

## 3.2.8 Релаксационные колебания

Радькин Кирилл Б01-005

19.10.21

**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), амперметр вольтметр, магазин сопротивлений, магазин емкостей, источник питания, осциллограф (ЭО), генератор звуковой частоты (ЗГ)

Колебательные системы, как правило, имеют два накопителя энергии, между которыми происходит ее перекачка.

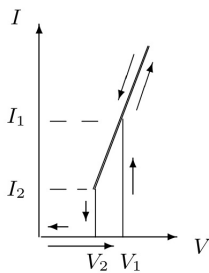


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика стабилитрона с последовательно включенным резистором

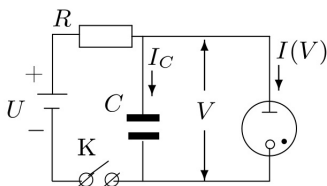
В контуре, содержащем конденсатор и катушку индуктивности, электрическая энергия переходит в магнитную и обратно.

Встречаются, однако, колебательные системы, содержащие всего один накопитель энергии. Рассмотрим в качестве примера электрическую цепь, содержащую конденсатор и сопротивление без самоиндукции. 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 попеременную зарядку и разрядку конденсатора, играет газоразрядный диод. Зависимость тока от напряжения для газоразрядной лампы не подчиняется закону Ома и характеризуется рядом особенностей (рис. 1). При малых напряжениях лампа практически не пропускает тока.

Ток в лампе возникает только в том случае, если разность потенциалов на ее электродах достигает напряжения зажигания  $V_1$ . При этом скачком устанавливается конечная сила тока  $I_1$  — в лампе возникает нормальный тлеющий заряд. При дальнейшем незначительном увеличении напряжения сила тока заметно возрастает по закону, близкому к линейному. Нормальный тлеющий заряд — стабилизатор напряжения, отсюда второе название — стабилон.

Рис. 2. Принципиальная схема релаксационного генератора



Если начать уменьшать напряжение на горячей лампе, то при напряжении, равном  $V_1$ , лампа еще 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, изображенная 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.

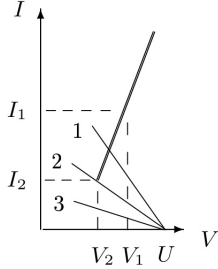


Рис. 3. Режимы работы релаксационного генератора

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

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

или

$$C \frac{dV}{dt} + I(V) = \frac{U - V}{R} \quad (1)$$

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

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

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 пересекаются 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

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

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  $V = 0$ . Замкнем ключ. Конденсатор  $C$  начнет заряжаться через сопротивление  $R$ , напряжение на нем увеличивается (рис. 4). Как только оно достигнет напряжения зажигания  $V_1$ , лампа начинает проводить ток, причем прохождение тока сопровождается разрядкой конденсатора. В самом деле батарея  $U$ , подключенная через большое сопротивление  $R$ , не может поддерживать необходимую для горения лампы величину тока.

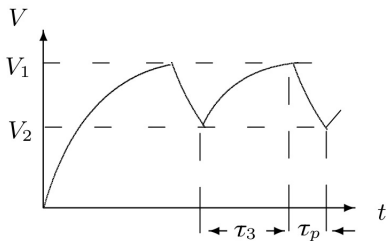


Рис. 4. Осциллограмма релаксационных колебаний

Во время горения лампы конденсатор разряжается, и когда напряжение на нем достигнет потенциала гашения, лампа перестанет проводить ток, а конденсатор вновь начнет 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 зажженной лампы, то  $\tau_3 \gg \tau_p$  и  $T \approx \tau_3$  (этим случаем мы и ограничимся).

Во время зарядки конденсатора лампа не горит ( $I(V) = 0$ ), и уравнение (1) приобретает вид

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

Будем отсчитывать время с момента гашения лампы, так что  $V = V_2$  при  $t = 0$  (рис. 4). Решив уравнение (4), найдем

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

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

$$V_1 = U - (U - V_2) \exp^{-\tau_3/RC} \quad (6)$$

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

$$T \approx \tau_3 = RC \ln \frac{U - V_2}{U - V_1} \quad (7)$$

## Задание

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 емкости и от емкости при фиксированном сопротивлении.

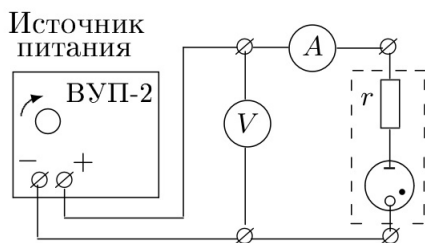


Рис. 5. Схема установки для изучения характеристик стабилитрона

### Характеристика стабилитрона

1. Соберем схему, изображенную на рис.5. Запишем величину  $r$ , указанную на панели лампы.  $r = 5.4$  кОм
2. Установим регулятор источника питания на минимум напряжения и включим источник в сеть.
3. Снимем вольт-амперную характеристику стабилитрона с сопротивлением  $r$  при возрастании и убывании напряжения. При этом как можно точнее определите потенциалы зажигания и гашения  $V_1$  и  $V_2$  и соответствующие токи  $I_1$  и  $I_2$ .

При возрастании				При убывании			
$I$ , мА	$U$ , В	$I$ , мА	$U$ , В	$I$ , мА	$U$ , В	$I$ , мА	$U$ , В
3.37	91.25	5.47	103.33	6.26	106.48	3.8	93.55
3.72	93.25	5.78	105.12	5.92	105.1	3.5	92.02
4.01	94.93	6.28	107.15	5.52	103.02	3.22	90.25
4.47	97.53	6.48	108.37	5.34	102.05	2.76	87.67
4.76	99.15			4.87	99.25	2.26	84.97
5.25	102.05			4.64	98.05	1.41	80.52
						0	75.4



Рис. 6. Картина колебаний

4.  $V_1 = 91.25$  В,  $V_2 = 75.40$  В,  $I_1 = 3.37$  мА,  $I_2 = 0.43$  мА

#### Осциллограммы релаксационных колебаний

5. Соберем релаксационный генератор согласно рис. 6
6. Установим на магазине емкостей значение  $C = 0.05$  мкФ, а на магазине сопротивлений  $R = 900$  кОм
7. Включим в сеть осциллограф, звуковой генератор и источник питания и Установим напряжение  $U = 109.5$  В
8. Подберем частоту развертки ЭО, при которой на экране видна картина пилообразных колебаний (рис. 4).
9. Получив пилу на экране, оценим время зарядки и время разрядки  $\tau_z = 60$  мс,  $\tau_p = 5$  мс. Картина колебаний см. ниже
10. Уменьшая сопротивление магазина, определим  $R_{кр}$ , при котором пропадают колебания и сравним его с величиной, рассчитанной по формуле (3).  $R_{крт} = 0.8 \cdot 10^5$  Ом,  $R_{кр} = 1.4 \cdot 10^5$  Ом

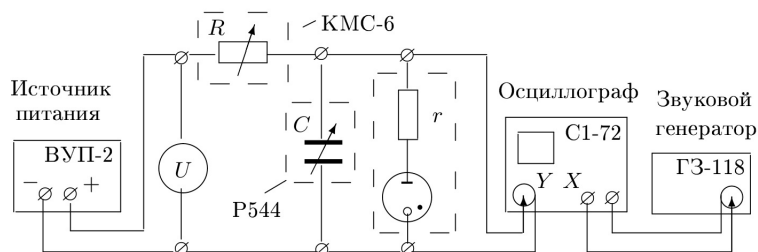


Рис. 7. Схема установки для исследования релаксационных колебаний

## Фигуры Лиссажу

11. Восстановим исходные параметры релаксационного генератора:  $C = 5 \cdot 10^{-2}$  мкФ,  $R = 900$  кОм,  $U \approx 1.2 \cdot V_1$ . Подадим сигнал с генератора на вход осциллографа. Меняя частоту ЗГ, получим на экране фигуры лиссажу без самопересечений, соответствующую отношению частот 1:1.
12. Не меняя параметров релаксационного генератора, уменьшим частоту ЗГ вдвое (втрое) и получим фигуры Лиссажу при соотношении частот 2:1 (3:1). Кривые приведены ниже.

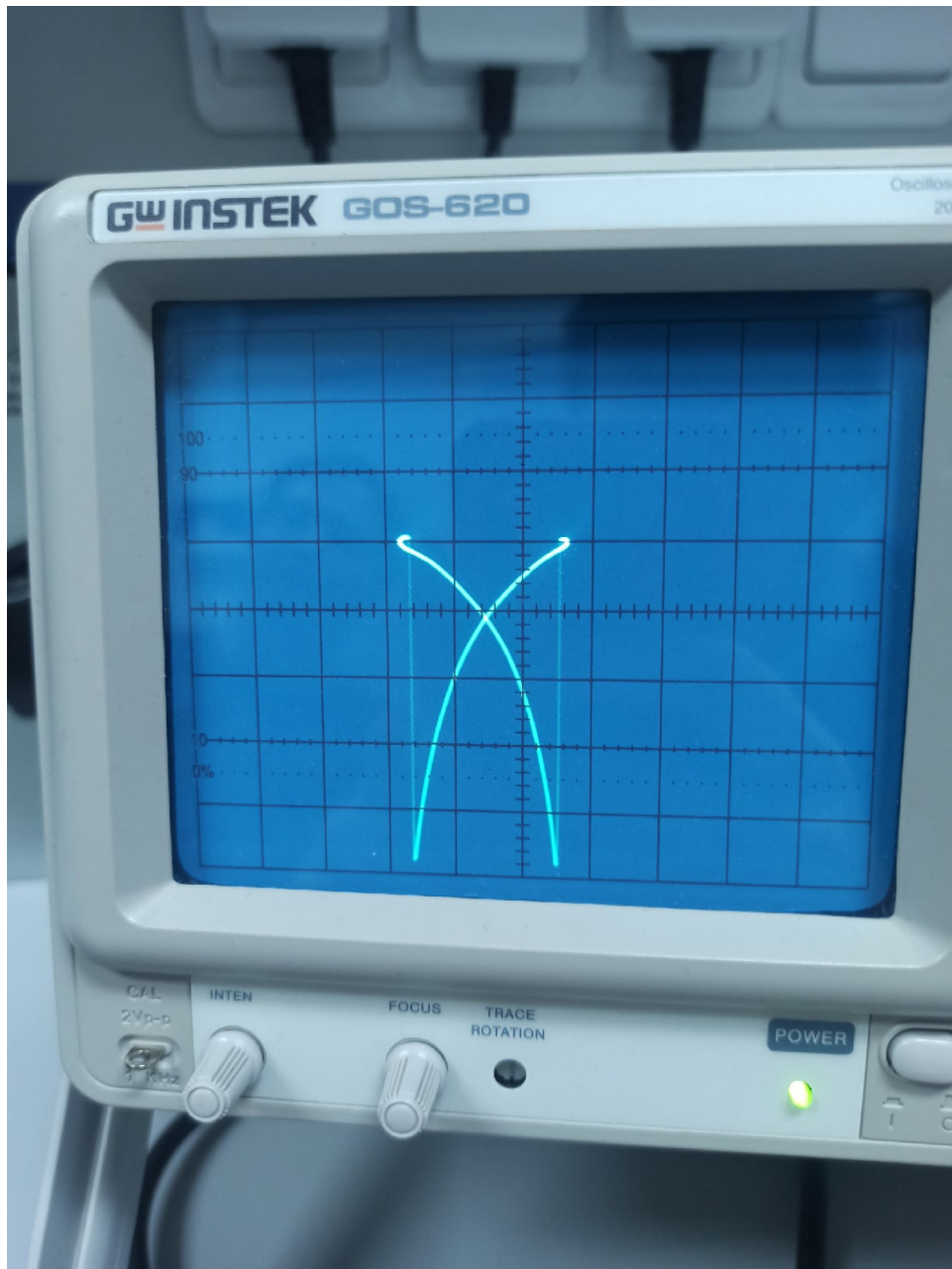


Рис. 8. Отношение частот 2:1

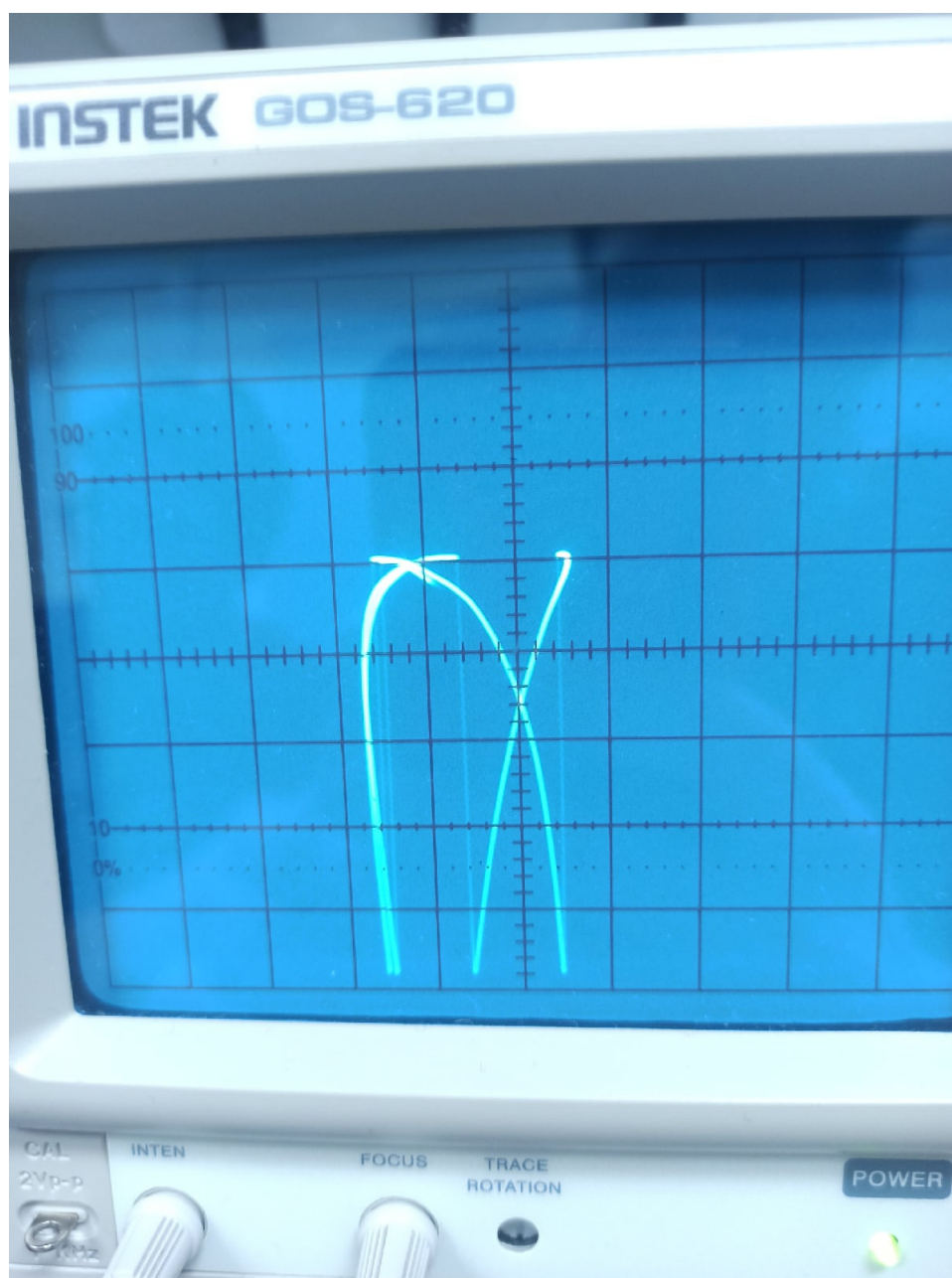


Рис. 9. Отношение частот 3:1

13. При значении  $R = 5.2 \cdot 10^5$  Ом снимем с помощью фигур Лиссажу 1:1 зависимость частоты колебаний  $f$  от емкости  $C$ , меняя величину емкости. Напряжение поддерживаем постоянным,  $U = 109.5$  В (таблицу см. ниже)
14. Проведем серию измерений  $f = f(R)$  при постоянной емкости  $C = 0.05$  мкФ, меняя величину  $R$  от максимального значения до критического.

$R = 5.2 \cdot 10^5$ Ом		$C = 0.05$ мкФ		$C = 0.05$ мкФ	
$f$ , Гц	$C$ , мкФ	$f$ , Гц	$R, 10^5$ Ом	$f$ , Гц	$R, 10^5$ Ом
150	0.01	17	9	39.5	4
75	0.02	19	8	53	3
50	0.03	22	7	78.2	2
37	0.04	25.7	6		
30	0.05	31	5		

## Обработка результатов

1. Построим графики  $I = f(V)$  для системы, состоящей из стабилитрона и дополнительного сопротивления  $r$  (по результатам измерений) и для стабилитрона без сопротивления (вычитая падения напряжения на сопротивлении при каждом токе).

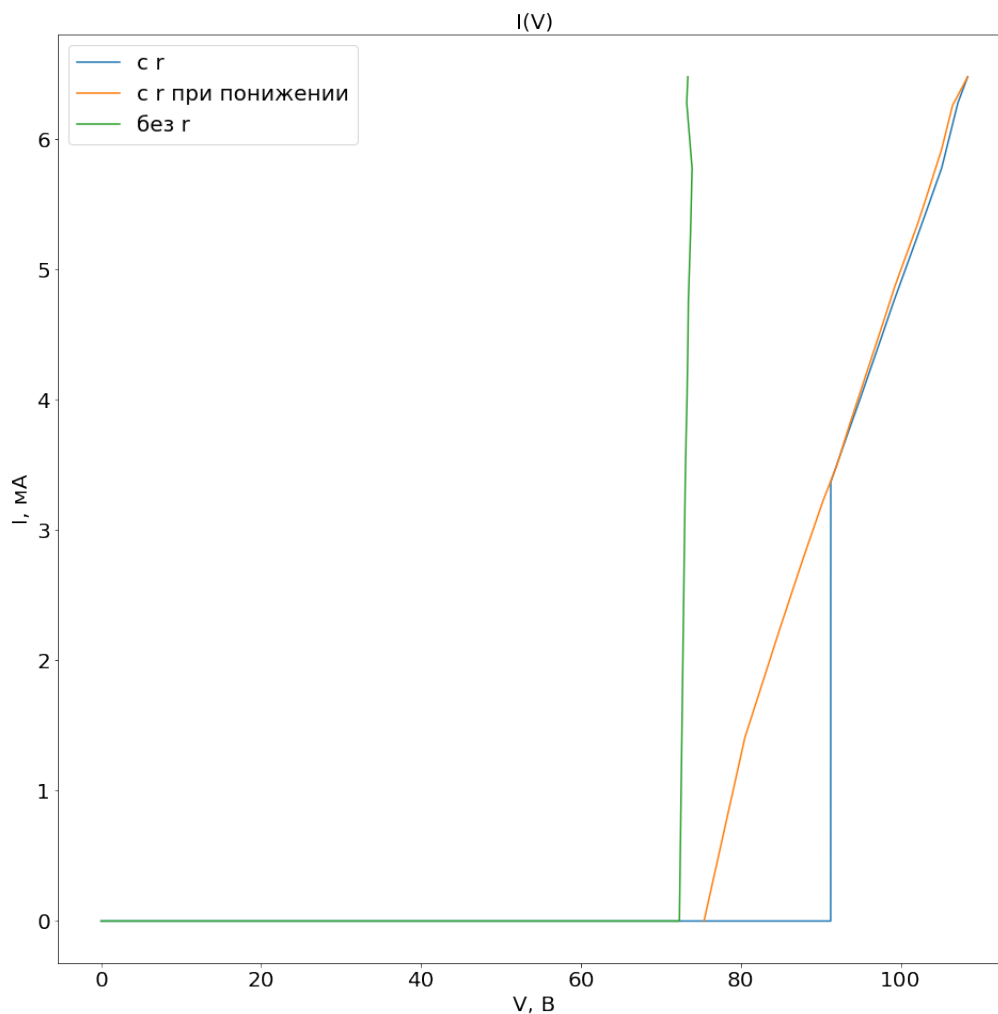


Рис. 10. График для пункта 1 обработки результатов

2. Рассчитаем экспериментальные и теоретические значения периодов, построим графики  $T_{\text{эскп}} = f(C)$  и  $T_{\text{теор}} = f(C)$ . На другом листе построим графики зависимостей периодов от  $R$ .

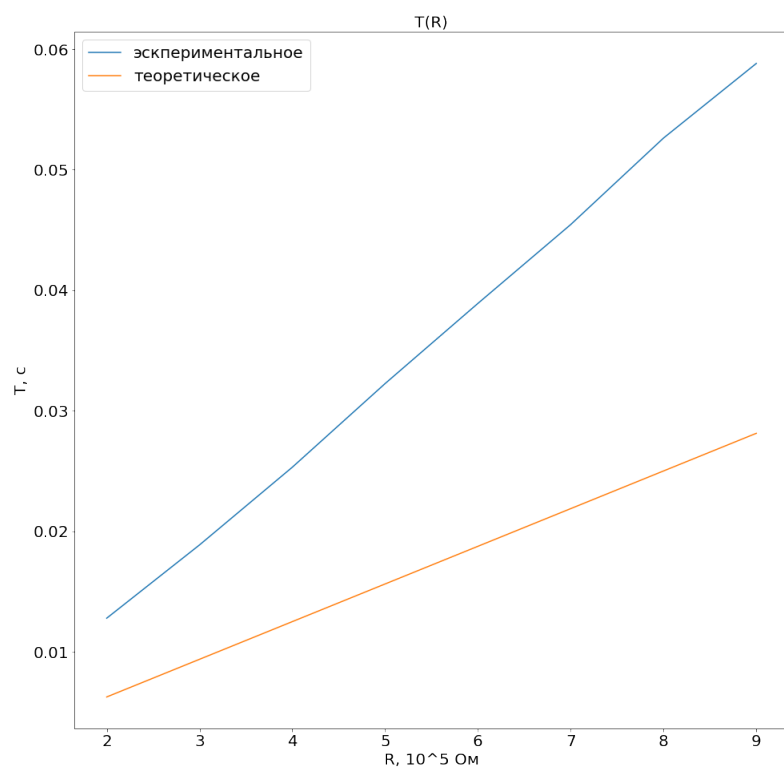
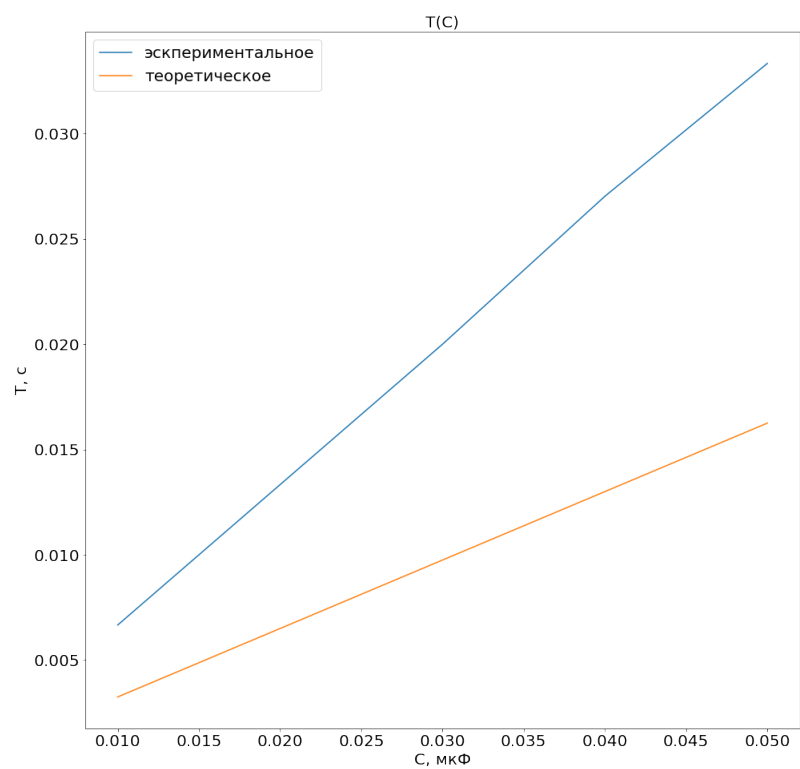


Рис. 11. Графики  $T(C)$  и  $T(R)$  для пункта 2 обработки результатов