

Департамент образования Администрации города Омска  
МОУ ДОД «Центр дополнительного образования детей «Эврика»»

**Городская конференция обучающихся 5-11 классов «Шаги в науку»**

Направление «Физика»

**Определение энергии электрического поля**

Омск, 2011

## Введение

Для накопления заряда и энергии в различных радиотехнических, электротехнических приборах используют конденсаторы. Энергия электрического поля конденсатора определяется, как известно, электроемкостью и напряжением. Однако, до настоящего времени широко не известны наглядные способы демонстрации данных зависимостей.

По этой причине является *актуальным* разработка способа демонстрации зависимости энергии электрического поля конденсатора от его электрической емкости и от напряжения. *Целью* данной работы является создание установки, применение которой позволяет демонстрировать указанные выше зависимости.

В работе ставились и решались следующие *задачи*:

1. Ознакомиться с разными видами конденсаторов и параметрами их характеризующими.
2. Ознакомиться с известными методами измерения заряда и энергии конденсатора.
3. Экспериментально проверить известные теоретически зависимости энергии электрического поля конденсатора от его электроёмкости и величины напряжения.
4. Разработать установку для демонстрации зависимости энергии электрического поля конденсатора от емкости и напряжения.

В соответствии с целью данной работы *объектом исследования* является накопитель электрической энергии – конденсатор, а *предметом исследования* - изучение функциональной зависимости энергии конденсатора от электроемкости и напряжения.

## §1. Конденсаторы и их характеристики

Известно, что окружающая нас материя существует или в форме вещества, или в форме поля. Одним из видов поля, изучаемого в курсе физики, является электрическое поле. Оно обладает энергией. Наиболее распространенные приборы для создания и «накопления» электрического поля - конденсаторы. Простейшим конденсатором являются две металлические пластины (электроды), разделенные каким-либо диэлектриком (рис. 1). Конденсатор можно зарядить, если соединить его электроды с источником электрической энергии постоянного тока [1, с. 95].

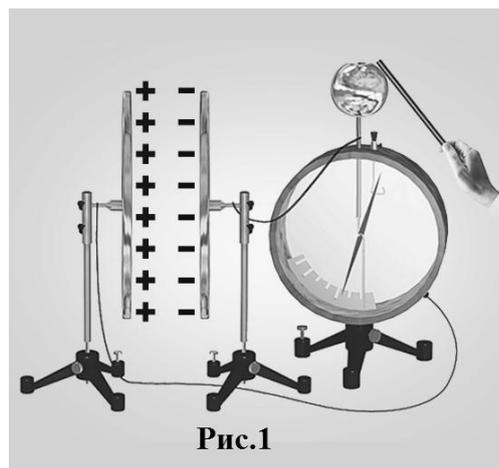


Рис.1

Первый электрический конденсатор (Лейденская банка), изобретен голландскими учёными Мушенбреком и его учеником Кюнеусом в 1745 году в Лейдене. Параллельно и независимо от них сходный аппарат, под названием «медицинская банка» изобрёл немецкий учёный Клейст. Лейденская банка представляла собой закупоренную наполненную водой стеклянную банку, оклеенную внутри и снаружи фольгой (рис. 2). Сквозь крышку в банку был воткнут металлический стержень. Лейденская банка позволяла накапливать и хранить сравнительно большие заряды, порядка микрокулона. Изобретение лейденской банки стимулировало изучение электричества, в частности скорости его распространения и электропроводящих свойств некоторых материалов. Выяснилось, что металлы и вода - лучшие проводники электричества. Благодаря Лейденской банке удалось впервые искусственным путем получить электрическую искру.

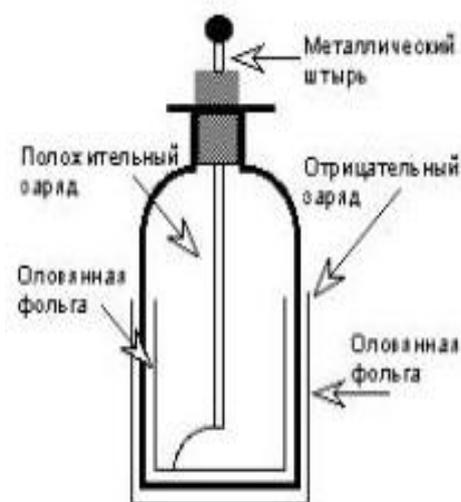


Рис. 2

Конденсаторы находят применение практически во всех областях электротехники:

- конденсаторы используются для построения различных цепей с частотно-зависимыми свойствами, в частности, фильтров, колебательных контуров и т.п.;
- при быстром разряде конденсатора можно получить импульс большой мощности, например, в фотовспышках, импульсных лазерах с оптической накачкой;
- так как конденсатор способен длительное время сохранять заряд, то его можно использовать в качестве элемента памяти или устройства хранения электрической энергии;
- как датчики малых перемещений (малое изменение расстояния между обкладками очень заметно сказывается на ёмкости конденсатора).

Некоторые виды конденсаторов показаны на рисунке 3.

*Пленочные конденсаторы.* В пленочных конденсаторах в качестве диэлектрика используют пленки из различных полимерных материалов (полистирола, полипропилена, лавсана или фторопласта). Обкладками в секциях пленочных конденсаторов служит металлизированная фольга или металлизированная пленка. Пленочные конденсаторы выпускают в металлических и пластмассовых корпусах прямоугольной и цилиндрической формы или без корпусов и используют в радиоприемной, телевизионной, электроизмерительной аппаратуре, вычислительной технике и т. д.

*Электролитические конденсаторы.* В электролитических конденсаторах имеются две обкладки. В качестве одной, называемой анодом, служит фольга, а в качестве другой, называемой катодом, - жидкий электролит или твердый полупроводник, диэлектриком - оксидная тонкая плёнка, электрохимически создаваемая на аноде. Преимущество данных конденсаторов перед конденсаторами с другими диэлектриками состоит в их большой удельной ёмкости. Электролитические конденсаторы

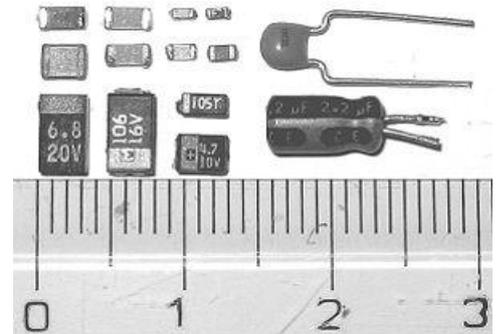


Рис. 3

разделяют на неполярные - используемые в цепях переменного тока и полярные - работающие в цепях с постоянным или пульсирующим напряжением. Именно такие конденсаторы и были использованы в нашей работе.

*Бумажные и металобумажные конденсаторы.* Бумажные конденсаторы являются наиболее распространенной разновидностью конденсаторов постоянной емкости. Они содержат одну или несколько секций из двух металлических лент (как правило, из алюминиевой фольги), служащих обкладками. Последние разделены двумя или более лентами конденсаторной бумаги, являющейся диэлектриком. Секции помещаются в цилиндрический или прямоугольный корпус. В корпус вмонтированы элементы герметизации (проходные стеклянные или керамические изоляторы), через которые проходят внешние проволочные или лепестковые токоотводы [2].

Накопительная способность конденсатора характеризуется электроемкостью. Электроёмкость конденсатора  $C$  равна отношению заряда  $q$  на одной из обкладок конденсатора к напряжению  $U$  между обкладками:

$$C = \frac{q}{U}. \quad (1.1)$$

Электроемкость измеряют в фарадах (Ф):

$$1\text{Ф} = 1\text{ Кл/1В}.$$

На практике часто применяется дольная единица электроёмкости:

$$1\text{ мкФ} = 10^{-6}\text{ Ф}.$$

Электроемкость конденсатора зависит от площади обкладок  $S$ , расстояния между ними  $d$  и качества диэлектрика:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d},$$

где  $\varepsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей пространство между обкладками [3, с. 125 - 127].

По конструкции и назначению конденсаторы разделяют на постоянные и переменные. Емкость постоянных не меняется, а переменных - можно плавно менять (рис. 4).



Рис. 4

Для изменения электроёмкости конденсаторы можно соединять в батареи (рис. 5).

При параллельном соединении конденсаторов (рис. 6) их общая электроёмкость  $C$  рассчитывается по формуле:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots,$$

где  $C_1, C_2, C_3$  – электроёмкость каждого из параллельно соединённых конденсаторов.

При последовательном соединении конденсаторов (рис. 7) их общая электроёмкость определяется из выражения

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \dots,$$

где  $C_1, C_2, C_3$  – электроёмкость каждого из последовательно соединённых конденсаторов.



Рис. 5

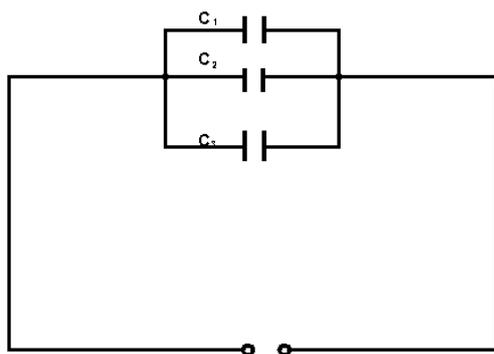


Рис. 6

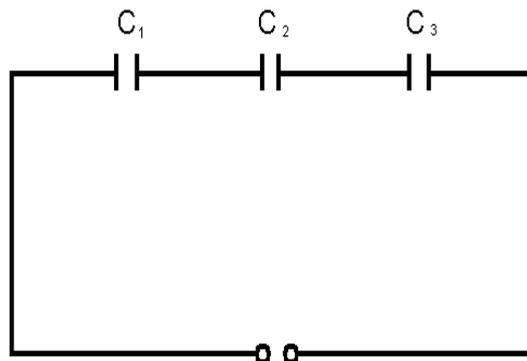


Рис. 7

Если конденсатор заряжен, то между пластинами конденсатора существует электрическое поле, которое обладает определенной энергией. Энергия электрического поля заряженного конденсатора  $W$  определяется выражением:

$$W = \frac{CU^2}{2}. \quad (1.2)$$

При разрядке конденсатора первоначально запасенная энергия выделяется в виде тепла [4, с. 285 - 289].

## §2. Способы определения электроёмкости конденсаторов

Одним из способов определения электроёмкости заключается в сравнении электроёмкости конденсатора неизвестной ёмкости  $C_x$  с электроёмкостью конденсатора эталонной ёмкости  $C_0$ .

Схема установки для проведения таких измерений изображена на рисунке 8.

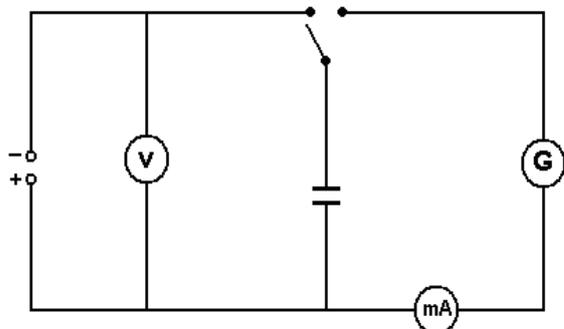


Рис. 8



Рис. 9

Конденсатор  $C$  заряжается от источника постоянного напряжения и разряжается затем через баллистический гальванометр  $G$  (рис. 9). Баллистический гальванометр предназначен для измерения небольшого количества электричества, протекающего по цепи за время значительно меньшее периода его собственных колебаний. Кратковременный ток сообщает подвижной системе толчок, который служит причиной возникновения колебаний. Величина первого отклонения подвижной части баллистического гальванометра пропорциональна количеству протекшего через нее электричества:

$$q = Bn, \quad (2.1)$$

где  $n$  - величина первого отклонения «зайчика» в делениях шкалы;

$q$  - заряд, протекший через гальванометр за короткий промежуток времени;

$B$  - множитель, постоянный для данного прибора, называемый баллистической постоянной. Баллистическая постоянная  $B$  численно равна количеству электричества, которое, протекая через гальванометр, вызывает отклонение «зайчика» на одно деление.

Практически, баллистическую постоянную можно определить, разряжая через гальванометр конденсатор известной ёмкости  $C_0$ , заряженный до известного напряжения  $U_0$  и, следовательно, содержащий заряд  $q_0$ :

$$q_0 = C_0 U_0. \quad (2.2)$$

Из уравнений (2.1) - (2.2) имеем

$$B = \frac{C_0 U_0}{n_0}.$$

Если баллистическая постоянная измерена, то можно определить ёмкость неизвестного конденсатора:

$$C = \frac{q}{U} = \frac{Bn}{U}.$$

Недостатком этого метода является то, что необходимо знать электроёмкость эталонного конденсатора, которая должна быть измерена иным образом [5, с. 113 - 116].

Следующий способ определения емкости конденсатора основан на измерении его заряда. Конденсатор неизвестной ёмкости  $C$  разряжается через некоторый резистор сопротивлением  $R$  (рис. 10). Оценка значения сопротивления резистора, который следует использовать при изучении процесса разрядки конденсатора, дана в *Приложении 1* доклада.

Если конденсатор разряжается через резистор, то с течением времени напряжение на конденсаторе уменьшается, а значит, уменьшается и сила тока в цепи (рис. 11).

По определению сила тока равна:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}.$$

Значит, за время  $\Delta t$  по цепи проходит заряд  $\Delta q$  равный:

$$\Delta q = I \Delta t.$$

Из графика (рис.11) видно, что величина заряда  $\Delta q$  численно равна площади прямоугольника со сторонами  $I$  и  $\Delta t$ . Следовательно, для определения всего заряда, прошедшего по цепи при разрядке конденсатора, необходимо измерить площадь под графиком зависимости силы тока от времени [6, с. 65-66]. После этого не составляет труда определить и емкость конденсатора:

$$C = \frac{q}{U}.$$

В качестве примера один из графиков зависимости силы тока от времени приведен на рисунке 12.

На рисунке 13 приведен график зависимости мгновенной мощности от времени.

При обработке результатов измерения силы тока необходимо учесть погрешность, вносимую прибором для измерения силы тока - миллиамперметром. Первоначально нами использовался миллиамперметр авометра. Класс точности миллиамперметра (авометр АВО 63 с пределом 0,5 мА) составляет 2,5. Тогда приборная погрешность

$$\Delta I_{\text{пр}} = 0,5 \text{ мА} \cdot \frac{2,5}{100} = 0,013 \text{ мА}.$$

Цена деления прибора - 0,01 мА. В итоге погрешность измерения силы тока составляет

$$\Delta I = 0,02 \text{ мА}.$$

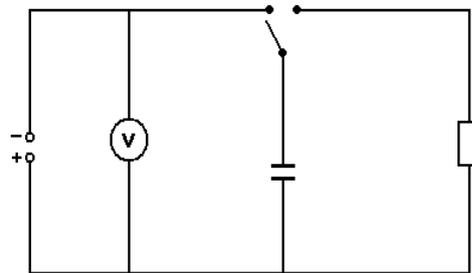


Рис. 10

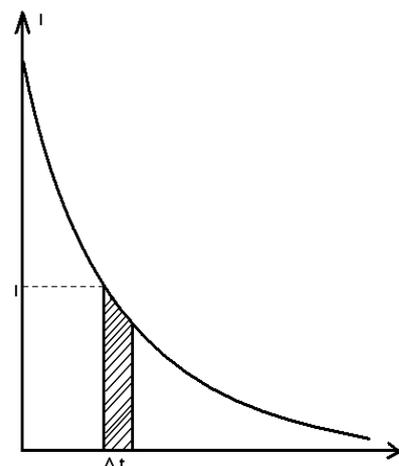


График зависимости силы тока  $J$  от времени  $t$   
при разрядке конденсатора

$$\begin{array}{l} C \text{ (номинал)} = 1000 \text{ мкФ} \\ U = 12 \text{ В} \end{array}$$

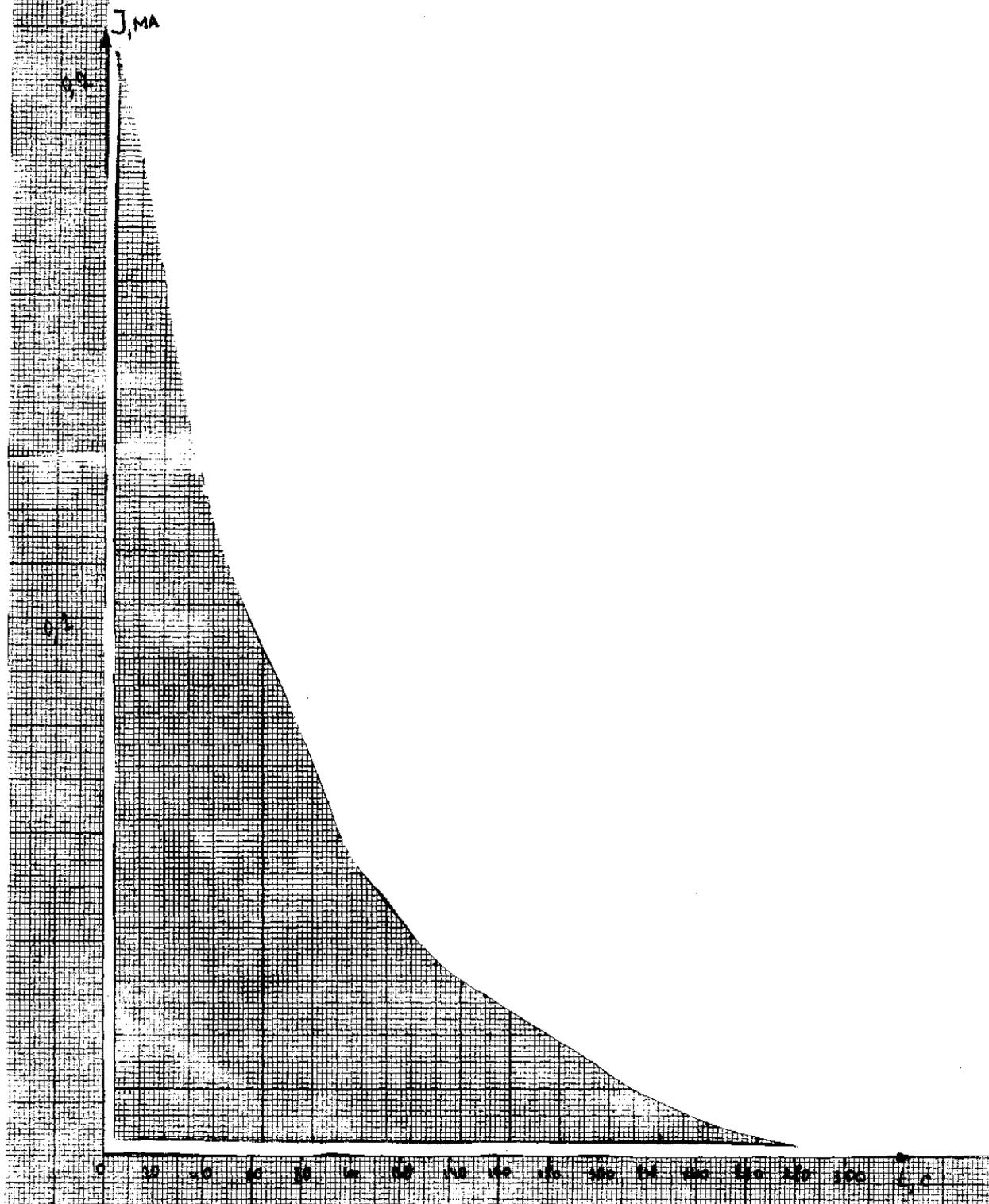


Рис. 12

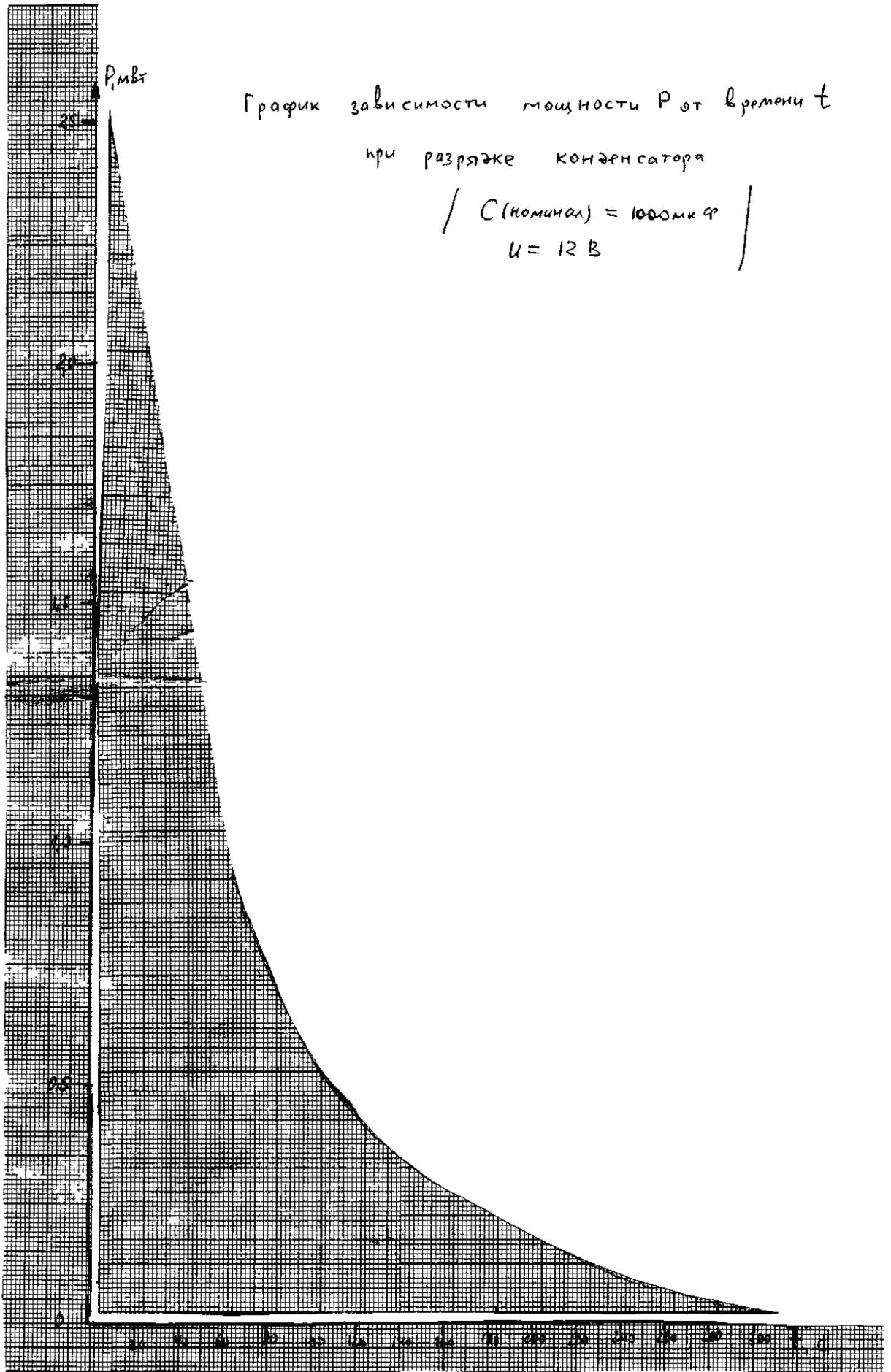


Рис. 13

По этой причине на рисунках 12 и 13 помимо основного графика наносились пунктирные линии с учетом погрешности измерения силы тока.

Для нахождения заряда конденсатора  $q$  и абсолютной погрешности измерения заряда  $\Delta q$  мы определили площадь под графиком путем взвешивания (рис. 14). Из миллиметровой бумаги был вырезан квадрат площадью  $100 \text{ см}^2$ . Его масса оказалась равна  $3,41 \text{ г}$ . Затем был вырезан график (рис. 12) и измерена масса соответствующей фигуры, что позволило определить площадь под графиком, а значит, и заряд конденсатора  $q$  и абсолютную погрешность заряда  $\Delta q$ .

Проделав аналогичную процедуру с графиком зависимости мгновенной мощности от времени (рис. 13), мы смогли определить энергию электрического поля конденсатора.



Рис. 14



Рис. 15

Учитывая значительную трудоемкость подобного метода определения заряда конденсатора (и его энергии) в дальнейшем было решено провести обработку результатов измерения с помощью программы *Microsoft Excel*.

Для измерения силы тока был взят более точный прибор. В качестве такого прибора использовали комбинированный цифровой прибор НГТУ ОФ с пределом измерения  $2000 \text{ мкА}$  (рис. 15). Абсолютная погрешность измерения силы тока принята равной  $10 \text{ мкА}$ .

Также было решено увеличить напряжение зарядки конденсатора, но при этом в момент замыкания ключа (рис. 10) иногда наблюдалась искра. По этой причине схема измерений была изменена и далее использовалась иная электрическая цепь.

Расчет заряда проводился по формуле:

$$q = \sum_{n=1}^N \frac{I_{n+1} + I_n}{2} \cdot \Delta t,$$

где  $\Delta t = 10 \text{ с}$ ,

$N$  – число измерений.

Абсолютную погрешность измерения заряда оценим по формуле

$$\Delta q = 2\Delta I \Delta t N.$$

Эта формула вытекает из выражения

$$\Delta q = \sum_{n=1}^N \frac{(I_{n+1} + \Delta I) + (I_n + \Delta I)}{2} \cdot \Delta t - \sum_{n=1}^N \frac{(I_{n+1} - \Delta I) + (I_n - \Delta I)}{2} \cdot \Delta t.$$

Результаты расчета заряда конденсаторов приведены в таблице 1.

**Таблица 1.** Определение зарядов конденсаторов различной емкости (при напряжении зарядки 40 В)

Номинальное значение емкости $C$ , мкФ	Заряд конденсатора $q$ , мКл	Погрешность измерения заряда $\Delta q$ , мКл
1000		
2000		
3000		
4000		
5000		

Используя формулу (1.1) и данные, приведенные в таблице 1, определим емкость конденсаторов  $C$  и абсолютную погрешность  $\Delta C$ .

Для измерения напряжения использовался цифровой вольтметр блока питания с погрешностью измерения 0.2 В ( $\Delta U = 0,2$  В).

Относительная погрешность измерения заряда  $\varepsilon_q$  равна:

$$\varepsilon_q = \frac{\Delta q}{q},$$

относительная погрешность измерения напряжения  $\varepsilon_u$  равна:

$$\varepsilon_u = \frac{\Delta U}{U},$$

относительная погрешность измерения емкости  $\varepsilon_c$  равна:

$$\varepsilon_c = \sqrt{\varepsilon_q^2 + \varepsilon_u^2}.$$

По определению

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta C}{C}.$$

Отсюда

$$\Delta C = \varepsilon_c \cdot C.$$

Результаты данных вычислений приведены в таблице 2.

**Таблица 2.** Определение емкости конденсаторов

Номинальное значение емкости $C$ , мкФ	Экспериментально полученное значение емкости $C$ , мкФ	Абсолютная погрешность измерений емкости $\Delta C$ , мкФ
1000		
2000		
3000		
4000		
5000		

### §3. Определение энергии электрического поля конденсатора

При размыкании ключа в цепи происходит разрядка конденсатора через резистор  $R$  и выделяется мощность  $P$ , равная

$$P = I^2 R,$$

где  $R$  - сопротивление резистора.

Общее количество теплоты  $Q$ , выделившееся в цепи очевидно равно:

$$Q = \sum(P \Delta t).$$

Совершение работы электрическим током и выделением теплоты происходит за счет энергии  $W$  электрического поля:

$$W = Q.$$

$$W = \sum(P \Delta t).$$

Построение графика зависимости мощности от времени позволяет рассчитать по площади фигуры под графиком энергию электрического поля [7, с. 105 - 107].

Расчет энергии электрического поля конденсатора проводился также с помощью программы Microsoft Excel с использованием формулы

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{I_{n+1}^2 + I_n^2}{2} \cdot R \Delta t,$$

где  $R = 27$  кОм – сопротивление резистора, через который происходит разрядка конденсатора,

$$\Delta t = 10 \text{ с},$$

$N$  – число измерений.

Абсолютную погрешность измерения энергии электрического поля конденсатора  $\Delta W$  оценим по формуле:

$$\Delta W = 4q \Delta I R.$$

Вывод этой формулы дан в *Приложении 3* доклада.

Результаты обработки измерений приведены в таблице 3 - 6.

**Таблица 3.** Энергия конденсатора при различных напряжениях.  
(емкость конденсатора  $C = 5000$  мкФ (номинал))

Напряжение $U$ , В	Энергия конденсатора $W$ , Дж	Абсолютная погрешность измерения энергии $\Delta W$ , Дж
15		
20		
25		
30		
35		
40		

**Таблица 4.** Энергия конденсатора при различных напряжениях.  
(емкость конденсатора  $C = 3000$  мкФ (номинал))

Напряжение $U$ , В	Энергия конденсатора $W$ , Дж	Абсолютная погрешность измерения энергии $\Delta W$ , Дж
15		
20		
25		
30		
35		
40		

**Таблица 5.** Энергия конденсаторов различной емкости  
(напряжение зарядки  $U = 40$  В)

Номинальное значение элек- троемкости $C$ , мкФ	Энергия конденсатора $W$ , Дж	Абсолютная погрешность измерения энергии $\Delta W$ , Дж
1000		
2000		
3000		
4000		
5000		

**Таблица 6.** Энергия конденсаторов различной емкости  
(напряжение зарядки  $U = 20$  В)

Номинальное значение элек- троемкости $C$ , мкФ	Энергия конденсатора $W$ , Дж	Абсолютная погрешность измерения энергии $\Delta W$ , Дж
1000		
2000		
3000		
4000		
5000		

Полученные значения энергии электрического поля позволяют выяснить зависимость энергии электрического поля конденсатора от напряжения и электроемкости конденсатора.

Используя экспериментальные данные, приведенные в таблицах 3 и 4, построим график зависимости энергии конденсатора  $W$  от квадрата напряжения  $U^2$ .

Используя экспериментальные данные, приведенные в таблицах 5 и 6, построим график зависимости энергии конденсатора от электроемкости.

Анализ полученных графических зависимостей позволяет сделать вывод, что, действительно, энергия электрического поля конденсатора определяется квадратом напряжения  $U^2$  и электроемкостью конденсатора  $C$ , как это и следует из формулы (1.2).

#### §4. Демонстрационный метод

Рассмотренный выше способ изучения зависимости энергии электрического поля  $W$  конденсатора от его электроемкости  $C$  и напряжения  $U$ , к сожалению, не дает возможности наглядно продемонстрировать зависимости

$$W \sim C \quad (4.1)$$

и

$$W \sim U^2. \quad (4.2)$$

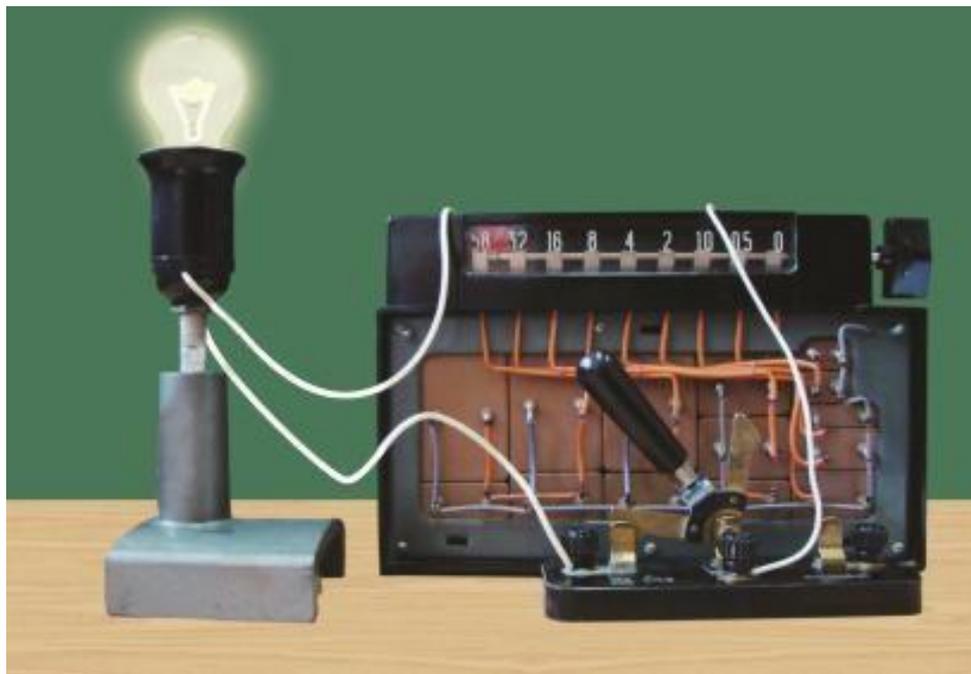
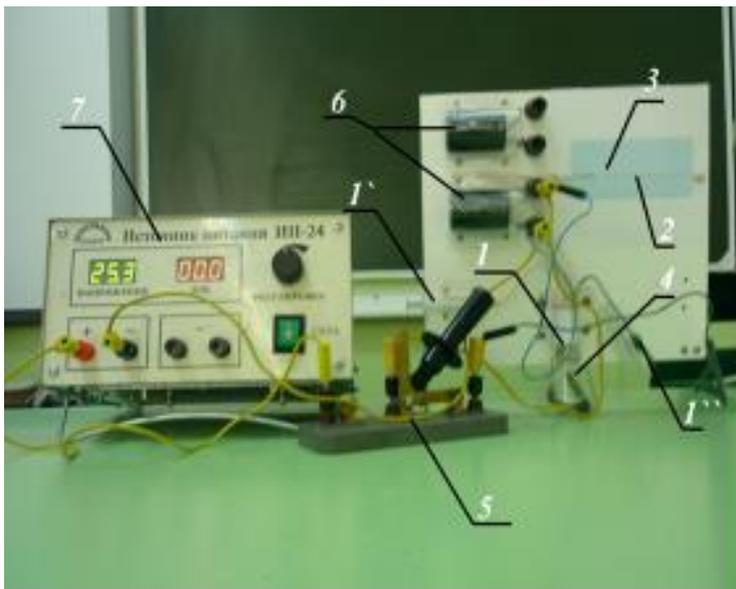


Рис. 16

Можно, например, демонстрировать разрядку конденсатора через неоновую лампу (рис. 16). При этом, чем больше электроемкость конденсатора и чем выше зарядное напряжение, тем ярче вспыхивает лампа. Однако таким образом зависимости (4.1) и (4.2) могут быть проиллюстрированы только на качественном уровне. По этой причине нами была разработана установка, позволяющая пронаблюдать данные зависимости в рамках демонстрационного эксперимента (рис. 17).



$$x \sim W.$$

$$W \sim C.$$

$$W \sim U^2.$$

Рис. 17

Основной элемент установки - колба 1, соединенная с горизонтально расположенным капилляром 2, замкнутым капелькой-столбиком термометрической жидкости 3. Под номером 4 изображен шприц для регулировки положения столбика жидкости, под номером 5 - клапан аварийного сброса давления.

В колбе помещен проволочный резистор 6 сопротивлением 4 Ом. Ключ 7 позволяет замкнуть данным резистором конденсатор 8, предварительно заряженный от источника постоянного напряжения 9.

В качестве конденсатора использовались два параллельно соединенных конденсатора емкостью каждого 10000 мкФ. (При необходимости один из конденсаторов возможно отключить. Также не составляет труда соединить конденсаторы не параллельно, а последовательно, то есть можно получить емкость 5000 мкФ, 10000 мкФ и 20000 мкФ.)

Блок питания позволяет заряжать конденсаторы напряжением от 0 до 40 В.

При разрядке конденсатора резистор нагревается, воздух, находящийся в колбе, расширяется, и столбик жидкости в капилляре смещается. Смещение столбика жидкости  $x$  прямо пропорционально энергии электрического поля  $W$ , запасенной в конденсаторе:

$$x \sim W.$$

Так, например, при разрядке конденсатора емкостью 10000 мкФ, заряженного

до напряжения 40 В, смещение столбика жидкости  $x$  составляет: ( 8 +- 1) мм. При разрядке конденсаторов емкостью 20000 мкФ, заряженных до того же значения напряжения смещение столбика жидкости  $x$  составляет ( 15 +-1) мм.

Следовательно,

$$W \sim C.$$

Если же напряжение зарядки конденсаторов уменьшить до 20 В, то смещение столбика жидкости составляет ( 4 +-1) мм.

Следовательно,

$$W \sim U^2.$$

Таким образом, разработанный прибор может быть успешно использован при преподавании школьного курса физики и с его помощью могут быть продемонстрированы указанные выше зависимости.

## Заключение

В результате выполнения данной работы нами была измерена электроемкость нескольких конденсаторов. Измеренное значение не отличалось существенно от указанного на конденсаторах номинального значения. Была проверена зависимость энергии электрического поля, накапливаемой в конденсаторе от его электроемкости и от напряжения между обкладками конденсатора. Полученные экспериментально зависимости находились в согласии с теоретической формулой (1.2).

Для наглядной демонстрации зависимости энергии электрического поля от емкости и напряжения была изготовлена специальная установка. В установке о величине энергии электрического поля можно было наглядно судить по смещению столбика термометрической жидкости при тепловом расширении воздуха.

В школьном курсе физики помимо свойств электрического поля изучается и магнитное поле. Магнитное поле также обладает энергией. «Накопителем» энергии магнитного поля, как известно, является катушка индуктивности. Энергия магнитного поля катушки зависит от ее индуктивности и величины тока, протекающего через катушку. В дальнейшем мы планируем, используя разработанную нами установку, провести изучение зависимости энергии магнитного поля катушки от индуктивности и силы тока.

## Приложение 1

### Оценка величины сопротивления резистора, используемого при разрядке конденсатора

Пусть конденсатор емкостью  $C$ , первоначально заряженный до напряжения  $U$ , разряжается через резистор  $R$  (рис. 21).

Среднее значение силы тока  $I$  оценим, как отношение первоначального заряда  $q$  ко времени разрядки:

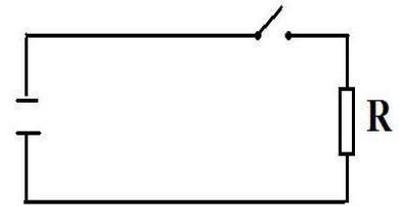


Рис. 21

$$I \sim \frac{q}{t} \quad (\text{П.1.1})$$

С другой стороны, в соответствии с законом Ома для участка цепи

$$I = \frac{U}{R} \quad (\text{П.1.2})$$

а заряд конденсатора равен

$$q = CU. \quad (\text{П.1.3})$$

Из соотношений (П.1.1.) – (П.1.3) имеем:

$$\frac{U}{R} \sim \frac{CU}{t}$$

или

$$t \sim RC,$$

$$R \sim \frac{t}{C}.$$

Если время разрядки конденсатора принять равным  $10^2$  с, а емкость конденсатора  $10^{-3}$  Ф (1000 мкФ), то

$$R \sim \frac{10^2}{10^{-3}} \sim 10^5 \text{ (Ом)}.$$

$$R \sim 100 \text{ (кОм)}.$$

Следовательно, необходим резистор порядка 100 кОм.

## Библиографический список

1. Андриюшечкин С. М. Физика. Учебник для 8-го класса общеобразовательной школы. – М.: Баласс, 2012.
2. Интернет-ресурс. Точка доступа: [www.wikipedia.ru](http://www.wikipedia.ru). Конденсаторы.
3. Мякишев Г. Я, Буховцев Б. Б. Физика: Учеб. для 10 кл. общеобразоват. учреждений.— 8-е изд. М.: Просвещение, 2000.
4. Мякишев Г. Я. Физика: Учеб. для 10 кл. общеобразоват. учреждений / Г. Я. Мякишев, Б. Б. Буховцев, Н. Н. Сотский.— 11-е изд.— М.: Просвещение, 2003.
5. Грицай В. Г., Кирюхина Л. И. и др. Руководство к лабораторным работам по физике (для 1 курса). Под ред. Э. А. Майера. Омск.: Издательство «Омская правда», 1973.
6. Кабардин О. Ф. и др. Лабораторные работы по физике для средних профессионально-технических училищ. Учебное пособие. М., «Выш. Школа», 1976.
7. Физический практикум для классов с углубленным изучением физики: дидакт. материал: 9 – 11 кл. / Ю. И. Дика, О. Ф. Кабардин, В. А. Орлов и др.; Под ред. Ю. И. Дика, О. Ф. Кабардина. – М.: Просвещение, 1993.