

Лабораторная работа 3.2.8

Релаксационные колебания

Аксенова Светлана

6 октября 2020 г.

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

В работе используются: стабилитрон СГ-2 (газонаправленный диод) на монтажной панели, магазин ёмкостей, магазин сопротивлений, источник питания, амперметр, вольтметр, осциллограф (ЭО), генератор звуковой частоты (ЗГ).

1 Теоретические сведения

Рассмотрим электрическую цепь, содержащую конденсатор и сопротивление без самоиндукции. Разряд конденсатора через сопротивление является аperiодическим процессом. Разряду, однако, можно придать периодический характер, возобновляя заряд конденсатора через постоянные промежутки времени. Колебания в этом случае являются совокупностью двух аperiодических процессов - процесса зарядки и разрядки конденсатора. Такие колебания называются релаксационными. Это колебательная система, которая содержит всего один накопитель энергии, таким образом, мы рассматриваем в данной работе вырожденные автоколебания.

В нашей установке «ключ», обеспечивающий попеременную зарядку и разрядку конденсатора, играет газоразрядный диод. Зависимость тока от напряжения для газоразрядной лампы изображена на [рис. 1](#). Она не подчиняется закону Ома и имеет ряд особенностей. При малых напряжениях лампа не пропускает ток вовсе (не горит), он возникает только в том случае, если разность потенциалов на электродах лампы достигает напряжения зажигания V_1 . При этом скачком устанавливается конечная сила тока I_1 - в лампе возникает *нормальный тлеющий заряд*. При дальнейшем увеличении напряжения сила тока заметно возрастает по закону, близкому к линейному. Нормальный тлеющий заряд - стабилизатор напряжения, отсюда второе название лампы - стабилитрон.

Если начать уменьшать напряжение на горячей лампе, то при напряжении V_1 лампа ещё не гаснет, и сила тока продолжает уменьшаться. Лампа перестаёт пускать ток лишь при *напряжении гашения* V_2 . Сила тока при этом скачком падает до нуля от значения I_2 . 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 носят второстепенный характер и для нашей задачи несущественны. Рассмотрим схему релаксационного генератора ([рис. 2](#)). Пусть напряжение батареи U больше напряжения зажигания V_1 . В обозначениях, принятых на схеме, справедливо уравнение

$$I_C + I(V) = \frac{U - V}{R}, \quad (1)$$

где $I_C = C \frac{dV}{dt}$. В стационарном режиме работы, когда напряжение на конденсаторе постоянно, ток через лампу равен

$$I_{st} = \frac{U - V}{R} \quad (2)$$

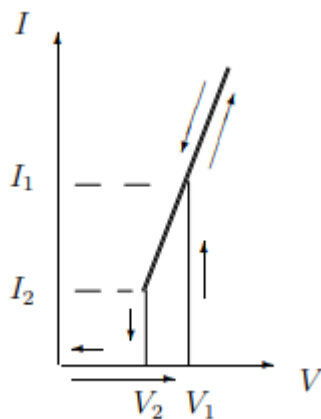


Рисунок 1 – Упрощённая ВАХ стабилитрона с последовательно включённым резистором

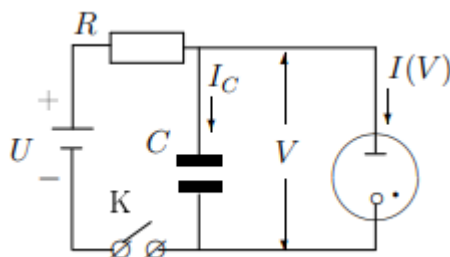


Рисунок 2 – Принципиальная схема релаксационного генератора

Графический вид уравнения (2) представлен на [рис. 3](#). При разных R графики имеют вид прямых, пересекающихся в точке $V = U, I = 0$. Область, где эти *нагрузочные прямые* пересекают ВАХ 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:

$$R_{cr} = \frac{U - V_2}{I_2} \quad (3)$$

При сопротивлении $R > R_{cr}$ нагрузочная прямая 3 не пересекает характеристику лампы, поэтому стационарный режим невозможен, в системе устанавли-

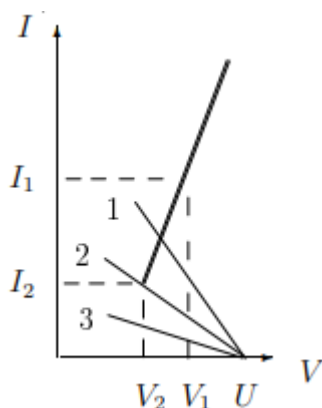


Рисунок 3 – Режим работы релаксационного генератора

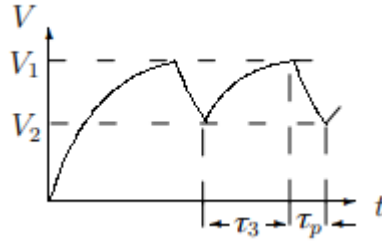


Рисунок 4 – Осциллограмма релаксационных колебаний

ваются колебания.

Рассмотри колебательный процесс. Пусть в начале опыта ключ K разомкнут (рис. 2) и $V = 0$. После замыкания ключа 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, при этом конденсатор разряжается, так как батарея U , подключённая через большое сопротивление R , не может больше поддерживать необходимую для горения лампы величину тока. Когда напряжение на нём достигнет потенциала гашения V_2 , лампа перестанет проводить ток, а конденсатор вновь начнёт заряжаться. Возникают релаксационные колебания с амплитудой $(V_1 - V_2)$.

Полное время одного периода колебаний T состоит из суммы времени зарядки τ_{ch} и времени разрядки τ_{dch} , но если сопротивление R существенно превосходит сопротивление зажжённой лампы, то $\tau_{ch} \gg \tau_{dch}$ и $T \simeq \tau_{ch}$.

Во время зарядки конденсатора лампа не горит, и уравнение (1) приобретает вид

$$RC \frac{dV}{dt} = U - V. \quad (4)$$

будем отсчитывать время с момента гашения лампы, так что $V = V_2$ при $t = 0$. Решаем (4) и находим:

$$V = U - (U - V_2) \exp^{-t/(RC)}. \quad (5)$$

В момент зажигания $t = \tau_{ch}$, $V = V_1$, поэтому

$$V_1 = U - (U - V_2) \exp^{-\tau_{ch}/(RC)}. \quad (6)$$

Из уравнений (5) и (6) нетрудно найти период колебаний:

$$T \simeq \tau_{ch} = RC \ln \frac{U - V_2}{U - V_1}. \quad (7)$$

Следует отметить, что приведённая выше теория - приближённая, все упрощения оговорены в тексте. Мы полностью пренебрегли паразитными емкостями и индуктивностью 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

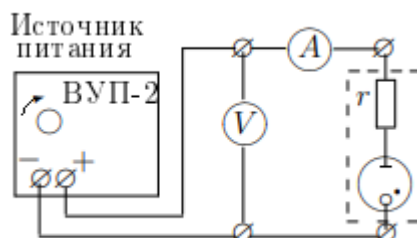


Рисунок 5 – Схема установки для изучения характеристик стабилизатора

статической вольт-амперной характеристики, может отличаться от потенциала гашения лампы, работающей в динамическом режиме релаксационных колебаний.

2 Характеристика стабилизатора

Схема установки для этой части работы представлена на [рисунке 5](#). Параметры установки и значения потенциалов зажигания и гашения V_1 и V_2 и соответствующие токи I_1 и I_2 представлены в [таблице 1](#). График $I = f(V)$ для системы, состоящей из стабилизатора и дополнительного сопротивления r и для стабилизатора без сопротивления r представлены, соответственно, на [рисунке 6](#) и на [рисунке 7](#).

| Величина | Значение | Абс. погрешность |
|----------|----------|------------------|
| r | 5,1 кОм | 1кОм |
| V_1 | 83,51 В | 0,11 В |
| I_1 | 2,196 мА | 0,008 мА |
| V_2 | 80,57 В | 0,11 В |
| I_2 | 1,6843 | 0,0027 мА |

Таблица 1 – Параметры стабилизатора и экспериментально полученные значения

3 Осциллограммы релаксационных колебаний

Схема установки для исследования релаксационных колебаний представлена на [рисунке 8](#). Параметры установки указаны в [таблице 2](#). Была подобрана частота развёртки ЭО, при которой на экране видна картина пилообразных колебаний ([рис. 4](#)). Было оценено соотношение между временем зарядки τ_{ch} и временем разрядки τ_{dch} , было экспериментально определено R_{cr} , при котором колебания пропадают. Все полученные результаты указаны в [таблице 2](#)

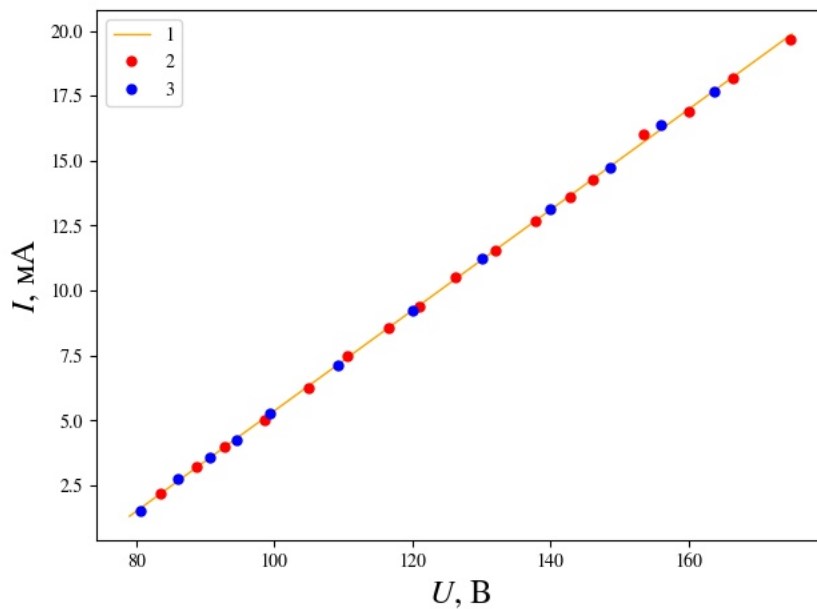


Рисунок 6 – График $I = f(V)$, построенный по результатам измерений

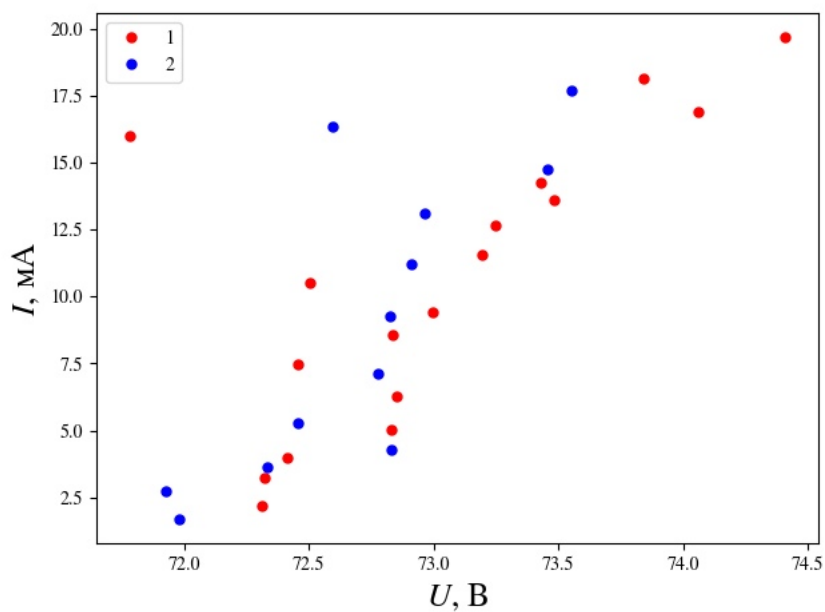


Рисунок 7 – График $I = f(V)$ для стабилитрона без сопротивления r

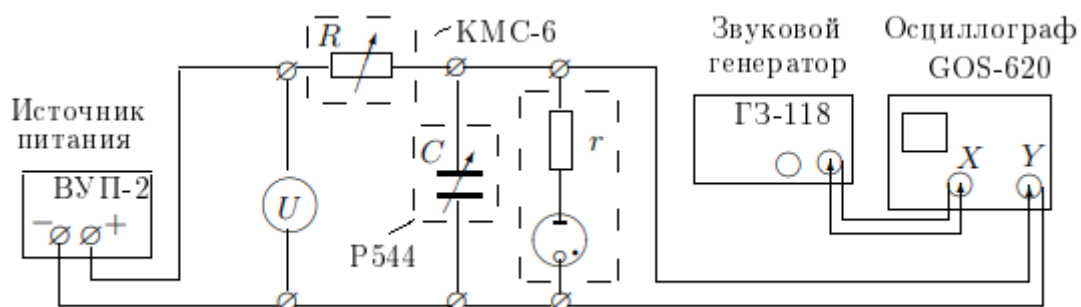


Рисунок 8 – Схема установки для исследования релаксационных колебаний

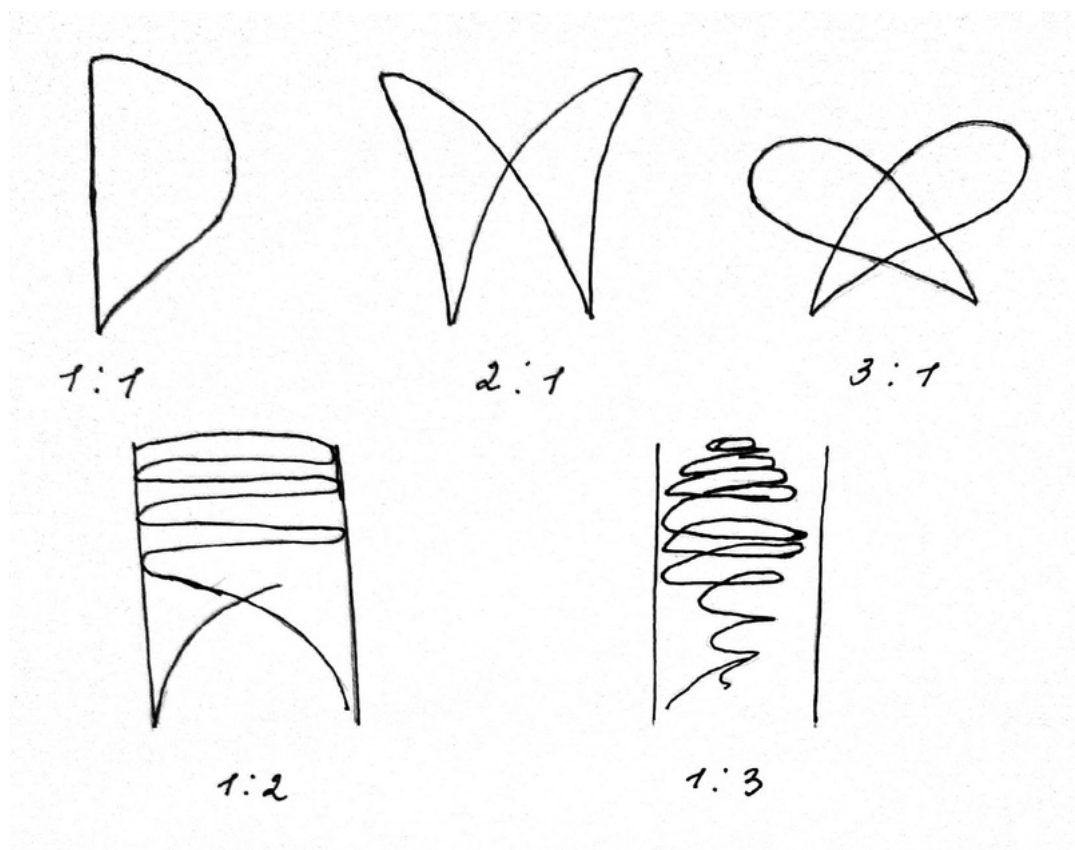


Рисунок 9 – Фигуры Лиссажу при разных соотношениях частот

| Величина | Значение | Абс. погрешность |
|--------------------------------|----------|------------------|
| C | 0,05 мкФ | 0,01 мкФ |
| R | 900 кОм | 1 кОм |
| U | 108.7 В | 1 В |
| $\frac{\tau_{ch}}{\tau_{dch}}$ | 12 | 6 |
| $R_{cr(exp)}$ | 200 кОм | 10 кОм |
| $R_{cr(th)}$ | 16,4 кОм | 0,6 кОм |

Таблица 2 – Параметры установки для получения пилообразных колебаний

4 Фигуры Лиссажу и частота колебаний

Меняя частота ЗГ, на экране были получена фигуры Лиссажу без самопересечений, соответствующая отношению частот 1:1 (при сложении двух гармонических колебаний это был бы эллипс). Также были получены фигуры Лиссажу в других соотношениях частот (рис. 9).

При сопротивлении $3R_{cr} = 600$ кОм, с помощью фигур Лиссажу 1:1 была снята зависимость частоты колебаний от ёмкости, меняя ёмкость в пределах от $5 \cdot 10^{-2}$ до $3 \cdot 10^{-2}$ мкФ (не удалось измерить диапазон, рекомендованный в методичке, так как возникли технические неполадки со стабилизатором), при этом постоянным поддерживалось напряжение U . На рис. 10 показаны зависимости периода от значения ёмкости C , полученная экспериментально и рассчитанная теоретически по формуле (7). Соответственно, коэффициенты наклона графика

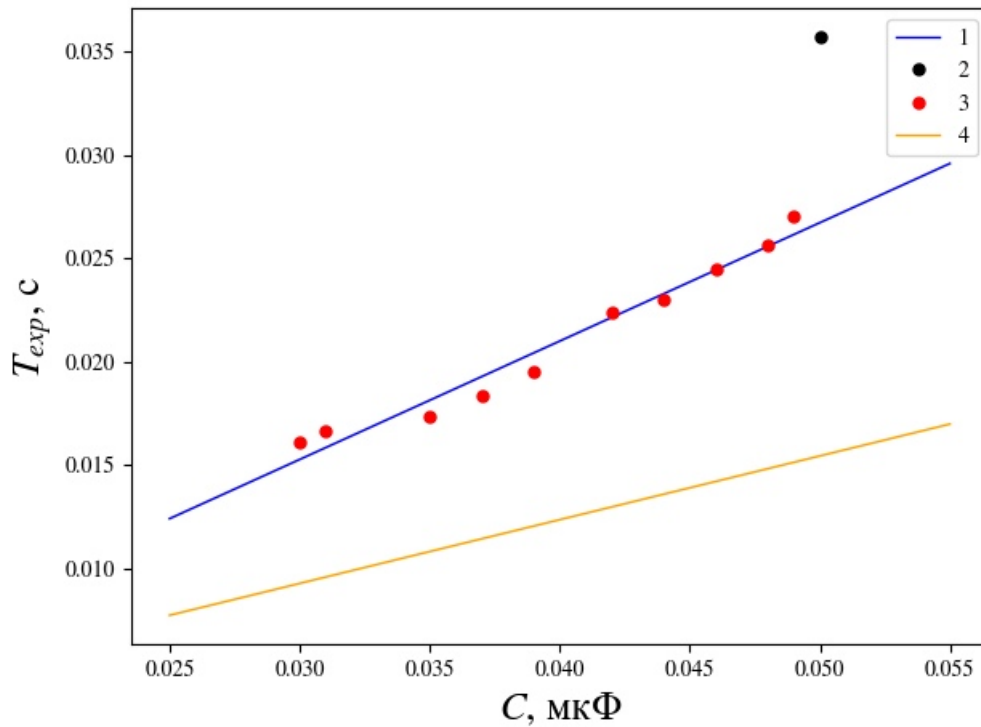


Рисунок 10 – Зависимость периода колебаний от значения ёмкости C : 1 - кривая, аппроксимирующая график, полученный экспериментально; 2- точка, которая не учитывалась при аппроксимации; 3 - точки, полученные экспериментально; 4 - теоретическая зависимость периода от значения ёмкости C

КОВ :

$$b_{exp} = 0,573 \pm 0,033 \text{ с/мкФ} , b_{th} = 0,3086 \pm 0,0044 \text{ с/мкФ} . \quad (8)$$

Аналогично была проведена серия измерений при постоянной ёмкости $C = 5 \cdot 10^{-2}$ мкФ, где величина R менялась в диапазоне от 400 до 900 кОм (не удалось измерить диапазон, рекомендованный в методичке, так как не хватило времени). На [рисунке 11](#) представлена зависимость периода от сопротивления R , полученная экспериментально и рассчитанная теоретически по формуле (7). Коэффициенты наклона графиков

$$b_{exp} = (4,51 \pm 0,08) \cdot 10^{-5} \text{ с/кОм} , b_{th} = (2,5 \pm 0,5) \cdot 10^{-5} \text{ с/кОм} . \quad (9)$$

5 Выводы и обсуждение результатов

Была получена вольт-амперная характеристика стабилитрона с нагрузочным сопротивлением r и без него. Первая зависимость - линейная, она соответствует заявленной на [рисунке 1](#), вторую зависимость не удалось аппроксимировать по методу наименьших квадратов к линейной.

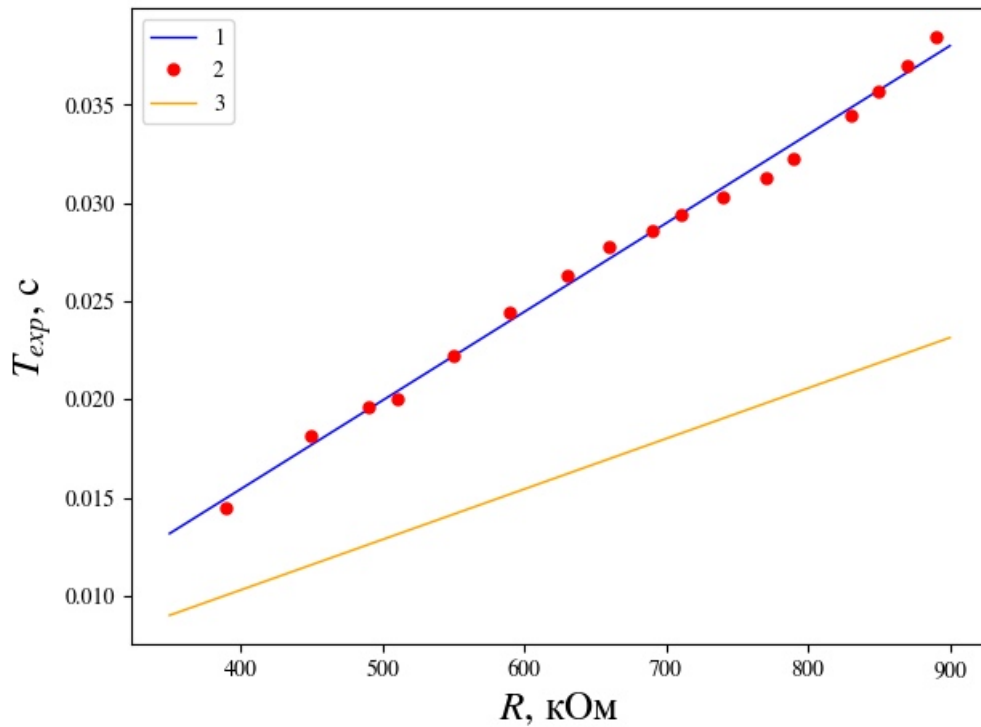


Рисунок 11 – Зависимость периода колебаний от значения сопротивления R : 1 - кривая, полученная аппроксимацией экспериментальных данных; 2 - экспериментальные точки; 3 - теоретически рассчитанная зависимость

Были исследованы релаксационные колебания: рассмотрены пилообразные колебания, оценено соотношение между временем зарядки и разрядки конденсатора ($\tau_{ch} \gg \tau_{dch}$) и экспериментально определено R_{cr} , которое заметно отличается от теоретически рассчитанного. Возможно, это связано с тем, что модель, в которой проводились теоретические расчёты, упрощённая. Поэтому из-за наличия паразитной ёмкости и индуктивности схемы не удалось получить полное соответствие теории и эксперимента.

Были рассмотрены фигуры Лиссажу при разных соотношениях частот. При соотношении 1:1 были исследованы зависимости периода колебаний от ёмкости C и от сопротивления R , также были построены теоретические зависимости, которые были рассчитаны по формуле (7).

6 Список литературы

1. [Методическое пособие по выполнению лабораторной работы](#)
2. Лабораторный практикум по общей физике: Учебное пособие в трех томах. Т. 2. Электричество и магнетизм. 2-е изд., перераб и дополн. / Никулин М.Г., Попов П.В, Нозик А.А. и др.; Под ред. А.В. Максимычева, М.Г. Никулина. – М.: МФТИ, 2019. – 370 с.

7 Приложение

[Ссылка на данные и их обработку](#)