

Стабилизация

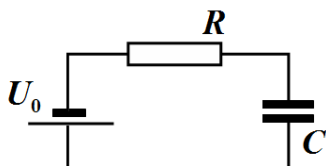
Условие

Задание 10-1. «Стабилизация»

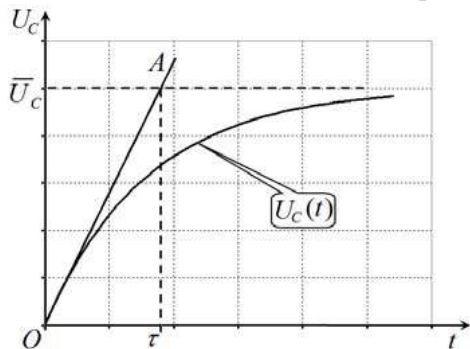
Приборы и оборудование: источник тока (батарейка 4,5 В), цифровой мультиметр, переменный резистор (потенциометр) 100 кОм, стабилитрон, резистор 30 кОм, конденсатор 4000 мкФ, ключ двухполюсный, соединительные провода.

Часть 1. Введение.

Вам необходимо измерять зависимость напряжения на конденсаторе от времени $U_C(t)$ при различных напряжениях источника U_0 (рис.1).



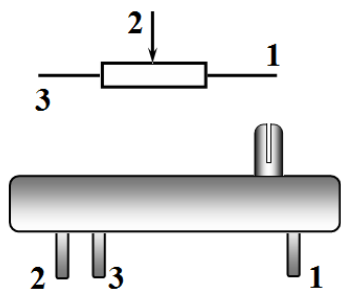
Эта зависимость не линейна, сначала скорость роста напряжения велика, затем она стремится к нулю, а напряжения достигает предельного стационарного значения $\bar{U}_C$ (схематически эта зависимость показана на рис. 2).



Строго говоря, время полной зарядки конденсатора бесконечно велико. Однако, в качестве временной характеристики процесса зарядки используется, так называемое, **характерное время зарядки** τ , которое определяется следующим образом. Считается, что скорость зарядки постоянна и равна скорости в начальный момент времени (когда конденсатор разряжен). В этом случае напряжение на конденсаторе растет пропорционально времени (прямая OA на рисунке). Время достижения предельного напряжения на конденсаторе, при таком линейном росте и является характерным временем зарядки τ .

1.1 Считая все элементы цепи (рис.1) идеальными, покажите, что - предельное значение напряжения на конденсаторе равно напряжению источника $\bar{U}_C = U_0$; - определенное выше характерное время зарядки равно $\tau = RC$.

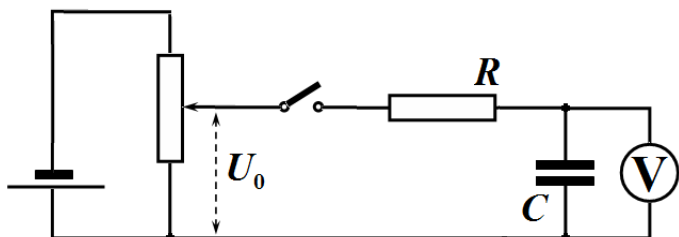
При сборке цепи учитывайте, что конденсатор – полярный элемент, а стабилитрон полупроводниковый, поэтому соблюдайте полярность их подключения. При подключении потенциометра руководствуйтесь следующим рисунком, где указаны номера выводов (2 – средний вывод).



*Предупреждаем! Потенциометр нелинейный – изменение сопротивления не пропорционально смещению движка! *Сопротивление мультиметра превышает 1 МОм, поэтому его можно считать идеальным вольтметром.**

Часть 2. Электролитический (полярный) конденсатор.

Соберите цепь, показанную на рисунке. С помощью движка реостата установите требуемое напряжение U_0 при отключенной внешней цепи (ключ разомкнут).



2.1 Измерьте зависимости напряжения на конденсаторе от времени при двух значениях напряжения U_0 (4,0В и 2,0В). На одном бланке постройте графики полученных зависимостей.

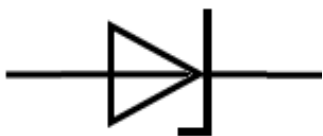
Перед каждым измерением убедитесь, что конденсатор полностью разряжен!

2.2 Объясните, почему предельные значения напряжения на конденсаторе $\bar{U}_c$ не совпадают с установленным напряжением U_0 . Для подтверждения вы можете провести некоторые дополнительные измерения.

2.3 Рассчитайте электрическое сопротивление конденсатора.

2.4 Используя полученные временные зависимости определите характерные времена зарядки конденсатора при двух напряжениях источника.

2.5 Проведите теоретический расчет характерных времен зарядки. Сравните результаты расчетов с экспериментальными данными. *Можете использовать графический метод – погрешности рассчитывать не требуется.*



Часть 3 Стабилитрон.

Стабилитрон – полупроводниковый прибор, предназначенный для поддержания постоянного напряжения на участке цепи. В некотором диапазоне сил токов напряжение на стабилитроне практически не зависит от силы тока.

3.1 Разработайте и нарисуйте электрическую схему, позволяющую измерить зависимость напряжения на стабилитроне от силы тока через него.

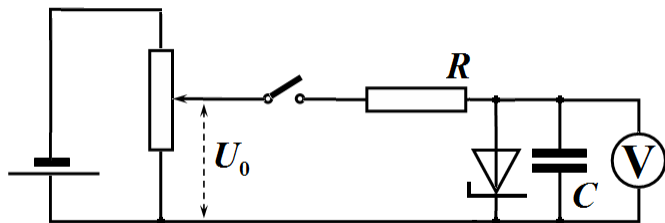
Для измерения, как силы тока, так и напряжения, рекомендуем использовать

мультиметр в режиме измерения напряжения. Подсказываем – используйте резистор с известным сопротивлением.

3.2 Проведите измерения зависимости напряжения на резисторе от силы тока через него $U(I)$. Постройте график полученной зависимости.

Часть 4. Конденсатор и стабилитрон.

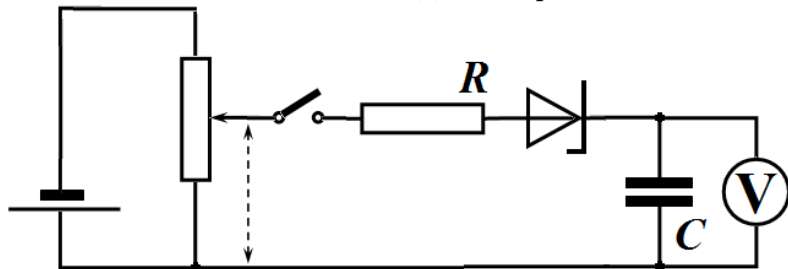
Опять соберите схему части 2. Подключите к конденсатору параллельно стабилитрон (смотрите маркировку на стабилитроне и конденсаторе).



4.1 Измерьте зависимость напряжения на конденсаторе от времени при двух значениях напряжения U_0 (4,0 В и 2,0 В), которое устанавливайте при разомкнутом ключе. Постройте графики полученных зависимостей.

Перед каждым измерением убедитесь, что конденсатор полностью разряжен!

4.2 Сравните полученные зависимости с аналогичными зависимостями, полученными в части 2. Качественно объясните сходства и различия этих зависимостей.



Теперь в схеме подключите стабилитрон последовательно к конденсатору (смотрите маркировку на стабилитроне и конденсаторе).

4.3 Измерьте зависимость напряжения на конденсаторе от времени при значениях напряжении U_0 равному 4,0 В. Постройте график полученной зависимости.

Перед каждым измерением убедитесь, что конденсатор полностью разряжен!

4.4 Качественно объясните полученную зависимость. Объясните полученные значения предельных напряжений на конденсаторе $\bar{U}_C$ и характерного времени зарядки конденсатора.

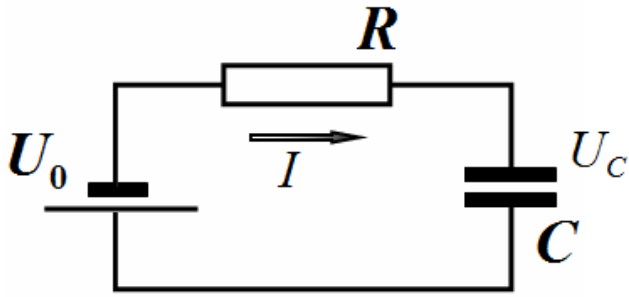
Решение

Задание 10-1. Стабилизация

Часть 1. Введение.

1.1 Для рассматриваемой цепи в любой момент времени справедливо уравнение (закон Ома):

$$U_0 = IR + U_C. \quad (1)$$



Если напряжение на конденсаторе достигает стационарного значения, то ток в цепи прекращается, поэтому при $I = 0$

$$\bar{U}_C = U_0. \quad (2)$$

В начальный момент зарядки напряжение на конденсаторе равно нулю $U_C = 0$, поэтому в этот момент сила тока равна

$$I_0 = \frac{U_0}{R}. \quad (3)$$

Следовательно, скорость изменения напряжения на конденсаторе в этот момент рассчитывается по формуле

$$\Delta U_C = \frac{\Delta q}{C} = \frac{I_0 \Delta t}{C} \Rightarrow \left(\frac{\Delta U_C}{\Delta t} \right)_0 = \frac{I_0}{C} = \frac{U_0}{RC}. \quad (4)$$

В соответствии с предложенной в условии методикой определяем характерное время зарядки

$$\tau = \frac{\bar{U}_C}{\left(\frac{\Delta U_C}{\Delta t} \right)_0} = RC. \quad (5)$$

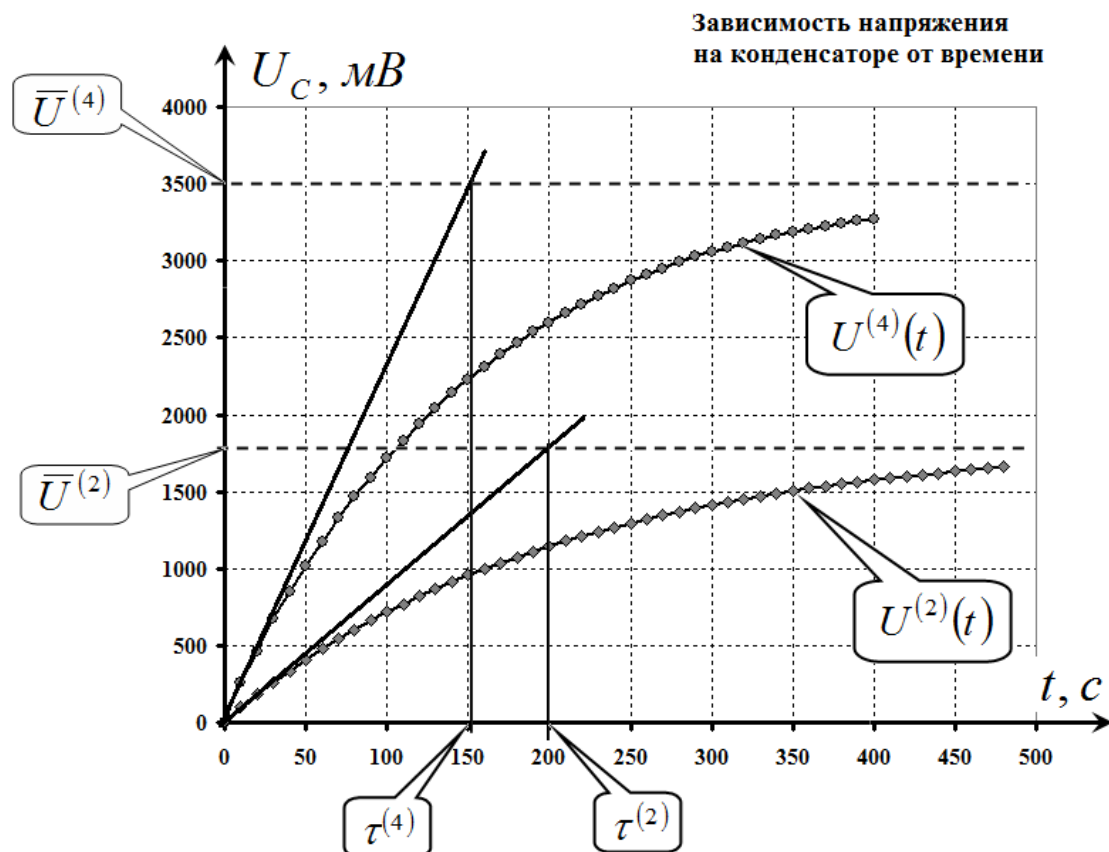
Часть 2. Электролитический (полярный) конденсатор.

2.1 Результаты измерений зависимостей напряжения на конденсаторе от времени при двух значениях напряжения U_0 ($U^{(4)}(t)$ при $U_0 = 4,0$ В и $U^{(2)}(t)$ при $U_0 = 2,0$ В) представлены в Таблице 1. Графики этих зависимостей показаны на рисунке.

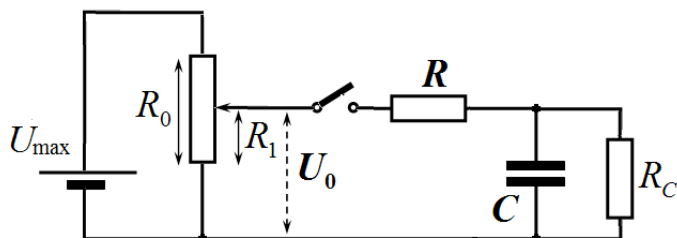
Таблица 1. Зарядка конденсатора.

$t, \text{ c}$	$U^{(4)}(t), \text{ мВ}$	$U^{(2)}(t), \text{ мВ}$	$t, \text{ c}$	$U^{(4)}(t), \text{ мВ}$	$U^{(2)}(t), \text{ мВ}$
5	180	60	200	2610	1110
10	260	100	205	2640	1130
15	380	130	210	2670	1140
20	470	170	215	2700	1160
25	560	210	220	2740	1170
30	660	240	225	2760	1190
35	760	280	230	2790	1210
40	830	320	235	2820	1220
45	920	350	240	2840	1230
50	1000	390	245	2870	1250
55	1090	420	250	2890	1260
60	1160	450	255	2920	1270
65	1230	480	260	2950	1290
70	1300	510	265	2970	1300
75	1380	540	270	2990	1310
80	1440	570	275	3020	1320
85	1510	600	280	3040	1340
90	1580	630	285	3050	1350
95	1640	660	290	3070	1360
100	1700	690	295	3100	1370
105	1770	710	300	3120	1380
110	1820	740	305	3140	1390
115	1870	760	310	3150	1400
120	1920	780	315	3170	1410
125	1980	810	320	3190	1420
130	2030	830	325	3200	1430
135	2080	850	330	3220	1440
140	2130	880	335	3230	1450
145	2180	900	340	3240	1460
150	2220	920	345	3260	1470
155	2280	940	350	3280	1480
160	2310	960	355	3290	1490
165	2360	980	360	3300	1500
170	2390	1000	365	3310	1500
175	2420	1020	370	3330	1510
180	2460	1040	375	3340	1520
185	2510	1060	380	3350	1530
190	2540	1070	385	3360	1540
195	2570	1090	390	3380	1540
200	2610	1110	395	3390	1550
			400	3400	1560

Зависимость напряжения на конденсаторе от времени



2.2 Главная причина неравенства предельных значений напряжения на конденсаторе $\bar{U}_C$ с установленными напряжениями U_0 - **ток утечки конденсатора**. Для подтверждения этого утверждения достаточно показать, что и в предельном режиме (по прошествии большого промежутка времени) достаточно провести измерения напряжения на резисторе — оно отлично от нуля, что свидетельствует о том, что ток в цепи продолжает идти. Так как напряжение на конденсаторе при этом не изменяется, то это есть ток утечки. Иными словами, для правильного описания режимов работы цепи в эквивалентную схему параллельно конденсатору следует добавить резистор с сопротивлением равным сопротивлению конденсатора.



2.3 Для расчета сопротивления конденсатора можно измерить установившиеся значения напряжений на резисторе и на конденсаторе. В этом случае (при отсутствии тока зарядки) выполняется соотношение (условия постоянства силы тока):

$$\frac{U_R}{R} = \frac{\bar{U}_C}{R_C} \Rightarrow R_C = R \frac{\bar{U}_C}{U_R}. \quad (6)$$

Проведенные измерения (после 1 часа зарядки) дали следующие значения²:

U_0 , В	$\bar{U}_C$, мВ	U_R , мВ	R_C , кОм
4,0	1848	102	540
2,0	3500	357	295

2 2

Важно (и неожиданно!), оказывается сопротивление конденсатора зависит от напряжения на нем: с ростом напряжения сопротивление падает («конденсатор течет сильнее»). Кроме того, даже в установившемся режиме сумма напряжений на конденсаторе и резисторе оказывается меньше начального установленного напряжения U_0 . Это связано с тем, что сопротивление делителя напряжений (потенциометра) оказывается сравнимым с сопротивлением подключенной цепи.

Для грубой оценки сопротивления конденсатора можно попытаться воспользоваться и данными снятыми с графиков зависимости напряжения на конденсаторе от времени, полагая, что суммарное напряжение не изменилось. Такие оценки дают следующие результаты: $(U^{(4)}(t))$ при $U_0 = 4,0В$ и $U^{(2)}(t)$ при $U_0 = 2,0В$)

$$\text{для } U_0 = 4,0В \quad R_C = R \frac{\bar{U}_C}{U_0 - U_R} = 30 \cdot \frac{3500}{4000 - 3500} \approx 210 \text{ кОм}$$

$$\text{для } U_0 = 2,0В \quad R_C = R \frac{\bar{U}_C}{U_0 - U_R} = 30 \cdot \frac{1750}{2000 - 1750} \approx 210 \text{ кОм}$$

При таком подходе получены заниженные оценки, кроме того не проявляются различия в сопротивлении конденсатора при разных напряжениях. Поэтому дополнительные измерения при большем времени зарядки необходимы!

2.4 По построенным графикам временных зависимостей можно определить примерные предельные значения напряжений на конденсаторах и характерные времена зарядки конденсатора при двух напряжениях источника. Такие построения показаны на рисунке, результаты представлены ниже:

$$\begin{aligned} \bar{U}^{(4)} &\approx 3,5 \text{ В}, \quad \tau^{(4)} \approx 150 \text{ с} \\ \bar{U}^{(2)} &\approx 1,8 \text{ В}, \quad \tau^{(2)} \approx 200 \text{ с} \end{aligned} \quad (7)$$

Важно отметить, что характерные времена зарядки зависят от начального напряжения, что свидетельствует о зависимости сопротивления конденсатора от напряжения на нем!

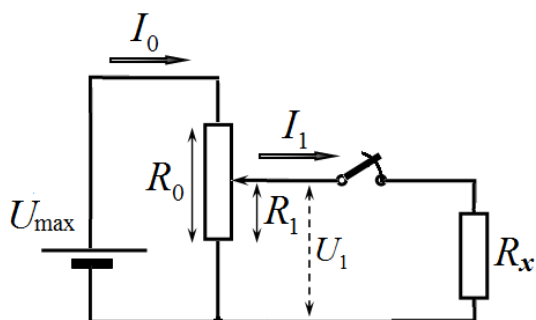
2.5 Теоретический расчет характерных времен зарядки представляет собой достаточно громоздкую, но посильную задачу. Прежде всего, отметим, что упрощенный расчет этих времен (при условии постоянства напряжения на выходе потенциометра) дает принципиально неверный результат.

Действительно, в рассматриваемой цепи (в рамках сделанного приближения) при зарядке выполняются соотношения

$$\bar{U} = \frac{U_0 R_C}{R + R_C}, \quad I_0 = \frac{U_0}{R}, \quad (8)$$

из которых следует, что $\tau = \frac{C\bar{U}}{I_0} = \frac{CR_C R}{R + R_C} < RC \approx 120 \text{ с}$. Хотя в действительности эти времена оказываются большими, чем RC .

Следовательно, необходимо полностью и корректно рассчитывать начальные токи и установившиеся напряжения на конденсаторе в цепи, показанной на рисунке. При этом в начальный момент времени следует полагать, что $R_x = R$ и рассчитать силу тока I_1 , а в установившемся режиме $R_x = R + R_C$ и найти напряжение на R_C .



Результаты таких расчетов представлены в таблицах

	R ₀ =	100	U _{max} =	4,8		
	R=	30	U ₀ =	4		
	C=	4,00E-03	R ₁ =	83,3		
R _c =	0				R _c =	300
R _x =	30				R _x =	330
R _{об} =	38,73				R _{об} =	83,2
I ₀ =	0,124				I ₀ =	0,058
I ₁ =	0,091				I ₁ =	0,012
					U lim=	3,49
					U _r lim=	0,35
		τ =	153 с			
	R ₀ =	100	U _{max} =	4,8		
	R=	30	U ₀ =	2		
	C=	4,00E-03	R ₁ =	41,7		
R _c =	0				R _c =	500
R _x =	30				R _x =	530
R _{об} =	75,78				R _{об} =	96,96
I ₀ =	0,063				I ₀ =	0,050
I ₁ =	0,037				I ₁ =	0,004
					U _{lim} =	1,80
					U _r lim=	0,11
		τ =	196 с			

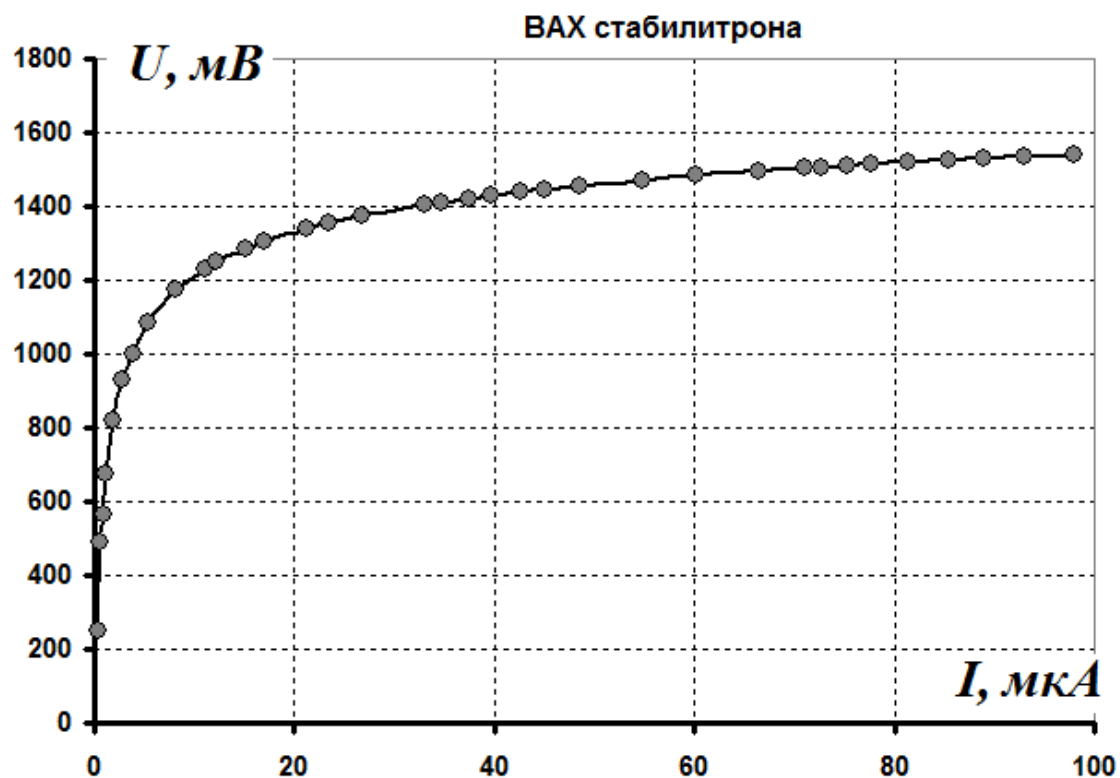
Полученные результаты совпадают с результатами измерений (как по временам зарядки, так и по предельным значениям).

Часть 3 Стабилитрон.

Схема для измерения вольтамперной характеристики стабилитрона очевидна. Результаты измерений и требуемый график приведены в таблице и на рисунке.

Таблица 2. ВАХ стабилитрона

U_r	**I_r**	**U_{ct}**	**U_r**	**I_r**	**U_{ct}**
мВ	мкА	мВ	мВ	мкА	мВ
9	0,30	251	1043	34,77	1412
19	0,63	490	1125	37,50	1422
25	0,83	567	1188	39,60	1431
34	1,13	677	1277	42,57	1440
55	1,83	819	1351	45,03	1447
83	2,77	931	1458	48,60	1457
114	3,80	1002	1646	54,87	1472
161	5,37	1087	1807	60,23	1483
246	8,20	1174	1994	66,47	1495
334	11,13	1232	2130	71,00	1503
366	12,20	1248	2180	72,67	1506
453	15,10	1286	2260	75,33	1511
511	17,03	1305	2330	77,67	1514
639	21,30	1342	2440	81,33	1519
702	23,40	1356	2560	85,33	1525
800	26,67	1375	2670	89,00	1530
993	33,10	1405	2790	93,00	1534
1043	34,77	1412	2940	98,00	1540



Важно отметить, что при токах больших 40 мкА напряжение на стабилитроне остается практически постоянным, что и оправдывает название этого прибора!

Часть 4. Конденсатор и стабилитрон.

4.1 Результаты измерения временных зависимостей напряжения на конденсаторе для схемы, показанной на рисунке, и соответствующие графики приведены в таблице 3 и на рисунке.

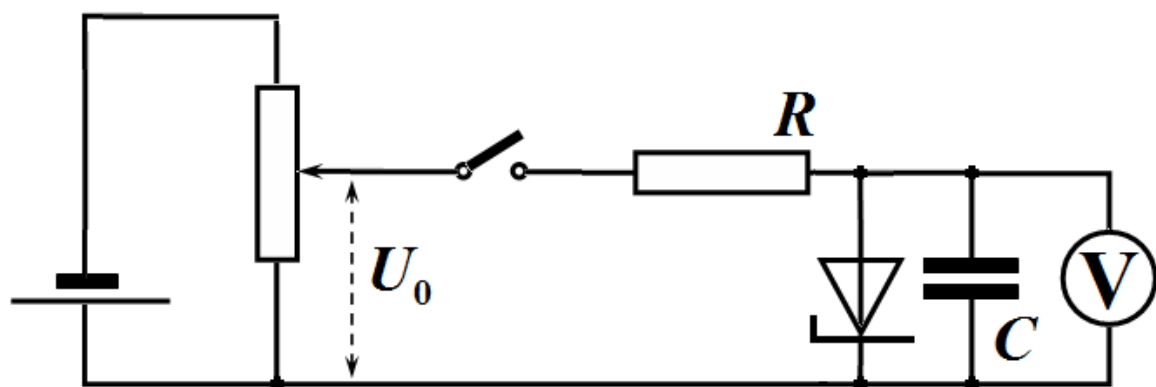
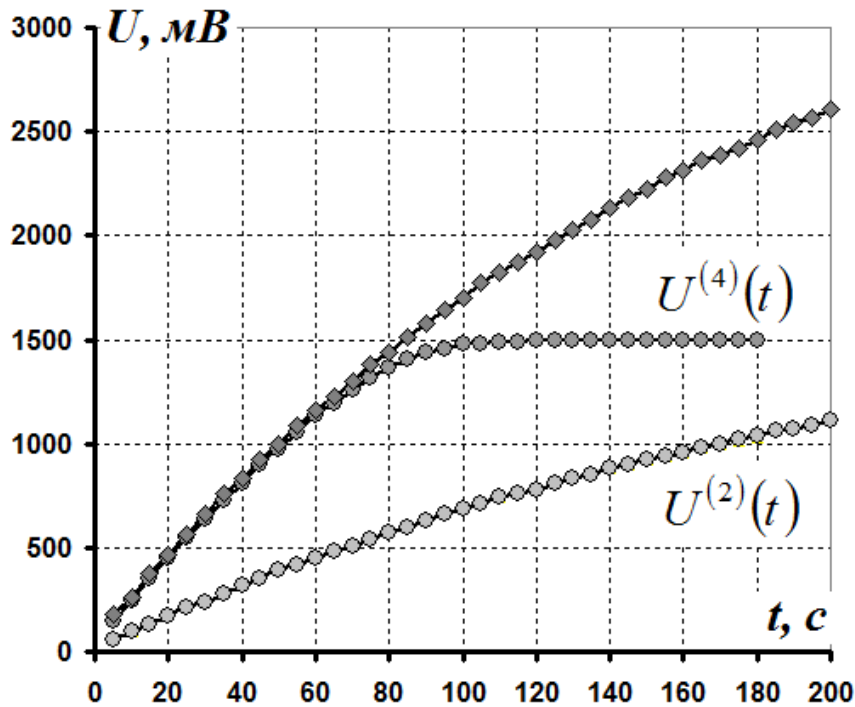


Таблица 3. Зарядка с параллельным стабилитроном.

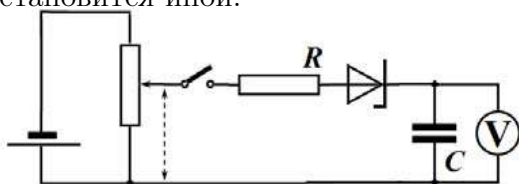
	4,0 B	2,0 B
t, c	$Ud, \text{ MB}$	$Ud, \text{ MB}$
5	150	68
10	246	101
15	348	142
20	450	180
25	548	221
30	641	257
35	724	295
40	811	330
45	899	363
50	976	399
55	1057	431
60	1138	464
65	1196	495
70	1259	526
75	1317	558
80	1364	584
85	1403	614
90	1437	641
95	1458	667
100	1477	695
105	1481	721
110	1486	746
115	1489	769
120	1492	792
125	1494	816
130	1495	838
135	1495	860
140	1496	881
145	1496	902
150	1496	923
155	1496	941
160	1496	960
165	1496	978
170	1497	994
175	1497	1012
180	1497	1026

Зарядка с параллельно подключенным стабилитроном



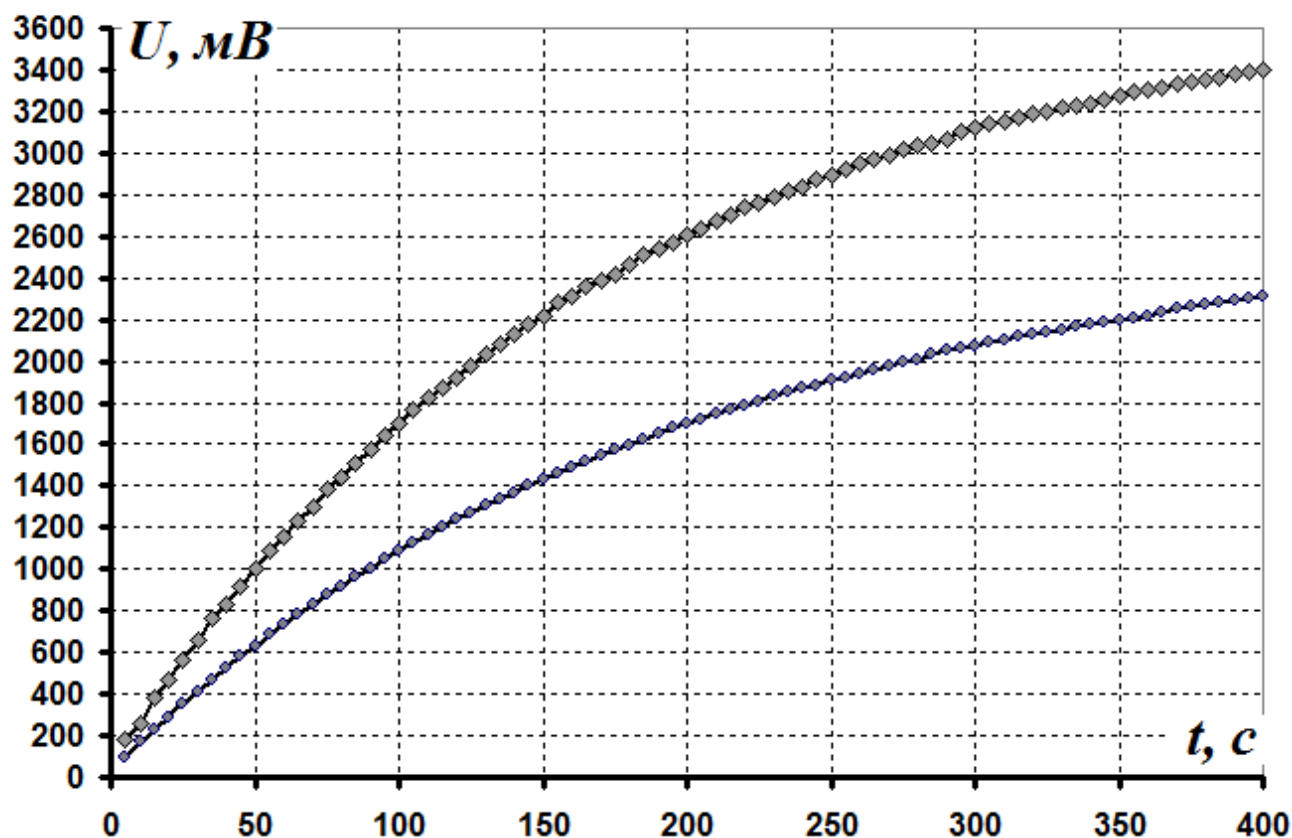
Пока напряжение на конденсаторе не достигло напряжения стабилизации, стабилитрон практически не влияет на процесс зарядки (для сравнения приведена кривая зарядки без стабилитрона). После того, как напряжение достигло 1,5 В зарядка прекращается – весь ток протекает через стабилитрон. При начальном напряжении 2,0 В стабилитрон практически не влияет на процесс зарядки, так как не достигается значения напряжения стабилизации.

4.2 При последовательном подключении стабилитрона временная характеристика зарядки становится иной.



Зарядка с последовательно подключенным стабилитроном

Зарядка с последовательно подключенным стабилитроном



Предельное напряжение уменьшается на напряжение стабилизации стабилитрона (т.е на 1,5 В). Так как стабилитрон вносит дополнительное сопротивление, возрастает также время зарядки конденсатора.

² Справедливости ради отметим, что на самом деле мы получаем сопротивление параллельно соединенных конденсатора и мультиметра (его сопротивление примерно равно 1,2 Мом, Поэтому реальное значение сопротивления конденсатора оказывается большим. Однако, в условии задачи оговорено, что мультиметр можно считать идеальным вольтметром, с бесконечно большим сопротивлением.