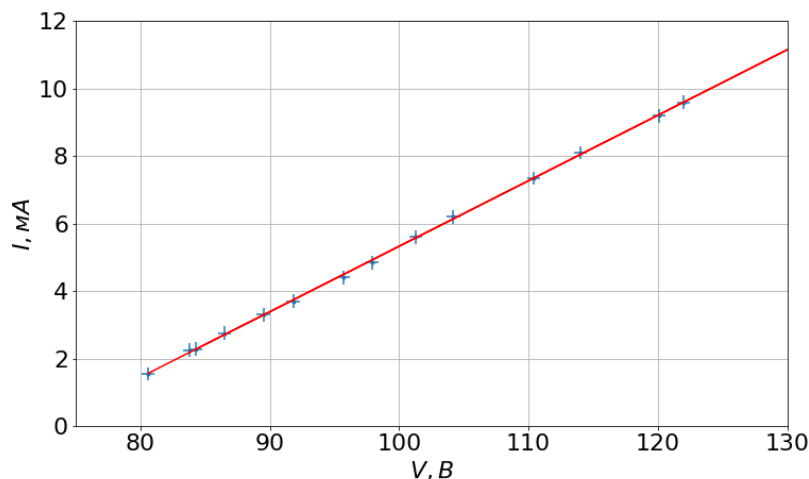


Рис. 6: График зависимости I от V

$$V_{\text{зж}} = 84.3 \text{ В}; \quad V_{\text{гаш}} = 80.2 \text{ В}$$

$$R_{\text{кр}} = 19 \cdot 10^4 \text{ Ом}$$

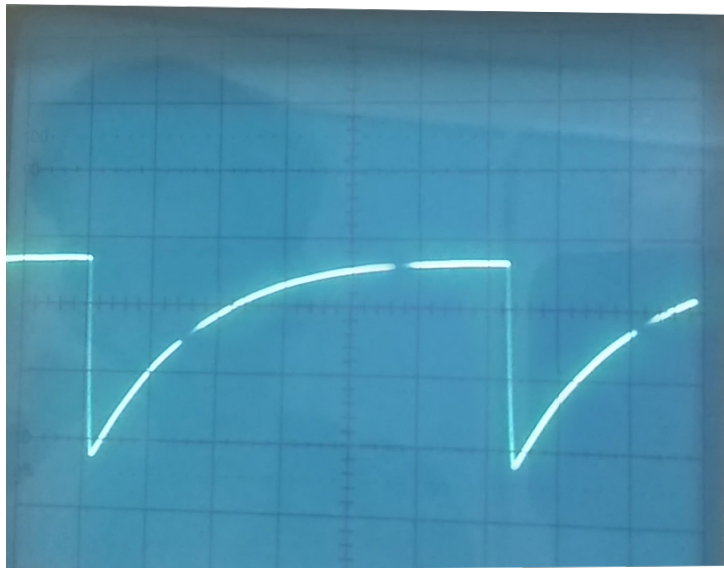


Рис. 7: Оциллограмма релаксационных колебаний

Рассчитаем экспериментальные и теоретические значения периодов, построим графики зависимости $T_{\text{эксп}}$ и $T_{\text{теор}}$:

$$T \approx RC \ln \frac{U - V_{\text{гаш}}}{U - V_{\text{зж}}}$$

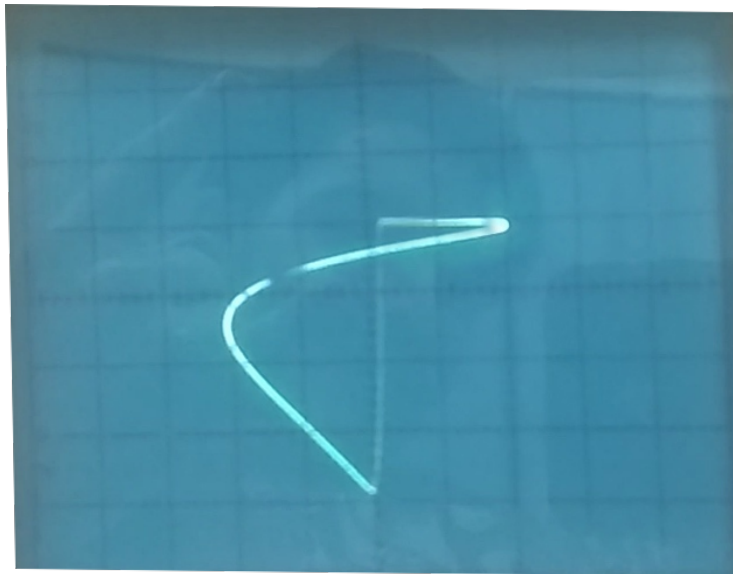


Рис. 8: Фигура Лиссажу при отношении частот 1:1

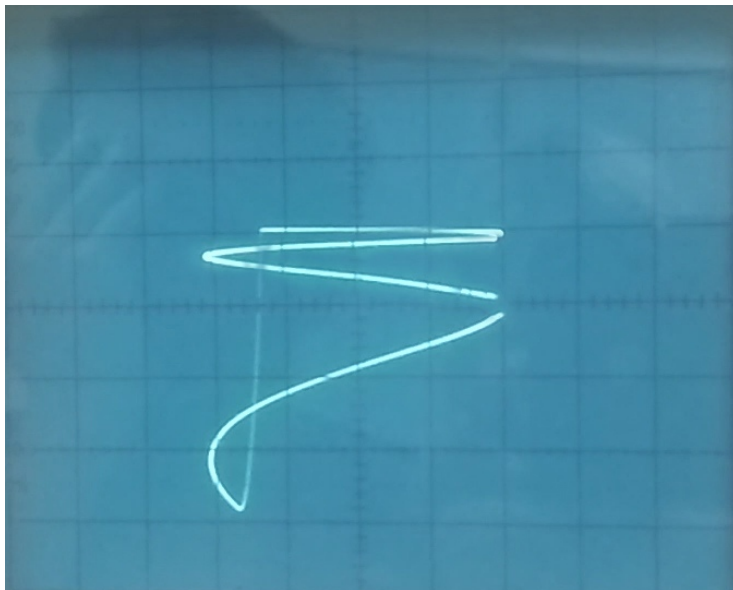


Рис. 9: Фигура Лиссажу при отношении частот 2:1

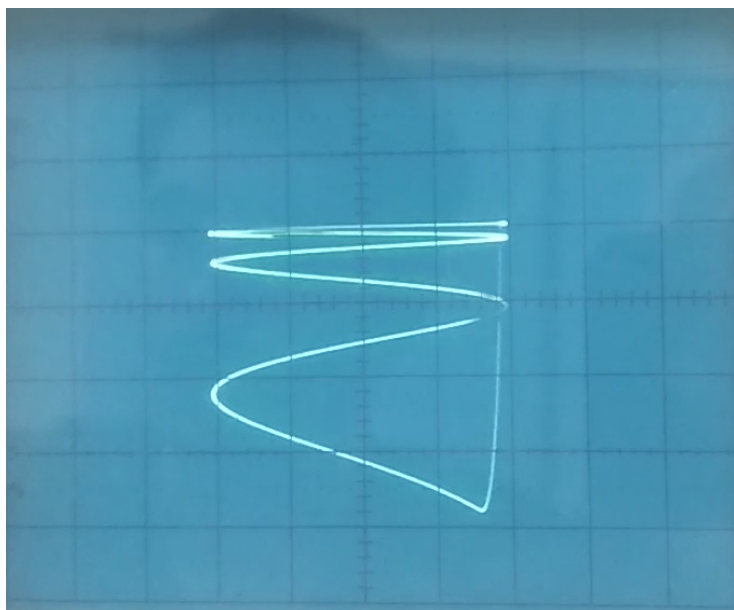
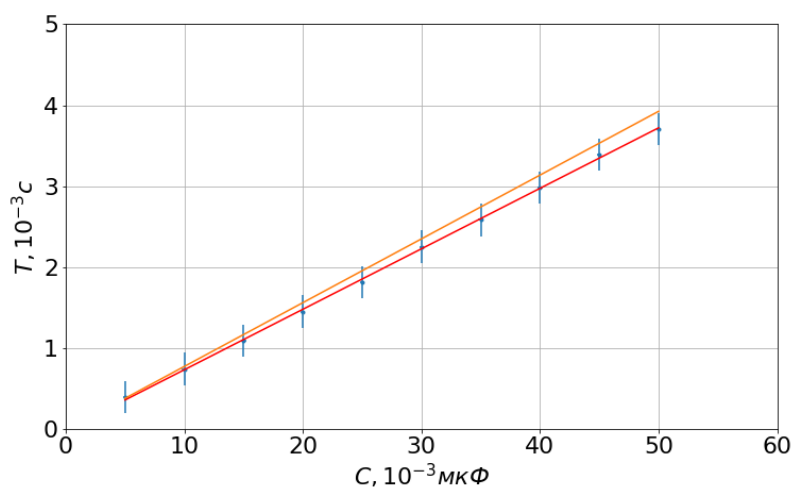
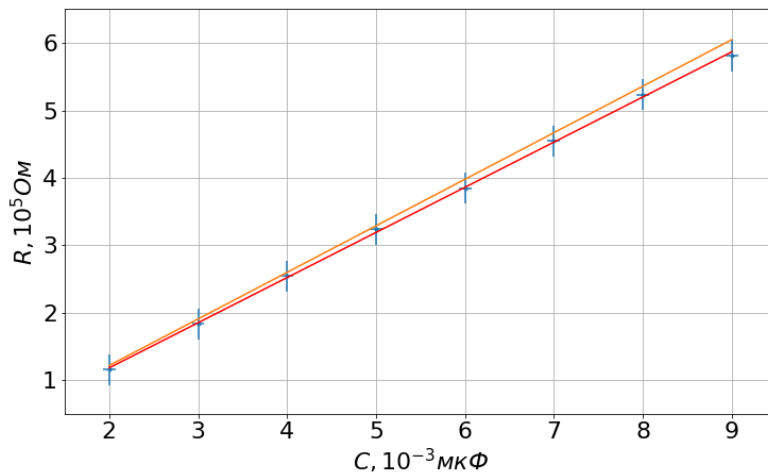


Рис. 10: Фигура Лиссажу при отношении частот 3:1

Рис. 11: $T = f(C)$

Рис. 12: $T = f(R)$

Вывод

Мы исследовали вольт-амперную характеристику стабилитрона и убедились в том, что стабилитрон не подчиняется закону Ома и характеризуется рядом особенностей. При малых напряжениях лампа не пропускает ток вовсе, а при достижении напряжения зажигания — в лампе возникает нормальный тлеющий разряд, который при незначительном увеличении напряжения сила тока линейно возрастает. При напряжении, незначительно меньшем, чем напряжение гашения, то возникают релаксационные колебания.