

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

Лабораторная работа по электричеству

**Релаксационные колебания [3.2.8]**

Талашкевич Даниил Александрович  
Группа Б01-009

Долгопрудный  
2021

# Содержание

<b>1</b>	<b>Аннотация</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Теоретические сведения</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>Ход работы</b>	<b>5</b>
3.1	Характеристика стабилитрона . . . . .	5
3.2	Времена гашения и зажигания . . . . .	8
3.3	Критический случай . . . . .	8
3.4	Исследование зависимости периода колебания цепи от её параметров . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Заключение</b>	<b>11</b>
<b>5</b>	<b>Литература</b>	<b>11</b>

## 1 Аннотация

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

**В работе используются:** стабилитрон СГ-2 (газонаполненный диод) на монтажной панели, магазин ёмкостей, магазин сопротивлений, источник питания, амперметр, вольтметр, осциллограф.

В работе предлагается снять вольт-амперную характеристику стабилитрона и познакомиться с работой релаксационного генератора: определить критическое сопротивление, исследовать зависимость периода колебаний от сопротивления при фиксированной ёмкости и от ёмкости при фиксированном сопротивлении.

## 2 Теоретические сведения

Колебательные системы, как правило, имеют два накопителя, между которыми происходит перекачка энергии. В контуре, содержащем конденсатор и катушку индуктивности, электрическая энергия переходит в магнитную и обратно; при колебаниях маятника потенциальная энергия поля тяжести переходит в кинетическую энергию движущейся массы и т.д.

Встречаются, 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 аperiodический процесс. Разряду, однако, можно придать периодический характер, возобновляя заряд конденсатора через постоянные промежутки времени. Колебания в этом случае являются совокупностью двух аperiodических процессов - процесса зарядки конденсатора и процесса его разрядки. Такие колебания называются релаксационными.

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

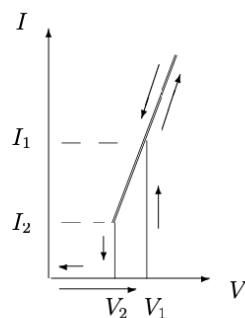


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика стабилитрона с последовательно включённым резистором

разрядной лампы не подчиняется закону Ома и характеризуется рядом особенностей (рис. 1). При малых напряжениях лампа не пропускает тока вовсе (не горит). Ток в лампе возникает только в том случае, если разность потенциалов на её электродах достигает напряжения зажигания  $V_1$ . При этом, 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, равном  $V_1$ , лампа ещё не гаснет, и сила тока продолжает уменьшаться. Лампа перестанет пропускать ток лишь при напряжении гашения  $V_2$ , которое обычно существенно меньше  $V_1$ . Сила тока при этом скачком падает от значения  $I_2$  ( $I_2 < I_1$ ) до нуля. Характеристика, изображённая на рис. 1, несколько идеализирована. У реальной лампы зависимость  $I(V)$  не вполне линейна. При  $V > V_1$  графики соответствующие возрастанию и убыванию напряжения, не всегда совпадают. Эти отличия, впрочем, носят второстепенный характер и для нашей задачи несущественны.

Рассмотрим схему релаксационного генератора, представленную на рис. 2. Пусть напряжение батареи  $U$  больше напряжения зажигания  $V_1$ . В обозначениях, принятых на схеме, справедливо уравнение

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

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

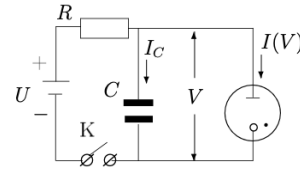


Рис. 2. Принципиальная схема релаксационного генератора

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

$$I_{cr} = \frac{U - V}{R}$$

Равенство (2) может быть представлено графически (рис. 3). 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

$$R_{кр} = \frac{U - V_2}{I_2}$$

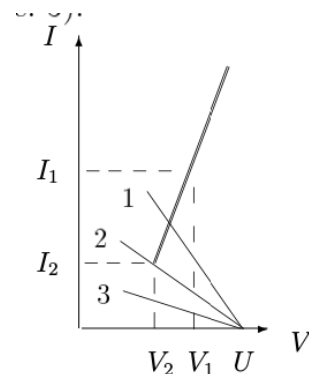


Рис. 3. Режимы работы релаксационного генератора

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

Рассмотрим, как происходит колебательный процесс. Пусть в начале опыта ключ  $K$  разомкнут (рис. 2) и  $V = 0$ . Замкнём ключ. Конденсатор  $C$  начинает заряжаться через сопротивление  $R$ , напряжение на нём увеличивается (рис. 4). Как только оно достигнет напряжения зажигания  $V_1$ , 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  $(V_1 - V_2)$ .

Рассчитаем период колебаний. Полное время одного периода колебаний  $T$  состоит из суммы времени зарядки  $\tau_3$  и времени разрядки  $\tau_p$ , но если сопротивление  $R$  существенно превосходит сопротивление Зажжённой лампы, то  $\tau_3 \gg \tau_p$  и  $T \simeq \tau_3$  (этим случаем мы и ограничимся). Во время зарядки конденсатора лампа не горит [ $I(V) = 0$ ], и уравнение (1) приобретает вид

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

Будем отсчитывать время с момента гашения лампы, так что  $V = V_2$  при  $t = 0$  (рис. 4). Решив уравнение (4), 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 уравнений (5) и (6) нетрудно найти период колебаний:

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

Развитая выше теория является приближённой. Ряд принятых при расчётах упрощающих предположений оговорен в тексте. Следует иметь в виду, что мы полностью пренебрегли паразитными емкостями 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  $\gg 10^{-5}$  с). Кроме того, потенциал гашения  $V_2$ , взятый из статической вольт-амперной характеристики, может отличаться от потенциала гашения лампы, работающей в динамическом режиме релаксационных колебаний.

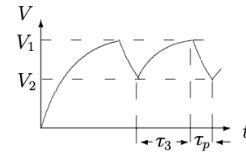


Рис. 4. Осциллограмма релаксационных колебаний

### 3 Ход работы

#### 3.1 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).

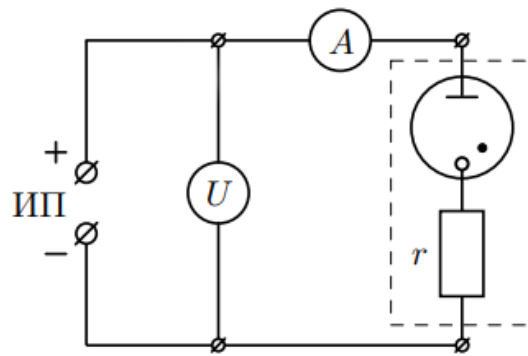


Рис. 1

Для этого снимем часть данных с приборов для построения ВАХ:

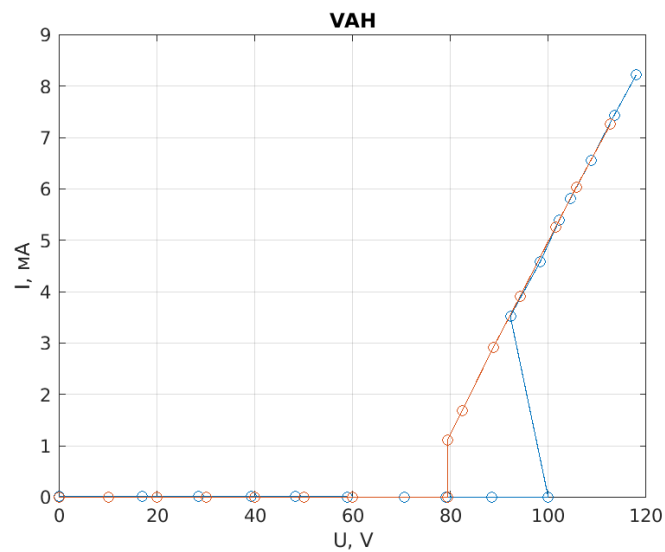


Рис. 2: ВАХ стабилитрона

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:



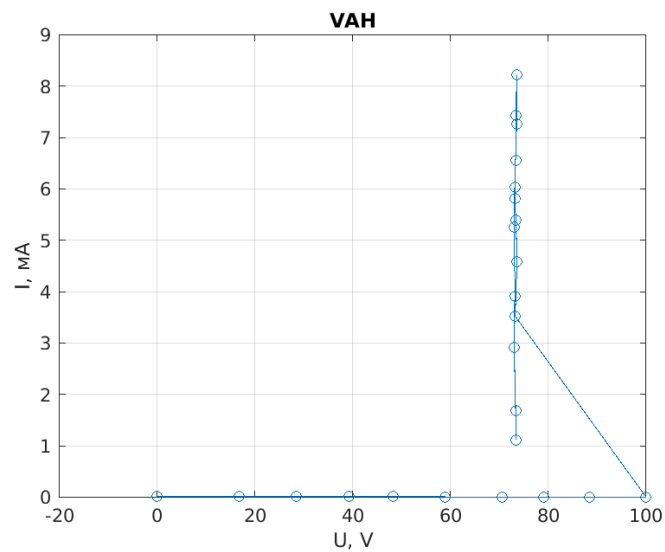


Рис. 3: ВАХ стабилитрона без учёта резистора

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:

$U_1$ ,	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

Итого имеем:

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

$$U_2 = 74,79\text{В}, \Delta U_2 = 0,95\text{В} \quad (2)$$

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

$$I_2 = 0,411\text{мА}, \Delta I_2 = 0,032\text{мА} \quad (4)$$

Погрешности были найдены через стандартное отклонение (средне-квадратичное значение) и являются погрешностями отдельного измерения. Также было учтено, что в статическом режиме измерения значение напряжения колебалось в пределах  $0,46 \text{ В}$ , а значение силы тока в пределах  $0,021 \text{ мА}$ .

### 3.2 Времена гашения и зажигания

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

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

$$\tau_p = 0,65 \pm 0,05 \text{ мс} \quad (6)$$

Погрешности были учтены с помощью цены деления экрана осциллографа (в зависимости от масштаба развёртки –  $5 \text{ ms/div}$  и  $0,5 \text{ ms/div}$  – половина цены деления).

Для отношения времён имеем

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

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

### 3.3 Критический случай

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

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

### 3.4 Исследование зависимости периода колебания цепи от её параметров

Зафиксируем сопротивление реостата  $R = 300 \text{ кОм}$ , вычислим, как зависит период колебания цепи от ёмкости конденсатора. В этом случае

напряжение источника держим постоянным. Зафиксировов экспериментальные значения и посчитав нужные теоретические значения, строим график.

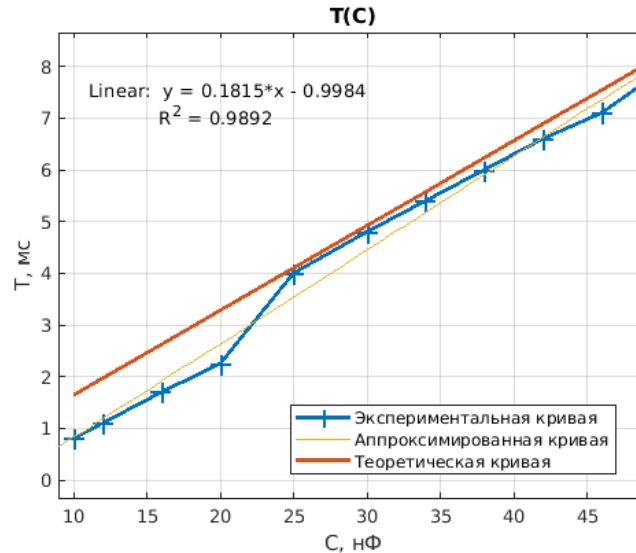


Рис. 4: Зависимость  $T(C)$

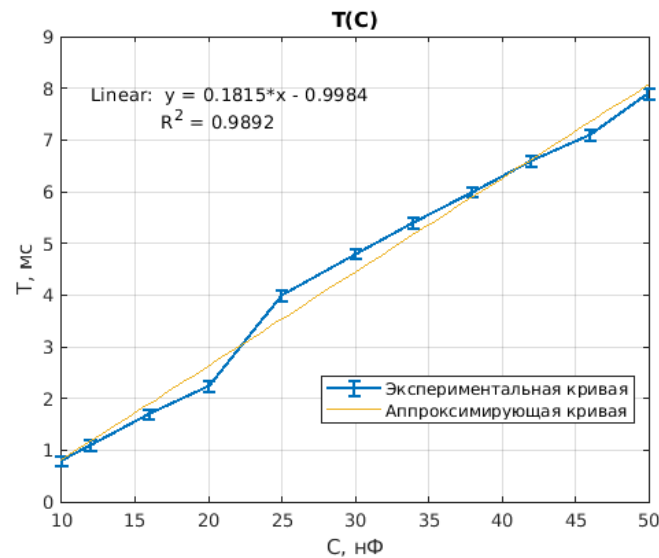
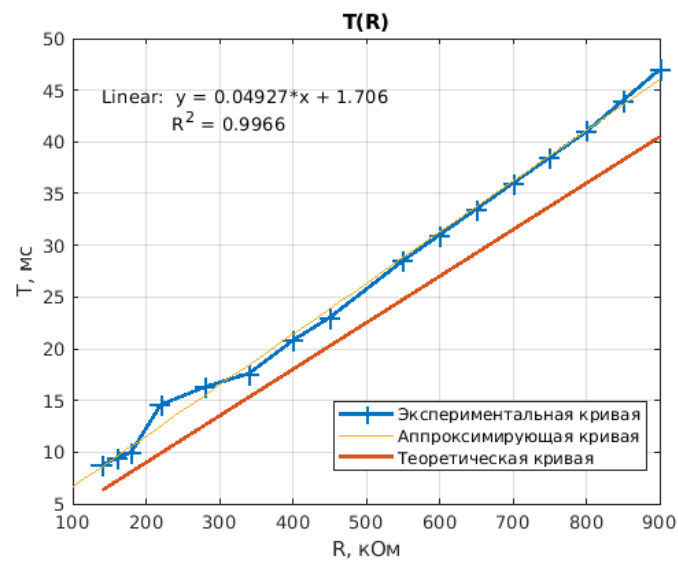
Видно, что вблизи центра рассмотренного набора значений графики почти совпадают, но на более низких ёмкостях происходит некоторый резкий спад периода. Возможно, он обусловлен неточностью осциллографа. Значения ниже 10 нФ не были рассмотрены, так как уже на этом этапе амплитуда колебаний на осциллографе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

$$T = RC \ln \frac{\varepsilon - U_2}{\varepsilon - U_1} \Rightarrow U_2 = 82,3 \text{ В}, \Delta U_2 = 2,1 \text{ В} \quad (8)$$

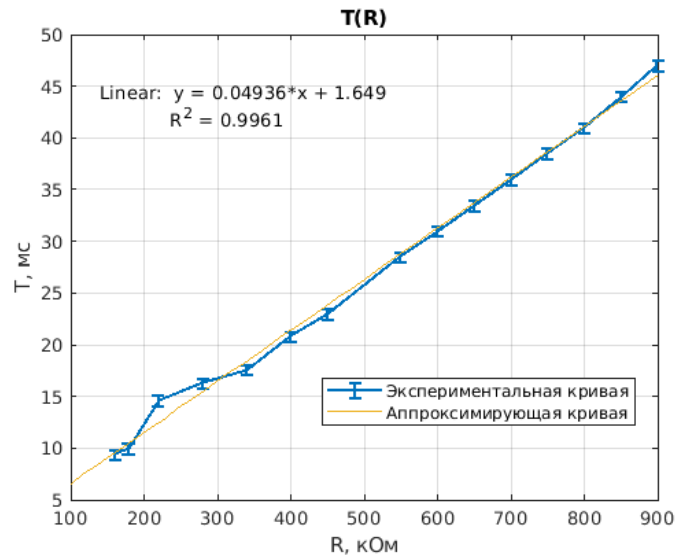
Погрешности для значения динамического потенциала гашения были найдены с помощью погрешности измерения  $\varepsilon$ ,  $k$  и стандартной формулы для погрешностей косвенных измерений.

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

Рис. 5: Зависимость  $T(C)$  с ошибками измеренияРис. 6: 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  $k = 44,5 \cdot 10^{-9}$

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

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  $U_2$ :

$$T = RC \ln \frac{\varepsilon - U_2}{\varepsilon - U_1} \Rightarrow U_2 = 84,8 \text{ В}, \Delta U_2 = 1,7 \text{ В} \quad (9)$$

## 4 Заключение

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

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.

## 5 Литература

1. **Лабораторный практикум по общей физике:** учеб. пособие. В трёх томах. Т. 2. Электричество и магнетизм / Никулин М. Г.,

Попов П. В., Нозик А. А., и др.; под ред. А. В. Максимычева, М. Г. Никулина. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : МФТИ, 2019. — 370 с. ISBN 978-5-7417-0709-8 (Т. 2. Электричество и магнетизм)