

Учреждение образование
«Гродненский государственный университет имени Янки Купалы»
физико-технический факультет
кафедра общей физики

ауд. 415

Лабораторная работа № 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЁМКОСТИ КОНДЕНСАТОРОВ

Лабораторная работа № 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЁМКОСТИ КОНДЕНСАТОРОВ

Цель работы

освоить экспериментальные методы определения емкости конденсаторов

Оборудование:

Стенд со сменной панелью НТЦ-22.03/02; цифровой мультиметр.

Краткая теория

Если двум изолированным друг от друга проводникам сообщить заряды q_1 и q_2 , то между ними возникает некоторая **разность потенциалов $\Delta\phi$** , зависящая от величин зарядов и геометрии проводников. Разность потенциалов $\Delta\phi$ между двумя точками в электрическом поле часто называют напряжением и обозначают буквой U . Наибольший практический интерес представляет случай, когда заряды проводников одинаковы по модулю и противоположны по знаку: $q_1 = -q_2 = q$. В этом случае можно ввести понятие электрической ёмкости.

Электроёмкостью системы из двух проводников называется физическая величина, определяемая как отношение заряда q одного из проводников к разности потенциалов (напряжению) U между ними:

$$C = \frac{q}{U} \quad (1)$$

В системе СИ единица электроёмкости называется фарад (Ф): $1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл/В}$.

Величина электроёмкости зависит от формы и размеров проводников и от свойств диэлектрика, разделяющего проводники. Существуют такие конфигурации проводников, при которых электрическое поле оказывается сосредоточенным (локализованным) лишь в некоторой области пространства. Такие системы называются конденсаторами, а проводники, составляющие конденсатор, называются обкладками.

Простейший конденсатор – система из двух плоских проводящих пластин, расположенных параллельно друг другу на малом по сравнению с размерами пластин расстоянии и разделённых слоем диэлектрика.

Такой конденсатор называется плоским. Электрическое поле плоского конденсатора в основном локализовано между пластинами (рис. 1), однако вблизи краёв пластин и в окружающем пространстве также возникает сравнительно слабое электрическое поле, которое называют полем рассеяния.

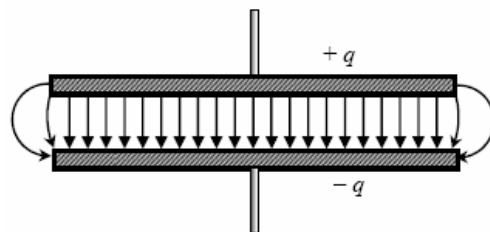


Рис. 1.

В целом ряде задач можно пренебрегать полем рассеяния и полагать, что электрическое поле конденсатора целиком сосредоточено между его обкладками. Тогда, используя теорему Гаусса и связь между напряжённостью и потенциалом для

однородного поля, можно вычислить ёмкость плоского конденсатора, которая прямо пропорциональна площади S каждой пластины, и обратно пропорциональна расстоянию d :

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d} \quad (2)$$

Измерение ёмкости конденсатора можно осуществить различными методами. Самый очевидный способ – использовать определяющую формулу (1). Для этого нужно измерить заряд конденсатора и напряжение на его обкладках. Напряжение можно измерить вольтметром, который должен иметь очень большое сопротивление, в идеале $R_V \rightarrow \infty$.

Тогда заряд на одной обкладке конденсатора будет равен заряду, прошедшему по цепи (рис. 2), если пренебречь током, проходящим по вольтметру. Так как, по определению, сила тока

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (3)$$

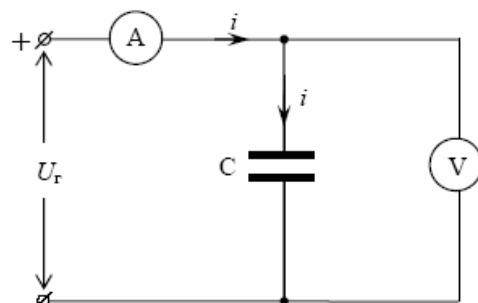


Рис. 2.

то заряд Δq , прошедший по цепи за время $\Delta t = t_2 - t_1$, равен интегралу

$$\Delta q = \int_{t_1}^{t_2} i \cdot dt \quad (4)$$

При постоянном напряжении U_g генератора напряжение U на конденсаторе при зарядке увеличивается, приближаясь к U_g , а зарядный ток уменьшается от максимального значения до нуля по экспоненте. Соответствующие графики при зарядке двух конденсаторов разной емкости представлены на рис. 3 и 4.

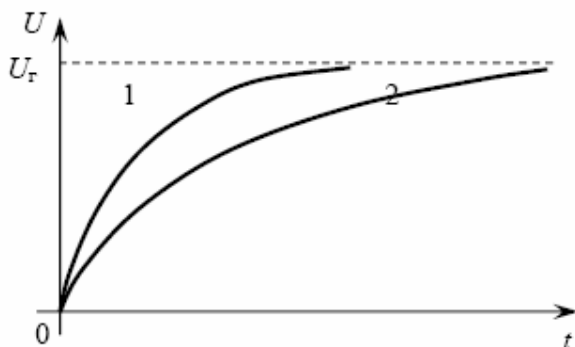


Рис. 3.

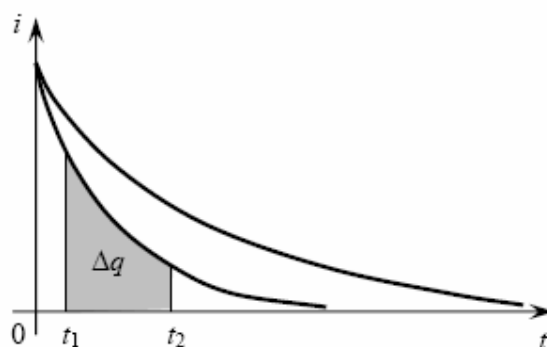


Рис. 4.

Изменение заряда конденсатора легко определить, если заряжать его током, сила I которого не изменяется. Тогда заряд конденсатора будет увеличиваться прямо пропорционально времени зарядки:

$$\Delta q = I \Delta t \quad (5)$$

Напряжение на конденсаторе при этом условии будет изменяться также пропорционально времени, и ёмкость можно определить, поделив $I\Delta t$ на соответствующее изменение напряжения ΔU :

$$C = \frac{I\Delta t}{\Delta U} \quad (6)$$

Так как процессы зарядки – разрядки конденсатора протекают очень быстро, то наблюдения и измерения проводят с помощью осциллографа, на экране которого одновременно отображаются две зависимости: $U(t)$ и $i(t)$. Для вычисления ёмкости по формуле (6) зависимость $i(t)$ должна иметь горизонтальный участок, на протяжении которого сила I зарядного тока не изменяется, и напряжение $U(t)$ линейно зависит от времени (рис.5).

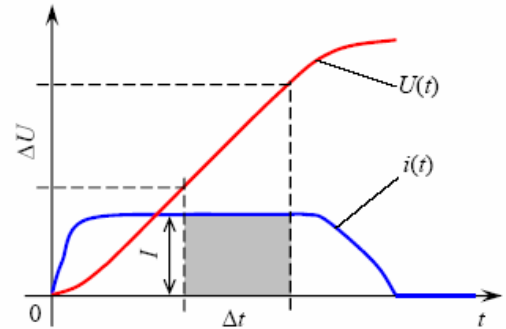


Рис. 5.

Конденсаторы могут соединяться между собой, образуя батареи конденсаторов. При параллельном соединении конденсаторов (рис. 6) напряжения на конденсаторах одинаковы: $U_1 = U_2 = U$, а заряды равны $q_1 = C_1 U$ и $q_2 = C_2 U$. Такую систему можно рассматривать как единый конденсатор электроёмкости C , заряженный зарядом $q = q_1 + q_2$ при напряжении между обкладками, равном U . Из определяющей формулы (1) получаем

$$C = \frac{q_1 + q_2}{U}, \text{ или } C = C_1 + C_2 \quad (7)$$

При последовательном соединении (рис. 7) одинаковыми оказываются заряды обоих конденсаторов: $q = q_1 = q_2$, а напряжения на них равны $U_1 = \frac{q}{C_1}$ и $U_2 = \frac{q}{C_2}$

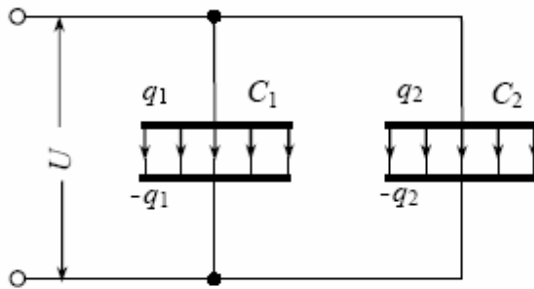


Рис. 6

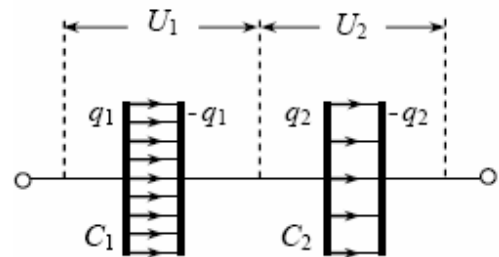


Рис. 7.

Такую систему можно рассматривать как единый конденсатор, заряд которого равен q при напряжении между обкладками $U = U_1 + U_2$. Следовательно,

$$C = \frac{q}{U_1 + U_2} \text{ или } \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (8)$$

При параллельном соединении конденсаторов складываются ёмкости, а при последовательном соединении складываются их обратные величины.

Формулы для параллельного и последовательного соединения остаются справедливыми при любом числе конденсаторов, соединённых в батарею.

ИЗМЕРЕНИЕ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА

Если цепь переменного тока содержит конденсатор с ёмкостью C , к которому приложено синусоидальное напряжение u (рис. 8(а)):

$$u = U_0 \sin \omega t, \quad (9)$$

то заряд конденсатора будет периодически изменяться, и мгновенное значение силы тока в этой цепи

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d(C \cdot u)}{dt} = \omega C U_0 \cos \omega t = \omega C U_0 \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right). \quad (10)$$

Обозначим $X_C = \frac{1}{\omega C}$ и назовем реактивным сопротивлением ёмкости (ёмкостным сопротивлением), тогда

$$i = I_0 \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right), \quad (11)$$

где $I_0 = \frac{U_0}{X_C}$.

Амплитудные значения силы тока и напряжения связаны соотношением $I_0 = \omega C U_0$.

Из (10) следует, что ток в цепи с ёмкостью опережает приложенное напряжение на угол $\frac{\pi}{2}$. Временная и векторная диаграммы изображены на рис. 8(б) и 8(в).

Деля соотношение (11) на $\sqrt{2}$, получим закон Ома для цепи с ёмкостью

$$I = \omega C U \text{ или } U = I \frac{1}{\omega C} = I \cdot X_C, \quad (12)$$

здесь $X_C = \frac{1}{\omega C}$ имеет размерность сопротивления и называется ёмкостным сопротивлением.

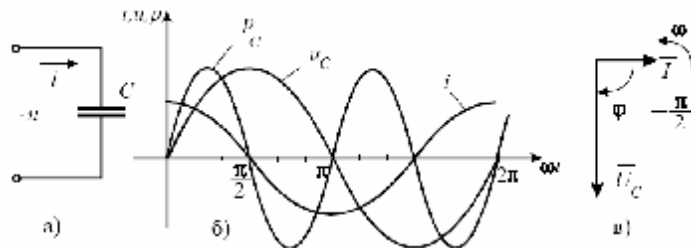


Рис. 8. Схема, временная и векторная диаграммы цепи с идеальным ёмкостным элементом

Перейдем к анализу энергетических процессов в цепи с емкостным элементом. Мгновенная мощность емкостного элемента

$$p = ui = \frac{1}{2} U_0 \cdot I_0 \cdot \sin \omega t \cdot \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = UI \sin 2\omega t, \quad (13)$$

изменяется по закону синуса с удвоенной частотой.

Активная мощность, характеризующая необратимые процессы преобразования энергии и определяемая средним значением мгновенной мощности за период, для емкостного элемента равна нулю.

$$P_{cp} = P = \frac{1}{T} \int_0^T i \cdot u \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T IU \sin 2\omega t dt = 0. \quad (14)$$

Таким образом, в цепи с идеальным емкостным элементом не совершается работа, а происходит только периодический обмен энергией между источником и электрическим полем. Интенсивность этого обмена принято характеризовать наибольшим значением скорости поступления энергии в электрическом поле, которое называют реактивной мощностью и обозначают Q_C

$$Q_C = U_C I = X_C I^2 \quad (15)$$

Реактивная мощность емкостного элемента, так же как и реактивная мощность индуктивного элемента, измеряется Вольт-Ампер реактивный, сокращенно ВАр.

График мгновенной мощности приведен на рис. 8(б). В первую четверть периода направления напряжения и тока совпадают и $p > 0$, т.е. емкостной элемент потребляет энергию от источника, которая запасается в электрическом поле. Во вторую четверть периода направления напряжения и тока противоположны, $p < 0$, т.е. емкостной элемент является источником и отдает запасенную в электрическом поле энергию.

Цепь с активно-емкостной нагрузкой

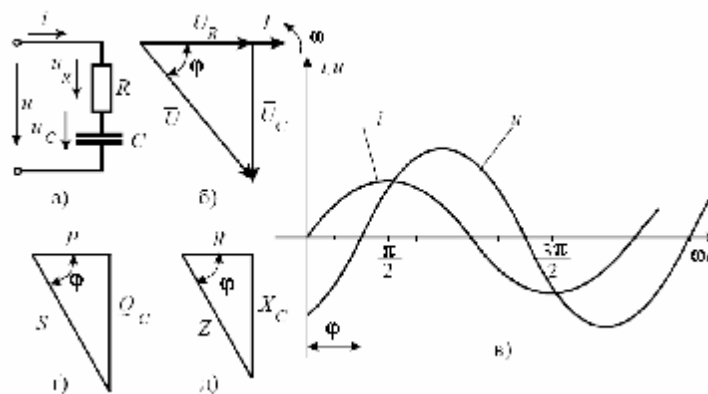


Рис. 9. Схема, временные диаграммы и треугольники напряжений, сопротивлений и мощностей цепи с активным и емкостным элементами

В этом случае уравнение напряжения цепи (рис. 9(а)) имеет вид:

$$u = u_R + u_C. \quad (16)$$

Напряжение на активном сопротивлении

$$u_R = RI_m \sin \omega t, \quad (17)$$

совпадает по фазе с током.

Напряжение на емкости

$$u_C = \frac{1}{\omega C} I_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right), \quad (18)$$

отстает по фазе на угол $\frac{\pi}{2}$.

Таким образом, напряжение, приложенное к цепи, будет равно

$$u = RI_m \sin \omega t + \frac{1}{\omega C} I_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right), \quad (19)$$

На рис. 9(б) изображена векторная диаграмма цепи R , C . Вектор напряжения \dot{U}_R совпадает с вектором тока, вектор \dot{U}_C отстает от вектора тока на угол 90° . Из диаграммы следует, что вектор напряжения, приложенного к цепи, равен геометрической сумме векторов \dot{U}_R и \dot{U}_C :

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_C, \quad (20)$$

а его величина

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2}. \quad (21)$$

Выразив U_R и U_C через ток и сопротивления, получим

$$U = \sqrt{(IR)^2 + (IX_C)^2}, \quad (22)$$

откуда

$$U = I \sqrt{R^2 + X_C^2} = IZ. \quad (23)$$

Последнее выражение представляет собой закон Ома цепи R и C :

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} = \frac{U}{Z}, \quad (24)$$

где $Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$ - полное сопротивление, Ом.

Из векторной диаграммы следует, что напряжение цепи R и C отстает по фазе от тока на угол φ и его мгновенное значение

$$u = U_m \sin(\omega t - \varphi). \quad (25)$$

Временные диаграммы u и i изображены на рис. 9(в). Разделив стороны треугольника напряжений (рис. 9(б)) на ток, получим треугольник сопротивлений (рис. 9(д)), из которого можно определить косинус угла сдвига фаз между током и напряжением:

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}. \quad (26)$$

Энергетические процессы в цепи с активным и емкостным элементами можно рассматривать как совокупность процессов, происходящих отдельно в цепи с R и с C .

Из сети непрерывно поступает активная мощность, которая выделяется в активном сопротивлении R в виде тепла. Реактивная мощность, обусловленная электрическим полем емкости C , непрерывно циркулирует между источником энергии и цепью. Ее среднее значение за период равно нулю. Умножив стороны треугольника напряжений (рис. 9(б)) на ток, получим треугольник мощностей (рис. 9(г)). Стороны треугольника мощностей представляют:

$P = U_R I = I^2 R$ - активную мощность цепи, Вт;

$Q_C = U_C I = I^2 X_C$ - реактивную (емкостную) мощность цепи, ВАр;

$S = UI = I^2 Z$ - полную мощность цепи, ВА;

$\cos \varphi = \frac{P}{S}$ - коэффициент мощности цепи.

Методика эксперимента

По закону Ома, сила переменного тока через конденсатор связана с напряжением на нем следующим отношением:

$$I_{эфф} = \frac{U_{эфф}}{\omega C} \text{ откуда } C = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{I_{эфф}}{U_{эфф}} = \frac{1}{\omega Z} \quad (27)$$

Для определения Z поступают следующим образом. Соединяют последовательно измеряемый конденсатор C , амперметр A и подключают к источнику переменного напряжения. Параллельно конденсатору присоединяют вольтметр V .

Собирают схему представленную на рис. 10.

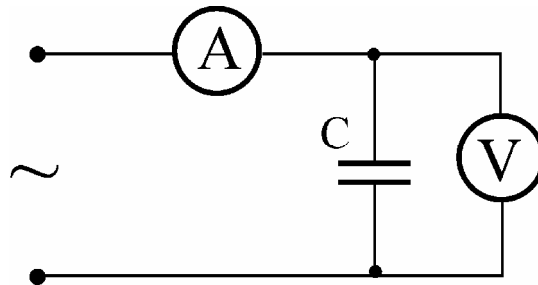


Рис. 10 .

Отсчитывают по приборам силу тока $I_{эфф}$ и напряжение $U_{эфф}$. Определив Z по формуле $Z = \frac{U_{эфф}}{I_{эфф}}$, подставляют его значение в формулу (27) и вычисляют C .

Измерения проводят для каждого конденсатора в отдельности, затем при последовательном и параллельном их соединении, проверяя тем самым формулы соединения конденсаторов.

Параллельное соединение конденсаторов $C = C_1 + C_2$.

Последовательное соединение конденсаторов $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$.

Результаты записывают в таблицу 1.

Таблица 1

	№ п/п	$I_{эфф},$ А	$U'_{эфф},$ В	$Z,$ Ом	$Z_{ср},$ Ом	$C,$ мкФ
Конденсатор 1	1					
	2					
	3					
Конденсатор 2	1					
	2					
	3					
Последовательное соединение конденсаторов	1					
	2					
	3					
Параллельное соединение конденсаторов	1					
	2					
	3					

Порядок выполнения лабораторной работы:

1. Установить сменную панель НТЦ-22.03/02 в разъем станда.

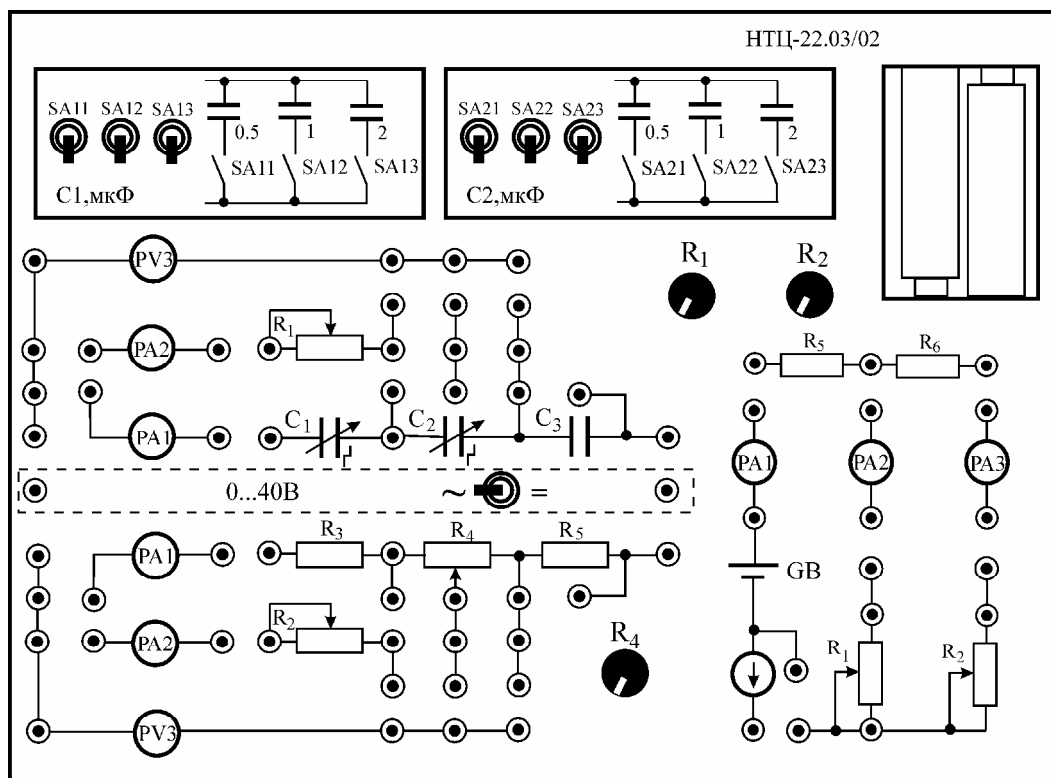


Рис. 11

2. Собрать схему, как показано на рис. 10 используя монтажную схему (рис. 11). В цепь включается мультиметр в режиме измерения напряжения (предел измерения 20 В), показания амперметра отражаются на панели стенда РА2. В цепь включить конденсатор С1 (см. приложение).
3. После проверки схемы преподавателем или лаборантом убедиться, что на панели стенда присутствуют только необходимые для проведения данного опыта переключки, все тумблеры и выключатели находятся в нижнем положении («ВЫКЛЮЧЕНО»), а все галетные переключатели и потенциометры в крайнем левом положении.
4. Включить питание стенда (три автоматических выключателя «СЕТЬ»).
5. Установите номер профиля индикации 4. Для смены профиля необходимо войти в меню выбора профилей: для этого нажать кнопку энкодера «МЕНЮ» и удерживать 2...3 секунды, пока отображаемый на индикаторе профиль не начнет мигать. После этого вращением ручки SA100 «ЗАДАНИЕ» влево/вправо установить номер профиля индикации 4 и кратковременно нажать кнопку энкодера «МЕНЮ». Выбранный профиль после этого должен отображаться на служебном индикаторе.
6. Тумблер : /= перевести в положение «: ».
7. Включить тумблер SA1. Установить галетным переключателем SA11-SA12 напряжение U. Для этого установить напряжение галетным переключателем SA11 на один поворот, в дальнейшем при изменении напряжения нужно пользоваться галетным переключателем SA12.
8. При изменении напряжения на панели стенда РА2 отражается значение тока. Показание амперметра РА2 и напряжение (показание мультиметра) на исследуемом конденсаторе занести в таблицу 1.
9. Увеличить ток в цепи трижды галетным переключателем SA12 и записать соответствующее значение напряжения на конденсаторе в таблицу 1.
10. Выключить питание стенда.
11. Также исследовать конденсатор С2. Для этого нужно изменить схему вместо конденсатора С1 включить конденсатор С2 (см. приложение).
12. Повторить п.п. 3-9.
13. Аналогично выполнить измерения емкости при последовательном и параллельном соединении исследуемых конденсаторов С1 и С2 повторяя п.п. 3-9. (см. приложение)
14. Все тумблеры и выключатели установить в нижнее положение («ВЫКЛЮЧИТЬ»), а все галетные переключатели в крайнее левое положение.
15. Выключить питание стенда, разобрать схему.
16. Рассчитать исследуемые конденсаторы по формуле (27). Определите их средние значения и погрешности измерения.
17. Используя средние значения С двух конденсаторов рассчитать по соответствующим формулам их емкость при параллельном соединении (7) и последовательном (8). Сравните данные расчетов с результатами измерений.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определения электроёмкости проводника и конденсатора. В каких единицах измеряется и от каких величин зависит ёмкость конденсатора?
2. Выведите формулу (2).
3. Как изменяются заряд и напряжение на конденсаторе при внесении диэлектрика? При изменении расстояния между обкладками? Рассмотреть случаи:
а) конденсатор подключён к источнику постоянного напряжения;
б) конденсатор отключён от источника постоянного напряжения..
7. Выведите формулы для расчёта ёмкости при последовательном и параллельном соединениях конденсаторов. Как изменяется ёмкость в соединении по сравнению с ёмкостью одного конденсатора?
8. Сравните параметры (заряд, напряжение) одного конденсатора и батареи конденсаторов, соединённых: а) последовательно; б) параллельно.
9. Запишите закон Ома для цепи R, L и для цепи R, C для действующих значений.
10. Что понимают под действующим значением тока?
11. Укажите свойства активного сопротивления в цепи синусоидального тока.
12. Укажите свойства ёмкостного сопротивления в цепи синусоидального тока.

Литература

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

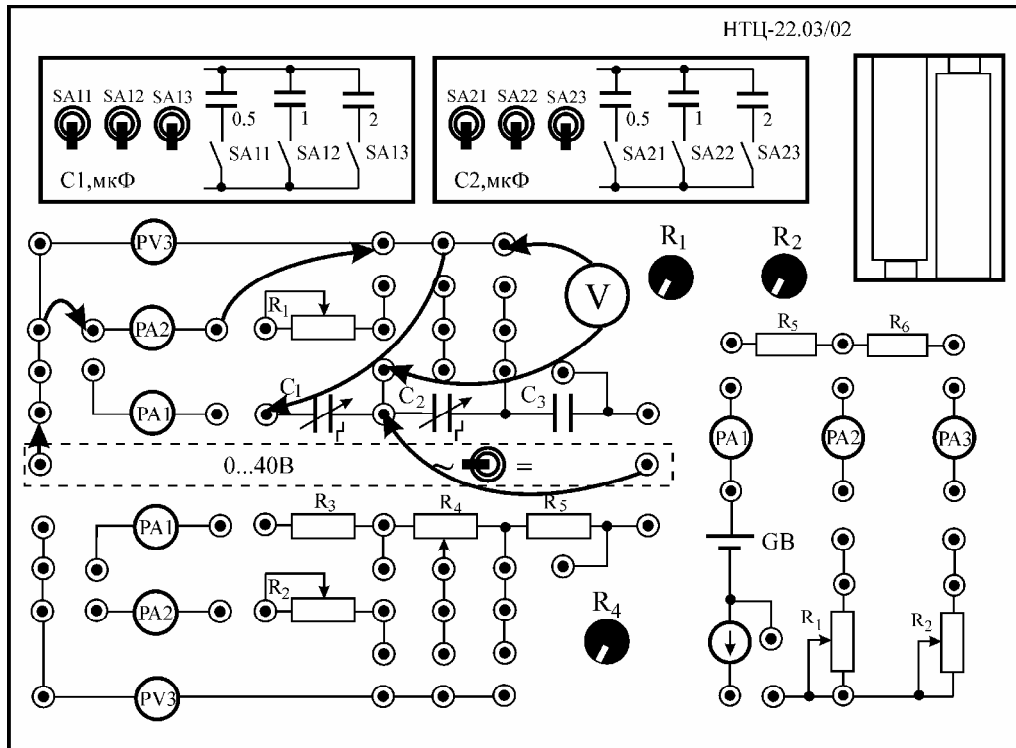
1. Калашников С.Г. Электричество. М. Физматлит, 2004. – 276 с.
2. Тамм И. Е. Основы теории электричества.- М. : Наука , 1989.- 504с.
3. А.Н. Матвеев. Электричество и магнетизм. Учеб. пособие для студ. вузов.- М. : ОНИКС 21 век: Мир и Образование , 2005.- 463с
4. Д.В. Сивухин. Общий курс физики. Электричество. : учеб. пособие для студ. физических спец. вузов- 4-е изд., стереотип.- М. : Физматлит: МФТИ , 2002.- 656с.
5. И.Е. Иродов. Электромагнетизм. Основные законы. М., ЛБЗ, 2001.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

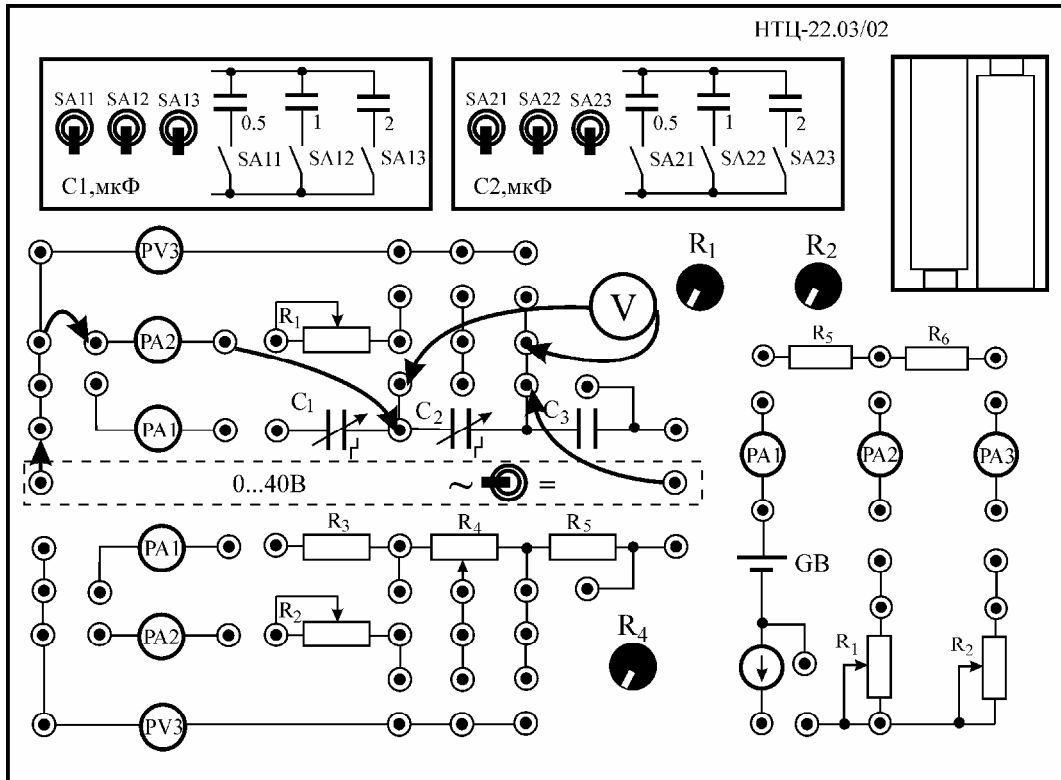
1. Савельев И.В. Общий курс физики. Т. 3. Электричество. учеб. пособие для вузов- М. : Астрель : АСТ , 2003.- 336с
2. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике, вып. 5,6. Электричество и магнетизм. М., Мир, 1966.

Приложение к лабораторной работе №5

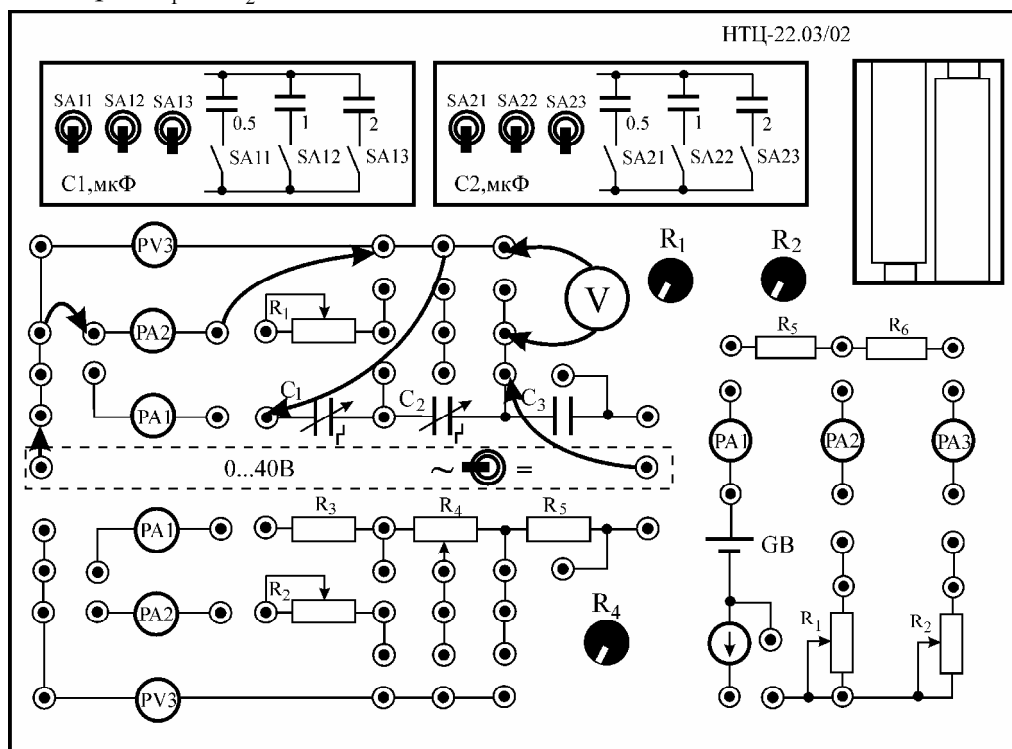
1. Схема определения неизвестного конденсатора C_1



2. Схема определения неизвестного конденсатора C_2



3 . Схема измерения емкости C' при последовательном соединении исследуемых конденсаторов C_1 и C_2



4. Схема измерения емкости C'' при параллельном соединении исследуемых конденсаторов C_1 и C_2

