Министерство образования и науки Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКА

Методические указания к лабораторной работе № 14 по физике

Екатеринбург
УрФУ
2017

УДК 537.67(076.5)

Составители: В. С. Гущин, Н. Д. Ватолина, Ю.Г.Стрелецкий

Научный редактор – канд. физ.-мат. наук, доцент Волков А.Г.

Исследование диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика : методические указания к лабораторной работе № 14 по физике/ сост. В. С. Гущин, Н. Д. Ватолина, Ю. Г. Стрелецкий, – Екатеринбург : УрФУ, 2017. – 27 с.

В методических указаниях описан механизм поляризации диэлектриков, приведены феноменологические соотношения для описания поляризационных процессов. Рассмотрены явления гистерезиса и фазового превращения. Изложен метод измерения диэлектрической проницаемости в зависимости от приложенного электрического поля и температуры. Представлены вывод расчетных формул и схемы электрических цепей. Описан порядок выполнения лабораторной работы и оформления отчета.

Указания предназначены для студентов всех специальностей всех форм обучения.

Табл. 2. Рис. 13. Прил. 2.

Подготовлено кафедрой физики

© Уральский федеральный университет, 2017

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКА

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Электрический диполь – это система, состоящая из двух электрических зарядов одинаковой величины и противоположного знака. Диполи бывают жесткими и упругими.

Диполь **жесткий**, если расстояние l между зарядами не изменяется.

Диполь **упругий**, если расстояние между зарядами с течением времени изменяется, а силы взаимодействия подчиняются закону Гука.

Векторной электрической характеристикой диполя является электрический момент диполя $\vec{p}$. Электрический момент диполя равен произведению модуля одного из зарядов на плечо диполя $\vec{l}$. Плечо диполя $\vec{l}$ – это вектор, равный по модулю расстоянию между зарядами и направленный от отрицательного заряда к положительному. Векторы дипольного электрического момента $\vec{p}$ и плеча диполя $\vec{l}$ сонаправлены ($\vec{l} \uparrow\uparrow \vec{p}$) и связаны между собой соотношением

$$\vec{p} = |q| \cdot \vec{l}. \tag{1}$$

Силовые характеристики электрического поля.

Напряженность $\vec{E}$ электрического поля – векторная физическая величина, характеризующая силовое воздействие поля на внесенный в него электрический заряд, численно равная силе действующей со стороны поля на единичный положительный заряд, внесенный в эту точку поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_+}. \tag{2}$$

Электрическое смещение $\vec{D}$ (**индукция электрического поля**) - векторная физическая величина, учитывающая электрические свойства среды. Индукция электрического поля исключает связанные заряды при расчете силовой характеристики поля. Для однородной и изотропной среды векторы напряженности $\vec{E}$ и индукции $\vec{D}$ сонаправлены. Обе характеристики являются силовыми характеристиками электрического поля. Основной считается напряженность электрического поля. Электрическое смещение определяется не только напряженностью электрического поля, но и вектором поляризации

$$\vec{D} = \vec{E} + 4\pi\vec{P}. \tag{3}$$

Здесь $\vec{P}$ – вектор поляризации, численно равный дипольному электрическому моменту единицы объема диэлектрика.

Классификация диэлектриков

Диэлектрики – это вещества, не способные проводить электрический ток. Диэлектрики делятся по механизму поляризации на четыре класса: неполярные диэлектрики; полярные диэлектрики; ионные диэлектрики и пироэлектрики, включающие в себя сегнетоэлектрики.

Любой диэлектрик состоит из молекул, которые можно рассматривать как электрические диполи, у которых положительный заряд равен суммарному заряду ядра и находится в «центре тяжести» положительных зарядов.

Отрицательный заряд диполя равен суммарному заряду электронов, помещённому в геометрический центр отрицательных зарядов.

У симметричных молекул (например, He, H_2, O_2, N_2) в отсутствие внешнего электрического поля центры тяжести положительных и отрицательных зарядов совпадают. Такие молекулы не имеют собственного дипольного электрического момента и называются **неполярными**.

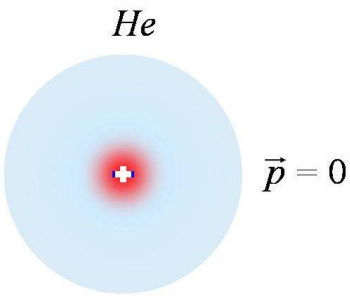


Рис.1. Атом гелия.

Под действием внешнего электрического поля заряды в неполярной молекуле смещаются друг относительно друга: положительные по направлению поля, отрицательные против поля. Молекула приобретает дипольный электрический момент $\vec{p}$, величина которого, пропорциональна напряженности внешнего электрического $\vec{E}_0$ поля.

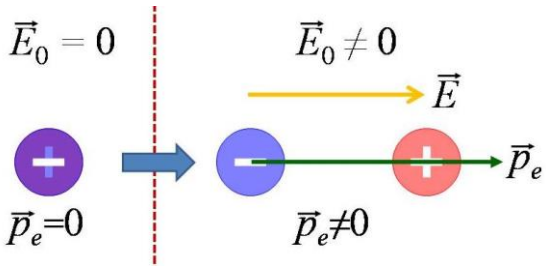


Рис.2. Возникновение электрического момента неполярной молекулы.

Коэффициент пропорциональности в формуле дипольного момента в системе единиц (СИ) равен $\beta\varepsilon_0$, где ε_0 – электрическая постоянная, а β – **поляризуемость** молекулы, характеризующая способность молекулы поляризоваться. Направления векторов $\vec{p}$ и $\vec{E}_0$ совпадают.

$$\vec{p} = \beta\varepsilon_0\vec{E}_0. \qquad (4)$$

Процесс поляризации неполярной молекулы протекает так, как если бы положительные и отрицательные заряды молекулы были связаны друг с другом **упругими** силами. Поэтому неполярная молекула ведет себя во внешнем электрическом поле как **упругий электрический диполь**.

У несимметричных молекул (например, H_2O, HCl и др.) центры тяжести зарядов разных знаков сдвинуты друг относительно друга. Молекулы обладают собственным дипольным электрическим моментом и называются **полярными**.

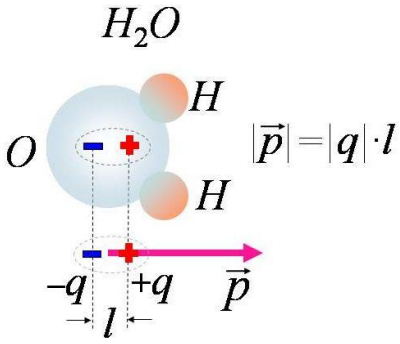


Рис.3. Электрический момент молекулы воды.

Действие внешнего электрического поля, напряженностью $\vec{E}_0$, на полярную молекулу сводится к стремлению повернуть молекулу так, чтобы её дипольный момент $\vec{p}$ установился по направлению электрического поля. На величину дипольного электрического момента несимметричной молекулы внешнее поле практически не влияет. Полярная молекула ведет себя во внешнем поле как **жесткий диполь**.

В ионных кристаллах отдельные молекулы утрачивают свою обособленность. Весь кристалл представляет собой как бы одну гигантскую молекулу. Решетку ионного кристалла можно рассматривать как две вставленные друг в друга решетки, одна из которых образована положительными, а другая отрицательными ионами.

При действии на ионы кристалла внешнего электрического поля, напряженностью $\vec{E}_0$ обе решетки сдвигаются друг относительно друга, что приводит к поляризации диэлектрика, т.е. возникновению электрического момента объема кристалла.

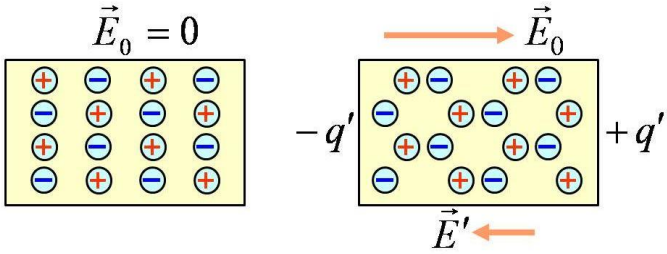


Рис.4. Поляризация ионного кристалла.

Тип молекул определяет основной механизм поляризации. Неполярным молекулам присущ **электронный** механизм поляризации. Этот механизм поляризации наблюдается во всех без исключения диэлектриках.

Полярным молекулам – **ориентационный** механизм.

Ионным кристаллам – **ионная поляризация**.

По типу молекул определяется и класс диэлектрика. Неполярные молекулы образуют неполярный диэлектрик, полярные – полярный диэлектрик.

Под действием внешнего электрического поля любой диэлектрик поляризуется. Поляризация сопровождается появлением связанных зарядов q' на поверхности диэлектрика. Результирующий дипольный момент диэлектрика становится отличным от нуля. Величиной, характеризующей степень поляризации диэлектрика, является **дипольный электрический момент единицы объема (вектор поляризации)** $\vec{P}$ диэлектрика.

Если поле или диэлектрик (или оба) неоднородны, степень поляризации в разных точках диэлектрика различна. В заданной точке вектор поляризации находится по схеме:

выделяем включающий в себя эту точку физически бесконечно малый объем δV;

суммируем электрические дипольные моменты молекул $\sum_{\Delta V} \vec{p}$, заключенные в этом объеме;

берем их отношение

$$\vec{P} = \frac{1}{\delta V} \sum_{\Delta V} \vec{p}. \qquad (5)$$

Величина $\vec{P}$ называется **вектором поляризации** диэлектрика. У изотропных диэлектриков любого типа вектор поляризации диэлектрика связан с напряженностью поля в той же точке пространства соотношением:

$$\vec{P} = \chi\varepsilon_0\vec{E}, \tag{6}$$

где $\vec{E}$ – результирующая напряженность электрического поля в диэлектрике, χ – диэлектрическая восприимчивость, не зависящая от напряженности электрического поля. Диэлектрическая восприимчивость характеризует способность диэлектрика поляризоваться.

В вакууме напряженность и индукция электрического поля связаны соотношением:

$$D = \varepsilon_0 E_0. \tag{7}$$

Напряженность электрического поля в конденсаторе связана с плотностью зарядов соотношением:

$$E_0 = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}, \tag{8}$$

где σ – поверхностная плотность зарядов на обкладках конденсатора.

Аналогичное соотношение можно записать для напряженности поля связанных зарядов:

$$E' = \frac{\sigma'}{\varepsilon_0}, \tag{9}$$

где σ' – плотность связанных зарядов.

Объединив равенства (7) и (8), получим связь индукции электрического поля и поверхностной плотности зарядов:

$$D = \sigma. \tag{10}$$

Результирующая напряженность $\vec{E}$ электрического поля в диэлектрике любого типа – это сумма электрических полей: внешнего $\vec{E}_0$ и поля индуцированных (связанных) зарядов $\vec{E}'$.

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'. \tag{11}$$

Отношение напряженности электрического поля в вакууме $\vec{E}_0$ к напряженности электрического поля в диэлектрике $\vec{E}$ называется диэлектрической проницаемостью ε, которая показывает во сколько раз внешнее поле больше поля в диэлектрике.

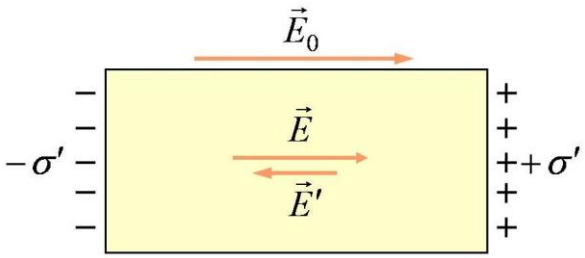


Рис. 5. Результирующее поле в диэлектрике.

Поле связанных зарядов имеет противоположное направление к внешнему полю, поэтому результирующее поле по величине всегда меньше внешнего (см. рис. 5).

У диэлектриков, построенных из полярных молекул, ориентирующему действию внешнего поля препятствует тепловое движение молекул, разбрасывающее их дипольные моменты равновероятно по всем направлениям. В результате устанавливается некоторая преимущественная ориентация дипольных моментов молекул в направлении поля.

Диэлектрическая восприимчивость χ полярных диэлектриков обратно пропорциональна абсолютной температуре (закон Кюри)

$$\chi \sim \frac{1}{T}. \qquad (12)$$

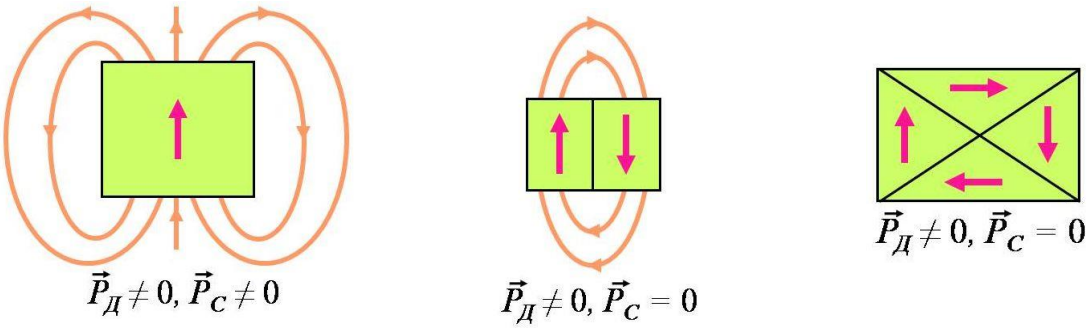
Сегнетоэлектрики

Особое место занимают кристаллические диэлектрики – сегнетоэлектрики. Сегнетоэлектрики отличаются от полярных диэлектриков тем, что в определенном интервале температур характеризуются **спонтанной (самопроизвольной) поляризацией**, существенно изменяющейся под влиянием внешних воздействий. Характерной чертой строения сегнетоэлектриков является наличие в них самопроизвольно поляризованных областей (доменов), существующих в отсутствие внешнего электрического поля. Направление спонтанной поляризации в сегнетоэлектриках может быть изменено на противоположное направление слабым электрических полем.

Сегнетоэлектрики не являются однородно поляризованными, поскольку состоят из **доменов** – областей с различными направлениями спонтанной поляризации, так что при отсутствии внешних воздействий суммарный электрический дипольный момент $\vec{P}$ образца практически равен нулю.

Механизм возникновения доменов.

Возникновение доменов с произвольной ориентаций обусловлено стремлением любой системы в состояние с минимальной энергией.



а) *б*) *в*)

Рис.6. Механизм возникновения доменов.

Представим сегнетоэлектрик в виде одного домена (см. рис. 6*а*), тогда вокруг него возникнет электрическое поле с запасенной этим полем энергией. Чтобы уменьшить объем этого поля, а, следовательно, и энергию, необходимо создать в сегнетоэлектрике вместо одного домена – два (см. рис. 6*б*), лучше три и более. Например, у сегнетоэлектрика, состоящего из четырех доменов (см. рис. 6*в*), поле отсутствует, но существует энергия взаимодействия между доменами.

$$W = -\vec{P} \cdot \vec{E}. \qquad (13)$$

Эта энергия будет меньше в том случае, если в сегнетоэлектрике возникает бесконечное множество небольших по размеру доменов.

При температуре выше T_C, называемой точкой Кюри, спонтанная поляризация исчезает, как следствие происходит разрушение доменов. Сегнетоэлектрик превращается в полярный диэлектрик.

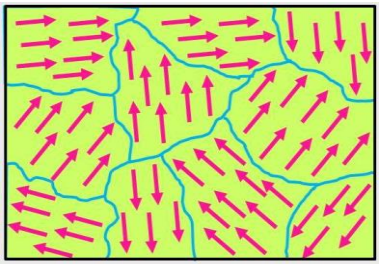


Рис.7. Доменная структура сегнетоэлектрика.

Равновесная доменная структура сегнетоэлектриков определяется балансом между уменьшением энергии электростатического взаимодействия доменов при разбиении кристалла на домены и увеличением энергии от образования новых доменных границ.

Конфигурация доменов зависит от размеров и формы образца, на неё влияет характер распределения по образцу дефектов в кристаллах, внутренних напряжений и других неоднородностей, неизбежно присутствующих в реальных кристаллах.

Наличие доменов обусловливает аномалии многих физических свойств (упругих, пьезоэлектрических, электро- и магнитооптических). Особенно ярко это проявляется в области температуры фазового перехода – точки Кюри T_C.

Свойства сегнетоэлектриков:

1. Диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков достигает нескольких тысяч единиц (у обычных диэлектриков не превышает нескольких десятков);
2. Зависимость поляризации от напряженности электрического поля – нелинейная;
3. Поляризованность $\vec{P}$ отстает от напряженности $\vec{E}_0$ внешнего электрического поля, т.е. зависит от предыстории сегнетоэлектрика. Это явление называется **гистерезисом** (от греческого «гистерезис» – запаздывание). В сильном поле происходит полная переполяризация образца.
4. Сегнетоэлектрики широко используются в технике и промышленности, в частности, при производстве электрических конденсаторов, нелинейных элементов в радиотехнике (стабилизаторы тока и напряжения), элементов логических схем, элементов памяти, излучателей и приемников звука, модуляторов света в устройствах оптико-волоконной связи.

В данной работе исследуется зависимость диэлектрической проницаемости классического сегнетоэлектрика (титаната бария $BaTiO_3$) от напряженности электрического поля и температуры.

Титанат бария имеет наиболее простую кристаллическую структуру по сравнению со всеми известными сегнетоэлектриками. Кристаллы этого соединения могут находиться в четырех кристаллических структурах (сингониях).

В неполярной фазе при температурах выше 120^0C $BaTiO_3$ имеет **кубическую структуру** типа перовскита (см. рис. 8). Такой же структурой обладает минерал перовскит $CaTiO_3$. Ввиду наличия центра симметрии титанат бария в неполярной области температур не обладает необычными электрическими свойствами.

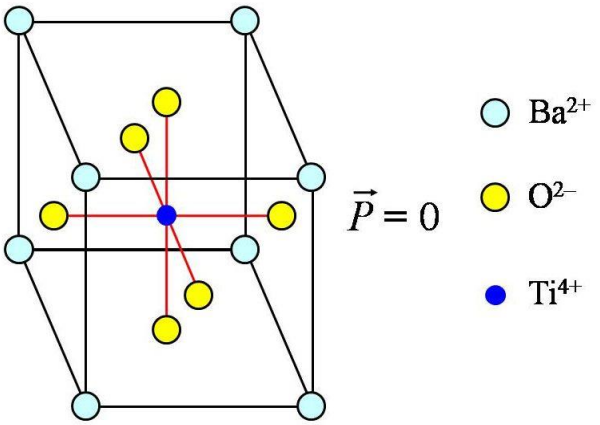


Рис. 8. Элементарная ячейка титаната бария в неполярной фазе

В полярной области температур между точкой Кюри (120^0C) и температурой (5^0C) кристаллы титаната бария имеют **тетрагональную симметрию**. Фазовый переход при температуре 120^0C сводится к тому, что одно из ребер кубической ячейки удлиняется, два других одинаково укорачиваются, переходя в тетрагональные оси (см. рис.9). Элементарная ячейка приобретает электрический момент $\vec{P}$.

Какое из ребер исходной кубической ячейки удлинится и перейдет в полярную ось – дело случая. Если в результате флуктуации возникнет какое-то удлинение, то оно определит выделенное направление, вдоль которого и будет происходить дальнейшее удлинение. Поскольку все три ребра кубической ячейки эквивалентны, каждое из них может удлиниться, т.е. перейти в полярную ось.

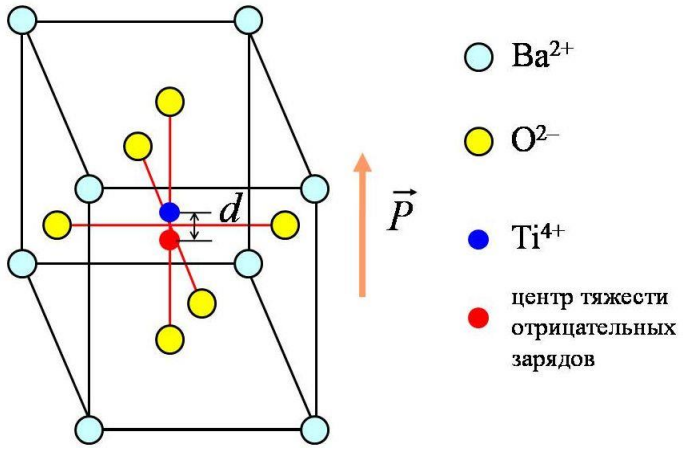


Рис.9. Элементарная ячейка титаната бария в тетрагональной фазе.

В тетрагональной фазе существует **шесть** возможных

направлений спонтанной поляризации – по два взаимно противоположных направления вдоль ребер кубической ячейки.

Ниже 5^0С титанат бария испытывает второе фазовое превращение. Возникает новая сегнетоэлектрическая фаза, устойчивая между 5 и -90^0С и обладающая **орторомбической симметрией**. Элементарная ячейка получается из исходной кубической ячейки, если её растянуть вдоль диагонали одной из граней куба и сжать вдоль другой диагонали той же грани. Число граней – шесть, число их диагоналей двенадцать, которые попарно параллельны. Поэтому в орторомбической фазе существует **двенадцать** направлений, вдоль которых может ориентироваться вектор спонтанной поляризации кристалла.

При -90^0С происходит третий фазовый переход. Кристалл становится **ромбоэдрическим** с полярной осью вдоль одной из пространственных диагоналей куба – диагоналей, соединяющих его противоположные вершины. Так как исходная кубическая ячейка содержит четыре эквивалентных пространственных диагонали и каждой диагонали соответствуют два взаимно противоположных направления спонтанной поляризации, то в ромбоэдрической фазе существует **восемь** направлений, в которых может ориентироваться вектор спонтанной поляризации.

Спонтанная поляризация P_C изменяется с температурой, обращаясь в нуль на границах полярной области. Для титаната бария при комнатной температуре она составляет P_C = 0,26 Кл/м^2. На практике используется тетрагональная фаза титаната бария.

При наложении электрического поля поляризация сегнетоэлектрика меняется. Связь между $\vec{P}$ и $\vec{E}_0$ нелинейная, так что обычное определение диэлектрической восприимчивости χ и диэлектрической проницаемости ε к сегнетоэлектрику в полярной фазе неприменимо.

Одна из характерных особенностей сегнетоэлектриков состоит в том, что значения диэлектрической проницаемости в полярной фазе аномально велики. Для титаната бария $\varepsilon_{макс}$ = 6000÷7000.

В неполярной фазе сегнетоэлектрик ведет себя как обычный диэлектрик, в котором поляризация пропорциональна полю. Однако диэлектрическая восприимчивость χ и диэлектрическая проницаемость ε изменяются с температурой. Вблизи точки Кюри имеет место закон Кюри-Вейсса

$$\chi = \frac{C}{T_0 - T}, \qquad (14)$$

где C и T_0 – постоянные, из которых T_0 называется температурой Кюри-Вейсса. Она мало отличается от температуры T_K при которой происходит фазовый переход из полярной фазы в неполярную (или обратно); этим различием обычно пренебрегают.

ВЫВОД РАСЧЕТНОЙ ФОРМУЛЫ

Поскольку лабораторная работа выполняется на переменном токе, необходимо учитывать фазовые соотношения между током и падением напряжения на отдельных элементах электрической цепи см. рис.10.

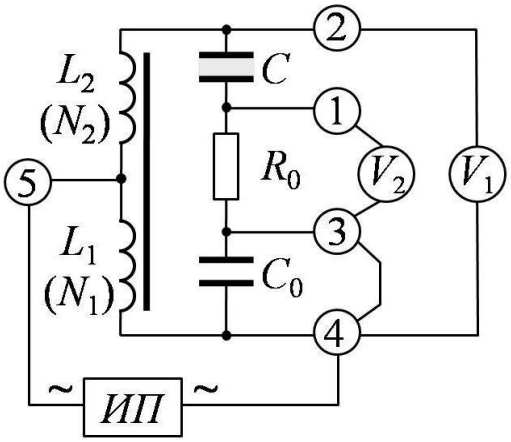


Рис.10. Электрическая схема подключения модуля «С» при выполнении первого задания.

Найдем соотношение между фазами падения напряжения на эталонном сопротивлении U_R, падением напряжения на конденсаторе U_C и входным напряжением U_1. Пусть ток в цепи подчиняется закону

$$I = I_0 \cdot cos\,\omega t. \tag{15}$$

Падение напряжения на эталонном резисторе совпадает по фазе с законом изменения тока и равно

$$U_R = R_0 \cdot I_0 \cdot cos\,\omega t. \tag{16}$$

Найдем напряжение на конденсаторе U_C, воспользовавшись известным соотношением электростатики

$$U_C = \frac{q}{C} \tag{17}$$

Заряд по определению связан с током соотношением

$$q = \int I_0 \cdot cos\,\omega t \cdot dt = \frac{1}{\omega} \cdot I_0 \cdot sin\,\omega t = \frac{1}{\omega} \cdot I_0 \cdot cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right).$$

Подставив в формулу (17) получим закон изменения падения напряжения на конденсаторе

$$U_C = \frac{I_0}{\omega C} \cdot cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right). \qquad (18)$$

Сравнивая это выражение с выражением (16), приходим к выводу, что падение напряжения на конденсаторе U_C отстает от напряжения на эталонном резисторе U_R на четверть периода (фаза U_C меньше на $\pi/2$). Построив векторную диаграмму (см. рис.12), приходим к выводу, что входное напряжение U_1 можно выразить через U_C и U_R.

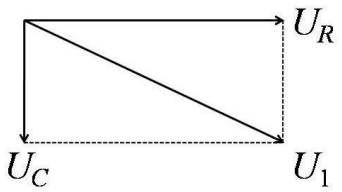


Рис. 11. Векторная диаграмма падений напряжения на отдельных элементах электрической цепи.

$$U_1^2 = U_R^2 + U_C^2$$

Из последнего равенства найдем напряжение на конденсаторе

$$U_{\tilde{N}} = \sqrt{U_1^2 - U_R^2}\ . \qquad (19)$$

По измеренным напряжениям на эталонном резисторе и входным напряжением легко найти падение напряжения на конденсаторе.

Отношение действующих напряжений равно отношению амплитудных значений, найденных из отношений выражений (16) и (18)

$$\frac{U_R}{U_C} = \omega R_0 C$$

Из этого выражения найдем электроемкость

$$C = \frac{U_R}{U_C \omega R_0} \qquad (20)$$

С другой стороны электроемкость плоского конденсатора равна

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

а диэлектрическая проницаемость с учетом выражения (20) равна

$$\varepsilon = \frac{C \cdot d}{\varepsilon_0 S} = \frac{U_R \cdot d}{U_C \cdot \omega \cdot R_0 \cdot S} \tag{21}$$

Напряженность внутри диэлектрика (в конденсаторе) равна

$$E = \frac{U_C}{d} \tag{22}$$

Подставив в формулу (20) выражение (19), получим расчетную формулу для электроемкости конденсатора

$$C = \frac{U_R}{\sqrt{U_1^2 - U_R^2} \cdot \omega \cdot R_0} \tag{23}$$

Воспользовавшись формулой (20), выразим электроемкость через напряженность электрического поля в конденсаторе (диэлектрике).

$$C = \frac{U_R}{d \cdot \omega \cdot R_0} \cdot \frac{1}{E} \tag{24}$$

Подставив выражения (23) и (24) в формулу (21), получим расчетные формулы для диэлектрической проницаемости

$$\varepsilon = \frac{U_R \cdot d}{\sqrt{U_1^2 - U_R^2} \cdot \varepsilon_0 \cdot \omega \cdot R_0 \cdot S} \tag{25}$$

и

$$\varepsilon = \frac{U_R}{\varepsilon_0 \cdot \omega \cdot R_0 \cdot S} \cdot \frac{1}{E} \tag{26}$$

Поскольку входное сопротивление вольтметра V_1 не равно бесконечности, расчетные формулы должны учитывать сопротивление вольтметра. Вольтметр и эталонный резистор параллельны, их общее сопротивление равно

$$R = \frac{R_0 \cdot R_V}{R_0 + R_V} \tag{27}$$

В расчетных формулах с учетом данного замечания необходимо заменить R_0 на R. Уточненные расчетные формулы примут вид

$$C = \frac{U_R \cdot (R_0 + R_V)}{\sqrt{U_1^2 - U_R^2} \cdot \omega \cdot R_0 \cdot R_V} \tag{28}$$

$$C = \frac{U_R \cdot (R_0 + R_V)}{d \cdot \omega \cdot R_0 \cdot R_V} \cdot \frac{1}{E} \tag{29}$$

$$\varepsilon = \frac{U_R \cdot d \cdot (R_0 + R_V)}{\sqrt{U_1^2 - U_R^2} \cdot \varepsilon_0 \cdot \omega \cdot R_0 \cdot R_V \cdot S} \tag{30}$$

$$\varepsilon = \frac{U_R \cdot (R_0 + R_V)}{\varepsilon_0 \cdot \omega \cdot R_0 \cdot R_V \cdot S} \cdot \frac{1}{E} \tag{31}$$

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Лабораторная работа выполняется на комплексе ЛТК-3, включающем в себя: измерительную систему ИСТ-2 (см. фото 1);

Фото 1. Измерительная система

и модуль сегнетоэлектрик *C*» (фото 2).

Фото. 2. Модуль «СЕГНЕТОЭЛЕКТРИК»

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучение нелинейности физических свойств сегнетоэлектрика, определение зависимости динамической диэлектрической проницаемости от напряженности электрического поля;
2. Изучение зависимости диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от температуры и определение точки Кюри.

Задание 1. Изучение зависимости диэлектрической проницаемости от напряженности электрического поля

Схема измерений приведена на рисунке 12. В задании 1 используется термоэлектрический модуль с маркировкой «С» «СЕГНЕТОЭЛЕКТРИК». Соберите электрическую схему. На модуле «С» поставьте перемычку между выводами [3] и [4], замкнув тем самым эталонный конденсатор C_0. Переменное напряжение от изолированного источника питания (на схеме обозначен ИП), подключите к первичной цепи повышающего трансформатора.

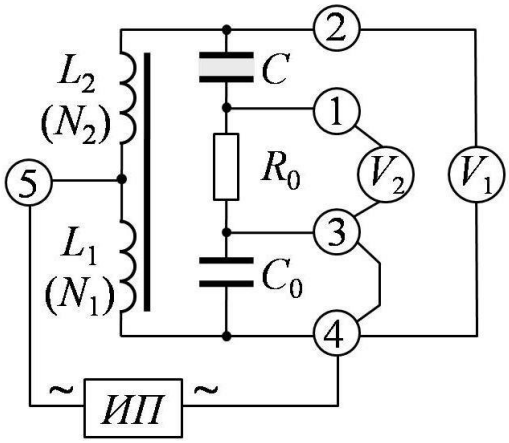


Рис.12. Электрическая схеме подключения модуля ″С″
при выполнении первого задания.

Соедините проводниками контакты [4] и [5] с выходами [–/~] и [+/~] на панели измерительной системы ИСТ-3. При таком соединении исследуемый конденсатор C будет последовательно соединен с эталонным резистором R_0 и подключен ко вторичной обмотке трансформатора. Вольтметр V_2 (мультиметр М8303-2) подключен к клеммам [1] и [3] модуля «С». Вольтметр V_2 измеряет падение напряжения на эталонном резисторе R_0.

Вольтметр V_1 (цифровой индикатор на панели ИСТ-3), подключен к клеммам [2] и [4] модуля «С». Включение вольтметра V_1 осуществляется нажатием на панели ИСТ-3 кнопки U_{BX}. Вольтметр V_1 измеряет напряжение на включенных последовательно конденсаторе C и сопротивлении R_0. Показания прибора дают действующее значение напряжения.

После сборки и проверки схемы переведите тумблер ”~/=“ в положение ”~” (верхнее положение). Включите тумблер «СЕТЬ» переводом его в верхнее положение.

Снимите зависимость падения напряжения U_R на резисторе R_0 от входного напряжения U_1 в диапазоне от 0 до 15,0 В, с шагом 1,0 В. Регулируется напряжение U_1 поворотом потенциометра «АМПЛИТУДА», расположенного на панели ИСТ-3.

Затем рассчитайте для заполнения таблицы 1 необходимые для построения графиков величины. Для этого выполните последовательно следующие пункты:

- найдите по приведенной ниже формуле напряжение на конденсаторе и занесите в третий столбец таблицы 1.

$$U_C = \sqrt{U_1^2 - U_R^2}; \tag{32}$$

- рассчитайте электроемкость конденсатора по найденному напряжению U_C и рекомендуемым данным. Полученные результаты занесите в четвертый столбец таблицы 1.

$$C = \frac{U_R}{2\pi \cdot \nu \cdot U_C \cdot R}, \tag{33}$$

где ν – частота колебаний ИП, равная 1075Гц, R – сопротивление электрической цепи, рассчитываемое по формуле

$$R = \frac{R_0 \cdot R_V}{R_0 + R_V}, \tag{34}$$

здесь R_0 =3 кОм; R_V = 50 кОм.

- По найденной электроемкости C найдите диэлектрическую проницаемость сегнетоэлектрика, используя записанную ниже формулу:

$$\varepsilon = \frac{C \cdot d}{\varepsilon_0 \cdot S}, \tag{35}$$

где S = 1,63 см^2 – площадь обкладок конденсатора, d = 0,545 мм – толщина слоя диэлектрика, $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$Ф/м.

Результаты занесите в пятый столбец таблицы 1.

- Вычислите напряженность электрического поля внутри диэлектрика по формуле

$$E = \frac{U_C}{d}. \tag{36}$$

Полученные значения занесите в таблицу 1.

По результатам измерений и расчетов, постройте зависимости электроемкости конденсатора C и диэлектрической проницаемости ε от

напряженности E электрического поля в конденсаторе – графики: $C = f(E)$ и $\varepsilon = f(E)$.

Проанализируйте полученные результаты, сравнив их с табличными значениями или теоретическими, и сделайте выводы.

Задание 2. Изучение зависимости диэлектрической проницаемости от температуры

Схема измерений приведена на рисунке 13. Повышающий трансформатор во втором задании не используется.

Модуль «С» установите на печи термостата с тепловым контактом через каплю глицерина и прижмите стержнем с пружинами. Подключите печь термостата к ИСТ-3, соединив кабель печи термостата с разъемом «ТЕРМОСТАТ» на панели ИСТ-3.

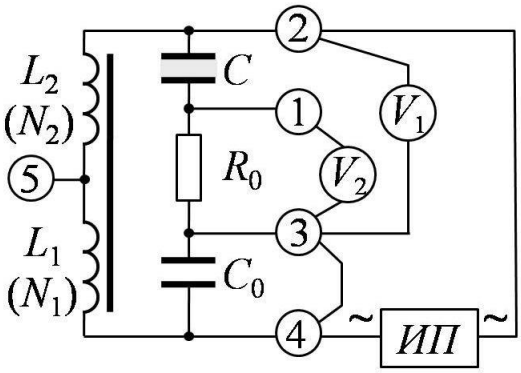


Рис.13. Электрическая схеме подключения модуля ″С″
при выполнении второго задания.

Соберите электрическую схему. Соедините выходы [–/~] и [+/~] на панели ИСТ-3 с контактами [2] и [4] модуля «С». Вольтметр V_1 (мультиметр М830В-1) подключите к выходам [2] и [3] модуля «С». Вольтметр V_1 измеряет напряжение на включенных последовательно конденсаторе C и сопротивлении R_0. Вольтметр V_2 (мультиметр М830В-2) подключите к клеммам [1] и [3]. Вольтметр V_2 измеряет падение напряжения на эталонном резисторе.

Проверьте собранную схему. Тумблер ~/= установите в положение «~» (верхнее положение). Включите ИСТ-3, переводом тумблера «СЕТЬ» в верхнее положение. Регулятором «АМПЛИТУДА» установите по вольтметру V_1 переменное напряжение U_1 около 3В (или 6В). В дальнейшем это напряжение не изменяйте. Изучите зависимость падения напряжения на резисторе R_0 – U_R, измеряемое вольтметром V_2, от температуры в диапазоне от комнатной (~20 ^{O}C) до 120 ^{O}C. Для этого последовательно выполните следующие действия:

Нажмите кнопку T_1 индикатор ИСТ-3 покажет температуру в модуле «С».

Тумблером «НАГРЕВ» включите нагрев.

Ручку потенциометра «НАГРЕВ» поверните по часовой стрелке до упора, установив тем самым максимально возможную температуру 120 °С.

Регулятор «ТЕМПЕРАТУРА» установить в положение соответствующее 40°С.

Дождитесь момента времени, в который индикатор ИСТ-3 покажет температуру 40°С.

Запишите показания индикатора (температуру в столбец 1 таблицы 2) и показания вольтметра V_2 во второй столбец таблицы 2 «ПРИЛОЖЕНИЯ».

Увеличивайте температуру модуля «С» регулятором «ТЕМПЕРАТУРА» на 10 градусов в интервалах 40÷70°С и 100÷120°С и с шагом 2°С в интервале от 70 до 100°С.

Проведите предусмотренные во втором задании измерения (заполните таблицу 2), а именно последовательно выполните вычисления:

найдите напряжение на конденсаторе по формуле (результаты занесите в столбец 3 таблицы 2). При расчетах U_1 = 3,0 В (или 6В).

$$U_C = \sqrt{U_1^2 - U_R^2}; \tag{37}$$

- рассчитайте электроемкость конденсатора по найденному напряжению U_C и рекомендуемым данным (результаты занесите в 4 столбец таблицы 2)

$$C = \frac{U_R}{2\pi \cdot \nu \cdot U_C \cdot R}, \tag{38}$$

где ν – частота колебаний ИП, равная 1075Гц, R – сопротивление электрической цепи, рассчитываемое по формуле

$$R = \frac{R_0 \cdot R_V}{R_0 + R_V}, \tag{39}$$

здесь R_0 =2,91 кОм; R_V = 50 кОм.

- найдите диэлектрическую проницаемость, используя формулу для электроемкости конденсатора C: (результаты занесите в столбец 5 таблицы 2)

$$\varepsilon = \frac{C \cdot d}{\varepsilon_0 \cdot S}, \tag{40}$$

где S = 1,63 см^2 – площадь обкладок конденсатора, d = 0,545 мм – толщина слоя диэлектрика, $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$Ф/м.

Постройте график зависимости диэлектрической проницаемости от температуры – график $\varepsilon = f(T)$. По графику определите точку Кюри T_C – температуру, при которой диэлектрическая проницаемость ε максимальна.

Проанализируйте полученные результаты, сравнив их с табличными или теоретическими и сделайте выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Сформулируйте цель работы.
2. Что такое электрический диполь? Чему равен электрический момент диполя $p_Э$? Какое направление имеет электрический момент диполя?
3. Дайте определение вектора поляризации?
4. Что характеризует диэлектрическая восприимчивость χ вещества?
5. Каков физический смысл диэлектрической проницаемости ε веществ?
6. В чем различие между полярной и неполярной молекулами? Назовите известные Вам классы диэлектриков.
7. Опишите механизм поляризации неполярных, полярных и ионных диэлектриков.
8. Какой закон описывает температурную зависимость диэлектрической восприимчивости полярных диэлектриков?
9. Какие вещества называются сегнетоэлектриками? Чем обусловлены высокие значения диэлектрической проницаемости сегнетоэлектриков?
10. Что представляют собой сегнетоэлектрические домены? Опишите механизм поляризации сегнетоэлектриков.
11. Что такое и чем обусловлен сегнетоэлектрический гистерезис?
12. Опишите температурную зависимость основных свойств сегнетоэлектриков. Какую температуру для сегнетоэлектриков называют температурой Кюри?
13. Что происходит со структурой титаната бария при нагреве выше точки Кюри?
14. Как определяется напряжение на конденсаторе в данной работе?
15. Как определяется электрическое смещение? Что характеризует электрическое смещение?

Литература

1. Рабе К.М. Физика сегнетоэлектриков. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. — ISBN 978-5-9963-2535-1.
2. Валишев М.Г., Повзнер А.А. Физика : учебное пособие. СПб : Издательство «Лань», 2010. 576 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ I

ПРИМЕР ОТВЕТА НА ТЕСТ

0.1. К основным свойствам сегнетоэлектрика относятся:

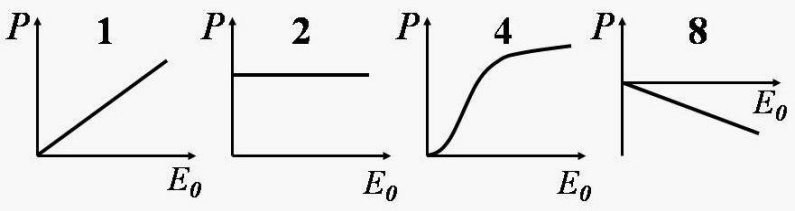
1) способность сильно поляризоваться во внешних полях;
2) наличие диэлектрического гистерезиса;
4) наличие температуры Кюри;
8) нелинейная зависимость поляризации от внешнего поля.

Укажите сумму номеров правильных утверждений.

Наличие в сегнетоэлектриках доменов с самопроизвольной поляризацией, сопровождается нелинейной зависимостью диэлектрических свойств, а именно: сильно поляризоваться во внешних полях; зависимость диэлектрических свойств от предыстории (в каком поле предварительно находился сегнетоэлектрик); нагрев разрушает домены, а следовательно в сегнетоэлектрике происходит фазовый переход, который происходит при определенной температуре, называемой температурой Кюри и наконец, процесс изменения доменной структуры происходит нелинейно и необратимо во внешнем поле. Таким образом, все указанные в вопросе свойства относятся к сегнетоэлектрику.

Ответ – 15.

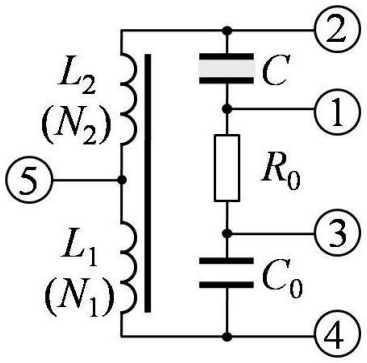
0.2. На рисунке приведены зависимости поляризации P от величины внешнего поля E_0 для различных веществ. Укажите номер зависимости, соответствующей сегнетоэлектрику.



Во внешнем поле при его росте происходит непропорциональный рост доменов с благоприятной ориентацией. После превращения сегнетоэлектрика в один домен дальнейшая поляризация происходит по электронному типу, т.е. линейно. Таким образом, правильный рисунок под номером 4.

Ответ: 4

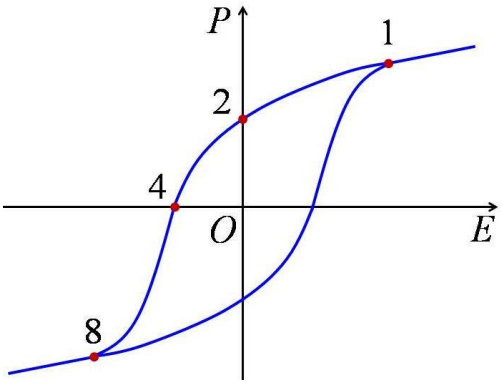
0.3. На рисунке представлена схема электрической цепи модуля «С» «СЕГНЕТОЭЛЕКТРИК». К каким контактам необходимо подключить источник питания «ИП» при выполнении первого задания? Укажите сумму их номеров.



При выполнении первого задания необходимо получить зависимость диэлектрической проницаемости от напряженности внешнего поля. Это возможно, если внешний источник подключен к клеммам 4 и 5, тогда напряжение преобразуется трансформатором и подается на последовательно соединенные эталонное сопротивление R_0 и исследуемый конденсатор C.

Ответ: 4+5=9

0.4. На рисунке приведена петля гистерезиса сегнетоэлектрика. Укажите, какой цифрой обозначена на рисунке остаточная поляризация в образце.



Свойства сегнетоэлектрика зависят от предыстории. Пусть в исходном состоянии сегнетоэлектрик находился в точке 1. Уменьшая напряженность внешнего электрического поля сопровождается уменьшением поляризации, которая отстает от напряженности внешнего поля. Достигнув точки 2 напряженность внешнего поля равна нулю, а поляризация сегнетоэлектрика нет. Поляризация в точке 2 называется остаточной поляризацией.

Ответ: 2

0.5. Вам предстоит определить диэлектрическую проницаемость сегнетоэлектрика, используя формулу:
В неё входят величины:

$$\varepsilon = \frac{U_R \cdot d}{\sqrt{U_1^2 - U_R^2} \cdot \varepsilon_0 \cdot \omega \cdot R_0 \cdot S}$$

1) U_R 2) U_1 4) ω 8) S

Какие величины определяются Вами в результате прямых измерений. Укажите сумму их номеров.

При получении зависимости диэлектрической проницаемости от напряженности внешнего поля необходимо измерить падение напряжения на эталонном сопротивлении и исследуемом конденсаторе, т.е. напряжение U_R и U_1.

Ответ: 1+2=3

ПРИЛОЖЕНИЕ II

ФОРМА ОТЧЕТА

Министерство образования и науки Российской Федерации
«Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

Кафедра физики

О Т Ч Е Т

по лабораторной работе № 14

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКА

Студент(-ка)_____

Группа_____

Дата_____

Преподаватель_____

1. Расчетные формулы

Напряжение на конденсаторе

$$U_C = \sqrt{U_1^2 - U_R^2}\ . \qquad (1)$$

Электроемкость конденсатора через измеряемые величины и напряженность электрического поля, соответственно

$$C = \frac{U_R \cdot (R_0 + R_V)}{\sqrt{U_1^2 - U_R^2} \cdot \omega \cdot R_0 \cdot R_V} \qquad (2)$$

$$C = \frac{U_R \cdot (R_0 + R_V)}{d \cdot \omega \cdot R_0 \cdot R_V} \cdot \frac{1}{E} \qquad (3)$$

Диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрика через измеряемые величины и напряженность электрического поля соответственно

$$\varepsilon = \frac{U_R \cdot d \cdot (R_0 + R_V)}{\sqrt{U_1^2 - U_R^2} \cdot \varepsilon_0 \cdot \omega \cdot R_0 \cdot R_V \cdot S} \qquad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{U_R \cdot (R_0 + R_V)}{\varepsilon_0 \cdot \omega \cdot R_0 \cdot R_V \cdot S} \cdot \frac{1}{E} \qquad (5)$$

Напряженность электрического поля в сегнетоэлектрике (конденсаторе)

$$E = \frac{U_C}{d}. \qquad (6)$$

где U_1 – _____;

U_R – _____;

C – _____;

ν – _____;

d – _____;

ε – _____;

$\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м– _____;

S – _____;

E – _____.

2. Средства измерения и их характеристики

Наименование средства измерения	Предел измерений	Цена деления шкалы	Класс точности, δ	Предел основной погрешности, $\theta_{осн}$
Вольтметр 1			–	–
Вольтметр 2			–	–
Вольтметр			–	–
Источник питания			–	–
Вариконд ВК-2			–	–
Термометр			–	–

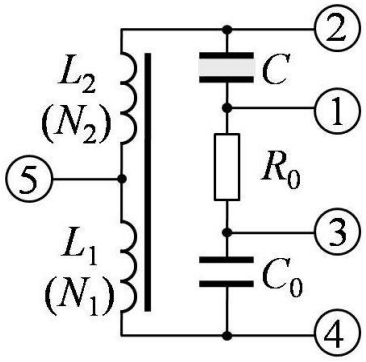
Рекомендуемые данные для расчетов:

d = (0,545 ± 0,002) мм; S = (1,63 ± 0,01) см^2;

C_0 = (0,093 ± 0,009) мкФ

R_0 = 2910 ± 10 Ом; R_V = 50000 ± 100 Ом;

4. Электрическая схема модуля расширения "С" (СЕГНЕТОЭЛЕКТРИК)



L_1 (N_1) – первичная обмотка повышающего трансформатора,

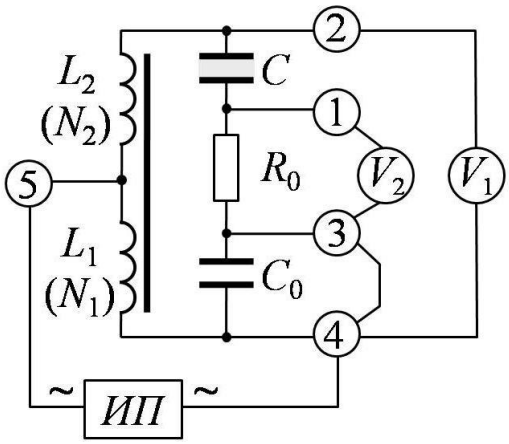
L_2 (N_2) – вторичная обмотка повышающего трансформатора,

R_0 – эталонное резистор,

C_0 – эталонный конденсатор,

C – исследуемый конденсатор (вариконд).

5. Электрическая схема при выполнении задания 1



ИП – _____.

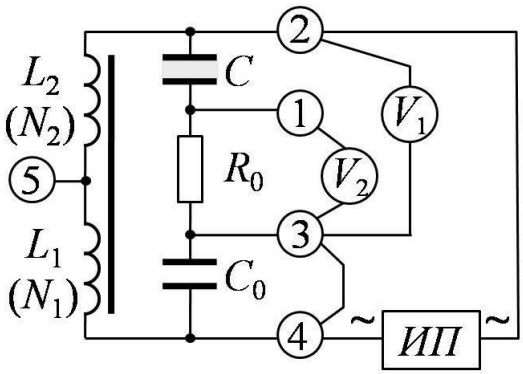
V_1 – _____

_____,

V_2 – _____

_____.

6. Электрическая схема при выполнении задания 2



Внешний источник подключен иначе.

Трансформатор не используется.

V_1 – _____,

_____

_____

7. Результаты измерений

Задание 1.

Таблица 1. Зависимость диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от напряжения

U_1, В	U_R, В	U_C, В	C, Ф	ε,	E, В/м

Постройте графики зависимости электроемкости $C = f(E)$ и диэлектрической проницаемости $\varepsilon = f(E)$ от напряженности электрического поля в конденсаторе.

ВЫВОДЫ:

Задание 2.

Таблица 2. Зависимость диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от температуры

T, °C	U_R, В	U_C, В	C, Ф	ε

Проведите расчеты U_1, C и ε по формулам соответственно (1), (2) и (4).

Постройте график зависимости диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от температуры $\varepsilon = f(T)$. По графику определить точку Кюри (температуру фазового перехода T_C). Температура Кюри соответствует максимальному значению ε.

ВЫВОДЫ: