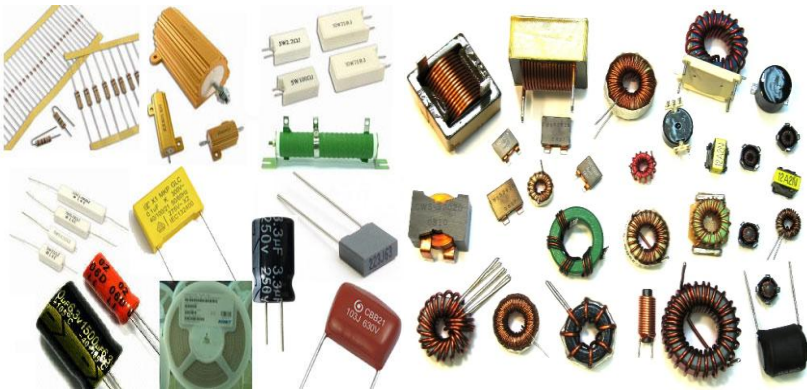


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

МАТЕРИАЛЫ И КОМПОНЕНТЫ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Методические указания
к лабораторным работам



УДК 621.39

Материалы и компоненты радиоэлектронных средств: методические указания к лабораторным работам /Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: С.И. Мальченко, В.Г. Мишустин, В.Н. Тимофеев. Рязань, 2012. 84 с.

Рассматриваются лабораторные работы по курсу «Материалы и компоненты радиоэлектронных средств».

Предназначены студентам специальностей 140400, 200100, 201000, 210100 210400, 211000.

Табл. 13. Ил. 39. Библиогр.: 6 назв.

Сопротивление диэлектриков, энергия активации, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла потерь, конденсатор, катушка индуктивности, электрическая прочность

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра биомедицинской и полупроводниковой электроники Рязанского государственного радиотехнического университета (зав. кафедрой проф. С.П. Вихров)

Материалы и компоненты радиоэлектронных средств

Составители: М а л ь ч е н к о Сергей Иосифович
М и ш у с т и н Владислав Геннадьевич
Т и м о ф е е в Владимир Николаевич

Редактор Р.К. Мангутова

Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать 18.06.12. Формат бумаги 60x84 1/16.

Бумага газетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 5,25.

Тираж 50 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: изучение методов измерения сопротивления твердых диэлектриков и исследование температурной зависимости их удельного сопротивления.

1. Основные теоретические сведения**1.1. Электропроводность диэлектриков**

Необходимым условием наличия электропроводности у любого вещества является существование в нем свободных *заряженных материальных частиц* — носителей зарядов. При наличии электрического поля на каждый носитель тока действует электродвижущая сила E . При этом плотность тока J равна

$$J = n \cdot q \cdot v, \quad (1)$$

где n - концентрация зарядов в данном объеме;

q - величина заряда;

v - скорость движения заряда.

Окончательно электропроводность γ можно определить как

$$\gamma = n \cdot q \cdot \frac{v}{E}. \quad (2)$$

Отношение v/E , определяющее скорость при напряженности поля, равной единице, называют *подвижностью* носителей и обычно обозначают буквой μ .

В диэлектриках можно выделить следующие виды электропроводности.

1. **Электронная электропроводность** характеризуется перемещением электронов под действием поля. Помимо металлов, ее обнаруживают у углерода, некоторых соединений металлов с кислородом, серой и другими веществами и у многих полупроводников. При электронной электропроводности отсутствует видимый перенос вещества с током.

2. **Ионная электропроводность** обуславливается движением ионов. Ее наблюдают у электролитов - растворов и расплавов солей, кислот, щелочей и подобных соединений, а также у многих диэлектриков. Ионы создаются электролитической диссоциацией, т. е. расщеплением молекул веществ на две части: катионы (+) и анионы (-). При движении ионов в электрическом поле имеет место электролиз, т. е. видимый перенос вещества и образование вблизи электродов новых химических веществ. Количество перенесенного с током вещества про-

порционально количеству прошедшего через вещество электрического тока, в соответствии с известными законами Фарадея. Общая проводимость вещества равна сумме анионной и катионной электропроводности.

3. **Молионная электропроводность** обусловлена движением заряженных частиц – молионов (целых сгустков молекул). Наблюдают ее в коллоидных системах, в которых дисперсионная фаза взвешена в дисперсионной среде. Заряженные частицы дисперсионной фазы называют *молионами*. Движение молионов под действием электрического поля называют *электрофорезом*. Большое влияние на электропроводность жидких, а также аморфных вязких материалов (смолы, компаунды) оказывает вязкость вещества.

1.1.1. Электропроводность газов

Газы при небольших значениях напряженности электрического поля обладают исключительно малой проводимостью. Ток в газах может возникнуть только при наличии в них ионов или свободных электронов. Ионизация нейтральных молекул газа возникает либо под действием внешних факторов, либо вследствие соударений заряженных частиц с молекулами. Внешними факторами, вызывающими ионизацию газа, являются коротковолновые воздействия (космическое, рентгеновское, радиоактивное излучение), а также тепловое воздействие. Электропроводность газа, обусловленную действием внешних ионизаторов, называют *несамостоятельной*, а обусловленную ударной ионизацией - *самостоятельной* электропроводностью.

В слабых полях ударная ионизация отсутствует и самостоятельной проводимости не обнаруживается. При ионизации газа одновременно происходит соединение положительных ионов и отрицательных электронов в нейтральные молекулы. Этот процесс носит название *рекомбинация* и препятствует безграничному росту числа ионов. Это означает, что условие равновесия заключается в равенстве числа вновь образующихся ионов числу рекомбинирующих ионов.

Предположим, что ионизированный газ находится между двумя плоскими параллельными электродами, к которым приложено электрическое напряжение. Ионы и электроны под влиянием напряжения будут перемещаться, и в цепи возникнет ток. Часть ионов будет нейтрализоваться на электродах, часть исчезнет за счет рекомбинации. Увеличение напряжения между электродами приведет к тому, что большая часть не рекомбинированных носителей заряда будет достигать электродов и увеличивать ток в цепи за счет увеличения скорости их перемещения. Причем чем больше будет величина поля, тем больше носителей заряда будет достигать электродов и не успевать рекомбинировать. Плотность тока в этом случае (при относительно слабых напряженностях поля) будет про-

порциональна напряженности поля, т. е. выполняется закон Ома.

При больших напряженностях поля наступит момент, когда все свободные носители заряда из-за высокой скорости движения будут достигать электродов, так и не успевая рекомбинировать. Поскольку количество свободных носителей, возникающих в газе в единицу времени, неизменно, то ток в цепи, при изменении напряженности поля перестанет изменяться. Такой ток называют *током насыщения*.

На рис. 1 показан характер зависимости тока от напряжения в газах. Начальный участок кривой до напряжения U_H соответствует выполнению закона Ома. По мере возрастания величины приложенного напряжения ионы переносятся к электродам, не успевая рекомбинировать, и при некотором напряжении U_H все ионы, создаваемые в газовом промежутке, будут разряжаться на электродах. Дальнейшее увеличение напряжения уже не будет вызывать возрастания тока, что соответствует горизонтальному участку кривой рис. 1 (ток насыщения при напряжениях от U_H до $U_{кр}$). Ток насыщения для воздуха в нормальных условиях, влажности и расстояния между электродами 1 см наблюдается при напряженностях поля около 0,6 В/м.

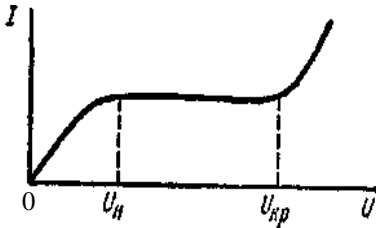


Рис. 1. Зависимость тока в воздушном зазоре от напряжения

Плотность тока насыщения в воздухе весьма мала и составляет величину порядка 10^{-15} А/м². Поэтому воздух можно рассматривать как совершенный диэлектрик до тех пор, пока не создадутся условия для появления ударной ионизации. Ток при увеличении напряжения остается постоянным, пока ионизация осуществляется под действием внешних факторов. При

возникновении ударной ионизации появляется самостоятельная электропроводность (выше $U_{кр}$ на рис. 1) и ток вновь начинает увеличиваться с возрастанием напряжения.

1.1.2. Электропроводность жидкостей

Электропроводность жидких диэлектриков тесно связана со строением молекул жидкости. В нейтральных жидкостях электропроводность определяется наличием диссоциированных примесей, в том числе влаги. В полярных жидкостях электропроводность зависит не только от примесей, иногда она вызывается диссоциацией молекул самой жидкости. Электропроводность жидкостей носит в основном ионный характер. Ионная электропроводность подразделяется на *собственную* и *примесную*.

Собственная электропроводность обусловлена движением ионов, получаемых от частичной диссоциации молекул жидкости. Полярные жидкости, как правило, сильнее диссоциированы и имеют большую электропроводность, чем неполярные. В неполярных и слабополярных жидких диэлектриках (минеральные масла, кремнийорганические, полиизобутиленовые и другие жидкости) электропроводность в основном определяется примесями и не является характерной для данного диэлектрика.

При тепловых колебаниях молекула в некоторых случаях получает достаточную кинетическую энергию для отрыва от соседней молекулы и приобретает поступательное движение. Направление этих перемещений беспорядочно. Однако если молекула имеет электрический заряд, то при приложении электрического поля к жидкости она начинает направленное движение и участвует в проводимости.

В нейтральных жидкостях их электропроводность зависит от наличия диссоциированных примесей (*примесная электропроводность*), в том числе от влаги; в полярных - еще и от диссоциации молекул самой жидкости. Ток в жидкости обуславливается перемещением ионов и молионов. Наблюдается зависимость роста удельной проводимости γ жидких диэлектриков от температуры. Это связано с ростом количества свободных носителей заряда в жидкости за счет увеличения энергии частиц жидкости. Уменьшение вязкости жидкости с увеличением температуры увеличивает подвижность ионов и других заряженных частиц и также способствует увеличению проводимости. Увеличение температуры также способствует активизации явления диссоциации молекул жидкости.

1.1.3. Объемная электропроводность твердых диэлектриков

Твердые диэлектрики предназначены в основном для электрической изоляции различных узлов РЭА. По самому своему назначению электроизоляционные материалы совершенно не должны пропускать электрический ток под действием приложенного электрического напряжения, т. е. они должны быть диэлектриками. Однако «идеальных» диэлектриков не существует и все практически применяемые электроизоляционные материалы при приложении напряжения все же пропускают некоторый, обычно весьма незначительный, ток.

Это обусловлено наличием в технических диэлектриках небольшого числа свободных носителей электрических зарядов, а также инжекцией зарядов из электродов. Такие токи принято называть токами сквозной электропроводности, или токами утечки.

Наряду с токами сквозной электропроводности в диэлектрике могут появляться и токи смещения. Упругое смещение (т.е. смещение на небольшое расстояние и возврат в исходное положение после снятия

электрического поля) любых связанных зарядов в веществе под действием электрического поля до момента установления и получения равновесного состояния обуславливает появление поляризационных токов, или токов смещения в диэлектриках. Токи смещения упруго связанных зарядов при электронной и ионной поляризациях настолько кратковременны, что их обычно не удается зафиксировать прибором. Токи же, вызванные замедленными видами поляризации, могут быть зафиксированы у многих технических диэлектриков и называются абсорбционными токами.

При постоянном напряжении абсорбционные токи, меняя свое направление, протекают только в моменты включения и выключения напряжения; при переменном напряжении они имеют место в течение всего времени нахождения материала в электрическом поле. Таким образом, полная плотность тока в диэлектрике представляет собой сумму плотностей токов утечки и смещения:

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_{\text{УТ}} + \mathbf{J}_{\text{СМ}}. \quad (3)$$

Плотность тока смещения определяется скоростью изменения вектора электрического смещения (индукции) \mathbf{D} :

$$\mathbf{J}_{\text{СМ}} = d\mathbf{D}/dt = \mathbf{J}_{\text{АБ}}. \quad (4)$$

Поляризационные токи (токи смещения или абсорбционные токи) необходимо принимать во внимание при измерениях проводимости диэлектриков, потому что при небольшой выдержке образца диэлектрика под напряжением обычно регистрируется не только ток утечки, но и сопровождающий его обратимый ток, т.е. ток абсорбции. Вследствие этого может создаться неправильное представление о большой проводимости диэлектрика. Таким образом, проводимость диэлектрика при постоянном напряжении определяется по току утечки, который сопровождается выделением и нейтрализацией зарядов на электродах. При переменном напряжении активная проводимость определяется не только током утечки, но и активными составляющими поляризационных токов.

Поскольку измерение поляризационных токов даже при замедленных механизмах поляризации осуществить довольно трудно, сопротивление диэлектрика рассчитывают обычно как частное от деления напряжения на величину тока, измеренную через одну минуту после включения напряжения (т. е. учитывают только токи утечки в диэлектрике). Значение $R_{\text{УТ}}$ (или $R_{\text{ИЗ}}$) в некоторых случаях зависит не только от самого диэлектрика, но и от материала электродов. Особенностью электропроводности диэлектриков в большинстве случаев является ее неэлектронный (*ионный*) характер.

У твердых изоляционных материалов различают объемную и поверхностную электропроводности. Для сравнительной оценки объемной

и поверхностной электропроводности различных материалов используют понятие удельного объемного ρ_V и удельного поверхностного ρ_S сопротивлений.

Принимают, что ρ_V численно равно сопротивлению куба с ребром в 1 м, мысленно вырезанного из исследуемого материала, если ток проходит через две противоположные грани этого куба, при этом величина ρ_V выражается в Ом*м.

В случае плоского образца материала при однородном поле удельное объемное сопротивление рассчитывают по формуле

$$\rho_V = R_V \cdot \frac{S}{h}, \quad (5)$$

где R_V — объемное сопротивление, Ом;

S — площадь электрода, м²;

h — толщина образца, м.

Для того чтобы носитель заряда стал свободным, необходимо воздействовать на него некоторой энергией, которую обычно называют *энергией активации*. В процессе прохождения электрического тока через твердый диэлектрик содержащиеся в нем ионы примесей могут частично удаляться, выделяясь на электродах. Это с течением времени приводит к уменьшению проводимости и росту сопротивления диэлектрика.

В твердых диэлектриках ионного строения электропроводность обусловлена главным образом перемещением ионов, вырываемых из решетки под влиянием флуктуации теплового движения. При низких температурах передвигаются слабо закрепленные ионы, в частности ионы примесей. При высоких температурах движутся основные ионы кристаллической решетки. В диэлектриках с атомной или молекулярной решеткой электропроводность зависит от наличия примесей.

В каждом отдельном случае вопрос о механизме электропроводности решается на основании данных об энергии активации носителя заряда. Известно, например, что для каменной соли энергия активации ионов натрия при нормальной температуре составляет около 0,85 эВ. Энергия активации ионов хлора в три раза больше, а энергия активации электронов равна 6 эВ, тогда как средняя энергия теплового движения при комнатной температуре составляет всего лишь 0,025 эВ.

Подвижность электронов на много порядков больше, чем подвижность ионов; в двуокиси титана, например, подвижность электронов составляет около 10^{-4} м²/В*с, тогда как подвижность ионов в алумосиликатной керамике всего лишь $10^{-13} - 10^{-16}$ м²/В*с. В связи с этим в диэлектрике с электронной электропроводностью концентрация электронов в $10^9 - 10^{12}$ раз меньше, чем концентрация носителей в диэлектрике с ионной электропроводностью при одинаковом заряде носителей и оди-

наковом значении удельной проводимости.

Известно, что при ионной электропроводности число диссоциированных ионов находится в экспоненциальной зависимости от температуры, и тогда проводимость может быть представлена следующей зависимостью:

$$\gamma = A \cdot e^{-\frac{b}{T}}, \quad (6)$$

где A и b – коэффициенты зависящие от параметров материала диэлектрика.

Если в диэлектрике электропроводность обусловлена носителями с различной энергией активации \mathcal{E}_i , то зависимость электропроводности от температуры может быть представлена в виде

$$\gamma = \sum A_i e^{-\frac{\mathcal{E}_i}{kT}}, \quad (7)$$

где k – постоянная Больцмана;

A_i – коэффициент, зависящий от параметров носителя заряда;

\mathcal{E}_i – энергия активации носителя заряда.

В связи с этим кривые логарифмической зависимости удельной проводимости от температуры имеют изломы, как показано на рис. 2.

При низких температурах электропроводность обусловлена ионизированными примесями, при высоких температурах она становится собственной. В некоторых случаях излом кривой температурной зависимости логарифма удельной проводимости объясняется тем, что ионы основного вещества имеют различные энергии диссоциации.

Заменяя γ на $1/\rho$, получают выражение для зависимости удельного объемного сопротивления от температуры:

$$\rho = B \cdot e^{\frac{b}{T}}, \quad (8)$$

где B и b – постоянные, характеризующие данный материал.

Собственная электропроводность твердых тел и изменение ее от температуры определяются структурой вещества и его составом. В телах кристаллического строения с ионной решеткой электропроводность связана с валентностью ионов. Кристаллы с одновалентными ионами обладают большей удельной проводимостью, чем кристаллы с многовалентными ионами. Так, для кристалла NaCl удельная проводимость значительно больше, чем для кристаллов MgO или Al_2O_3 .

В большинстве кристаллов удельная проводимость неодинакова по разным осям. Например, в кварце удельная проводимость в направлении, параллельном главной оси, примерно в 1000 раз больше, чем в направлении, перпендикулярном к этой оси. Для многих ионных кристаллов и других диэлектриков коэффициент b в формулах (6) и (8) близок к величине 10^4 .

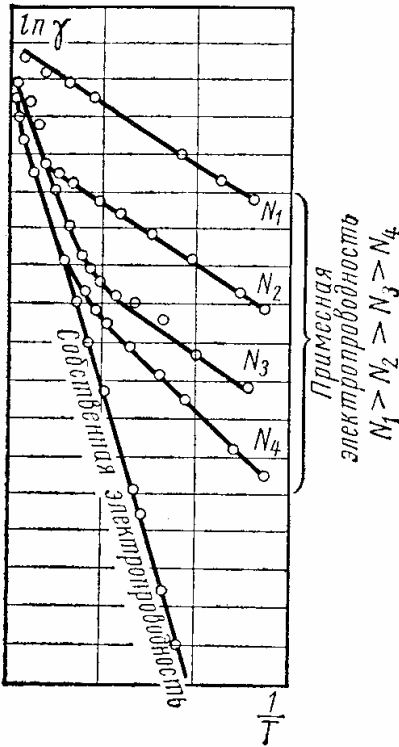


Рис. 2. Температурная зависимость удельной проводимости диэлектриков

В кристаллических телах с молекулярной решеткой (сера, полиэтилен, парафин) удельная проводимость мала и определяется в основном наличием примеси.

Величина удельной проводимости аморфных тел связана, прежде всего, с их составом. Высокомолекулярные органические полимеры обладают удельной проводимостью, зависящей в значительной степени от целого ряда факторов: от химического состава и наличия примесей, от степени полимеризации (например, для фенолформальдегидной смолы), от степени вулканизации (для эбонита). Органические нейтральные аморфные диэлектрики, как, например, полистирол, отличаются очень малой удельной проводимостью.

Большую группу аморфных тел составляют неорганические стекла. Удельная проводимость стекол зависит главным образом от химического состава; это дает возможность в ряде

случаев получать заранее заданную величину удельной проводимости.

Твердые пористые диэлектрики при наличии в них влаги, даже в ничтожных количествах, резко увеличивают свою удельную проводимость. Высушивание материалов повышает их электрическое сопротивление, но при нахождении высушенных материалов во влажной среде величина сопротивления вновь уменьшается.

Степень изменения электрических свойств материалов при увлажнении зависит не только от количества воды, проникшей в поры материала. В том случае, когда поглощенная влага способна образовать нити или пленки по толщине изоляции, которые могут пронизывать весь промежуток между электродами (или значительную область этого промежутка), даже весьма малые количества поглощенной влаги приводят к

резкому ухудшению электрических свойств изоляции. Если же влага распределяется по объему материала в виде отдельных, не соединяющихся между собой малых включений, то влияние влаги на электрические свойства материала менее существенно.

Наиболее заметное снижение удельного объемного сопротивления под влиянием влажности наблюдается у пористых материалов, которые содержат растворимые в воде примеси, создающие электролиты с высокой проводимостью. В таких диэлектриках при нагревании влажного образца вначале величина ρ уменьшается за счет увеличения степени диссоциации примесей в водном растворе, затем идет удаление влаги - сушка и только при более высоких температурах наблюдается снижение ρ от температуры по законам, приведенным ранее.

Для уменьшения влагопоглощения и влагопроницаемости пористых изоляционных материалов широко применяется их *пропитка*. Необходимо иметь в виду, что пропитка целлюлозных волокнистых материалов и других пористых органических диэлектриков дает лишь замедление увлажнения материала, не влияя на величину ρ после длительного воздействия влажности. Это объясняется тем, что молекулы пропиточных материалов имеют весьма большие размеры по сравнению с размерами молекул воды и не в состоянии создать полную непроницаемость пор материала для влаги, а в наиболее мелкие поры они вообще не могут попасть.

При больших напряженностях электрического поля, близких к напряженностям электрического пробоя, необходимо учитывать возможность появления в твердых диэлектриках электронного тока, быстро возрастающего с увеличением напряженности поля, благодаря чему наблюдается отступление от закона Ома.

1.1.4. Поверхностная электропроводность твердых диэлектриков

Удельное поверхностное сопротивление ρ_s численно равно сопротивлению квадрата (любых размеров), мысленно выделенного на поверхности материала, если ток проходит через две противоположные стороны этого квадрата.

Полная проводимость твердого диэлектрика, соответствующая его сопротивлению $R_{из}$, складывается из объемной и поверхностной проводимостей (следовательно, учитываются объемное и поверхностное сопротивления). Удельное поверхностное сопротивление можно определить по формуле

$$\rho_s = R_s \cdot \frac{d}{h}, \quad (9)$$

где R_s - поверхностное сопротивление образца материала между парал-

лельно поставленными электродами шириной d , отстоящими друг от друга на расстоянии h .

Полное сопротивление изоляции $R_{из}$ твердого диэлектрика определяется как соединение параллельно включенных поверхностного R_S и объемного R_V сопротивлений. Поверхностная электропроводность чаще всего обусловлена присутствием влаги на поверхности диэлектрика. Вода, как известно, обладает значительной проводимостью. Достаточно наличия тончайшего слоя влаги на поверхности диэлектрика, чтобы обнаружить заметную проводимость, которая определяется в основном толщиной этого слоя.

Однако, поскольку сопротивление адсорбированной водяной пленки связано с природой материала, на поверхности которого она находится, удельную поверхностную проводимость обычно рассматривают как свойство самого диэлектрика. Адсорбция влаги на поверхности диэлектрика находится в тесной зависимости от относительной влажности окружающей среды. Поэтому величина относительной влажности является решающим фактором, определяющим значение удельной поверхностной проводимости диэлектрика. Особенно резкое увеличение поверхностной проводимости обычно наблюдается, когда величина относительной влажности превышает 50—60 %.

Удельная поверхностная проводимость тем ниже, чем меньше полярность вещества и чем чище поверхность диэлектрика. Причем присутствие загрязнений на поверхности относительно мало сказывается на удельной поверхностной проводимости гидрофобных диэлектриков и сильно влияет на проводимость гидрофильных диэлектриков.

В зависимости от пределов значений удельного поверхностного сопротивления, обусловленных взаимодействием с влагой, все материалы можно подразделить на несколько групп:

- 1) не растворимые в воде диэлектрики;
- 2) частично растворимые в воде диэлектрики;
- 3) диэлектрики, имеющие пористую структуру.

Не растворимые в воде диэлектрики делятся на две подгруппы:

- а) нейтральные и слабополярные - не смачивающиеся водой (парафин, полистирол, янтарь, сера);
- б) дипольные и ионные - смачивающиеся водой (канифоль, некоторые виды керамики и др.).

Все материалы подгруппы (а) характеризуются высоким удельным поверхностным сопротивлением, мало зависящим от влажности окружающей среды. Удельное поверхностное сопротивление у материалов подгруппы (б) во влажной среде ниже, чем у материалов подгруппы (а), но может быть и достаточно большим при полном отсутствии загрязнений на их поверхности.

Частично растворимые в воде диэлектрики. К этой группе относится большинство технических стекол. Таким материалам свойственно более низкое удельное поверхностное сопротивление, в значительной мере зависящее от влажности.

Диэлектрики, имеющие пористую структуру. К этим диэлектрикам относятся волокнистые материалы (органические и неорганические), мрамор и большинство пластических масс. Благодаря пористой структуре во влажной среде эти материалы обнаруживают большую удельную поверхностную проводимость.

Для того чтобы повысить поверхностное сопротивление, применяют разнообразные приемы очистки поверхности - промывку водой, растворителями, прокаливание при температуре 600—700 °С.

Наиболее эффективной очисткой поверхности изделия, не впитывающего воду, является продолжительное кипячение в дистиллированной воде. Пропитка поверхностных слоев детали парафином или церезином не обеспечивает достаточной устойчивости значений ρ_s при высокой влажности. Это связано с возможностью проникновения влаги в микропоры, поверхности изделия из-за влагопроницаемости перечисленных защитных покрытий. Покрытие керамики и стекол кремнийорганическими лаками значительно повышает величину поверхностного сопротивления изделий во влажной среде.

Таким образом, зависимость удельного поверхностного сопротивления от влажности обусловлена наличием на поверхности диэлектрика гигроскопических и диссоциирующих на ионы веществ. Влага, адсорбируемая поверхностью, способствует появлению ионов из-за ее диссоциации. Если эти вещества случайно попали на поверхность диэлектрика, то после их удаления можно получить высокое удельное поверхностное сопротивление при любой влажности воздуха. Если эти вещества являются составной частью материала, то удельное поверхностное сопротивление будет сильно снижаться при увеличении влажности.

1.2. Измерение сопротивления диэлектриков

Для определения величины сопротивления диэлектрика обычно используют стандартный способ *амперметра-вольтметра*. Подавая на образец диэлектрика известное по величине напряжение, измеряют ток, протекающий в цепи диэлектрика, с помощью высокочувствительных измерителей тока. Типичные значения величин тока лежат в пределах $10^{-9} - 10^{-16}$ А. Приборы, измеряющие такие токи, обычно называют *пикоамперметрами (фемтоамперметрами, аттоамперметрами)*. Сопротивление диэлектрика рассчитывается по закону Ома как

$$R = U/I. \quad (10)$$

Определение удельного объемного и удельного поверхностного

сопротивлений производится обычно на одном и том же образце, снабженном тремя электродами. Форма и расположение этих электродов для случая плоского образца диэлектрика показаны на рис. 3.

Верхний дисковый электрод А имеет диаметр d_1 , внутренний диаметр кольцевого электрода $d_2 = d_1 + 4$ мм. Таким образом, зазор между этими электродами составляет 4 мм. Нижний дисковый электрод С может иметь диаметр, примерно равный наружному диаметру кольцевого электрода или больше. При измерении объемного сопротивления образца следует пропускать ток сквозь толщу образца между верхним и нижним дисковыми электродами А и С, а при измерении поверхностного сопротивления - через поверхностный слой образца, расположенный в кольцевом зазоре между электродами А и В.

В принципе измерение этих сопротивлений образцов не представляет трудностей, однако на практике далеко не всегда является простым делом, так как вследствие большой величины удельных сопротивлений, особенно в случае высококачественных диэлектриков, в схеме протекают настолько слабые токи, что их измерение осуществляют особо точными приборами, как указано выше.

В настоящей работе измерение удельного сопротивления осуществляется с помощью цифрового аттоамперметра. Ток от источника напряжения пропускается сквозь толщу образца между нижним электродом и верхним дисковым электродом (так называемым измерительным электродом) и измеряется цифровым аттоамперметром.

Измеряемый ток является объемным током утечки, так как поверхностный ток утечки с электрода С не попадет на электрод А и “собирается” кольцевым электродом В, выполняющим роль охранного кольца, и далее отводится на землю, минуя измеритель тока (*пикоамперметр, фемтоамперметр, аттоамперметр*). Охранный электрод, имея практически тот же потенциал, что и измерительный электрод А, способствует устранению краевого эффекта у этого электрода и тем самым создает практически однородное электрическое поле в образце между электродами А и С. Зная величину приложенного к образцу на-

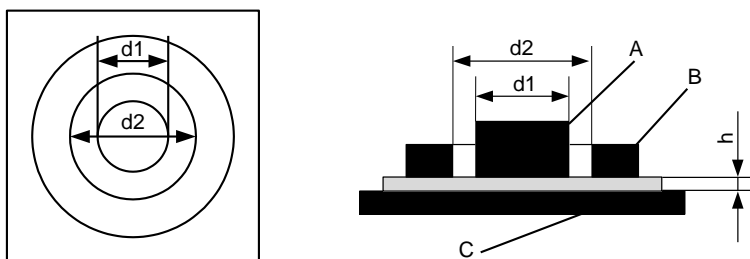


Рис. 3. Схема расположения электродов для измерения удельных сопротивлений плоского образца диэлектрика

пряжения U (в вольтах) и ток, протекающий через образец, можно определить объемное сопротивление образца R_v . Затем, используя формулу (5), можно рассчитать удельное объемное сопротивление диэлектрика.

При измерении поверхностного сопротивления электрод А опять является измерительным, т. е. остается соединенным с измерителем тока, в то время как другие электроды поменялись ролями. Кольцевой электрод В стал измерительным, а электрод С - охранным. При этом измеряется поверхностный ток в кольцевом зазоре между электродами А и В, а объемный ток утечки, который мог бы также проходить от электрода В к электроду А, отводится электродом С на землю и минует измеритель тока. Измерив напряжение U (в вольтах), приложенное к образцу, и поверхностный ток утечки, можно определить поверхностное сопротивление исследуемого диэлектрика.

Для круглых электродов связь между поверхностным сопротивлением образца R_s , удельным поверхностным сопротивлением диэлектрика ρ_s и размерами электродов d_1 и d_2 выражается следующим соотношением:

$$R_s = \rho_s \frac{d_2 - d_1}{\pi \cdot (d_2 - d_1)}, \quad (11)$$

где ρ_s измеряется в омах, а d_1 и d_2 - в любых одинаковых единицах длины.

Измеряя R_s и зная диаметры d_1 и d_2 , можно вычислить величину удельного поверхностного сопротивления испытуемого образца как

$$\rho_s = \frac{R_s \cdot \pi \cdot (d_2 + d_1)}{d_2 - d_1}. \quad (12)$$

2. Выполнение лабораторной работы

Лабораторная работа выполняется путем моделирования процесса измерения удельного сопротивления диэлектрика специальной программой, выполняемой на персональном компьютере (ПК). В эту программу заложены модели изменения удельного сопротивления ряда диэлектриков в зависимости от изменения температуры окружающей среды и влажности воздуха. Измерение производится стандартным методом амперметра-вольтметра. При измерении сопротивления диэлектрика используется трехэлектродный метод, описанный ранее. Измеряются объемное сопротивление и поверхностное сопротивление, а затем по известным параметрам исследуемого материала и измерительных электродов рассчитываются удельное объемное и поверхностное сопротивления.

При подготовке к работе необходимо изучить методические ука-

зания к лабораторной работе и затем получить у преподавателя задание. Для начала работы необходимо запустить файл «Сопротив_диэлз» на Рабочем столе ПК, после чего появится окно, изображенное на рис.4,а. Оно отображает название выполняемой лабораторной работы и некоторые интуитивно понятные элементы управления. Лабораторная работа состоит из двух частей. В **первой части** работы исследуются *удельное объемное сопротивление твердых диэлектриков* и его зависимость от температуры, а **во второй части** исследуется *удельное поверхностное сопротивление* в зависимости от температуры и влажности воздуха. Выбор конкретного вида измерения (объемное или поверхностное сопротивление) выбирается в окне выбора материала (рис.4,б) щелчком левой кнопки мыши по соответствующей кнопке.

2.1. Измерение объемного сопротивления диэлектрика

После щелчка по кнопке «Измерение объемного сопротивления» открывается окно измерения объемного сопротивления диэлектрика, показанное на рис. 5. В этом окне отображаются измерительные приборы и измерительная камера с образцом диэлектрика. Здесь же отображается схема подключения измерительных электродов.



Рис. 4. Внешний вид первого окна лабораторной работы (а) и окна выбора материала диэлектрика (б)

Необходимо включить приборы щелчком по тумблерам «Сеть». По умолчанию в виртуальной измерительной камере установлены температура 20°C и влажность 5 %. Если включены не все приборы и не установлено какое-либо напряжение, то отображается мигающая надпись «Включите приборы и установите напряжение».

Измерение сопротивления диэлектрика необходимо производить в следующей последовательности.

1. Установить необходимое напряжение источника питания, используя кнопки «Инкремент-декремент» рядом с цифровыми индикаторами на панели источника питания. Стрелочный прибор источника дублирует эти показания.

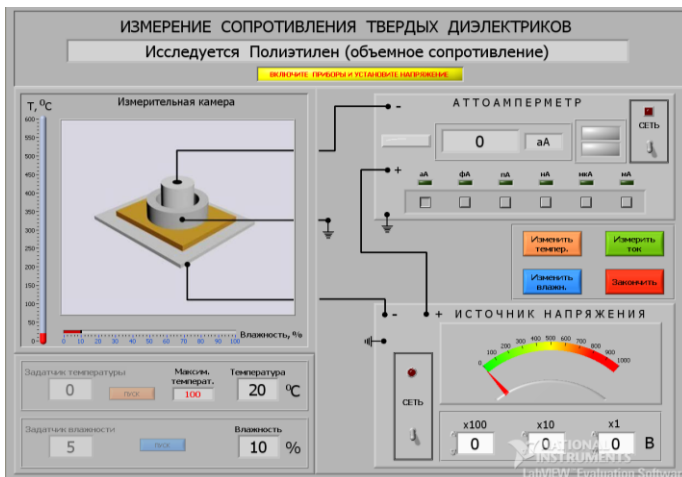


Рис. 5. Окно измерения объемного сопротивления диэлектрика

2. Щелкнуть по кнопке «Изменить температуру» и в окне «Задатчик температуры» ввести с клавиатуры нужную температуру в измерительной камере и нажать кнопку «Пуск». Дождаться момента установления заданной температуры в измерительной камере. Считается, что объемное сопротивление диэлектрика от влажности воздуха не зависит.

3. Установить масштаб измерения тока прибором «Аттоамперметр», используя кнопки, расположенные под цифровым индикатором величины тока. Рекомендуется начинать с масштаба «нА» (10^{-9} А).

4. Щелкнуть по кнопке «Измерить ток». Через некоторое время на индикаторе отобразится величина тока через диэлектрик. Если моргает индикатор «Перегрузка», изменить масштаб аттоамперметра. Записать значение тока.

5. После проведения необходимого цикла измерений при данной температуре в измерительной камере изменить значение температуры в соответствии с п. 2 этого раздела.

6. Закончив полный цикл измерений объемного сопротивления диэлектрика, щелкнуть по кнопке «Закончить» и выбрать новый материал или режим измерения.

2.2. Измерение поверхностного сопротивления диэлектрика

После выбора режима измерения поверхностного сопротивления щелкнуть по кнопке «Изменить влажность», а в окно «Задатчик влаж-

ности» ввести с клавиатуры нужное значение влажности в измерительной камере и нажать кнопку «Пуск». Дождаться момента установления заданной влажности в измерительной камере и перейти к измерениям тока.

При необходимости изменять температуру в измерительной камере действовать, как указано в п. 2 раздела 2.1.

ВНИМАНИЕ! Процесс измерения поверхностного сопротивления диэлектрика ничем не отличается от измерения объемного сопротивления, но схема подключения измерительных электродов уже другая.

3. Последовательность выполнения работы

1. Исследовать зависимость объемного сопротивления диэлектрика от температуры в диапазоне температур, указанных преподавателем. Для каждого значения температуры в измерительной камере проводить не менее 5 – 7 измерений значений тока через диэлектрик и определять среднее значение. Процесс измерения тока занимает определенное время, т.к. при больших сопротивлениях диэлектрика необходимо несколько секунд для установления стационарного состояния при перезарядке паразитных емкостей измерительных электродов. Данные занести в таблицу по приведенному ниже примеру. При расчете объемного сопротивления R_V использовать формулу (10), а при расчете удельного объемного сопротивления использовать формулу (5). Диаметр верхнего электрода 5 см.

Диэлектрик – полипропилен							
Напряжение на диэлектрике 200 В							
t, °C	T, К	$10^4/T$	$I_{\text{СРЕД}}$	Един. тока	R_V , Ом	ρ_V , Ом*м	$\log(\rho_V)$

Построить зависимость $\log(\rho_V) = F(10^4/T)$. Аппроксимировать эту зависимость прямой и найти тангенс угла наклона как

$$tg \alpha = \frac{\Delta \log(\rho_V)}{\Delta \left(\frac{10^4}{T} \right)} \quad (13)$$

Рассчитать энергию активации примеси как

$$W = 8.625 \cdot 10^{-5} \cdot tg \alpha, \text{ эВ.} \quad (14)$$

2. Исследовать зависимость поверхностного сопротивления диэлектрика от температуры в диапазоне температур и постоянной влажности, указанных преподавателем. Для каждого значения температуры в измерительной камере проводить не менее 5 – 7 измерений значений тока через диэлектрик и определять среднее значение. Данные занести

в таблицу по приведенному ниже примеру. При расчете поверхностного сопротивления R_S использовать формулу (10), а при расчете удельного поверхностного сопротивления использовать формулу (12). Диаметр верхнего электрода 5 см, а внутренний диаметр кольцевого электрода 5.4 см.

Диэлектрик - полипропилен							
Напряжение на диэлектрике 200 В							
t, °C	T, К	$10^4/T$	$I_{\text{СРЕД}}$	Един. тока	R_S , Ом	ρ_S , Ом	$\log(\rho_S)$

Построить зависимость $\log(\rho_S) = F(1/T)$. Аппроксимировать эту зависимость прямой и найти тангенс угла наклона как

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta \log(\rho_S)}{\Delta \left(\frac{10^4}{T} \right)}$$

Рассчитать энергию активации примеси как

$$W = 8.625 \cdot 10^{-5} \cdot \operatorname{tg} \alpha, \text{ эВ.}$$

3. Исследовать зависимость поверхностного сопротивления диэлектрика от влажности w при постоянной температуре, указанной преподавателем. Для каждого значения влажности в измерительной камере проводить не менее 5 – 7 измерений значений тока через диэлектрик и определять среднее значение. Данные занести в таблицу, по приведенному ниже примеру.

Диэлектрик - полипропилен				
Температура 20 °C				
Напряжение на диэлектрике 200 В				
w, %	$I_{\text{СРЕД}}$	Един. тока	R_S , Ом	ρ_S , Ом

Построить график $\rho_S = F(w)$.

4. Содержание отчета

4.1. Отчет выполняется каждым студентом индивидуально.

4.2. Отчет должен содержать:

- название работы;
- цель работы;
- основные теоретические сведения;
- схемы измерения;
- полученные расчетные данные;

- необходимые графики, требуемые по заданию;
- сравнение полученных данных со справочными материалами;
- ссылку по ГОСТу на изученную справочную литературу.

5. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

1. Что такое электропроводность вещества?
2. Назовите основные виды электропроводности диэлектриков.
3. Чем обусловлена электропроводность в газовых диэлектриках?
4. Нарисуйте и объясните график зависимости тока в газах от напряжения между электродами.
5. Что такое *ионизация* и *рекомбинация*?
6. Чем обусловлена электропроводность жидких диэлектриков?
7. Что такое объемное и поверхностное сопротивления твердых диэлектриков и в каких единицах они измеряются?
8. Что такое сопротивление изоляции твердых диэлектриков?
9. Что такое *энергия активации*?
10. Объясните характер температурной зависимости удельной проводимости диэлектриков.
11. Что такое *примесная* и *собственная* электропроводность твердых диэлектриков?
12. Чем обусловлено поверхностное сопротивление диэлектриков?
13. Как и почему влажность воздуха влияет на поверхностное сопротивление твердых диэлектриков?
14. Какие системы электродов и почему используют для измерения объемного и поверхностного сопротивления твердых диэлектриков?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИЗМЕРЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ТАНГЕНСА УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: изучение методов измерения относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь твердых диэлектриков резонансным методом, исследование температурной и частотной зависимости этих параметров.

1. Основные теоретические сведения

1.1. Поляризация диэлектриков

Одним из важных понятий при изучении поляризации диэлектриков является *электрический дипольный момент* (в дальнейшем просто

дипольный момент). Электрический дипольный момент определяется как совокупность двух равных по абсолютной величине разноимённых точечных электрических зарядов (это и есть диполь), находящихся на некотором расстоянии друг от друга. Основной характеристикой электрического диполя является его дипольный момент - вектор, направленный от отрицательного заряда к положительному (рис. 1) и численно равный произведению заряда q на расстояние l между зарядами: $p = ql$. Дипольный момент определяет электрическое поле диполя на большом расстоянии R от него ($R \gg l$), а также воздействие на диполь внешнего электрического поля.

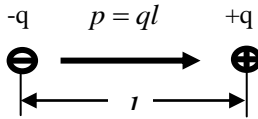


Рис. 1. Электрический диполь: заряды $-q$ и $+q$ на расстоянии l друг от друга. Дипольный момент $p = ql$ полностью определяет электрическое поле диполя на расстояниях $R \gg l$.

Действие внешнего электрического поля на диполь также пропорционально величине его дипольного момента. Однородное поле создаёт вращающий момент, стремящийся повернуть диполь так, чтобы его дипольный момент был направлен по полю. В неоднородном электрическом поле на диполь, кроме вращающего момента, действует также сила, стремящаяся втянуть его в область более сильного поля. Следует понимать, что если положительный и отрицательный заряды совпадают друг с другом (т.е. $l=0$), то электрическое поле будет отсутствовать.

Диэлектрики - это вещества, которые практически не проводят электрический ток. Поведение диэлектриков в электрическом поле определяется их внутренним строением. Как известно, мельчайшей частью вещества, сохраняющей его химические свойства, является молекула. Молекулы состоят из атомов, в состав которых входят положительно заряженные ядра и отрицательно заряженные электроны. В целом молекулы электронейтральны. Согласно теории ковалентных связей устойчивость молекул достигается путем образования одной или нескольких пар электронов, которые становятся общими для соединяющихся атомов, т. е. одновременно входят в состав оболочек двух атомов.

Для каждого вида зарядов - положительных (ядер) и отрицательных (электронов) - можно найти такую точку, которая будет являться как бы их "электрическим центром тяжести". Эти точки называются полюсами молекулы. Если в молекуле электрические центры тяжести

положительных и отрицательных зарядов совпадут, то дипольный момент такой молекулы равен нулю, а следовательно, и электрическое поле, создаваемое этой молекулой, будет отсутствовать. Такую молекулу называют неполярной. Но если молекула построена несимметрично, например состоит из двух разнородных атомов, то общая пара электронов может быть в большей или меньшей степени смещена в сторону одного из атомов. Очевидно, что в этом случае, вследствие неравномерного распределения положительных и отрицательных зарядов внутри молекулы, их электрические центры тяжести не совпадут. Это приведет к возникновению дипольного момента молекулы и появлению электрического поля вокруг нее. Такие молекулы принято называть полярными.

Для описания макроскопических электрических свойств диэлектриков достаточно ограничиться представлением о том, что в них отсутствуют свободные носители заряда и при помещении диэлектрика в электрическое поле в материале возбуждается множество микроскопических диполей. В случае неполярных молекул это происходит путем смещения в пределах молекул их положительных зарядов в направле-

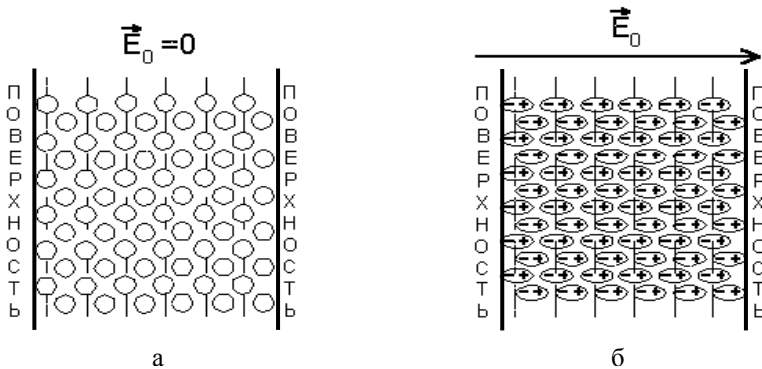


Рис. 2. Поляризация однородного диэлектрика с неполярными молекулами: (а – внешнее электрическое поле отсутствует; б – при воздействии внешнего электрического поля)

нии внешнего поля и отрицательных в противоположном направлении (рис. 2).

Приобретаемый молекулой дипольный момент пропорционален напряженности поля, в котором находится молекула. В системе СИ он записывается как:

$$p = \beta \epsilon_0 E, \quad (1)$$

где β - коэффициент пропорциональности, который называется *поляризуемостью молекулы*, а ϵ_0 - системная константа, называемая *абсо-*

лютой диэлектрической проницаемостью вакуума ($\epsilon_0=8,8510^{-12}$ Ф/м).

Для вещества, состоящего из полярных молекул, под действием момента сил происходит преимущественное выстраивание молекул в направлении внешнего поля (рис. 3).

В обоих случаях (неполярных и полярных молекул) в результате появляется дипольный момент и у всего объема диэлектрика. Средний дипольный момент, индуцированный полем в единице объема, называется поляризованностью диэлектрика:

$$P = \frac{1}{\Delta V} \cdot \sum_{\Delta V} p \quad , \quad (2)$$

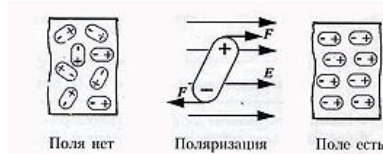


Рис. 3. Ориентация полярной молекулы в электрическом поле

где суммирование производится по всем молекулам, находящимся в объеме ΔV , а дипольный момент p каждой молекулы определяется суммированием по всем заряженным частицам, входящим в молекулу:

$$p = \sum_i e_i l_i \quad , \quad (3)$$

где e_i - заряд каждой частицы, а l_i - ее смещение под действием электрического поля.

Домножив и разделив правую часть выражения (3) на число молекул ΔN , находящихся в объеме ΔV , получим еще одно выражение для поляризованности:

$$p = n \langle p \rangle \quad , \quad (4)$$

где $n = \Delta N / \Delta V$ – концентрация молекул, а $\langle p \rangle$ - средний дипольный момент молекулы.

Вообще говоря, P меняется в диэлектрике от точки к точке, но для широкого класса веществ в каждой точке $P \sim E$. Существуют вещества, обладающие поляризованностью и в отсутствие внешнего поля. Поскольку в целом молекулы нейтральны, то именно дипольный момент и определяет электрическое поле, создаваемое самим материалом, когда его помещают во внешнее поле. В соответствии с принципом суперпозиции поле внутри диэлектрика есть сумма внешнего поля и поля от всех диполей, индуцированных в диэлектрике:

$$E = E_0 + E' \quad , \quad (5)$$

где E_0 - напряженность внешнего электрического поля, а E' – напряженность внутреннего электрического поля, созданного связанными

зарядами вещества диэлектрика. Связанными зарядами называются нескомпенсированные заряды, появляющиеся в результате поляризации молекул диэлектрика, тогда как сторонними - свободные заряды, находящиеся в диэлектрике или вне его. E_0 и E' представляют собой макрополя, т.е. усредненные по некоторому малому объему микрополя, создаваемые сторонними и связанными зарядами соответственно.

Так как каждая молекула поляризуется под воздействием как поля сторонних зарядов, так и поля, создаваемого всеми другими поляризованными молекулами, то поляризованность диэлектрика пропорциональна напряженности именно суммарного поля:

$$P = \kappa \epsilon_0 E, \quad (6)$$

где κ – диэлектрическая восприимчивость вещества.

При поляризации неоднородного диэлектрика (см. рис. 3) смещения зарядов внутри любого выбранного слоя внутри диэлектрика происходят таким образом, что количество связанного заряда, покидающего слой, равно заряду, входящему в него. Таким образом, объемный заряд внутри диэлектрика не образуется. В поверхностных же слоях образуется связанный поверхностный заряд. В случае же неоднородного диэлектрика в каждый слой, мысленно выделенный внутри материала, с одной стороны входит больше заряда, чем выходит с другой, и связанный заряд образуется не только на поверхности, но и в объеме диэлектрика, как это показано на рис. 4.

С учетом вышеперечисленных явлений можно дать определение поляризации и поляризованности диэлектрика.

Поляризация диэлектриков — это явление, связанное со смещением связанных зарядов в диэлектрике или поворотом дипольных (поляризованных) молекул под воздействием внешнего электрического поля.

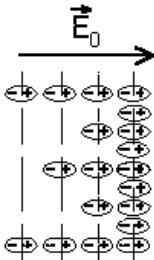


Рис. 4. Поляризация неоднородного диэлектрика

Поляризацию диэлектриков характеризует вектор электрической поляризации. Физический смысл *поляризованности* - это суммарный дипольный момент, который приобретает поляризованные молекулы, приходящийся на единицу объема диэлектрика. В этом случае в диэлектрике появляется дополнительный заряд Q_d , вызванный явлением *поляризации*, т.е. смещением связанных зарядов в диэлектрике.

Наиболее наглядно явление поляризации проявляется в электрическом конденсаторе. Если на поверхность листового диэлектрического материала с однородными (изотропными) свойствами нанести металлические электроды и подать на них постоянное напряжение, то образо-

вавшийся конденсатор будет накапливать электрический заряд величиной $Q = CU$, где C – емкость конденсатора, U – приложенное напряжение. В свою очередь заряд Q в диэлектрике может быть представлен как $Q = Q_0 + Q_D$, т.е. суммой заряда Q_0 , когда вместо диэлектрика в конденсаторе вакуум, и Q_D – заряда обусловленного поляризацией диэлектрика. Отношение зарядов Q и Q_0 называется относительной диэлектрической проницаемостью (в дальнейшем просто диэлектрической проницаемостью) материала, т.е.

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_0} = 1 + \frac{Q_D}{Q_0}. \quad (7)$$

Таим образом, *диэлектрическая проницаемость* ε – это скалярная безразмерная величина (всегда больше единицы), которую можно представить как отношение емкости конденсатора с данным диэлектриком к емкости такого же конденсатора, между электродами которого вакуум.

1.2. Виды поляризации

В зависимости от механизма поляризации, поляризацию диэлектриков можно подразделить на следующие виды.

Электронная поляризация — упругое смещение электронных оболочек атомов под действием внешнего электрического поля. Это самая быстрая поляризация, время установления которой до 10^{-15} с. Не связана с потерями энергии.

Ионная поляризация — смещение узлов кристаллической структуры под действием внешнего электрического поля, причем смещение узлов решетки происходит на величину, меньшую, чем величина постоянной решетки. Время протекания 10^{-13} с и происходит без потерь энергии.

Дипольная (ориентационная) поляризация — протекает с потерями на преодоление сил связи и внутреннего трения. Связана с ориентацией диполей во внешнем электрическом поле.

Электронно-релаксационная поляризация — ориентация дефектных (слабо связанных) электронов во внешнем электрическом поле.

Ионно-релаксационная поляризация — смещение ионов слабо закрепленных в узлах кристаллической структуры, либо находящихся в междоузлиях.

Структурная поляризация — ориентация примесей и неоднородных макроскопических включений в диэлектрике. Самый медленный тип.

Самопроизвольная (спонтанная) поляризация — благодаря наличию этого типа поляризации в диэлектрике проявляется нелинейность свойств, то есть явление гистерезиса. Отличается очень высокими значениями диэлектрической проницаемости (от 900 до 7500 у некоторых

видов конденсаторной керамики).

Резонансная поляризация — ориентация частиц, собственные частоты которых совпадают с частотами внешнего электрического поля.

Миграционная поляризация - обусловлена наличием в материале слоев с различной проводимостью, образованием объемных зарядов, особенно при высоких градиентах напряжения, имеет большие потери и является поляризацией замедленного действия.

1.3. Частотная и температурная зависимость диэлектрической проницаемости

Поляризация диэлектриков имеет максимальное значение в статических электрических полях. В переменных полях, в связи с наличием инерции электронов, ионов и электрических диполей, вектор электрической поляризации зависит от частоты. В связи с этим вводится понятие дисперсии диэлектрической проницаемости. Так как время установления, например, электронной поляризации весьма мало - 10^{-15} с, то даже при наиболее высоких частотах, применяемых в современной электротехнике и радиоэлектронике, поляризация неполярных диэлектриков успевает полностью установиться за время, которое пренебрежимо мало по сравнению с полупериодом переменного напряжения. Поэтому у неполярных диэлектриков ϵ от частоты не зависит (рис. 5).

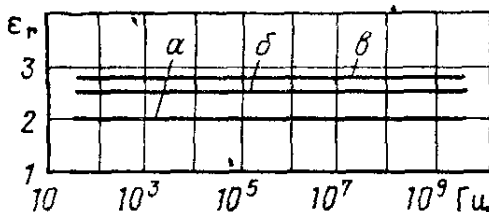


Рис. 5. Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ от частоты для твердых неполярных диэлектриков: а – фторопласт-4; б – полистирол; в – полидихлорстирол

У полярных диэлектриков при повышении частоты диэлектрическая проницаемость сначала также остается неизменной, но начиная с некоторой критической частоты, когда поляризация уже не успевает полностью установиться за один полупериод, величина ϵ снижается (рис. 6).

У неполярных диэлектриков ϵ слабо зависит от температуры, уменьшаясь при повышении температуры вследствие теплового расширения вещества, т. е. уменьшения количества поляризующихся молекул в единице объема вещества. Пример — рис. 7 (резкое изменение

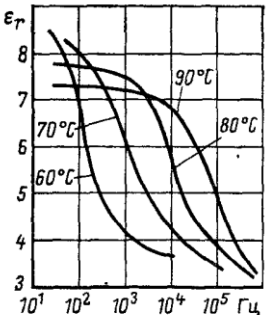


Рис. 6. Зависимость ϵ_r полярного диэлектрика (поливинилацетата) от частоты и температуры

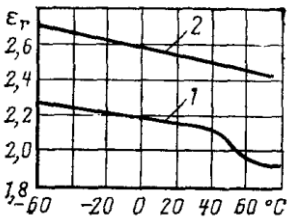


Рис. 7. Зависимость ϵ_r от температуры для неполярных диэлектриков; 1 – парафин; 2 – полистирол

ϵ на графике для парафина соответствует температуре плавления этого кристаллического материала, связанного со скачкообразным изменением плотности вещества).

У диэлектриков ионного строения ϵ при росте температуры обычно возрастает. Однако у некоторых ионных кристаллов ϵ при росте температуры уменьшается. У полярных диэлектриков в области низких температур, когда вещество обладает большой вязкостью или даже находится в кристаллическом состоянии, ориентация дипольных молекул невозможна или, во всяком случае, затруднена. При повышении температуры возможность ориентации диполей облегчается, вследствие чего ϵ существенно возрастает. Однако при еще более высоких температурах вследствие усиления хаотических тепловых колебаний молекул степень упорядоченности ориентации молекул снижается, поэтому ϵ , пройдя через максимум, уменьшается (рис. 8).

В полярных диэлектриках с различными видами поляризации при увеличении частоты происходит скачкообразное уменьшение величины диэлектрической проницаемости по мере того, как постепенно «отключаются» медленные виды поляризации. На температурной зависимости относительной диэлектрической проницаемости таких диэлектриков могут появляться несколько максимумов.

1.4. Потери в диэлектриках

Диэлектрическими потерями называют энергию, вызывающую нагрев диэлектрика, которая рассеивается в единицу времени в диэлектрике при воздействии на него электрического поля.

Потери энергии в диэлектриках наблюдаются как при переменном напряжении, так и при постоянном, поскольку в любом материале протекает сквозной ток, обусловленный проводимостью. При постоянном напряжении, когда нет периодической поляризации, качество

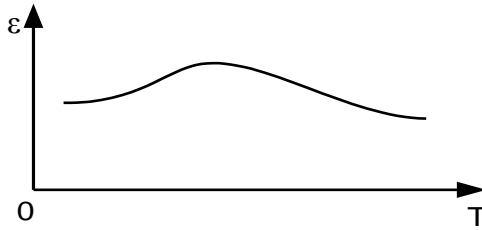


Рис. 8. Типовая зависимость ϵ от температуры для большинства полярных диэлектриков

материала характеризуется значениями удельных объемного и поверхностного сопротивлений. При переменном напряжении необходимо использовать какую-то другую характеристику качества материала, так как в этом случае, кроме сквозной электропроводимости, возникает ряд добавочных причин, вызывающих потери энергии в диэлектрике. Для характеристики способности диэлектрика рассеивать энергию в электрическом поле пользуются понятием угла диэлектрических потерь, а также тангенсом этого угла.

Углом диэлектрических потерь называется угол δ , дополняющий до 90° угол сдвига фаз φ между током I и напряжением U в емкостной цепи. В случае идеального диэлектрика I в такой цепи будет опережать вектор U на 90° , при этом угол δ будет равен нулю. Чем больше рассеиваемая в диэлектрике мощность, переходящая в тепло, тем меньше угол сдвига фаз φ и тем больше угол диэлектрических потерь δ и соответственно $\operatorname{tg}\delta$ (рис. 9).

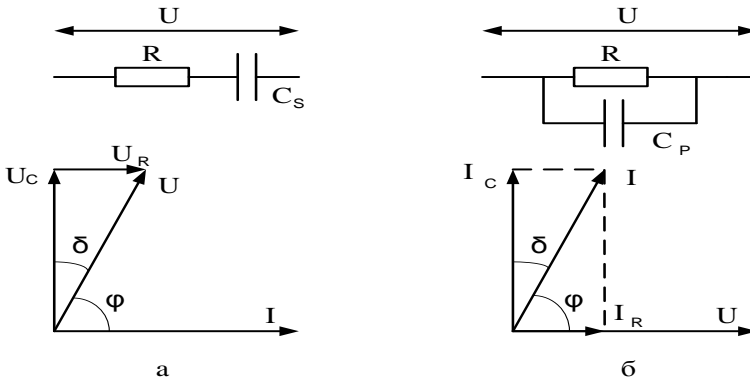


Рис. 9. Эквивалентные схемы и векторные диаграммы диэлектрика с потерями: а – последовательная схема, б – параллельная схема

Диэлектрические потери могут обуславливаться сквозным током

или активными составляющими поляризационных токов. При изучении диэлектрических потерь, непосредственно связанных с поляризацией диэлектрика, можно изобразить это явление в виде кривых, представляющих зависимость электрического заряда на обкладках конденсатора с данным диэлектриком от приложенного к конденсатору напряжения. При отсутствии потерь, вызываемых явлением поляризации, заряд линейно зависит от напряжения, и такой диэлектрик называется линейным.

Если в диэлектрике имеет место замедленная поляризация, связанная с потерями энергии, то кривая зависимости заряда от напряжения приобретает нелинейную зависимость. В технических электроизоляционных материалах, помимо потерь на сквозную электропроводность и потерь от замедленных видов поляризации, возникают электрические потери, которые сильно влияют на электрические свойства диэлектриков. Эти потери вызываются наличием изолированных друг от друга посторонних проводящих или полупроводящих включений углерода, окислов железа и т.д. и значительны даже при малом содержании таких примесей в электроизоляционном материале. В случае высоких напряжений потери в диэлектрике возникают вследствие ионизации газовых включений внутри диэлектриков, особенно интенсивно происходящей при высоких частотах. При изучении поведения диэлектрика с потерями при переменном напряжении часто оказывается целесообразным заменить рассматриваемый диэлектрик емкостью без потерь (учитывает явление поляризации) и активным сопротивлением (учитывает электропроводность), соединенными между собой параллельно или последовательно.

Рассмотрим схему, эквивалентную конденсатору с диэлектриком, обладающим потерями и находящимся в цепи переменного напряжения. Последовательная и параллельная схема представлены на рис. 8, там же даны соответствующие диаграммы токов и напряжений. Обе схемы эквивалентны друг другу, если при равенстве полных сопротивлений $z_1 = z_2 = z$ равны их активные и реактивные составляющие. Это условие будет соблюдено, если углы сдвига тока I относительно напряжения U равны и значения активной мощности одинаковы.

Из теории переменных токов известно, что:

$$P_a = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (8)$$

Выразим P для последовательной и параллельной схемы через C_s и C_p и угол δ , который является дополнением угла φ до 90 градусов. Для последовательной схемы (рис. 9, а), используя выражения для P_a и соответствующую диаграмму, имеем:

$$P_a = \frac{U}{z} \cdot \frac{U_r}{z} = \frac{U_r^2}{x^2 + r^2} = \frac{U_r^2}{x^2 \cdot (1 + \frac{r^2}{x^2})} = \frac{U^2 \cdot \omega C_s \cdot \operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg} \delta} \quad (9)$$

и $\operatorname{tg} \delta = \omega C_s R_s$.

Для параллельной схемы (рис. 9,б):

$$P_a = U^2 \cdot \omega C_p \cdot \operatorname{tg} \delta \quad \text{и} \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega C_p R_s} \quad (10)$$

Из формул (9) и (10) можно видеть, что диэлектрические потери приобретают серьезное значение для материалов, используемых в установках высокого напряжения, в высокочастотной аппаратуре и особенно в высоковольтных высокочастотных устройствах, поскольку величина диэлектрических потерь пропорциональна квадрату приложенного к диэлектрику напряжения и частоте поля. Материалы, предназначенные для применения в указанных условиях, должны отличаться малым значением угла потерь и диэлектрической проницаемостью, т.к. в противном случае мощность, рассеиваемая в диэлектрике, может стать недопустимо большой.

Диэлектрические потери по их особенностям и физической природе можно подразделить на четыре основных вида:

- 1) диэлектрические потери, обусловленные поляризацией;
- 2) диэлектрические потери, обусловленные сквозной электропроводностью диэлектрика;
- 3) ионизационные диэлектрические потери;
- 4) диэлектрические потери, обусловленные неоднородностью структуры.

Рассмотрим каждый вид диэлектрических потерь.

Диэлектрические потери, обусловленные поляризацией, особенно отчетливо наблюдаются в веществах, обладающих релаксационными видами поляризации, в диэлектриках дипольной структуры и в диэлектриках ионной структуры с неплотной упаковкой ионов.

Релаксационные диэлектрические потери вызываются нарушением теплового движения частиц под влиянием сил электрического поля. Это нарушение приводит к рассеянию энергии и нагреву диэлектрика. В температурной зависимости $\operatorname{tg} \delta$ релаксационных диэлектрических потерь наблюдается максимум при некоторой температуре, характерной для данного вещества (рис. 10). При этой температуре время релаксации частиц диэлектрика примерно совпадает с периодом изменения приложенного переменного напряжения. Если температура такова, что время релаксации частиц значительно больше полупериода изменения приложенного переменного напряжения, то тепловое движение частиц будет менее интенсивным. Потери уменьшатся, если температура такова, что время релаксации частиц значительно меньше полу-

периода изменения напряжения, а интенсивность теплового движения будет больше, связь между частицами уменьшится, в результате чего потери также снизятся.

Классификация потерь в диэлектриках

Диэлектрические потери	Главные особенности	Виды диэлектриков
1. Обусловленные поляризацией		
релаксационные (дипольные и ионные)	Наличие максимума $\text{tg}\delta$ угла потерь, зависящего от температуры и частоты	Дипольные жидкие и твердые диэлектрики, ионные с неплотной упаковкой
резонансные	Наличие резко выраженного максимума при некоторой частоте (выше 10^{15} Гц), положение которого не зависит от температуры	Все виды диэлектриков
2. Обусловленные электропроводностью	Независимость потерь от частоты ($\text{tg}\delta$ угла потерь с частотой снижается по гиперболе) и заметное возрастание с ростом температуры	Жидкие и твердые диэлектрики. Жидкие и твердые диэлектрики с большой электропроводностью
3. Ионизационные	Наблюдаются при напряжениях выше напряжения ионизации газов и газовых включений внутри диэлектрика	Газообразные и твердые диэлектрики с газообразными включениями
4. Обусловленные неоднородностью структуры	Сложная зависимость потерь от компонентов, входящих в состав диэлектрика и случайных примесей	Неоднородные диэлектрики

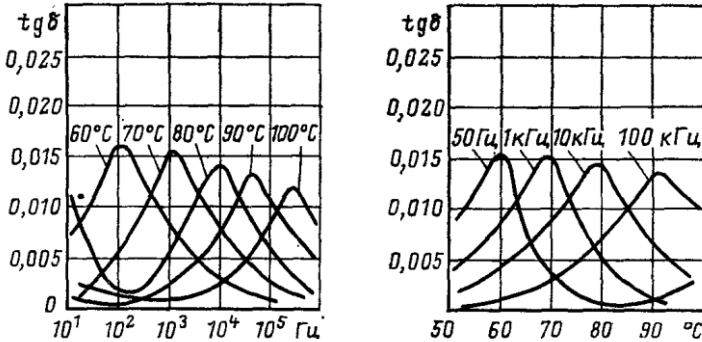


Рис. 10. Зависимость $\operatorname{tg}\delta$ от частоты и температуры для полярного диэлектрика (поливинилацетат)

Резонансные потери, проявляющиеся в диэлектриках при световых частотах. Этот вид потерь с особой четкостью наблюдается в некоторых газах при строго определенной частоте и выражается в интенсивном поглощении энергии электрического поля. Также эти потери возможны и в твердых веществах, если частота вынужденных колебаний, вызываемых электрическим полем, совпадает с частотой собственных колебаний частиц твердого вещества. Наличие максимума в частотной зависимости $\operatorname{tg}\delta$ характерно также и для резонансного механизма потерь, однако в данном случае температура на положение максимума потерь не влияет.

Диэлектрические потери, обусловленные сквозной электропроводностью. Диэлектрические потери, обусловленные сквозной проводимостью, обнаруживаются в диэлектриках, имеющих заметную электропроводность, объемную или поверхностную. Диэлектрические потери этого вида не зависят от частоты электрического поля, а $\operatorname{tg}\delta$ уменьшается с частотой по гиперболическому закону. Диэлектрические потери, обусловленные электропроводностью, возрастают с ростом температуры по экспоненциальному закону.

Ионизационные диэлектрические потери свойственны диэлектрикам в газообразном состоянии. Ионизационные потери проявляются в неоднородных электрических полях при напряженностях, превышающих значения, соответствующие началу ионизации данного газа.

Диэлектрические потери, обусловленные неоднородностью структуры. Диэлектрические потери, обусловленные неоднородностью структуры, наблюдаются в слоистых диэлектриках из пропитанной бумаги и ткани, в пластмассах с наполнителем, в пористой керамике, в производных слюды - миканитах, микалксе и т.д. В таблице приведена классификация потерь в диэлектриках.

1.5. Методика измерения

В лабораторной работе измерение ε и $\operatorname{tg}\delta$ твердых диэлектриков производится хорошо известным резонансным методом с применением прибора измерителя добротности или Q-метра. Как следует из его названия, он может применяться для измерения добротности Q и обычно применяется при измерении добротности катушек индуктивности. Упрощенная схема Q-метра показана на рис. 11.

В приборе используется явление резонанса в высокодобротном последовательном колебательном контуре. Этот контур сформирован образцовой высокодобротной катушкой индуктивности L и образцовым (обычно воздушным) переменным конденсатором $C1$. На контур подается напряжение с высокочастотного генератора G , частоту f которого можно изменять в широких пределах. На определенной частоте f_0 сигнала генератора G , изменяя емкость конденсатора $C1$, контур настраиваем в резонанс, который фиксируется по максимальному значению напряжения на вольтметре $V2$. Сопротивление R характеризует общие потери во всех элементах колебательного контура. В момент резонанса добротность контура Q определяется как отношение показаний вольтметров $V2$ и $V1$, т.е. $Q = V2/V1$. Если поддерживать напряжение генератора сигнала G на известном уровне (например, 0,1 В), то шкалу вольтметра $V2$ можно проградуировать прямо в значениях добротности Q .

Если в контур вносится дополнительная емкость Cx , например в виде емкости, полученной при подключении исследуемого твердого диэлектрика, то изменяются резонансная частота контура и его добротность. Резонансная частота изменяется за счет увеличения суммарной емкости контура $C = C1 + Cx$, а добротность контура снижается за

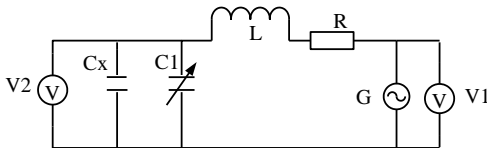


Рис. 11. Упрощенная схема измерителя добротности (Q-метра)

счет потерь различного типа, возникающих в диэлектрике. Настраивая контур вновь в резонанс на этой же частоте f_0 , по разности показаний конденсатора $C1$ можно определить величину емкости Cx , т.е. это и есть емкость исследуемого диэлектрика. Зная геометрические размеры подключенного диэлектрика можно определить величину ε диэлектрика, используя формулу емкости плоского конденсатора.

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 S}{d}, \quad (11)$$

где ε - относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика конденсатора, ε_0 - абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума ($\varepsilon_0=8,8510^{-12}$ Ф/м), S – площадь обкладок конденсатора, d – расстояние между обкладками конденсатора.

Определяя значение емкости C_x подключенного диэлектрика и учитывая размеры электродов (в работе используется круглый электрод диаметром 3 см), можно рассчитать ε диэлектрика как:

$$\varepsilon = \frac{C \cdot d}{8.85 \cdot 10^{-12} \cdot S} \cdot \quad (12)$$

Уменьшение добротности контура позволит оценить величину потерь, вносимых диэлектриком в колебательный контур, а следовательно, и $\text{tg}\delta$. При этом $\text{tg}\delta$ можно рассчитать по формуле

$$\text{tg}\delta = \frac{(Q_1 - Q_2) \cdot C_1}{Q_1 \cdot Q_2 \cdot (C_1 - C_2)} \quad , \quad (13)$$

где Q_1 и C_1 – добротность контура и емкость переменного конденсатора при неподключенном диэлектрике, Q_2 и C_2 – добротность контура и емкость переменного конденсатора при подключенном диэлектрике.

2. Выполнение лабораторной работы

Лабораторная работа выполняется путем моделирования процесса измерения резонансным методом относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков с использованием прибора – измерителя добротности (Q-метра). Для этого применяется специальная программа, выполняемая на персональном компьютере (ПК). В эту программу заложены модели изменения характеристик ряда диэлектриков в зависимости от изменения параметров окружающей среды и внешних воздействий, а также используется модель прибора Q-метр. Принцип измерения ε и $\text{tg}\delta$ описан выше. При подготовке к работе необходимо изучить методические указания к лабораторной работе.

Для начала работы необходимо запустить файл «Танг_диэл» на Рабочем столе ПК. после чего появится окно, изображенное на рис.12,а. Оно отображает название выполняемой лабораторной работы и кнопки, назначение которых интуитивно понятно. Управление программой осуществляется обычным способом, применяемым повсеместно в операционной системе Windows. После щелчка по кнопке «Начинаем» появится окно выбора материалов, как показано на рис. 12,б.

Выбор материала осуществляется щелчком по соответствующей закладке с названием материала. На закладке представлены описание и некоторые характеристики выбранного материала диэлектрика.

2.1. Проведение измерений

После щелчка по кнопке «К измерениям» открывается окно измерения параметров выбранного диэлектрика, показанное на рис. 13. В этом окне отображаются прибор - измеритель добротности и измерительная камера с образцом диэлектрика. Здесь же отображаются схема подключения исследуемого образца диэлектрика и используемые при этом электроды.

Необходимо включить прибор щелчком по тумблеру «Сеть». По умолчанию в измерительной камере установлена температура 0°C .

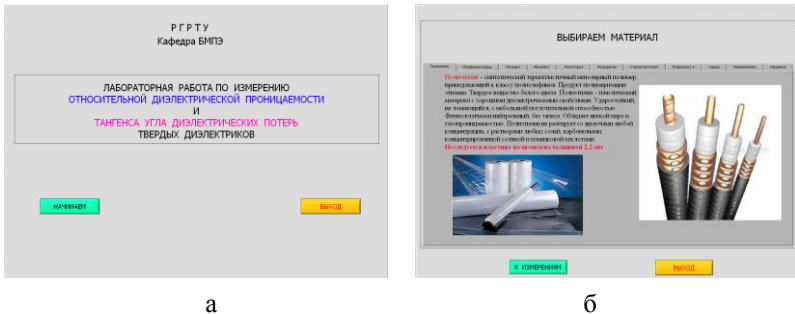


Рис. 12. Внешний вид окна начала работы (а) и выбора материала диэлектрика для исследования (б)

Измерение ϵ и $\text{tg}\delta$ диэлектрика необходимо производить в следующей последовательности.

Установить необходимую частоту генератора, используя кнопки выбора диапазона и движок на шкале плавного изменения частоты.

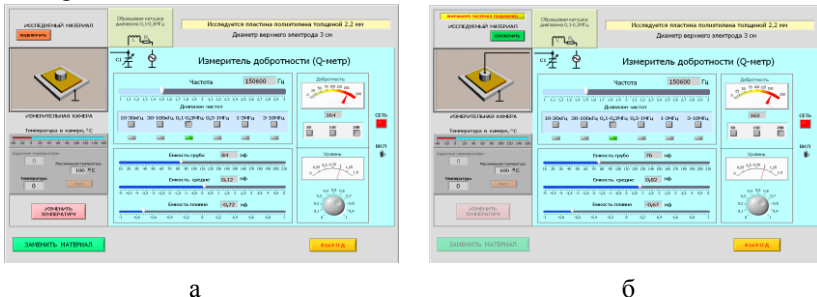


Рис. 13. Внешний вид окна для проведения измерений без подключенного к Q-метру исследуемого образца диэлектрика (а) и с подключенным образцом диэлектрика (б)

1. Ручкой под стрелочным индикатором «Уровень» установить стрелку на шкале прибора на 1.
2. Щелкнуть по кнопке «Изменить температуру» и в окно «Задатчик

температуры» ввести с клавиатуры нужную температуру в измерительной камере и нажать кнопку «Пуск». Дождаться момента установления заданной температуры в измерительной камере.

3. Изменяя значение емкости переменного конденсатора по шкалам «Емкость грубо», «Емкость средне» и «Емкость плавно», по стрелочному прибору «Добротность» добиться резонанса в колебательном контуре по максимальному отклонению стрелки прибора. Записать в черновике значение добротности Q_1 с цифрового индикатора внизу стрелочного прибора и значение емкости переменного конденсатора C_1 . Емкость конденсатора в пикофарадах определяется суммированием значений цифровых индикаторов под соответствующими шкалами изменения емкости переменного конденсатора.

4. Подключить образец диэлектрика щелчком по кнопке «Подключить образец» и повторить измерения в соответствии с п. 4. Новые величины добротности и емкости будут соответствовать значениям Q_2 и C_2 , измеренным при подключенном в контур диэлектрике.

5. Отключить образец кнопкой «Отключить образец», при необходимости изменить частоту или температуру в измерительной камере в соответствии с пп. 1-3 и продолжить в соответствии с пп. 4,5.

6. При необходимости выбрать другой диэлектрик, используя кнопку «Заменить материал».

3. Последовательность выполнения работы

1. Получить у преподавателя задание на исследование конкретного диэлектрика в указанном диапазоне температур и частот.

2. Для каждого значения температуры провести измерения Q_1 , C_1 и Q_2 , C_2 на фиксированной частоте и полученные значения занести в таблицу, пример которой показан ниже.

Диэлектрик 1								
Темпер.	Частота	Q_1	C_1	Q_2	C_2	C_x	ε	$\text{tg}\delta$

3. Рассчитать значения ε и $\text{tg}\delta$ для исследуемых диэлектриков по формулам (12) и (13) и построить графики зависимости этих параметров от частоты и температуры в соответствии с заданием.

4. Содержание отчета

4.1. Отчет выполняется каждым студентом индивидуально.

4.2. Отчет должен содержать:

- название работы;
- цель работы;
- основные теоретические сведения;
- схемы измерения;
- полученные расчетные данные;
- необходимые графики, требуемые по заданию;
- сравнение полученных данных со справочными материалами.

5. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

1. Что такое дипольный момент и на что он влияет в диэлектрике?
2. Чем отличается полярная молекула от неполярной?
3. Что такое поляризация диэлектрика и на что влияет это явление?
4. Дайте определение относительной диэлектрической проницаемости.
5. Перечислите основные виды поляризации.
6. Чем отличаются электронная поляризация от электронно-релаксационной, ионная от ионно-релаксационной?
7. Какие виды поляризации присущи полярным и неполярным диэлектрикам?
8. Нарисуйте график зависимости ϵ от частоты для полярных и неполярных диэлектриков.
9. Нарисуйте график зависимости ϵ от температуры для полярных и неполярных диэлектриков.
10. Что такое потери в диэлектриках?
11. Что такое $\text{tg}\delta$ для последовательной схемы замещения диэлектрика?
12. Что такое $\text{tg}\delta$ для параллельной схемы замещения диэлектрика?
13. Нарисуйте график зависимости $\text{tg}\delta$ от частоты для полярных и неполярных диэлектриков.
14. Нарисуйте график зависимости $\text{tg}\delta$ от температуры для полярных и неполярных диэлектриков.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОНДЕНСАТОРОВ

Цель работы: измерение с помощью прибора Q-метра емкости и добротности конденсатора при различных частотах и температурах, расчет эквивалентной схемы конденсатора.

1. Теоретические сведения

1.1. Общие сведения о конденсаторах

Конденсаторы, как и резисторы, представляют широкий класс компонентов современной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). В настоящее время имеется достаточно широкая номенклатура этих элементов, использующих последние достижения науки и техники. Продолжается разработка новых типов конденсаторов с более высокими электрическими, технологическими и эксплуатационными параметрами. Конденсатор – компонент РЭА, предназначенный для накопления электрической энергии и возвращения ее в электрическую цепь. Составляет из электродов (обкладок), разделенных диэлектриком.

Конденсатор характеризуется номинальной емкостью, допустимым отклонением емкости от номинального значения, номинальным рабочим напряжением, сопротивлением изоляции, добротностью и другими параметрами.

Номинальная емкость конденсатора – емкость, которую должен иметь конденсатор в соответствии с ГОСТом. Номинальное значение емкостей, в соответствии с рекомендациями МЭК (Международная электротехническая комиссия), стандартизовано и выбирается из определенных рядов чисел E3; E6; E12; E24; E48; E96; E192 (цифра указывает количество номинальных значений в каждой декаде). Так, например, для ряда E6 номинальные значения в пределах декады составляют величины 1.0; 1.5, 2.2; 3.3; 4.7; 6.8. Полное указание номинальной емкости состоит из цифры и обозначения единицы измерений: Ф – фарада; мкФ – микрофарада (10^{-6} Ф); нФ – нанофарада (10^{-9} Ф); пФ – пикофарада (10^{-12} Ф). Фактическое значение емкости может отличаться от номинального в пределах поля допуска, которое исчисляется в процентах от номинального значения и также подчиняется ряду. Имеются буквенная международная кодировка допусков и соответствующие отечественные обозначения. Стоит отметить, что большинство зарубежных компаний – производителей конденсаторов имеют свои условные обозначения типов и параметров конденсаторов. Таблица допусков и их условное обозначение представлены в приложении.

Емкость большинства конденсаторов зависит от температуры. Для ее учета вводят *температурный коэффициент емкости (ТКЕ)*, показывающий относительное изменение емкости при изменении температуры на один градус. Для обозначения используется буквенно-цифровая или цветовая (в виде цветных полос или цвета корпуса конденсатора) кодировка. По разновидности ТКЕ конденсаторы разделяют на конденсаторы с ненормируемым ТКЕ, с линейной зависимостью ТКЕ и нелинейной зависимостью ТКЕ.

Для конденсаторов с ненормируемым ТКЕ и нелинейной зависи-

мостью ТКЕ указывается разброс номинальной емкости в диапазоне рабочих температур. Для конденсаторов с линейной зависимостью емкости от температуры указывается температурный коэффициент $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ($\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$) в рабочем диапазоне температур (обычно $-60 +85$ $^{\circ}\text{C}$). Таблица условных обозначений ТКЕ представлена в приложении.

Номинальное рабочее напряжение – максимальное напряжение, при котором конденсатор может надежно работать в течение гарантированного срока с сохранением своих параметров. Номинальное напряжение меньше испытательного в 1,5...3 раза и значительно ниже пробивного. При испытательном напряжении конденсатор может работать лишь кратковременно. Номинальные напряжения также подчиняются стандартному ряду.

Сопротивление изоляции – сопротивление конденсатора постоянному току. $R_{\text{из}}=U/I_{\text{ут}}$, где U – напряжение; $I_{\text{ут}}$ – сквозной ток (ток утечки). Сквозной ток проводимости имеет электронную или ионную природу. Сопротивление изоляции конденсаторов всех видов, кроме электролитических, велико и выражается в мегаомах, гигаомах, тераомах (10^6 , 10^9 , 10^{12}).

Постоянная времени конденсатора $\tau=R_{\text{из}}*C$ характеризует конденсатор при использовании его в цепи постоянного тока. Постоянная времени обычно используется для характеристики пленочных конденсаторов.

Потери энергии в конденсаторе на заданной частоте определяет *тангенс угла потерь* $tg\delta$. Потери определяются типом диэлектрика, его качеством, температурой окружающей среды, частотой переменного тока. Изменение $tg\delta$ происходит в широких пределах от $(10-15) \cdot 10^{-4}$ для фторопластовых, слюдяных, высокочастотных керамических, полистирольных конденсаторов и до $(500-3500) \cdot 10^{-4}$ для оксидных.

Добротность конденсатора $Q = \frac{1}{tg\delta}$, где $tg\delta = tg\delta_{\epsilon} + tg\delta_M$. Суммар-

ные потери определяются потерями в диэлектрике и металлических обкладках. На высоких частотах потери за счет поверхностного эффекта растут и добротность конденсатора снижается. Добротность меняется также из-за частотной и температурной зависимости потерь в диэлектрике.

Конденсатор, включенный в цепь переменного тока, обладает полным сопротивлением (импедансом), включающим кроме емкости омическое сопротивление и индуктивность. На высоких частотах они оказывают большое влияние на амплитуду и форму напряжений и токов цепи, в которую включен конденсатор. Упрощенная эквивалентная схема и амплитудно-частотная характеристика модуля полного сопротивления конденсатора представлены на рис. 1.

На частоте f конденсатор имеет сопротивление (импеданс)

$$Z = \sqrt{r^2 + \left[\frac{1}{2\pi f C} - 2\pi f L \right]^2}. \quad (1)$$

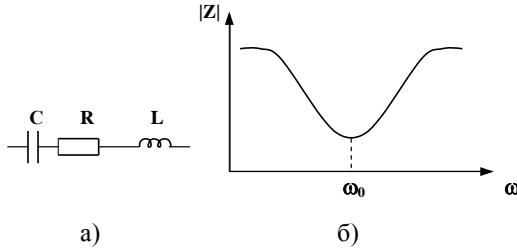


Рис. 1. Эквивалентная схема (а) и амплитудно-частотная характеристика модуля полного сопротивления конденсатора (б)

На высоких частотах конденсатор можно рассматривать как последовательный колебательный контур с резонансной частотой

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{\text{п}}C}}. \quad (2)$$

На резонансной частоте компенсируются емкостная и индуктивная составляющие импеданса, т. е. $\frac{1}{2\pi f C} = 2\pi f L$. Сопротивление резко

снижается, и конденсатор имеет чисто активное сопротивление. На частотах ниже резонансной реактивное сопротивление носит емкостный характер, на частоте выше резонансной – индуктивный (рис. 1, б). Резонансная частота должна быть в 2-3 раза выше рабочей.

Паразитная индуктивность обычно мала, составляет единицы нГн у керамических, слюдяных конденсаторов и сотни нГн у бумажных и пленочных конденсаторов большого номинала. В конденсаторах, изготовленных из диэлектрика с релаксационными видами поляризации, снижение емкости на частотах $10^5 \dots 10^6$ Гц связано с уменьшением диэлектрической проницаемости. В электролитических конденсаторах емкость начинает уменьшаться уже на частотах $10^2 \dots 10^4$ Гц.

1.2. Конденсаторы для современной малогабаритной РЭА

Современная РЭА характеризуется повсеместной миниатюризацией и уменьшением ее массогабаритных характеристик. Широкое применение больших интегральных микросхем (БИС) позволило резко снизить размеры и массу большинства образцов РЭА. Применение поверхностного монтажа элементов и миниатюризация пассивных компонентов электронных устройств потребовали уменьшения размеров конденсаторов основных типов, соизмеримых по габаритным характе-

ристикам с размерами основных элементов для поверхностного монтажа. Такие конденсаторы выпускаются в специальных корпусах (SMD), и их называют ЧИП конденсаторы. Пример такого рода конденсаторов показан на рис. 2. Обычно ЧИП конденсаторы упаковываются в ленту, которая снабжена перфорацией и позволяет легко выбирать их различными автоматами при установки на печатную пла-

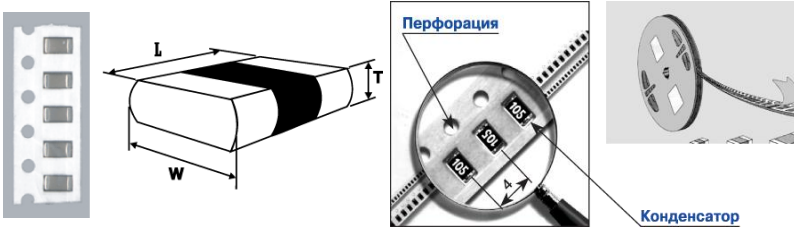


Рис. 2. ЧИП конденсаторы

ту.

Линейные размеры таких конденсаторов лежат в пределах от десятых долей до единиц миллиметров. ЧИП конденсаторы используются в малогабаритных, переносных и других типах РЭА. В настоящее время как у нас в стране, так и за рубежом большое количество компаний производят ЧИП конденсаторы от простых керамических до электролитических с величинами номиналов от единиц пикофарад до десятков микрофарад. Такие конденсаторы могут использоваться практически в любых диапазонах частот. В качестве примера ниже в табл. 1 и 2 приведены типовые размеры и некоторые параметры ЧИП конденсаторов компании производителя Vibrant Development.

Таблица 1

Типоразмеры ЧИП конденсаторов компаний Vibrant Development

Типоразмер	L	W	H		A
			Min	Max	
1210	3,2 мм	2,60 мм	1,0 мм	1,25 мм	0,75 мм

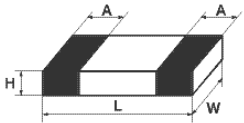


Таблица 2

Параметры ЧИП конденсаторов компаний Vibrant Development

Диэлектрик	NPO	X7R
Диапазон номинальных емкостей	1пФ - 3.3нФ	470 пФ-0.1мкФ
Диапазон рабочих температур	-55 + 125 °С	-55 + 125 °С

2. Методика проведения измерений

В данной работе определяются параметры конденсатора: номинальная емкость, $\text{tg}\delta$, активное сопротивление потерь и ТКЕ. В лабораторной работе измерение параметров конденсаторов производится хорошо известным резонансным методом с применением прибора - измерителя добротности, или Q-метра. Как следует из его названия, он может применяться для измерения добротности Q и обычно применяется при измерении добротности катушек индуктивности. Упрощенная

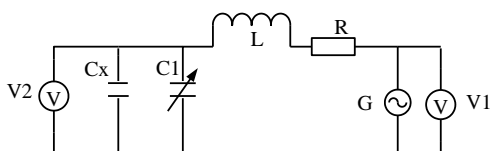


Рис. 3. Упрощенная схема измерителя добротности (Q-метра)

схема Q-метра показана на рис. 3.

В приборе используется явление резонанса в высокодобротном последовательном колебательном контуре. Этот контур сформирован образцовой высокодобротной катушкой индуктивности L и образцовым (обычно воздушным) переменным конденсатором $C1$. На контур подается напряжение с высокочастотного генератора G , частоту f которого можно изменять в широких пределах. На определенной частоте f_0 сигнала генератора G , изменяя емкость конденсатора $C1$, контур настраиваем в резонанс, который фиксируется по максимальному значению напряжения на вольтметре $V2$. Сопротивление R характеризует общие потери во всех элементах колебательного контура. В момент резонанса добротность контура Q определяется как отношение показаний вольтметров $V2$ и $V1$, т.е. $Q = V2/V1$. Если поддерживать напряжение генератора на известном уровне (например, 1 В), то шкалу вольтметра $V2$ можно проградуировать в значениях добротности.

Если в контур вносится дополнительная емкость Cx , например в виде емкости исследуемого конденсатора, то изменяются резонансная частота контура и его добротность. Резонансная частота изменяется за счет увеличения суммарной емкости контура $C = C1 + Cx$, а добротность контура снижается за счет потерь различного типа, возникающих в подключенном конденсаторе. Настраивая контур вновь в резонанс на этой же частоте f_0 , по разности показаний конденсатора $C1$ можно определить величину емкости Cx , т.е. это и есть емкость исследуемого конденсатора.

Уменьшение добротности контура позволит оценить величину потерь, вносимых конденсатором в колебательный контур, а следова-

тельно, и его $\text{tg}\delta$. При этом $\text{tg}\delta$ можно рассчитать по формуле

$$\text{tg}\delta = \frac{(Q_1 - Q_2) \cdot C_1}{Q_1 \cdot Q_2 \cdot (C_1 - C_2)}, \quad (3)$$

где Q_1 и C_1 – добротность контура и емкость переменного конденсатора при неподключенном исследуемом конденсаторе, Q_2 и C_2 – добротность контура и емкость переменного конденсатора при подключенном к Q-метру исследуемом конденсаторе.

3. Выполнение лабораторной работы

Лабораторная работа выполняется путем моделирования процесса измерения резонансным методом емкости исследуемого конденсатора и тангенса угла его диэлектрических потерь с применением прибора – измерителя добротности (Q-метра). Для этого используется специальная программа, выполняемая на персональном компьютере (ПК). В эту программу заложены модели изменения характеристик ряда конденсаторов от изменения параметров окружающей среды и внешних воздействий, а также используется модель прибора Q-метр. Принцип измерения C_x и $\text{tg}\delta$ описан выше. При подготовке к работе необходимо изучить методические указания к лабораторной работе.

Для начала работы необходимо запустить файл «Лаб_конденсатор» на Рабочем столе ПК, после чего появится окно, изображенное на рис. 4,а. Оно отображает название выполняемой лабораторной работы и кнопки управления, назначение которых интуитивно понятно. Управление программой осуществляется обычным способом, применяемым повсеместно в операционной системе Windows. После щелчка по кнопке «Начинаем» появится окно выбора



Рис. 4. Окна запуска лабораторной работы

конденсатора, как показано на рис. 4,б.

Выбор конденсатора осуществляется щелчком по соответствующей закладке с названием конденсатора. На закладке представлены описание и некоторые характеристики выбранного типа конденсаторов

для исследования в лабораторной работе.

3.1. Проведение измерений

После щелчка по кнопке «К измерениям» открывается окно проведения измерений прибором Q-метр, показанное на рис. 5. В этом окне отображаются прибор - измеритель добротности и измерительная камера с образцом конденсатора. На рис. 5,а исследуемый конденсатор не подключен к прибору Q-метр, а на рис. 5,б подключен. Здесь же отображается функциональная схема подключения исследуемого кон-

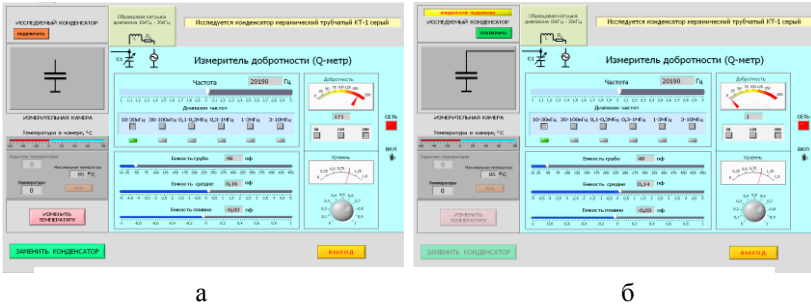


Рис. 5. Окно проведения измерений прибором Q-метр

денсатора.

Необходимо включить прибор щелчком по тумблеру «Сеть». По умолчанию в измерительной камере установлена температура 20 °С. Измерение параметров конденсатора необходимо производить в следующей последовательности.

1. Установить необходимую частоту генератора, используя кнопки выбора диапазона и движок на шкале плавного изменения частоты.
2. Ручкой под стрелочным индикатором «Уровень» установить стрелку на шкале прибора на отметку «1».
3. Щелкнуть по кнопке «Изменить температуру», в окно «Задатчик температуры» ввести с клавиатуры нужную температуру в измерительной камере и нажать кнопку «Пуск». Дождаться момента установления заданной температуры в измерительной камере.

4. Изменяя значение емкости переменного конденсатора по шкалам «Емкость грубо», «Емкость средне» и «Емкость плавно», по стрелочному прибору «Добротность» добиться резонанса в колебательном контуре по максимальному отклонению стрелки прибора. Записать в черновике значение добротности Q_1 с цифрового индикатора внизу стрелочного прибора и значение емкости переменного конденсатора C_1 . В процессе проведения измерений на одной частоте значения Q_1 и емкость C_1 остаются постоянными. Емкость конденсатора в пикофарадах определяется суммированием значений цифровых индикаторов под соответствующими шкалами изменения емкости переменного

конденсатора.

5. Подключить исследуемый конденсатор щелчком по кнопке «Подключить образец» и повторить измерения в соответствии с п. 4. Новые величины добротности и емкости будут соответствовать значениям Q_2 и C_2 , измеренным при подключенном в контур конденсаторе.

6. Отключить образец кнопкой «Отключить образец», при необходимости изменить частоту или температуру в измерительной камере в соответствии с пп. 1-3 и продолжить измерения как в пп. 4,5.

7. При необходимости выбрать другой конденсатор, используя кнопку «Заменить конденсатор».

4. Последовательность выполнения работы

1. Получить у преподавателя задание на исследование конкретных конденсаторов в указанном диапазоне температур и частот.

2. Для каждого значения температуры провести измерения Q_1 , C_1 и Q_2 , C_2 на фиксированной частоте и полученные значения занести в таблицу, пример которой показан ниже.

3. Рассчитать значения C , X_C , Q , R_{Π} для исследуемых конденсаторов по формулам (4) – (8) и построить графики зависимости этих параметров от частоты и температуры в соответствии с заданием преподавателя:

$$\text{– емкость конденсатора } C = C_2 - C_1; \quad (4)$$

$$\text{– реактивное сопротивление } X_C = \frac{1}{2\pi f C}; \quad (5)$$

$$\text{– добротность конденсатора } Q = \frac{(C_2 - C_1)Q_1Q_2}{C_1(Q_1 - Q_2)}; \quad (6)$$

$$\text{– активное сопротивление } R_{\Pi} = \frac{C_1Q_1/Q_2 - Q_1}{2\pi f C_1Q_1Q_2}; \quad (7)$$

$$\text{– тангенс угла потерь конденсатора } \operatorname{tg}\delta = 1/Q. \quad (8)$$

4. Определить ТКЕ конденсатора в указанном диапазоне температур и сопоставить его со значениями, указанными в приложении к лабораторной работе.

5. Содержание отчета

5.1. Отчет выполняется каждым студентом индивидуально.

5.2. Отчет должен содержать:

- название работы;
- цель работы;

- основные теоретические сведения;
- схемы измерения;
- полученные расчетные данные;
- необходимые графики, требуемые по заданию;
- сравнение полученных данных со справочными материалами.

6. Классификация и маркировка конденсаторов

Классифицируют конденсаторы по типу диэлектрика. Сокращенные обозначения содержат три элемента. Первый элемент - буква или сочетание букв - определяет тип конденсатора (К - постоянной емкости; КП - переменной емкости; КТ - подстроечный; КС - конденсаторной сборки). Второй элемент – число, обозначающее используемый вид диэлектрика: 10 – керамические на номинальное напряжение до 1600 В; 15 – керамические на номинальное напряжение 1600 В и выше; 20 – кварцевые; 21 – стеклянные; 22 – стеклокерамические; 23 – стекломалеваые; 31 – слюдяные малой мощности; 32 – слюдяные большой мощности; 40 – бумажные на номинальное напряжение до 2 кВ с обкладками из фольги; 41 – бумажные на номинальное напряжение 2 кВ и выше с обкладками из фольги; 50 – электролитические фольговые алюминиевые; 51 – электролитические фольговые танталовые, ниобиевые и др.; 52 – электролитические объемно-пористые; 53 – полупроводниковые оксидные; 54 – металлические оксидные; 60 – воздушные; 61 – вакуумные; 71 – полистирольные; 72 – фторопластовые; 73 – полиэтилентерефталатные лавсановые; 74 – комбинированные; 76 – лакопленочные; 77 – поликарбонатные. Третий элемент – порядковый номер, присваиваемый при разработке. Дополнительно может содержать буквенное обозначение (П – для работы в цепях постоянного и переменного токов; Ч – для работы в цепях переменного тока; И – для работы в импульсных режимах; У – для работы в цепях постоянного тока и в импульсных режимах).

Обозначения и маркировка применяются двух типов в зависимости от размера конденсатора. На конденсаторах большого размера обозначаются тип, номинальная емкость, допустимое отклонение емкости в процентах, номинальное напряжение, марка завода-изготовителя, месяц и год выпуска.

При маркировке применяются обозначения полные или сокращенные (кодированные). Кодированные обозначения номинальной емкости состоят из трех или четырех знаков, включающих две или три цифры и букву. Буква обозначает множитель p , n , μ , m , F (соответственно 10^{-12} , 10^{-9} , 10^{-6} , 10^{-3} , 1) для значений емкости, выраженных в фарадах. Например, 5,6 пФ–5р6; 150 пФ–150р(п15); 2,2 мкФ–2 μ 2; 10

мФ-10т. Кодированные обозначения допустимых отклонений приводятся в справочной литературе (в таблицах).

Ниже представлена кодировка допускаемых отклонений емкости конденсаторов. Буквенное обозначение допуска указано для международного и российского стандартов.

Допуск, %	Буквенное обозначение	Цвет
$\pm 0,1$ пФ*	В (Ж)	Не указан
$\pm 0,25$ пФ*	С (У)	Оранжевый
$\pm 0,5$ пФ*	D (Д)	Желтый
± 1 пФ*	F (Р)	Коричневый
± 2	G (Л)	Красный
± 5	J (И)	Зеленый
± 10	K (С)	Белый
± 20	M (В)	Черный
± 30	N (Ф)	Не указан
-10...+30	Q (О)	Не указан
-10...+50	T (Э)	Не указан
-10...+100	Y (Ю)	Не указан
-20...+50	S (Б)	Фиолетовый
-20...+80	Z (А)	Серый
* Для конденсаторов емкостью меньше 10 пФ		

Кодировка ТКЕ конденсаторов.

Конденсаторы с ненормируемым ТКЕ			
Группа ТКЕ	Допуск при -60...+85 °С (%)	Буквенный код	Цвет*
H10	± 10	B	Оранжевый (+черный)
H20	± 20	Z	Оранжевый (+красный)
H30	± 30	D	Оранжевый (+зеленый)
H50	± 50	X	Оранжевый

			(+голубой)
H70	± 70	E	Оранжевый (+фиолетовый)
H90	± 90	F	Оранжевый (+белый)
* Современная цветовая кодировка. Цветные полоски или точки. Второй цвет может быть представлен цветом корпуса.			

Конденсаторы с линейной зависимостью емкости от температуры

Обозначение ГОСТ	Международное	ТКЕ (ppm/°C) *	Буквенный код	Цвет**
П100	P100	+100	A	Красный (+фиолетовый)
П33		+33	N	Серый
МП0	NP0	0(+30...-75)	C	Черный
M33	N030	-33 (+30...-80)	H	Коричневый
M47	N050	-47 (+30...-80)	M	Желтый
M75	N080	-75 (+30...-80)	L	Красный
M150	N150	-150 (+30...-105)	P	Оранжевый
M220	N220	-220 (+30...-120)	R	Желтый
M330	N330	-330 (+60...-180)	S	Зеленый

M470	N470	-470 (+60...-210)	T	Голубой
M750	N750	-750 (+120...-330)	U	Фиолетовый
M1500	N1500	-1500(-1300)	V	Оранжевый (+оранжевый)
M2200	N2200	-2200	K	Желтый (+оранжевый)

* В скобках приведен реальный разброс для импортных конденсаторов в диапазоне температур -55...+85°C.

** Современная цветовая кодировка. Цветные полосы или точки. Второй цвет может быть представлен цветом корпуса.

Конденсаторы с нелинейной зависимостью от температуры

Группа ТКЕ*	Допуск, %	Температура,** °С	Буквенный код***	Цвет***
Y5F	± 7,5	-30...+85		
Y5P	± 10	-30...+85		Серебряный
Y5R		-30...+85		Серый
Y5S	± 22	-30...+85	R	Коричневый
Y5U	+22...-56	-30...+85	S	
Y5V (2F)	+22...-82	-30...+85	A	
X5F	± 7,5	-55...+85		
X5P	± 10	-55...+85		
X5S	± 22	-55...+85		
X5U	+22...-56	-55...+85		Синий

X5V	+22...-82	-55...+85		
X7R (2R)	± 15	-55...+85		
Z5F	± 7,5	-10...+85	B	
Z5P	± 10	-10...+85	C	
Z5S	± 22	-10...+85		
Z5U (2E)	+22...-56	-10...+85	E	
Z5V	+22...-82	-10...+85	F	Зеленый
<p>* Обозначение приведено в соответствии со стандартом EIA, в скобках - IEC.</p> <p>** В зависимости от технологий, которыми обладает фирма, диапазон может быть другим.</p> <p>*** В соответствии с EIA. Некоторые фирмы пользуются другой кодировкой.</p>				
		Отечественное обозначение ТКЕ	Замена на:	
		M1500, M750	X7R	
		H10, H20, H30, H50, H70, H90	Y5V	
		П33, МП0, М47	NP0	

7. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

1. От чего зависит емкость конденсатора?
2. Для чего используют конденсаторы в РЭА?
3. Что такое тангенс дельта и добротность конденсатора?
4. От чего зависит добротность конденсатора?
5. Нарисуйте эквивалентную схему конденсатора и объясните назначение ее элементов.
6. Что такое номинальная емкость конденсатора и допускаемые отклонения?
7. Что такое ТКЕ и от чего он зависит?
8. Как классифицируются конденсаторы?
9. Как сокращенно обозначаются значения емкости конденсаторов?

10. Из каких диэлектрических материалов выполняются конденсаторы?
11. Объяснить зависимости, полученные в работе.
12. Объяснить график частотной зависимости полного сопротивления конденсатора.
13. На какие группы разделяют ТКЕ конденсаторов?
14. Как добротность конденсатора зависит от температуры?
15. Как добротность конденсатора зависит от частоты?
16. Каковы конструктивные особенности СВЧ конденсаторов?
17. Какие конструктивные особенности конденсаторов для малогабаритной аппаратуры?
18. Почему растет $\operatorname{tg}\delta$ конденсатора на высоких частотах?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: изучение методов измерения пробивного напряжения и определение электрической прочности диэлектрических материалов

1. Основные теоретические сведения

1.1. Электрический пробой твердых диэлектриков

Надежность и долговечность электрической изоляции проводов, диэлектрика конденсаторов и других деталей радиоэлектронной аппаратуры, особенно работающих при повышенных электрических напряжениях, зависят от электрической прочности диэлектрика. Электрическая прочность диэлектрика зависит от напряжения пробоя U_{np} , т.е. напряжения, при котором происходит пробой диэлектрика, а именно потеря диэлектриком изолирующих свойств.

Электрическую прочность диэлектрика в однородном электрическом поле определяют величиной пробивного напряжения U_{np} , отнесенной к толщине диэлектрика d или расстоянию между электродами, – т.е. напряженностью электрического поля при пробое E_{np} . Пробивное напряжение U_{np} в большинстве случаев прямо пропорционально величине d , зависит от параметров диэлектрика и окружающей среды и характеризует конкретную конструктивную особенность данного изделия. Напряженность электрического поля при пробое E_{np} не зависит от толщины и поэтому характеризует электрическую прочность материала диэлектрика:

$$E_{np} = \frac{U_{np}}{d}. \quad (1)$$

Электрическая прочность измеряется в В/м, однако допускаются

производные единицы измерения: МВ/м, кВ/мм, кВ/см. Величина $E_{пр}$ характеризует способность диэлектрика противостоять разрушающему действию электрического поля и зависит в первую очередь от агрегатного состояния изолятора и его свойств.

Различают четыре вида электрического пробоя твердых диэлектриков.

- 1) электрический пробой макроскопически однородных диэлектриков;
- 2) электрический пробой неоднородных диэлектриков;
- 3) тепловой (электротепловой) пробой;
- 4) электрохимический пробой.

Каждый из указанных видов пробоя может иметь место для одного и того же материала в зависимости от характера электрического поля (постоянного или переменного, импульсного, низкой или высокой частоты), наличия в диэлектрике дефектов, в частности закрытых пор, от условий охлаждения, времени воздействия напряжения.

Электрический пробой обычно происходит в диэлектриках с низкой электропроводностью, низким тангенсом угла диэлектрических потерь и хорошим отводом тепла.

1. Электрический пробой макроскопически однородных диэлектриков характеризуется весьма быстрым развитием. Он протекает за время, меньшее $10^{-7} - 10^{-8}$ с, и не обусловлен тепловой энергией, хотя электрическая прочность при электрическом пробое в некоторой степени все же зависит от температуры.

Электрический пробой по своей природе является чисто электронным процессом, когда из немногих изначально свободных электронов в твердом теле создается электронная лавина. Под действием электрического поля и имея некоторую длину свободного пробега λ , электроны разгоняются и получают дополнительную кинетическую энергию $W = qU_{\lambda}$, где q - заряд; U_{λ} - падение напряжения на длине свободного пробега λ . Электроны, достигшие определенной критической скорости при столкновении с нейтральной молекулой или атомом, могут производить отщепление одного или нескольких новых электронов. Каждый из отщепленных от атомов и молекул электронов может ускоряться электрическим полем и выбить при достаточно набранной энергии еще несколько других электронов. Таким образом, возникает лавинообразное увеличение количества свободных электронов и за счет лавинного умножения таких электронов возникает участок в диэлектрике с повышенной проводимостью.

Это приводит к резкому возрастанию проводимости твердого диэлектрика в месте формирования электронной лавины, и возникает явление электрического пробоя. Как правило, резкое возрастание тока

приводит к повышенному выделению тепла и в месте возникновения лавины происходит разрушение структуры диэлектрика.

Чисто электрический пробой имеет место, когда исключено влияние разогрева диэлектрика за счет высокой электропроводности и диэлектрических потерь, также обуславливающих нагрев материала, а также отсутствует ионизация газовых включений. Для однородного поля и полной структурной однородности материала напряженность поля при электрическом пробое может служить мерой электрической прочности вещества. Такие условия удается наблюдать для монокристаллов щелочно-галлоидных соединений и некоторых органических полимеров. В этом случае $E_{пр}$ достигает сотен мегавольт на метр и более. Для однородных материалов наблюдается существенная разница между значениями пробивного напряжения в однородном и неоднородном электрических полях.

2. *Электрический пробой неоднородных диэлектриков* характерен для технических диэлектриков, содержащих газовые включения. Также, как и электрический пробой однородного диэлектрика, он весьма быстро развивается.

Наличие газовых включений и других неоднородностей с величиной диэлектрической проницаемости ϵ , меньшей чем в самом материале диэлектрика, приводит к неравномерному распределению напряженности электрического поля по объему материала. Это влечет увеличение напряженности электрического поля в веществе с меньшей величиной ϵ и первоначальное возникновение пробоя именно в этом месте. Возникновение пробоя, например в газовом промежутке, приводит к нарушению структуры вещества диэлектрика в месте его соприкосновения с неоднородностью и местному разогреву. Возникают локальные механические и тепловые напряжения, приводящие к растрескиванию вещества. Все это ведет к росту проводимости в локальном месте диэлектрика, увеличению плотности тока и дальнейшему разогреву. Электропроводность диэлектриков увеличивается с ростом температуры, и, следовательно, растет ток в локальном месте. Таким образом формируется лавинообразный процесс увеличения электропроводности в локальном месте диэлектрика и возникает пробой. Напоминаем, что причиной этого процесса являлась неоднородность в структуре диэлектрика.

Пробивные напряжения для неоднородных диэлектриков, находящихся во внешнем однородном или неоднородном поле, как правило, имеют невысокие значения и мало отличаются друг от друга.

Принято считать, что в однородном поле электрическая прочность стекол, фарфора и других твердых диэлектриков не зависит от толщины образца. Однако основные работы по изучению влияния сте-

пени однородности поля на электрическую прочность проводились лишь со стеклом при очень малых толщинах образцов - от 0,05 до 0,2 - 0,5 мм, когда число дефектов невелико. Понятно, что с увеличением толщины образца усиливается неоднородность структуры, возрастает число газовых включений и снижаются электрические прочностные характеристики как в однородном, так и в неоднородном поле. Иногда на опыте можно видеть, что электрическая прочность керамики при электродах, создающих внешнее неоднородное поле, будет даже выше, чем при электродах, обеспечивающих однородное поле. Так, электрическая прочность образцов рутиловой керамики толщиной 1,6 - 1,7 мм при постоянном напряжении для электродов игла - плоскость составляет примерно 24 МВ/м, а для плоских электродов - всего 12,5 - 15 МВ/м.

Из этого следует, что чем меньше площадь электродов, тем выше может быть значение электрической прочности керамических материалов вследствие уменьшения числа инородных включений, попадающих в пределы поля, хотя поле в этом случае резко неоднородное. Снижение электрической прочности твердых диэлектриков при увеличении площади электродов наблюдается не только у керамики, но и у других материалов: бумаги, картона, лакотканей.

Электрическая прочность твердых диэлектриков практически не зависит от температуры до некоторого ее значения. Выше этого значения наблюдается заметное снижение электрической прочности, что говорит о появлении теплового механизма пробоя.

Низкой электрической прочностью отличаются диэлектрики с открытой пористостью (непропитанная бумага, дерево, пористая керамика). Электрическая прочность их сравнительно мало отличается от таковой для воздуха; исключение составляет бумага с повышенной плотностью. Твердые диэлектрики с закрытыми порами, например плотная керамика, характеризуются более высокой электрической прочностью. Наличие газовых включений в твердой изоляции особенно опасно при высоких частотах. На высоких частотах в газовых промежутках возникает сильная ионизация и возможно образование плазмы. Это приводит к появлению активных химических веществ по краям газового включения, которые могут иметь более высокую проводимость, инициировать локализацию тока и вызвать электрический пробой в локальном месте, как описано выше. Электрический пробой неоднородных диэлектриков при прочих равных условиях требует применять материалы с большей толщиной для улучшения изоляционных свойств электроустановок.

Высокой электрической прочностью характеризуются диэлектрики, имеющие плотную структуру и не содержащие газовых включений. К ним относятся: слюда, пропитанная жидким диэлектриком бу-

мага, стекла. Статистические исследования напряжения пробоя диэлектриков показали, что коэффициент вариации (Квар) напряжения пробоя для неоднородных диэлектриков превышает значение 0,15, а для однородных - менее 0,15. Чем однороднее диэлектрик, тем меньше для него значение Квар.

3. *Тепловой пробой.* Характерен для диэлектриков с высокой электропроводностью, большим значением тангенса угла диэлектрических потерь и плохим теплоотводом. Этот пробой сводится к разогреву материала в электрическом поле до температур, соответствующих потере им электроизоляционных свойств в локальном месте, связанной с чрезмерным возрастанием сквозной электропроводности или диэлектрических потерь. Пробивное напряжение при тепловом пробое зависит от целого ряда факторов: частоты электрического поля, условий охлаждения, температуры окружающей среды и др. При нахождении

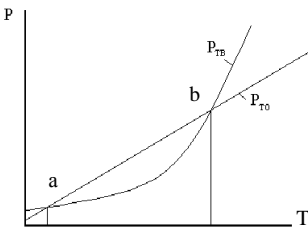


Рис. 1. Зависимости мощности выделения тепла ($P_{ТВ}$) и мощности отвода тепла ($P_{ТО}$) от температуры

диэлектрика в электрическом поле часть энергии электрического поля рассеивается в диэлектрике из-за диэлектрических потерь, сквозной проводимости, в результате чего диэлектрик нагревается. Повышение температуры диэлектрика по сравнению с окружающей средой ведет к увеличению теплоотвода. Дальнейшее развитие процессов зависит от соотношения скоростей отвода тепла и тепловыделения. На рис.1 показаны зависимости мощности тепловыделения ($P_{ТВ}$) и мощности отвода тепла ($P_{ТО}$) от температуры окружающей среды для неполярного диэлектрика.

Как видно из приведенного рисунка, в области температур от точки a до точки b мощность отвода тепла превышает мощность тепловыделения, поэтому повышения температуры не происходит, т.е. система находится в равновесии. Для перехода в область за точку b необходимо дополнительное выделение тепла. Это обусловлено тем, что при росте температуры увеличивается электропроводность диэлектрика, растут ток и выделяемое в диэлектрике тепло. Рост температуры увеличивает электропроводность и выделяемое тепло. Создается лавнообразный процесс увеличения тепловыделения, кривая тепловыделения $P_{ТВ}$ на рис. 1 поднимается выше кривой теплоотвода и начинается необратимый разогрев диэлектрика, приводящий к его пробое и разрушению. Этот процесс может происходить достаточно быстро, и

температура диэлектрика начинает быстро расти. Нагрев материала диэлектрика может привести к его растрескиванию, оплавлению, обугливанию, что снижает электрическую прочность диэлектрика и ведет к его разрушению.

Очевидно, что стойкость к электротепловому пробоям зависит как от свойств самого материала (у полярных диэлектриков диэлектрические потери выше и стойкость к электротепловому пробоям ниже), так и от конструкции изолятора. Чем больше поверхность изолятора, тем больше тепла рассеивается в окружающую среду и меньше вероятность электротеплового пробоя.

Следует также отметить, что в случае, когда рабочая температура изолятора приближается к точке b , любое повышение температуры приведет к выходу изоляции из строя. В то же время в случае, когда рабочая температура находится ниже точки b , колебания температуры не столь опасны. Нагрев диэлектрика (при нахождении его при температуре ниже точки b) приведет к увеличению мощности отвода тепла. Поэтому мощности выделения и отвода тепла сравниваются.

4. *Электрохимический пробой* имеет особенно существенное значение при нахождении диэлектрика в химически агрессивных средах, при повышенной температуре и высокой влажности воздуха. Этот вид пробоя наблюдается при постоянном и переменном напряжении низкой частоты, когда в материале развиваются электролитические процессы, обуславливающие необратимое уменьшение сопротивления изоляции. Уменьшение сопротивления диэлектрика стимулирует увеличение через него тока и дополнительное выделение тепла. Температура диэлектрика возрастает, и это активизирует электролитические и электрохимические процессы в веществе, что в свою очередь уменьшает сопротивление изоляции и приводит к росту тепловыделения. Таким образом, возникает лавинообразный процесс роста температуры изоляции и к ее разрушению.

Такое явление часто называют старением диэлектрика в электрическом поле, поскольку оно приводит к постепенному снижению электрической прочности, заканчивающемуся пробоем при напряженности поля, значительно меньшей пробивной напряженности, полученной при кратковременном испытании. Это явление имеет место в органических (пропитанная бумага, резина и т.д.) и некоторых неорганических диэлектриках (например, титановая керамика).

Электрохимический пробой требует для своего развития длительного времени. Это связано с явлением электропроводности, приводящим к медленному выделению в материале малых количеств химически активных веществ, или с образованием полупроводящих соединений. В керамике, содержащей окислы металлов переменной валентно-

сти (например, TiO_2), электрохимической пробой встречается значительно чаще, чем в керамике, состоящей из окислов алюминия, кремния, магния, бария.

Наличие щелочных окислов в алюмосиликатной керамике способствует возникновению электрохимического пробоя и ограничивает допустимую рабочую температуру. При электрохимическом пробое большое значение имеет материал электрода. Серебро, из которого могут быть выполнены электроды, способно диффундировать в керамику и облегчает электрохимический пробой в противоположность, например, золоту.

1.2. Физические явления электрического пробоя в газообразных диэлектриках

Внешней изоляцией во многих видах электротехнических конструкций, таких как трансформаторы, конденсаторы, линии электропередачи, служит воздух. Электрическая прочность воздуха в нормальных условиях невелика по сравнению с $E_{\text{пр}}$ большинства жидких и твердых диэлектриков.

Небольшое число содержащихся в газе положительных и отрицательных ионов и электронов вызвано в основном внешними воздействиями (радиационный фон, ультрафиолетовое излучение и др.). Эти носители зарядов, как и нейтральные молекулы газа, находятся в беспорядочном тепловом движении. При наложении электрического поля заряды получают некоторую добавочную скорость и начинают перемещаться вдоль вектора поля или в противоположном направлении, в зависимости от знака заряда. При этом заряженная частица в газе приобретает дополнительную энергию

$$W = qU_{\lambda}, \quad (2)$$

где q - заряд; U_{λ} - падение напряжения на длине свободного пробега λ носителя заряда

Если поле достаточно однородно, то можно принять $U_{\lambda} = E\lambda$, где E - напряженность поля. Отсюда

$$W = Eq\lambda. \quad (3)$$

Добавочная энергия заряженных частиц сообщается молекулам, с которыми они сталкиваются. Если эта энергия достаточно велика, происходит возбуждение атомов и молекул, связанное с переходом электрона на более удаленную от ядра орбиту, или даже ионизация молекул, т. е. их расщепление на электроны и положительные ионы. Условие, определяющее возможность ионизации:

$$W \geq W_{\text{и}}, \quad (4)$$

причем W включает в себя и энергию теплового движения, обычно

небольшую при нормальной температуре.

Из формул (2) и (3) получаем условие ионизации нейтральной молекулы вещества:

$$Eq\lambda \geq W_{и} \cdot \quad (5)$$

Энергию ионизации $W_{и}$ обычно характеризуют ионизационным потенциалом

$$U_{и} = W_{и}/q \cdot \quad (6)$$

Ионизационный потенциал большинства различных газов изменяется в пределах от 4 до 25 эВ, что соответствует энергии ионизации 4 - 25 эВ.

При заданных значениях давления газа и температуры ударная ионизация начинается при определенной напряженности поля, поскольку q и λ постоянны для каждого газа при данных конкретных условиях. Эта напряженность поля $E_{пр}$ называется начальной напряженностью.

В некоторых газах, например в кислороде, углекислом газе, парах воды, отделившийся электрон при одной из ближайших встреч с другой нейтральной молекулой соединяется с ней, превращая ее в электроотрицательный ион. Присоединение, «прилипание» электрона к нейтральной молекуле приводит в подобных случаях к такой перестройке ее электронной оболочки, что в итоге энергия молекулы, захватившей лишний электрон, оказывается меньше энергии нейтральной молекулы на некоторую величину, которую называют энергией сродства к электрону. Она колеблется у большинства различных газов в пределах 0,75 - 4,5 эВ. В инертных газах - в аргоне, неоне, гелии, криптоне, ксеноне, а также в азоте - отрицательные ионы не возникают. При разряде в воздухе образуются положительные ионы газов, содержащихся в атмосфере: O^+ , O_2^+ , N^+ , N_2^+ , NO^+ .

Скорость электрона (километр в секунду), прошедшего без столкновений разность потенциалов U (вольт), определяется выражением

$$v \approx 600\sqrt{U} \cdot \quad (7)$$

Подставляя в эту формулу ионизационные потенциалы, получаем, что электрон способен ионизировать газовые молекулы, когда скорость его движения свыше 1000 км/с.

Казалось бы, подобно электронам, и положительные ионы, разогнанные полем, сталкиваясь с нейтральными частицами газа, должны вызывать ионизацию газа. В действительности при энергиях до сотен и тысяч электрон-вольт соударения положительных ионов с частицами газа непосредственно не приводят к ионизации газа. Такое различное действие электронов и положительных ионов на частицы газа объясня-

ется тем, что электроны имеют значительно большую подвижность, чем ионы. Кроме того, отщепляемый электрон отталкивается электроном, столкнувшимся с частицей газа, и, наоборот, притягивается положительным ионом. Сказывается также и то, что для электрона длина свободного пробега больше, чем для иона. Если положительный ион, разогнанный полем, испытывает соударение с периферическим электроном на внешней электронной оболочке нейтральной частицы, то условия для отщепления электрона оказываются неблагоприятными, так как при большом различии массы энергия, отдаваемая электрону при ударе, мала. Ионизация при соударении ионов с частицами газа зависит от химической природы столкнувшихся частиц, поскольку соударения являются элементарным актом химической реакции. При разряде в газе, находящемся между металлическими электродами, положительные ионы высвобождают электроны из металла, бомбардируя поверхность катода.

В некоторых случаях электрон, разогнанный полем, может не ионизировать молекулу, а привести ее, как указывалось выше, в возбужденное состояние. В следующий момент эта возбужденная молекула отдает свою избыточную энергию в форме электромагнитного излучения — испускает фотон. Фотон может поглощаться какой-либо другой молекулой, которая получает дополнительную энергию, и ее электро-

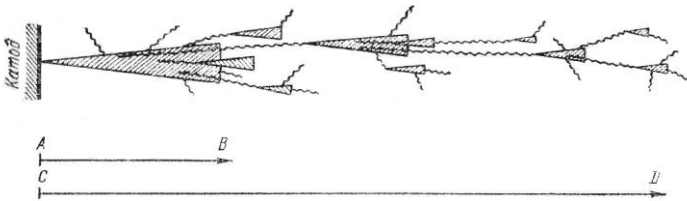


Рис. 2. Схематическое изображение распределения стримера при пробое газа

ны внешней оболочки уже имеют меньшую энергию ионизации. Эти молекулы гораздо легче ионизируются другими электронами. Такая внутренняя фотонная ионизация газа благодаря большой скорости распространения излучения приводит к особенно быстрому развитию в разрядном промежутке каналов с повышенной проводимостью газа.

На рис.2 представлена схема, поясняющая, почему рост электропроводящего канала — стримера — происходит быстрее, чем продвижение электронной лавины. На рис.2 лавины условно показаны в виде заштрихованных конусов, а волнистыми линиями изображены пути

фотонов. Внутри каждого конуса, представляющего собой развивающуюся лавину, газ ионизируется ударами электронов; вновь отщепленные электроны, разгоняемые полем, ионизируют встречаемые ими частицы газа, и таким образом лавинообразно нарастает число электронов, движущихся к аноду, и число положительных ионов, направляющихся к катоду.

Волнистые линии исходят из атомов, которые были возбуждены ударами электронов и вслед за тем испустили фотоны. Двигаясь со скоростью $3 \cdot 10^8$ м/с, фотоны обгоняют лавину и в каком-то месте, соответствующем концу волнистой линии, увеличивают энергию электронов молекул газа. В таких молекулах ионизация происходит при меньших энергиях разогнанного полем электрона и освобожденные здесь электроны, устремляясь к аноду, порождают новую лавину далеко впереди первой лавины. Таким образом, пока первая лавина вырастает, скажем, на длину малой стрелки АВ (рис.2), намечающийся канал повышенной проводимости газа, т. е. стример, распространяется на длину большой стрелки CD.

В следующей стадии отдельные лавины в отрицательном стримере, нагоняя друг друга, сливаются, образуя сплошной канал ионизированного газа.

Одновременно с ростом стримера, направленного от катода к аноду, начинается образование встречного лавинного потока положительно заряженных частиц, направленного к катоду. Положительный стример представляет собой канал газоразрядной плазмы. Поясим это подробнее. Электронные лавины оставляют на своем пути большое число вновь образованных положительных ионов, концентрация которых особенно велика там, где лавины получили свое наибольшее развитие, т. е. около анода. Если концентрация положительных ионов здесь достигает определенного значения (близкого к 10^{12} ионов в 1 см^3), то, во-первых, обнаруживается интенсивная фотонная ионизация, во-вторых, электроны, освобождаемые частицами газа, поглотившими фотоны, притягиваются положительным пространственным зарядом в головную часть положительного стримера и, в-третьих, вследствие ионизации концентрация положительных ионов на пути стримера увеличивается. Насыщение электронами пространства, заполненного положительными зарядами, превращает эту область в проводящую газоразрядную плазму. Под влиянием ударов положительных ионов на катоде образуется катодное пятно, излучающее электроны. В результате указанных процессов и возникает пробой газа. Обычно пробой газа происходит практически мгновенно: длительность подготовки пробоя газа при длине промежутка 1 см составляет порядка $10^{-7} - 10^{-8}$ с. Чем больше напряжение, приложенное к газовому промежутку, тем быстрее

может развиваться пробой. Если длительность воздействия напряжения очень мала, то пробивное напряжение повышается. Это повышение обычно характеризуют коэффициентом импульса

$$\beta = U_{np} / U_{np50}, \quad (8)$$

где U_{np} - пробивное напряжение при данном импульсе; U_{np50} - пробивное напряжение при постоянном или переменном напряжении частотой 50 Гц. Коэффициент импульса в резко неоднородных электрических полях может достигать значения 1,5 и даже превышать его. Явление пробоя газа зависит от степени однородности электрического поля, в котором осуществляется пробой. Рассмотрим явление пробоя газа в однородном поле. Однородное поле можно получить между плоскими электродами с закругленными краями, а также между сферами при расстоянии между ними, соизмеримом с диаметром сферы. В таком поле пробой наступает практически мгновенно при достижении строго определенного напряжения, зависящего от температуры и давления газа. Между электродами возникает искра, которая затем переходит в дугу, если источник напряжения имеет достаточную мощность. Появление искры при заданном расстоянии между электродами используют для определения значения приложенного напряжения (измерение высоких напряжений с помощью шаровых разрядников).

При малых расстояниях между электродами наблюдается значительное увеличение электрической прочности воздуха. Это явление можно объяснить трудностью формирования разряда при малом расстоянии между электродами. При нормальных условиях, т. е. при давлении 0,1 МПа и температуре около 20 °С, электрическая прочность воздуха при расстоянии между электродами 1 см составляет примерно 3 МВ/м; а при $h = 5$ мкм она достигает 70 МВ/м.

Электрическая прочность газа в сильной степени зависит от его плотности (т. е. от давления, если температура постоянна). При малых изменениях температуры и давления газа пробивное напряжение пропорционально плотности газа. Поэтому для расчета пробивных напряжений воздуха применяется формула

$$U_{np} = U_{np0} \delta, \quad (9)$$

где U_{np} - пробивное напряжение при данных температуре и давлении; U_{np0} - пробивное напряжение при нормальных условиях ($t = 20$ °С и давлении $p = 0,1$ МПа). Относительная плотность воздуха δ рассчитывается по соотношению

$$\delta = 0,386 \frac{p}{t + 273}, \quad (10)$$

где t - температура, °С; p - давление, мм рт. ст. При нормальных ус-

ловиях окружающей среды $\delta = 1$.

При больших давлениях и соответственно повышенной плотности газа расстояние между отдельными молекулами становится меньше; тем самым уменьшается длина свободного пробега электронов и, как следует из формулы (4), для того чтобы пробой произошел, должна быть увеличена напряженность электрического поля.

При уменьшении давления вначале наблюдается падение электрической прочности, как это видно из рис.3; когда же давление доходит до некоторого предела (ниже атмосферного давления) и разрежение достигает высоких степеней, электрическая прочность начинает

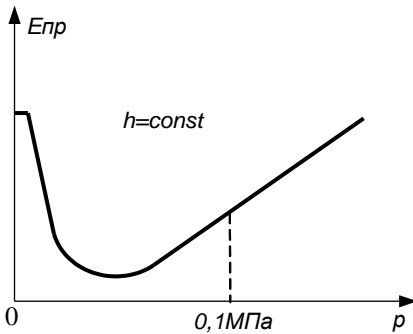


Рис. 3. Зависимость электрической прочности газа от давления

снова возрастать. Это возрастание объясняется уменьшением числа молекул газа в единице объема при сильном разрежении и снижением вероятности столкновений электронов с молекулами. При высоком вакууме пробой можно объяснить явлением вырывания электронов из поверхности электрода (холодная эмиссия). В этом случае электрическая прочность доходит до весьма высоких значений, зависит от материала и состояния поверхности электродов и больше не изменяется («полочка» на рис.3). Большую электрическую прочность вакуума используют в технике при конструировании вакуумных конденсаторов для больших напряжений высокой частоты.

Газы при больших давлениях применяются в качестве изоляции для высоковольтной аппаратуры, а также в производстве кабелей и конденсаторов высокого напряжения. Химический состав газа заметно влияет на электрическую прочность. Закономерности, которым подчиняется пробой газов в неоднородном поле, заметно отличаются от описанных выше закономерностей, наблюдаемых при пробое в однородном поле. Неоднородное поле возникает между двумя острями, острием и плоскостью, между проводами линий электропередачи, между сферическими поверхностями при расстоянии между ними, превышающем диаметр сферы, и т. д.

Особенностью пробоя газа в неоднородном поле является возникновение частичного разряда в виде короны в местах, где напря-

электрическая прочность начинает снова возрастать. Это возрастание объясняется уменьшением числа молекул газа в единице объема при сильном разрежении и снижением вероятности столкновений электронов с молекулами. При высоком вакууме пробой можно объяснить явлением вырывания электронов из поверхности электрода (холодная эмиссия). В этом случае электрическая прочность доходит до весьма высоких значений, зависит от материала и состояния поверхности

женность поля достигает критических значений, с дальнейшим переходом короны в искровой разряд и дугу при возрастании напряжения между электродами.

Электрическая прочность воздушного зазора зависит от радиационного фона. Это связано с тем, что рост радиации приводит к увеличению количества свободных носителей заряда в газе и облегчает формирование электронной лавины. Радиоактивность измеряется в различных единицах. Мерой радиоактивности служит активность. Одной из единиц измерения служит Беккерель (Бк), что соответствует 1 распаду в секунду. Содержание активности в веществе часто оценивают на единицу веса вещества (Бк/кг) или объема (Бк/куб.м).

Также используется еще такая единица активности, как кюри (Ки). Это - огромная величина: $1 \text{ Ки} = 37000000000 \text{ Бк}$. Активность радиоактивного источника характеризует его мощность. Так, в источнике активностью 1 кюри происходит 37000000000 распадов в секунду.

Как было сказано выше, при этих распадах источник испускает ионизирующее излучения. Мерой ионизационного воздействия этого излучения на вещество является экспозиционная доза. Часто измеряется в рентгенах (Р). Поскольку 1 рентген - довольно большая величина, на практике удобнее пользоваться миллионной (мкР) или тысячной (мР) долями рентгена.

1.3. Статистические методы исследования электрического пробоя диэлектриков

О величине электрической прочности материала нельзя судить по результатам одного опыта из-за большого разброса значений $U_{пр}$, полученных в одних и тех же условиях испытания (толщина диэлектрика, размер электродов, температура окружающей среды, скорость повышения напряжения и т.д.). Разброс значений $U_{пр}$ одинаковых образцов может достигать 50 %.

Чтобы судить о величине электрической прочности материала, необходимо произвести большое число испытаний на пробой (не менее 10), а экспериментальные результаты обработать статическим методом. Наилучшим приближением к истинному значению пробивного напряжения является среднее арифметическое из n измерений:

$$U_{np} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{inp} \cdot \quad (11)$$

Мера отклонения отдельного измерения величины пробивного напряжения U_i от истинного значения U_{np} есть среднеквадратичное отклонение σ , которое не зависит от числа измерений, но зависит от свойств самого материала и от условий проведения эксперимента. Мера отклонения среднего значения пробивного напряжения от истинного значе-

ния U_{np} есть среднеквадратичная величина σ_m , которая зависит от числа измерений n . Величины σ и σ_m связаны между собой соотношением

$$\sigma_m = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (12)$$

Для определения σ_m можно воспользоваться формулой Питерса. Если определим для i – го измерения остаток

$$|A_i| = U_{inp} - U_{np} \quad (13)$$

и найдем среднее значение n остатков, взятых без учета знака,

$$r = \frac{1}{n} \sum_i |A_i|, \quad (14)$$

то формула Питерса примет вид

$$\sigma_m \approx \frac{5}{4} \frac{r}{\sqrt{n-1}}. \quad (15)$$

Это выражение связывает среднеквадратичное отклонение среднего значения пробивного напряжения от истинного. Пробивное напряжение в этом случае

$$U_{np} = U_{np} + \sigma_m. \quad (16)$$

Чем менее однородным является материал, тем больше σ_m и σ . Степень однородности определяется по коэффициенту вариации:

$$K_{var} = \frac{\sigma}{U_{np}}. \quad (17)$$

К однородным материалам относятся такие, для которых $K_{var} < 0,15$, к неоднородным – материалы с $K_{var} > 0,15$. Пробивную напряженность (электрическую прочность) определяют по формуле (1) при постоянном напряжении, переменном напряжении промышленной частоты, напряжениях высокой частоты и импульсных напряжениях. Чаще всего определение E_{np} производят при переменном напряжении промышленной частоты.

2. Методика измерений электрической прочности

Измерение пробивного напряжения диэлектрика производят обычно с помощью установок, обобщенная принципиальная схема которых приведена на рис.4. Схема содержит: Т – повышающий трансформатор, максимальное выходное напряжение которого может быть 10 кВ и более. Коэффициент трансформации определяет максимальное напряжение, которого можно достичь при заданном максимальном входном напряжении. АТ – автотрансформатор с плавной регулировкой напряжения; Р – реле максимального тока, отключающее высоковольтный трансформатор при пробое образца; МП1, МП2 – магнитные пускатели; которые подключают сеть к автотрансформатору. Л1 и Л2 – сигнальные лампы. V – вольтметр переменного тока. Резистор R ограничивает максимальную величину тока через образец при пробое.

При испытании образцы располагают на плоском нижнем электроде, выполненном из нержавеющей стали. В качестве верхнего электрода обычно применяют шары различных диаметров. Для определения пробивного напряжения испытуемый образец располагают между электродами, находящимися под защитным колпаком, имеющим блокировочный контакт. Магнитные пускатели подключают электрическую сеть к автотрансформатору, после чего можно подавать с него напряжение на первичную обмотку трансформатора Т. Путем ручного или автоматического увеличения автотрансформатором напряжения на первичной обмотке трансформатора Т напряжение на испытуемом образце плавно повышается до его пробоя. Напряжение, при котором произойдет пробой, фиксируют с помощью вольтметра V. В случае пробоя испытуемого образца магнитные пускатели МП1 и МП2 отключают автотрансформатор от электрической сети. После этого образец материала заменяют на другой и обеспечивают подготовку следующего цикла измерения.

3. Выполнение лабораторной работы

При подготовке к работе необходимо изучить методические ука-

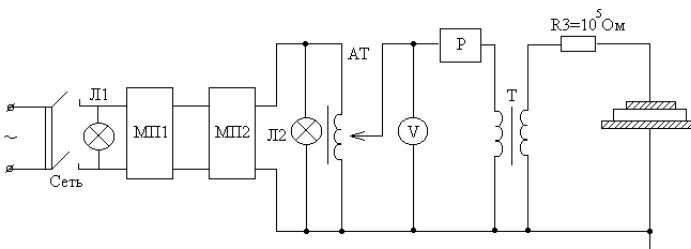
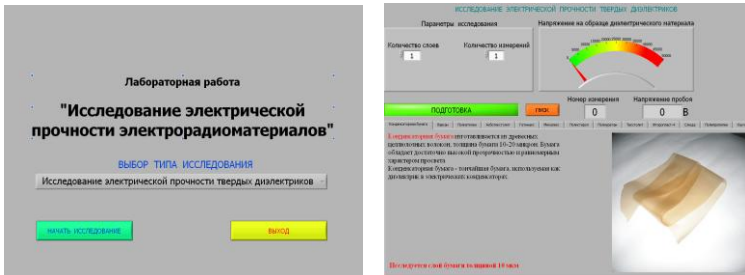


Рис. 4. Функциональная схема установки для измерения напряжения электрического пробоя твердых диэлектриков

зания к лабораторной работе и затем получить у преподавателя задание. Для начала работы необходимо запустить файл «Пробой_диэл» на Рабочем столе ПК. После чего появится окно, изображенное на рис.5,а. Оно отображает название выполняемой лабораторной работы и некоторые интуитивно понятные элементы управления.

Лабораторная работа состоит из двух частей. В **первой части** исследуется *электрическая прочность твердых диэлектриков*, а **во второй части** исследуется *электрическая прочность воздушного зазора*. Начинать работу можно с любой из частей, выбрав в меню «Выбор типа исследования» щелчком левой кнопки мыши нужный тип исследования. Начинается исследование со щелчка левой кнопкой мыши по кнопке «Начать исследование».

3.1. Исследование электрической прочности твердых



а б
Рис. 5. Внешний вид окна «Выбора типа исследования» (а) и окна исследования пробивного напряжения диэлектрика (б)

диэлектриков

Панель управления выполнением этой части лабораторной работы показана на рис.5,б. В нижней части панели происходит выбор материала для исследования щелчком по соответствующей вкладке. На каждой вкладке представлены конкретный материал диэлектрика и его краткое описание. Указывается толщина исследуемого образца материала. В верхней части панели задаются параметры исследования в виде количества слоев материала и количества необходимых измерений. Числовые значения в цифровые элементы управления задаются стандартным способом операционной системы Windows. (выделить и изменить).

ВНИМАНИЕ! Процесс измерения полностью автоматизирован и заканчивается автоматически после выполнения заданного количества измерений. Индикатор зеленого цвета «Подготовка» указывает на то, что происходит подготовка высоковольтной установки к началу измерений. Процесс измерения задается нажатием кнопки «Пуск». Процесс измерения напряжения пробоя отображается индикатором «Внимание! Высокое напряжение». Полученный массив измеренных данных отображается на специальном *индикаторе массива* справа в верхней части панели. Элементы массива, не уместившиеся на индикаторе, могут быть просмотрены с использованием кнопок *инкремент – декремент*, отображаемых слева в верхней части индикатора массива (рис.6). Цифровой индикатор рядом с кнопками *декремент – инкремент* указывает на индекс элемента массива, который всегда отображается в верхней строке *индикатора массива*. После выполнения полного цикла заданного количества измерений на панели управления появляются дополнительные кнопки, которые позволяют изменить параметры исследования (количество слоев, количество измерений) или прекратить исследование и перейти на выбор другого исследования (рис.7). На панель управления также выведены дополнительные индикаторы, отображающие процесс выполнения исследований.



Рис. 6. Отображение массива измеренных значений

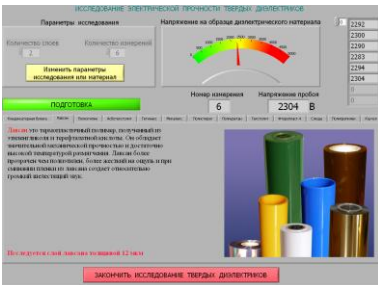


Рис. 7. Экран ПК после выполнения цикла измерений

После выполнения полного цикла заданного количества измерений на панели управления появляются дополнительные кнопки, которые позволяют изменить параметры исследования (количество слоев, количество измерений) или прекратить исследование и перейти на выбор другого исследования (рис.7). На панель управления также выведены дополнительные индикаторы, отображающие процесс выполнения исследований.

3.2. Исследование электрической прочности воздушного зазора

Это исследование происходит в различных состояниях воздушного зазора в измерительной камере. Исследуется напряжение пробоя при различных *давлениях воздуха и радиационных фонах*. Для перехода к этой части лабораторной работы необходимо в первом окне ра-

боты (рис.5,а) выбрать из меню соответствующий пункт. Панель управления выполнением этой части лабораторной работы показана на рис.8. Она состоит из двух частей. Каждая их них активизируется только в своем режиме работы. После перехода к исследованию воздушного зазора появляется панель управления насосом (рис. 8,а), задающим давление в измерительной камере. После задания нужного давления, включения насоса и достижения заданного давления можно переходить к измерению напряжения пробоя. Для этого используются соответствующие кнопки панели управления.

Панель управления исследованием напряжения пробоя воздушного зазора показана на рис. 8,б. Элементы управления этой панели во многом соответствуют ранее описанной панели управления при исследовании напряжения пробоя твердых диэлектриков.



Рис. 8. Окна управления насосом (а) и измерения напряжения пробоя воздушного зазора (б)

4. Последовательность выполнения работы

4.1. Исследовать электрическую прочность твердых диэлектриков, указанных преподавателем. Для этого:

а) произвести указанное количество (N) измерений напряжения пробоя для каждого слоя. Количество слоев также указывает преподаватель;

б) определить среднюю величину пробивного напряжения U_m для каждого из слоев как
$$U_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i ;$$

в) построить график $U_m = F(N)$ и определить среднюю величину пробивной напряженности электрического поля (электрическую прочность) как $E = U_m/d$, где d – толщина исследуемого образца;

г) для максимального количества слоев исследуемого диэлектрика разделить диапазон напряжений пробоя между максимальным и минимальным значениями на несколько (5-7) зон и построить гистограмму распределения количества напряжений пробоя попавших в вы-

деленные зоны;

д) определить среднеквадратичное отклонение σ напряжений пробоя для максимального количества слоев диэлектрика как

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (U_i - U_m)^2}{N}};$$

е) определить коэффициент вариации напряжения пробоя для максимального количества слоев диэлектрика.

4.2. Исследовать электрическую прочность воздушного зазора. Для этого:

а) установить величину давления (P) в измерительной камере по указанию преподавателя и для обычного радиационного фона 15 мкР/ч произвести указанное количество (N) измерений напряжения пробоя;

б) произвести измерения (по п. 2.2 а) для указанных преподавателем давлений в измерительной камере при неизменном радиационном фоне;

в) определить среднюю величину пробивного напряжения U_m воздушного зазора для каждого значения давления в измерительной камере;

г) построить график $U_m = F(P)$;

д) установить давление в измерительной камере 750 мм рт. ст. и, увеличивая указанное преподавателем значение радиационного фона (R), произвести по 5 измерений напряжения пробоя воздушного зазора для каждого значения радиационного фона;

е) определить пробивного напряжения U_m для каждого значения радиационного фона R и построить график $U_m = F(R)$.

5. Содержание отчета

5.1. Отчет выполняется каждым студентом индивидуально.

5.2. Отчет должен содержать:

- название работы;
- цель работы;
- основные теоретические сведения;
- схемы измерения;
- полученные расчетные данные;
- необходимые графики, требуемые по заданию;
- сравнение полученных данных со справочными материалами.

6. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

1. Что такое электрический пробой диэлектриков?
2. В каких единицах и почему именно в них измеряется электри-

ческая прочность диэлектриков?

3. В каких диэлектриках возможен электрический пробой, тепловой пробой, электрохимический пробой?

4. Что такое энергия ионизации?

5. Как возникает электрический пробой в газообразных диэлектриках?

6. Что такое стример и какова его роль в электрическом пробое газообразных диэлектриков?

7. Как развивается тепловой пробой?

8. Как и почему происходит электрический пробой твердых неоднородных диэлектриков?

9. Как происходит электрический пробой твердых однородных диэлектриков?

10. Как происходит электрохимический пробой твердых диэлектриков?

11. Как и почему электрическая прочность газообразных диэлектриков зависит от давления газа?

12. Что такое коэффициент вариации пробивного напряжения и что он определяет?

13. Как пробивное напряжение диэлектрика зависит от его толщины?

14. Почему для исследования пробивной прочности диэлектрика используют статистические методы?

15. Как и почему электрическая прочность газообразных диэлектриков зависит от уровня радиации?

16. Почему при одинаковой толщине газообразного и твердого диэлектрика пробивное напряжение твердого диэлектрика значительно выше, чем у газообразного?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ

Цель работы: ознакомление с основными электрическими параметрами высокочастотных катушек индуктивности и методами измерения этих параметров на переменном токе высокой частоты.

1. Краткие теоретические сведения

1.1. Общие сведения о катушках индуктивности

Катушки индуктивности, трансформаторы, дроссели относятся к моточным компонентам радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Основ-

ной рабочий элемент – обмотка, используемая для реализации магнитных свойств. Доля моточных компонентов в устройствах РЭА составляет от 3 до 8 %. В высокочастотных катушках индуктивности используется индуктивный характер сопротивления в диапазоне 100 кГц – 10 ГГц. Катушки индуктивности обладают свойством оказывать реактивное сопротивление переменному току при незначительном сопротивлении постоянному току. Совместно с конденсаторами они используются для создания фильтров, осуществляющих частотную селекцию электрических сигналов, а также для создания элементов задержки сигналов и запоминающих элементов, осуществления связи между цепями через магнитный поток и т.д. В отличие от резисторов и конденсаторов они не являются стандартизованными изделиями, а изготавливаются для конкретных целей и имеют такие параметры, которые необходимы для осуществления тех или иных преобразований электрических сигналов. Катушки индуктивности в основном применяются:

- для колебательных контуров (параллельных и последовательных);
- получения магнитной связи за счет магнитного поля между отдельными участками цепей РЭА (связанные контуры);
- создания в электрической цепи реактивного сопротивления индуктивного характера (дрессели).

Материал проводника обмотки катушки – металл с большой проводимостью. Форма катушек может быть любой, но большее применение получили катушки цилиндрические.

Виды намотки – однослойная, многослойная, однослойная с шагом, универсальная, внавал.

Катушки индуктивности по конструкции можно разделить на несколько групп: каркасные и бескаркасные, с сердечниками и без сердечников, экранированные и неэкранированные.

Свойства высокочастотных катушек индуктивности характеризуются следующими параметрами:

- номинальная величина индуктивности (от единиц нГн до сотен мГн);
- добротность катушки (порядка 10-200);
- собственная емкость катушки (в зависимости от конструкции от долей до десятков пФ);
- температурный коэффициент индуктивности (ТКИ).

Однослойная катушка образуется путем размещения провода по поверхности каркаса в один слой по винтовой линии. Витки обмотки располагаются плотно, виток к витку, или на некотором расстоянии друг от друга. В первом случае обмотка называется сплошной, во втором – с шагом. Фактически при сплошной обмотке не представляется

возможным уложить провод без зазора, и расстояние между осевыми линиями двух соседних витков (шаг намотки τ) оказывается несколько больше, чем диаметр провода в изоляции ($d_{из}$):

$$\tau = \alpha d_{из}, \quad (1)$$

где α – коэффициент неплотности обмотки.

Длиной обмотки однослойной катушки ℓ является расстояние между осевыми линиями двух крайних витков:

$$\ell = \tau(N-1), \quad (2)$$

где N – число витков катушки.

Наружный диаметр катушки:

$$D = D_0 + 2d_{из}, \quad (3)$$

где D_0 – диаметр каркаса. Для однослойных катушек с достаточной точностью можно считать $D \approx D_0$.

Величина индуктивности L_0 однослойной катушки без сердечника определяется по формуле:

$$L_0 = K_L N^2 D \cdot 10^{-8}, \text{ Гн}, \quad (4)$$

где K_L – поправочный коэффициент, значение которого приведено в табл. 1; значение D подставляется в мм.

Таблица 1

ℓ/D	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8
K_L	20	17	15,5	13	11,3	10	9,2	7,7
ℓ/D	1	1,5	2	3	4	5	6	10
K_L	6,8	5	4	2,7	2,2	1,8	1,5	1

При введении в катушку *магнитного сердечника* ее индуктивность возрастает в μ_c раз (μ_c – действующая магнитная проницаемость сердечника):

$$L_c = L\mu_c. \quad (5)$$

Величина μ_c зависит от начальной магнитной проницаемости материала, формы и размера сердечника, размеров катушки и от частоты. Сердечники различают по материалу и по форме. В качестве сердечников могут использоваться как магнитные, так и немагнитные материалы. Наиболее широкое применение находят сердечники круглого и прямоугольного сечения, броневые (с замкнутой или разомкну-

той магнитной цепью) и цилиндрические. Индуктивность катушек с кольцевыми сердечниками и равномерно распределенной однослойной обмоткой определяется по формуле:

$$L_c = \frac{LSN^2\mu_a 10^{-7}}{D_{cp}}, \text{ Гн}, \quad (6)$$

где D_{cp} – средний диаметр кольца, м; S – сечение кольца, м²; N – число витков; μ_a – начальная магнитная проницаемость кольца.

Цилиндрические сердечники применяются для увеличения индуктивности катушек и как элемент настройки. Индуктивность катушки с цилиндрическим сердечником и однослойной равномерной обмоткой рассчитывается по формуле:

$$L_c = \frac{\mu_c N^2 D^2 \cdot 100}{(\ell/D) + 0,44}, \text{ Гн}, \quad (7)$$

где ℓ – длина намотки; D – диаметр намотки. Формула (7) справедлива при соотношении $\ell/D \leq 5$.

Индуктивность катушки с многослойной намоткой и магнитным сердечником определяется по формуле:

$$L = \frac{\mu_c N^2 D_{cp} \cdot 8 \cdot 10^{-2}}{3D_{cp} + 9h + 10t} - \Delta L, \text{ Гн}, \quad (8)$$

где D_{cp} – средний диаметр намотки; h – высота катушки; t – радиальная ширина намотки; ΔL – поправка на шаг намотки.

$$\Delta L = \mu_c [\ln(d_{вн}/d_0) + 0,1]. \quad (9)$$

В катушках индуктивности помимо основного эффекта взаимодействия тока и магнитного поля наблюдаются паразитные эффекты, вследствие которых сопротивление катушки не является чисто реактивным и равным $X_L = \omega L$. Наличие паразитных эффектов ведет к появлению потерь в катушке, оцениваемых сопротивлением потерь r_n , которое определяет добротность катушки индуктивности.

Добротность катушек индуктивности в общем случае определяется формулой:

$$Q = \frac{\omega L}{r_n}, \quad (10)$$

где L – индуктивность катушки, Гн; ω – частота, рад/с; r_n – общее сопротивление потерь в катушке, Ом.

Потери в катушке создаются в обмотке, каркасе и экране. Рас-

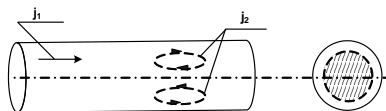


Рис. 1. Иллюстрация скин-эффекта

смотрим некоторые из них.

1. Скин - эффект

При прохождении высокочастотного тока магнитное поле тока J_1 наводит индуктивный ток J_2 , который на поверхности совпадает с током J_1 , а в объеме - противоположно направлен. Поэтому уменьшается действующее сечение проводника (см. рис.1, заштрихованная часть проводника).

2. Эффект близости

Если расстояние между витками большое, то поля соседних витков не влияют друг на друга. При сближении наблюдается процесс вытеснения тока к внутренним областям (рис. 2).

Увеличение диаметра d провода приводит к уменьшению омического (активного) сопротивления катушки, а также обусловленного действием магнитного поля внутри витка, но к росту сопротивления за счет эффекта «близости», обусловленного действием соседних витков. Поэтому существует оптимальное сечение провода при заданных габаритах катушки, значениях её индуктивности и рабочей частоты.

3. Сердечники.

Введение ферромагнитного сердечника позволяет увеличить индуктивность катушки:

$$L_c = L_{\mu c}. \quad (11)$$

При той же индуктивности можно уменьшить число витков. Сердечник вносит дополнительные потери, однако при определенных условиях добротность катушки возрастает, если индуктивное сопротивление растёт больше, чем потери, вносимые сердечником. В качестве

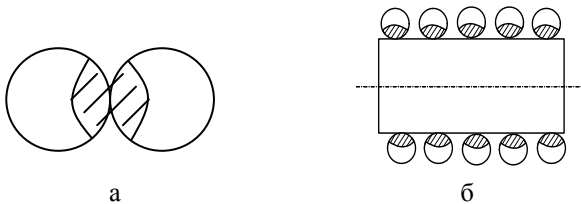


Рис. 2. Иллюстрация эффекта близости: а - в соседних витках; б - в соседних слоях

сердечников используются ферромагнетики с высоким удельным сопротивлением (малы потери на вихревые токи). Это ферриты и магнитодиэлектрики.

Магнитодиэлектрики - композиционный материал, где наполнителем служит ферромагнитный порошок, а в качестве связующего звена - органический (фенолоформальдегидная смола, эпоксидная смола, полистирол) или неорганический (стёкла) изолятор. За счет высокого

сопротивления связующих веществ сопротивление сердечника очень высокое и потери на вихревые токи минимальны.

Добротность катушки с сердечником:

$$Q = \frac{\mu_c w L}{r_n + r_c}, \quad (12)$$

где r_c – сопротивление потерь, вносимых сердечником в катушку.

При $r_c \ll r_n$ добротность катушки при введении сердечника возрастает в μ_c раз. При увеличении частоты тока μ_c уменьшается, а потери растут. При некотором значении частоты

$$\frac{\mu_c}{1 + (r_c / r_n)} < 1 \quad (13)$$

добротность катушки уменьшается.

Собственная емкость катушек индуктивности (C_0) складывается из суммарных емкостей, существующих между отдельными витками, а также между витками и другими элементами конструкции катушки. Наименьшим значением C_0 обладают однослойные катушки.

Температурная стабильность параметров катушек индуктивности характеризуется температурным коэффициентом индуктивности (ТКИ). Значение ТКИ, как правило, положительное. ТКИ задается следующим соотношением:

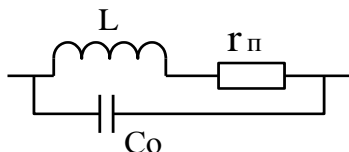
$$TKI = \frac{\Delta L}{L \cdot \Delta T}, \quad (14)$$

где ΔL – изменение значения индуктивности в диапазоне температур ΔT .

Увеличение индуктивности катушки при росте температуры определяется следующими явлениями:

- увеличиваются длина и диаметр каркаса, что приводит к изменению шага обмотки и диаметра витков;
- увеличиваются длина и диаметр провода обмотки, что приводит к тем же последствиям;
- увеличивается сопротивление провода обмотки, что может снижать добротность катушки;
- увеличиваются потери в материалах каркаса и изменяется его диэлектрическая проницаемость, что может изменять собственную емкость C_0 .

Все перечисленные явления приводят к изменениям индуктивности, добротности и собственной емкости катушек, что в большинстве случаев крайне нежелательно. Устранить или скомпенсировать действие этих дестабилизирующих факторов не представляется возможным, однако при рациональном выборе конструкции их действие можно свести к минимуму. Зависимость Q от температуры определяется температурным коэффициентом добротности TKD .



(15)

$$TKD = \frac{\Delta Q}{Q \cdot \Delta T}$$

Рис. 3. Эквивалентная схема катушки

Практически величина добротности лежит в пределах от 10 до 200. Повышение добротности достигается оптимальным выбором диаметра провода, увеличением

размеров катушки индуктивности и применением сердечников с высокой магнитной проницаемостью и малыми потерями. С учетом потерь и собственной емкости катушку индуктивности можно представить в виде эквивалентной схемы, показанной на рис. 3. Сопротивление r_{Π} характеризует общие потери энергии в катушке индуктивности, вызванные различными факторами, а C_0 - собственную емкость катушки индуктивности.

1.2. Катушки индуктивности современной РЭА

Современная РЭА характеризуется повсеместной миниатюризацией и уменьшением массогабаритных характеристик. Широкое применение больших интегральных микросхем (БИС) позволило резко снизить размеры и массу большинства образцов РЭА. Применение поверхностного монтажа элементов и миниатюризация пассивных компонентов электронных устройств потребовали уменьшения размеров катушек индуктивности, соизмеримых по габаритным характеристикам с размерами основных элементов для поверхностного монтажа.

Обычно катушки индуктивности для поверхностного монтажа имеют три конструктивных разновидности: многослойные, толстопленочные и намотанные. На рис. 4 показан внешний вид малогабаритных ЧИП катушек.

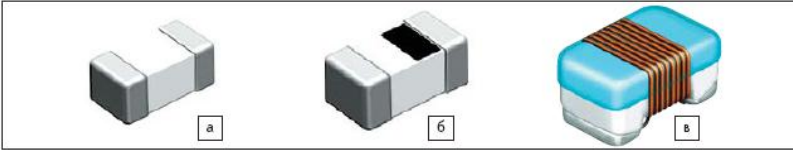


Рис. 4. Внешний вид ЧИП катушек индуктивности для поверхностного монтажа: а - многослойные индуктивности, б - толстопленочные индуктивности, в - намотанные индуктивности

Типичные варианты конструкций катушек индуктивности, например, компании MuRata показаны на рис. 5. Конструктивно катушки выполнены в четырех вариантах, схематично изображенных на рис. 5.

Катушки, представленные на рис. 5,а, содержат в конструкции сердечник из окиси алюминия с вертикальным расположением проводочной обмотки. Катушки такой конструкции являются высокочастотными и предназначены для работы на частотах до 6 ГГц. Эти конструкции отличаются высокой добротностью и большими токами.

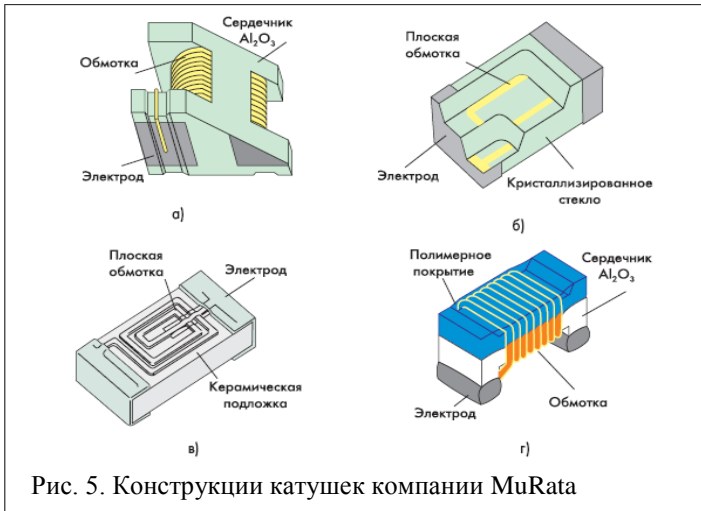


Рис. 5. Конструкции катушек компании MuRata




Катушки, приведенные на рис. 5,б, представляют собой многослойную конструкцию, где в качестве каркаса используют специальное стекло. Обмотка катушки в таком варианте выполнена пленочным проводником, нанесенным несколькими слоями внутри каркаса. Это позволяет получить катушку индуктивности для высокочастотного диапазона с малыми размерами корпуса и достаточно большими тока-

ми. Катушки, представленные на рис. 5,в, изготовлены на стеклянной основе однослойным пленочным проводником. Эти катушки обладают малыми отклонениями от номинала и имеют рекордно малые размеры (0,6x0,3x0,3 мм). Они предназначены для применения в сложной малогабаритной переносной РЭА, например такой, как мобильные телефоны.

Катушки, представленные на рис. 5,г, отличаются от других горизонтальной проволочной обмоткой. При этом каркас катушки выполнен из окиси алюминия, а корпус сверху покрыт полимерным материалом, который защищает и фиксирует обмотку. Эти катушки допускают работу в диапазоне температур $-50...+120$ °С. Верхняя рабочая частота ограничена собственным резонансом катушки и для некоторых катушек составляет 11 – 18 ГГц.

Некоторые производители малогабаритных катушек используют в качестве каркаса высококачественную ферритовую керамику. В настоящее время различные производители выпускают широкую номенклатуру катушек индуктивности для поверхностного монтажа. Так, например, в табл. 2 представлены основные характеристики и внешний вид некоторых образцов катушек индуктивности компании SUMIDA

Таблица 2

Максимальные размеры, мм			Индуктивность, мкГн	Внешний вид
Высота	Длина	Ширина		
3,5	4,8	4,3	1	
4,8	6,1	5,5	10	
4,0	8,1	7,3	10	
5,5	10,4	9,6	10	
5,9	13,1	12,1	10	

В табл. 3 представлены основные параметры некоторых катушек индуктивности для поверхностного монтажа компании Yageo (ЧСР – частота собственного резонанса катушки).

Таблица 3

Серия	Индуктивность, L	Точность, %	Добротность, Q	ЧСР, мГц	Сопротивление, Ом	Сила тока, мА
CL	0,047 – 18мкГн	10,20	25 –45	18 – 320	0,15 –0,75	5 –300
NL	0,1 – 1000мкГн	10,20	28 –50	2,5 – 700	0,44 –50	30 – 450
CLH	1,0 –470 нГ	5,10	8	1250 – 6000	0,1 –2,0	200,300
LCN	1,6 –270 нГ	5,10	16 –40	900 – 12500	0,03 –2,8	170 – 700

В табл. 4 представлены основные параметры некоторых СВЧ катушек индуктивности компании MuRata, выполненные по конструктивному варианту, показанному на рис. 5, а.

Таблица 4

Внешний вид	Индуктивность, нГн	Добротность	ЧСР, мГц	Сопротивление, Ом
	39 ± 5%	80	1700	0.09
	47 ± 5%	65	1600	0,23
	68 ± 5%	65	1200	0,23
	100 ± 5%	60	900	0,38
	150 ± 5%	35	350	0,26
	220 ± 5%	45	500	0,7

1.3. Метод измерения параметров катушек индуктивности

В лабораторной работе измерение основных параметров катушек индуктивности производится хорошо известным резонансным методом с применением прибора измерителя добротности, или Q-метра. Как следует из его названия, он может применяться для измерения добротности и обычно применяется при измерении добротности катушек индуктивности. Упрощенная схема Q-метра показана на рис. 6.

В приборе используется явление резонанса в последовательном

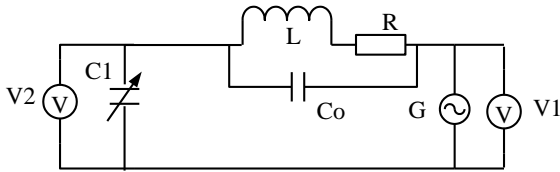


Рис. 6. Принципиальная схема измерителя добротности (Q-метра)

колебательном контуре. Этот контур сформирован исследуемой катушкой индуктивности L и образцовым (обычно воздушным) переменным конденсатором $C1$. На контур подается напряжение с высокочастотного генератора G , частоту f которого можно изменять в широких пределах. На определенной частоте f_0 сигнала генератора G , изменяя емкость конденсатора $C1$, контур настраивается в резонанс, который фиксируется по максимальному значению напряжения на вольтметре $V2$. Сопротивление R характеризует общие потери во всех элементах колебательного контура. В момент резонанса добротность контура Q определяется как отношение показаний вольтметров $V2$ и $V1$, т.е. $Q = V2/V1$. Если поддерживать напряжение генератора G на известном уровне (например, 1 В), то шкалу вольтметра $V2$ можно проградуировать прямо в значениях добротности Q . При предположении, что конденсатор $C1$ практически не имеет потерь, добротность в контуре при резонансе будет определять параметр Q катушки индуктивности.

Рассмотрим основные соотношения в системе катушка индуктивности со своей эквивалентной схемой (рис. 3) и последовательно включенным образцовым конденсатором $C1$. В этой системе возможны два вида резонанса - последовательный на частоте $F_{\text{пос}}$, определяемой соотношением

$$F_{\text{пос}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot (C_1 + C_0)}} , \quad (16)$$

и параллельный на частоте $F_{\text{пар}}$, определяемой соотношением

$$F_{\text{пар}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C_0}} . \quad (17)$$

Параллельный резонанс – это собственный резонанс катушки индуктивности, обусловленный собственной емкостью C_0 . На частоте собственного резонанса добротность катушки индуктивности максимальна. После частоты собственного резонанса добротность катушки индуктивности резко падает из-за влияния собственной емкости катушки, поэтому катушки индуктивности практически не используют

на частотах выше частоты собственного резонанса.

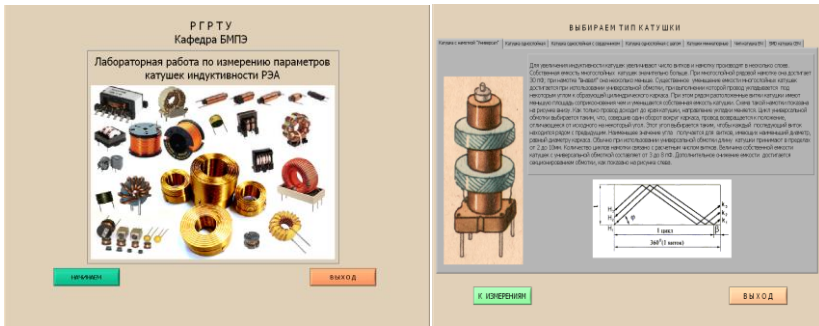
Последовательный резонанс в контуре Q-метра происходит на более низкой частоте, чем параллельный. Добротность всего контура при этом практически соответствует добротности исследуемой катушки, если не учитывать потери в конденсаторе C_1 . При $C_1 \gg C_0$, как обычно и бывает, можно по формуле (16) определить индуктивность исследуемой катушки.

Используя соотношение (17) можно определить собственную емкость катушки индуктивности, построив график зависимости добротности от частоты и определить частоту максимального значения добротности катушки.

2. Выполнение лабораторной работы

Лабораторная работа выполняется путем моделирования процесса измерения резонансным методом параметров катушек индуктивности с использованием прибора – измерителя добротности (Q-метра). Для этого используется специальная программа, выполняемая на персональном компьютере (ПК). В эту программу заложены модели изменения характеристик ряда катушек индуктивности, в зависимости от изменения параметров окружающей среды и внешних воздействий, а также используется модель прибора Q-метр. При подготовке к работе необходимо изучить методические указания к лабораторной работе.

Для начала работы необходимо запустить файл «Лабор_индукт» на Рабочем столе ПК, после чего появится окно, изображенное на рис.7,а. Оно отображает название выполняемой лабораторной работы и кнопки управления, назначение которых интуитивно понятно. Управление программой осуществляется обычным способом, приме-



а

б

Рис. 7. Вид рабочих окон программы: а - вид окна начала работы с программой; б - вид окна выбора катушки индуктивности для исследования

няемым повсеместно в операционной системе Windows. После щелчка по кнопке «Начинаем» появится окно выбора типа катушки индуктивности, как показано на рис. 7,б.

Выбор катушки индуктивности осуществляется щелчком по соответствующей закладке с названием. На закладке представлены описание и некоторые характеристики выбранной катушки индуктивности.

3. Проведение измерений

После щелчка по кнопке «К измерениям» открывается окно измерения добротности катушки индуктивности прибором Q-метр, показанное на рис. 8. В этом окне отображаются прибор - измеритель добротности и измерительная камера с образцом катушки. Здесь же отображается схема подключения исследуемой катушки индуктивности.

Необходимо включить прибор щелчком по тумблеру «Сеть». По



Рис. 8. Окно управления прибором Q-метр

умолчанию в измерительной камере установлена температура 20 °С. Измерение добротности катушки необходимо производить в следующей последовательности.

1. Установить необходимую частоту генератора, используя кнопки выбора диапазона и движок на шкале плавного изменения частоты.
2. Ручкой под стрелочным индикатором «Уровень» установить стрелку на шкале прибора на «1».
3. Щелкнуть по кнопке «Изменить температуру» и в окно «Задат-

чик температуры» ввести с клавиатуры нужную температуру в измерительной камере и щелкнуть по кнопке «Пуск». Дождаться момента установления заданной температуры в измерительной камере и перейти к измерениям.

4. Изменяя значение емкости переменного конденсатора по шкалам «Емкость грубо», «Емкость средне» и «Емкость плавно», по стрелочному прибору «Добротность» добиться резонанса в колебательном контуре по максимальному отклонению стрелки прибора. Записать в черновике значение температуры, частоты измерительного сигнала, значения добротности Q_1 с цифрового индикатора внизу стрелочного прибора и значение емкости переменного конденсатора C_1 . Емкость конденсатора в пикофарадах определяется суммированием значений цифровых индикаторов под соответствующими шкалами изменения емкости переменного конденсатора.

5. Изменить частоту сигнала и произвести новые измерения как в п. 4.

6. При необходимости изменить температуру в камере как в п. 3.

7. При необходимости выбрать другую катушку, используя кнопку «Заменить катушку».

4. Последовательность выполнения работы

1. Получить у преподавателя задание на исследование конкретной катушки индуктивности в указанном диапазоне температур и частот.

2. Для каждого значения температуры провести измерения Q_1 , C_1 на фиксированной частоте и полученные значения занести в таблицу, пример которой показан ниже. Рекомендуется начать с температуры в измерительной камере $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Темпер.	Частота	Q_1	C_1	L	r_{Π}	μ_c

3. Рассчитать значения L для исследуемых катушек, используя формулу (16), и построить графики зависимости добротности и индуктивности от частоты при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4. Рассчитать значение сопротивления потерь r_{Π} катушки, используя формулу (10), и построить график зависимости r_{Π} от частоты.

5. На частоте, указанной преподавателем, определить среднее значение ТКИ и ТКД по формулам (14) и (15).

6. В случае исследования катушки с магнитным сердечником дополнительно рассчитать значение μ_c , используя формулу (5), и занести данные в дополнительный столбец таблицы. Построить зависимость μ_c от температуры при фиксированной частоте.

5. Содержание отчета

1. Отчет выполняется каждым студентом индивидуально.
2. Отчет должен содержать:
 - название работы;
 - цель работы;
 - основные теоретические сведения;
 - конструктивные особенности исследуемых катушек;
 - схемы измерения;
 - полученные расчетные данные;
 - необходимые графики, требуемые по заданию.

6. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

1. Назначение катушек индуктивности при использовании их в РЭА.
2. От чего зависит величина индуктивности катушки?
3. Назовите основные классические конструкции катушек индуктивности.
4. Перечислите основные параметры катушек индуктивности.
5. Что такое собственная емкость катушки индуктивности и от чего она появляется?
6. Какие способы уменьшения собственной емкости катушки вы знаете?
7. Нарисуйте эквивалентную схему катушки индуктивности и объясните назначение ее элементов.
8. Зачем в катушку индуктивности помещают магнитный сердечник и на какие параметры катушки индуктивности он влияет?
9. Что такое ТКИ и как он определяется?
10. Что такое ТКД и как он определяется?
11. Что такое собственный резонанс катушки индуктивности?
12. Что такое собственное сопротивление катушки и из чего оно состоит?
13. Как каркас катушки влияет на ее параметры?
14. Какие конструкции современных катушек индуктивности используют для поверхностного монтажа?
15. Что такое ЧИП катушки и как конструктивно они выполнены?

Библиографический список

1. Покровский Ф.Н. Материалы и компоненты радиоэлектронных средств: учеб. пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005.- 350 с.: ил.

2. Пасынков В. В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники. - М.: Высшая школа, 1986. - С. 325-359.

3. Электрорадиоматериалы / под ред. Б. М. Тареева. - М.: Высшая школа, 1978. - С. 122 – 130.

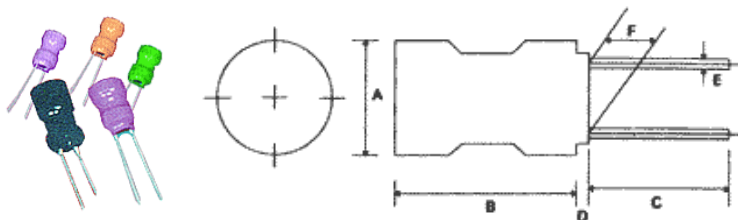
4. Справочник по схемотехнике для радиолюбителя /под ред. В.П.Боровского.- Киев: Техника, 1987.- 431 с.

5. Справочник по электротехническим материалам. В 3 т /под ред. Ю.В. Корицкого и др. Т. 1. изд. 2-е, перераб.- М.: Энергия, 1974. - 584 с., ил.

6. Справочник по электротехническим материалам. В 3 т под ред. Ю.В. Корицкого и др. Т. 3. изд. 2-е, перераб.- М.: Энергия, 1974. - 896 с., ил.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Параметры и характеристики некоторых малогабаритных катушек индуктивности отечественных производителей



Индуктивность РК0406

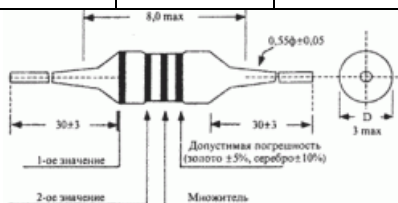
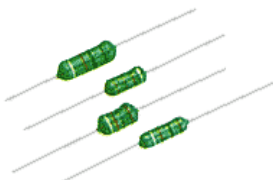
Ана-
КИГ

А (макс)	В (макс)	С (мин)	Д (макс)	Е (± 0.05)	Ф (макс)
5.0	8.0	15.0	3.0	0.55	2.0 \pm 0.5

лог

Тип	Индуктивность, мкГн	Добротность, Q, мин	Резонансная частота, МГц, мин	Активное со- противление, Ом, макс
РК0406- 1R0M- S0	1.0	130	120	0.035
РК0406- 4R7M- S0	4,7	100	50	0,140
РК0406- 6R8M-	6,8	100	30	0,15

S0				
PK0406-100M-S0	10	80	20	0,23
PK0406-220K-S0	22	80	10	0,45



Индуктивность ЕС24

Аналоги ДПМ, ДМ

Система обозначений

ЕС	24-	330	К-	Т5	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)

- (1) Тип
 (2) Форма
 (3) Индуктивность
 (4) Точность
 (5) Вид формовки
 (6) "А" -- упаковка в ленте

Цвет	Значение	Множитель	Точность, %
Черный	0	1	-
Коричневый	1	10	-
Красный	2	100	-
Оранжевый	3	1000	-
Желтый	4	-	-
Зеленый	5	-	-
Голубой	6	-	-
Фиолетовый	7	-	-
Серый	8	-	-
Белый	9	-	-
Черный	-	-	±20
Серебряный	-	0.01	±10
Золотой	-	0.1	±5

Тип	Индуктивность, мкГн	Точность, %	Добротность, Q, мин	Тестовая частота, МГц	Резонансная частота, МГц, мин	Активное сопротивление, макс, Ом
ЕС24-R027M-CC	0.027	M(±20%) [K(±10%)]	40	50.0	500	0.02
ЕС24-R033M-CC	0.033	M(±20%) [K(±10%)]	40	50.0	490	0.02
ЕС24-R039M-CC	0.039	M(±20%) [K(±10%)]	40	50.0	480	0.02

Тип	Индуктивность, мкГн	Точность, %	Добротность, Q, мин	Тестовая частота, МГц	Резонансная частота, МГц, мин	Активное сопротивление, макс, Ом
EC24-R33K	0.33	M($\pm 20\%$) [K($\pm 10\%$)]	40	25.2	350	0.16
EC24-R39K	0.39	M($\pm 20\%$) [K($\pm 10\%$)]	40	25.2	320	0.18
EC24-R47K	0.47	M($\pm 20\%$) [K($\pm 10\%$)]	40	25.2	300	0.26
EC24-R56K	0.56	M($\pm 20\%$) [K($\pm 10\%$)]	40	25.2	280	0.38
EC24-R68K	0.68	M($\pm 20\%$) [K($\pm 10\%$)]	40	25.2	250	0.42
EC24-R82K	0.82	M($\pm 20\%$) [K($\pm 10\%$)]	40	25.2	200	0.55
EC24-150K	15	K($\pm 10\%$) [J($\pm 5\%$)]	50	2.52	16	0.88
EC24-180K	18	K($\pm 10\%$) [J($\pm 5\%$)]	50	2.52	15	1.00
EC24-220K	22	K($\pm 10\%$) [J($\pm 5\%$)]	60	2.52	13	1.20
EC24-270K	27	K($\pm 10\%$) [J($\pm 5\%$)]	60	2.52	11	1.35
EC24-330K	33	K($\pm 10\%$) [J($\pm 5\%$)]	50	2.52	10	1.50
EC24-390K	39	K($\pm 10\%$) [J($\pm 5\%$)]	50	2.52	9.5	1.70
EC24-470K	47	K($\pm 10\%$) [J($\pm 5\%$)]	50	2.52	8.5	2.30

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

**ПОДГОТОВКА СТУДЕНТОВ
К ТЕКУЩЕМУ И ПРОМЕЖУТОЧНОМУ
КОНТРОЛЮ ОСВОЕНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ**

Методические указания



Рязань 2016

УДК 621.3

Подготовка студентов к текущему и промежуточному контролю освоения компетенций: методические указания; / Рязан. гос. радиотехн. ун-т сост.: Т.А.Холомина, Е.Н.Евдокимова. Рязань, 2016. 16 с.

Приведены рекомендации, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующие этапы формирования компетенций студентов, обучающихся по программам бакалавриата и магистратуры по направлениям подготовки 11.03.04 и 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника», ООП «Нанотехнологии в электронике».

Отмечены особенности текущего и промежуточного контроля освоения компетенций обучающимися по самостоятельной работе и лабораторным практикумам при изучении специальных дисциплин, а также при прохождении производственной практики.

Предназначены для аудиторной и самостоятельной работы.

Табл.2. Библиогр.: 4 назв.

Компетенции, текущий контроль, промежуточный контроль, методические рекомендации, критерии оценки

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: Региональный центр зондовой микроскопии (коллективного пользования) при кафедре микро- и наноэлектроники Рязанского государственного радиотехнического университета (директор центра Н.В.Вишняков)

Подготовка студентов к текущему и промежуточному контролю освоения компетенций

Составители: Х о л о м и н а Татьяна Андреевна
Е в д о к и м о в а Елена Николаевна
Редактор Р.К. Мангутова. Корректор Н.А. Орлова

Подписано в печать 01.08.16. Формат бумаги 60x84 1/16.
Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл печ. л.1,0.
Тираж 30 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Формы текущего контроля успеваемости

Текущий контроль успеваемости студентов проводится с целью определения степени усвоения учебного материала, своевременного выявления и устранения недостатков в подготовке обучающихся и принятия необходимых мер по совершенствованию методики преподавания учебной дисциплины, организации работы обучающихся в ходе учебных занятий и оказания им индивидуальной помощи.

К контролю текущей успеваемости относятся проверка знаний, умений и навыков обучающихся: на занятиях, по результатам выполнения обучающимися индивидуальных заданий, проверки качества конспектов лекций и иных материалов.

Текущий контроль по учебным дисциплинам проводится в виде контрольных расчетных заданий, тестовых опросов по отдельным темам, проверки заданий, выполняемых самостоятельно и на лабораторных занятиях, а также экспресс – опросов и заданий по лекционным материалам и лабораторным работам. Результаты решения задач и ответы на вопросы тестовых заданий контролируются преподавателем.

Ниже в качестве примеров приведены методические рекомендации по формированию отчетов по самостоятельной и лабораторной работам.

Методические требования к структуре аналитического отчета

по самостоятельной работе:

1) титульный лист;

2) часть I – «Аналитическая часть» - анализ раздела индивидуального задания по дисциплине, формулировка актуальности темы, цели и задач разработки или исследования объекта и предмета разработки или исследования, оценка современного состояния изучаемой проблемы;

3) часть II - «Основная часть» - результаты выполнения основной части раздела индивидуального задания по дисциплине (обзор научно-методических информационных источников - современных научных статей и монографий по теме, выявление вопросов, требующих углубленного изучения; формирование и обоснование собственной точки зрения на рассматриваемые проблемы и возможные пути их разрешения; необходимые расчеты, моделирование и другие задания, предусмотренные темой самостоятельной работы. Материал не должен иметь только компилятивный характер, но обладать новизной, практической

значимостью, отражать точку зрения автора на изучаемые проблемы и результаты проделанной работы.

4) часть III – «Заключение» – заключение и выводы по результатам выполненной работы;

5) список использованных научных и научно-методических источников;

6) приложения (при необходимости).

Методические требования к оформлению отчетов по лабораторным работам

Отчет по лабораторной работе должен содержать следующие элементы:

- номер, название и цель работы;
- чертеж функциональной схемы установки, выполненный карандашом по линейке либо при помощи соответствующей компьютерной программы, с соблюдением требований ЕСКД;
- основные расчетные соотношения;
- таблицы результатов экспериментов, выполненные карандашом по линейке;
- графики экспериментальных зависимостей, полученных при выполнении лабораторной работы;
- выводы, содержащие анализ экспериментальных зависимостей, сравнение результатов, полученных в работе, с данными справочной литературы.

При выполнении лабораторной работы каждому студенту необходимо иметь полностью оформленный отчет по ранее выполненной работе и отчет по выполняемой работе, содержащий все перечисленные элементы (за исключением экспериментальных данных в таблице, графиков, выводов). При несоблюдении указанных требований студент к лабораторной работе не допускается.

Формирование у обучающихся во время обучения в семестре предусмотренных стандартом компетенций на этапах лабораторных занятий (после каждой лабораторной работы) и самостоятельной работы (на консультациях) оценивается по критериям шкалы оценок - «зачтено» – «не зачтено».

Оценки "зачтено" заслуживает обучающийся, обнаруживший знания основного учебного материала в объеме, необходимом для дальнейшей учебы и предстоящей работы по профессии, знакомый с основной литературой, рекомендованной программой, справляющийся с выполнением графика и содержания заданий, предусмотренных учебным планом.

Оценка "не зачтено" выставляется обучающемуся, обнаружившему пробелы в знаниях основного учебного материала,

допустившему принципиальные ошибки в выполнении заданий, предусмотренных учебным планом.

Формы промежуточного контроля

Формой промежуточного контроля по дисциплине является зачет или экзамен. К этапу промежуточного контроля допускаются обучающиеся, полностью выполнившие все виды учебной работы, предусмотренные учебным планом и программой дисциплины. Формами проведения зачета или экзамена могут быть тесты, письменный или устный ответ по утвержденным экзаменационным билетам, сформулированным с учетом содержания учебной дисциплины.

Критерии оценки компетенций обучающихся и шкалы оценивания

Оценка степени формирования компетенций, сформулированных в федеральных государственных образовательных стандартах высшего образования по направлению подготовки бакалавров (11.03.04) и магистров (11.04.04) «Электроника и наноэлектроника», контролируемых на различных этапах их формирования у обучающихся, проводится преподавателем во время лекций, консультаций и лабораторных занятий по шкале оценок «зачтено» – «не зачтено». Освоение материала дисциплины и достаточно высокая степень формирования контролируемых компетенций обучающегося (эффективное и своевременное выполнение всех видов учебной работы, предусмотренных учебным планом и учебной программой) служат основанием для допуска обучающегося к этапу промежуточной аттестации – зачету или экзамену.

Целью проведения промежуточной аттестации (зачета или экзамена) является проверка общекультурных, общепрофессиональных и профессиональных компетенций, приобретенных студентом при изучении конкретной дисциплины. Уровень теоретической подготовки студента определяется составом и степенью формирования приобретенных компетенций, усвоенных теоретических знаний и методов, а также умением осознанно и эффективно применять их при решении практических задач

Экзамен организуется и осуществляется, как правило, в форме собеседования. Средством, определяющим содержание собеседования студента с экзаменатором, является утвержденный экзаменационный билет, содержание которого определяется основной образовательной программой (ООП) «Нанотехнологии в электронике» и рабочей

программой дисциплины. Экзаменационный билет включает в себя, как правило, три вопроса, из которых два относятся к теоретическим разделам дисциплины и один – практическому применению теоретических знаний к решению задач.

Оценке на заключительной стадии экзамена подвергаются устные ответы экзаменуемого на вопросы экзаменационного билета, а также дополнительные вопросы экзаменатора.

Применяются следующие критерии оценивания компетенций (результатов):

- уровень усвоения материала, предусмотренного программой;
- умение анализировать материал, устанавливать причинно-следственные связи;
- полнота, аргументированность, убежденность ответов на вопросы;
- качество ответа (общая композиция, логичность, убежденность, общая эрудиция);
- использование дополнительной литературы при подготовке к этапу промежуточной аттестации.

Применяется четырехбалльная шкала оценок: "отлично", "хорошо", "удовлетворительно", "неудовлетворительно", что соответствует шкале "компетенции студента полностью соответствуют требованиям ФГОС ВО", "компетенции студента соответствуют требованиям ФГОС ВО", "компетенции студента в основном соответствуют требованиям ФГОС ВО", "компетенции студента не соответствуют требованиям ФГОС ВО".

К оценке уровня знаний и практических умений и навыков предъявляются следующие общие требования.

«Отлично»:

глубокие и твердые знания программного материала программы дисциплины, понимание сущности и взаимосвязи рассматриваемых явлений (процессов);

полные, четкие, логически последовательные, правильные ответы на поставленные вопросы; умение выделять главное и делать выводы.

«Хорошо»:

достаточно полные и твердые знания программного материала дисциплины, правильное понимание сущности и взаимосвязи рассматриваемых явлений (процессов);

последовательные, правильные, конкретные, без существенных неточностей ответы на поставленные вопросы, свободное устранение замечаний о недостаточно полном освещении отдельных положений при постановке дополнительных вопросов.

«Удовлетворительно»:

знание основного программного материала дисциплины, понимание сущности и взаимосвязи основных рассматриваемых явлений (процессов):

понимание сущности обсуждаемых вопросов, правильные, без грубых ошибок ответы на поставленные вопросы, несущественные ошибки в ответах на дополнительные вопросы.

«Неудовлетворительно»:

отсутствие знаний значительной части программного материала дисциплины; неправильный ответ хотя бы на один из вопросов, существенные и грубые ошибки в ответах на дополнительные вопросы, недопонимание сущности излагаемых вопросов, неумение применять теоретические знания при решении практических задач, отсутствие навыков в обосновании выдвигаемых предложений и принимаемых решений.

При трех вопросах в билете общая оценка выставляется следующим образом: «отлично», если все оценки «отлично» или одна из них «хорошо»; «хорошо», если не более одной оценки «удовлетворительно»; «удовлетворительно», если две и более оценок «удовлетворительно»; «неудовлетворительно», если одна оценка «неудовлетворительно», а остальные не выше чем «удовлетворительно» или две оценки «неудовлетворительно».

Практики

Основной целью учебной, производственной, преддипломной практик является формирование у студентов общекультурных, личностных и профессиональных компетенций, направленных на закрепление и углубление теоретической подготовки, овладение умениями и навыками самостоятельной постановки задач, структурирования и анализа полученных результатов, формулировки выводов, приобретение и развитие навыков проведения инженерной и научно-исследовательской работы, подготовку к выполнению выпускной квалификационной работы. Формы проведения указанных видов практики - лабораторная и/или заводская.

В задачи, например производственной практики студентов входят следующие:

-изучение современной элементной базы электронной техники и типовых технологических процессов;

- изучение и анализ возможностей решения задач, возникающих в ходе производственной деятельности, и требующих углубленных знаний;
- анализ научной и практической значимости проводимых работ;
- формирование навыков обобщения и обработки полученных результатов, анализа и осмысления их с учетом литературных данных;
- измерения и экспериментальные исследования объектов электроники;
- участие в проведении модельных и натуральных экспериментов по оптимизации структуры и конструкции исследуемых приборов и устройств, оценка их качества и надежности на стадиях проектирования и эксплуатации;
- подготовка результатов исследований для опубликования в научной печати, а также составление обзоров, рефератов, отчетов и докладов;
- применение методов и средств компьютерного моделирования физических процессов и явлений в материалах, приборах и устройствах электроники и нанoeлектроники;
- отработка навыков сбора, обработки, анализа и систематизации научно-технической информации по теме индивидуального задания;
- отработка навыков формулирования и решения задач, возникающих в процессе выполнения индивидуального задания;
- выполнение индивидуального задания по производственной практике;
- проведение анализа достоверности полученных результатов.

СОДЕРЖАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ПРАКТИКИ

Производственная практика проводится в рамках общей концепции подготовки, предполагающей формирование профессиональных и коммуникативных умений, связанных с научно-исследовательской работой, проектно-технологической производственной деятельностью.

Тематика мероприятий, проводимых в рамках производственной практики, связана с изучением основных методов проектирования электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения, подготовки технических заданий на

выполнение проектных работ и технологических процессов на производстве; постановкой и проведением исследований характеристик и параметров электронных устройств, объектов микро- и нанотехнологий; диагностикой параметров приборов и устройств в производственных условиях; теоретическим и экспериментальным изучением микро- и квантоворазмерных объектов.

Во время производственной практики студент должен

изучить:

- формы организации научной деятельности в вузе или производственной – на предприятии;
- научно-методическую литературу по правилам оформления результатов научной деятельности,
- литературные и патентные источники по разрабатываемой теме с целью их использования при выполнении выпускной квалификационной работы;
- методы исследования по теме индивидуального задания;
- методы анализа и обработки экспериментальных данных;
- требования к оформлению научно-технической документации;

освоить:

- правила эксплуатации исследовательского или производственного оборудования;
- методы анализа, систематизации и обобщения научно-технической информации по теме индивидуального задания;
- методы анализа достоверности, научной и практической значимости результатов проводимых исследований, а также технико-экономической эффективности разработки.

Содержание программы производственной практики включает в себя:

- изучение возможностей использования новых физических явлений для создания новых материалов, технологий, компонентов, приборов и устройств электроники, микро- и нанoeлектроники;
- освоение организационных форм и методов организации научных исследований в высшем учебном заведении или основных производственных программ на промышленном предприятии;
- формирование практических навыков научно-

исследовательской работы в высшей школе, подготовки, систематизации и оформления научного материала по требуемой тематике в соответствии с требованиями ГОСТов;

- оценку достоверности, научной новизны и практической значимости результатов научно-исследовательской работы или проектно-технологического решения;

- сравнение результатов исследований (разработок) с аналогичными отечественными и зарубежными результатами.

Содержание программы производственной практики включает в себя:

- возможное участие магистранта в производственной деятельности;

- встречи со специалистами, знающими постановления, распоряжения, приказы, методические и нормативные материалы;

- встречи со специалистами, знающими технические характеристики и экономические показатели отечественных и зарубежных разработок в области электронного материаловедения, элементной базы электронной техники, электронного приборостроения, применения нанотехнологий в электронике;

- встречи со специалистами, знающими действующие стандарты и технические условия, положения и инструкции по эксплуатации производственного и технологического оборудования, программам испытаний, оформлению технической документации;

- изучение возможностей использования новых физических явлений для создания новых материалов, технологий, компонентов, приборов и устройств электроники, микро - и нанoeлектроники;

- изучение современной элементной базы электронной техники;

- изучение современной научно-исследовательской аппаратуры;

- сравнение результатов исследований (разработок) с аналогичными отечественными и зарубежными результатами/

Проведение производственной практики включает ряд взаимосвязанных этапов: организационный; аналитический; основной (расчетно-конструкторский, технологический и (или) экспериментальный) и заключительный, включающий анализ полученных результатов, оформление и защиту отчета.

№ п/ п	Разделы (этапы) практики	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов	Формы текущего контроля (отчетная документация)
1	Организационный этап	Организационное собрание магистрантов с руководителями практики и руководителем ООП, уточнение задач практики, ее содержания в зависимости от места проведения практики. -Заключение договора на прохождение производственной практики (если студент направляется на иное место практики, чем выпускающая кафедра). -Составление и согласование с предприятием программы прохождения производственной практики, в т.ч. индивидуального задания в соответствии с темой НИР.	Договор на прохождение производственной практики (при необходимости) Программа производственной практики
2	Аналитический этап (общая часть)	Анализ индивидуального задания по производственной практике. Формирование плана и графика работы над индивидуальным заданием. Сбор, актуализация информационных ресурсов и обновление теоретико-методологических основ исследования в рамках тематики ВКР	Часть I отчета.
3	Аналитический этап (функциональная часть)	Составление аналитического обзора научно-технической литературы по теме производственной практики. Анализ информационных ресурсов и теоретико-методологических основ исследования, предложения и рекомендации по теме индивидуального задания	Часть II отчета
4	Расчетно-конструкторский, технологический и (или) экспериментальные этапы производственной практики	Выполнение основной части индивидуального задания по теме производственной практики. Анализ результатов разработки (экспериментального исследования), моделирование процессов, параметров, характеристик объекта исследования Выводы и заключение по выполнению темы индивидуального задания по производственной практике	Часть III отчета
5	Оформление и защита отчета	Подготовка и презентация отчета по производственной практике	Оформленный отчет, доклад и презентация по результатам производственной практики

График работы студента во время производственной практики включает в себя:

- оформление и получение пропусков на предприятие;
- изучение правил внутреннего распорядка техники безопасности;
- проведение учебных занятий и экскурсий;
- выполнение самостоятельных заданий на конкретном рабочем месте;
- оформление отчета;
- сдачу зачета по практике.

В период практики следует ориентировать студента на разработку темы выпускной квалификационной работы и обоснование целесообразности ее разработки.

ФОРМЫ ОТЧЕТНОСТИ ПО ПРАКТИКЕ

Согласно Положению о порядке проведения практик студентов образовательных организаций высшего образования (Приказ Министерства образования РФ №1154 от 25.03.2003) форма и вид отчетности (дневник, отчет и т.п.) студентов о прохождении практик определяются образовательной организацией.

Общее руководство и контроль за прохождением практики студентов конкретного направления подготовки возлагается приказом ректора на руководителя практики по направлению подготовки магистров.

Перед началом практики руководитель проводит организационное собрание студентов-магистрантов, направляемых на практику, и информирует о ее целях и задачах. Руководитель выдает магистранту:

- индивидуальное задание и план прохождения производственной практики;
- график проведения производственной практики.

Непосредственное руководство и контроль за выполнением индивидуального задания и плана практики студента осуществляется его научным руководителем.

Научный руководитель магистранта:

- осуществляет постановку задач по самостоятельной работе студентов в период практики с выдачей индивидуальных заданий,

оказывает соответствующую консультационную помощь;

- согласовывает график проведения практики и осуществляет систематический контроль за ее ходом и работой студентов;

- оказывает помощь студентам по всем вопросам, связанным с прохождением практики и оформлением дневника и отчета о практике.

При прохождении практики магистрант получает от руководителя указания, рекомендации и разъяснения по всем вопросам, связанным с организацией и прохождением практики, отчитывается о выполняемой работе в соответствии с графиком проведения практики.

По окончании срока производственной практики магистрант предоставляет на кафедру следующие материалы:

- дневник производственной практики;
- отчет о выполнении программы производственной практики;
- отзыв научного руководителя или руководителя от предприятия, на базе которого магистрант проходил практику;
- доклад и презентацию по результатам практики.

В дневнике должны быть отражены результаты текущей работы и выполненные задания. Дневник производственной практики заполняется лично магистрантом. Записи о выполненных работах производятся по мере необходимости, но не реже одного раза в неделю. Достоверность записей проверяется руководителем и заверяется его подписью.

Отчет о практике - основной документ, характеризующий работу студента-магистранта во время практики.

Текст отчета должен быть отредактирован и напечатан с соблюдением правил оформления научных работ, предусмотренных ГОСТом. Структура отчета определяется его формой. В отчет о производственной практике должны быть включены следующие сведения:

- место прохождения (предприятие, структурное подразделение), сроки практики;
- характеристики и параметры изученных компонентов, комплексов и технологических процессов электроники и наноэлектроники;

- характеристики и параметры измерительного оборудования, применяемого на предприятии, в структурном подразделении; программ испытаний продукции;

- особенности применяемых на предприятии, в структурном подразделении информационных технологий и программных продуктов;

- основные методические приемы и правила оформления технической документации;

- перечисление изученных положений и инструкций по эксплуатации производственного и технологического оборудования;

- перечисление изученных постановлений, распоряжений, приказов, методических и нормативных материалов;

- предложения по организации и проведению практики;

- список использованной литературы.

На основании представленных материалов проводится промежуточная аттестация магистранта по итогам производственной практики в форме дифференцированного зачета. Производственная практика считается завершенной при условии выполнения магистрантом всех требований программы практики. Оценка, полученная на дифференцированном зачете, вместе с оценками (зачётами) по теоретическому обучению учитывается при подведении итогов общей успеваемости студентов и назначении стипендии в соответствующем семестре.

Магистранты, не выполнившие программу производственной практики по уважительной причине, направляются на практику вторично в свободное от учебы время или проходят практику в индивидуальном порядке.

Магистранты, не выполнившие без уважительной причины требования программы практики или получившие неудовлетворительную оценку, отчисляются из университета как имеющие академическую задолженность в порядке, предусмотренном Уставом университета и Положением о зачетной и экзаменационной сессиях и порядке ликвидации академической задолженности.

Формы текущего контроля

Для текущего контроля качества усвоения знаний студентами и оценки степени формирования указанных выше компетенций, знаний, умений и практических навыков используется следующий диагностический инструментарий:

- контроль руководителем содержания дневника производственной практики;
- защита студентом отчета о производственной практике.

Методические материалы по производственной практике содержат тестовые задания с возможными вариантами ответов по каждому из разделов, предусмотренных индивидуальным заданием на прохождение практики. Результаты ответов на вопросы тестовых заданий контролируются преподавателем.

7.3 Формы промежуточного контроля

Формой промежуточного контроля по производственной практике является дифференцированный зачет.

7.4 Описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования, шкал оценивания

Оценка степени формирования указанных выше (п. 7.1) контролируемых компетенций у обучающихся на различных этапах их формирования проводится руководителем в форме текущего контроля содержания дневника производственной практики, тестовых опросов по отдельным разделам индивидуального задания, результатам защиты отчета по производственной практике. Освоение программного материала и достаточно высокая степень формирования контролируемых компетенций обучающегося служат основанием для допуска обучающегося к этапу промежуточной аттестации – дифференцированному зачету по практике.

Уровень подготовки студента определяется составом и степенью формирования приобретенных компетенций, усвоенных теоретических знаний и методов, умением осознанно, эффективно применять их при целенаправленном поиске решения актуальных проблем электроники и нанoeлектроники и считается соответствующим требованиям стандартов, если студент

демонстрирует способности решать задачи научно-исследовательской работы и профессиональной деятельности в типовых ситуациях без погрешностей принципиального характера.

Показатели оценивания компетенций представлены в разделе 2 настоящей программы производственной практики с декомпозицией «знать», «уметь», «владеть». Основными этапами формирования вышеуказанных компетенций при прохождении практики являются последовательное прохождение содержательно связанных между собой этапов практики. Итоговая оценка, полученная с учетом оценивания компетенций на различных этапах их формирования, показывает успешность освоения компетенций обучающимися в период производственной практики.

Прохождение практики осуществляется в соответствии с программой, разработанной обучающимся совместно с руководителем практики от вуза (научным руководителем студента), согласованной с руководителем от предприятия (при наличии) и утвержденной руководителем ООП. Результаты практики должны быть оформлены в виде отчета. Отчет является основанием для аттестации студента.

По итогам производственной практики предусмотрена защита, которая проходит на заседании выпускающей кафедры или перед комиссией в составе руководителя ООП «Нанотехнологии в электронике», руководителя практики группы студентов или научных руководителей магистрантов в форме доклада с презентацией в установленные учебным планом сроки.

По результатам аттестации студенту выставляется дифференцированный зачет (зачет с оценкой).

При выставлении итоговой оценки учитываются следующие факторы:

1) отзыв руководителя от университета, отражающий следующие характеристики студента:

– соблюдение графика производственной практики;

– качество подготовки отчетной документации (проверка отчета на соблюдение требований по формальным признакам);

- выполнение программы производственной практики и отражение результатов в отчете;
 - самостоятельность при выполнении заданий, предусмотренных программой производственной практики;
 - научная новизна и практическая значимость полученных результатов, обоснованность предложений и рекомендаций;
- 2) процедура защиты отчета:
- полнота отражения в докладе и презентации результатов производственной практики, отраженных в отчете;
 - знание предметной области;
 - научная новизна и практическая значимость полученных результатов, обоснованность предложений и рекомендаций;
 - грамотность, развернутость, структурированность и логичность ответов на вопросы;
- 3) отзыв, подготовленный руководителем от предприятия (организации), характеризующий выполнение обязанностей практиканта.

Аттестация студента осуществляется на основании следующих критериев:

Шкала оценивания	Критерий
<p><i>Зачтено с оценкой «отлично»</i></p>	<p><i>Отзыв руководителя от вуза:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – студент строго соблюдал график практики; – отчет полностью соответствует требованиям, предъявляемым к отчетной документации; – программа производственной практики выполнена полностью; – задания выполнялись полностью самостоятельно, студент проявил творческий подход к решению задач практики; – результаты, полученные студентом, обладают научной новизной и (или) практической значимостью, студент внес обоснованные предложения и рекомендации. <p><i>Процедура защиты отчета:</i></p> <p>– доклад и презентация полностью отражают результаты,</p>

	<p>полученные студентом в период практики и представленные в отчете;</p> <ul style="list-style-type: none"> – студент показал глубокие знания вопросов темы, свободно оперировал данными исследования; – результаты, полученные студентом, обладают научной новизной и(или) практической значимостью, студент внес обоснованные предложения и рекомендации; – студент правильно и грамотно ответил на все поставленные вопросы. <p><i>Отзыв руководителя от предприятия:</i> студент получил положительный отзыв от руководителя практики от предприятия.</p>
<p>Зачтено с оценкой «хорошо»</p>	<p><i>Отзыв руководителя от вуза:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – студент в основном соблюдал график практики; – отчет соответствует требованиям, предъявляемым к отчетной документации, студентом допущены несущественные ошибки, отчет выполнен с незначительными замечаниями по оформлению; – программа производственной практики выполнена полностью; – задания выполнялись самостоятельно при определенной консультационной поддержке со стороны руководителя от вуза; – результаты, полученные студентом, обладают научной новизной и (или) практической значимостью, студент внес обоснованные предложения и рекомендации. <p><i>Процедура защиты отчета:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – доклад и презентация отражают основные результаты, полученные студентом в период практики и представленные отчете; – студент показал базовые знания вопросов темы, оперировал данными исследования; – результаты, полученные студентом, обладают научной новизной и(или) практической значимостью, студент внес обоснованные предложения и рекомендации; – при ответах на вопросы были допущены ошибки, которые носят несущественный характер. <p><i>Отзыв руководителя от предприятия:</i> студент получил положительный отзыв от руководителя практики от предприятия с незначительными замечаниями и рекомендациями.</p>
<p>Зачтено</p>	<p><i>Отзыв руководителя от вуза:</i></p>

<p>с оценкой «удовлетворительно»</p>	<ul style="list-style-type: none"> – студент не соблюдал график практики без уважительной причины; – отчет имеет поверхностный анализ собранного материала, большинство материалов скомпилировано из существующих источников без необходимого осмысления, имеет нечеткую последовательность изложения материала, студентом допущены существенные ошибки, отчет выполнен с многочисленными замечаниями по его оформлению; – программа производственной практики выполнена полностью; – задания выполнялись самостоятельно лишь частично, консультационная поддержка со стороны руководителя от вуза не была должным образом воспринята студентом; – результаты, полученные студентом, не обладают научной новизной и(или) практической значимостью, предложения и рекомендации не имеют достаточного обоснования. <p><i>Процедура защиты отчета:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – доклад и презентация поверхностны, не отражают основные результаты, полученные студентом в период практики и представленные отчете; – студент показал слабые знания вопросов темы, не оперировал данными исследования; – результаты, полученные студентом, не обладают научной новизной и(или) практической значимостью, предложения и рекомендации не имеют достаточного обоснования; – студент не дал полных и аргументированных ответов на заданные вопросы. <p><i>Отзыв руководителя от предприятия:</i></p> <p>в отзыве руководителя практики от предприятия имеются существенные замечания.</p>
<p>Не зачтено</p> <p>с оценкой «неудовлетворительно»</p>	<p><i>Отзыв руководителя от вуза:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – студент не соблюдал график практики без уважительной причины; – отчет не имеет детализированного анализа собранного материала, представленные в отчет материалы скомпилированы из существующих источников без необходимого осмысления, студентом допущены принципиальные ошибки в его изложении, отчет не соответствует требованиям к оформлению; – программа производственной практики выполнена не полностью; – задания выполнялись не самостоятельно, консультационная поддержка со стороны руководителя от вуза не оказывалась по причине неявки студента; – результаты, полученные студентом, не обладают научной новизной и (или) практической значимостью, отсутствуют предложения и рекомендации.

	<p><i>Процедура защиты отчета:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – доклад и презентация выполнены без должной связи с программой практики; – студент показал слабые знания вопросов темы, не оперировал данными исследования; – результаты, полученные студентом, не обладают научной новизной и (или) практической значимостью, отсутствуют предложения и рекомендации; – студент затруднился ответить на поставленные вопросы или допустил в ответах принципиальные ошибки. <p><i>Отзыв руководителя от предприятия:</i></p> <p>отзыв руководителя практики от предприятия отсутствует или в нем имеются существенные критические замечания.</p>
--	---

Итоговая дифференцированная оценка определяется как средняя арифметическая всех выставленных оценок.

Результаты аттестации производственной практики фиксируются в экзаменационной ведомости и зачетных книжках студентов. Получение обучающимся неудовлетворительной оценки является академической задолженностью. Ликвидация академической задолженности по практике осуществляется путем ее повторной отработки по индивидуальному графику.