



СОДЕРЖАНИЕ

Основная школа

Е. И. Вараксина	ГЕМОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЕРДЦА	
В. В. Майер	ДЛЯ ДЕМОНСТРАЦИОННЫХ ОПЫТОВ	
А. В. Долженко	НА УРОКАХ ФИЗИКИ И БИОЛОГИИ.....	3

Старшая школа

В. В. Майер	ИЗМЕРЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ	
Е. И. Вараксина	ВОЗДУХА В ДЕМОНСТРАЦИОННОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ...	13

Высшая школа

В. Е. Сидоров	СОЗДАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА	
Б. А. Русанов	ПО ОПТИКЕ НА БАЗЕ ПЕДАГОГИЧЕСКОГО	
А. П. Усольцев	ТЕХНОПАРКА «КВАНТОРИУМ»	21
В. А. Семериков		
А. А. Сабирзянов		
В. В. Майер	ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ	
Е. И. Вараксина	КАК ОБЪЕКТ УЧЕБНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ	35
И. И. Мышкин		

Компьютер в эксперименте

С. В. Барышников	ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕРАКТИВНОЙ ПАНЕЛИ	
	В СОСТАВЕ ЦИФРОВОЙ ЛАБОРАТОРИИ.....	51

Науковедение

Ю. А. Сауров	О ЖИЗНИ И ПРОБЛЕМАХ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ	
	АКАДЕМИКА В. Г. РАЗУМОВСКОГО	59

АВТОРЫ ЖУРНАЛА	72
----------------------	----

Редакция журнала:

В. В. Майер (главный редактор), Р. В. Акатов, Е. И. Вараксина, Л. С. Кропачева

Редакционный совет:

С. В. Барышников	д.ф.-м.н., профессор, Благовещенск
И. В. Гребенев	д.п.н., профессор, Нижний Новгород
М. Д. Даммер	д.п.н., профессор, Челябинск
П. В. Зуев	д.п.н., профессор, Екатеринбург
О. В. Лебедева	д.п.н., доцент, Нижний Новгород
Ю. А. Сауров	д.п.н., профессор, член-корр. РАО, Киров
А. П. Усольцев	д.п.н., профессор, Екатеринбург
А. А. Шаповалов	д.п.н., профессор, Барнаул

Оргкомитет конференции:

Н. Я. Молотков	д.п.н., профессор, Тамбов
Г. Г. Никифоров	к.п.н., доцент, ИСРО РАО, Москва
Ф. А. Сидоренко	д.ф.-м.н., профессор, Екатеринбург
Я. А. Чиговская-Назарова	к.филол.н., доцент, ректор ГИПУ, Глазов
Т. Н. Шамало	д.п.н., профессор, Екатеринбург

Перечень ВАК: Журнал «Учебная физика» включен Высшей аттестационной комиссией (ВАК) Минобрнауки России в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук».

Адрес редакции, издателя и типографии: 427621, Удмуртия, Глазов, Первомайская, 25, ФГБОУ ВО «ГИПУ», Телефон: (341 41) 5–32–29.
E-mail: uch-fiz@mail.ru, kropa@bk.ru

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Глазовский государственный инженерно-педагогический университет имени В. Г. Короленко»

Журнал «Учебная физика» зарегистрирован Комитетом Российской Федерации по печати 4 февраля 1997 года, регистрационный № 015686, перерегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 2 мая 2017 года, ПИ № ФС77–69506.

Подписной индекс: 79876.

Использование и перепечатка материалов допускаются только по договоренности с редакцией журнала.

Сдано в набор 02.06.25. Подписано в печать 25.06.25.

Дата выхода в свет: 27.06.25.

Формат 60 × 90 1/16. Усл. печ. л. 4,5.

Заказ 170. Тираж 200 экз. Цена свободная.

Первая страница обложки: Демонстрация дифракции света на тумане.

Научная статья

ББК 74.262.23

УДК 372.853

В. В. Майер, Е. И. Вараксина, И. И. Мышкин
**ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ
КАК ОБЪЕКТ УЧЕБНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ**

Для курса экспериментальной физики разработано содержание и технология выполнения учебного исследования электролитических (полярных) конденсаторов в цепях постоянного и переменного тока. Обучающиеся измеряют емкость электролитического конденсатора; снимают его вольт-амперную характеристику; изучают неправильно включенный электролитический конденсатор; исследуют батарею из двух полярных конденсаторов, соединенных встречно; устанавливают правильное и безопасное включение соединенных встречно и последовательно полярных конденсаторов в цепь переменного тока.

Ключевые слова: учебное исследование, электролитический конденсатор, вольт-амперная характеристика, встречное включение, цепи постоянного и переменного тока.

V. V. Mayer, E. I. Varaksina, I. I. Myshkin
**ELECTROLYTIC CAPACITORS AS AN OBJECT
OF EDUCATIONAL RESEARCH**

For the course of experimental physics, the content and technology of conducting an educational study of electrolytic (polar) capacitors in DC and AC circuits have been developed. Students measure the capacitance of an electrolytic capacitor; obtain its volt-ampere characteristic; examine an improperly connected electrolytic capacitor; examine a battery of two polar capacitors connected in series; establish the correct and safe inclusion of polar capacitors connected in a counter and sequential manner in an alternating current circuit.

Keywords: educational research, electrolytic capacitor, volt-ampere characteristic, counter-switching, DC and AC circuits.

DOI: 10.62957/2307-5457-2025-2-35-50

Введение

Хорошо известно, что трехфазный электродвигатель средней мощности можно включить в сеть однофазного переменного напряжения, если одну из обмоток подключить через неполярный (обычно, бумажный) конденсатор достаточно большой емкости. Но

такие конденсаторы громоздки, а более компактные электролитические конденсаторы полярны и переменное напряжение не выдерживают. Тем не менее, практика показывает, что два одинаковых электролитических конденсатора при их последовательном и встречном соединении успешно работают и на переменном токе. Этот факт при необходимости используется также в учебном эксперименте, например, при демонстрациях электрических колебаний инфранизкой частоты [1], молотка Маклакова [2, 3], взаимодействия параллельного контура с переменным полем электромагнита [4]. Однако объяснение столь неожиданной, но весьма полезной способности полярных конденсаторов выдерживать переменное напряжение, далеко не очевидно. Отсюда следует актуальность *образовательной проблемы*: насколько целесообразно и возможно учебное исследование электролитических конденсаторов и их электрических соединений в курсе экспериментальной физики педагогического вуза?

Технический этап выполненного нами дидактического исследования этой проблемы связан с изучением интернет-ресурсов [5], [6] и [7], а физический и методический этапы [8] исследования изложены в настоящей статье.

Техника безопасности. Полярные конденсаторы следует подключать в цепь постоянного тока, строго соблюдая полярность. На них запрещается подавать напряжение больше указанного на корпусе. При исследовании конденсатора на него *кратковременно* подается напряжение неправильной полярности. При этом нужно следить, чтобы сила тока не превышала нескольких миллиампер. Экспериментируя с полярными конденсаторами, мы всегда закрываем их крышкой или помещаем в пластиковый контейнер, например, так, как показано на рис. 1. Необходимо помнить, что при случайном нарушении режима эксплуатации полярные конденсаторы могут взрываться, а вскипевший внутри них электролит разбрызгиваться. В цепи переменного тока через конденсатор большой емкости идет большой ток (сопротивление конденсатора $X_C = 1/\omega C$ при $C = 1000$ мкФ и частоте тока 50 Гц составляет всего 3 Ом, а значит при напряжении, например, 6 В, сила тока достигает 2 А); это нужно иметь в виду при подключении диодов последовательно с конденсаторами.

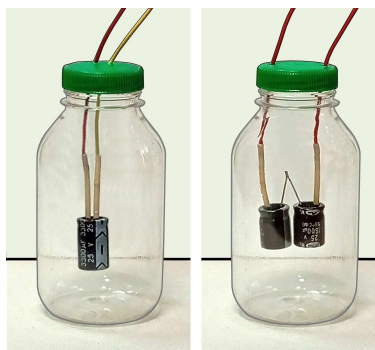


Рис. 1. Возможный способ повышения безопасности учебного исследования полярных конденсаторов

1. Емкость электролитического конденсатора

Информация

Во многих мультиметрах есть опция, позволяющая измерять емкость конденсаторов. Однако максимальный предел измерения емкости не превышает 200 мкФ. Кроме того, физические принципы измерения емкости мультиметром нуждаются в изучении и обосновании их достоверности. В курсе общей и экспериментальной физики выводят несколько формул, связанных с емкостью конденсатора:

$$C = \frac{Q}{U}, \quad C = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{S}{d}, \quad U = \mathcal{E}(1 - e^{-t/RC}), \quad U = U_0 e^{-t/RC}. \quad (1)$$

Проблема

Как в условиях учебной лаборатории быстро и безопасно измерить емкость электролитического конденсатора, если на его корпусе указано значение емкости, выходящее за предел измерения мультиметра? Какой из методов измерения опирается на имеющиеся у обучающихся знания о конденсаторах? Можно ли определять емкость двух последовательно и встречно включенных полярных конденсаторов, пользуясь известными соотношениями для батареи конденсаторов?

Идея

Нужно снять зависимость от времени напряжения на конденсаторе при его зарядке через резистор от источника с известной ЭДС или при разрядке конденсатора, заряженного до известного напряжения, через такой же резистор. В целях безопасности для опытов целесообразно использовать низковольтный маломощный источник.

Вариант решения

1. Оборудование: 1) два одинаковых электролитических конденсатора номинальной емкостью 1000 мкФ и рабочим напряжением 25 В; 2) батарея гальванических элементов на 4,5 В; 3) мультиметр типа DT9208A в режиме вольтметра; 4) постоянный резистор сопротивлением порядка 11 кОм; 5) секундомер; 6) переключатель; 7) соединительные провода.

2. Принципиальная схема экспериментальной установки. На рис. 2.1 показана принципиальная схема электрической цепи для исследования процессов зарядки и разрядки конденсатора. Батарея гальванических элементов *GB1* подключена с помощью переключателя *SA1* к последовательно соединенным резистору *R1* и конденсатору *C1*. Напряжение на конденсаторе измеряется мультиметром *PV1*. Резистор *R1* необходим для увеличения времени зарядки и разрядки конденсатора. Переключатель *SA1* позволяет подключать

конденсатор в цепь зарядки и в цепь разрядки. Секундомер необходим для измерения времени зарядки и разрядки конденсатора.

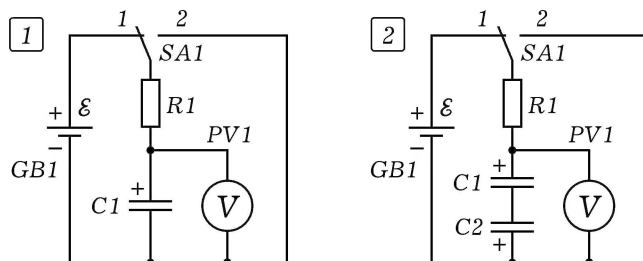


Рис. 2. Принципиальная схема для исследования процессов зарядки и разрядки: 1 — электролитического конденсатора; 2 — двух последовательно и встречно соединенных конденсаторов

3. Зарядка конденсатора. Вначале мультиметром измеряют сопротивление резистора $R1$ (у нас получилось значение $R_1 = 10840$ Ом). Переключатель $SA1$ переводят в положение 1 и снимают зависимость напряжения U на одном электролитическом конденсаторе $C1$ от времени t . Затем снимают эту же зависимость $U = U(t)$ для второго конденсатора и для последовательно и встречно включенных конденсаторов (рис. 2.2). По полученным данным в электронных таблицах *Excel* строят графики этих зависимостей в одной системе координат (рис. 2.1).

Теоретически зависимость напряжения на обкладках конденсатора от времени $U = U(t)$ выражается одной из приведенных выше формул (1). Графики этой зависимости строят в той же системе координат и для теоретических графиков подбирают значения емкостей C_1 , C_2 и C ($1/C = 1/C_1 + 1/C_2$) так, чтобы эти графики как можно ближе соответствовали экспериментальным точкам.

Получают, например, следующие результаты: емкости конденсаторов по отдельности одинаковы и равны $C_1 = C_2 = 1060$ мкФ, а емкость батареи из двух последовательно соединенных конденсаторов $C = 530$ мкФ.

4. Разрядка конденсаторов. Для проверки полученного в предыдущем опыте результата используют теоретическую зависимость напряжения при разрядке конденсатора от времени (1). Как и раньше, по полученным в эксперименте данным строят графики зависимостей $U = U(t)$ и по ним методом сравнения с теоретическими зависимостями напряжения разряда от времени определяют емкости исследованных конденсаторов (рис. 3.2). Например, в наших опытах получилось $C_1 = C_2 = 1040$ мкФ, $C = 520$ мкФ.

Таким образом, емкость батареи из двух одинаковых, соединенных последовательно и встречно электролитических конденсаторов

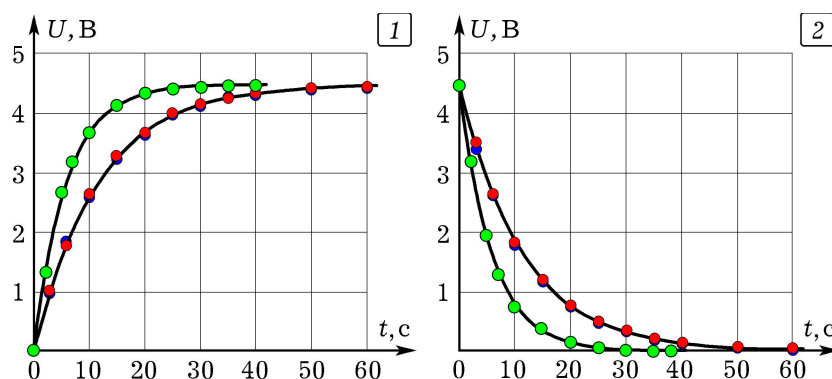


Рис. 3. Графики зависимости напряжения на обкладках электролитического конденсатора от времени при его зарядке 1 и разрядке 2: красные и синие экспериментальные точки соответствуют зарядке и разрядке двух внешне одинаковых конденсаторов с номиналом 1000 мкФ, эти точки практически совпадают; зеленые (светлые) точки — зарядка и разрядка батареи из этих конденсаторов, соединенных последовательно и встречно

равна половине емкости каждого из конденсаторов. Следовательно, для расчета емкости C последовательно и встречно включенных полярных конденсаторов применимо известное из школьной электродинамики соотношение: $1/C = 1/C_1 + 1/C_2$. Однако, можно предположить, что этот вывод справедлив лишь для малых напряжений, с которыми выполнялись опыты. Чтобы проверить это, необходимо исследовать вольтамперную характеристику электролитического конденсатора.

2. Вольтамперная характеристика полярного конденсатора

Информация

Сведения об устройстве электролитического конденсатора можно найти, например, в статье [7]. В ней говорится, что современный электролитический конденсатор состоит из двух лент из алюминиевой фольги, между которыми проложена бумажная лента, пропитанная электролитом. На поверхности одной из алюминиевых лент создан тонкий слой оксида алюминия Al_2O_3 , который представляет собой полупроводник n -типа и для напряжения определенной полярности является прекрасным диэлектриком. Лента, покрытая слоем оксида, представляет собой положительную (или анодную) обкладку конденсатора. Отрицательной (катодной) обкладкой служит слой электролита, которым пропитана бумажная лента (рис. 4). Вторая алюминиевая лента соединяет обкладку из электролита с отрицательным выводом конденсатора [7, с. 18].

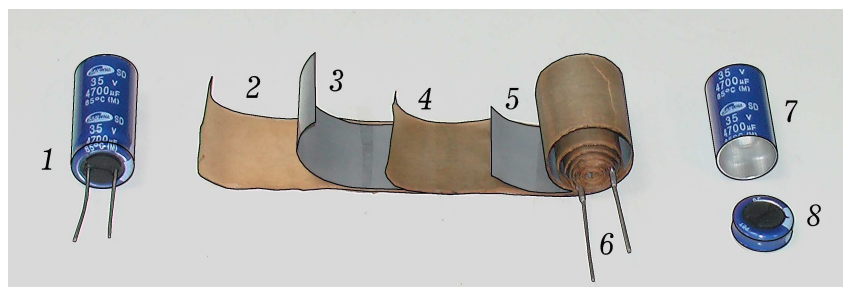


Рис. 4. Устройство электролитического конденсатора: 1 — конденсатор в сборе; 2 — лента бумажная защитная; 3 — лента алюминиевая катодная; 4 — лента бумажная с электролитом; 5 — лента алюминиевая анодная; 6 — выводы, длинный — анод; 7 — корпус; 8 — дно конденсатора

Из школьного курса физики известно, что емкость конденсатора прямо пропорциональна площади S его обкладок и обратно пропорциональна толщине d диэлектрика между ними (1). Поэтому для увеличения площади будущей анодной обкладки ее подвергают электрохимическому травлению, которое делает поверхность алюминия рыхлой, создавая в ней многочисленные микроуглубления. В результате эффективная площадь поверхности обкладки возрастает до 200 раз. Далее наружную поверхность анодной фольги и поверхности всех ее микроуглублений покрывают оксидным слоем толщиной не более 1 мкм, который выполняет функцию диэлектрика. Электролит заполняет микроуглубления, образуя катодную обкладку конденсатора, емкость которого многократно превышает емкость такого же по размерам бумажного конденсатора [6, 7].

Проблема

Какой должна быть серия опытов, убедительно подтверждающая приведенную здесь информацию об устройстве и принципе действия электролитического конденсатора?

Идея

Чтобы решить проблему исследования, нужно разобрать старый электролитический конденсатор и изучить его устройство. Так как, судя по сообщенной информации, алюминиевая лента с нанесенным на ее поверхность слоем оксида при контакте с электролитом представляет собой своеобразный полупроводниковый диод [7, с. 18], то необходимо снять зависимость силы постоянного тока через конденсатор от напряжения на нем и сравнить ее с вольтамперной характеристикой типичного диода.

Вариант решения

1. **Оборудование:** электролитический конденсатор емкостью 1500 мкФ рабочим напряжением 25 В; четыре аккумулятора типа

18650 (2000 mAh, 3,7 V), соединенные последовательно в контейнере; два мультиметра типа DT9208A в режиме миллиамперметра и вольтметра; реостат сопротивлением 500 Ом в качестве потенциометра; переключатель двухполюсный; соединительные провода.

2. Принципиальная схема экспериментальной установки. На рис. 5 показана схема электрической цепи для снятия вольтамперной характеристики (ВАХ) полярного конденсатора при его правильном и неправильном включении. Потенциометром $R1$, подключенным к батарее аккумуляторов $GB1$, регулируют напряжение на конденсаторе $C1$. Силу тока через конденсатор измеряют мультиметром $PA1$, напряжение на нем — мультиметром $PV1$. Переключатель $SA1$ позволяет включать в цепь конденсатор в правильной 1 и неправильной 2 полярности.

3. ВАХ правильно включенного конденсатора. Вначале снимают зависимость $I = I(U)$ при правильном включении конденсатора, увеличивая напряжение на нем от 0 до 15 В. Наблюдают, что при каждом увеличении напряжения на конденсаторе возникает зарядный ток, который достигает максимума и затем уменьшается до нуля. Завершая опыт, напряжение на конденсаторе уменьшают до нуля.

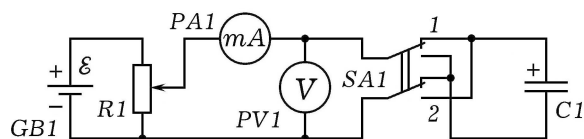


Рис. 5. Принципиальная схема установки для снятия вольтамперной характеристики конденсатора: 1 — правильное включение; 2 — неправильное включение конденсатора

4. ВАХ неправильно включенного конденсатора. Переключателем изменяют полярность напряжения на конденсаторе на неправильную и осторожно увеличивают подаваемое на него напряжение. Обнаруживают, что при плавном росте напряжении до 7 В, сила тока через конденсатор медленно растет, оставаясь близкой к нулю. При дальнейшем увеличении напряжения сила тока резко возрастает (рис. 6). Это не позволяет точно снять экспериментальные данные, так как при фиксации определенного значения напряжения потенциометром сила тока продолжает увеличиваться, а напряжение на конденсаторе уменьшается. При напряжении, превышающем 10 В, конденсатор начинает сильно нагреваться. Для разных конденсаторов даже одного номинала указанные значения напряжения различны. Поэтому выполняя опыт, нужно ориентироваться по силе тока: не следует

допускать протекание через конденсатор тока силой более 20 мА (на рис. 6.1 пунктиром показан участок графика, снятый авторами статьи, который мы рекомендуем не воспроизводить читателям).

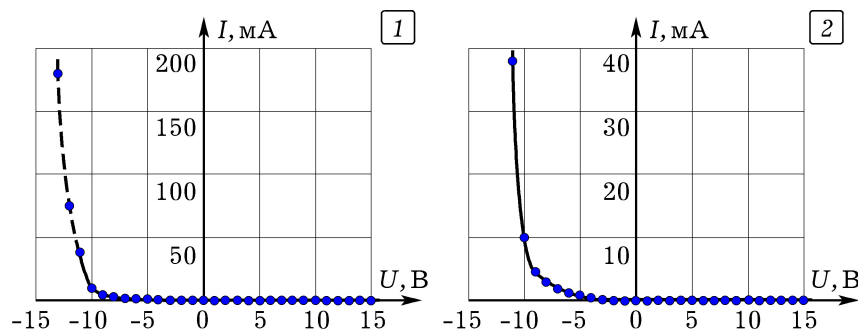


Рис. 6. Вольтамперная характеристика электролитического конденсатора: 1 — оксидный слой на аноде неправильно включенного конденсатора разрушается; 2 — при снятии ВАХ ток через конденсатор не должен превышать 20 мА

5. Результат исследования. По полученным данным в электронных таблицах *Excel* строят вольтамперную характеристику конденсатора (рис. 6.2). Обнаруживают, что она сильно напоминает ВАХ полупроводникового диода. Делают вывод: при напряжении более 7 В через *неправильно включенный* электролитический конденсатор проходит недопустимо большой самопроизвольно растущий электрический ток, который вызывает нагревание конденсатора и его последующее разрушение.

3. Неправильно включенный электролитический конденсатор

Информация

В *исследовании 1* показано, что два последовательно и встречно включенные электролитические конденсаторы имеют емкость в два раза меньше, чем у каждого из них по отдельности при правильном включении. В *исследовании 2* получено, что при малом напряжении сила тока через неправильно включенный конденсатор мала (рис. 6). Поэтому можно допустить, что при небольшом напряжении электролитический конденсатор ничем не отличается от любого другого конденсатора.

Проблема

Как проверить, что при неправильном включении электролитический конденсатор при малых напряжениях действительно проявляет себя в цепи переменного тока как обычный неполярный конденсатор?

Идея

Нужно попробовать изучить и сравнить зарядку и разрядку правильно и неправильно включенного электролитического конденсатора.

Вариант решения

1. Оборудование: электролитический конденсатор емкостью 100 мкФ рабочим напряжением 25 В; резистор сопротивлением 270 кОм; мультиметр типа DT9208A в режиме вольтметра; секундомер; батарея гальванических элементов на 4,5 В; батарея аккумуляторов на 11,1 В; переключатель; соединительные провода.

2. Экспериментальная установка. Используя перечисленное оборудование, собирают экспериментальную установку по схеме, приведенной на рис. 2.1. Перед проведением измерений конденсатор разряжают.

3. Правильное включение конденсатора. Сначала исследуют зарядку правильно включенного конденсатора от батареи гальванических элементов на 4,5 В (график 1 на рис. 7.1) и от батареи аккумуляторов на 11,1 В (график 2 на рис. 7.1) и его разрядку (графики 5 и 6 на рис. 7.2). Обнаруживают, что конденсатор заряжается до напряжения источника питания и разряжается до нуля в полном соответствии с теорией — формулы (1).

4. Неправильное включение конденсатора. Для безопасности конденсатор помещают в пластиковый контейнер (рис. 1) и включают его неправильно в цепь, показанную на рис. 2.1. В качестве источника используют батарею GB1 на 4,5 В, переводят переключатель SA1 в положение 1 и снимают зависимость напряжения на конденсаторе от времени. Получают график 3, мало отличающийся от аналогичного графика

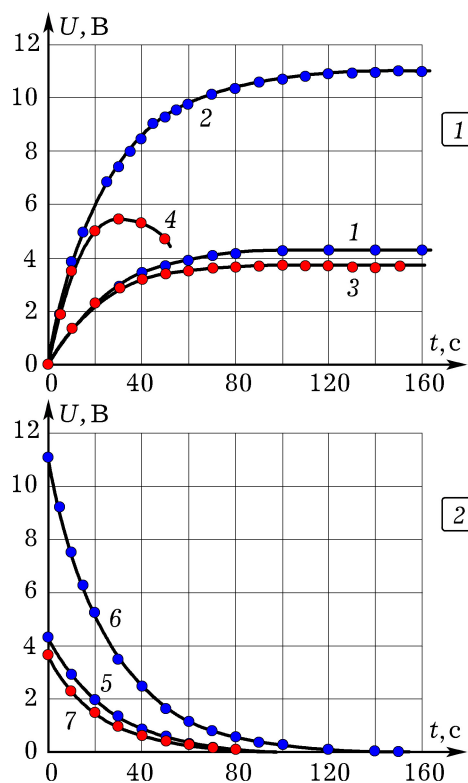


Рис. 7. Сравнение процессов зарядки электролитического конденсатора, включенного правильно (синие точки) и неправильно (красные точки); разрядка происходит одинаково при любом включении

1 при правильном включенном конденсаторе. Но максимальное напряжение заряженного конденсатора оказывается несколько меньше, чем напряжение батареи 4,5 В, в нашем случае, примерно 3,8 В (график 3 на рис. 7.1).

Переключатель SA1 переводят в положение 2 и производят разрядку заряженного в предыдущем опыте конденсатора. Убеждаются, что график 7 зависимости напряжения при разрядке от времени неправильно включенного конденсатора примерно такой же, как и график 5 при правильном включении этого конденсатора (рис. 7.2). Таким образом, на низком напряжении неправильно включенный конденсатор может функционировать примерно так же, как правильно включенный.

Однако использование в качестве источника батареи аккумуляторов на 11,1 В дает другие результаты. При зарядке неправильно включенного конденсатора сначала напряжение на нем быстро растет, а затем начинает уменьшаться (график 4 на рис. 7.1). Поскольку это свидетельствует о возрастании силы тока через конденсатор, процесс зарядки необходимо прекратить.

Таким образом, опыт показывает, что при напряжении, превышающем несколько вольт, неправильное включение электролитического конденсатора может привести его к выходу из строя.

4. Батарея из двух полярных конденсаторов, соединенных встречно

Информация

Исследование 3 показало, что полярный конденсатор не может работать в цепи переменного тока потому, что половину каждого периода на нем оказывается *неправильное напряжение*, приводящее к разрушению оксидного слоя на анодной обкладке. Однако хорошо известно, что два одинаковых соединенных последовательно и встречно, то есть плюсами или минусами, электролитических конденсатора вполне удовлетворительно выдерживают переменное напряжение.

Проблема

Как доказать, что последовательное и встречное включение одинаковых полярных конденсаторов позволяет использовать эту батарею в цепи переменного тока?

Идея

Нужно смоделировать источник переменного напряжения источником постоянного, изменяющего полярность напряжения на батарее конденсаторов посредством переключателя, и измерить напряжения на конденсаторах.

Вариант решения

1. Оборудование: два одинаковых электролитических конденсатора емкостью 100 мкФ рабочим напряжением 25 В; два мульти-

метра типа DT9208A в режиме вольтметра; батарея гальванических элементов на 4,5 В; переключатель двухполюсный; соединительные провода.

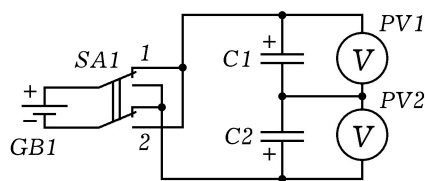


Рис. 8. Принципиальная схема установки для изучения распределения напряжений на двух последовательно и встречно включенных одинаковых электролитических конденсаторах

2. Эксперимент. Используя перечисленное оборудование, собирают экспериментальную установку по схеме, приведенной на рис. 8. Перед началом измерений конденсаторы разряжают.

Подают на батарею напряжение 4,5 В. Измеряют и записывают напряжения на конденсаторах. В одном из наших опытов напряжение на правильно включенном конденсаторе оказалось равным 2,76 В, а на неправильно включенном 1,70 В. Меняют полярность подключения источника напряжения. Теперь первый конденсатор оказывается включенным неправильно, а второй — правильно. Напряжение на первом составило 1,80 В, а на втором 2,64 В. Можно заметить, что с течением времени распределение напряжений меняется: на правильно включенном конденсаторе медленно растет, а на неправильно включенном — убывает.

5. Правильное включение полярных конденсаторов в цепь переменного тока

Информация

В учебной литературе можно найти опыты, в которых электролитические конденсаторы одинаковой емкости успешно работают в цепи переменного тока, если они соединены последовательно и встречно [1, 3, 4].

Проблема

Как убедиться, что при таком соединении конденсаторов решается проблема их использования на переменном напряжении?

Идея

Нужно в *исследовании 4* вместо источника постоянного напряжения и переключателя его полярности использовать переменное напряжение сетевой частоты 50 Гц и исследовать осциллограммы напряжений на конденсаторах.

Вариант решения

1. Оборудование: два одинаковых электролитических конденсатора емкостью 100 мкФ рабочим напряжением 25 В; двухлучевой цифровой осциллограф типа UTD2025CL; мультиметр типа DT9208A в режиме вольтметра переменного напряжения; источник переменного напряжения, регулируемый в пределах 0–12 В, например, школьный блок В–24м; соединительные провода.

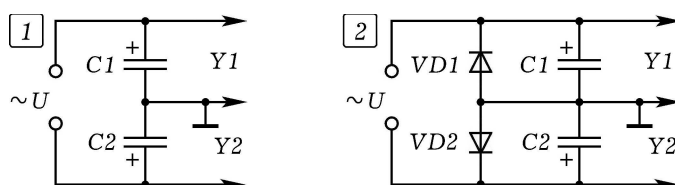


Рис. 9. Схемы для получения осциллограмм напряжений: 1 — на последовательно и встречно включенных конденсаторах; 2 — на таких же конденсаторах, зашунтированных диодами

2. Эксперимент. Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рис.9.1. Осциллограф типа UTD2025CL имеет два входа Y1 и Y2, которые соединены в его общей точке (земле). Поэтому осциллограммы переменных напряжений на конденсаторах будут сдвинуты одна относительно другой на 180° . Чтобы ликвидировать этот сдвиг, нужно воспользоваться имеющейся в осциллографе опцией *инверсия* одного из напряжений.

Убеждаются, что конденсаторы разряжены, на необходимое время замкнув выводы каждого из них проводником. На включенные встречно конденсаторы подают небольшое переменное напряжение $U = 3,4$ В. Тогда амплитуды напряжений на каждом конденсаторе равны $U_m = \sqrt{2}U/2 = U/\sqrt{2} = 2,4$ В, при этом осциллограммы сигналов практически полностью накладываются одна на другую и симметричны относительно оси времени (рис. 10.1).

Увеличивают общее напряжение на конденсаторах примерно в 2 раза, например, до $U = 7,6$ В. Обнаруживают, что теперь осциллограммы напряжений на конденсаторах несимметричны относительно оси времени так, что чередуются полупериоды с меньшей и большей амплитудами (рис. 10.2). Очевидно, более низкая амплитуда соответствует тем полупериодам, в которые полярный конденсатор включен неправильно. Поэтому значительно повышать переменное напряжение на встречно включенных электролитических конденсаторах нельзя, так как на оба конденсатора поочередно подается неправильное напряжение. При этом через конденсаторы идут большие токи, вызывающие нагрев электролита с возможным выходом конденсаторов из строя.

Осциллограммы на каждом конденсаторе по отдельности представляют собой синусоиды, сдвинутые вверх и вниз. Значит напряжение на отдельном конденсаторе можно представить как сумму переменного и постоянного напряжений. Анализируя результаты исследования 2, можно допустить, что постоянная составляющая напряжения на конденсаторе обусловлена тем, что соседний конденсатор выполняет функцию диода [7, с.18] в прямом включении, когда напряжение на него подано неправильно.

В заключительном опыте сбрасывают общее напряжение на конденсаторах до нуля: осциллограммы показывают, что оба конденсатора остаются заряженными (рис. 10.3). Разность постоянных напряжений на каждом из заряженных конденсаторов равна разности мгновенных значений переменных напряжений на этих конденсаторах (рис. 10.2).

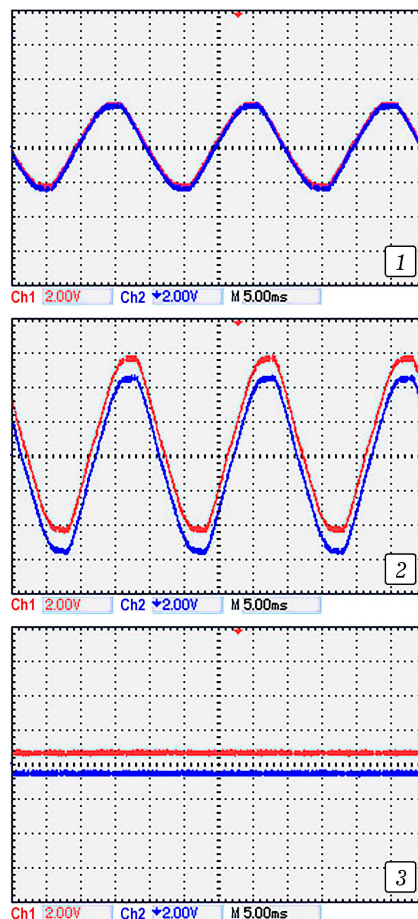


Рис. 10. Осциллограммы напряжений на последовательно и встречно соединенных конденсаторах без диодов

6. Безопасная подача на полярные конденсаторы переменного напряжения

Информация

Исследование 5 показало, что встречное включение одинаковых полярных конденсаторов в цепь переменного тока опасно, так как через каждые полпериода переменного напряжения оба конденсатора поочередно оказываются включенными неправильно.

Проблема

Что необходимо сделать, чтобы обеспечить надежную работу электролитических конденсаторов на переменном токе?

Идея

Нужно добиться, чтобы каждый из встречно включенных конденсаторов находился только под правильным напряжением. Для этого параллельно каждому конденсатору можно подсоединить диод, шунтирующий конденсатор по неправильному напряжению (рис. 9.2).

Вариант решения

1. Оборудование: два одинаковых электролитических конденсатора емкостью 100 мкФ рабочим напряжением 25 В; два одинаковых полупроводниковых диода типа 1N007; осциллограф типа UTD2025CL; источник переменного напряжения, регулируемый в пределах 0–12 В; соединительные провода.

2. Эксперимент. Собрав экспериментальную установку по схеме, приведенной на рис. 9.2, повторяют исследование 5 и получают осциллограммы, показанные на рис. 11. На первых двух осциллограммах видно, что при любом переменном напряжении источника на конденсаторах получаются правильные по полярности постоянные пульсирующие напряжения. При выключении источника конденсаторы остаются заряженными до величины, равной половине амплитуды пульсаций на них постоянного напряжения. Разрядить последовательно и встречно включенные конденсаторы коротким замыканием их крайних выводов не удается. Но если замкнуть выводы одного из конденсаторов, то они оба потеряют заряды.

В этом опыте обнаруживается поразительное явление: каждый из последовательно и встречно соединенных одина-

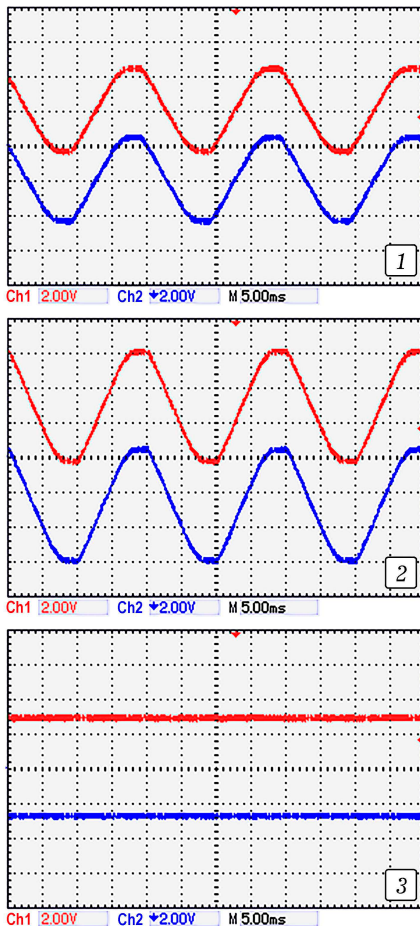


Рис. 11. Осциллограммы напряжений на последовательно и встречно соединенных конденсаторах, шунтированных диодами

ковых конденсаторов заряжается до половины амплитудного значения поданного на батарею переменного напряжения. Возникшие при этом на конденсаторах напряжения встречны. Поэтому крайние выводы конденсаторов имеют одинаковые потенциалы. Этим объясняется невозможность разрядить батарею замыканием указанных выводов.

3. Теоретическая модель. На рис. 12 показаны идеальные осциллограммы 1 и 2 напряжений на конденсаторах $C1$ и $C2$ (рис. 9.2 и рис. 11.2). Это пульсирующие с частотой 50 Гц постоянные положительное и отрицательное напряжения. Сумма графиков 1 и 2, построенная для каждого момента времени, дает осциллограмму переменного напряжения 3. Поэтому на выводах двух одинаковых включенных последовательно и встречно электролитических конденсаторов получается синусоидальное переменное напряжение. Но на каждом конденсаторе пульсирующее напряжение постоянно, соответствует правильному включению конденсатора и среднее его значение равно половине амплитуды переменного напряжения на батарее. Поэтому рабочее напряжение электролитических конденсаторов не должно быть меньше амплитуды переменного напряжения, поданного на оба конденсатора.

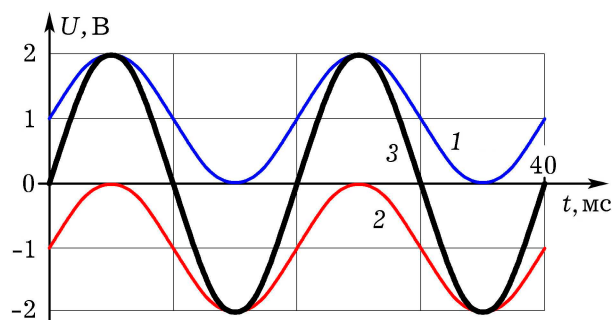


Рис. 12. Синусоидальные напряжения на последовательно и встречно включенных конденсаторах [5]: 1 — положительное пульсирующее напряжение на $C1$; 2 — отрицательное пульсирующее напряжение на $C2$; 3 — переменное напряжение на $C1 + C2$

Заключение

В статье представлена детально разработанная серия из шести учебных исследований электролитических конденсаторов в практикуме по экспериментальной физике. Приведенные в ней результаты получены обучающимися в самостоятельной учебно-исследовательской деятельности, организованной в соответствии со

структурой: *Информация* → *Проблема* → *Идея* → *Вариант решения*, которая пригодна для использования в курсе экспериментальной физики и для организации проектной деятельности школьников.

Вывод: учебное исследование в системе естественнонаучного образования современных электролитических конденсаторов и их электрических соединений *целесообразно*, поскольку оно способствует научному и техническому развитию обучающихся средствами дидактики физики, и *возможно*, так как безопасно, не нуждается в специальном оборудовании и теперь имеет разработанный дидактический ресурс экспериментальной деятельности.

Дидактическое исследование физического объекта можно считать завершенным, если его итогом является краткое, экспериментально обоснованное и теоретически безупречное *качественное объяснение* явления, процесса или прибора. В нашем случае это объяснение таково: последовательно и встречно включенные электролитические конденсаторы могут работать на переменном напряжении потому, что в первые полупериоды проходящего через них переменного тока *каждый из них заряжается до постоянного напряжения правильной полярности*, равного половине амплитуды поданного на них переменного напряжения; поэтому на каждом конденсаторе вместо переменного имеется пульсирующее синусоидальное напряжение штатной для него полярности; сумма этих постоянных по направлению напряжений дает переменное напряжение, поданное на оба конденсатора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рязанов Г. А. Лекционные опыты по теории электромагнитного поля. — М.–Л.: Гостехтеориздат, 1952. — 216 с.
2. Сивухин Д. В. Общий курс физики: учеб. пособие: для вузов. В 5 т. Т. 3. Электричество. — М.: Физматлит; Изд-во МФТИ, 2004. — 687 с.
3. Майер В. В., Майер Р. В. Учебные опыты с колебательными контурами // Учебная физика. — 1998. — № 2. — С. 36–41.
4. Акатов Р. В., Сысоева Б. П. Демонстрация взаимодействия переменных магнитных полей // Учебная физика. — 2001. — № 5. — С. 13–16.
5. 223. Все о встречно–последовательном соединении электролитических конденсаторов. — URL: <https://dzen.ru/a/X13TtNcJJHMXfHC9?ysclid=m7o9hund7m812492766> (дата обращения: 02.06.2025).
6. Аллюминиевые электролитические конденсаторы. — URL: https://www.tdk-electronics.tdk.com/en/electrolytic_capacitors (дата обращения: 02.06.2025).
7. Гуревич В. Электролитические конденсаторы: особенности конструкции и проблемы выбора // Компоненты и технологии. — 2012. — № 5. — С. 17–24.
8. Вараксина Е. И. Основные этапы научного исследования учебного физического эксперимента // Учебная физика. — 2022. — № 3. — С. 61–67.

Глазовский государственный
инженерно-педагогический
университет имени В. Г. Короленко

Поступила в редакцию 28.03.25.