

Лабораторная работа №218.
Измерение ёмкости конденсатора.

Приборы и оборудование: магазин сопротивлений РЗЗ, мультиметр, генератор БЛ-7, генератор ВАС-810, осциллограф БДС-71022, конденсаторы различных ёмкостей.

- Осциллограммы напряжения $U_2(t)$ при различных значениях R_1 и частоте развёртки (Приложение 1).
- Зависимость времени заряда (разряда) от постоянной времени $R_1 C_1$.

R_1, Ω	$t, \text{мс}$	$\tau, \text{Гс}$	$C_1, \text{мкФ}$	$U_1, \text{В}$	$\Delta t, \text{мс}$	$\sigma C_1, \%$
1000	0,92	93,98	1	12,4	0,2	0,2
2000	1,76	51,04				
3000	2,76	30,27				
4000	3,64	28,16				
5000	4,56	23,12				
6000	5,44	20,32				

- Измерение неизвестной ёмкости с переменным напряжением типа «микро»
($U = 12 \text{ В}$)

R_1, Ω	$R_2^{(0)}, \Omega$	$R_2^{(+)}, \Omega$	$R_2^{(-)}, \Omega$	$C_1, \text{мкФ}$	$C_2, \text{мкФ}$	$R_{\text{эф}}, \Omega$
20	5	9	4	1	4,00	5
100	24	30	19	1	4,12	24,3
1000	244	253	237	1	4,09	244,7
10000	2440	2510	2380	1	4,09	2443,3

- Измерение неизвестной ёмкости с постоянным напряжением.

$U = 12 \text{ В}$:

R_1, Ω	$R_2^{(0)}, \Omega$	$R_2^{(+)}, \Omega$	$R_2^{(-)}, \Omega$	$C_1, \text{мкФ}$	$C_2, \text{мкФ}$	$R_{\text{эф}}, \Omega$
50	12	22	2	1	4,17	13
100	24	34	16	1	4,05	24,7
1000	240	249	230	1	4,17	239,7
10000	2420	2450	2380	1	4,14	2416,7

$U = 24 \text{ В}$:

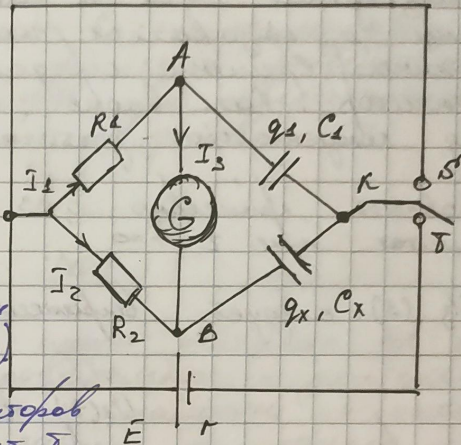
R_1, Ω	$R_2^{(0)}, \Omega$	$R_2^{(+)}, \Omega$	$R_2^{(-)}, \Omega$	$C_1, \text{мкФ}$	$C_2, \text{мкФ}$	$R_{\text{эф}}, \Omega$
50	12	18	6	1	4,17	12
100	24	29	18	1	4,22	23,7
1000	240	248	234	1	4,15	240,7
10000	2415	2426	2399	1	4,14	2413,3

10.09.21

Для измерения сопротивлений, емкостей и индуктивностей часто применяются мостовые схемы. В таких схемах элементы цепи соединяются "четырёхугольником", в одну диагональ которого включается источник напряжения, а в другую - измерительный прибор. При определенном соотношении между параметрами элементов измерительный прибор показывает отсутствие напряжения в диагонали (баланс моста).

В данной лабораторной работе измерительный мост используется для измерения емкости конденсатора.

В схеме, изображенной на рис. 1, R_1 и R_2 - малые сопротивления, C_1 - конденсатор известной емкости, C_x - измеряемая емкость, G - прибор для измерения напряжения, E - источник напряжения. Ключ K может быть замкнут на контакт δ (при этом конденсаторы C_1 и C_x заряжаются от источника напряжения) или на контакт δ (при этом конденсаторы разряжаются через сопротивления R_1 и R_2).



Рассмотрим процесс зарядки конденсаторов после замыкания ключа K на контакт δ .

Для упрощения выводов будем считать внутреннее сопротивление измерительного прибора (R_G) бесконечно большим, а источника напряжения (r) - пренебрежимо малым. Такие предположения справедливы, если выполняются неравенства:

$$R_G \gg R_1, R_2 \gg r$$

Применяя к контуру DABD второе правило Кирхгофа, получим

$$i_1 R_1 + \frac{q_1}{C_1} = E \quad (1)$$

где i_1 - ток, текущий через сопротивление R_1 , а q_1 - заряд конденсатора C_1 . Поскольку ток через измерительный прибор пренебрежимо мал (R_G велико), то $i_1 = \frac{q_1}{R_1}$ и уравнение (1) принимает вид

$$C_x = C_1 \frac{R_1}{R_2}$$

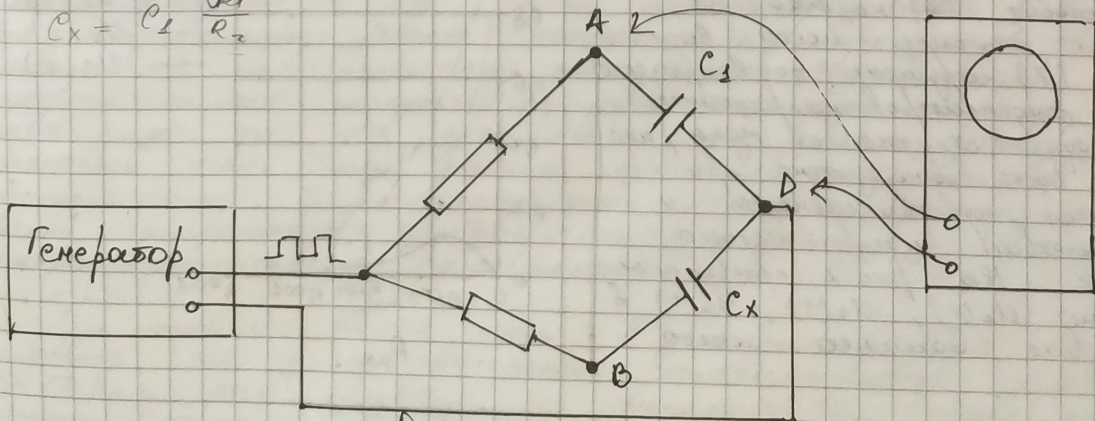


Рис. 3.

$$\frac{dq_1}{dt} + \frac{q_1}{R_1 C_1} = \frac{E}{R_1} \quad (2)$$

Разделяя переменные

$$\frac{dq_1}{q_1 - EC_1} = - \frac{dt}{R_1 C_1}$$

и интегрируя с учетом начального условия $q_1 = 0$ при $t = 0$, получаем

$$q_1(t) = C_1 E \cdot (1 - e^{-\frac{t}{R_1 C_1}}) \quad (3)$$

Произведение $R_1 C_1$ в показателе экспоненты имеет размерность времени и называется постоянной времени RC-цепи. Величина постоянной времени определяет, насколько быстро заряжается конденсатор. Как видно из формулы (3), за время $\tau = R_1 C_1$ заряд конденсатора достигает значения

$q_1(\tau) = C_1 E (1 - e^{-1})$, что составляет примерно 0,63 значения $C_1 E$, к которому заряд стремится при $\tau \rightarrow \infty$.

Из (3) следует выражение для напряжения U_1 на конденсаторе C_1 :

$$U_1(t) = E \cdot (1 - e^{-\frac{t}{R_1 C_1}}) \quad (4)$$

Напряжение на втором конденсаторе находим аналогичным образом из рассмотрения контура DBTD:

$$U_x(t) = E \cdot (1 - e^{-\frac{t}{R_2 C_x}}) \quad (5)$$

Напряжение U_0 на измерительном приборе (миллиметр точки А и В) равно разности напряжений на конденсаторах:

$$U_0(t) = U_1(t) - U_x(t) = E \cdot (e^{-\frac{t}{R_2 C_x}} - e^{-\frac{t}{R_1 C_1}}) \quad (6)$$

Из (6) следует, что при выполнении равенства

$$R_1 C_1 = R_2 C_x \quad (7)$$

напряжение U_0 во время равно нулю. Условие (7) называется условием балансировки моста. Если условие (7) нарушено, то в процессе зарядки конденсаторов напряжение $U_0(t)$ будет отклоняться от нуля, что можно было бы обнаружить при достаточной чувствительности и быстродействии измерительного прибора. На рис. 2 приведены графики $U_1(t)$, $U_x(t)$, $U_0(t)$ в отсутствие балансировки моста.

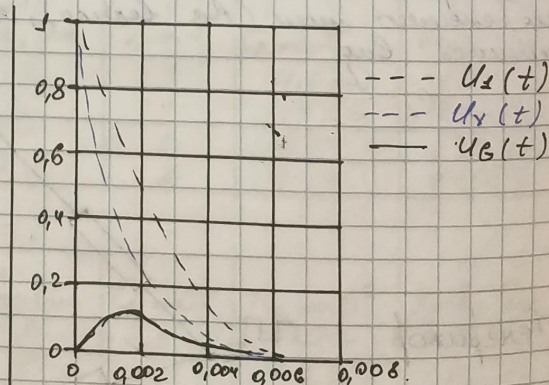


Рис. 2

После замыкания ключа K на шину конденсаторов, в ходе которого напряжения $U_1(t)$, $U_x(t)$, $U_0(t)$ изменяются следующим образом:

$$U_1(t) = E \cdot e^{-\frac{t}{R_1 C_1}}, \quad U_x(t) = E \cdot e^{-\frac{t}{R_1 C_x}} \quad (8)$$

$$U_0(t) = E \cdot \left(e^{-\frac{t}{R_1 C_1}} - e^{-\frac{t}{R_1 C_x}} \right) \quad (9)$$

Для баланса метода напряжения на измерительном приборе, как и при зарядке, также равно нулю.

Для измерения емкости конденсатора C_x следует, подбирая значения сопротивлений R_1 и (или) R_2 , добиться равенства нулю показаний измерительного прибора при переключении ключа K , т.е. баланса метода. При этом из условия (7) измеряемая емкость находится как

$$C_x = C_1 \frac{R_1}{R_2} \quad (10)$$

При реализации данного метода следует учитывать, что фронсы зарядки (разрядки) конденсаторов, а, следовательно, и длительность импульса U_0 , оказываются достаточно малыми и поэтому отклик измерительного прибора будет зависеть не только от чувствительности прибора, но и от его инерционных свойств. В данной лабораторной работе предусмотрено проведение измерений в двух режимах: безинерционном и инерционном.

При безинерционном (манипуляционном) наблюдении прибор условно "отслеживает" все изменения измеряемой величины. В качестве такого прибора в работе используется осциллограф, обладающий достаточно быстрым действием для наблюдения формы импульсов $U_0(t)$. О величине разбаланса метода можно судить по малейшему заметному напряжению $U_0(t)$.

При инерционном наблюдении прибор не обладает достаточным быстродействием для отслеживания изменений измеряемой величины. Вискозучувствительный нуль-гальванометр, установленный в диагональ моста, является типичным прибором, реализующим инерционное наблюдение. Время установления стрелки в таком гальванометре существенно больше времени зарядки/разрядки конденсаторов. Процесс измерения в этом случае можно представить в виде двух последовательных этапов: сначала, из-за проходящего через гальванометр кратковременного тока, рамка гальванометра получает некоторый момент импульса (приобретает угловую скорость), а затем, когда ток уже прекратился, эта рамка отклоняется на некоторый угол. Такой режим измерения называется баллистическим. В баллистическом режиме отклонение стрелки гальванометра пропорционально произведению через гальванометр заряду (см. Приложение 1).

При анализе работы схемы в данном режиме следует заметить, что у чувствительных гальванометров условие $R_0 \gg R_1, R_2$, как правило, не выполняется. Однако, если между точками A и B разность потенциалов отсутствует, то ток через измерительный прибор будет равен нулю при

но, и следовательно, величина R_0 на
уравнении $\dots$ может вычислять не будет.

Экспериментальная часть.

1. Составить схему на рис. 3. На вход измерительного моста с генератора подать напряжение тока "микро".

Подключив осциллограф к точкам А, В схемы, наблюдать осциллограммы напряжений $U_1(t)$ и $U_{AB}(t)$ при разных значениях R_2 (значение R_2 при этом установить максимальное возможное). Измерить соответствующие времена задержки (разрядки) конденсатора.

Построить график зависимости времени задержки (разрядки) конденсатора от постоянной времени $R_2 C_1$.

2. Наблюдать на осциллографе и зарисовать несколько осциллограмм напряжений $U_1(t)$ и $U_{AB}(t)$ (при одинаковых скоростях развертки осциллографа и "полюх" сбалансированного моста).

3. Измерить известную емкость C_1 , используя в качестве осциллографа в качестве измерительного прибора. Измерения проводить несколько раз с различными R_2 .

~ При всех измерениях фиксировать диапазон изменений R_2 (ΔR_2), для которого отклонение нуля осциллографа от нулевого уровня не превышает некоторого фиксированного значения, выделенного в зависимости от уровня нулей.

4. Составить схему, приведенную на рис. 1, с гальванометром в качестве измерительного прибора. Измерить емкость конденсатора C_1 . Измерения проводить несколько раз с различными R_2 (от $R_2 \ll R_0$ до $R_2 \gg R_0$).

~ При всех измерениях фиксировать диапазон изменений R_2 (ΔR_2), для которого отклонение стрелки гальванометра от нуля не превышает некоторого отклонения стрелки гальванометра от нуля не превышает некоторого фиксированного значения (максимум, не превышающий половины деления шкалы гальванометра).

5. По результатам, полученным в п. 1 и п. 4, построить графики зависимости логарифмов измерений от величины R_2 .

Приложение 1. Баллистический режим работы гальванометра.

Гальванометр - это магнитоэлектрический прибор для измерения малых токов. Рамка, состоящая из большого числа витков тонкого провода, помещена в магнитное поле постоянного магнита и может поворачиваться вокруг своей оси. Последствие рамки фиксируется пружинками специальной формы, по которым, как правило, и ней и подводится измерительный ток. На рамку с током действует момент сил Лоренца, пропорциональный току I в рамке, и момент упругих сил пружинки, пропорциональный углу отклонения этой рамки от положения равновесия.

Запишем ур-е моментов относительно оси вращения рамки:

$$J \cdot \frac{d\omega_z}{dt} = I_c N S B - D \cdot \alpha \quad (11)$$

Здесь J - момент инерции рамки, $\omega_z = \frac{d\alpha}{dt}$ - её угловая скорость вращения, N - число витков, S - площадь рамки, B - индукция магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами, D - коэффициент, характеризующий упругость пружинки.

В уравнении (11) не учтено возное время, оказывающее демпфирующее действие на рамку.

При достаточно быстром протекании тока рамка практически не успевает отклониться. В этом случае уравнение (11) легко интегрируется:

$$J d\omega_z = I_c N S B dt, \quad \omega_{z0} = \frac{N S B}{J} \int I_c dt = \frac{N S B}{J} Q,$$

где ω_{z0} - угловая скорость полученная рамкой, а Q - заряд, прошедший через гальванометр. Если протекание действия сил Лоренца рамка гальванометра, продолжая вращаться, отклоняется на некоторый угол, который можно найти, используя закон сохранения энергии

$$\frac{J \omega_{z0}^2}{2} = \frac{D \alpha_{max}^2}{2}, \quad \text{откуда } \alpha_{max} = \frac{N S B Q}{\sqrt{J D}}$$

На практике из-за вязкого трения, отклонение стрелки гальванометра будет несколько меньше, но оно все равно пропорционально заряду, прошедшему через гальванометр.

Приложение 2. Расчёт погрешности, вносимой конечной чувствительностью нм - индикатора.

Баланс не всегда невозможно определить абсолютно точно. Измерительный прибор, находясь в состоянии покоя имеет конечную чувствительность и поэтому не будет реагировать на очень малые токи. Однако, выходя из процесса измерения ёмкости конденсаторной чувствительностью прибора C , можно оценить, определив вариацию (изменение) сопротивления (например R_2), при которой уже можно заметить "неуловимые" показания прибора.

В случае "разбаланса" измерительного моста сопротивление

в виде.

$$R_2 = R_2^* + \Delta R_2 = R_2^* \cdot \left(1 + \frac{\Delta R_2}{R_2^*}\right) = R_2^* (1 + \delta R_2), \quad (12)$$

где $R_2^* = \frac{R_1 C_1}{C_x}$ соответствует условию баланса моста, а $\frac{\Delta R_2}{R_2^*} = \delta R_2$ будет характеризовать относительное отклонение R_2 от R_2^* (погрешность определения R_2).

Расчёт погрешности, вносимой конечной чувствительностью осциллографа (безинерционное измерение)

При малоинерционном наблюдении о величине разбаланса измерительного моста можно судить по максимальному значению напряжения $U_0(t)$. Максимум функции $U_0(t)$ находится дифференцированием выражения (6). С учётом малости δR_2 в (12), можно получить

$$\max |U_0| \approx \left| E \cdot \frac{\delta R_2}{(1 + \delta R_2) R_2} \right| \approx \left| \frac{E}{R_2} \cdot \delta R_2 \right|,$$

где e - основание натурального логарифма

Пусть $U_{\min}$ минимальное напряжение, которое уверенно регистрируется прибором как не нулевое. Тогда условие обнаружения разбаланса можно записать, как $\max |U_0| \geq |U_{\min}|$, следовательно относительная ошибка, связанная с конечной чувствительностью измерительного прибора, пересчитанная в погрешность определения R_2 , равна $\delta R_2 \approx \frac{e \cdot U_{\min}}{E}$, уменьшающаяся при увеличении E и не зависящая от значений R_1 и R_2 .

Расчёт погрешности, вносимой конечной чувствительностью гальванометра (инерционное измерение)

У чувствительных гальванометров условие $R_0 \gg R_1$, а пока правило не выполняется. Поэтому проверим работу схемы, показанной на рис. 1, в предположении конечности сопротивления измерительного прибора. Пользуясь правилом Кирхгофа, запишем систему уравнений:

$$\begin{cases} I_1 R_1 + \frac{q_1}{C_1} = E, \\ I_2 R_2 + \frac{q_x}{C_x} = E, \\ I_1 R_1 + I_0 R_0 - I_2 R_2 = 0, \\ I_1 - I_0 - \frac{dq_1}{dt} = 0, \\ I_0 + I_0 - \frac{dq_x}{dt} = 0 \end{cases}$$

Исключая ток I_1 и I_0 , эту систему можно свести к:

$$\begin{cases} \frac{dU_1}{dt} + \frac{U_1}{R_1 C_1} = \frac{E}{R_1 C_1} - \frac{U_1 - U_x}{R_0 C_1}, \\ \frac{dU_x}{dt} + \frac{U_x}{R_2 C_x} = \frac{E}{R_2 C_x} + \frac{U_1 - U_x}{R_0 C_x} \end{cases} \quad (13)$$

или малой разбросанности моста.

Используя (12) и малость δR_2 , второе уравнение системы (13) сводится к следующему виду:

$$\frac{dU_x}{dt} + \frac{U_x}{R_1 C_1} (1 - \delta R_2) = \frac{E}{R_1 C_1} (1 - \delta R_2) + \frac{U_2 - U_x}{R_2 C_x}$$

Воспользуемся полученное уравнение из первого в (13) и, учитывая, что $U_2 - U_x = U_0$, получаем:

$$\frac{dU_0}{dt} + U_0 \left(\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_x} \right) \right) = \frac{\delta R_2}{R_1 C_1} (E - U_x) \quad (14)$$

Подставим в правую часть выражения (14) в качестве нулевого приближения $U_x(t)$ из (5) и найдем $U_0(t)$:

$$U_0(t) = \frac{E \cdot \delta R_2 \cdot \tau}{R_1 \cdot C_1} e^{-\frac{t}{R_2 C_1}} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (15)$$

$$\text{где } \tau = \frac{R_2 \cdot C_1 \cdot C_x}{C_1 + C_x} = \frac{R_2 \cdot C_1 \cdot R_1}{R_1 + R_2^*}$$

Заряд, прошедший через гальванометр, можно определить, интегрируя по времени выражение (15) (предельное по R_2):

$$Q = \frac{R_1 \cdot C_1}{R_1 + R_2^* + R_2} \cdot E \cdot \delta R_2 \quad (16)$$

Пусть $Q_{\min}$ - минимальный заряд, прохождение которого через гальванометр мы ещё можем обнаружить. Тогда справедливо будет следующее соотношение, "предельная" в ошибку определяемая R_2 :

$$\delta R_2 = Q_{\min} \frac{R_1 + R_2^* + R_2}{R_1 C_1 E} = Q_{\min} \frac{1 + \frac{C_1}{C_x} + \frac{R_2}{R_1}}{C_1 E}$$

Как видно из выражения (17), относительная ошибка уменьшается при увеличении R_1 .

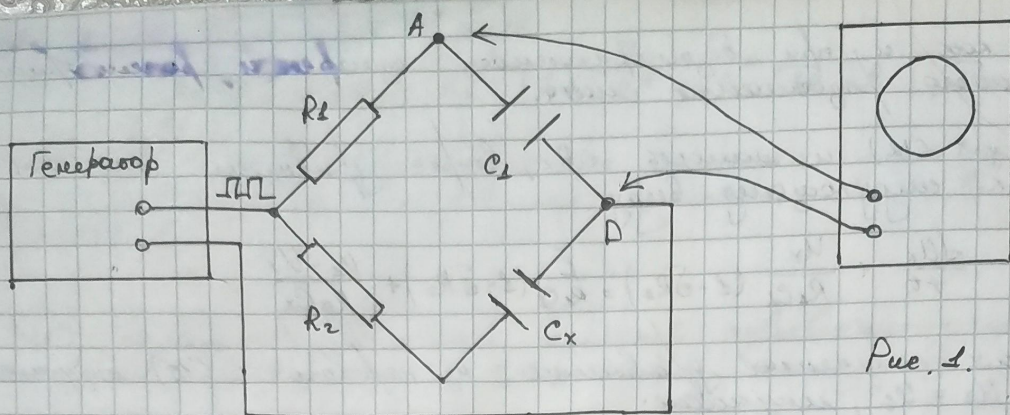
Отчёт по лабораторной работе №8.
Измерение ёмкости конденсатора.

Цель работы: научиться измерять ёмкость конденсатора различными способами.

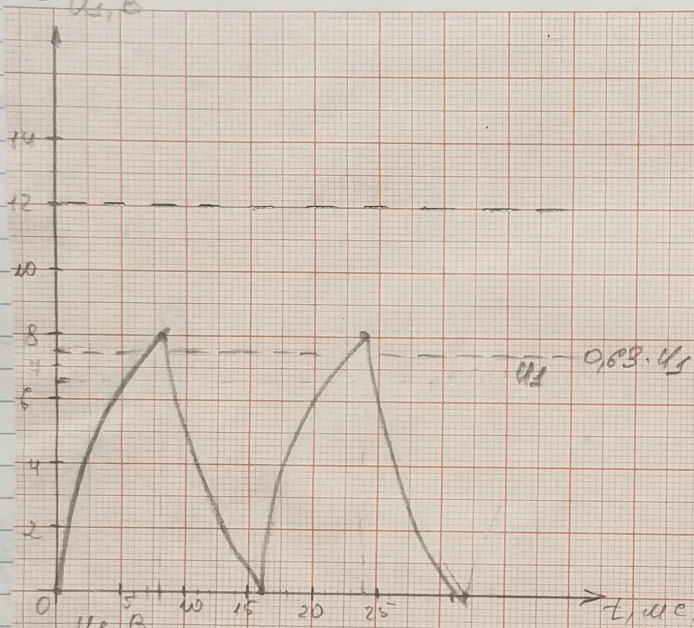
Аппаратура и оборудование: мультиметр сопротивлений РЗЗ, нуль-гальванометр, генератор БИ-7, генератор САС-810, осциллограф СДЗ-71022, конденсаторы различных ёмкостей.

1. Несколько осциллограмм напряжений $U_0(t)$ и $U_{AB}(t)$ при различных сопротивлениях и временах развёртки:

Схема:



② U_1, B



$$\tau = 80,0285 \text{ } \mu\text{s}$$

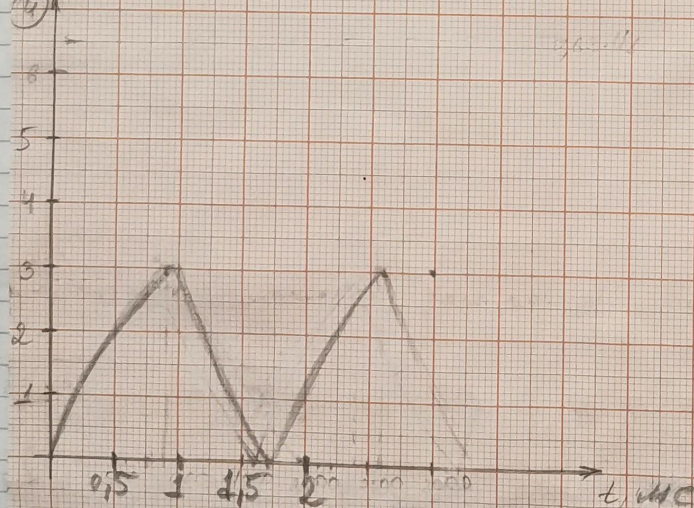
5 BACH

$$R = 4600 \text{ } \Omega$$

$$\tau_{1/2} \approx 8,33 \text{ } \mu\text{s}$$

$$R \cdot C_1 = 4,6 \mu\text{s}$$

④ U_2, B



$$R = 4600 \text{ } \Omega$$

2 BACH

$$\tau = 590 \text{ } \mu\text{s}$$

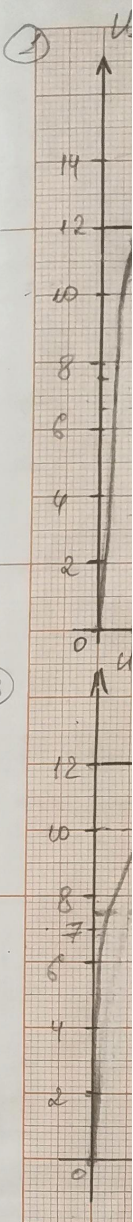
$$\tau_{1/2} \approx 0,85 \text{ } \mu\text{s}$$

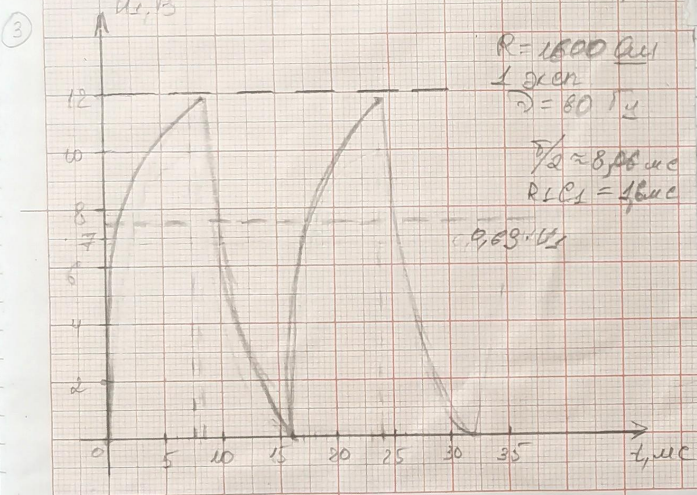
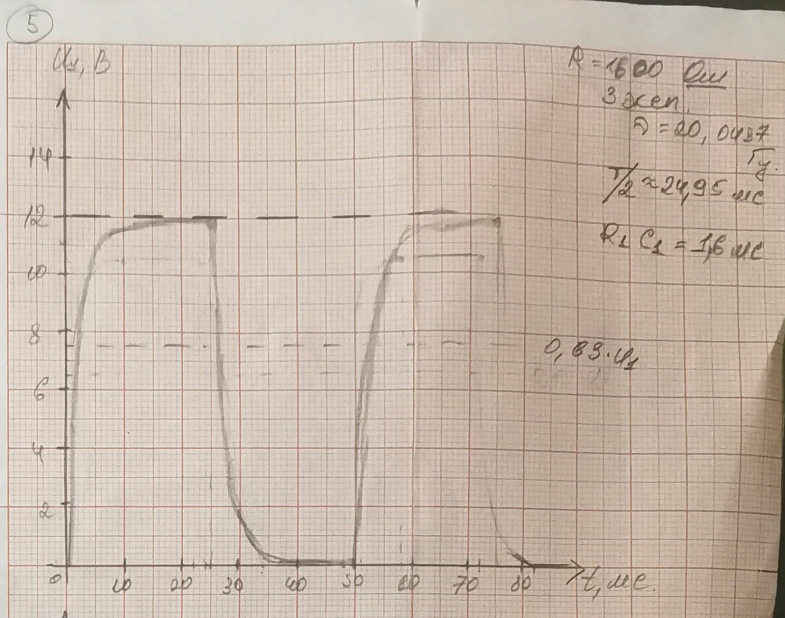
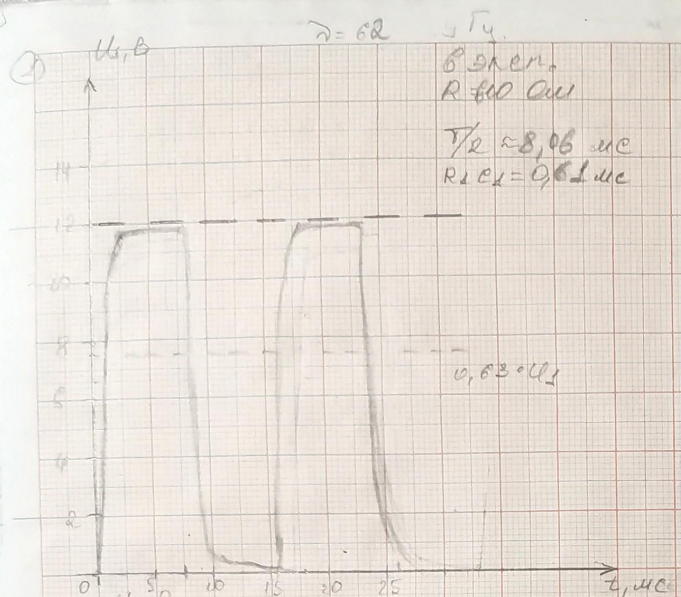
$$R \cdot C_1 = 4,6 \mu\text{s}$$

N°	R_s, Ω
1	1000
2	2000
3	3000
4	4000
5	5000
6	6000

2. Значение
от 100

П/м





Приложение 1

2. Экспериментальное определение зависимости времени задержки (разряда) от постоянной времени $R_1 C_1$. $+ 600 \text{ Ом}$ на генераторе

N°	$R_1, \text{ Ом}$	$t, \text{ мс}$	$\tau, \text{ Гз}$	$C_1, \text{ мкФ}$	$U_1, \text{ В}$	$\Delta t, \text{ мс}$	$\Delta C_1, \%$	$\Delta R_1, \%$	$\Delta C_1, \text{ мкФ}$	$\Delta R_1, \text{ Ом}$
1	1000	0,92	93,98					0,2		1
2	2000	1,76	51,04					0,2		2
3	3000	2,76	30,27	1	12,1	0,2	0,2	0,2	0,002	3
4	4000	3,64	28,16					0,2		4
5	5000	4,56	23,12					0,2		5
6	6000	5,44	10,32					0,2		6

Основная погрешность вызвана сопротивлением, выраженная в процентах от номинального значения включенного сопротивления не превышает:

$$\pm \left[0,2 + 0,5 \frac{m}{R} \right], \quad (1)$$

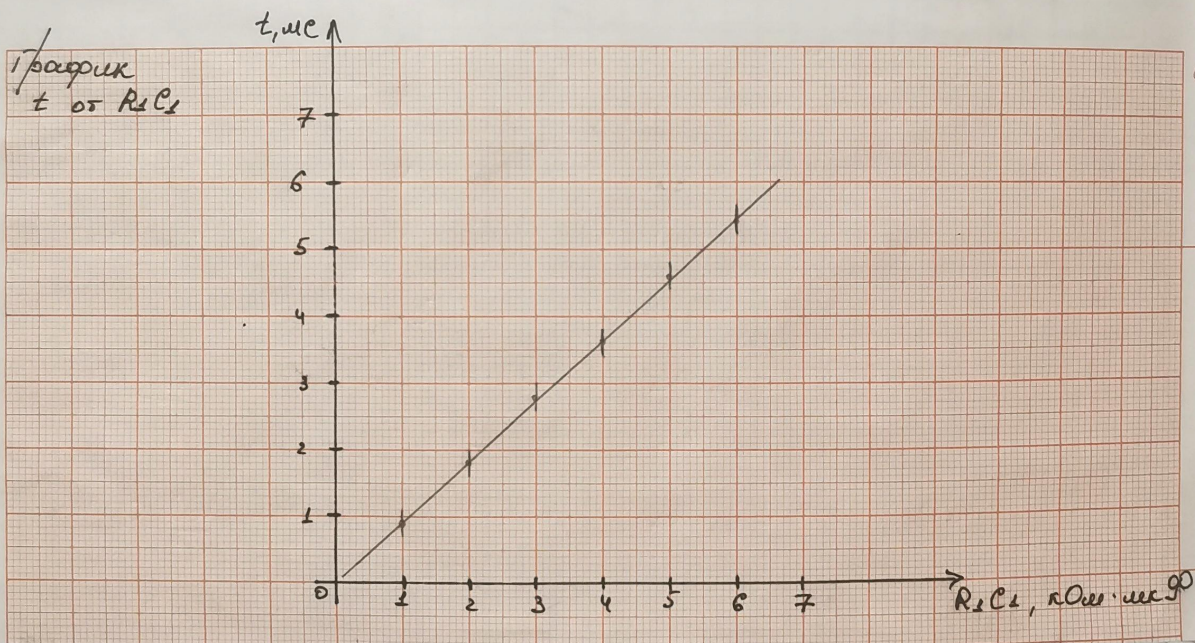
где m - число делений шкалы прибора, показаний которых не равно 0,
 R - значение вычисленного сопротивления в омах.

Расчет погрешностей:

$$\Delta(R_1 C_1) = R_1 C_1 \cdot \delta(R_1 C_1) = R_1 \cdot C_1 \cdot (\delta R_1 + \delta C_1) \quad (2)$$

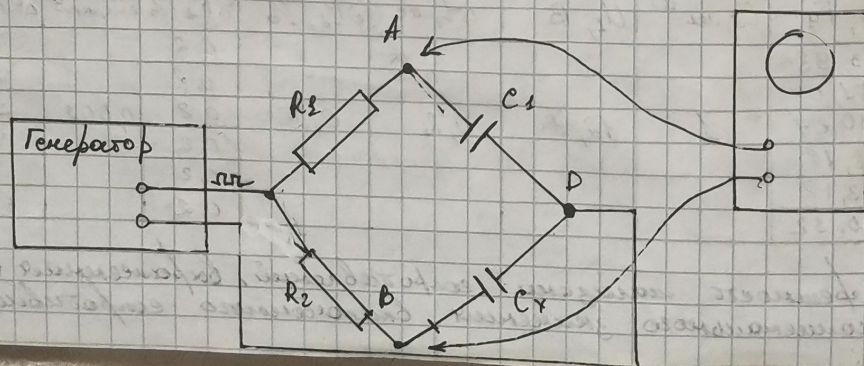
где $\delta C_1 = 0,2\%$ (известно), а δR_1 находится из формулы (1).

N°	$R_1, \text{ Ом}$	$C_1, \text{ мкФ}$	$\delta C_1, \%$	$\delta R_1, \%$	$\Delta(R_1 C_1) = R_1 C_1 \cdot (\delta R_1 + \delta C_1), \text{ мкФ} \cdot \text{Ом}$	$\Delta t, \text{ мс}$
1	1000	1	0,2	0,2	0,004	0,2
2	2000				0,008	
3	3000				0,012	
4	4000				0,016	
5	5000				0,020	
6	6000				0,024	



3. Измерение неизвестной емкости C_x , используя в качестве источника сигнала генератор.

Схема:



Таблица

$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$
20	5
100	24
1000	244
10000	2440

Расчет

$\delta R_2 =$

$\Rightarrow \delta C$

1) $R_2 = 20 \text{ Ом}$

2) $R_2 = 100 \text{ Ом}$

3) $R_2 = 1000 \text{ Ом}$

Таблица измерений с погрешностями:

$R_1, \text{ Ом}$	$R_2^{(0)}, \text{ Ом}$	$R_2^{(+)}, \text{ Ом}$	$R_2^{(-)}, \text{ Ом}$	$R_{\text{ср}}, \text{ Ом}$	$C_1, \text{ мкФ}$	$C_x, \text{ мкФ}$	$\delta C_1, \%$	$\delta R_2, \%$	$\delta R_1, \%$	$\Delta C_x, \text{ мкФ}$
20	5	9	1	5	1	4,00	0,2	53,0	0,2	2,14
100	24	30	19	24,3		4,12		16,0	0,2	0,68
1000	244	253	237	244,7		4,09		2,0	0,2	0,10
10000	2440	2540	2380	2443,3		4,09		1,8	0,2	0,09

Расчет погрешностей:

$$\delta R_2 = \frac{\Delta R_2}{R_{\text{ср}}}, \text{ где } \Delta R_2 = \sqrt{(\Delta R_{2\text{ср}})^2 + (\Delta R_{2\text{нр}})^2}$$

$$\Delta R_{2\text{ср}} = \frac{|R_{\text{ср}} - R_2^{(0)}| + |R_{\text{ср}} - R_2^{(+)}| + |R_{\text{ср}} - R_2^{(-)}|}{3}$$

~ абсолютная погрешность
среднего значения.

$$\Delta R_{2\text{нр}} = \delta R_{2\text{нр}} \cdot R_{\text{ср}}$$

~ абсолютная приборная
погрешность, где $\delta R_{2\text{нр}}$
находятся по ф-ле (1)

$$C_x = C_1 \frac{R_1}{R_2}$$

$$\Rightarrow \delta C_x = \delta C_1 + \delta R_1 + \delta R_2$$

$$\Delta C_x = \delta C_x \cdot C_x = (\delta C_1 + \delta R_1 + \delta R_2) \cdot C_x \quad (2)$$

1) $R_1 = 20 \text{ Ом}$: $\Delta R_{\text{ср}} = \frac{|5-5| + |5-9| + |5-1|}{3} \approx 2,67 \text{ Ом}$

$$\Delta R_{2\text{нр}} = \frac{0,419}{100} \cdot 5 \approx 0,021 \text{ Ом}$$

$$\delta R_2 = \frac{\sqrt{(\Delta R_{2\text{ср}})^2 + (\Delta R_{2\text{нр}})^2}}{R_{\text{ср}}} \approx 0,53; \quad \delta R_1 \approx 0,225 \%$$

2) $R_1 = 100 \text{ Ом}$: $\Delta R_{\text{ср}} = \frac{|24,3-24| + |24,3-30| + |24,3-19|}{3} \approx 3,44 \text{ Ом}$

$$\Delta R_{2\text{нр}} = \frac{0,237}{100} \cdot 24,3 \approx 0,058 \text{ Ом}$$

$$\delta R_2 \approx 0,16; \quad \delta R_1 \approx 0,205 \%$$

3) $R_1 = 1000 \text{ Ом}$: $\Delta R_{\text{ср}} = \frac{|244,7-244| + |244,7-253| + |244,7-237|}{3} \approx 5,57 \text{ Ом}$

$$\Delta R_{2\text{нр}} \approx 0,50 \text{ Ом}$$

$$\delta R_2 \approx 0,02$$

$$\delta R_1 \approx 0,20 \%$$

$$4) R_2 = 10000 \text{ Ом: } \Delta R_{2\text{ф}} = \frac{|12443,3 - 2380| + |2443,3 - 2510| + |2443,3 - 2440|}{3} \approx 44,13 \text{ Ом}$$

$$\Delta R_{2\text{ф}} \approx 4,90 \text{ Ом}$$

$$\delta R_2 \approx 0,018; \delta R_1 \approx 0,20\%$$

4. Изменение неизвестной ёмкости C_x с постоянным напряжением:

$$1) U = 12 \text{ В:}$$

$R_1, \text{Ом}$	$R_2^{(0)}, \text{Ом}$	$R_2^{(1)}, \text{Ом}$	$R_2^{(-)}, \text{Ом}$	$R_{2\text{ф}}, \text{Ом}$	$C_x, \text{мкФ}$	$C_{x, \text{мкФ}}^0$	$\delta C_x, \%$	$\delta R_2, \%$	$\delta R_1, \%$	$\Delta C_x, \text{мкФ}$
50	12	22	2	13	1	4,17	0,2	54,0	0,21	2,24
100	24	34	16	24,7		4,05		25,0	0,21	1,03
1000	240	249	230	239,7		4,17		2,7	0,20	0,13
10000	2440	2450	2380	2416,7		4,14		1,0	0,20	0,08

Принцип расчёта погрешностей аналогичен пункту 3.

$$1) R_2 = 50 \text{ Ом: } \Delta R_{2\text{ф}} \approx 7 \text{ Ом}; \Delta R_{2\text{ф}} \approx 0,042 \text{ Ом}$$

$$\delta R_2 \approx 0,54; \delta R_1 \approx 0,21\%$$

$$2) R_2 = 100 \text{ Ом: } \Delta R_{2\text{ф}} \approx 6,23 \text{ Ом}; \Delta R_{2\text{ф}} \approx 0,080 \text{ Ом}$$

$$\delta R_2 \approx 0,25; \delta R_1 \approx 0,21\%$$

$$3) R_2 = 1000 \text{ Ом: } \Delta R_{2\text{ф}} \approx 6,43 \text{ Ом}; \Delta R_{2\text{ф}} \approx 0,491 \text{ Ом}$$

$$\delta R_2 \approx 0,027; \delta R_1 \approx 0,20\%$$

$$4) R_2 = 10000 \text{ Ом: } \Delta R_{2\text{ф}} \approx 24,43 \text{ Ом}; \Delta R_{2\text{ф}} \approx 4,847 \text{ Ом}$$

$$\delta R_2 \approx 0,010; \delta R_1 \approx 0,20\%$$

$$\Delta C_x = C_x \cdot (\delta R_1 + \delta R_2 + \delta C_x) \quad (2)$$

$$2) U = 24 \text{ В:}$$

$R_1, \text{Ом}$	$R_2^{(0)}, \text{Ом}$	$R_2^{(1)}, \text{Ом}$	$R_2^{(-)}, \text{Ом}$	$R_{2\text{ф}}, \text{Ом}$	$C_x, \text{мкФ}$	$C_{x, \text{мкФ}}^0$	$\delta C_x, \%$	$\delta R_2, \%$	$\delta R_1, \%$	$\Delta C_x, \text{мкФ}$
50	12	18	6	12	1	4,17	0,2	33	0,21	1,39
100	24	29	18	23,7		4,22		16	0,21	0,69
1000	240	248	234	240,7		4,15		2	0,20	0,10
10000	2415	2426	2399	2413,3		4,14		0,4	0,20	0,03

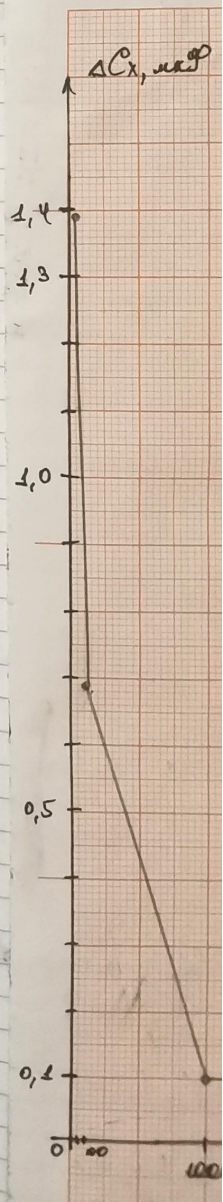
$$1) R_1 = 50$$

$$2) R_2 = 100$$

$$3) R_2 = 1000$$

$$4) R_2 = 10000$$

5. Задача

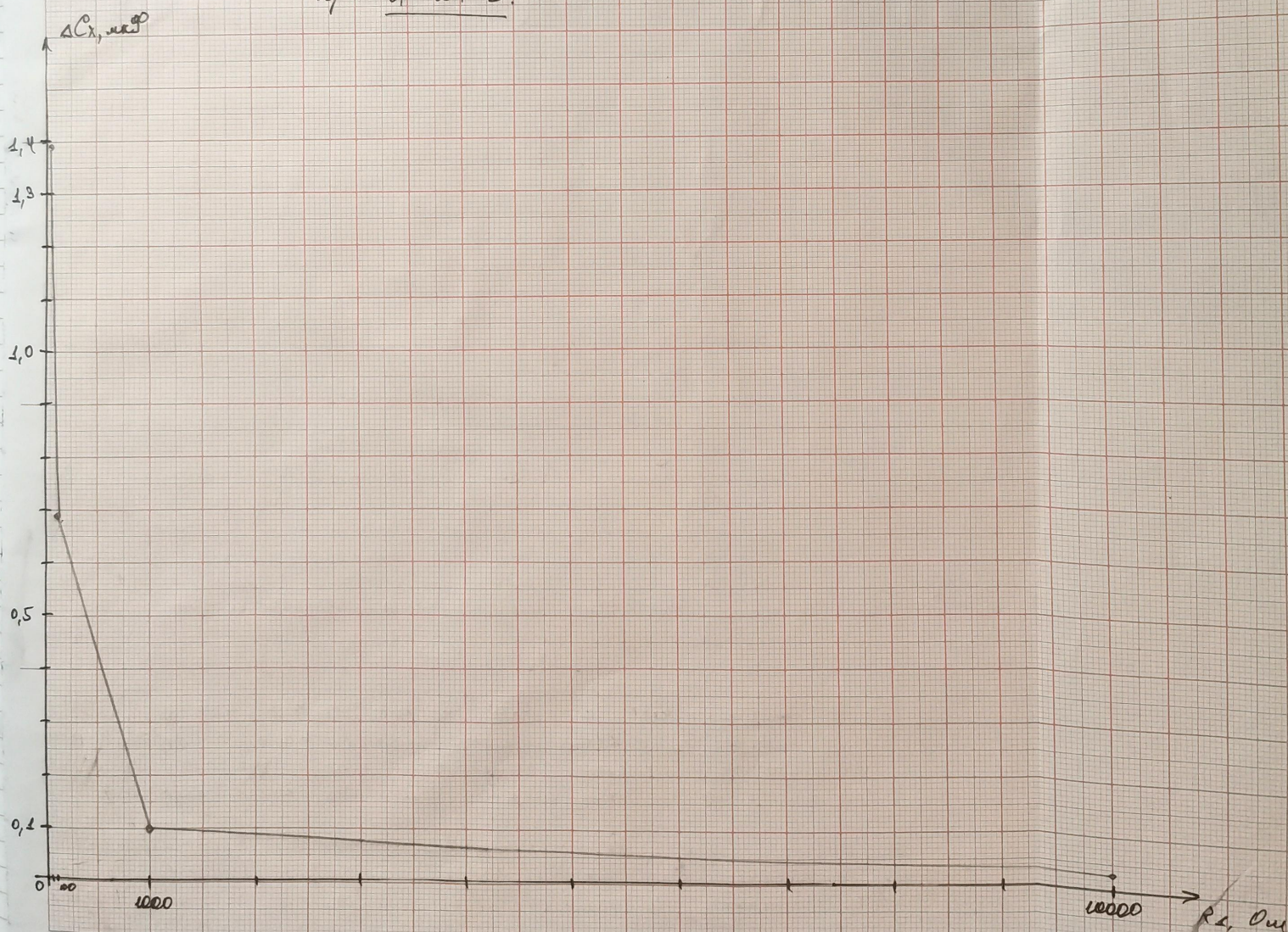


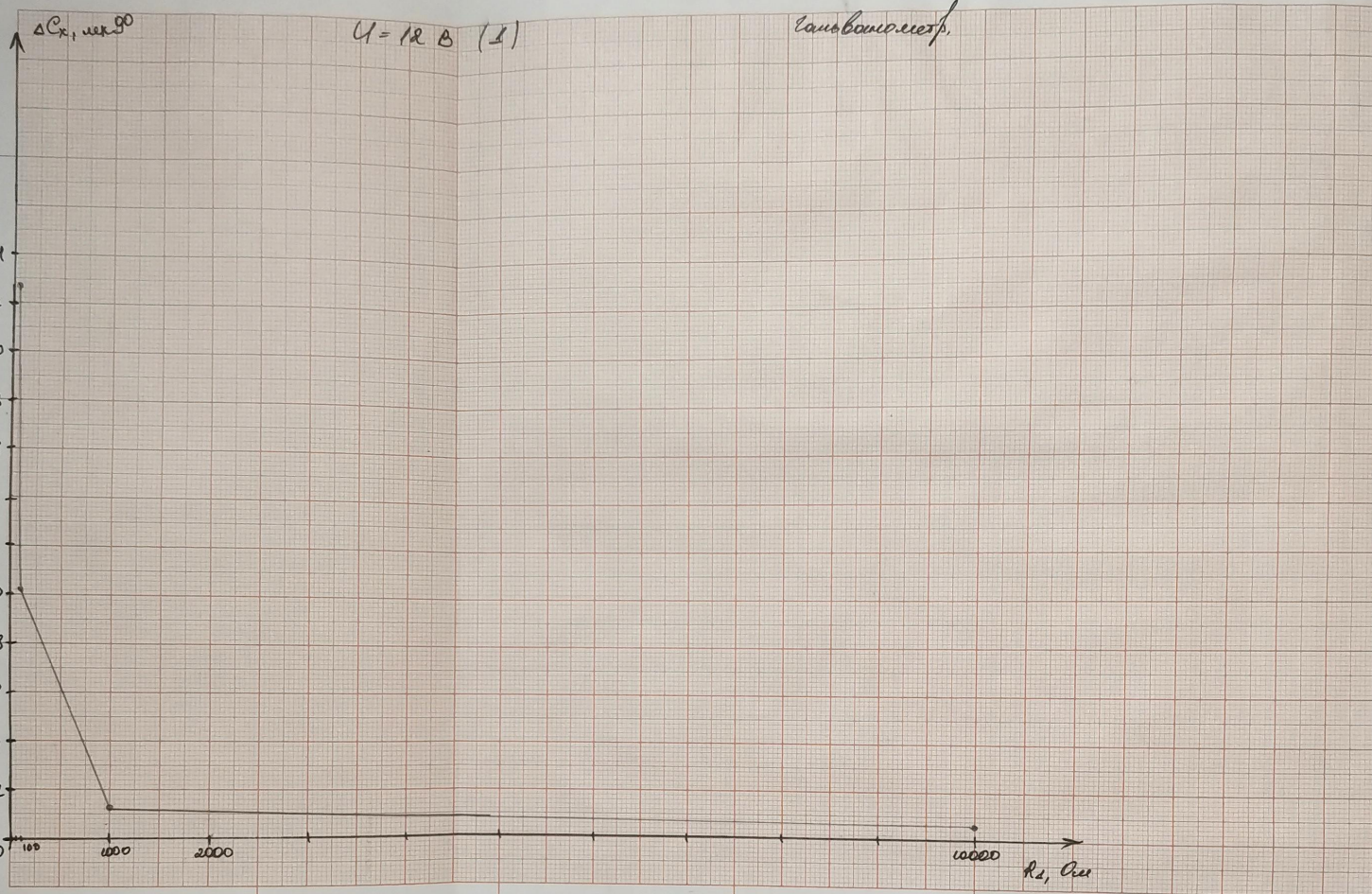
- 1) $R_1 = 50 \text{ Ом}$: $\Delta R_{\text{зеп}} \approx 1 \text{ Ом}$; $\Delta R_{\text{зеп}} \approx 0,033 \text{ Ом}$
 $\delta R_2 \approx 0,33$; $\delta R_1 \approx 0,21 \%$
- 2) $R_1 = 100 \text{ Ом}$: $\Delta R_{\text{зеп}} \approx 3,77 \text{ Ом}$; $\Delta R_{\text{зеп}} \approx 0,058 \text{ Ом}$
 $\delta R_2 \approx 0,18$; $\delta R_1 \approx 0,21 \%$
- 3) $R_1 = 1000 \text{ Ом}$: $\Delta R_{\text{зеп}} \approx 4,9 \text{ Ом}$; $\Delta R_{\text{зеп}} \approx 0,495 \text{ Ом}$
 $\delta R_2 \approx 0,02$; $\delta R_1 \approx 0,20 \%$
- 4) $R_1 = 10000 \text{ Ом}$: $\Delta R_{\text{зеп}} \approx 9,57 \text{ Ом}$; $\Delta R_{\text{зеп}} \approx 4,847 \text{ Ом}$
 $\delta R_2 \approx 0,004$; $\delta R_1 \approx 0,20 \%$

5. График зависимости погрешности измерения от величины R_1 :

при $U = 24 \text{ В}$. (2)

таблица 1.





Вывод: Измерили ёмкость неизвестного конденсатора:

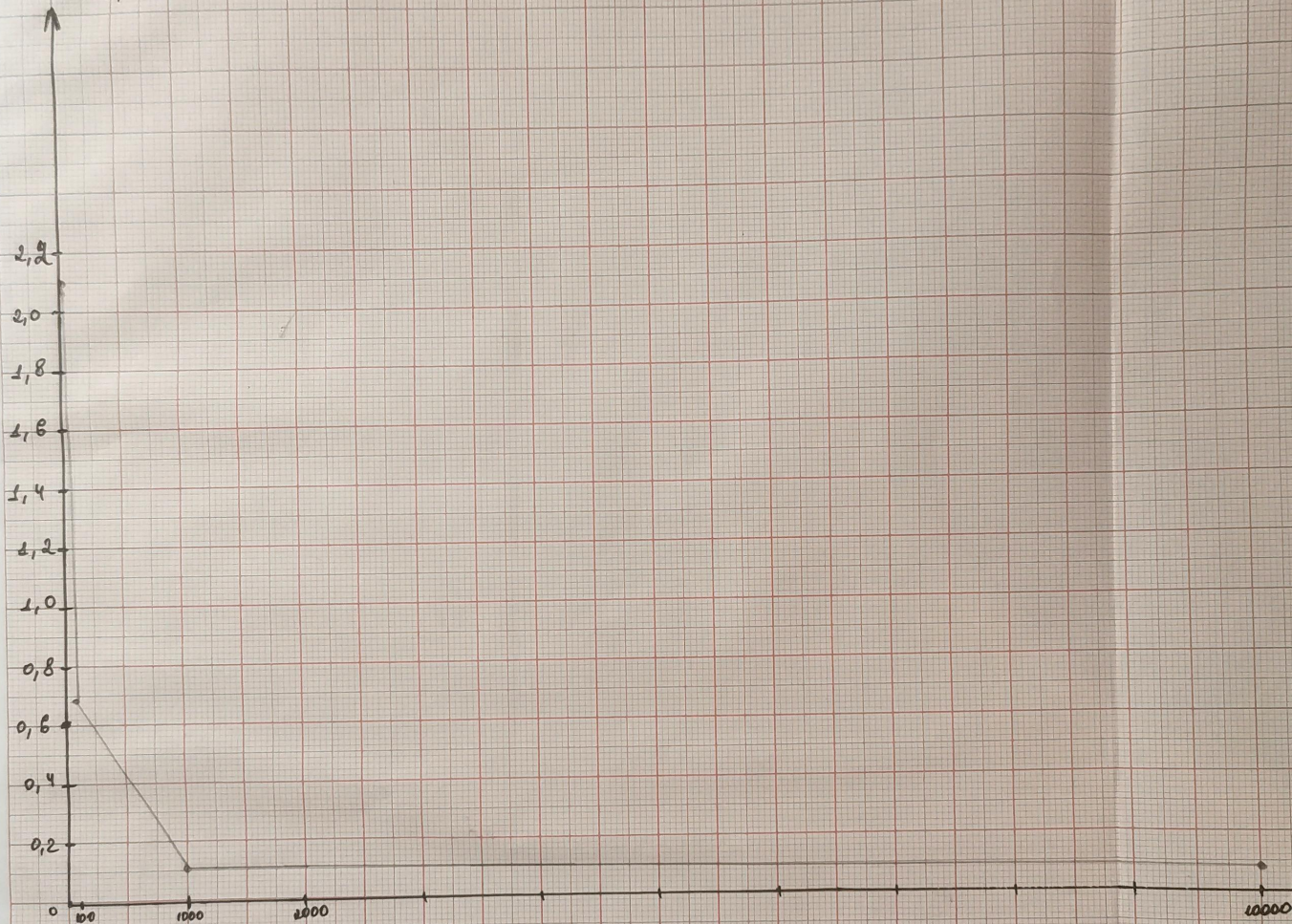
$$C_x = (4,14 \pm 0,06) \text{ мкФ}$$

- 2) По полученным данным можно сказать, что при измерении ёмкости конденсатора (используя мультиметр) погрешность меньше чем в безмерном режиме (используя осциллограф и генератор переменного напряжения).
- 3) Также при увеличении R_2 (и соответственно увеличении R_2 для данного мультиметра) погрешность также уменьшается в одних и тех же. При $R_2 > 1000 \text{ Ом}$. $\Delta C_x < 5\%$.

с осциллографом

$U = 12 \text{ В.}$

$\Delta C_x, \text{ мкФ}$



26.11.21