

ДИЭЛЕКТРИКИ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Теоретические замечания

Диэлектрическая проницаемость относится к одной из основных макроскопических характеристик диэлектриков. Эта величина характеризует влияние среды на электрическое поле и зависит как от свойств атомов, молекул или ионов, входящих в состав вещества, так и от его строения.

Все вещества в природе содержат положительные и отрицательные заряды. Если тело не заряжено, то положительные и отрицательные заряды, входящие в его состав, скомпен-

пенсированы (суммарный заряд равен нулю). Вещества, в которых имеются заряды, слабо связанные друг с другом и способные перемещаться под действием электрического поля на большие расстояния (вещества со свободными зарядами), относят к проводникам. Вещества, в которых заряды не являются свободными и могут смещаться под действием электрического поля из своих положений равновесия лишь на малые расстояния, порядка атомных, относят к диэлектрикам.

Деление веществ на проводники и диэлектрики весьма условно. В реальных диэлектриках имеется небольшое количество свободных зарядов. Следовательно, диэлектрики, как и проводники, способны проводить электрический ток, но их электропроводность крайне мала. Принято считать, что вещества с удельной электропроводностью менее 10^{-7} — 10^{-8} Ом/м относятся к диэлектрикам. К проводникам относят вещества с удельной электропроводностью более 10^7 Ом/м. Промежуточное положение занимают вещества, называемые полупроводниками. Электропроводность не является характерной чертой диэлектриков и, зачастую, ею можно пренебречь (идеальный диэлектрик).

Следует также отметить, что одни и те же вещества в зависимости от условий могут вести себя и как диэлектрики, и как проводники. Например, стекла, являющиеся при обычных условиях диэлектриками, при высоких температурах становятся проводниками, а металлы при высоких температурах переходят в газообразное состояние и превращаются в диэлектрики.

Впервые понятие «диэлектрик» ввел в 1839 г. М. Фарадей. Он назвал диэлектриком «вещество, сквозь или поперек которого действуют электрические силы». Это формальное определение не потеряло смысла и с современной точки зрения. В проводнике, помещенном в электрическое поле, заряды свободно перемещаются и спустя очень малый промежуток времени сосредотачиваются на поверхности проводника таким образом, что возникает обратное поле, полностью компенсирующее внешнее. В диэлектрике заряды не могут перемещаться на большие расстояния и не способны создать обратное поле, полностью компенсирующее внешнее электрическое поле. Напряженность макроскопического поля в диэлектрике отлична от нуля.

Говоря о поле в диэлектрике, мы имеем в виду не микроскопическое поле, создаваемое находящимися в непрерыв-

ном движении электронами и ядрами, а результат его усреднения по «физически бесконечно малому объему», т. е. по объему, который достаточно мал по сравнению с макроскопическими неоднородностями среды и поля и в то же время его размеры значительно больше расстояния между молекулами среды.

Под действием приложенного электрического поля положительные и отрицательные заряды в диэлектрике смещаются в разные стороны — происходит поляризация диэлектрика. За счет поляризации на границах диэлектрика, а если диэлектрик неоднороден, то и внутри появляются нескомпенсированные заряды, которые называют поляризационными или связанными. Существует несколько механизмов поляризации диэлектриков.

Внешнее электрическое поле может привести к деформации электронной оболочки молекулы, в результате чего «центры тяжести» положительных и отрицательных зарядов смещаются. Собственное электрическое поле деформированной молекулы на достаточном удалении от нее похоже на поле электрического диполя. Так называют совокупность двух точечных зарядов $+q$ и $-q$, сдвинутых друг относительно друга на некоторое расстояние l . Таким образом, молекула представляется эквивалентным диполем, точечные заряды которого находятся в «центрах тяжести» соответственно положительных и отрицательных зарядов молекулы.

Электрическое поле диполя определяется его дипольным моментом. По определению дипольным моментом системы зарядов q_i называют величину

$$\bar{P} = \sum_i q_i \bar{r}_i,$$

где $\bar{r}_i$ — радиус-вектор i -го заряда системы относительно некоторого начала координат. Если система в целом нейтральна ($\sum_i q = 0$), то значение дипольного момента не зависит от выбора системы координат. Для электрического диполя дипольный момент равен

$$\bar{P} = q\bar{r}_1 - q\bar{r}_2 = q\bar{l},$$

где $\bar{l}$ — вектор, проведенный от отрицательного к положительному заряду. Векторы моментов диполей ориентируются по направлению внешнего электрического поля $\vec{E}_0$, т. е. положительно заряженными концами в направлении вектора $\vec{E}_0$. Сориентированные диполи создают на границах диэлектрика по-

ляризационные заряды, которые с макроскопической точки зрения можно характеризовать поверхностной плотностью σ_p . Если диэлектрик однородный, т. е. все молекулы имеют одинаковые дипольные моменты, то внутри диэлектрика положительные и отрицательные заряды концов диполей взаимно компенсируются. В неоднородном диэлектрике такой компенсации нет и могут появиться объемные поляризационные заряды. Поляризация, при которой происходит смещение электронных оболочек относительно тяжелых и неподвижных ядер, называется электронной или поляризацией смещения. Так как все вещества в конечном счете состоят из атомов (ионов), то электронная поляризация в той или иной мере проявляется у всех диэлектриков. Однако возможны случаи, когда другие виды поляризации проявляются значительно сильнее, чем электронная.

При рассмотрении поляризации смещения мы предполагали, что диэлектрик состоит из симметричных молекул, у которых «центры тяжести» положительных и отрицательных зарядов в отсутствие внешнего электрического поля совпадают. Существуют диэлектрики (например, вода), молекулы которых при отсутствии внешнего электрического поля являются диполями. Такие молекулы, обладающие собственным дипольным моментом, называют полярными. Если диэлектрик находится вне электрического поля, то диполи ориентированы хаотически. Но во внешнем электрическом поле происходит преимущественная ориентация диполей вдоль силовых линий поля, что и ведет к поляризации диэлектрика. Этот механизм поляризации называется дипольным или ориентационным. Существует еще ионная поляризация, характерная для твердых диэлектриков с ионной кристаллической решеткой. В таких диэлектриках молекулы утрачивают свою индивидуальность. Кристалл представляется единой молекулой, состоящей из двух решеток, каждая из которых образована ионами одного знака и которые вдвинуты одна в другую. Во внешнем электрическом поле решетки положительных и отрицательных ионов смещаются в разные стороны, что приводит к появлению поляризационных зарядов.

Вышеизложенное позволяет определить поляризацию диэлектрика как состояние, характеризуемое наличием дипольного момента у любого элемента его объема. С макроскопической точки зрения поляризация диэлектрика ведет к появлению на его поверхности связанных зарядов. Эти заряды

создают обратное поле, уменьшающее внешнее электрическое поле.

Для количественного описания поляризации используют вектор поляризации $\vec{P}$, равный дипольному моменту единицы объема диэлектрика. Если в единице объема находится N одинаково сориентированных диполей, с дипольными моментами $\vec{p}$, то

$$\vec{P} = N \vec{p} = Nql.$$

Вектор поляризации $\vec{P}$, как видно из его определения, является функцией вектора напряженности $\vec{E}$ электрического поля в диэлектрике. Из опыта следует, что для широкого круга изотропных диэлектриков связь между $\vec{P}$ и $\vec{E}$ линейная. Так как размерность $\vec{P}$ равна $[q]L^{-2}$ и в системе единиц СИ совпадает с размерностью $\epsilon_0 \vec{E}$ (ϵ_0 — электрическая постоянная), то линейную связь между векторами $\vec{P}$ и $\vec{E}$ удобно представить в виде

$$\vec{P} = \chi \epsilon_0 \vec{E}, \quad (1)$$

где χ — безразмерная величина, называемая диэлектрической восприимчивостью и характеризующая индивидуальные свойства диэлектриков.

Величина вектора поляризации связана с плотностью поляризационных зарядов. Ограничившись рассмотрением лишь изотропных и однородных диэлектриков, найдем связь $\vec{P}$ с поверхностной плотностью поляризационных зарядов σ_n . Для этого обратимся к рис. 1, где изображена пластинка из диэлектрика, помещенная в однородное электрическое поле. Вектор напряженности внешнего поля $\vec{E}_0$ ортогонален поверхностям пластинки. Поляризационные заряды на верхней и нижней поверхностях образуются соответственно положи-

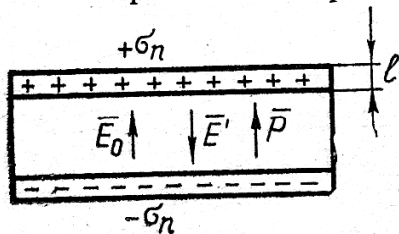


Рис. 1

тельными и отрицательными зарядами сориентированных диполей. Их число N_1 равно произведению концентрации диполей N на площадь пластин S и на величину смещения зарядов диполей l . Тогда поверхностная плотность поляризационного заряда равна:

$$\sigma_n = (qN_1)/S = qNl = P. \quad (2)$$

При произвольной ориентации диэлектрика в электрическом

поле поверхностная плотность поляризационных зарядов равна величине проекции вектора поляризации на нормаль к поверхности диэлектрика:

$$\sigma_{\pi} = P_n = (\vec{P}\vec{n}).$$

Рассмотрим электрическое поле внутри диэлектрика $\vec{E}$. Оно определяется суперпозицией внешнего поля $\vec{E}_0$ и поля поляризационных зарядов $\vec{E}'$:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'. \quad (3)$$

Для случая, изображенного на рис. 1, определить величину поля поляризационных зарядов несложно. Известно, что две разноименно заряженные плоскости с поверхностной плотностью заряда σ_{π} создают между собой однородное поле напряженностью

$$E' = \sigma_{\pi}/\varepsilon_0. \quad (4)$$

Из (2), (3) и (4), учитывая, что вектора $\vec{E}_0$ и $\vec{E}'$ направлены вдоль одной прямой в различные стороны, находим

$$E = E_0 - P/\varepsilon_0. \quad (5)$$

Принимая во внимание (1), из (5) получаем

$$E = E_0/1 + \kappa = E_0/\varepsilon$$

или в векторной форме

$$\vec{E} = \vec{E}_0/\varepsilon. \quad (6)$$

Новая безразмерная величина $\varepsilon = 1 + \kappa$ называется диэлектрической проницаемостью и является, как и κ , индивидуальной характеристикой диэлектриков.

Приведенные соотношения получены для частного случая (диэлектрик между обкладками плоского идеального конденсатора), тем не менее они носят общий характер при сделанных основных предположениях. Еще раз подчеркнем, что рассматривался лишь однородный, изотропный диэлектрик при наличии линейной связи между вектором поляризации и усредненной напряженностью электрического поля. И хотя этот случай широко распространен и практически важен, необходимо помнить, что существуют диэлектрики, для которых эти условия не выполняются (сегнетоэлектрики, электроеты). Следует обратить внимание также на то, что приведенные соотношения получены при совпадении поверхности диэлектрика с эквипотенциальными поверхностями внешнего поля. Только в этом случае или при допущении, что диэлек-

трик бесконечен, справедливо соотношение (6). Так, например, пусть внешнее поле $\vec{E}_0$ в некоторой точке A создается точечным зарядом q (рис. 2, а). Заполним пространство, включающее точку A , средой с диэлектрической проницаемостью ϵ . Если диэлектрик бесконечен (рис. 2, б) или заполняет объем, ограниченный эквипотенциальными поверхностями внешнего поля (рис. 2, в и г), то соотношение (6) выполняется.

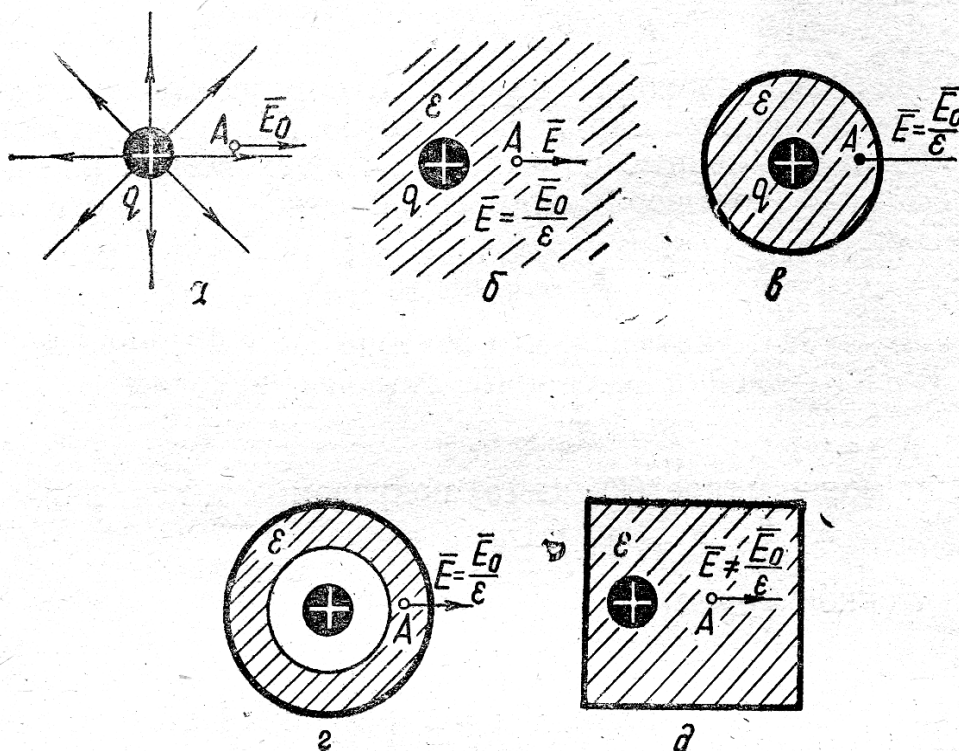


Рис. 2

ся. Если диэлектрик имеет форму, показанную на рис. 2, д, то напряженность поля в точке A при наличии диэлектрика не может быть определена по формуле (6). В этом случае поляризационные заряды на поверхности диэлектрика искажают внешнее поле так, что вектора $\vec{E}$ и $\vec{E}_0$ не совпадают по направлению.

Таким образом, диэлектрическую проницаемость ϵ можно определить как отношение напряженности электрического поля в вакууме к напряженности макроскопического поля в однородном изотропном диэлектрике, который заполняет объем, ограниченный эквипотенциальными поверхностями поля в вакууме.

Согласно (6) напряженность поля внутри диэлектрика меньше напряженности внешнего поля. Следовательно, если заполнить однородным диэлектриком пространство между пластинами идеального конденсатора емкостью C_0 , то при неизменном заряде q на его пластинах разность потенциалов пластин V уменьшится и станет равной

$$V' = E \cdot d = E_0 d / \epsilon = V / \epsilon.$$

В результате емкость конденсатора увеличится до величины

$$C' = q / V' = \epsilon q / V = \epsilon C_0.$$

Таким образом, емкость конденсатора, напряженность поля и разность потенциалов при заполнении конденсатора диэлектриком меняются в ϵ раз. Более того, в ϵ раз изменяется емкость, напряженность поля и разности потенциалов для любой системы проводников произвольной формы, расположенных как угодно, при полном их погружении в однородный изотропный диэлектрик. При этом предполагается, что диэлектрик бесконечен или имеет специальную форму границ (рис. 2).

Электрическое поле $\vec{E}$ в диэлектрике зависит не только от источников внешнего поля (от сторонних зарядов), но и от поляризационных зарядов, которые в свою очередь определяются через $\vec{E}$. Это обстоятельство существенно затрудняет расчет вектора $\vec{E}$. Для характеристики электрического поля в диэлектрике удобно ввести вспомогательный вектор, который зависел бы лишь от сторонних зарядов. Таким вектором (доказательство можно найти в указанной ниже литературе) является электрическая индукция, определяемая соотношением

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}. \quad (7)$$

Из (1) и (7) находим

$$\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}.$$

Следовательно, диэлектрическая проницаемость определяет связь между векторами электрической индукции и напряженности поля в однородном изотропном диэлектрике.

Если поместить диэлектрик в электрическое поле, которое меняется во времени, то вслед за полем будет изменяться и поляризация диэлектрика. Однако процессы смещения и ориентации частиц в диэлектрике протекают хотя и за малое, но конечное время τ (так, например, для электронной поляризации, как правило, $\tau \sim 10^{-14} - 10^{-15}$ с). Если $\tau \ll T$ (T — период колебаний электрического поля), то поляризация диэлектрика происходит так же, как и в постоянном поле,—

частицы полностью успевают следовать за изменением поля. При $\tau \gg T$, когда частота колебаний электрического поля очень велика, частицы диэлектрика практически не успевают сместиться или повернуться вслед за полем, и поляризация не наблюдается. Если период колебаний поля сравним с характерным временем тех движений частиц, которые определяют поляризацию диэлектрика, то диэлектрическая проницаемость является функцией частоты электрического поля (дисперсия). С ростом частоты величина ϵ у многих диэлектриков существенно изменяется.

Можно указать три способа (принципа) измерения диэлектрической проницаемости вещества:

- 1) по изменению емкости конденсатора при заполнении его диэлектриком;
- 2) по изменению силы взаимодействия зарядов в веществе по сравнению с вакуумом (например, измеряя силу притяжения пластин конденсатора в жидком или газообразном диэлектриках);
- 3) по изменению скорости распространения электромагнитных волн в диэлектрике по сравнению с вакуумом.

Рассмотрим лишь методы измерения, основанные на первом принципе (второй способ не нашел широкого применения, а третий распространен при измерении на сверхвысоких частотах).

Выбор метода измерения диэлектрической проницаемости вещества определяется диапазоном частот, в пределах которого производятся измерения.

1. В постоянном поле или на очень низких частотах (десятые доли герц) используется схема с баллистическим гальванометром (рис. 3). В положении 1 переключателя *Пр* конденсатор *С* заряжают до разности потенциалов на обкладках, равной ЭДС батареи. Затем, переключая *Пр* в положение 2, разряжают конденсатор через баллистический гальванометр *Г*. Показания гальванометра пропорциональны протекающему через него заряду *q*. После заполнения конденсатора исследуемым диэлектриком повторяют измерения. Считая, что ЭДС батареи за время опыта не меняется, величину диэлектрической проницаемости определяют по выражению

$$\epsilon = C_{\epsilon} / C = q_{\epsilon} / q,$$

где C_{ϵ} и q_{ϵ} — емкость и заряд конденсатора, заполненного диэлектриком, а C и q — соответствующие величины для пустого конденсатора.

2. В области частот от десятых долей герц до 10^7 Гц для измерения емкостей пустого конденсатора и заполненного диэлектриком используются мостиковые схемы, описание которых приведено в лабораторной работе № 20.

3. На высоких частотах (10^5 — 10^8 Гц) широко используются резонансные методы измерения, идея которых заключается в следующем. Колебательный контур, образованный катушкой с постоянной индуктивностью L и двумя конденсаторами (проградуированным образцовым конденсатором переменной емкости $C_{об}$ и пробным воздушным конденсатором C), настраивается на частоту внешнего генератора электромагнитных колебаний (рис. 4). Резонанс наблюдается при равенстве собственной частоты контура $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ частоте генератора ω . Его добиваются подстройкой конденсатора $C_{об}$ и фиксируют по максимуму показаний чувствительного вольтметра. При введении исследуемого диэлектрика в пробный конденсатор его емкость увеличивается в ϵ раз, поэтому

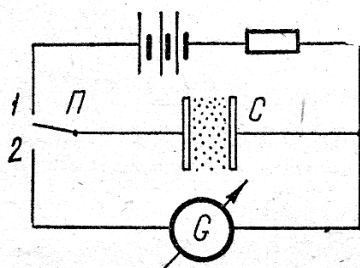


Рис. 3

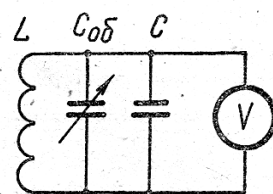
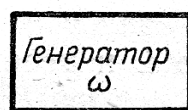


Рис. 4

для настройки в резонанс приходится уменьшить в ϵ раз емкость образцового конденсатора. Величина диэлектрической проницаемости определяется с помощью шкалы образцового конденсатора.

Экспериментальная часть

Целью настоящей работы является измерение диэлектрической проницаемости жидкости резонансным методом. Конструктивно установка выполнена в виде двух блоков, схемы которых приведены на рис. 5. Источником электромагнитных колебаний фиксированной частоты (блок а) является ламповый генератор. Принцип действия такого генератора описан в лабораторной работе № 16. Генератор закрыт корпусом,

прозрачным для электромагнитных волн, излучаемых его колебательным контуром. Питание лампового генератора осуществляется от специального источника, который смонтирован на той же плате и включается в сеть переменного

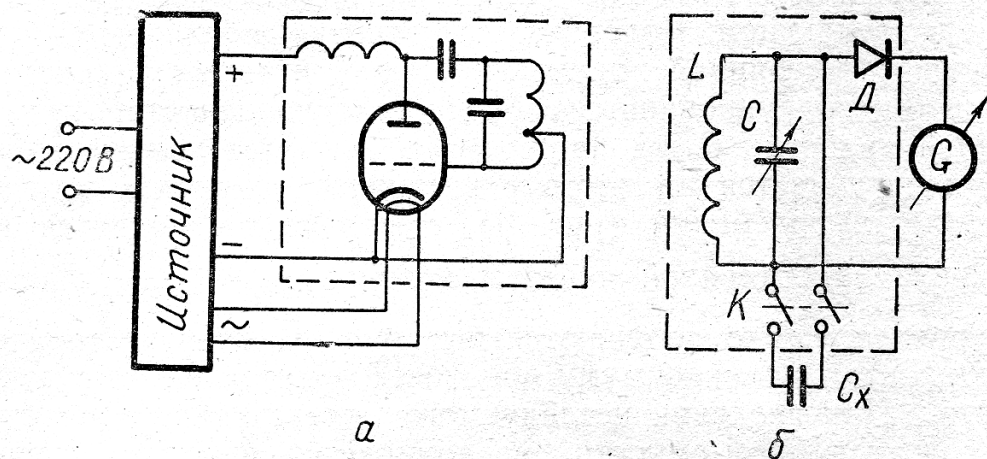


Рис. 5

напряжения 220 В. Вторая часть установки (блок б) представляет собой колебательный контур, образованный постоянной индуктивностью L и переменным конденсатором C , емкость которого можно определить по шкале и градуировочной кривой (вмонтирована в блок б). Параллельно конденсатору C при помощи переключателя K можно подключить пробный конденсатор C_x . Этот конденсатор может быть опущен в специальный стакан с жидкостью, диэлектрическая проницаемость которой измеряется. Электромагнитные волны, излучаемые генератором, возбуждают колебания в контуре. Амплитуда этих колебаний регистрируется при помощи устройства, состоящего из чувствительного гальванометра G с выпрямляющим полупроводниковым диодом D . Настройка контура в резонанс фиксируется по максимуму показаний гальванометра (стрелка при этом не должна зашкаливать). Величину максимального отклонения стрелки гальванометра можно регулировать, изменяя расстояние между блоками и их взаимную ориентацию, т. е. изменяя связь между катушками индуктивности генератора и колебательного контура.

При постоянной индуктивности L настройка колебательного контура в резонанс будет происходить лишь при совершенно определенной суммарной емкости C_1 переменного и пробного конденсаторов. При настройке с отключенным

пробным конденсатором по шкале переменного конденсатора и градуировочной кривой определяется емкость C_1 . При настройке с включенным, но не опущенным в жидкость пробным конденсатором C_x определяется емкость переменного конденсатора $C_2 = C_1 - C_x$. Наконец, при настройке контура в резонанс с пробным конденсатором, опущенным в исследуемую жидкость, получаем $C_3 = C_1 - \epsilon C_x$. По полученным значениям емкости переменного конденсатора C_1 , C_2 и C_3 легко найти значения диэлектрической проницаемости жидкости:

$$\begin{aligned} C_1 - C_2 &= C_x, \\ C_1 - C_3 &= \epsilon C_x, \\ \epsilon &= (C_1 - C_3) / (C_1 - C_2). \end{aligned} \quad (8)$$

При выполнении работы запрещается вскрывать блоки установки; следует проявлять осторожность в обращении с измеряемой жидкостью.

Работа выполняется в следующем порядке:

1. Включить блок генератора в сеть ~ 220 В и дать установке прогреться в течение 2—3 минут;
2. Поставить переключатель K в положение «выкл»;
3. Вращением ручки переменного конденсатора настроить контур в резонанс. Снять показания A_1 по шкале конденсатора;
4. Настроить контур в резонанс при включенном переключателе K , при этом пробный конденсатор должен быть закреплен в предназначенных для него клеммах, пластины конденсатора должны быть сухими. Снять показания переменного конденсатора A_2 ;
5. Опустить пробный конденсатор в стакан с исследуемой жидкостью и повторить настройку контура в резонанс. Снять показания A_3 ;
6. Используя показания A_1 , A_2 , A_3 , найти по градуировочной кривой значения соответствующих емкостей C_1 , C_2 и C_3 . По формуле (8) определить значение диэлектрической проницаемости.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ

1. Какие вещества относят к диэлектрикам?
2. Что понимают под макроскопическим электрическим полем в диэлектрике?
3. В чем состоит явление поляризации диэлектриков?

4. Какие существуют механизмы поляризации?
5. Дайте определение диэлектрической проницаемости веществ. Что характеризует эта величина?
6. Как изменяются напряженность поля, разность потенциалов на обкладках и емкость идеального конденсатора при его заполнении диэлектриком?
7. Каковы особенности поведения диэлектриков в переменных электрических полях?
8. Какие существуют методы измерения диэлектрической проницаемости?
9. Расскажите об экспериментальной установке и рабочей формуле.

Литература

- Сивухин Д. В. Курс общей физики. М., 1977, т. 3, § 10, 12, 13, 15.
- Савельев И. В. Курс общей физики. М., 1978, т. 2, §15—22.
- Парселл Э. Берклевский курс физики. М., 1971, т. 2, § 9.1, 9.2, 9.8, 9.9.