

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Методические указания

по организации практической работы обучающихся по
дисциплине «Электротехническое и конструкционное
материаловедение» для студентов направления подготовки /специальности
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
Направленность (профиль) Цифровые технологии в электроэнергетике

Ставрополь
2026

Практическое занятие 1

Тема: Изучение и построение диаграмм состояния сплавов.

1 Теоретическая часть

Компоненты, образующие ограниченные твердые растворы, могут образовывать системы, в которых происходит кристаллизация по перитектическому механизму. Диаграмма состояния системы перитектического типа с переменной ограниченной растворимостью в твердом состоянии представлена на рисунке 1.1. Ликвидусом диаграммы является линия $A'r$; pB' , солидусом – линия $A'a$; ab ; bB' , сольвусом – линии aa_1 ; bb_1 . На диаграмме фазового равновесия системы горизонталь rab определяет инвариантное превращение $L_r + \beta_b \rightarrow \alpha_a$, называемое перитектическим. Перитектическая точка r горизонтали rb располагается по одну сторону от точек a и b максимальной взаимной растворимости компонентов в твердом состоянии. Перитектическая реакция $L_r + \beta_b \rightarrow \alpha_a$, протекающая при кристаллизации сплавов участка rab , заключается во взаимодействии жидкости L_r с выпавшими ранее первичными β_b -кристаллами, в результате которого образуются новые α_a -кристаллы. Иначе говоря, жидкость L_r растворяет выпавшие при более высоких температурах β_b -кристаллы, одновременно кристаллизуясь в виде новых кристаллов α_a -твердого раствора.

Кристаллизация и формирование структуры сплавов диаграммы определяется составом сплава. Кристаллизация сплава, состав которого соответствует перитектической точке r , начинается с образования кристаллов α -фазы, и перитектическая реакция в нем невозможна из-за отсутствия кристаллов β -фазы. Структура затвердевшего сплава соответствует однофазному состоянию и состоит только из зерна α -твердого раствора, разделенных высокоугловыми межзеренными границами. При кристаллизации сплавов, фигуративная линия которых пересекает линию rab , происходит

перитектическое превращение. В зависимости от состава сплавов от точки p до точки b перитектическая реакция заканчивается по-разному. Единственным сплавом, в котором перитектическая реакция $L_p + \beta_b \rightarrow \alpha_a$ протекает с одновременным и полным исчезновением обеих исходных фаз, является сплав, отвечающий по составу точке a (рисунок 1.1).

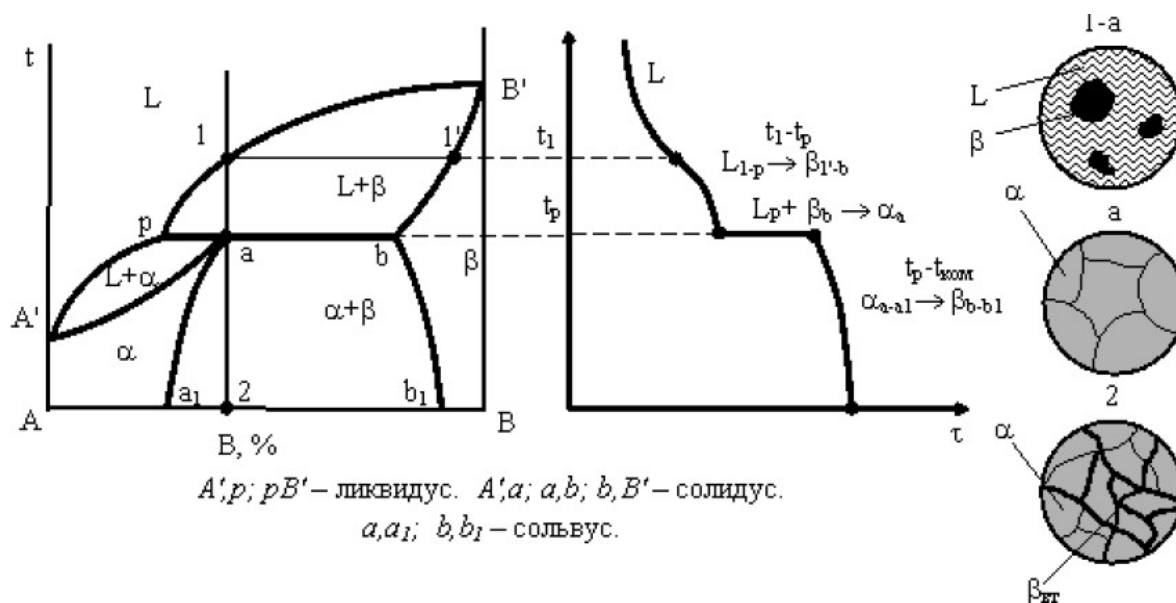


Рисунок 1.1 Диаграмма состояния системы перитектического типа. Кривая охлаждения сплава составом точки a и его структура.

Рассмотрим фазовые превращения, протекающие в этом сплаве. При первичной кристаллизации в интервале температур t_1 – t_p состав β -кристаллов изменяется по кривой солидуса $B'b$ от точки $1'$ к точке b , а состав кристаллизующейся жидкости – по кривой ликвидуса $B'p$ от точки 1 к перитектической точке p или $L_1-p \rightarrow \beta_{1'-b}$. По достижении температуры t_p в равновесии оказываются жидкость L_p и β_b -кристаллы, относительные количества которых определяются отношениями отрезков ab/pb и ap/pb соответственно. Жидкость L_p и первичные кристаллы β_b взаимодействуют по перитектической реакции $L_p + \beta_b \rightarrow \alpha_a$ полностью. В результате такой реакции образуются кристаллы новой α -фазы состава точки a . С понижением

температуры ниже перитектической из кристаллов α -фазы выделяются вторичные кристаллы β -фазы. Состав α -кристаллов изменяется по кривой сольвуса aa_1 , а вторичных β -кристаллов – по кривой сольвуса bb_1 , т.е. $\alpha a_1 \rightarrow \beta b_1$. При комнатной температуре αa_1 -кристаллы оказываются в равновесии с βb_1 -кристаллами. В структуре этого сплава при комнатной температуре выделяются две составляющие: α -кристаллы, образовавшиеся по перитектической реакции, и вторичные β -кристаллы, располагающиеся в виде прожилок по границам зерен. Кривая охлаждения и структура сплава представлены на рисунок 1.1. В сплавах, находящихся между точками а и b (рисунок 1.2) перитектическая реакция протекает лишь до исчезновения жидкости L_p , расходуемой при этом полностью. Причем это происходит в тот момент, когда в сплаве еще сохраняется некоторое количество оказавшихся в избытке кристаллов: $L_p + \beta b \rightarrow \alpha a (+\beta_{изб})$.

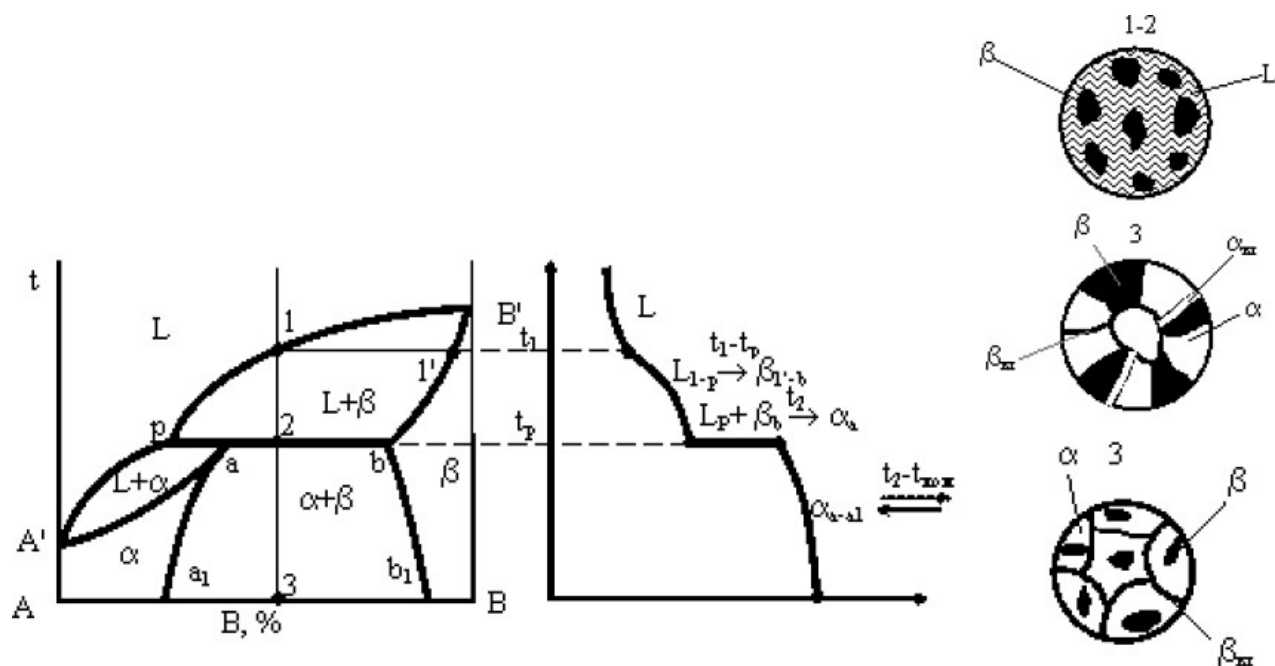


Рисунок 1.2 – Диаграмма состояния системы перитектического типа. Кривая охлаждения и структура сплава с избытком твердой фазы после перитектической реакции.

Количество кристаллов β -фазы, образовавшихся при первичной кристаллизации до начала перитектической реакции, определяется правилом рычага и равно p_2/p_b . После завершения перитектической кристаллизации количество избыточных кристаллов β -фазы в сплаве определяется соотношением a_2/a_b . Структура сплава после превращения состоит из оказавшихся в избытке β -кристаллов и α -кристаллов перитектического происхождения. В зависимости от того, где зарождаются α -кристаллы в сплавах, и соответствующих особенностей механизма перитектического превращения, в системе могут возникать быть два типа структур.

Во-первых, при перитектической реакции α -кристаллы могут зарождаться на поверхности β -кристаллов, окружая их сплошными ободками образующейся фазы. Такая структура носит название структуры окружения, подобная структура изображена на рисунке 1.2, а для сплава системы Sn–Sb – на рисунке 1.3.

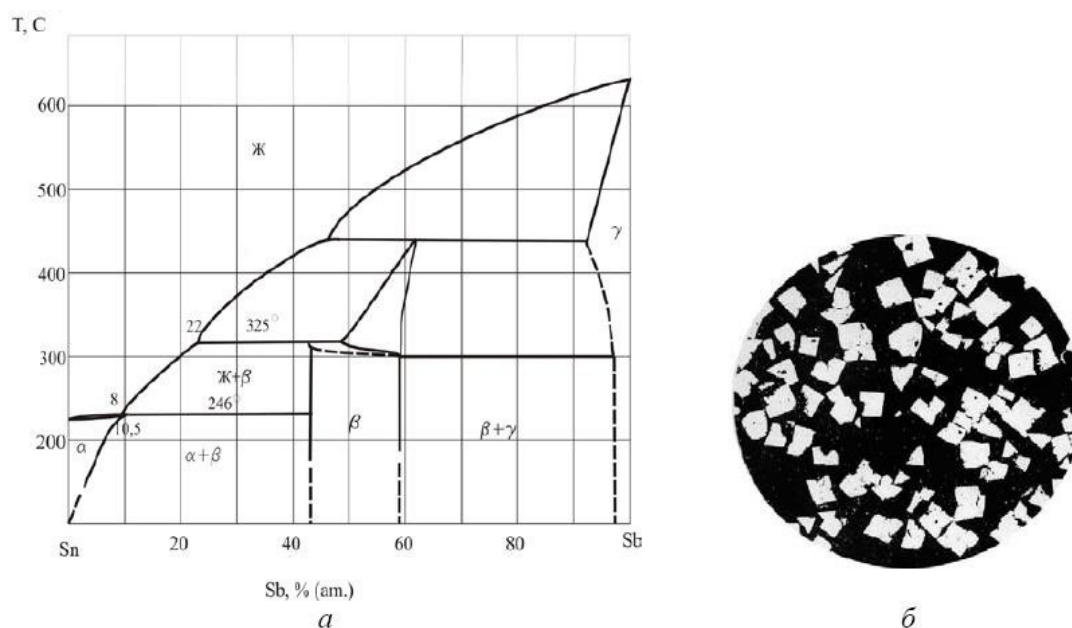


Рисунок 1.3 – Диаграмма состояния системы Sn–Sb (а); структура сплава Sn–20 % Sb в литом состоянии (б); структурные составляющие: избыточные β -кристаллы (SnSb) и α -кристаллы, образовавшиеся по перитектической реакции.

Рисунок 1.4 – Диаграмма состояния Cu–Zn (а); структура сплава Cu–38 % Zn в литом состоянии (б); структурные составляющие: избыточные β -кристаллы (темные) и α -кристаллы (светлые), образовавшиеся по перитектической реакции.

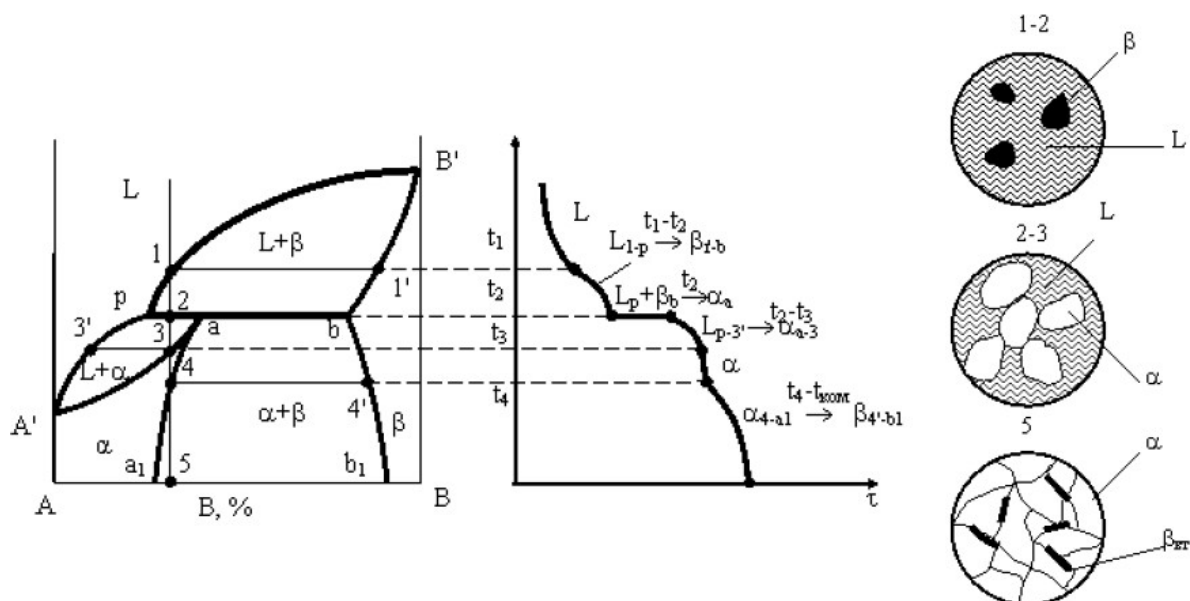


Рисунок 1.5 – Диаграмма состояния перитектического типа. Кривая охлаждения и структура сплава с избытком жидкой фазы после перитектической реакции

Кроме того, жидкость, окружающая растущие кристаллы, не препятствует свободному перемещению межфазной границы в направлении роста. В структуре сплавов наблюдаются отдельно α -кристаллы и отдельно избыточные β -кристаллы. Схематично такая структура представлена на рисунке 1.2, а для сплава на основе системы Cu–Zn – на рисунке 1.4.

В сплавах, расположенных между точками p и a , перитектическая реакция заканчивается полным расходом β_b -кристаллов: $L_p + \beta_b \rightarrow \alpha_a$ (+ $L_{\text{рост}}$), поскольку в этом случае перитектическая реакция развивается в условиях избытка жидкой фазы (рисунок 1.5). При этом перитектическая реакция оказывается возможной лишь до тех пор, пока не будут в полном объеме израсходованы кристаллы β -фазы, количество которых в

рассматриваемых сплавах оказывается недостаточным для полного завершения кристаллизации во всем объеме сплава. В этом случае в сплавах после перитектического превращения остается неизрасходованная избыточная жидкость $L_{\text{рост}}$ и некоторое количество образовавшихся по перитектической реакции кристаллов новой α -фазы. Их количественное соотношение может быть определено по правилу рычага. Последующее охлаждение таких сплавов в интервале температур от точки 2 до точки 3 приводит к продолжению кристаллизации α -твердого раствора по реакции $L \rightarrow \alpha$ непосредственно из жидкости по рассмотренному ранее механизму кристаллизации твердых растворов. После окончания кристаллизации в связи с уменьшением растворимости компонента В в α -твердом расворе происходит выделение на границах зерен α -фазы вторичных β -кристаллов.

Кривая охлаждения и структура сплава показаны на рисунке 1.5.

2 Задания

Задание 1.1. Изобразить диаграмму состояния с эвтектическим равновесием и с отсутствием растворимости (практически) в твердом состоянии. Указать фазовые области. Выбрать доэвтектический сплав. Зарисовать кривую охлаждения и структуру сплава при кристаллизации и последующем охлаждении.

Задание 1.2. Изобразить диаграмму состояния с эвтектическим равновесием и с отсутствием растворимости (практически) в твердом состоянии. Указать фазовые области. Выбрать заэвтектический сплав. Зарисовать кривую охлаждения и структуру сплава при кристаллизации и последующем охлаждении.

Задание 1.3. Изобразить диаграмму состояния с эвтектическим равновесием и переменной, уменьшающейся при охлаждении растворимостью в твердом состоянии. Указать фазовые области. Выбрать доэвтектический

сплав. Зарисовать кривую охлаждения и структуру сплава при кристаллизации и последующем охлаждении.

Задание 1.4. Изобразить диаграмму состояния с эвтектическим равновесием и переменной, уменьшающейся при охлаждении растворимостью в твердом состоянии. Указать фазовые области. Выбрать заэвтектический сплав. Зарисовать кривую охлаждения и структуру сплава при кристаллизации и последующем охлаждении.

Задание 1.5. Изобразить диаграмму состояния с эвтектическим равновесием и переменной, уменьшающейся при охлаждении растворимостью в твердом состоянии. Указать фазовые области. Выбрать эвтектический сплав. Зарисовать кривую охлаждения и структуру сплава при кристаллизации и последующем охлаждении.

Задание 1.6. Изобразить диаграмму состояния с перитектическим равновесием и переменной, уменьшающейся при охлаждении растворимостью в твердом состоянии. Указать фазовые области. Выбрать сплав с избытком твердой фазы после перитектической реакции. Зарисовать кривую охлаждения и структуру сплава при кристаллизации и последующем охлаждении.

Вопросы к практическому занятию

1. Опишите линии ликвидуса, солидуса и сольвуса.
2. Какое превращение происходит при температуре t_p в результате охлаждения в сплавах диаграммы состояния?
3. Изобразить диаграмму перитектического типа с переменной растворимостью в твердом состоянии, отметить сплавы, в которых реализуется перитектическое превращение.
4. Провести анализ фазовых превращений в сплавах диаграммы, кристаллизующихся по типу твердых растворов.

5. Изобразить диаграмму перитектического типа с ограниченной переменной растворимостью в твердом состоянии, провести анализ фазовых превращений в сплавах диаграммы от точки p до точки a .

6. Изобразить диаграмму перитектического типа с ограниченной переменной растворимостью в твердом состоянии, провести анализ фазовых превращений в сплавах диаграммы от точки a до точки b .

7. Какие кристаллы в структуре сплавов относятся к первичным и вторичным? Как они изображаются?

8. Какое строение в зависимости от механизма образования новой фазы при превращении имеет структура сплавов после перитектической кристаллизации и последующего охлаждения?

9. Изобразить структуру «окружения» сплавов диаграммы.

Практическое занятие 2

Тема: Изучение и расчет механических характеристик образцов материалов.

1 Теоретическая часть

Механические свойства характеризуют способность материала сопротивляться деформации и разрушению под действием приложенных нагрузок.

По характеру изменения во времени действующей нагрузки механические испытания могут быть статическими (на растяжение, сжатие, изгиб, кручение), динамическими (на ударный изгиб) и циклическими (на усталость).

По воздействию температуры на процесс их делят на испытания при комнатной температуре, низкотемпературные и высокотемпературные (надлительную прочность, ползучесть). Статические испытания проводятся при

воздействии на образец с определенной скоростью постоянно действующей нагрузки. Скорость деформации составляет от 10^{-4} до 10^{-1} с^{-1} . Статические испытания на растяжение относятся к наиболее распространенным. Свойства, определяемые при этих испытаниях, приведены в многочисленных стандартах по техническим условиям на материалы. К статическим относятся испытания на растяжение, сжатие, изгиб, кручение.

Динамические испытания характеризуются приложением к образцу ударной нагрузки и значительной скоростью деформации. Длительность испытания не превышает сотен долей секунды. Скорость деформации составляет около 10^2 с^{-1} . Динамические испытания чаще всего проводят по схеме ударного изгиба образцов с надрезом. Циклические испытания характеризуются многократными изменениями нагрузки по величине и по направлению. Примером испытаний являются испытания на усталость, они длительны и по их результату определяют число циклов до разрушения при разных значениях напряжения. В конечном итоге находят предельные напряжения, который образец выдерживает без разрушения в течение определенного числа циклов нагружения.

Испытания на твердость.

Простейшим механическим свойством является твердость. Методы определения твердости в зависимости от скорости приложения нагрузки делятся на статические и динамические, а по способу ее приложения – на методы вдавливания и царапания. Методы определения твердости по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу относятся к статическим методам испытания.

Твердость – это способность материала сопротивляться вдавливанию в него более твердого тела (индентора) под действием внешних сил. При испытании на твердость в поверхность материалов вдавливают пирамиду, конус или шарик (индентор), в связи с чем различают методы испытаний, соответственно, по Виккерсу, Роквеллу и Бринеллю. Кроме того, существуют менее распространенные методы испытания твердости: метод упругого отскока (по Шору), метод сравнительной твердости (Польди) и некоторые другие.

При испытании материалов на твердость не изготавливают стандартных специальных образцов, однако к размерам и поверхности образцов и изделий предъявляются определенные требования.

Твердость по Виккерсу (ГОСТ 2999-75) устанавливают путем вдавливания в металл индентора – алмазной пирамиды с углом при вершине 136° под действием постоянной нагрузки P : 1; 2; 2,5; 3; 5; 10; 20; 30; 50 или 100 кгс и выдержки под нагрузкой в течение 10–15 с. Для определения твердости черных металлов и сплавов используют нагрузки от 5 до 100 кгс, медных сплавов – от 2,5 до 50 кгс, алюминиевых сплавов – от 1 до 100 кгс. После снятия нагрузки с помощью микроскопа прибора находят длину диагонали отпечатка, а твердость HV рассчитывают по формуле:

$$HV = 1,854 P/d \quad (2.1)$$

где P – нагрузка, кгс; d – диагональ отпечатка, мм.

Имеется таблица зависимости твердости от величины нагрузки и длины диагонали. Поэтому на практике вычислений не производят, а пользуются готовой расчетной таблицей.

Твердость по Виккерсу HV измеряется в кгс/мм², Н/мм² или МПа. Значение твердости по Виккерсу может изменяться от HV 2060 до HV 5 при нагрузке 1 кгс.

По методу Бринелля вдавливают в образец или изделие стальной закаленный шарик диаметром 10, 5 или 2,5 мм под действием нагрузок 3000, 1000, 750, 500, 250, 62,5 кгс и др. (ГОСТ 9012-59, рисунок 2.1). Полученный круглый отпечаток на образце измеряют под лупой и по таблицам находят величину твердости по Бринеллю, значение которой не превышает 450 HB.

Твердость по Бринеллю почти совпадает со значениями твердости по Виккерсу.

Твердость HB – это также величина напряжений сопротивления вдавливанию:

$$HB = \frac{2P}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} \quad (2.2)$$

где P – нагрузка, кгс; D – диаметр шарика, мм; d – диаметр отпечатка, мм.

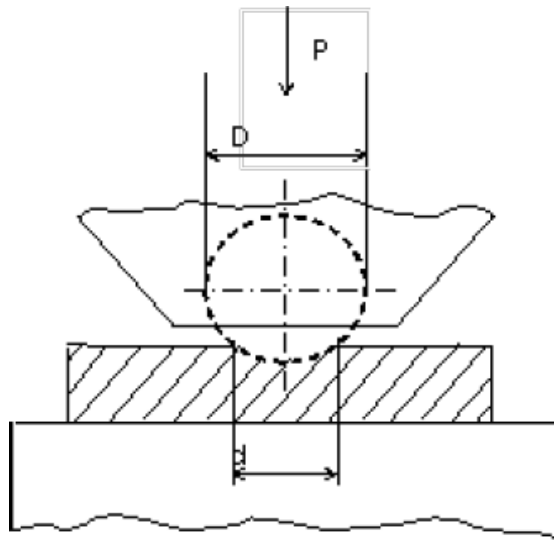


Рисунок 2.1 – Схема определения твердости по Бринеллю

Твердость по Бринеллю HB (по умолчанию) имеет размерность кгс/мм², например, твердость алюминиевого сплава равна 70 HB. При нагрузке, определяемой в ньютонах, твердость по Бринеллю измеряется в МПа. Например, твердость отожженной стали равна 207 HB при нагрузке 3 000 кгс, диаметре шарика 10 мм, диаметре отпечатка 4,2 мм или, учитывая коэффициент перевода: 1 Н = 9,8 кгс, HB = 2 028 МПа.

По методу Роквелла (ГОСТ 9013-59) вдавливают алмазный конус с углом при вершине 120° (шкалы А и С) или стальной шарик диаметром 1,5875 мм (шкала В). При этом определяют твердость, соответственно, HRA, HRC и HRB. В настоящее время измерение твердости по методу Роквелла является наиболее распространенным методом, потому что при использовании твердомеров Роквелла не требуется измерять отпечаток, число твердости считывается со шкалы прибора сразу после снятия основной нагрузки.

Метод заключается во вдавливании в испытуемый образец индентора под действием двух последовательно прикладываемых нагрузок – предварительной P_0 и основной P_1 , которая добавляется к предварительной, так чтообщая нагрузка $P = P_0 + P_1$. После выдержки в течение нескольких секунд основную нагрузку снимают и измеряют остаточную глубину проникновения индентора, который при этом продолжает находиться под действием предварительной нагрузки. Перемещение основной стрелки индикатора на одно деление шкалы соответствует перемещению индентора на 0,002 мм, которое принимается за единицу твердости. На рисунке 2.2 представлена схема измерения твердости по методу Роквелла алмазным или твердосплавным конусом. При испытаниях измеряют глубину восстановленного отпечатка. Шкалы А и С между собой совпадают, поскольку испытания проводят одним и тем же индентором – алмазным конусом, но при разных нагрузках: 60 и 150 кгс соответственно. Твердость в этом случае определяется как:

$$HRC = \frac{t}{0,002} = 100 - \frac{H - h}{0,002} \quad (2.3)$$

По шкале В (нагрузка 100 кгс, шарик)

$$HRB = 130 - \frac{H - h}{0,002} \quad (2.4)$$

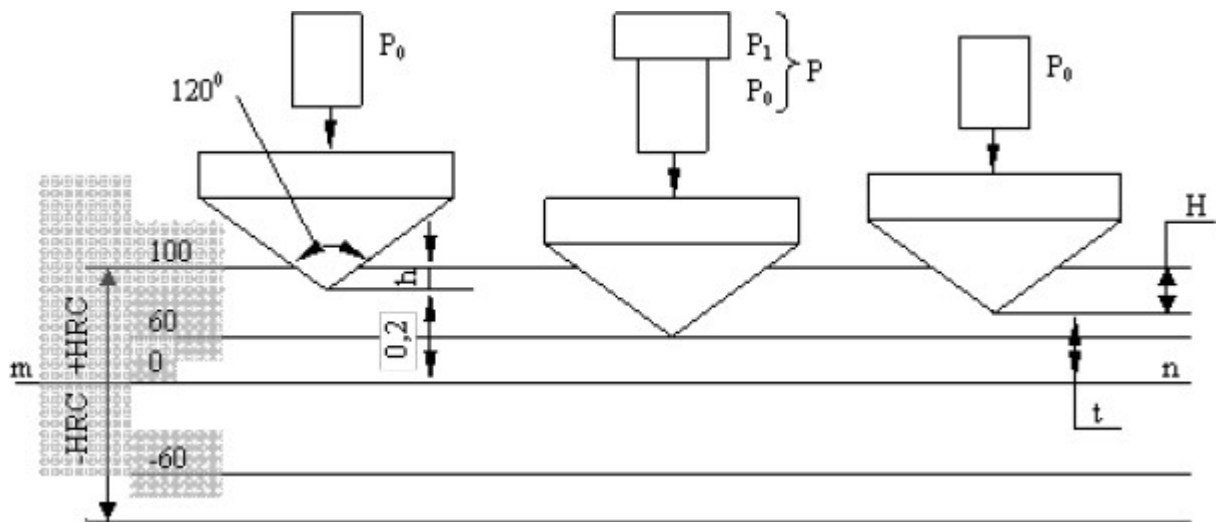


Рисунок 2.2 – Схема определения твердости по Роквеллу (индентор – конус)

На практике значения твердости по Роквеллу не рассчитываются по формулам, а считываются с соответствующей (черной или красной) шкалы прибора. Шкалы HRC и HRA используются для высокой твердости, HRB – для низкой. Число твердости по Роквеллу измеряют в условных единицах, оно является мерой глубины вдавливания индентора под определенной нагрузкой.

Испытание на растяжение материалов проводят в соответствии с ГОСТ 1497-84 «Методы испытаний на растяжение». Стандарт устанавливает методы статических испытаний на растяжение черных и цветных металлов для определения при температуре 20 °С пределов пропорциональности, упругости, текучести, временного сопротивления разрыву, относительного удлинения и относительного сужения, модуля упругости.

Для испытаний применяют плоские и цилиндрические образцы, вырезанные из детали или специально изготовленные. Размеры образцов регламентированы указанным стандартом, они подчиняются геометрическому подобию и могут быть короткими и длинными. Для цилиндрического образца берется соотношение начальной рабочей длины l_0 и исходного диаметра d_0 : $l_0=5d_0$ – короткий образец, $l_0=10d_0$ – длинный образец. Для плоского образца берется соотношение рабочей длины l_0 и площади поперечного сечения F_0 : $l_0=$

$5,65 \sqrt{F_0}$ – короткий образец, $l_0 = 11,3 \sqrt{F_0}$ – длинный образец. Цилиндрические образцы изготавливаются диаметром 3 мм и более. Образцы состоят из рабочей части длиной l_0 и головок, форма и размер которых соответствуют захватам машины (рисунок 2.3).

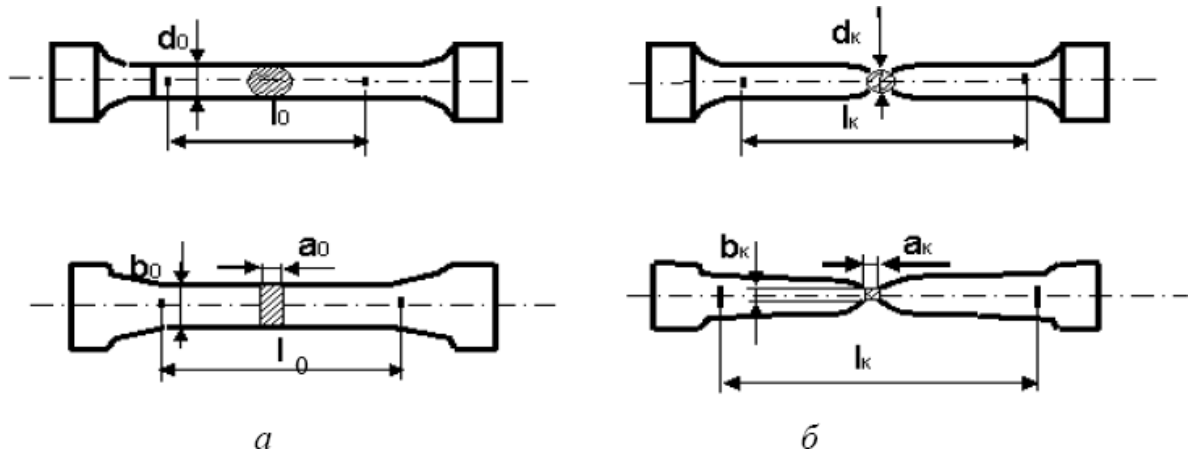


Рисунок 2.3 – Цилиндрические и плоские образцы до (а) и после (б) испытания на растяжение

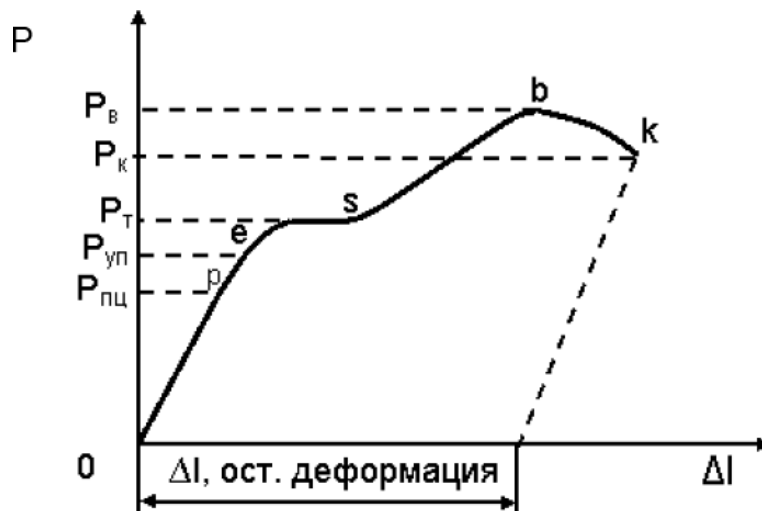


Рисунок 2.4 – Первичная диаграмма растяжения

Растяжение образца проводят на специальных машинах, позволяющих фиксировать величину прилагаемой нагрузки и изменение длины образца при растяжении. Эти же машины дают возможность записывать изменение длины образца при увеличении нагрузки (рисунок 2.4), т.е. первичную диаграмму испытания на растяжение в координатах: нагрузка P , Н, кН; и абсолютное

удлинение образца Δl , мм. Измеряя величину нагрузки в характерных точках диаграммы испытаний на растяжение определяют следующие параметры механических свойств материалов: $\sigma_{\text{пл}}$ – предел пропорциональности, точка р; $\sigma_{0,05}$ – предел упругости, точка е; $\sigma_{\text{т}}$ – предел текучести физический, точка s; $\sigma_{0,2}$ – предел текучести условный; $\sigma_{\text{в}}$ – временное сопротивление разрыву, или предел прочности, точка в. Значения 0,05 и 0,2 в записи предела упругости и текучести соответствуют величине остаточной деформации Δl в процентах от l_0 при растяжении образца. Напряжения при испытании на растяжение вычисляют путем деления нагрузки P , соответствующей характерной точке на диаграмме, на площадь первоначального поперечного сечения F_0 рабочей части испытуемого образца:

$$\sigma_{\text{пл}} = \frac{P_{\text{пл}}}{F_0} \quad (2.5)$$

$$\sigma_{0,05} = \frac{P_{0,05}}{F_0} \quad (2.6)$$

$$\sigma_{0,05} = \frac{P_{0,05}}{F_0} \quad (2.7)$$

$$\sigma_{\text{в}} = \frac{P_{\text{в}}}{F_0} \quad (2.8)$$

Предел пропорциональности и предел упругости определяют с помощью тензометра (прибор для определения величины деформации). Предел текучести физический и условный рассчитывают, находя нагрузку по диаграмме растяжения. Если на диаграмме нет площадки текучести, то для вычисления условного предела текучести необходимо провести графические построения на диаграмме (рисунок 2.5). Вначале находят величину остаточной деформации, равную 0,2 % от l_0 , далее отмечают отрезок на оси деформации, равный 0,2 % от l_0 , и проводят линию, параллельную пропорциональному участку диаграммы растяжения, до пересечения с кривой растяжения. Нагрузка $P_{0,2}$ соответствует точке их пересечения. Физический и условный предел

текучести характеризуют способность материала к началу пластической деформации, т.е. сопротивление малой пластической деформации.

Предел прочности можно подсчитать, используя показания силоизмерителя, по максимальной нагрузке $P_{\max}$ при разрыве либо найти $P_{\max}$ (P_B) по первичной диаграмме растяжения. Характер деформации при растяжении вязких и хрупких материалов существенно различается.

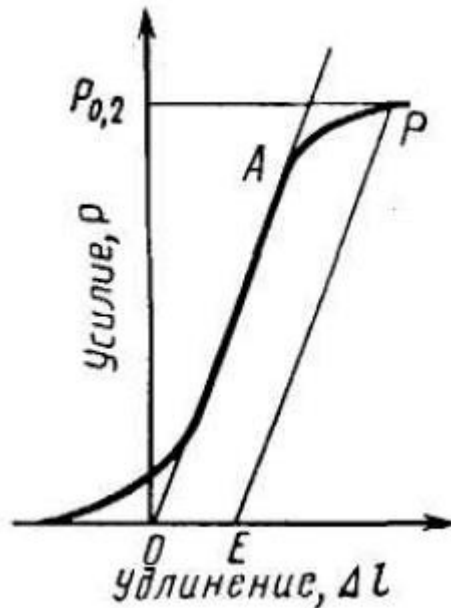


Рисунок 2.5 – Определение предела текучести

Хрупкие материалы после достижения максимальной нагрузки быстро разрушаются без значительной пластической деформации, поэтому σ_B для хрупких материалов является характеристикой сопротивления разрушению, а для пластичных – характеристикой сопротивления деформации.

Напряжение разрушения определяют как истинное. При этом нагрузку разрушения делят на конечную площадь поперечного сечения образца после разрушения F_K :

$$S_K = \frac{P_K}{F_K} \quad (2.9)$$

Все рассчитанные таким образом величины являются характеристиками прочности материала. Пластичность, т.е. способность деформироваться без разрушения, характеризуется изменениями размеров образца. При испытании на разрыв определяют следующие характеристики пластичности:

относительное удлинение

$$\delta = \frac{l_K - l_0}{l_0} \cdot 100\% \quad (2.10)$$

относительное сужение

$$\psi = \frac{F_K - F}{F_0} \cdot 100\% \quad (2.11)$$

где l_K , F_K – соответственно, длина рабочей части и площадь поперечного сечения образца после разрыва.

Испытания на ударный изгиб.

Ударная вязкость характеризует удельную работу, затрачиваемую на разрушение при ударе образца с надрезом. Ударная вязкость испытывается на маятниковом копре с постоянным запасом работы маятника по ГОСТ 9454-78 «Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженной, комнатной и повышенной температурах». Стандарт распространяется на черные и цветные металлы и сплавы и устанавливает метод испытания при температурах от -100 до $+1\ 000$ °С. Метод основан на разрушении ударом маятникового копра образца с концентратором напряжений. В результате испытания определяют полную работу, затраченную при ударе K , или ударную вязкость K_C .

Используют образцы прямоугольной формы с концентратором типа U, V, T (усталостная трещина). Наиболее распространенными образцами являются образцы размерами $55 \times 10 \times 10$ мм с U-концентратором 2×2 мм (рисунок 2.6).

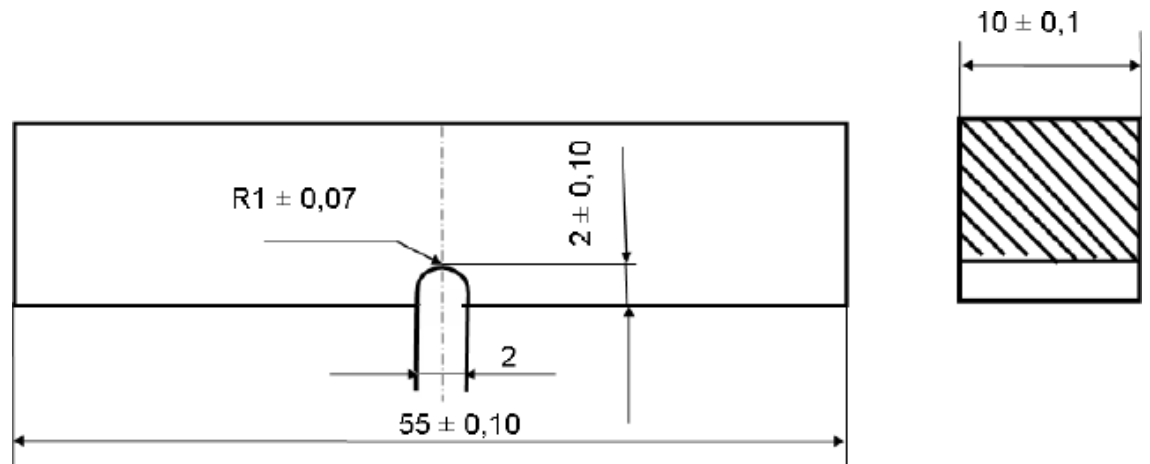


Рисунок 2.6 – Стандартный образец с U-образным надрезом для испытаний на ударный изгиб.

На разрушение ударом образца затрачивается только часть энергии маятника, в связи с чем маятник после разрушения образца продолжает двигаться, отклоняясь на определенный угол. Чем больше величина работы, затрачиваемой на разрушение образца, тем на меньший угол он отклоняется от вертикали после разрушения. По величине этого угла и определяют работу удара K или работу, затраченную на разрушение образца. Работу разрушения K относят к площади поперечного сечения образца S_0 в месте излома и тем самым находят $KС$ – ударную вязкость:

$$KС = K/S_0 \quad (2.12)$$

где K измеряется в Дж (кгс·м), S_0 – в m^2 (cm^2). В зависимости от вида концентратора ударная вязкость обозначается KCU , KCV , KCT и имеет размерность $МДж/м^2$ ($МДж/см^2$) или $кгс·м/см^2$.

2 Задачи

Задача 2.1. Рассчитать усилие, при котором произойдет разрыв проволоки из отожженной стали диаметром 2,2 мм.

Задача 2.2. В результате вдавливания индентора при определении твердости по Бриннелю при нагрузке 100 кгс диаметр отпечатка составил 1,4 мм. Определить твердость материала.

Задача 2.3. При испытании на ударную вязкость образца с U образным концентратором маятник отклонился на угол 45° , вес маятника 20 кг, длина маятника 1 м. определить ударную вязкость материала.

Вопросы к практическому занятию

1. Охарактеризовать типы механических испытаний.
2. Как определить твердость по Бринеллю? Каковы условия испытаний, значения твердости?
3. Как определить твердость по Роквеллу? Каковы условия испытаний, значения твердости?
4. Как определить твердость по Виккерсу? Каковы условия испытаний, значения твердости?
5. Записать единицы измерения твердости по Бринеллю, Роквеллу и Виккерсу.
6. Какие методы испытаний механических свойств относят к статическим, динамическим и циклическим испытаниям?
7. Изобразить первичную диаграмму растяжения для пластичного материала.
8. Как по диаграмме растяжения определить временное сопротивление разрыву?
9. Какие построения необходимо провести на диаграмме растяжения для определения предела текучести?
10. Какие типы образцов используют для расчета механических свойств при испытании на растяжение?
11. По каким формулам определяют временное сопротивление разрыву и предел текучести?

12. По каким формулам находят относительное удлинение и относительное сужение?
13. Какие характеристики вычисляют при испытании на ударный изгиб?
14. Какие образцы используют при испытании на ударный изгиб?
15. Чем различается ударная вязкость, обозначаемая KCU , KCV, KCT?

Практическое занятие 3

Тема: Расчет удельного сопротивления металлов и сплавов..

1 Теоретическая часть

Относительное изменение удельного сопротивления при изменении температуры на один (градус) называют температурным коэффициентом удельного сопротивления:

$$Tk\rho = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} \quad (3.1)$$

Положительный знак $Tk\rho$ соответствует случаю, когда удельное сопротивление возрастает при повышении температуры. Величина $Tk\rho$ также является функцией температуры. В области линейной зависимости $\rho(T)$ справедливо выражение:

$$\rho = \rho_0 [1 + Tk\rho (T - T_0)] \quad (3.2)$$

где ρ_0 и $Tk\rho$ – удельное сопротивление и температурный коэффициент удельного сопротивления, отнесенные к началу температурного диапазона, т. е. температуре T_0 ; ρ — удельное сопротивление при температуре T .

Из выражения для свободного пробега электронов и (3.1) следует, что значение $T_{кр}$ чистых металлов должно быть близким к $1/T$. Согласно экспериментальным данным большинство металлов имеют при комнатной температуре $T_{кр} \approx 0,004 \text{ К}^{-1}$. Несколько большим $T_{кр}$ характеризуются ферромагнитные металлы.

На практике при измерении $T_{кр}$ часто бывает полезной следующая формула:

$$T_{кр} = T_{кR} + T_{кL} \quad (3.3)$$

где $T_{кR}$ – температурный коэффициент сопротивления данного резистора; $T_{кL}$, – температурный коэффициент линейного расширения материала.

Влияние примесей и других структурных дефектов на удельное сопротивление металлов.

Как известно, причинами рассеяния электронных волн в металле являются не только тепловые колебания узлов решетки, но и статические дефекты структуры, которые также нарушают периодичность потенциального поля кристалла. Рассеяние на статических дефектах структуры не зависит от температуры. Поэтому по мере приближения температуры к абсолютному нулю сопротивление реальных металлов стремится к некоторому постоянному значению, называемому остаточным сопротивлением (рисунок 3.1). Отсюда вытекает правило Маттиссена об аддитивности удельного сопротивления:

$$\rho = \rho_m + \rho_{ост} \quad (3.4)$$

т. е. полное сопротивление металла есть сумма сопротивления, обусловленного рассеянием электронов на тепловых колебаниях узлов кристаллической решетки, и остаточного сопротивления, обусловленного рассеянием электронов на статических дефектах структуры.

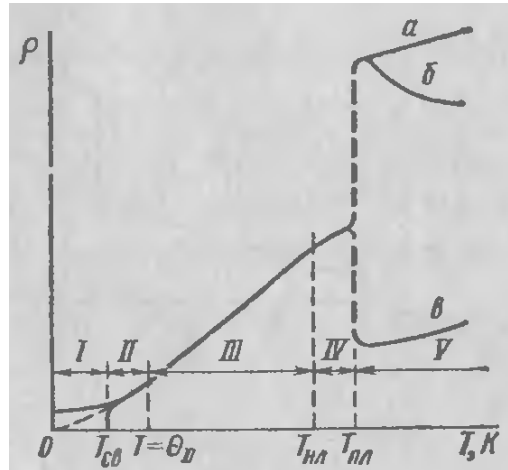


Рисунок 3.1 – Зависимость удельного сопротивления металлического проводника от температуры в широком диапазоне температур: а), б), в) — варианты изменения удельного сопротивления у различных расплавленных металлов

Исключение из этого правила составляют сверхпроводящие металлы, в которых сопротивление исчезает ниже некоторой критической температуры.

Наиболее существенный вклад в остаточное сопротивление вносит рассеяние на примесях, которые всегда присутствуют в реальном проводнике либо в виде загрязнения, либо в виде легирующего (т. е. преднамеренно вводимого) элемента. Следует заметить, что любая примесная добавка приводит к повышению ρ , даже если она обладает повышенной проводимостью по сравнению с основным металлом. Так, введение в медный проводник 0,01 ат. доли примеси серебра вызывает увеличение удельного сопротивления меди на 0,002 мкОм·м. Экспериментально установлено, что при малом содержании примесей удельное сопротивление возрастает пропорционально концентрации примесных атомов. Этой опытной закономерности может быть дано следующее объяснение. Примесное рассеяние ограничивает длину свободного пробега электронов, которая в реальном проводнике определяется соотношением:

$$1/\bar{l} = 1/\bar{l}_T + 1/\bar{l}_\Pi \quad (3.5)$$

где $\bar{l}_T$ и $\bar{l}_\Pi$ характеризуют рассеяние на тепловых колебаниях и на примесях, соответственно.

Иллюстрацией правила Маттиссена является рисунок 3.2, из которого видно, что температурные зависимости удельного сопротивления чистой меди и ее сплавов с малым количеством (приблизительно до 4 ат. %) индия, сурьмы, олова, мышьяка взаимно параллельны; для сплавов с переходными металлами наблюдаются и некоторые отклонения от этого правила.

Одна из причин отклонений от правила Маттиссена может быть связана с влиянием примесей на упругие свойства металла, что сопровождается изменением колебательного спектра кристаллической решетки.

Различные примеси по-разному влияют на остаточное сопротивление металлических проводников. Эффективность примесного рассеяния определяется возмущающим потенциалом в решетке, значение которого тем выше, чем сильнее различаются валентности примесных атомов и металла-растворителя (основы).

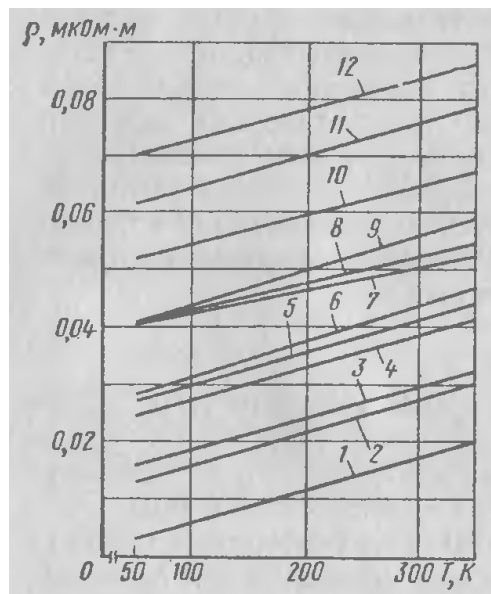


Рисунок 3.2 — Температурные зависимости удельного сопротивления сплавов меди типа твердых растворов, иллюстрирующие правило Маттиссена:

1 — чистая Cu; 2 — Cu — 1,03 ат.% In; 3—Cu—1.12 ат.% Ni; 4 — Cu - 0.40.% ат. Sb; 5 —Cu —0.89 ат.% Sn; 6 — Cu —2.16 ат.% Ni; 7-Cu-1.20 ат.% Mn; 8 — Cu — 0.61 ат.% Fe; 9 — Cu— 3.32 ат.% Ni; 10 — Cu — 0.87 ат.% Fe; 11-Cu -1.13 ат.% Sb; 12 - Cu - 1.01 ат.% As

Для одновалентных металлов изменение остаточного сопротивления на 1 ат. % примеси («примесный» коэффициент электросопротивления) подчиняется следующей закономерности:

$$\Delta\rho_{\text{ост}} = a + b (\Delta Z)^2. \quad (3.6)$$

где a и b — константы, зависящие от природы металла и периода, который занимает в периодической системе элементов примесный атом; ΔZ — разность валентностей металла-растворителя и примесного атома.

Соотношение (3.6) известно в физике как правило Линде. Из него следует, что влияние металлоидных примесей на снижение проводимости сказывается сильнее, чем влияние примесей металлических элементов.

Помимо примесей некоторый вклад в остаточное сопротивление, вносят собственные дефекты структуры — вакансии, атомы внедрения, дислокации, границы зерен. Концентрация точечных дефектов экспоненциально возрастает с температурой и может достигать высоких значений вблизи точки плавления. Кроме того, вакансии и межузельные атомы легко возникают в материале при его облучении частицами высокой энергии, например, нейтронами из реактора или ионами из ускорителя. По измеренному значению сопротивления можно судить о степени радиационного повреждения решетки. Таким же образом можно проследить и за восстановлением (отжигом) облученного образца.

Изменение остаточного сопротивления меди на 1 ат. % точечных дефектов составляет: в случае вакансий 0,010—0,015 мкОм-м; в случае атомов внедрения 0,005—0,010 мкОм-м.

Остаточное сопротивление представляет собой весьма чувствительную характеристику химической чистоты и структурного совершенства металлов. На практике при работе с металлами особо высокой чистоты для оценки содержания примесей измеряют отношение удельных сопротивлений при комнатной температуре и температуре жидкого гелия:

$$\beta = \rho_{300}/\rho_{4,2} \quad (3.7)$$

Чем чище металл, тем больше значение β . В наиболее чистых металлах, получаемых в настоящее время (со степенью чистоты 99,99999%), параметр β имеет значение порядка 10^5 .

Большое влияние на удельное сопротивление металлов и сплавов оказывают искажения, вызываемые напряженным состоянием. Однако степень этого влияния определяется характером напряжений. Например, при всестороннем сжатии у большинства металлов удельное сопротивление уменьшается. Это объясняется сближением атомов и уменьшением амплитуды тепловых колебаний решетки.

При упругом растяжении и кручении межатомные расстояния увеличиваются. Это сопровождается усилением рассеяния электронов и возрастанием ρ . Влияние упругого растяжения или сжатия при условии пропускания тока вдоль действующей силы учитывается формулой:

$$\rho = \rho_0(1 \pm \varphi \sigma) \quad (3.8)$$

где φ — коэффициент удельного сопротивления по давлению; σ — механическое напряжение в сечении образца.

Знак плюс в выражении (3.8) соответствует деформации при растяжении, а знак минус — при сжатии. Обычно коэффициент φ составляет $(1 — 5) \cdot 10^{-11}$ Па⁻¹.

Пластическая деформация и наклеп всегда повышают удельное сопротивление металлов и сплавов. Однако это повышение даже при значительном наклепе чистых металлов составляет единицы процентов.

Термическая закалка приводит к повышению ρ , что связано с искажениями решетки, появлением внутренних напряжений. При рекристаллизации путем термической обработки (отжига) удельное сопротивление может быть снижено до первоначального значения, поскольку происходит «залечивание» дефектов и снятие внутренних напряжений.

Электрические свойства металлических сплавов

В технике широко применяются металлические сплавы, имеющие структуру неупорядоченного твердого раствора. При образовании твердого раствора сохраняется кристаллическая решетка металла-растворителя, изменяется лишь ее период. Многие металлы, имеющие одинаковый тип кристаллической структуры, смешиваются в любых пропорциях, т. е. образуют непрерывный ряд твердых растворов. Вместе с тем существует немало металлических систем, компоненты которых обладают ограниченной взаимной растворимостью или вообще не растворимы в твердой фазе.

Статистическое распределение атомов разных сортов по узлам кристаллической решетки вызывает значительные флуктуации периодического потенциального поля кристалла, что, в свою очередь, приводит к сильному рассеянию электронов. Как и в случае металлов, полное сопротивление сплава можно выразить в виде суммы двух слагаемых:

$$R_{СПЛ} = \rho_m + \rho_{ост} \quad (3.9)$$

где ρ_m — сопротивление, обусловленное рассеянием электронов на тепловых колебаниях решетки; $\rho_{ост}$ — добавочное (остаточное) сопротивление, связанное с рассеянием электронов на неоднородностях структуры сплава.

Специфика твердых растворов состоит в том, что $\rho_{ост}$ может существенно (во много раз) превышать тепловую составляющую.

Для многих двухкомпонентных сплавов изменение ρ в зависимости от состава хорошо описывается параболической зависимостью вида

$$\rho = Cx_Ax_B = Cx_B(1 - x_B) \quad (3.10)$$

где C — константа, зависящая от природы сплава; x_A и x_B — атомные доли компонентов в сплаве.

Соотношение (3.10) получило название закона Нордгейма. Из него следует, что в бинарных твердых растворах А–В остаточное сопротивление увеличивается как при добавлении атомов В к металлу А, так и при добавлении атомов А к металлу В, причем это изменение характеризуется симметричной кривой. В непрерывном ряду твердых растворов удельное сопротивление тем больше, чем дальше по своему составу сплав отстоит от чистых компонентов. Остаточное сопротивление достигает своего максимального значения при равном содержании каждого компонента ($x_A = x_B = 0,5$).

Закон Нордгейма довольно точно описывает изменение удельного сопротивления непрерывных твердых растворов в том случае, если при изменении состава не наблюдается фазовых переходов и ни один из их компонентов не принадлежит к числу переходных или редкоземельных элементов. Примером подобных систем могут служить сплавы Au — Ag, Си — Ag, Си — Аи, W — Мо и др.

Несколько иначе ведут себя твердые растворы, компонентами которых являются металлы переходной группы. В этом случае при высоких концентрациях компонентов наблюдается существенно большая величина остаточного сопротивления, что связано с переходом части валентных электронов на внутренние незаполненные оболочки атомов переходных

металлов. Кроме того, в подобных сплавах максимальное ρ часто соответствует концентрациям, отличным от 50%.

Чем больше удельное сопротивление сплава, тем меньше его $T_{кр}$. Это вытекает из того, что в твердых растворах $\rho_{ост}$, как правило, существенно превышает ρ_m и не зависит от температуры. В соответствии с определением температурного коэффициента и учитывая, что $T_{кр}$ чистых металлов незначительно отличаются друг от друга, можно записать:

$$T_{кр} \rho_{спл} \approx \frac{T_{кр} \rho_{мет}}{1 + \rho_{ост} / \rho_m} \quad (3.11)$$

В концентрированных твердых растворах $\rho_{ост}$ обычно на порядок и более превышает ρ_m . Поэтому $T_{кр} \rho_{спл}$ может быть значительно ниже $T_{кр}$ чистого металла. На этом основано получение термостабильных проводящих материалов. Во многих случаях температурная зависимость удельного сопротивления сплавов оказывается более сложной, чем та, которая вытекает из простой аддитивной закономерности. Температурный коэффициент удельного сопротивления сплавов может быть существенно меньше, чем предсказывает соотношение (3.11). В некоторых сплавах при определенных соотношениях компонентов наблюдается отрицательный $T_{кр}$.

Такое изменение ρ и $T_{кр}$ от процентного содержания компонентов сплава, по-видимому, можно объяснить тем, что при более сложном составе и структурах по сравнению с чистыми металлами сплавы нельзя рассматривать как классические металлы, т. е. изменение проводимости их обуславливается не только изменением длины свободного пробега электронов, но в некоторых случаях и частичным возрастанием концентрации носителей заряда при повышении температуры. Сплав, у которого уменьшение длины свободного пробега с увеличением температуры компенсируется возрастанием

концентрации носителей заряда, имеет нулевой температурный коэффициент удельного сопротивления.

В разбавленных растворах, когда один из компонентов (например, компонент В) характеризуется очень низкой концентрацией и его можно рассматривать как примесь, в формуле (3.10) без ущерба для точности можно положить $(1 - x_B) \approx 1$. Тогда приходим к линейной зависимости между остаточным сопротивлением и концентрацией примесных атомов в металле:

$$\rho_{ост} = C \cdot x_B \quad (3.12)$$

где константа C характеризует изменения остаточного сопротивления $\Delta\rho_{ост}$ на 1 ат. % примеси.

Некоторые сплавы имеют тенденцию образовывать упорядоченные структуры, если при их изготовлении выдержаны определенные пропорции в составе. Причина упорядочения заключается в более сильном химическом взаимодействии разнородных атомов по сравнению с атомами одного сорта. Упорядочение структуры происходит ниже некоторой характеристической температуры $T_{кр}$, называемой критической (или температурой Курнакова). Например, сплав, содержащий 50 ат. % Си и 50 ат. % Zn (Р — латунь) обладает объемноцентрированной кубической структурой. При $T > 360^\circ\text{C}$ атомы меди и цинка распределены по узлам решетки случайным образом, статистически. Ниже этой критической температуры сплав упорядочивается таким образом, что его структура становится аналогичной структуре кристалла CsCl (см. рис. 1.8,6), т. е. атомы меди располагаются в вершинах куба, а атомы цинка — в центре кубических ячеек.

В том случае, когда компоненты бинарной системы не обладают взаимной растворимостью в твердом состоянии, структура застывшего после кристаллизации сплава представляет собой смесь двух фаз. Удельное сопротивление таких гетерофазных сплавов в первом приближении линейно изменяется с изменением состава, т. е. возрастает пропорционально

содержанию металла с большим значением ρ . Однако в силу значительной структурной чувствительности электрических свойств неоднородных материалов возможны заметные отклонения от простой аддитивности, вызванные размерами частиц, их формой, распределением в материале. Например, если одна из фаз образует непрерывно связанную матричную основу, в которую вкраплены несприкасающиеся между собой частицы другой фазы, то удельную проводимость смеси следует рассчитывать по формуле:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \sigma_0 \left[1 + \frac{(1-\theta)/3 + \theta \sigma_1 / (\sigma_0 - \sigma_1)}{\sigma_0} \right] \quad (3.13)$$

где σ_0, σ_1 — проводимость матричной основы и включений второй фазы; θ_v — объемная доля включений.

Сопротивление проводников на высоких частотах.

На высоких частотах наблюдается неравномерное распределение электрического тока по сечению проводников плотность тока максимальна на поверхности и убывает по мере проникновения в глубь проводника. Это явление получило название поверхностного эффекта (скин-эффекта).

Неравномерное распределение тока объясняется действием магнитного поля того же проводника. Сцепленный с проводом магнитный поток пропорционален току:

$$\Phi = Li \quad (3.14)$$

где L — индуктивность проводника.

Изменение магнитного потока вызывает появление э. д. с. Самоиндукции

$$e_L = -L \frac{di}{dt} \quad (3.15)$$

Если ток изменяется по синусоидальному закону, то индуцируемая э. д. с. пропорциональна частоте:

$$i = I_m \sin \omega t \quad (3.16)$$

$$i = -\omega L I_m \cos \omega t \quad (3.17)$$

Э. д. с. самоиндукции имеет направление, противоположное току в проводе и тормозит его изменение в соответствии с законом Ленца. При прохождении переменного тока переменное магнитное поле возникает как вне проводника, так и внутри него, причем по отношению к этому полю различные участки сечения провода находятся не в одинаковых условиях. Действительно, потокосцепление максимально для внутренней центральной жилы и минимально для поверхностных слоев проводника. Поэтому э. д. с. самоиндукции максимальна в центре проводника и затухает в направлении к поверхности. Соответственно и плотность тока наиболее сильно ослабляется в центральных частях проводника и в меньшей степени у поверхности. С ростом частоты «вытеснение» тока к поверхности проводника проявляется сильнее, так как э. д. с. самоиндукции пропорциональна частоте. Если радиус кривизны поверхности проводника велик по сравнению с глубиной, на которой сосредоточена основная часть тока, то его можно рассматривать как бесконечное полупространство, заполненное веществом.

Приняв для проводящего полупространства направление тока за ось X , нормаль к поверхности — за ось Z и считая, что распределение остается неизменным вдоль оси X , получим следующее уравнение распределения тока по сечению проводника:

$$J_x(z) = J_0 \exp(-z / \Delta) \quad (3.18)$$

где J_0 — плотность тока на поверхности; Δ — глубина проникновения поля в проводник.

Плотность тока изменяется по тому же закону, что и напряженность электрического поля, так как $J = \sigma E$.

Глубина проникновения поля численно равна расстоянию, на котором амплитуда напряженности поля, а следовательно, и плотности тока, уменьшается в e раз по отношению к своему значению на поверхности проводника. По мере удаления от поверхности изменяется не только амплитуда поля, но и фаза электромагнитных колебаний на $-z/\Delta$, т. е. внутри проводящей среды колебания запаздывают по фазе по отношению к колебаниям на поверхности.

Резкость проявления поверхностного эффекта усиливается не только при увеличении частоты, но и при увеличении магнитной проницаемости μ и удельной проводимости σ материала. Это объясняется тем, что увеличение ρ вызывает увеличение потока внутри провода, т. е. приводит к возрастанию индуктивности проводника L , а увеличение σ усиливает влияние э. д. с. самоиндукции. Связь глубины проникновения поля с физическими характеристиками вещества определяется выражением:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu \mu_0}} = \sqrt{\frac{1}{\pi f \sigma \mu \mu_0}} \quad (3.19)$$

где $\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная.

В случае сильно выраженного поверхностного эффекта значение тока рассчитывают по формуле:

$$I = J_0 \Pi \Delta \quad (3.20)$$

где Π — периметр сечения проводника; для провода круглого сечения $\Pi = \pi d$.

2 Задачи

Задача 3.1. Определить сопротивление при температуре 100°C удельное сопротивление меди, содержащей 1,5 % примеси никеля. Константы $a=1,5$, $b=2,5$.

Задача 3.2. Определить удельное сопротивление сплава при температуре 150°C , обладающего фазовой диаграммой, характерной для сплава с взаимной нерастворимостью компонентов, объемная доля примесной фазы 30%, проводимость основы при 20°C 10^{-6} Ом·м, $T_{кр}=0,0045$, проводимость примесной фазы при 20°C 10^{-7} Ом·м, $T_{кр}=0,0035$.

Задача 3.3. Определить сопротивление стального проводника для постоянного тока и тока частотой 10 кГц при температурах 50°C и 500°C . Диаметр проводника 10 мм, длина 100 м.

Вопросы к практическому занятию

1. Какие основные виды проводников электрического тока вам известны?
2. Каков физический смысл уровня Ферми?
3. Какими свойствами обладает «электронный газ» в состоянии вырождения?
4. Почему удельное сопротивление металлов растет с повышением температуры?
5. Что называют температурным коэффициентом удельного сопротивления? Является ли он константой для данного металла?
6. Как влияют примеси на удельное сопротивление металлов? Сформулируйте правило Маттиссена
7. Почему металлические сплавы типа твердых растворов обладают

более высоким удельным сопротивлением, нежели чистые компоненты, образующие сплав?

8. Объясните поведение проводников на высоких частотах

9. Как зависит удельное сопротивление тонких металлических пленок от их толщины и почему?

10. В каких условиях возможно появление термо-э. д. с. в замкнутой цепи? Назовите основные

механизмы, ответственные за возникновение термо-э. д. с.

Практическое занятие 4

Тема: Расчет допустимого тока сверхпроводника.

1 Теоретическая часть

Протекание тока в проводниках всегда связано с потерями энергии, т.е. с переходом энергии из электрического вида в тепловой вид. Этот переход необратим, обратный переход связан только с совершением работы, как об этом говорит термодинамика. Существует, правда возможность перевода тепловой энергии в электрическую и с использованием т.н. термоэлектрического эффекта, когда используют два контакта двух проводников, причем один нагревают, а другой охлаждают.

На самом деле, существует ряд проводников, в которых, при выполнении некоторых условий, потерь энергии при протекании тока нет! В рамках классической физики этот эффект необъясним. Согласно классической электронной теории движение носителя заряда происходит в электрическом поле равноускоренно до столкновения с дефектом структуры или с колебанием решетки. После столкновения, если оно неупругое, как столкновение двух пластилиновых шариков, электрон теряет энергию, передавая ее решетке из

атомов металла. В этом случае принципиально не может быть сверхпроводимости. Оказывается сверхпроводимость появляется только при учете квантовых эффектов. Некоторое, слабое представление о механизме сверхпроводимости можно получить из следующих соображений. Оказывается, если учесть, что электрон может поляризовать ближайший к нему атом решетки, т.е. чуть-чуть притянуть его к себе за счет действия кулоновской силы, то этот атом решетки чуть-чуть сместит следующий электрон. Образуется как-бы связь пары электронов. При движении электрона, второй компонент пары, как-бы воспринимает энергию, которую передает электрон атому решетки. Получается, что если учесть энергию пары электронов, то она при столкновении не меняется, т.е. потери энергии электронов не происходит! Такие пары электронов называются куперовскими парами.

Сверхпроводимость была обнаружена в экспериментах при сверхнизких температурах, вблизи абсолютного нуля температур. По мере приближения к абсолютному нулю колебания решетки замирают. Сопротивление протеканию тока уменьшается даже согласно классической теории, но до нуля при некоторой критической температуре T_C , оно уменьшается только согласно квантовым законам.

Сверхпроводимость обнаружили по двум явлениям: во первых по факту исчезновения электрического сопротивления, во вторых по диамагнетизму. Первое явление понятно - если пропускать определенный ток I через проводник, то по падению напряжения U на проводнике можно определить сопротивление $R = U/I$. Исчезновение напряжения означает исчезновение сопротивления как такового.

Второе явление требует более подробного рассмотрения. Если рассуждать логически, то отсутствие сопротивления тождественно абсолютной диамагнитности материала. Действительно, представим себе небольшой опыт. Будем вводить сверхпроводящий материал в область магнитного поля. Согласно закону Джоуля-Ленца, в проводнике должен возникать ток, полностью компенсирующий изменение магнитного потока, т.е. магнитный

поток через сверхпроводник как был нулевым, так и остается нулевым. В обычном проводнике этот ток затухает, т.к. у проводника есть сопротивление. Только после этого в проводник проникает магнитное поле. В сверхпроводнике он не затухает. Это означает, что протекающий ток приводит к полной компенсации магнитного поля внутри себя, т.е. поле в него не проникает. С формальных позиций нулевое поле означает, что магнитная проницаемость материала равна нулю, $\mu=0$ т.е. тело проявляет себя абсолютным диамагнетиком.

Однако эти явления характерны только для слабых магнитных полей. Оказывается сильное магнитное поле может проникать в материал, более того, оно разрушает саму сверхпроводимость. Вводят понятие критического поля B_C , которое разрушает сверхпроводник. Оно зависит от температуры: максимально при температуре, близкой к нулю, исчезает при переходе к критической температуре T_C .

$$B_c(T) = B_c(0) \left[1 - (T/T_c)^2 \right] \quad (4.1)$$

Для чего нам важно знать напряженность, (или индукцию) при которой исчезает сверхпроводимость? Дело в том, что при протекании тока по сверхпроводнику физически создается магнитное поле вокруг проводника, которое должно действовать на проводник.

Например для цилиндрического проводника радиуса r , помещенного в среду с магнитной проницаемостью μ , магнитная индукция на поверхности в соответствии с законом Био-Савара-Лапласа составит

$$B = \mu_0 \mu I / 2\pi r \quad (4.2)$$

Чем больше ток, тем больше поле. Таким образом, при некоторой индукции (или напряженности) сверхпроводимость пропадает, а следовательно,

через проводник можно пропустить только ток, меньше того, который создает критическую индукцию.

Таким образом для сверхпроводящего материала мы имеем два параметра: критическая индукция магнитного поля B_C и критическая температура T_C .

Для некоторых металлов критические параметры приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Параметры сверхпроводниковых материалов

Металл	Zn	Cd	Al	Ga	In	Ti	Sn	Pb
B_C , мТл	5.3	3	9.9	5.1	28.3	16.2	20.6	80.3
T_C , К	0.88	0.56	1.19	1.09	3.41	1.37	3.72	7.18

Видно, что для металлов критические температуры близки к абсолютному нулю температур. Это область, т.н. «гелиевых» температур, сравнимых с точкой кипения гелия (4.2 К). Относительно критической индукции можно сказать, что она сравнительно невелика. Можно сравнить с индукцией в трансформаторах (1-1.5 Тл). Или например с индукцией вблизи провода. Рассчитаем например индукцию в воздухе вблизи провода радиусом 1 см при протекании тока 100 А.

$$B = \mu_0 \mu I / 2\pi r = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 100 / 2 \cdot 10^{-2} \cdot \pi = 2 \cdot 10^{-3} \quad (4.3)$$

Подставляя в выражение (4.2) получим $B = 2$ мТл, т.е значение, примерно соответствующее критическим. Это означает, что если такой проводник поставить в линию электропередач, например 6 кВ, то максимальная мощность, которая может передаваться по каждой фазе составит $P_m = U_\phi \cdot I = 600$ кВт. На рассмотренном примере видно, что собственное магнитное поле ограничивает возможность передачи мощности по криогенному проводу. При этом, чем ближе температура к критической температуре, тем меньше значение критической индукции.

Низкотемпературные сверхпроводники

Свойство сверхпроводимости характерно практически для всех материалов. Только для самых электропроводящих - медь, серебро сверхпроводимость не обнаружена. Конкретное применение сверхпроводимости в энергетике выглядит заманчивым: иметь линии электропередач без потерь было бы замечательно. Другой вариант применения - генератор со сверхпроводящими обмотками.

В физике и технике сверхпроводимости имеются и слабوتочные аналоги радиоэлементов обычной электроники. Например в системах «сверхпроводник - тонкая прослойка резистивного металла (или диэлектрика) - сверхпроводник» возможен ряд новых физических эффектов, которые уже применяются в электронике. Это квантование магнитного потока в кольце, содержащем такой элемент, возможность скачкообразного изменения тока в зависимости от напряжения при воздействии на систему слабого излучения, и построенные на этом принципе эталонные источники напряжения с точностью до 10^{-10} В. Кроме этого, существуют запоминающие элементы, аналого-цифровые преобразователи и т.п. Существует даже несколько проектов компьютеров на сверхпроводниках.

Температурную шкалу в криогенной области условно делят на несколько областей по температурам кипения сжиженных газов: гелиевая (ниже 4.2 К), водородная 20.5 К, азотная 77 К, кислородная 90 К, аммиак (-33 °С). Если бы удалось найти материал, у которого температура кипения была бы вблизи или выше водородной - затрат на поддержание кабеля в рабочем состоянии было бы в десять раз меньше чем для гелиевых температур. При переходе к азотным температурам был бы выигрыш еще на несколько порядков величины. Поэтому сверхпроводящие материалы, работающие при гелиевых температурах, хотя были открыты более 80 лет назад, до сих пор не нашли применения в энергетике.

Можно отметить, что очередные попытки разработать действующее криогенное устройство предпринимаются после каждого из прорывов в технологии. Прогресс в технологии привел к тому, что появились сплавы,

которые обладали лучшими характеристиками по критическим индукции и температуре. Так в начале 70-х годов был бум по исследованию станнида ниобия Nb_3Sn . У него $B_c = 22$ Тл, а $T_c = 18$ К. Однако у этих сверхпроводников, в отличие от металлов эффект сверхпроводимости более сложен. Оказывается у них существуют два значения критической напряженности B_{c0} и B_{c1} . В промежутке между ними материал не имеет сопротивления по отношению к постоянному току, но имеет конечное сопротивление переменному току. И хотя B_{c0} достаточно велико, но значения второй критической индукции B_{c1} мало отличается от соответствующих значений для металлов. «Простые» сверхпроводники получили название сверхпроводников первого рода, а «сложные» - сверхпроводников второго рода.

2 Задачи

Задача 4.1. Определить максимально допустимый ток для свинцового провода при температуре 4,2 К диаметром 2, 10, 25 мм.

Задача 4.2 Определить максимально допустимые токи для алюминиевого провода в сверхпроводящем состоянии и в обычном состоянии, диаметр провода 3 мм.

Вопросы к практическому занятию

1. Как можно классифицировать проводниковые материалы?
2. Какие свойства меди обуславливают ее широкое применение в электронной технике? Что такое «водородная болезнь» меди?
3. Какими преимуществами и недостатками по сравнению с медью обладает алюминий как проводниковый материал?

4. Какие металлы и в каких условиях могут переходить в состояние сверхпроводимости? Что является причиной образования куперовских пар?
5. Как влияет магнитное поле на критическую температуру перехода в состояние сверхпроводимости? Чем различаются сверхпроводники первого и второго рода?
6. Какие металлические сплавы высокого сопротивления нашли применение в электротехнике и для каких целей?
7. Каким образом обеспечивается прочность и формоустойчивость вольфрамовых нитей и спиралей при высоких температурах эксплуатации?
8. Почему ферромагнитные металлы обладают нелинейной зависимостью удельного сопротивления от температуры?
9. Что понимают под мягкими и твердыми припоями?
10. Назовите неметаллические проводниковые материалы и приведите примеры их применения в электротехнике.

Практическое занятие 5

Тема: Расчет напряжения электротеплового пробоя, расчет тангенса угла диэлектрических потерь. Расчет параметров схемы замещения диэлектрика.

1 Теоретическая часть

Основные понятия

Диэлектрическими потерями называют электрическую мощность, затрачиваемую на нагрев диэлектрика, находящегося в электрическом поле.

Потери энергии в диэлектриках наблюдаются как при переменном, так и при постоянном напряжении, поскольку в технических материалах обнаруживается сквозной ток утечки, обусловленный электропроводностью.

При постоянном напряжении, когда нет периодической поляризации, качество материала характеризуется значениями удельных объемного и поверхностного сопротивлений,. При воздействии переменного напряжения на диэлектрик в нем кроме сквозной электропроводности могут проявляться другие механизмы превращения электрической энергии в тепловую. Поэтому качество материала недостаточно характеризовать только сопротивлением изоляции.

В инженерной практике чаще всего для характеристики способности диэлектрика рассеивать энергию в электрическом поле используют угол диэлектрических потерь, а также тангенс этого угла.

Углом диэлектрических потерь δ называют угол, дополняющий до 90° угол сдвига фаз φ между током и напряжением в емкостной цепи.

В случае идеального диэлектрика вектор тока в такой цепи опережает вектор напряжения на угол 90° ; при этом угол δ равен нулю. Чем больше рассеивается в диэлектрике мощность, тем меньше угол сдвига фаз φ и тем больше угол диэлектрических потерь δ и его функция $\operatorname{tg}\delta$.

Тангенс угла диэлектрических потерь непосредственно входит в формулу для рассеиваемой в диэлектрике мощности, поэтому практически наиболее часто пользуются этой характеристикой.

Рассмотрим схему, эквивалентную конденсатору с диэлектриком, обладающим потерями. Эта схема должна быть выбрана с таким расчетом, чтобы активная мощность, расходуемая в данной схеме, была равна мощности, рассеиваемой в диэлектрике конденсатора, а ток был бы сдвинут относительно напряжения на тот же угол, что и в рассматриваемом конденсаторе.

Поставленную задачу можно решить, заменив конденсатор с потерями идеальным конденсатором с параллельно включенным активным сопротивлением (параллельная схема) или конденсатором с последовательно включенным сопротивлением (последовательная схема). Такие эквивалентные схемы, конечно, не дают объяснения механизма диэлектрических потерь и введены только условно.

Параллельная и последовательная эквивалентные схемы представлены на рисунке 5.1. Там же даны соответствующие диаграммы токов и напряжений. Обе схемы эквивалентны друг другу, если при равенстве полных сопротивлений $Z_1 = Z_2 = Z$ равны соответственно их активные и реактивные составляющие. Это условие будет соблюдено, если углы сдвига тока относительно напряжения равны и значения активной мощности одинаковы.

Для параллельной схемы:

$$\operatorname{tg} \delta = I_a / I_c = 1 / (\omega C_p R) \quad (5.1)$$

$$P_a = U I_a = U^2 \omega C_p \operatorname{tg} \delta \quad (5.2)$$

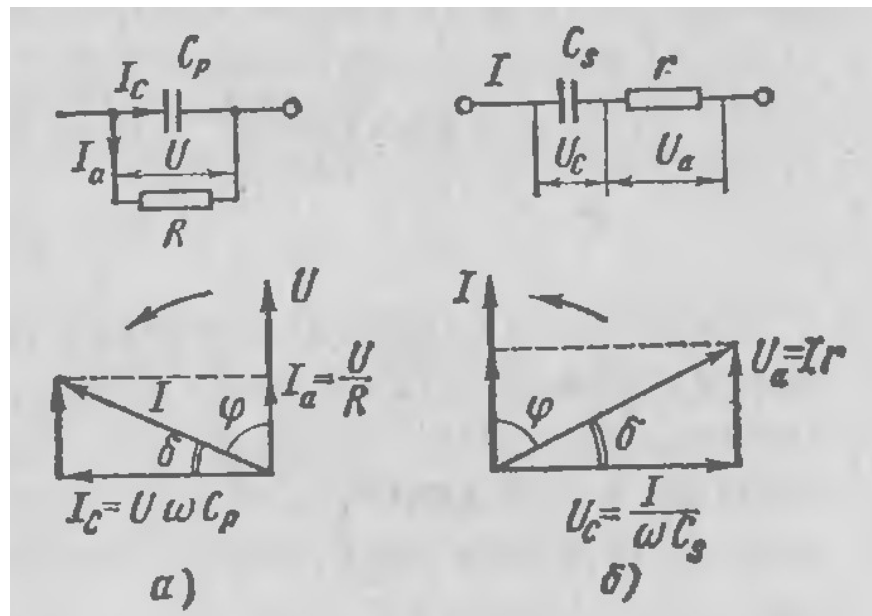


Рисунок 5.1 Параллельная (а) и последовательная (б) эквивалентные схемы диэлектрика с потерями и векторные диаграммы для них

для последовательной схемы:

$$\operatorname{tg} \delta = U_a / U_c = \omega C_s r \quad (5.3)$$

$$P_a = U I_a = \frac{U^2 \omega C_s \operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \quad (5.4)$$

Приравнивая выражения (5.1) и (5.3), а также (5.2) и (5.4) найдем соотношения между C_P и C_S между R и r :

$$C_P = \frac{C_S}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \quad (5.5)$$

$$R = \left(\frac{1}{r \left(1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta} \right)} \right) \quad (5.6)$$

Для доброкачественных диэлектриков можно пренебречь значением $\operatorname{tg} \delta$ по сравнению с единицей в формуле (5.5) и считать $C_P \approx C_S = C$. Выражения для мощности, рассеиваемой в диэлектрике, в этом случае будут также одинаковы у обеих схем:

$$P_a = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta \quad (5.7)$$

Следует отметить, что при переменном напряжении в отличие от постоянного емкость диэлектрика с большими потерями становится условной величиной и зависит от выбора той или иной эквивалентной схемы. Отсюда и диэлектрическая проницаемость материала с большими потерями при переменном напряжении также условна.

Для большинства диэлектриков параметры эквивалентной схемы зависят от частоты. Поэтому, определив каким-либо методом значения емкости и эквивалентного сопротивления для данного конденсатора при некоторой частоте, нельзя использовать эти параметры для расчета угла потерь при другой частоте. Такой расчет справедлив только в отдельных случаях, когда эквивалентная схема имеет определенное физическое обоснование. Так, если для данного диэлектрика известно, что потери в нем определяются только потерями от сквозной электропроводности в широком диапазоне частот, то угол потерь конденсатора с таким диэлектриком может быть вычислен для

любой частоты, лежащей в этом диапазоне, по формуле (5.1). Потери в таком конденсаторе определяются выражением

$$P_a = U^2/R. \quad (5.8)$$

Если же потери в конденсаторе обусловлены главным образом сопротивлением подводящих и соединительных проводов, а также сопротивлением самих электродов (обкладок), например, тонким слоем серебра в слюдяном или керамическом конденсаторе, то рассеиваемая мощность в нем возрастет с частотой пропорционально квадрату частоты:

$$P_a = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta = U^2 \omega^2 C^2 r \quad (5.9)$$

Из выражения (6.19) можно сделать весьма важный практический вывод – конденсаторы, предназначенные для работы на высокой частоте, должны иметь по возможности малое сопротивление как электродов, так и соединительных проводов и переходных контактов.

В большинстве случаев механизм потерь в конденсаторе сложный и его нельзя свести только к потерям от сквозной электропроводности или к потерям в контакте. Поэтому параметры конденсатора необходимо определять при той частоте, при которой он будет использован.

Для параллельной схемы из векторной диаграммы

$$P = \frac{P_a}{V} = \frac{U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta}{Sh} = \frac{U^2 \omega \varepsilon \varepsilon_0 \operatorname{tg} \delta}{Shh} = \omega \varepsilon \varepsilon_0 E^2 \operatorname{tg} \delta \quad (5.10)$$

где V — объем диэлектрика между плоскими электродами, м^3 ; E — напряженность электрического поля, В/м .

Произведение $\varepsilon \operatorname{tg} \delta = \varepsilon''$ называют коэффициентом диэлектрических потерь.

Из выражения (5.10) следует, что при заданных частоте и напряженности электрического поля удельные диэлектрические потери в материале пропорциональны коэффициенту потерь.

В электродинамике при описании взаимодействия электромагнитного поля с веществом часто используют величину, называемую комплексной диэлектрической проницаемостью:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (5.11)$$

Чтобы уяснить это понятие, воспользуемся одним из фундаментальных уравнений электродинамики (первым уравнением Максвелла), устанавливающим связь между изменениями электрического и магнитного полей:

$$\text{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \mathbf{J}_{\text{см}} = \sigma \mathbf{E} + \varepsilon \varepsilon_0 \frac{d}{dt} \quad (5.12)$$

Приведенное уравнение подтверждает тот факт, что магнитное поле отлично от нуля как при перемещении электрических зарядов (т. е. при наличии тока сквозной электропроводности через вещество), так и при изменении напряженности электрического поля во времени (т. е. при наличии тока смещения).

В однородных идеальных диэлектриках сквозной ток отсутствует, т. е. $\sigma = 0$. Для случая гармонического изменения поля уравнения (5.12) можно записать в комплексной форме:

$$\text{rot} \mathbf{H} = j\omega \varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E} \quad (5.13)$$

Если же имеем дело с несовершенным диэлектриком, обладающим заметными диэлектрическими потерями, то уравнение полного тока приобретает более сложный вид:

$$\operatorname{rot} H = (\sigma_f + j\omega\varepsilon\varepsilon_0)E \quad (5.14)$$

где σ_f — полная удельная активная проводимость на данной частоте, учитывающая как сквозную электропроводность, так и активные составляющие поляризационных токов. Задачу о распространении электромагнитного поля в частично проводящей среде можно свести к случаю идеального диэлектрика, если в уравнение (5.14) ввести комплексную диэлектрическую проницаемость:

$$\operatorname{rot} H = j\omega\varepsilon_0\varepsilon^*E \quad (5.15)$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j \frac{\sigma_f}{\omega\varepsilon_0} \quad (5.16)$$

Из сопоставления (5.1) и (5.16) следует, что действительная составляющая комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon = \varepsilon'$, а мнимая $\varepsilon'' = \frac{\sigma_f}{\omega\varepsilon_0}$.

Ранее было показано, что $\operatorname{tg} \delta$ есть отношение активной составляющей проводимости к емкостной составляющей. Поэтому для плоского конденсатора при данной частоте справедливо соотношение:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (5.17)$$

Диэлектрические потери имеют важное значение для материалов, используемых в установках высокого напряжения, в высокочастотной аппаратуре и особенно в высоковольтных, высокочастотных устройствах,

поскольку значение диэлектрических потерь пропорционально квадрату приложенного к диэлектрику напряжения и частоте.

Материалы, предназначенные для применения в указанных условиях, должны отличаться малыми значениями угла потерь и диэлектрической проницаемости, так как в противном случае мощность, рассеиваемая в диэлектрике, может достигнуть недопустимо больших значений.

Большие диэлектрические потери в электроизоляционном материале вызывают сильный нагрев изготовленного из него изделия и могут привести к его тепловому разрушению.

Если диэлектрик используется в колебательном контуре, то диэлектрические потери препятствуют достижению высокой добротности (острой настройки на резонанс), так как с увеличением эквивалентного сопротивления потерь усиливается затухание колебаний в контуре.

Расчет тангенса угла диэлектрических потерь.

В качестве расчетного принимаем напряжение переменное промышленной частоты ($f=50$ Гц) с действующим значением U .

Полный переменный ток через диэлектрический куб состоит из:

а) емкостной составляющей тока:

$$I_c = U / X_c = U \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \varepsilon \varepsilon_0 A^2 / A, \text{ А}, \quad (5.18)$$

где A – длина ребра куба, м;

б) активной составляющей тока, обусловленной поверхностным и объемным сопротивлением:

$$I_a = U / R_a, \text{ А}, \quad (5.19)$$

где $R_a = \frac{R_v R_s}{R_v + R_s}$, Ом, $R_v = \rho_v \frac{A}{A^2}$ – объемное сопротивление, Ом, $R_s = \rho_s \frac{A}{4A}$ –

поверхностное сопротивление, Ом,

в) активной составляющей тока, обусловленной диэлектрическими потерями:

$$I_{ad} = \operatorname{tg} \delta \cdot I_c, \text{ А}, \quad (5.20)$$

где $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь диэлектрика.

Полный ток, таким образом, равен

$$I = \sqrt{I_c^2 + (I_a + I_{ad})^2}, \text{ А.} \quad (5.21)$$

Тангенс угла диэлектрических потерь, вызванный сквозной проводимостью можно оценить как:

$$\operatorname{tg} \delta_{\sigma} = \frac{1.8 \cdot 10^{10}}{f \cdot \varepsilon \cdot \rho_v}. \quad (5.22)$$

Для обычных технических диэлектриков $\operatorname{tg} \delta_{\sigma} \ll \operatorname{tg} \delta$, поэтому при дальнейших расчетах принимаем $\operatorname{tg} \delta$ материала, взятый из справочной литературы.

Оценим мощность, выделяющуюся в объеме диэлектрического куба:

$$P = U^2 C \omega \operatorname{tg} \delta, \text{ Вт,} \quad (5.23)$$

где $C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 A^2}{A}$ – емкость куба, $\omega = 2 \pi f$.

Удельная мощность, выделяемая в диэлектрике

$$p = E \varepsilon \varepsilon_0 \omega \operatorname{tg} \delta, \text{ Вт.} \quad (5.24)$$

Удельные потери на постоянном токе определяются активным сопротивлением куба:

$$P_{ном} = U^2 / R_a, \text{ Вт.} \quad (5.25)$$

Оценим, произойдет ли перекрытие или тепловой пробой куба:

Напряжение теплового пробоя можно определить по формуле:

$$U_{np.m} = 383 \cdot \sqrt{\frac{k}{a \cdot f \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta}} \cdot \phi(c), \text{ кВ,} \quad (5.26)$$

где k – коэффициент внутренней теплопроводности, Вт/(м·К), a – температурный коэффициент тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$, f – частота, Гц, ε – диэлектрическая проницаемость материала, $\phi(c)$ – функция, зависящая от параметра c (рисунок 1):

$$c = \frac{\lambda b \alpha}{2k(b + \lambda h_{\text{э}})}; \quad (5.27)$$

где α – геометрический параметр, для плоского конденсатора $\alpha=A$, м, b – коэффициент теплопроводности электрода, Вт/(м·К), λ – коэффициент теплопередачи во внешнюю среду, при некотором упрощении можно принять $\lambda=13$ Вт/(м²·к), $h_{\text{э}}$ – толщина электрода, м.

При толщине электрода $h_{\text{э}} \rightarrow 0$, выражение (12) можно упростить:

$$c = \frac{\alpha \lambda}{2k}. \quad (5.28)$$

Значение $\phi(c)$ выбирается по графику, представленному на рисунке 1

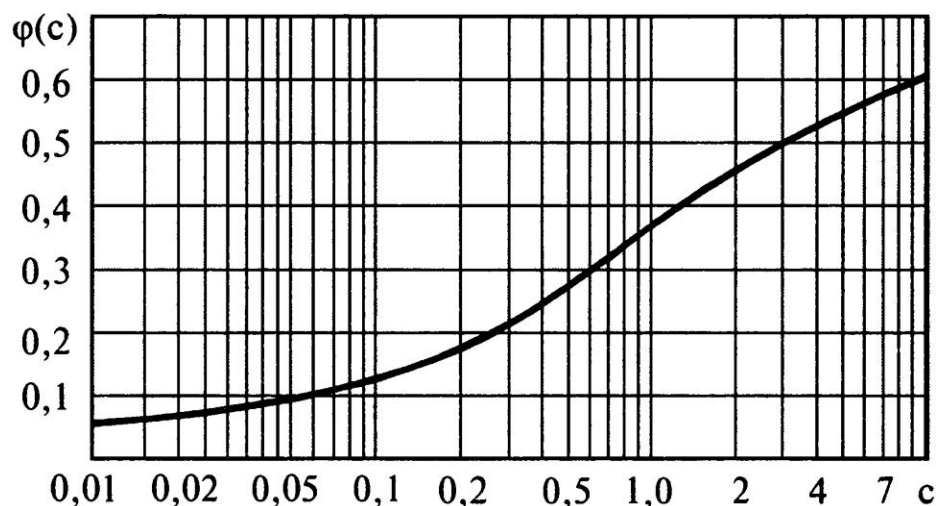


Рисунок 5.1 – Зависимость $\phi(c)$ для расчета электротеплового пробоя твердых диэлектриков.

Часто в справочниках не приводится значение температурного коэффициента тангенса диэлектрических потерь a . В этом случае его можно рассчитать по зависимости $\text{tg} \delta(T)$:

$$a = \frac{\ln \text{tg} \delta_2 - \ln \text{tg} \delta_1}{T_2 - T_1}; \quad (5.29)$$

где $\operatorname{tg}\delta_2$ – тангенс потерь при температуре T_2 , $\operatorname{tg}\delta_1$ – тангенс потерь при температуре T_1 .

Напряжение перекрытия по поверхности приблизительно оценивается по справочным данным.

2 Задачи

Задача 5.1. Рассчитать тангенс угла диэлектрических потерь и диэлектрическую проницаемость диэлектрика, если проводимость материала на частоте 50 Гц составляет 10 кОм, действительная диэлектрическая проницаемость составляет 2,2.

Задача 5.2 Определить напряжение электротеплового пробоя для пластинки из полиэтилена толщиной 2 мм при температуре 50°C.

Практическое занятие 6

Тема: Расчет характеристик изоляции. Расчет диэлектрических потерь в изоляции.

1 Теоретическая часть

Свойства изоляции электротехнического оборудования зависят не только от свойств конкретного материала, но и от формы электродов электротехнической конструкции. В большинстве случаев поле является неоднородным в реальных электротехнических аппаратах. Рассмотрим пример в виде цилиндрической изоляции.

Для случая однородной изоляции (состоящей из одного слоя диэлектрика). Напряженность поля в зависимости от радиуса рассчитывается

по следующей формуле :

$$E(r) = \frac{U}{r \ln \frac{R}{r_0}} \quad (6.1)$$

Где r – радиус изоляции, R – радиус наружного электрода, r_0 – радиус внутреннего электрода, U – приложенное к электродам напряжение. Это выражение справедливо для случая, когда параметры диэлектрика постоянны во всем его объеме, это выражение применимо для электрического поля, создаваемого как постоянным, так и переменным напряжением.

Для случая изоляции, состоящей из двух слоев применимо выражение:

$$E(r) = \frac{U}{\varepsilon r \left[\frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{r_2}{r} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{R}{r} \right]} \quad (6.2)$$

где r_2 – радиус плоскости раздела между двумя слоями диэлектрика. При расчетах ε принимается равной ε_1 , если $r_0 < r < r_2$ и равной ε_2 если $r_2 < r < R$. Данные соотношения справедливы для поля, создаваемого переменным напряжением. В случае, если напряжение постоянное, то выражение (6.2) приобретает следующий вид:

$$E(r) = \frac{U}{\gamma r \left[\frac{1}{\gamma_1} \ln \frac{r_2}{r} + \frac{1}{\gamma_2} \ln \frac{R}{r} \right]} \quad (6.3)$$

Где $\gamma_1 = 1/\rho_1$ и $\gamma_2 = 1/\rho_2$ – удельные объемные электропроводности первого и второго слоев диэлектрика. Соответственно, γ принимается равной γ_1 , если $r_0 < r < r_2$ и равной γ_2 если $r_2 < r < R$.

По результатам расчетов необходимо построить зависимости $E(r)$, r изменяется от r_0 до R .

Оценка электрической прочности изоляции.

Для этого необходимо сопоставить значение максимальной напряженности электрического поля в диэлектрике с электрической прочностью материалов, взятой из справочной литературы. Для расчета электрической прочности на постоянном напряжении примем электрическую прочность как $E_{np.пост}=1,41E_{np}$. Для случая изоляции из однородного диэлектрика рассчитать напряжение электротеплового пробоя.

$$U_{np} = 190 \cdot \sqrt{\frac{k}{af \varepsilon tg_0 \delta}} \cdot \phi(c) \quad (6.4)$$

где k - коэффициент теплопроводности диэлектрика, a - температурный коэффициент тангенса угла диэлектрических потерь $tg \delta$, f - частота, ε - диэлектрическая проницаемость материала, $\phi(c)$ - функция, зависящая от параметра c :

$$c = \frac{\alpha \lambda}{2k} \quad (6.5)$$

где $\alpha = 2R \ln(R/r_0)$ - геометрический параметр, λ - коэффициент теплопередачи во внешнюю среду, при некотором упрощении можно принять $\lambda = 10 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$,

Значение $\phi(c)$ выбирается по рисунку 5.1, температурный коэффициент тангенса угла диэлектрических потерь рассчитывается аналогично, как и в практическом занятии 5.

В случае, если электрическая прочность материала изоляции меньше той напряженности поля, которая получается в расчетах для однородной изоляции на переменном напряжении, необходимо рассчитать толщину изоляции $\Delta_1 = R_1 - r_0$, где новый радиус наружного электрода $R_1 = r_0 e^{\left(\frac{U}{\sigma E_{дон}} \right)}$, $E_{дон}$ - электрическая прочность изоляции.

2 Задачи

Задача 6.1. Рассчитать и построить график зависимости напряженности поля в изоляции в зависимости от расстояния между электродами. Расчёты произвести для постоянного и переменного напряжения. Система электродов – соосные цилиндры, с радиусом внутреннего $r_0=10$ мм, наружного $R=25$ мм. В одном случае изоляция однородна, в другом – состоит из двух слоев. Радиус второго слоя изоляции $r_2=13$ мм. Напряжение между электродами – $U=25$ кВ (действующее значение переменного напряжения, постоянное напряжение). Сделать вывод о том, выдержит ли изоляция приложенное напряжение, произвести расчет напряжения электротеплового пробоя для однослойной изоляции. Привести предложения и расчеты по уменьшению напряженности поля в однослойной изоляции. Материал изоляции 1 слоя – полиэтилен и 2 слоя – поливинилхлорид.

Вопросы к практическому занятию

1. Системы электродов для испытания электрической прочности диэлектриков.
2. Температурная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков.
3. Факторы, влияющие на развитие электротеплового пробоя
4. Факторы, влияющие на развитие ионизационного пробоя.
5. К какому классу твердых диэлектриков относится полиэтилен.
6. К какому классу твердых диэлектриков относится резина.
7. К какому классу относится диэлектрик текстолит.
8. К какому классу твердых диэлектриков относится стеклолакоткань.

Практическое занятие 7

Тема: Тепловой расчет изолирующей конструкции.

1 Теоретическая часть

Теплофизические характеристики материалов очень важны для практики. Действительно, материалы в различных энергетических устройствах и установках работают в различных температурных условиях. Это могут быть климатические условия: солнце, влага, мороз и т.д. Это может быть и нагревание самого материала за счет процессов, происходящих в эксплуатации. Это может быть и материалы для устройства подогрева электрооборудования в холодное время года.

Поэтому важно понимать, как ведут себя материалы при различных температурах, как они могут отводить тепло или аккумулировать тепло.

Температура - это понятие, введенное для характеристики энергии, которой обладают молекулы вещества. С другой стороны, это физическая характеристика, которая соответствует равновесию при приведении двух тел в контакт. Как и всякая физическая характеристика, она поддается измерению. Общепринятыми, в настоящее время, являются две температурные шкалы - Цельсия и Кельвина. Мера одного градуса у них одинакова, она соответствует (исторически) одной сотой от разницы температур кипения воды и ее плавления. У Цельсия, вы знаете, нуль соответствует точке плавления, а $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ - точке кипения воды. По шкале Кельвина, или абсолютной шкале температур, нуль соответствует абсолютному нулю, а нулевая температура по шкале Цельсия соответствует 273 K . Значок градуса в этом случае не ставится. Ниже нуля Кельвина температуры в принципе не может быть. Она соответствует абсолютному покою, при этой температуре, согласно классической механике, молекулы и атомы абсолютно неподвижны. В квантовой механике это не

совсем так, возможны колебательные движения молекул. Кроме того, некоторые электроны и при этой температуре обладают энергией в силу невозможности занятия энергетических уровней, уже занятых другими электронами. Нулевая температура в принципе недостижима, предпринимается много попыток достичь минимума температуры в надежде проявления новых свойств материи. На этом пути была обнаружена сверхпроводимость некоторых металлов, сверхтекучесть жидкого гелия, т.н. гелия-II. Я знаю о достижении к настоящему времени, по крайней мере, примерно одной тысячной доли градуса.

Для материалов вводят несколько характерных температурных точек, указывающих работоспособность и поведение материалов при изменении температуры.

Нагревостойкость - максимальная температура, при которой не уменьшается срок службы материала.

По этому параметру все материалы разделены на классы нагревостойкости (таблица 7.1).

Таблица 7.1 – Классы нагревостойкости диэлектриков

Обозначение класса	Y	A	E	B	F	H	C
Рабочая температура, °C	90	105	120	130	155	180	Выше 180

Теплостойкость - температура, при которой происходит ухудшение характеристик при кратковременном ее достижении.

Термостойкость - температура, при которой происходят химические изменения материала.

Морозостойкость - способность работать при пониженных температурах (этот параметр важен для резин).

Горючесть - способность к воспламенению, поддержанию огня, самовоспламенению. Это различные степени горючести.

Все эти понятия определяют характерные температуры, при которых меняется какое-либо свойство материала. Есть некоторые температуры, характерные для всех материалов, есть температуры, специфичные для некоторых электротехнических материалов. при которых резко меняются какие-либо характеристики.

Большинству материалов присущи точки плавления, кипения.

Точка плавления - температура, при которой происходит переход из твердого состояния в жидкое. Не обладает точкой плавления жидкий гелий, он даже при нуле Кельвина остается жидким. К наиболее тугоплавким можно отнести вольфрам - 3387 °С, молибден 2622 °С, рений - 3180 °С, тантал - 3000°С. Есть тугоплавкие вещества среди керамик: карбид гафния HfC и карбид тантала TaC имеют точки плавления 2880 °С., нитрид и карбид титана - более 3000 °С.

Есть материалы, в основном это термопластичные полимеры, которые обладают точкой размягчения, но до плавления дело не доходит, т.к. начинается разрушение полимерных молекул при повышенных температурах. У термореактивных полимеров даже до размягчения дело не доходит, материал раньше начинает разлагаться.

В любых процессах плавления, достижение определенной точки является необходимым, но недостаточным условием плавления. Для того, чтобы расплавить вещество нужно сообщить ему энергию, которая называется теплотой плавления.

Точка кипения - температура, при которой происходит переход из жидкого состояния в парообразное. Кипят практически все простые вещества, не кипят сложные органические соединения, они разлагаются при более низких температурах, не доходя до кипения. На точку кипения оказывает значительное влияние давление. Так, например для воды можно сдвинуть точку кипения от 100 °С до 373°С приложением давления в 225 атм. Кипение растворов, т.е. взаимно растворимых друг в друге веществ происходит сложным образом,

кипят сразу два компонента, только в паре одного вещества больше, чем другого. Например слабый раствор спирта в воде выкипает так, что в паре спирта больше чем в воде. За счет этого работает перегонка и после конденсации пара получается спирт, но обогащенный водой. Есть смеси выкипающие одновременно, например 96% спирт. Здесь при кипении состав жидкости и состав пара одинаковы. После конденсации пара получается спирт точно такого же состава. Такие смеси называются азеотропными.

Есть температуры специфичные для электротехнических материалов. Например для сегнетоэлектриков вводят т.н. точку Кюри. Оказывается, что сегнетоэлектрическое состояние вещества возникает только при пониженных температурах. Существует такая температура для каждого сегнетоэлектрика, выше которой домены не могут существовать и он превращается в параэлектрик. Такая температура называется точкой Кюри. Диэлектрическая проницаемость ниже точки Кюри велика, она слабо нарастает по мере подхода к точке Кюри. После достижения этой точки диэлектрическая проницаемость резко падает. Например, для наиболее распространенного сегнетоэлектрика: титаната бария, точка Кюри 120 °С, для цирконат-титаната свинца 270 °С, для некоторых органических сегнетоэлектриков температура Кюри отрицательна.

Теплоемкость, теплопроводность, температурные коэффициенты материалов.

Теплоемкость - это способность накапливать тепловую энергию в материале при его нагревании. Численно удельная теплоемкость равна энергии, которую нужно ввести в единицу массы материала, чтобы нагреть его на один градус. Размерность удельной теплоемкости [Дж/(кг·К)]. Эта величина экстенсивная, т.е. можно говорить о теплоемкости отдельной молекулы или атома, затем просуммировать количество молекул до одного грамма или до одного моля и получить теплоемкость одного грамма или одного моля вещества. Значение теплоемкости зависит от природы материала. Самая высокая теплоемкость у воды $4.2 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К) или 4.2 кДж/(кг·К). У подавляющего большинства материалов удельная теплоемкость порядка 1

кДж/(кг· К). Теплоемкость зависит от температуры. Вблизи нуля Кельвина она мала, в рабочем диапазоне температур - слабо меняется с ростом температуры. Какие-либо скачки теплоемкости связаны со структурной перестройкой тел, например с растянутым плавлением таких веществ, как парафин. Здесь можно упомянуть пример с парафиновой прогревающей повязкой, когда тепло долго сохраняется за счет высокой теплоемкости парафина и повязка греет длительное время.

Теплоемкость газов хорошо изучена теоретически. Для газов даже введено два типа теплоемкости: при постоянном давлении C_p и при постоянном объеме C_v . Обычно рассматривают теплоемкость, приходящуюся на одну молекулу.

Теплопроводность определяет способность передать тепловую энергию через материал. Это тоже важная характеристика, она характеризуется коэффициентом теплопроводности. Численно он равен потоку q проходящему через площадку единичной площади, при перепаде на ее гранях температуры 1 °С. Лучше всего передают тепло металлы, так у меди $K = 400$ Вт/(м К), для серебра чуть больше (418), для алюминия 200 Вт/(м К), для нержавеющей стали примерно 20 Вт/(м К), для простых сталей примерно в два раза выше.

У других материалов теплопроводность значительно ниже. Например у бетона $\lambda = 0.6$ Вт/(м К), у трансформаторного масла $\lambda = 0.13$ Вт/(м К), для воздуха $\lambda = 3,67 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·К).

Для газов и жидкостей обычная теплопроводность играет незначительную роль. В этом случае главную роль играют конвекция и излучение.

Расчет теплового сопротивления.

В качестве основного показателя будем использовать температуру проводника с током. Превышение температуры внутри изолирующей конструкции над температурой окружающей среды (температурой изотермической поверхности) рассчитывается по формуле:

$$\theta_{np} - \theta_0 = P_{np} \cdot (S_{из} + S_{\Pi} + S_0) + P_{д} \cdot \left(\frac{S_{из}}{2} + S_{\Pi} + S_0 \right) \quad (7.1)$$

Где Θ_{np} – температура проводника, Θ_0 – температура окружающей среды, P_{np} – мощность, выделяемая на единицу длины проводника, P_d – мощность, выделяющаяся в диэлектрике вследствие диэлектрических потерь, $S_{из}$ – тепловое сопротивление диэлектрика, S_{Π} – тепловое сопротивление защитной оболочки, S_{Π} – тепловое сопротивление среды, окружающей изолирующую конструкцию.

Мощность, выделяемая в проводнике может быть выражена в виде:

$$P_{np} = I^2 R \quad (7.2)$$

Где I – ток в проводнике, R_{np} – сопротивление проводника на единицу длины. В свою очередь, сопротивление проводника так же зависит от температуры:

$$R_{np} = \frac{\rho(1 - \alpha_T(\Theta_{np} - \Theta_0))}{F_{np}} \quad (7.3)$$

Где ρ – удельное объемное сопротивление материала проводника, α_T – температурный коэффициент удельного объемного сопротивления проводника, F_{np} – площадь сечения проводника, $\Theta_0 = 20$ °C – нормальная температура окружающей среды, при которой было определено значение ρ .

Подставив выражения (10) и (11) в (9) получим расчетную формулу для определения температуры проводника:

$$\Theta_{np} = \frac{F_{np} \left(\Theta_0 + P_d \left(\frac{S_{из} + S_{\Pi} + S_0}{2} \right) \right) + I^2 \rho (\alpha_T \Theta_0 + 1) (S_{из} + S_{\Pi} + S_0)}{I^2 \rho (\alpha_T) (S_{из} + S_{\Pi} + S_0) + F_n} \quad (7.4)$$

Тепловые сопротивления рассчитываются по формулам:

$$S_{из} = \frac{1}{2\pi k} \ln \left(\frac{R}{r} \right) \quad (7.5)$$

Где k - коэффициент теплопроводности диэлектрика. Аналогичным образом рассчитывается и тепловое сопротивление защитной оболочки:

$$S_{из} = \frac{1}{2\pi k_{\pi}} \ln \left(\frac{R+\Delta}{R} \right) \quad (7.6)$$

Где k_{π} - коэффициент теплопроводности материала защитной оболочки. Для расчета теплового сопротивления среды, окружающей изолирующую конструкцию необходимо применить выражение:

$$S_0 = \frac{\sigma_0}{2\pi} \ln \left(\frac{L}{R+\Delta} + \sqrt{\left(\frac{L}{R+\Delta} \right)^2 - 1} \right) \quad (7.7)$$

где σ_0 – удельное термическое сопротивление материала, окружающего изолирующую конструкцию, $\sigma_0=1/k_0$ где k_0 – коэффициент теплопроводности материала.

Потери в диэлектрике вычисляются, основываясь на данных о емкости изоляции и ее $\text{tg}\delta$:

$$P_d = U^2 \omega C \text{tg}\delta \quad (7.8)$$

Где U – напряжение, которое подается на проводник изолирующей конструкции, $\omega=2\pi f$ – угловая частота переменного напряжения, $f=50$ Гц. C – емкость изоляции, $\text{tg}\delta$ – тангенс потерь диэлектрика, из которого состоит

изоляция. Для упрощения принимаем, что $\operatorname{tg}\delta$ не зависит от температуры. Емкость изоляции конструкции можно определить по следующей формуле:

$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 R}{\ln \frac{R}{r}} \quad (7.9)$$

Где ϵ – диэлектрическая проницаемость диэлектрика.

Таким образом, воспользовавшись вышеприведенными формулами, можно рассчитать, какую температуру будет иметь токопроводящий стержень и прилегающие к нему слои диэлектрика в изолирующей конструкции.

В то же время, зная теплостойкость диэлектрика, и принимая его за максимальную рабочую температуру Θ_{max} , возможно рассчитать максимальный ток через изолированный проводник. Для этого необходимо воспользоваться следующим выражением:

$$I_{max} = \sqrt{\frac{\Theta_{max} - \theta_0 - P_d \cdot \left(\frac{S_{из}}{2} + S_{II} + S_0 \right)}{R_{np} \cdot (S_{из} + S_{II} + S_0)}} \quad (7.10)$$

2 Задачи

Задача 7.1 Определить температуру токопроводящей конструкции, по которой проходит ток I , диаметр которой r и она покрыта слоем диэлектрика. Наружный радиус диэлектрика – R , поверхность диэлектрика нанесена защитная оболочка толщиной Δ , все это находится в определенной среде на расстоянии L от теплоотводной (изотермической) поверхности. Защитная оболочка имеет нулевой потенциал. При расчетах учесть диэлектрические потери в изолирующем материале.

Вопросы к практическому занятию

5. Контрольные вопросы

1. Теория электротеплового пробоя жидкого диэлектрика.
2. Теория электрического пробоя жидких диэлектриков.
3. Последовательность развития электротеплового пробоя трансформаторного масла.
4. Зависимость электрической прочности трансформаторного масла от его электропроводности.
5. Зависимость электрической прочности трансформаторного масла от наличия нерастворимых примесей.
6. Зависимость электрической прочности трансформаторного масла от растворимых примесей.
7. Влияние эмульгированной влаги на электрическую прочность трансформаторного масла.
8. Зависимость пробивного напряжения трансформаторного масла от температуры.
9. Порядок проведения испытаний электрической прочности жидких диэлектриков на аппарате АИМ-90.
10. Устройство ячейки для испытания электрической прочности жидких диэлектриков.
11. Для какой цели проводится несколько пробоев на одном и том же образце жидкого диэлектрика.
12. Зачем необходимо рассчитывать среднеквадратичную ошибку пробивного напряжения трансформаторного масла.
13. Основные факторы, влияющие на электрическую прочность трансформаторного масла.
14. В оборудовании какого класса напряжения может быть применено трансформаторное масло, исследованное в лабораторной работе.

5. Контрольные вопросы

5. Контрольные вопросы

1. Классификация и основные виды поляризации в диэлектрике.
2. Определение диэлектрических потерь и причины их возникновения.
3. Обобщённая схема замещения реального диэлектрика. Виды поляризации.
4. Параллельная схема замещения диэлектрика с потерями. Область применения и её векторная диаграмма.
5. Последовательная схема замещения диэлектрика с потерями. Область применения и её векторная диаграмма.
6. Диэлектрические потери в газах. Причины возникновения.
7. Диэлектрические потери в неполярных и полярных жидких диэлектриках.
8. Диэлектрические потери в твёрдых диэлектриках ионного строения.
9. Диэлектрические потери в твёрдых полярных диэлектриках молекулярного строения.
10. Диэлектрические потери в твёрдых неполярных диэлектриках молекулярного строения.
11. Диэлектрические потери в полярных и неполярных полимерных диэлектриках.
12. Зависимость диэлектрической проницаемости полярных диэлектриков от температуры и частоты электрического поля.
13. Диэлектрическая проницаемость композиционных материалов.
14. Диэлектрическая проницаемость газов.

15. Диэлектрическая проницаемость твердых диэлектриков ионного строения.

16. Диэлектрическая проницаемость полимерных диэлектриков.

5. Контрольные вопросы

1. Электрический ток, электропроводность, электрическое сопротивление.

2. Условие протекания тока проводимости через вещество.

3. Электропроводность твердых диэлектриков ионного строения.

4. Основы зонной теории. Применение зонной теории к строению и свойствам диэлектриков.

5. Электропроводность газов.

6. Электропроводность жидких диэлектриков.

7. Электропроводность твердых диэлектриков молекулярного строения.

8. Поверхностная электропроводность.

9. Методы измерений удельных сопротивлений.

10. Порядок работы с измерительным мостом СА-7100-3 при измерении сопротивления.

11. Понятие токов абсорбции и методов их измерения.

12. Миграционная поляризация диэлектриков.

13. Распределение постоянного и переменного электрических полей внутри неоднородного (двухслойного) диэлектрика.

14. Особенности электропроводности твердых полимерных диэлектриков.

15. Влияние различных факторов на электропроводность газообразных и твердых диэлектриков.

16. Влияние различных факторов на электропроводность жидких диэлектриков.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Основная учебная литература:

1. С.Н. Колесов, Н.С. Колесов: Материаловедение и технология конструкционных материалов: Учебник для вузов: 2-е изд., перераб. и доп.: М.: Высш. шк., 2007. 535 с.
2. В. С. Сорокин, Б. Л. Антипов, Н. П. Лазарева: Материалы и элементы электронной техники : в 2 т. : учебник: Т.1, Проводники, полупроводники, диэлектрики.: М.: Академия, 2006.:448 с.
3. В. С. Сорокин, Б. Л. Антипов, Н. П. Лазарева: Материалы и элементы электронной техники: в 2 т.: учебник:, Т.2, Активные диэлектрики, магнитные материалы, элементы электронной техники.: М.: Академия, 2006.: 384 с.
4. В. Н. Бородулин, А. С. Воробьев, В. М. Матюнин и др.: Электротехнические и конструкционные материалы : учеб. пособие: под ред. В. А. Филикова.: 3-е изд., испр.: М.: Академия, 2007. 280 с
5. Электроматериаловедение: Методические указания к лабораторным работам для студентов специальности 100400 Электроснабжение дневной и заочной форм обучения / сост. Воропаев В.В. – Тверь, ЗАО “Лилия Принт”, 2006.– 48 с.

Дополнительная литература:

1. Справочник по электротехническим материалам: в 3-х томах: Под редакцией Ю.В. Корицкого и др.: М.: Энергия, 1986.Т.1, 355 с. Т.2, 1987. 457 с. Т.3, 1988. 716 с.
- 2 Д.М. Казарновский, Б.М. Тареев. Испытание электроизоляционных материалов и изделий.- Л.: Энергия, 1986 г.
- 3 И. И. Алиев: Электротехнические материалы и изделия.: справочник.: Изд. 2-е, испр.:М.: РадиоСофт, 2007. 352 с.

4. Н.П. Богородицкий, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев.: Электротехнические материалы.: Л: Энергия, 1989г. 316 с.

5. Ю. А. Геллер, А. Г. Рахштадт Материаловедение : учебник для вузов: под ред. А. Г. Рахштадта.: Изд. 6-е, перераб. и доп.: М.: Металлургия, 1989. 456 с.

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Методические указания

по организации самостоятельной работы обучающихся
по дисциплине «Электротехническое и конструкционное
материаловедение» для студентов направления подготовки /специальности
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
Направленность (профиль) Цифровые технологии в электроэнергетике

Ставрополь 2026

Программой предмета «Электротехнические материалы» предусматривается изучение учащимися свойств, областей применения, способов получения конструкционных и электротехнических материалов, применяемых в электротехнических устройствах.

Изучение предмета основывается на знаниях, полученных учащимися по общеобразовательным предметам и теоретическим основам электротехники. В свою очередь он является базой для изучения специальных предметов «Электрические измерения», «Основы промышленной электроники», «Основы автоматики и микропроцессорной техники», «Электрические машины» и других профилирующих предметов.

Для закрепления теоретических знаний программой предусматривается выполнение учащимися лабораторных работ.

В результате изучения предмета учащиеся должны знать:

1. Механические, электрические, тепловые и физикохимические характеристики конструкционных и электротехнических материалов;
2. Физико-химические процессы, определяющие основные свойства материалов;
3. Строение конструкционных и электротехнических материалов;
4. Способы получения конструкционных и электротехнических материалов;
5. Области применения конструкционных и электротехнических материалов, перспективы их развития.

Учащиеся должны уметь:

1. Выбирать конструкционные и электротехнические материалы в соответствии с условиями применения;
2. Пользоваться контрольно-измерительными приборами, материалами, инструментами при выполнении работ с учетом требований безопасности труда;
3. Определять свойства и характерные особенности материалов;
4. Пользоваться каталогами, справочной литературой, первоисточниками.

ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ

Современный научно-технический прогресс неразрывно связан с разработкой и освоением новых материалов. Именно материалы стали ключевым звеном, определяющим успех многих инженерных решений при создании электротехнического оборудования и электронной аппаратуры. Поэтому изучению материалов отводится значительное место.

Практика постоянно предъявляет все более жесткие и разнообразные требования к свойствам и сочетанию свойств у материалов. Соответственно, растет количество и номенклатура материалов. В настоящее время число наименований материалов, применяемых в электротехнике для различных целей, составляет несколько тысяч.

Материалы, используемые в электронной технике, подразделяют на электротехнические, конструкционные и специального назначения.

Электротехническими называют материалы, характеризующиеся определенными свойствами по отношению к электромагнитному полю и применяемые в технике с учетом этих свойств.

Практически, различные материалы подвергаются воздействиям как отдельно электрических или магнитных полей, так и их совокупности. По поведению в магнитном поле электротехнические материалы подразделяют на сильномагнитные (магнетики) и слабомагнитные. Первые нашли особенно широкое применение в технике благодаря их магнитным свойствам.

По поведению в электрическом поле материалы подразделяют на проводниковые, полупроводниковые и диэлектрические.

Большинство электротехнических материалов можно отнести к слабомагнитным или практически немагнитным. Однако и среди магнетиков следует различать проводящие, полупроводящие и практически непроводящие, что определяет частотный диапазон их применения.

Проводниковыми называют материалы, основным электрическим свойством которых является сильно выраженная электропроводность. Их применение в технике обусловлено в основном этим свойством,

определяющим высокую удельную электрическую проводимость при нормальной температуре.

Полупроводниковыми называют материалы, являющиеся по удельной проводимости промежуточными между проводниковыми и диэлектрическими материалами и отличительным свойством которых, является сильная зависимость удельной проводимости от концентрации и вида примесей или различных дефектов, а также в большинстве случаев от внешних энергетических воздействий (температуры, освещенности и т. п.).

Диэлектрическими называют материалы, основным электрическим свойством которых является способность к поляризации и в которых возможно существование электростатического поля. Реальный диэлектрик тем более приближается к идеальному, чем меньше его удельная проводимость и чем слабее у него выражены замедленные механизмы поляризации, связанные с рассеиванием электрической энергии и выделением теплоты.

При применении диэлектриков - одного из наиболее обширных классов электротехнических материалов - довольно четко определилась необходимость использования как пассивных, так и активных свойств этих материалов.

Пассивные свойства диэлектрических материалов используются, когда их применяют в качестве электроизоляционных материалов и диэлектриков конденсаторов обычных типов. Электроизоляционными материалами называют диэлектрики, которые не допускают утечки электрических зарядов, т. е. с их помощью отделяют электрические цепи друг от друга или токоведущие части устройств, приборов и аппаратов от проводящих, но не токоведущих частей (от корпуса, от земли). В этих случаях диэлектрическая проницаемость материала не играет особой роли или она должна быть возможно меньшей, чтобы не вносить в схемы паразитных емкостей. Если материал используется в качестве диэлектрика конденсатора определенной

емкости и наименьших размеров, то при прочих равных условиях желательно, чтобы этот материал имел большую диэлектрическую проницаемость.

Активными (управляемыми) диэлектриками являются сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, пироэлектрики, электролюминофоры, материалы для излучателей и затворов в лазерной технике, электреты и др.

Условно к проводникам относят материалы с удельным электрическим сопротивлением $\rho < 10^{-5}$ Ом·м, а к диэлектрикам — материалы, у которых $\rho > 10^8$ Ом·м. При этом надо заметить, что удельное сопротивление хороших проводников может составлять всего 10^{-8} Ом·м, а у лучших диэлектриков превосходить 10^{16} Ом·м.

Удельное сопротивление полупроводников в зависимости от строения и состава материалов, а также от условий их эксплуатации может изменяться в пределах 10^{-5} - 10^8 Ом·м.

Хорошими проводниками электрического тока являются металлы. Из 105 химических элементов лишь двадцать пять являются неметаллами, причем двенадцать элементов могут проявлять полупроводниковые свойства.

Но кроме элементарных веществ существуют тысячи химических соединений, сплавов или композиций со свойствами проводников, полупроводников или диэлектриков. Четкую границу между значениями удельного сопротивления различных классов материалов провести достаточно сложно. Например, многие полупроводники при низких температурах ведут себя подобно диэлектрикам. В то же время диэлектрики при сильном нагревании могут проявлять свойства полупроводников. Качественное различие состоит в том, что для металлов проводящее состояние является основным, а для полупроводников и диэлектриков - возбужденным.

Для понимания электрических, магнитных и механических свойств материалов, а также причин старения нужны знания их химического и фазового состава, атомной структуры и структурных дефектов.

Совокупность научно-технических знаний о физико-химической природе, методах исследования и изготовления различных материалов

составляет основу материаловедения, ведущая роль которого в настоящее время широко признана во многих областях техники и промышленности. Успехи материаловедения позволили перейти от использования уже известных к целенаправленному созданию новых материалов с заранее заданными свойствами.

При изучении разделов, посвященных различным классам материалов, необходимо придерживаться схемы, включающей раскрытие физической сущности явлений и процессов, происходящих в материалах при их взаимодействии с электромагнитным полем, анализ свойств материалов в различных условиях их эксплуатации, а также наиболее важные области применения в приборах и устройствах электротехники.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Целью выполнения учащимися контрольной работы является:

- 1) закрепление полученных знаний по основным разделам, посвященным различным классам электротехнических материалов;
- 2) проверка умения учащихся самостоятельно решать поставленные задачи;
- 3) выработка умения использования технической и справочной литературы.

Контрольная работа включает в себя:

- 1) четыре теоретических заданий, предусматривающих изучение характеристик, свойств, параметров, способов получения и областей применения основных классов материалов (конструкционных, проводниковых, диэлектрических, полупроводниковых, магнитных);
- 2) практический вопрос;
- 3) задачу.

При выполнении контрольной работы необходимо соблюдать следующие требования:

- 1) контрольная работа выполняется в тетради объёмом 12 листов; не желательно превышение объёма контрольной работы свыше 12 листов;
- 2) в тетради необходимо оставить поля и место в конце для рецензии проверяющего;
- 3) каждому ответу контрольной работы предшествует задание (вопрос), причём выполнение заданий может производиться в произвольном порядке;
- 4) ответ должен полностью, всесторонне и конкретно раскрывать задание;
- 5) при необходимости должны приводиться поясняющие рисунки, графики, диаграммы и т.п.;

- 6) при решении задачи необходимо приводить формулу, а затем вычисления в развёрнутом виде, с указанием размерности получаемых величин;
- 7) в конце работы обязательно должен быть приведён список используемой литературы;
- 8) оформление контрольной работы должно быть аккуратным и в соответствии с требованиями ЕСКД.
- 9) контрольная работа сдаётся не позднее, чем за две недели перед началом сессии или в соответствии с графиком.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богородицкий Н.Н., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы - Л., 1985
2. Бородулин В.А., Воробьев А.С., Попов С.Я. Конструкционные и электротехнические материалы. Москва, 1990
3. Гелин Ф.Д. Крупицкий Э.И. Позняк И.П. Материаловедение - Минск, «Высшая школа», 1977
4. Никулин Н.В. Электроматериаловедение – Москва, 1984
5. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники – Москва, 1986.

ИНТЕРНЕТ - ИСТОЧНИКИ

1. Сайт Гомельского государственного политехнического техникума web - **<http://www.ggpt.gomel.by>**
2. Электронная библиотека web- **<http://www.sergiolibrary.narod.ru>**
3. Учебно-методический пакет по курсу "Электротехнические материалы" включающий в себя 15 лекций, тренировочные тесты, вопросы к зачету и список обязательной и дополнительной литературы web - **<http://sermir.narod.ru/train.htm>**
4. Электронный конспект лекций по курсу материаловедение web - **<http://www.ispu.ru/library/lessons/tretjakova>**

ЗАДАНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

ЗАДАНИЕ 1

Задание предусматривает детальное раскрытие одной из тем (в соответствии с вариантом) по разделу

«Основы металловедения»

1. Физические и химические свойства металлов;
2. Механические и технологические свойства металлов;
3. Чёрные и цветные металлы. Основные группы цветных металлов. Области применения;
4. Классификация электротехнических материалов;
5. Понятие о коррозии металлов. Виды коррозии: химическая и электрохимическая. Способы борьбы с коррозией;
6. Основные виды термической обработки стали. Отпуск, отжиг и нормализация;
7. Сплавы железа. Деление железоуглеродистых сплавов на стали и чугуны. Структурные составляющие железоуглеродистых сплавов и их свойства;
8. Обзор способов получения чугуна;
9. Кристаллическое строение металлов. Характерные свойства металлов. Виды кристаллических решеток, дефекты их строения;
10. Обзор способов получения стали;
11. Классификация сталей. Маркировка сталей;
12. Химико-термическая обработка стали: цементирование, азотирование, цианирование, диффузионная металлизация;
13. Углеродистые и легированные стали. Их назначение и применение;
14. Электротехнические стали. Области применения;
15. Понятие сплава. Классификация сплавов, их свойства;
16. Чугуны, их свойства и область применения. Маркировка чугунов;
17. Твердые сплавы, их свойства и применение;

18. Основные виды термической обработки стали. Закалка стали. Сведения о поверхностной закалке стали;
19. Основные виды термической обработки стали. Отпуск, отжиг и нормализация;
20. Химико-термическая обработка стали: цементирование, азотирование, цианирование, диффузионная металлизация.
21. Понятие о коррозии металлов. Виды коррозии: химическая и электрохимическая. Способы борьбы с коррозией.
22. Чёрные и цветные металлы. Основные группы цветных металлов. Области применения.
23. Классификация электротехнических материалов.
24. Влияние примесей на качество сталей
25. Физические и химические свойства металлов.
26. Механические и технологические свойства металлов.
27. Понятие сплава. Классификация сплавов, их свойства.
28. Кристаллическое строение металлов. Характерные свойства металлов. Виды кристаллических решеток, дефекты их строения.
29. Электротехнические стали. Области применения.
30. Понятие о диаграмме состояния сплавов. Примеры диаграмм состояний. Связь между структурой сплава и его механическими, физическими и технологическими свойствами.

ЗАДАНИЕ 2

Задание предусматривает детальное раскрытие одной из тем (в соответствии с вариантом) по разделу

“Проводниковые материалы”:

1. Материалы, применяемые для контактов.
2. Медь, её основные свойства и применение в электротехнике.
3. Силовые кабели. Классификация силовых кабелей по числу жил, роду оболочки, роду изоляции, конструкции защитной

оболочки и назначению.

4. Алюминий, его свойства и применение в электротехнике.
5. Установочные и монтажные провода.
6. Тугоплавкие металлы, их свойства и применение в электротехнике.
7. Классификация проводниковых материалов.
8. Сверхпроводники и криопроводники.
9. Припой и флюсы.
10. Физическая природа электропроводности металлов.
11. Общие требования к материалам высокого сопротивления, их классификация. Свойства и применение нихрома.
12. Свойства и применение манганина и константана.
13. Контактные явления. Сплавы для термопреобразователей.
14. Неметаллические проводниковые материалы. Свойства и применение графита, как проводникового материала.
15. Композиционные проводниковые материалы. Проводящие материалы на основе оксидов.
16. Обмоточные провода, их виды.
17. Материалы проводов для воздушных линий электропередач.
18. Температурная зависимость удельного сопротивления металлических проводников. Влияние примесей и дефектов на удельное сопротивление металлических проводников.
19. Сверхпроводники и криопроводники.
20. Общая характеристика материалов высокой проводимости.
21. Благородные металлы и их применение в электротехнике.
22. Маркировка проводов и кабелей.
23. Материалы, применяемые для контактов.
24. Медь, её свойства и применение в электротехнике.
25. Алюминий, его свойства и применение в электротехнике.
26. Общие требования к материалам высокого сопротивления, их классификация. Свойства и применение нихрома.

27. Обмоточные провода, их виды.
28. Установочные и монтажные провода.
29. Физическая природа электропроводности металлов.
30. Контрольные кабели и их маркировка. Специальные кабели, их классификация.

ЗАДАНИЕ 3

Задание предусматривает детальное раскрытие одной из тем (в соответствии с вариантом) по разделу

«Диэлектрики»

1. Поляризация диэлектриков. Понятие диэлектрической проницаемости (ϵ) как численной оценки процесса поляризации.
2. Проводимость (сопротивление) диэлектриков. Понятие удельного объемного (r_v) и удельного поверхностного (r_s) сопротивления. Зависимость r_v и r_s от внешних факторов, структуры и параметров диэлектриков.
3. Потери в диэлектриках. Понятие тангенса угла ($\tan \delta$) диэлектрических потерь. Численное определение потерь в диэлектрике, зависимость потерь от напряжения и частоты.
4. Понятие электрического пробоя и электрической прочности, единицы измерения электрической прочности (E).
5. Виды пробоя. Механизм развития пробоя.
6. Роль газообразных диэлектриков в электротехнических установках. Основные электрические характеристики газов. Вольт-амперная характеристика газообразных диэлектриков.
7. Пробой газов в однородном и неоднородном поле. Типы электродов, создающие однородные и неоднородные поля. «Корона» при постоянном и переменном напряжении.
8. Применение газообразных диэлектриков (воздух, азот, водород, элегаз, фреон, инертные газы, вакуум) в электрических устройствах.

9. Электропроводность жидких диэлектриков. Пробой жидких диэлектриков.
10. Применение жидких диэлектриков. Нефтяные масла. Синтетические масла.
11. Полимеры. Классификация полимеров. Основные свойства и области применения полимеров.
12. Синтетические полимеры: полистирол, полиэтилен, полихлорвинил, фторопласты. Их основные свойства и применение.
13. Поликонденсационные смолы: фенолформальдегидные, поликонденсационные, полиэфирные, эпоксидные. Их основные свойства и применение.
14. Пластмассы. Состав пластмасс. Основные особенности пластмасс. Слоистые пластики и особенности их получения.
15. Характерные свойства резины. Состав и получение резины. Влияние составляющих на электрические, механические и тепловые свойства. Применение резины в электротехнике.
16. Понятие о лаках. Требования, предъявляемые к лакам. Состав и классификация лаков. Область применения лаков. Эмали, их состав и области применения.
17. Понятие о компаундах. Классификация и назначение компаундов. Состав компаундов. Термопластичные компаунды. Эпоксидные компаунды. Применение компаундов в электронике.
18. Виды волокнистых материалов, применяемых в электротехнике. Их достоинства и недостатки. Неорганические волокна: асбест, стекловолокно, их основные характеристики и применение.
19. Слюда, ее основные свойства. Изоляционные материалы на основе слюды, их применение в электротехнике. Искусственная фторфлогопит, ее свойства, применение.
20. Керамика, способы изготовления керамических изделий. Основные свойства керамических диэлектриков. Применение в электротехнике.

21. Установочная керамика, конденсаторная керамика, стеатит. Свойства и области применения.
22. Общая характеристика активных диэлектриков. Основные характеристики, область применения сегнетоэлектриков, пьезоэлектриков, пирозэлектриков, электретов.
23. Жидкие кристаллы. Явления в жидких кристаллах. Применение жидких кристаллов.
24. Состав стекла, способ его получения, характеристики, применение в электротехнике.
25. Тепловые характеристики диэлектриков: температура плавления, вспышки и размягчения материалов, теплостойкость, морозостойкость, температурные коэффициенты.
26. Синтетические жидкие диэлектрики. Свойства и применение совола, совтола, гексола. Кремний и фторорганические соединения. Их применение, достоинства и недостатки.
27. Зависимость электрической прочности диэлектриков от однородности поля, давления, температуры, толщины диэлектрика.
28. Физико-химические характеристики диэлектриков: вязкость жидких диэлектриков, кислотное число, химическая стойкость, влагостойкость, радиационная стойкость, тропическая стойкость.
29. Механические характеристики диэлектриков: прочность при растяжении, сжатии и изгибе, ударная вязкость, вибропрочность.
30. Кремнийорганические смолы, их получение и применение.

ЗАДАНИЕ 4

Задание предусматривает детальное раскрытие одной из тем
(в соответствии с вариантом) по разделам

“Полупроводниковые материалы” и “«Магнитные материалы»”

1. Кремний. Получение, свойства и применение.
2. Диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики.
3. Собственные и примесные полупроводники. Основные и неосновные носители заряда.
4. Явления намагничивания и перемангничивания. Понятие о потерях в стали.
5. Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках.
6. Общая характеристика магнитных материалов. Основные свойства магнитных материалов.
7. Термоэлектрические явления в полупроводниках.
8. Классификация магнитомягких материалов. Требования к ним. Основные области применения.
9. Гальваномагнитные эффекты в полупроводниках.
10. Пермаллой, альсиферы. Свойства, применение.
11. Получение и свойства р-n-перехода.
12. Электротехнические кремнистые стали, свойства и применение. Электролитическое и технически чистое железо.
13. Германий. Получение, свойства и применение.
14. Магнитные ферриты. Их основные особенности и применение.
15. Карбид кремния. Получение, свойства и применение.
16. Характеристики магнитотвердых материалов, их классификация и применение в электротехнике. Требования к магнитотвердым материалам.
17. Общая характеристика полупроводниковых материалов. Разновидности полупроводников и их основные свойства.
18. Магнитотвердые ферриты. Их основные особенности и применение.

19. Электропроводность полупроводников. Собственная электронная и дырочная электропроводность.
20. Влияние температуры на магнитные свойства материалов.
21. Процессы, протекающие при контакте между металлом и полупроводником. Применение перехода металл – полупроводник.
22. Магнитные материалы с прямоугольной петлей гистерезиса. Их характеристики, свойства и применение.
23. Селен. Получение, свойства и применение.
24. Термомагнитные сплавы. Магнитострикционные материалы. Их свойства и применение.
25. Органические, аморфные и магнитные полупроводники. Их особенности и применение.
26. Общая характеристика магнитных материалов. Основные свойства магнитных материалов.
27. Сложные полупроводниковые соединения.
28. Классификация магнитомягких материалов. Требования к ним. Основные области применения.
29. Общая характеристика полупроводниковых материалов. Разновидности полупроводников и их основные свойства.
30. Явления намагничивания и перемагничивания. Понятие о потерях в стали.

ЗАДАНИЕ 5

Дайте ответ на следующие вопросы (в соответствии с вариантом):

1. Почему чистое железо не находит применения в технике, а сталь и чугун являются основными материалами современной техники?
2. Чем объясняется, что основным топливом, применяемым в доменной печи, является кокс? Какие ещё виды топлива используются при выплавки чугуна и стали? Какой массовый способ выплавки стали позволяет получить высококачественную сталь?
3. Почему медь и алюминий являются основными проводниковыми материалами? Дайте их сравнительный анализ.
4. Почему в электрических лампах нить накала делается из вольфрама, а в плавких электрических предохранителях используется обычно свинцовая проволока?
5. Какие физические принципы положены в основу магнитной записи и воспроизведения информации? Какие материалы используются для этих целей?
6. В каких условиях возможно появление термо-Э.Д.С. в замкнутой цепи? Назовите основные механизмы, ответственные за возникновение термо-Э.Д.С. В каком случае возникновение термо-Э.Д.С. является вредным явлением?
7. Какие преимущества кремния по сравнению с германием обуславливают его широкое применение при изготовлении планарных транзисторов и интегральных микросхем?
8. Как изменится сопротивление резистора: а) при увеличении его длины в 2 раза; б) при уменьшении площади поперечного сечения провода в 3 раза; в) при одновременном увеличении длины в 4 раза, а диаметр провода в 2 раза?
9. Почему сердечник трансформатора набирают из стальных изолированных пластин?

10. Какие значения удельного сопротивления и температурного коэффициента следует выбирать у материала проводника, применяемого: а) для монтажных проводов; б) для спирали нагревательного прибора; в) для обмотки электродвигателя?
11. Почему магниты не используют для перемещения металлических изделий при их термической обработке, например, извлечение нагретого изделия из печи?
12. Какие диэлектрики называют активными? В чем различие требований к активным и пассивным диэлектрикам?
13. Каковы причины появления магнитных потерь при циклическом перемагничивании ферромагнетиков? Какие способы уменьшения магнитных потерь Вам известны?
14. Зачем верхние концы громоотвода заостряют?
15. Чем вызвано широкое применение пластмасс в технике? Каковы преимущества пластмасс по сравнению с металлами?
16. В чём различие между термопластичными и термореактивными пластмассами? Можно ли бракованное изделие из пластмассы, полученной на основе фенолоформальдегидной смолы, подвергнуть повторной переработке?
17. Назовите основные свойства полупроводниковых материалов.
18. Работа каких полупроводниковых приборов основана на этих свойствах?
19. Какие металлы и сплавы обладают ярко выраженными магнитными свойствами? Какие из них используются для изготовления магнитопроводов электрических аппаратов и машин?
20. От каких факторов зависит величина электропроводности металлических проводников? Почему провода, подводящие ток к электрической плитке, разогреваются намного слабее спирали электроплитки?

21. В чём отличие органических и неорганических диэлектриков по основным свойствам и электрическим параметрам?
22. На чём основаны выпрямительные свойства p-n-перехода?
23. В чём сходство и различие между ситаллом и стеклом? Для каких целей применяются ситаллы?
24. Как с помощью эффекта Холла определить тип электропроводности полупроводника?
25. Какие свойства меди обуславливают ее широкое применение в электронной технике?
26. Какой из двух стержней, изготовленных из одной и той же стали, прочней и почему: имеющий мелкозернистую или крупнозернистую структуру?
27. Какие полимеры используются в качестве высокочастотных диэлектриков и почему?
28. Какими способами можно улучшить физико-механические свойства металлов и сплавов?
29. Какие физические факторы обуславливают нарушения закона Ома в полупроводниках при воздействии на них сильного электрического поля?
30. Как влияют параметры диэлектриков (ϵ , r , $\tan \delta$, E) на массогабаритные показатели электроаппаратуры?

ЗАДАНИЕ 6

Решите задачу (в соответствии с вариантом):

1. Определите объёмный ток в диэлектрике плоского конденсатора при постоянном напряжении 1000 В, если площадь каждой его пластины 50 см², расстояние между ними 0.4 см, а в качестве диэлектрика используется электрофарфор.
2. Определите мощность рассеиваемую в диэлектрике плоского конденсатора при постоянном напряжении 500В, если площадь

каждой его пластины 100 см^2 , а расстояние между ними 5 мм , а в качестве диэлектрика используется стеатит.

3. Два отрезка проволоки длиной по 5 м имеют одинаковые электрическое сопротивление. На сколько отличается по весу отрезок алюминиевой проволоки от медной, если сечение последней 6 мм^2 ?
4. Длина вольфрамовой нити лампы накаливания равна одному метру, её сечение $0,0025 \text{ мм}^2$. Определите сопротивление нити в холодном (20°C) и накаливаемом (3000°C) состояниях.
5. Нихромовая спираль электрической плитки должна иметь сопротивление при комнатной температуре 22 Ом . Сколько метров проволоки нужно взять для изготовления спирали, если площадь поперечного сечения проволоки $0,3 \text{ мм}^2$.
6. Определить длину провода диаметром $d=0,5 \text{ мм}$ для нагревательного элемента при включении его в сеть с напряжением $U=220 \text{ В}$ при токе потребления $I=6,5 \text{ А}$; из: 1) нихрома; 2) константана; 3) фехраля.
7. Определить сопротивление провода, имеющего длину $l=150 \text{ м}$ и диаметр $d=0,2 \text{ мм}$, выполненного из: 1) константана; 2) нихрома; 3) стали.
8. В качестве диэлектрика в конденсаторе применена пропитанная маслом конденсаторная бумага КОН-2 толщиной 10 мкм . Принимая запас прочности равный двукратному, определите рабочее напряжение конденсатора.
9. При нормальных атмосферных условиях электрическая прочность газового промежутка составляет 40 кВ/см . Определите электрическую прочность этого же промежутка при температуре 100°C и давлении 240 кПа .
10. К входным зажимам двухпроводной линии приложено напряжение $U=300 \text{ В}$. Сопротивление потребителя $R=50 \text{ Ом}$, и он находится на расстоянии $l=280 \text{ м}$ от входных зажимов. Определить потерю

напряжения в проводах и мощность нагрузки, если провода выполнены из меди сечением $S=6 \text{ мм}^2$.

11. Определите мощность, рассеиваемую в диэлектрике плоского конденсатора, если площадь каждой его пластины 100 см^2 , расстояние между ними 0.01 см , объёмный ток утечки $2 \times 10^{-9} \text{ А}$, а в качестве диэлектрика взят стеатит.
12. Сопротивление обмотки трансформатора до его включения в сеть при нормальной температуре было равно $2,0 \text{ Ом}$. Определить температуру нагрева его обмотки в процессе работы, если ее сопротивление увеличилось до $2,28 \text{ Ом}$. Обмотка выполнена из медного провода.
13. Определите удельное поверхностное сопротивление в диэлектрике плоского конденсатора со сторонами пластины 1 см и 0.5 см толщиной диэлектрика 3 мм , если к нему приложено напряжение 1000 В , а поверхностный ток утечки $2 \times 10^{-10} \text{ А}$.
14. Найдите потери мощности в кабеле, имеющем ёмкость 10 пФ , если к нему приложено напряжение 300 В частотой 10 кГц , а тангенс угла потерь 4×10^{-4} .
15. Определить необходимую длину нихромового провода диаметром $d=0,1 \text{ мм}$ для изготовления паяльника мощностью $P=80 \text{ Вт}$ на напряжение $U=220 \text{ В}$.
16. Определить толщину воздушного слоя конденсатора емкостью $C=0,001 \text{ мкФ}$ и площадь его пластин, если его номинальное напряжение $U_{\text{ном}}=2 \text{ кВ}$ должно быть в $2,5$ раза меньше напряжения пробоя. Используя при тех же условиях в качестве диэлектрика стекло, определить его толщину и площадь пластин конденсатора.
17. При нагревании сопротивление провода из: 1) стали; 2) фехраля; 3) вольфрама - изменилось на 5% . Определить, до какой температуры был нагрет каждый проводник.

18. На двухпроводной линии из алюминиевого провода сечением $S=4$ мм² и длиной $l=500$ м произошло короткое замыкание. Для определения места аварии к входным зажимам подсоединен мощный источник с напряжением $U=24$ В. Измеренное значение тока при этом $I=5$ А. Определить место аварии.
19. Определить напряженность электрического поля в плоском воздушном конденсаторе, заряженном до напряжения $U=500$ В. Расстояние между пластинами 8 мм. Определить напряжение на конденсаторе, если расстояние между пластинами: а) уменьшить вдвое; б) увеличить до 12 мм.
20. При испытании двигателя постоянного тока измерили сопротивление обмотки якоря до начала работы двигателя при $T=18^{\circ}$ С. Обмотка выполнена из меди, и ее сопротивление $R=0,52$ Ом. По окончании работы сопротивление якоря увеличилось до 0,58 Ом. Определить температуру нагрева якорной обмотки.
21. Определить напряжение, при котором будет пробит образец: 1) из стекла толщиной 0,2 см; 2) из фарфора толщиной 0,1 см; 3) из электроизоляционного картона толщиной 1,5 мм.
22. Определите удельное объёмное сопротивление диэлектрика плоского конденсатора, если площадь каждой его пластины 100 см², а расстояние между ними 4 мм. К конденсатору приложено напряжение 1500 В, объёмный ток утечки 3×10^{-10} А.
23. От источника с э. д. с. $E=250$ В и внутренним сопротивлением $r=3,6$ Ом питается нагрузка через двухпроводную линию из медных проводов сечением $S=10$ мм². Определить сопротивление нагрузки, потребляемую ею мощность, сопротивление проводов и к. п. д. линии, если потребитель удален от источника на $l = 1800$ м и потеря напряжения в линии $\Delta U = 30$ В.
24. Определить толщину слоя электрокартона между пластинами плоского конденсатора, рассчитанного на номинальное напряжение

$U_{ном}=1000\text{В}$. Конденсатор должен иметь двукратный запас прочности по напряжению.

25. Между двумя металлическими обкладками, заряженными до напряжения $U=150\text{ В}$, находится пластина из эбонита. Как изменится напряжение между обкладками, если пластину из эбонита заменить пластиной из слюды той же толщины?
26. Обмотка трансформатора, изготовленная из медного провода при 15°С имела сопротивление 2 Ом . При работе сопротивление её стало равным $2,48\text{ Ом}$. Определите температуру обмотки в рабочем состоянии.
27. Рассчитайте активные потери в диэлектрике конденсатора ёмкостью 100 пФ , с сопротивлением 1010 Ом и тангенсом угла потерь 5% , через который протекает ток утечки $2 \times 10^{-9}\text{ А}$ промышленной частоты.
28. Определите тангенс угла потерь диэлектрика конденсатора ёмкостью 40 пФ , к которому приложено напряжение 10 кВ частотой 400 Гц , а потери мощности составляют 1 мВт .
29. Найдите напряжение пробоя газового промежутка при температуре 200°С и давлении 300 кПа , если при нормальных условиях его электрическая прочность составляет 60 кВ/см . Толщина газового промежутка равна $2,5\text{ см}$.
30. Определите электрическую прочность диэлектрика толщиной 2 мм , используемого в конденсаторе с рабочим напряжением 4000 В и пятикратном запасом прочности.

ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ К ЭКЗАМЕНУ

1. Классификация электротехнических материалов.
2. Кристаллическое строение металлов. Виды кристаллических решёток, дефекты их строения.
3. Свойства металлов.
4. Классификация сплавов, их свойства. Диаграммы состояния сплавов.
5. Структурные составляющие железоуглеродистых сплавов. Деление железоуглеродистых сплавов на стали и чугуны.
6. Влияние примесей на свойства сталей и чугунов.
7. Углеродистые и легированные стали. Их свойства и применение.
8. Чугун, его свойства, виды и области применения.
9. Термическая обработка металлов, её виды и назначение.
10. Химико-термическая обработка стали, её виды и назначение.
11. Коррозия металлов. Виды коррозии и способы борьбы с ней.
12. Проводимость твёрдых тел. Энергетические диаграммы.
13. Электропроводность металлов. Температурная зависимость удельного сопротивления металлических проводников.
14. Контактные явления. Сплавы для термопар.
15. Классификация проводниковых материалов.
16. Медь, её свойства и применение в электротехнике.
17. Алюминий, его свойства и применение в электротехнике.
18. Материалы для контактов.
19. Благородные металлы и их применение.
20. Тугоплавкие металлы и их применение.
21. Сверхпроводники и криопроводники.
22. Припой и флюсы.
23. Материалы высокого электрического сопротивления.
24. Неметаллические проводниковые материалы.
25. Поляризация диэлектриков. Виды поляризации.
26. Понятие диэлектрической проницаемости.

27. Проводимость диэлектриков. Её зависимость от внешних факторов, структуры и параметров диэлектриков.
28. Потери в диэлектриках. Понятие тангенса угла диэлектрических потерь.
29. Электрическая прочность. Понятие электрического пробоя и его виды.
30. Пробой диэлектриков в однородном и неоднородном поле.
31. Механические и тепловые характеристики диэлектриков.
32. Физико-химические характеристики диэлектриков.
33. Газообразные диэлектрики. Основные электрические характеристики. Пробой газов.
34. Газообразные диэлектрики и их применение в электрических устройствах.
35. Электропроводность и пробой жидких диэлектриков.
36. Виды жидких диэлектриков и их применение.
37. Полимеры. Классификация и основные свойства полимеров.
38. Термопластичные полимеры (полиэтилен, полистирол, фторопласт).
39. Полимеры, получаемые поликонденсацией.
40. Пластмассы. Состав, основные свойства.
41. Слоистые пластики, состав и применение.
42. Резины. Получение, состав и применение.
43. Лаки. Состав и классификация. Область применения. Эмали.
44. Компаунды. Состав, классификация и назначение.
45. Волокнистые материалы, применяемые в электротехнике.
46. Изоляционные материалы на основе слюды. Области применения.
47. Стекло. Состав, основные характеристики. Применение в электротехнике.
48. Керамика. Основные свойства, области применения.
49. Активные диэлектрики (сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, пироэлектрики). Основные характеристики, применение.

50. Жидкие кристаллы. Явления в жидких кристаллах, их применение.
51. Обмоточные провода, их виды. Типы изоляции.
52. Установочные и монтажные провода. Типы изоляции.
53. Силовые кабели.
54. Полупроводниковые материалы, их основные свойства.
55. Собственные и примесные полупроводники.
56. Получение и свойства р-n-перехода.
57. Явления в полупроводниках (оптические, фотоэлектрические, термоэлектрические).
58. Элементарные полупроводники (германий, кремний, селен).
Свойства, применение.
59. Сложные полупроводниковые соединения. Свойства, применение.
60. Основные характеристики магнитных материалов.
61. Диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики.
62. Магнитомягкие материалы, классификация основные свойства и применение.
63. Магнитотвердые материалы, их классификация основные свойства и применение.
64. Магнитные материалы специального назначения.

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ

Закон Ома для участка цепи: ток, проходящий по участку цепи, прямо пропорционален напряжению U , приложенному к этому участку, и обратно пропорционален его сопротивлению R ,

$$I=U/R \quad (1.1)$$

где U — в вольтах (В); R — в омах (Ом).

Закон Ома для всей цепи

$$I=E/(R+r) \quad (1.2)$$

где E — электродвижущая сила источника электрической энергии, В; R — сопротивление внешней цепи, Ом; r — внутреннее сопротивление источника, Ом.

Сопротивление провода

$$R = \rho l/S \quad (1.3)$$

где ρ - удельное сопротивление, Ом·мм²/м; l - длина проводника, м; S — площадь его поперечного сечения, мм².

Сопротивление проводника зависит от температуры:

$$R_2=R_1[1+\alpha(T_2-T_1)] \quad (1.7)$$

где R_1 — сопротивление проводника при температуре T_1 , Ом; R_2 — сопротивление проводника при температуре T_2 , Ом; α - температурный коэффициент сопротивления, численно равный приращению сопротивления при нагревании проводника на 1°С.

Мощность, потребляемая нагрузкой

$$P=UI=RI^2=U^2/R \quad (1.4)$$

где P выражена в ваттах (Вт).

Мощность, развиваемая источником или генератором

$$P_{\Gamma} = EI \quad (1.5)$$

Потеря напряжения в проводах линии электропередачи

Разность напряжений в начале и конце линии U_1-U_2 , равная падению напряжения в линии, называют потерей напряжения:

$$\Delta U=U_1-U_2=IR_{\text{пр}}, \quad (1.6)$$

где $R_{\text{пр}}$ - сопротивление проводов в линии $R = \rho 2l/S$ (l - длина одного провода двухпроводной линии, м; S - сечение провода, мм²). Мощность потерь в линии (выражают в Вт).

Напряженность поля, при которой происходит пробой диэлектрика, называют электрической прочностью диэлектрика $E_{\text{пр}}$, а напряжение при пробое – пробивным напряжением $U_{\text{пр}}$, причем

$$E_{\text{пр}} = U_{\text{пр}}/h \quad (1.7)$$

где h — толщина диэлектрика.

Емкость конденсатора зависит от геометрических размеров, формы, взаимного расположения и расстояния между обкладками, а также от свойств диэлектрика. Емкость плоского конденсатора

$$C = \epsilon_0 \epsilon S / h \quad (1.8)$$

где S — площадь пластины, м²; h — расстояние между пластинами, м.

Напряженность электрического поля плоского конденсатора

$$E = U/h \quad (1.9)$$

где U — напряжение, приложенное к зажимам конденсатора, В.

Удельное объёмное ρ_v сопротивление

$$\rho_v = R_v S / h ,$$

где R_v – объёмное сопротивление диэлектрика, Ом; S - площадь пластины, м²

h - толщина диэлектрика, м

Удельное поверхностное ρ_s сопротивление

$$\rho_s = R_s p / h ,$$

где R_s – поверхностное сопротивление, Ом; p – периметр пластины, между которыми находится диэлектрик, м; h - толщина диэлектрика, м.

СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ

Удельное электрическое сопротивление металлов, применяемых в электротехнике (при $t = 20^{\circ}\text{C}$)

Металл	ρ , мкОм*м	Металл	ρ , мкОм*м
Алюминий	0,028	Олово	0,12
Висмут ($t=0^{\circ}\text{C}$)	1,065	Платина	0,105
Вольфрам	0,055	Рений	0,21
Жезело	0,098	Ртуть	0,958
Золото	0,024	Свинец	0,205
Индий	0,09	Серебро	0,016
Кадмий	0,076	Тантал	0,135
Кобальт	0,062	Титан	0,42
Медь	0,0172	Хром	0,14
Молибден	0,057	Цинк	0,059
Никель	0,973	Цирконий	0,41
Ниобий	0,18		

Температурный коэффициент удельного электрического сопротивления металлов и сплавов.

В таблице приведены средние значения температурного коэффициента удельного электрического сопротивления $\alpha\rho$ в интервале температур от 0 до 100°C для некоторых металлов и сплавов.

Металл и сплав	$\alpha\rho$, $^{\circ}\text{C}^{-1}$	Металл и сплав	$\alpha\rho$, $^{\circ}\text{C}^{-1}$
Аллюмий	0,0042	Нихром	0,0001
Висмут	0,0046	Олово	0,0044
Железо	0,0060	Осмий	0,0042
Золото	0,0040	Платина	0,039

Металл и сплав	$\alpha_p, ^\circ\text{C}^{-1}$ 1	Металл и сплав	$\alpha_p, ^\circ\text{C}^{-1}$
Индий	0,0047	Платинит	0,003
Кадмий	0,0042	Платиноиридиевый сплав	0,0013
Кобальт	0,0060	Ртуть	0,0010
Константан	- 0,00005	Свинец	0,0037
Магний	0,0039	Серебро	0,0040
Манганин	0,0000 1	Сплав Вуда	0,0037
Марганец	0,0002- 0,0003	Сталь(0,10-0,15% С)	0,006
Медь	0,0043	Тантал	0,0038
Молибден	0,0043	Титан	0,0044
Натрий	0,0055	Фехраль	0,00010- 0,00012
Нейзильбер	0,0003	Хром	0,0059
Никелин	0,001	Хромаль	0,00006 5
Никель	0,0065	Цинк	0,0042
Ниобий	0,003	Цирконий	0,0045
Вольфрам	0,0048	Чугун	0,0010

Удельное электрическое сопротивление ρ некоторых металлов, сплавов и материалов (при $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Вещество	ρ, мкОм·м	Вещество	ρ, мкОм·м
Альсифер	0,81	Нейзильбер МНЦ-15-20	0,30-0,45
Графит (при $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$)	3,5-63,0	Никелин	0,39-0,45
Дуралюмин	0,033	Нихром Х20Н80	1,0-1,1
Инвар	0,81	Осмий	0,095
Иридий	0,053	Платанит	0,45
Калий	0,071	Платиноиридиевый сплав ($t=0$)	0,25
Константан МНМЦ-40-1,5	0,48-0,52	Сплав Вуда	0,52
Латунь Л-68	0,071	Сталь (0,10-0,15% С)	0,10-0,14
Магний	0,045	Уран (при $t=25\text{ }^{\circ}\text{C}$)	0,30
Манганин МНМЦ-3-12	0,42-0,48	Фехраль Х13Ю4	1,2-1,3
Марганец	1,5-2,6	Хромаль Х25Ю5	1,3-1,5
Натрий	0,049	Чугун	0,52-0,80

Удельное электрическое сопротивление ρ твердых диэлектриков
(при $t=20^{\circ}\text{C}$)

Диэлектрик	ρ , Ом·м	Диэлектрик	ρ , Ом·м
Алмаз	10^{10} - 10^{11}	Полиэтилен	10^{13} - 10^{15}
Берёза сухая	10^8	Резина электроизоляционная	10^{13}
Бумага	10^{10}	Слюда	10^{11} - 10^{15}
Воск пчелиный	$2 \cdot 10^{13}$	Стекло	10^9 - 10^{13}
Гетинакс	10^9 - 10^{12}	Текстолит	10^8
Дуб сухой	10^{10}	Фарфор	10^{10} - 10^{13}
Канифоль	10^{12} - 10^{13}	Фибра	10^8
Капрон	10^8 - 10^9	Фторопласт-4	10^{16} - 10^{17}
Лавсан	10^{14} - 10^{16}	Церазин	10^{13} - 10^{15}
Мрамор	10^5 - 10^6	Шифер	$4 \cdot 10^5$
Органическое стекло	10^{11} - 10^{13}	Эбонит	10^{12} - 10^{14}
Парафин	10^{14}	Эпоксидные смолы	10^{12} - 10^{13}
Полистирол	10^{13} - 10^{15}	Янтарь	10^{15} - 10^{17}
Полихлорвинил	10^{10} - 10^{12}		

ЗАМЕЧАНИЯ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ

[illegible]

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования**
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Методические указания

по организации лабораторных работ обучающихся
по дисциплине «Электротехническое и конструкционное
материаловедение» для студентов направления подготовки /специальности
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
Направленность (профиль) Цифровые технологии в электроэнергетике

Ставрополь
2026

Содержание

Лабораторная работа №1 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ... ..	6
Лабораторная работа №2 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ	29
Лабораторная работа №3 ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ	48
Лабораторная работа №4 ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО И ОБЪЕМНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ	88
Лабораторная работа №5 ПРОБОЙ ГАЗОВ В ОДНОРОДНОМ И НЕОДНОРОДНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ. ВЛИЯНИЕ БАРЬЕРОВ...	99
Лабораторная работа №6 УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ПРОВОДНИКОВ... ..	113

Предисловие

Целью дисциплины «Электротехническое и конструкционное материаловедение» является формирование согласно ООП ВПО набора профессиональных компетенций будущего бакалавра по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника. Дисциплина относится к базовой части профессионального цикла ООП ВПО и предполагает знание студентами следующих дисциплин: «Высшая математика», «Физика», «Теоретические основы электротехники». В результате изучения дисциплины у студента формируются указанные выше компетенции, приобретаются знания по строению и свойствам вещества, а также его взаимодействию с электрическими и магнитными полями, появляются навыки практического применения теоретических знаний для исследования свойств электротехнических материалов.

Учебно-тематический план дисциплины

№ п/п	Раздел дисциплины	семестр	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость в зач.ед. (часах)				Формы текущего контроля успеваемости (по разделам дисциплины) Форма промежуточной аттестации (по триместрам)
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	СРС	
	Раздел 1. Основы материаловедения	7	0,28 (10)	0,11 (4)	0	0,44 (16)	тестирование
1	Тема 1. Основы строения вещества. Строение полимеров	7	2	0	0	4	
2	Тема 2. Фазово-структурный состав сплавов	7	2	2	0	2	
3	Тема 3. Строение и свойства железоуглеродистых сплавов	7	2	0	0	0	
4	Тема 4. Механические свойства материалов. Понятие о термической обработке сталей	7	2	2	0	6	
5	Тема 5. Строение и свойства конструкционных материалов	7	2	0	0	4	
	Раздел 2. Электротехническое материаловедение	7	0,67 (24)	0,36 (13)	0,47 (17)	1,67 (60)	устный опрос
6	Тема 6. Проводники. Основные физические свойства.	7	2	0	0	5	
7	Тема 7. Классификация и свойства проводниковых материалов	7	2	2	0	6	
8	Тема 8. Новые проводниковые и сверхпроводниковые материалы	7	2	2	0	6	
9	Тема 9. Магнитные материалы	7	2	0	8	4	
10	Тема 10. Диэлектрики в электрическом поле.	7	6	4	4	14	
11	Тема 11. Классификация и свойства диэлектрических материалов	7	4	4	5	14	
12	Тема 12. Перспективные диэлектрические материалы. Композиционные материалы	7	2	0	0	4	
13	Тема 13. Тепловые и физико-химические свойства электротехнических материалов	7	2	1	0	6	
14	Тема 14. Технология обработки электротехнических и конструкционных материалов	7	2	0	0	1	
	Диф. зачет						накопительный
	ИТОГО:		0,94 (34)	0,47 (17)	0,47 (17)	2,11 (76)	

Лабораторная работа №1
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ЖИДКИХ
ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: ознакомиться с основными представлениями о пробое и методикой экспериментального определения электрической прочности жидких диэлектриков

1. Теоретическое обоснование

Пробой диэлектриков происходит в сильных электрических полях и связан с образованием проводящего канала в диэлектрике. Напряжённость поля, при которой диэлектрик теряет свои электроизоляционные свойства, называется пробивной напряжённостью, или электрической прочностью $E_{пр}$. Различают пробой в однородном и неоднородном поле. Приблизительно однородное поле обеспечивается для сферических электродов, если радиус сферы много больше длины зарядного промежутка (толщины диэлектрика).

В случае однородного электрического поля электрическая прочность диэлектрика рассчитывается по формуле

$$E_{пр} = U_{пр} / d, \quad (1.1)$$

где $U_{пр}$ – пробивное напряжение; d – толщина диэлектрика.

В условиях эксплуатации важно знать, какое напряжение способно выдержать то или иное электрическое изделие. Напряжение, приложенное к электрической изоляции изделия, должно быть значительно ниже той величины, при которой наступает электрический пробой. Минимальное напряжение, при котором происходит пробой, называется пробивным напряжением $U_{пр}$. Основной же характеристикой материала служит пробивная напряжённость (или электрическая прочность) $E_{пр}$, определяемая из соотношения (1.1).

Величина электрической прочности характеризует качество диэлектрика и зависит от его свойств. Однако $E_{пр}$ значительно зависит от условий испытания, от толщины диэлектрика, рода тока, скорости подъёма напряжения, формы электродов, температуры, атмосферного давления и прочих условий. Для того чтобы при

испытаниях получались воспроизводимые величины $E_{пр}$ для каждого материала, необходимо проводить опыты с соблюдением ряда требований, которые регламентируются ГОСТ 6581-75.

На электрическую прочность изоляционных материалов значительное влияние оказывает их неоднородность. Неоднородность диэлектрика вызывает искажение электрического поля, в котором расположен данный диэлектрик.

Предположим сначала, что макроскопически неоднородный диэлектрик находится в переменном электрическом поле и что проводимостью и диэлектрическими потерями его можно пренебречь, то есть $\sigma = \infty$ и $\operatorname{tg} \delta$.

При этих допущениях единственным параметром диэлектрического материала, который может оказывать влияние на распределение напряжённости электрического поля по его объёму, является относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r .

При макроскопически однородном по всему объёму диэлектрике напряжённость электрического поля в каждой точке диэлектрика вообще не зависит от ϵ_r диэлектрического материала. Так, в случае плоского конденсатора напряжённость поля определяется по формуле (1.2) для всех точек диэлектрика между обкладками, и поле является равномерным.

$$E = U/d, \quad (1.2)$$

где U – напряжение между обкладками, В; d – толщина диэлектрика, м.

Трансформаторное масло получают из нефти путем ее ступенчатой перегонки с выделением и последующей переработкой первой масляной фракции. Это слабвязкая, практически нейтральная жидкость желтого цвета, по химическому составу представляющая собой смесь различных углеводородов, преимущественно предельных.

Трансформаторное масло используют для заливки трансформаторов, выключателей, высоковольтных вводов, где оно обеспечивает более высокую электрическую прочность промежутков между токоведущими частями по сравнению с воздушной изоляцией, а также служит теплоносителем для охлаждения нагреваемых частей. Наиболее важной электрической характеристикой масла

является электрическая прочность. В технически чистых диэлектриках решающее влияние на электрическую прочность масла оказывают примеси: пузырьки газа, коллоидные частицы, капельки воды, твердые примеси. Газовые пузырьки имеют меньшую электрическую прочность, поэтому ионизация в них начинается при сравнительно небольших напряжениях, происходит рост пузырьков и пробой по ним. Жидкие и твердые примеси под действием сил электрического поля скапливаются в местах с наиболее высокой напряженностью поля, искажают поле и снижают пробивное напряжение. Поскольку при этом пробой определяется в основном тепловыми процессами, на переменном напряжении пробивным напряжением считают действующее значение напряжения.

Электрическая прочность трансформаторного масла с увеличением расстояния между электродами снижается, как и у воздуха. Также понижается электрическая прочность и с увеличением степени неоднородности электрического поля.

Каждая партия трансформаторного масла перед заливкой в оборудование подвергается испытаниям по показателям, приведенным в таблице 1.1, кроме пункта 3. После монтажа оборудования перед его включением под напряжение из него отбирается проба масла и подвергается сокращенному анализу в объеме, предусмотренном пунктами 1–6 таблицы 1.1, а для оборудования 110 кВ и выше, кроме того, – по пункту 10 таблицы 1.1.

При измерении пробивного напряжения приходится учитывать статистический характер пробоя масла, при котором по одному измерению невозможно сказать, каким будет следующее значение пробивного напряжения, то есть невозможно предсказать поведение масла в оборудовании. В таких ситуациях отыскивают и измеряют более стабильные характеристики, которые сохраняют свои значения в будущем. К таким характеристикам относится математическое ожидание стационарной случайной величины. Стационарной называют как раз такую случайную величину, которая и сохраняет во времени характер своей случайности, в частности, сохраняет во времени математическое ожидание, которое является серединой, средним значением при очень большом числе измерений.

Таблица 1.1 – Предельно допустимые величины показателей качества трансформаторного масла

Показатели качества	Свежее сухое масло перед заливкой	Масло после заливки в оборудование	Масло в процессе эксплуатации
1. Среднее значение пробивного напряжения масла в стандартном сосуде, кВ, не менее:			
в оборудовании напряжением до 15 кВ	30	25	20
выше 15 до 35 кВ	35	30	25
от 60 до 220 кВ	45	40	35
от 330 до 500 кВ	55	50	45
2. Содержание механических примесей	отсутствие (визуально)	отсутствие (визуально)	отсутствие (визуально)
3. Содержание взвешенного угля			
в трансформаторах	—	—	—
в выключателях	—	—	незначительное
4. Кислотное число, мг КОН, не более	0.02	0.02	0.02
5. Реакция водной вытяжки	нейтральная	нейтральная	нейтральная
6. Температура вспышки, °С, не ниже	135	135	130
7. Вязкость кинематическая, мм ² /с,			
не более при 20°С	28	23-28	-
при 50°С	9.0	8-9	-
8. Температура застыв., °С, не выше	минус 45	-	-
9. Прозрачность при +5°С	прозрач.	прозрач.	прозрач.
10. tg δ при напряженности электрического поля 1 кВ/мм, % при 20°С	0.2	0.4	2
при 70°С	1.5	2.0	7

Реально можно говорить только о некотором приближении к измерению математического ожидания путем вычисления среднего значения случайной величины по ряду ее измерений.

2 Аппаратура, оборудование и материалы

Лабораторная установка создана на базе аппарата АИМ-90Ц (рисунок. 1.1), объектом исследований являются различные образцы жидких диэлектриков.



Рисунок 1.1 – Общий вид аппарата АИМ-90Ц: 1 – крышка; 2 – барьер; 3 – ячейка измерительная; 4 – панель лицевая ручка.

2.1 Устройство и работа лабораторной установки

Конструктивно аппарат (рисунок 1.1) выполнен в виде единого переносного блока и включает в себя следующие основные элементы:

- устройство генераторное;
- блок управления;
- панель лицевая;

- ячейка измерительная;
- изоляционный барьер.

Трансформатор генераторного устройства заполнен трансформаторным маслом, уровень которого находится на 10 мм ниже панели (крышки генератора). Герметизация осуществляется с помощью резиновой прокладки.

Высокое напряжение от трансформатора выводится посредством специальных изоляторов, которые служат одновременно опорой для установки на них ячейки измерительной.

Зона аппарата, где устанавливается ячейка, имеет крышку. Крышка в закрытом положении разрешает включение высокого напряжения, а в открытом положении запрещает включение высокого напряжения.

Для дополнительной защиты от электрического пробоя с высоковольтных выводов устройства генераторного на гетинаксовую панель устанавливается изоляционный барьер, использующийся также для сбора масла.

2.2 Краткое описание работы аппарата.

Сетевое электропитание через кабель и предохранители FU1, FU2 подается на сетевой выключатель SB1 и контакты реле. При включении сетевого выключателя срабатывает реле и на преобразователь, на плату коммутации и на автотрансформатор вариатора подается напряжение электропитания 220 В. С преобразователя напряжение 12 В поступает на плату управления. На плате расположены элементы, обеспечивающие включение и отключение высокого напряжения, а также регулирование амплитуды высокого напряжения и обеспечение режимов калибровки аппарата.

При включении высокого напряжения через твердотельное реле, коммутационные реле и разъем платы напряжение от 0 до 250 В с вариатора, управляемого шаговым электродвигателем, подается на высоковольтный трансформатор генераторного устройства.

Микропереключатель определяет нулевое положение подвижного контакта

автотрансформатора. С помощью трансформатора высоковольтного на выходе генератора, на электродах ячейки измерительной происходит повышение испытательного напряжения до 90 кВ.

На панели лицевой расположена плата индикации, на которой расположены органы управления режимами аппарата. На панели информационной в цифровом и буквенном виде отображаются результаты проводимых испытаний, а также техническая информация о калибровочных параметрах и режимах работы аппарата.

Аппарат может комплектоваться принтером, подключаемым с помощью кабеля к разъему на задней панели аппарата. Питание принтера осуществляется от автономного блока питания, входящего в комплект принтера.

2.3 Программное обеспечение аппарата

Аппарат обеспечивает задание следующих режимов:

1. Испытание жидкого диэлектрика по ГОСТ 6581-75.
2. Испытание по запрограммированному режиму (до трех) с индивидуальными настройками.
3. Определение «гарантированной электрической прочности» жидкого диэлектрика. В ходе этого испытания в течение 1 минуты на электроды ячейки подается заданное испытательное напряжение.

Виды режимов испытания:

- автоматический режим (основной);
- ручной режим (дополнительный);

В автоматическом режиме задаются:

- скорость нарастания напряжения $(0,5 \pm 0,2)$, $(1,0 \pm 0,4)$, $(2,0 \pm 0,4)$, $(3,0 \pm 0,5)$, $(4,0 \pm 0,5)$, $(5,0 \pm 0,5)$ кВ/с;
- величина выходного напряжения в диапазоне от 2 до 90 кВ с шагом задания 1 кВ;
- величина защиты от превышения напряжения в диапазоне от 2 до 92 кВ с шагом задания 1 кВ;

– время интервала между последовательными пробоями масла в диапазоне от 1 с до 9 мин 59 с с шагом 1 с;

– количество пробоев жидкого диэлектрика в одном испытании от 1 до 9 .

Результат каждого пробоя выводится на дисплей аппарата. Это позволяет просмотреть результат каждого промежуточного пробоя жидкого диэлектрика, полученного в результате испытания.

Аппарат имеет счетчик общего количества пробоев.

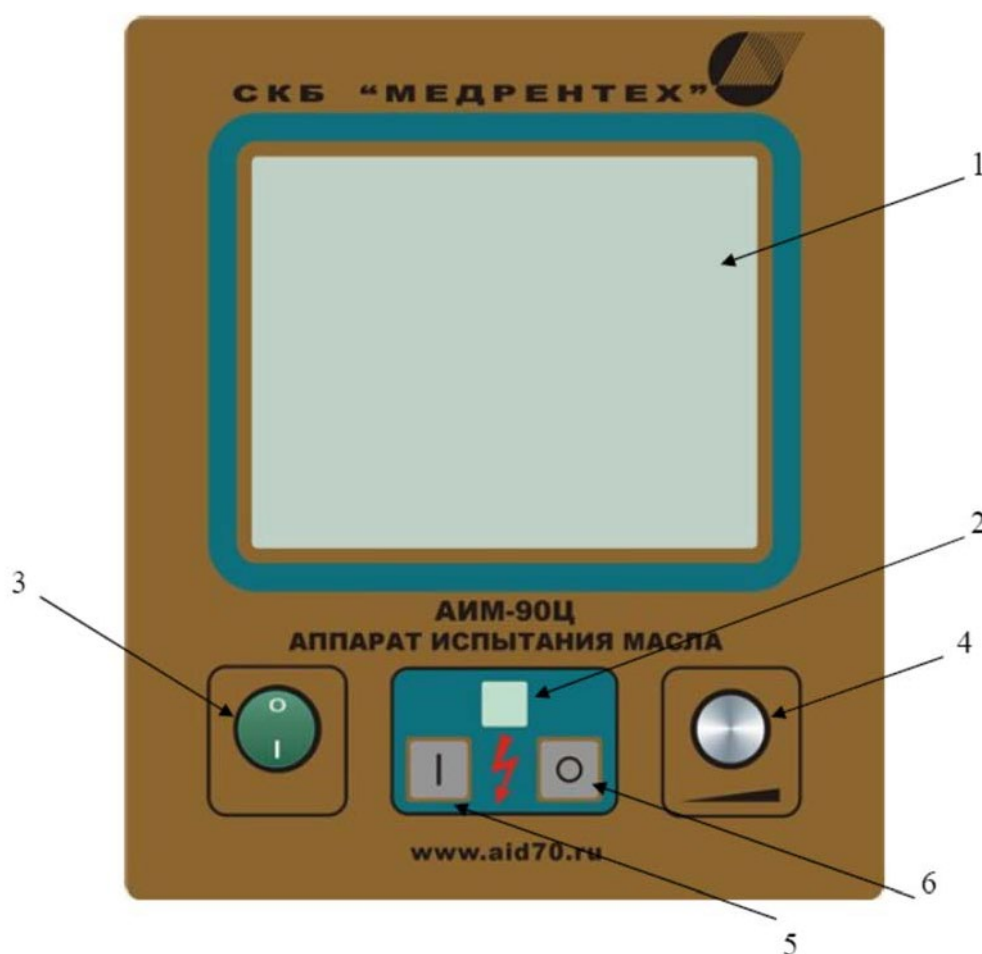


Рисунок 1.2 – Панель лицевая пульта управления аппарата «АИМ-90Ц»

На рисунке 1.2 приняты следующие обозначения: 1 – жидкокристаллический индикатор (дисплей); 2 – индикатор включения высокого напряжения; 3 – сетевой выключатель; 4 – ручка регулятора высокого напряжения и управления меню (Энкодер); 5 – кнопка включения высокого напряжения; 6 – кнопка выключения высокого напряжения.

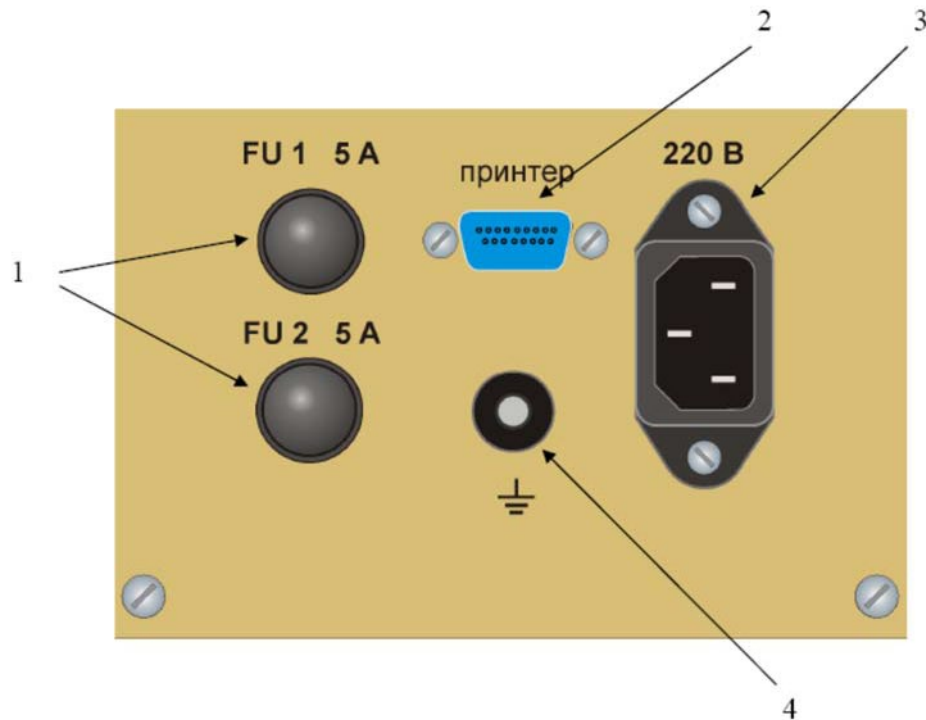


Рисунок 1.3 – Задняя панель аппарата «АИМ-90Ц»

На рисунке 1.3 приняты следующие обозначения: 1 – предохранители электропитания; 2 – разъем для подключения принтера и компьютера; 3 – вилка подключения кабеля сетевого; 4 – клемма подключения провода заземления.

2.4 Подготовка аппарата к использованию

Меры безопасности при подготовке аппарата к работе.

К работе в электроустановках высоковольтной техники допускаются лица не моложе 18 лет, имеющие профессиональную подготовку, соответствующую характеру работы.

К работам по монтажу аппарата допускается персонал, изучивший паспорт, настоящий документ и прошедший инструктаж по технике безопасности в соответствии с ГОСТ 12.0.004-91.

Работу с аппаратом может производить работник, имеющий квалификационную группу по технике безопасности не ниже III для работы с напряжением свыше 1000

В, единолично, в порядке текущей эксплуатации с использованием типовых методик испытаний.

Установку и выемку ячейки с диэлектриком для большей безопасности следует производить после выключения сетевого выключателя аппарата.

Работу на аппарате производить, стоя на резиновом коврике и в диэлектрических перчатках.

Аппарат надежно заземлить при помощи провода заземления (ПЩ-4,0 мм²), прилагаемого к аппарату.

Рабочее место персонала должно соответствовать требованиям пожарной безопасности по ГОСТ 12.1.004-91.

Запрещается включать высокое напряжение:

– если не установлены в аппарате изоляционный барьер и ячейка с жидким диэлектриком;

– если в аппарате неисправна сигнализация и блокировка.

– **ВНИМАНИЕ! Эксплуатация аппарата без заземления запрещена!**

Аппарат не должен иметь внешних повреждений корпуса. При загрязнении необходимо протереть сухой мягкой ветошью или смоченной спиртом панель (крышку) генераторного устройства, изоляторы, барьер и ячейку.

Подготовка измерительной ячейки.

При применении новой измерительной ячейки или после длительного ее хранения, при изменении типа испытываемой жидкости или после испытания сильно загрязненной жидкости ячейку следует обработать растворителями. Для промывки ячейки, заполненной нефтяным изоляционным маслом, применяют последовательно керосин по ТУ 0251-005-2271028-2004 и петролейный эфир по ТУ 6-02-1244-83 с пределами кипения 80-120 °С; ячейки, заполненные хлорированным или фторированным углеводородами, а также кремнийорганическими жидкостями – последовательно толуол по ГОСТ 9880-76, трихлорбензол или ацетон; ячейки, заполненной касторовым маслом, – ацетон по ГОСТ 2603-79. При применении легкокипящих растворителей, в результате быстрого испарения последних,

электроды могут охладиться, и на их поверхности возможна конденсация влаги. В таких случаях ячейку следует слегка нагреть.

Для периодической очистки поверхности электродов следует применять полировочные составы, следы которых после окончания полировки необходимо тщательно удалить, промывая указанными растворителями.

В тех случаях, когда визуально обнаружено потемнение поверхности электродов, эти электроды должны быть предварительно демонтированы, отполированы замшей, промыты растворителем и вновь смонтированы. После указанной выше обработки, ячейку ополаскивают испытываемой жидкостью и затем заполняют порцией жидкости, предназначенной для испытания. В тех случаях, когда ежедневно проводят контрольные, приемо-сдаточные и другие испытания жидкого электроизоляционного материала, а значения пробивного напряжения жидкости не ниже установленных норм, обработка испытательной ячейки сводится к ее ополаскиванию испытываемой жидкостью. В нерабочем состоянии измерительную ячейку необходимо хранить заполненной жидким материалом. При этом пробивное напряжение такой жидкости должно быть в пределах норм на этот показатель для данного типа жидкости.

Проверить зазор между электродами ячейки. Величина зазора должна быть $2,5 \pm 0,05$ мм. Если рабочая поверхность шаблон-калибра «ПР» свободно проходит в зазоре, а рабочая поверхность «НЕ» не проходит, то зазор установлен правильно. В противном случае необходимо отрегулировать зазор и проверить. Рабочие поверхности шаблон-калибра должны быть чистыми и ровными без забоин и вмятин.

После каждой проверки шаблон-калибр смазать консервационной смазкой типа АМС ГОСТ 2712-75, обернуть водонепроницаемой бумагой и уложить в упаковку для запчастей и инструмента.

Подготовка пробы жидкого диэлектрика.

За **пробу** принимают объем жидкого электроизоляционного материала одновременно отобраный в один сосуд. **Порцией** жидкого материала считают часть пробы, которую заливают в измерительную ячейку.

Пробивное напряжение жидких электроизоляционных материалов определяется при температуре 15-35°C, не отличающейся от температуры помещения.

Перед испытанием плотно закрытый сосуд с пробой жидкости должен быть выдержан в помещении, в котором будут проводиться испытания до приобретения жидкостью температуры помещения, но не менее 30 мин. При этом сосуд с жидкостью должен быть защищен от воздействия дневного света.

Сосуд с пробой жидкого материала несколько раз осторожно переворачивают вверх дном с тем, чтобы содержащиеся в пробе случайные загрязнения равномерно распределились по всему объему жидкости. При этом избегают интенсивного встряхивания, во избежание попадания в жидкость пузырьков воздуха. Непосредственно после этого небольшим количеством жидкости ополаскивают ячейку, следя за тем, чтобы струя жидкости стекала по ее стенке, и не образовывалось пузырьков воздуха.

При наличии в жидкости пузырьков воздуха их следует удалить осторожным перемешиванием жидкости стеклянной палочкой.

Через 10 минут после заполнения ячейки на образец подают испытательное напряжение и фиксируют величину пробивного напряжения.

При одном заполнении ячейки жидким электроизоляционным материалом по ГОСТ 6581-75 осуществляют шесть последовательных пробоев с интервалами между каждым из них, равным 5 мин. После каждого пробоя при помощи стеклянной палочки жидкость между электродами осторожно перемешивают для удаления продуктов разложения из межэлектродного пространства, не допуская при этом образования воздушных пузырьков.

При испытании при комнатной температуре жидких материалов с вязкостью более 50 сСт при 20 °С, когда удаление твердых продуктов разложения из межэлектродного пространства после пробоя затруднено; каждый последующий пробой осуществляют в отдельной порции жидкости, взятой из одной и той же пробы. Перед испытанием вязкая жидкость в закрытом сосуде должна принять температуру помещения (или прогрета в том же сосуде до температуры не выше 40°C, если при температуре помещения вязкость жидкости настолько велика, что ее перемешать

нельзя) и после этого должна быть перемешана путем 30-минутной выдержки сосуда с пробой в положении «пробкой вниз». Непосредственно перед заполнением ячейки сосуд возвращают в обычное положение. Жидкость, предварительно прогретая для ее перемешивания, перед определением должна быть охлаждена в ячейке до температуры окружающего воздуха или дополнительно нагрета до той температуры испытания, которая указана в стандарте на данный жидкий электроизоляционный материал.

При испытании нагретой жидкости, вязкость которой при температуре испытания менее 50 сСт, допускается проводить все шесть пробоев в одной порции жидкости.

При проведении испытаний при повышенной температуре продолжительность нагревания ячейки с жидкостью до температуры испытания должна быть указана в стандарте на испытуемый материал.

Температура жидкости при испытании должна поддерживаться с погрешностью ± 2 °С.

2.5 Порядок работы с аппаратом

Главное меню аппарата.

Включить питание аппарата сетевым выключателем. На дисплее лицевой панели аппарата появится заставка со следующей информацией:

- наименование предприятия-изготовителя аппарата;
- номера контактных телефонов;
- номер версии программного обеспечения аппарата.

Далее через 5 с на дисплее отобразится информация об исходном режиме испытания, что соответствует готовности аппарата к работе (рисунок 1.4):

	ПЕРВ	$\bar{U}_{np} = \text{---}$	
	1 ----		
	2 ----		
	3 ----		
	4 ----		
	5 ----		
	6 ----		
ГОСТ 6581-75		$\sigma_u = \text{---}$	
		$V = \text{---}\%$	
0.0 kV			5:00
№ 00055			

Рисунок 1.4 – Исходный режим аппарата: первичное испытание; среднее арифметическое значение; средняя квадратическая ошибка; коэффициент вариации; продолжительность интервала между последовательными пробоями; исходный режим испытаний по ГОСТ 6581-75; цифровые показания испытательного напряжения; счетчик количества пробоев.

Войти в главное «МЕНЮ» программы управления аппаратом. Для входа в главное «МЕНЮ» нажать на ручку энкодера 4 (рисунок 1.2).

Основные пункты главного «МЕНЮ» (рисунок 1.5):

ВОЗВРАТ – выход из «МЕНЮ» или подпункта меню;

ВЫЗОВ – с помощью этой команды вызываются режимы испытания, которые были записаны ранее;

СОХРАНЕНИЕ – с помощью этой команды сохраняется текущий режим испытания в памяти аппарата;

ПЕЧАТЬ – с помощью этой команды распечатывается результат испытания на принтере.

ВНИМАНИЕ! Принтер необходимо включать ПОСЛЕ включения питания аппарата. Убедитесь в наличии бумаги в принтере перед его включением.

УСТАНОВКИ – с помощью этой команды вызываются параметры испытаний жидкого диэлектрика;

КАЛИБРОВКА – с помощью этой команды вызываются калибровочные режимы аппарата. Первоначально аппарат калибруется на предприятии-изготовителе;

НАСТРОЙКА – с помощью этой команды проводится сброс счетчика.

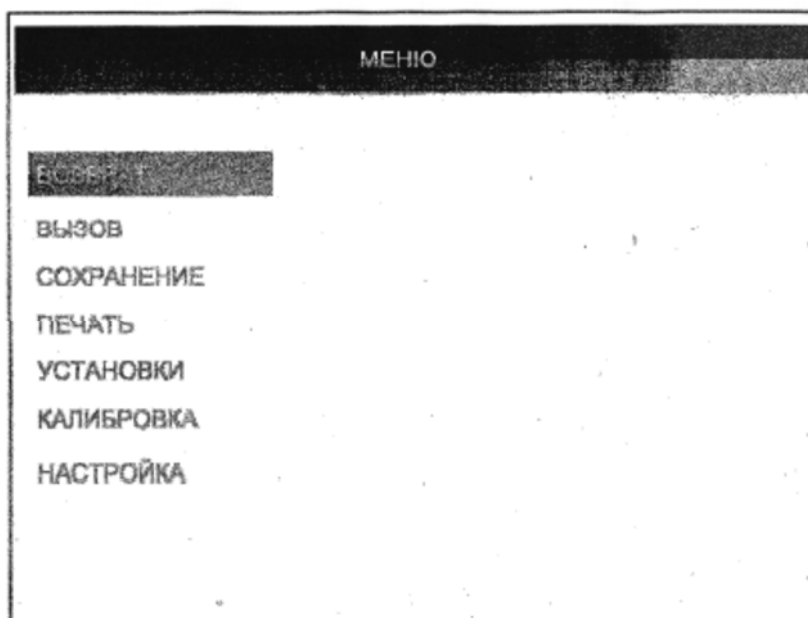


Рисунок 1.5 – Главное «МЕНЮ» программы управления

Установка требуемого режима испытания.

Вращением ручки энкодера выбрать пункт меню «УСТАНОВКИ» и нажать на ручку энкодера. На дисплее панели пульта аппарата появляются параметры испытания (рисунок 1.6).

Вращая ручку энкодера, выбрать требуемый подпункт и нажать ее. При нажатии происходит вход в подпункт. Вращением ручки выбрать требуемый параметр, нажатием - запомнить.

Основные подпункты меню «УСТАНОВКИ»:

- КОЛ-ВО ИСП – устанавливает количество пробоев жидкого диэлектрика в одном испытании от 1 до 9 раз;
- ПРЕДЕЛ КВ – устанавливает диапазон срабатывания защиты высокого напряжения от 2 кВ до 92 кВ;

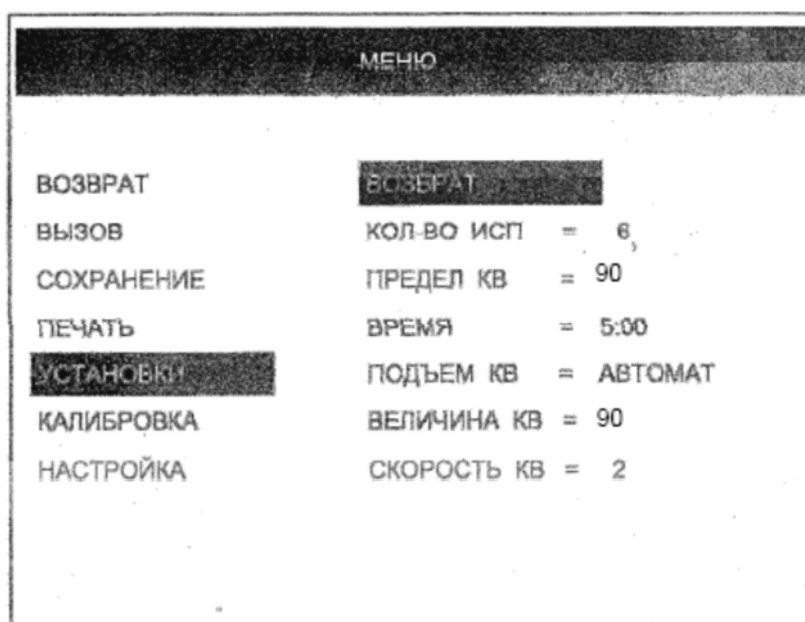


Рисунок 1.6 – Пункт главного «МЕНЮ» - «Установки»

- **ВРЕМЯ** – устанавливает продолжительность интервала между последовательными пробоями масла от 0 мин 1 с до 9 мин 59 с;
- **ПОДЪЕМ КВ** – устанавливает величину испытательного напряжения;
- **АВТОМАТ** – автоматический режим;
- **РУЧНОЙ** – ручной режим (ручной режим служит для настройки и калибровки аппарата);
- **ВЕЛИЧИНА КВ** – устанавливает величину испытательного напряжения при определении «Гарантированной электрической прочности»;
- **СКОРОСТЬ КВ** – в автоматическом режиме устанавливает скорость подъема выходного напряжения (0,5 ± 0,2) кВ/с; (1,0 ± 0,4) кВ/с; (2,0 ± 0,4) кВ/с; (3,0 ± 0,5) кВ/с; (4,0 ± 0,5) кВ/с и (5,0 ± 0,5) кВ/с.

Для задания необходимого режима испытания необходимо:

- установить величину срабатывания защиты высокого напряжения;
- установить продолжительность интервала между последовательными пробоями масла;
- установить режим подъема;
- установить скорость подъема выходного напряжения.

После выбора параметров режима испытания, подвести маркер на пункт «ВОЗВРАТ» и нажать на ручку энкодера. Осуществится выход в главное «МЕНЮ».

Подвести маркер на «ВОЗВРАТ» и нажать на ручку энкодера. На дисплее лицевой панели аппарата появится информационное поле с заданными параметрами испытаний.

Установив требуемые режимы для проведения испытания, возможно сохранить их в памяти аппарата. Для этого необходимо войти в главное «МЕНЮ» в пункт меню «СОХРАНЕНИЕ» (рисунок 1.7).

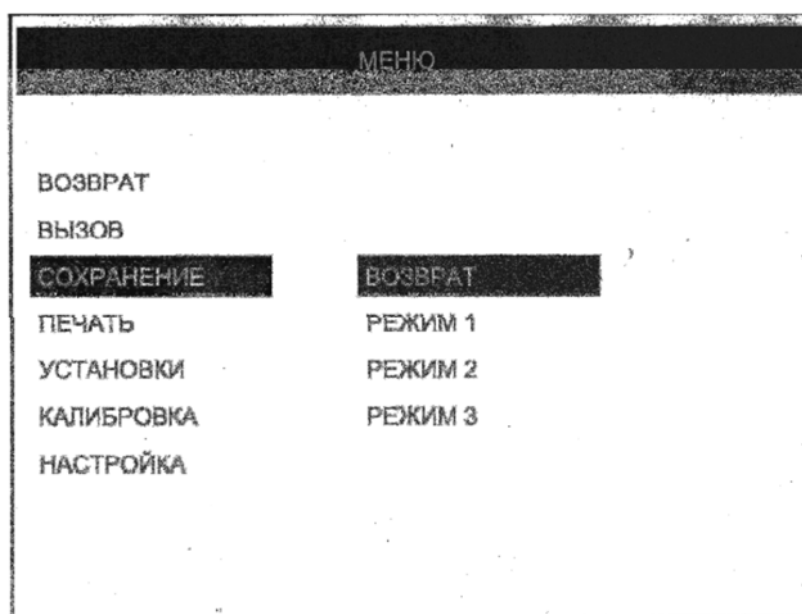


Рисунок 1.7 – Пункт главного «МЕНЮ» - «Сохранение»

При помощи ручки энкодера, выбрать один из подпунктов «РЕЖИМ 1» – «РЕЖИМ 3» и нажать кнопку энкодера, при этом произойдет запись параметров в одну из трех ячеек памяти аппарата.

При отключении аппарата параметры режима испытания сохраняются.

Для вызова ранее записанных режимов испытаний требуется войти в пункт меню «ВЫЗОВ» (рисунок 1.8).

При отключении аппарата параметры режима испытания сохраняются.

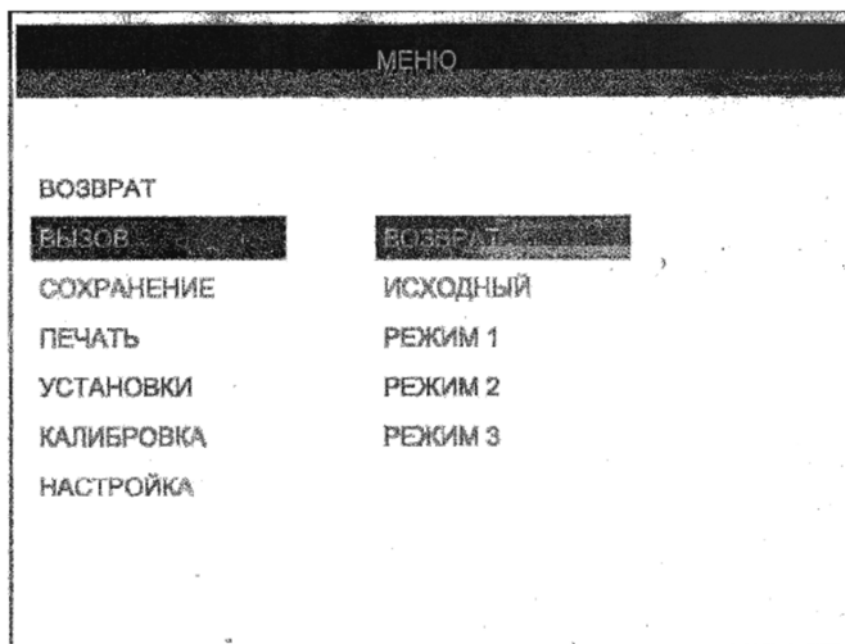


Рисунок 1.8 – Пункт главного «МЕНЮ» - «ВЫЗОВ»

Режим «ИСХОДНЫЙ» – с помощью этой команды восстанавливаются заводские параметры испытания по ГОСТ 6581-75.

Вывод протокола испытаний на печать

При наличии принтера можно распечатать протокол испытания. Принтер подключается в разъем 2 (рисунок 1.4).

После проведения испытания войти в главное «МЕНЮ». Вращая энкодер, выбрать пункт меню «ПЕЧАТЬ» и нажать на энкодер, выбрать – «ДА» и еще раз нажать на энкодер. Принтер начнет распечатывать протокол последнего испытания.

В протокол испытания входит следующая информация:

- дата испытания;
- время испытания;
- объект испытания;
- величины значений напряжения последовательных пробоев;
- среднее арифметическое значение пробивного напряжения;
- средняя квадратическая ошибка;
- коэффициент вариации;
- место проведения испытания;

- Ф.И.О. оператора;
- подпись;
- место печати.

2.6 Испытание жидкого диэлектрика

Подготовить аппарат к работе. Подготовить измерительную ячейку к использованию. Подготовить жидкий диэлектрик к испытанию. Открыть крышку аппарата, установить ячейку с жидким диэлектриком и закрыть крышку. Включить аппарат. Выбрать режим испытания «Исходный».

Включить кнопку высокого напряжения. Через 10 мин на дисплее появится значок высокого напряжения, а на лицевой панели аппарата включится красный индикатор высокого напряжения.

Увеличение напряжения на испытуемом объекте будет происходить автоматически до момента пробоя жидкого диэлектрика. После пробоя произойдет запись напряжения пробоя в графе «ПЕРВИЧНОЕ» и в строке «Среднее арифметическое значение пробивного напряжения» $U_{пр}$.

Высокое напряжение отключится. Красный индикатор погаснет.

Открыть крышку аппарата. Отсчет времени интервала между последовательными пробоями масла остановится.

При помощи чистой сухой стеклянной палочки осторожно удалить твердые продукты разложения (частицы сажи) между электродами, а также с самих электродов. При этом следует избегать возникновения пузырьков воздуха в испытываемом диэлектрике. Закрыть крышку аппарата.

Отсчет времени интервала между последовательными пробоями масла возобновится.

Испытание жидкого диэлектрика продолжится согласно программе аппарата. Перемешивание жидкого диэлектрика необходимо производить после каждого пробоя.

По окончании испытания аппарат известит звуковым сигналом, а программа определит результат испытаний жидкого диэлектрика. Для выключения звука требуется слегка повернуть ручку энкодера или приподнять крышку.

Если результат испытания отрицательный, необходимо провести вторичное испытание по ГОСТ 6581-75.

Не сбрасывая результаты испытания, поменять жидкий диэлектрик в испытательной ячейке из того же сосуда.

После этого включить высокое напряжение и повторить испытание.

Сброс результатов испытания проводить нажатием на кнопку выключения высокого напряжения.

2.7 Испытание жидкого диэлектрика в режиме «гарантированная электрическая прочность».

В ходе этого испытания на электроды ячейки в течение 1 минуты подается заданное напряжение.

Выбрать в меню «Установки» пункт «ВЕЛИЧИНА КВ». Установить «ВЕЛИЧИНА КВ» заданное значение испытательного напряжения. Выйти из меню. Включить высокое напряжение. Испытание проводится испытательным напряжением от 10 кВ до 89 кВ.

2.8 Порядок отключения аппарата

По окончании испытаний нажать кнопку отключения высокого напряжения.

Отключить питание аппарата сетевым выключателем.

3 Указания по технике безопасности

1. К работе на стендах допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности при выполнении работ в лабораториях кафедры

«Автоматизированных электроэнергетических сетей и электроснабжения» и ознакомившиеся с настоящими методическими указаниями. Прохождение инструктажа по технике безопасности фиксируется преподавателем в специальном журнале.

2. Лабораторная работа должна выполняться не менее чем двумя студентами.

3. Перед началом работы необходимо убедиться в надежном заземлении корпуса аппарата.

4. Замену образца диэлектрика производят после отключения аппарата сетевым выключателем.

5. По окончании испытания или при перерыве в работе установку отключают от напряжения питания.

4. Порядок выполнения работы

4.1 Исследование электрической прочности жидкого диэлектрика

По заданию преподавателя испытательный сосуд заполняется трансформаторным маслом или другим жидким диэлектриком, устанавливается зазор между электродами, и производится пробой в порядке, описанном в п. 2.6 или 2.7 по заданию преподавателя. Результаты сводятся в таблицу 1.2.

Таблица 1.2 – Результаты исследования жидкого диэлектрика

<i>Жидкий диэлектрик _____, $d =$ _____ мм Скорость подъема напряжения _____ кВ/с, Выдержка времени между пробоями _____, с</i>								
Величина	Опыт №1							
№ пробоя	1	2	3	4	5	6	$U_{пр\ ср},$ кВ	
$U_{пр},$ кВ							$\sigma,$ кВ	
$E_{пр},$ кВ/мм							$V, \%$	

4.2 Содержание, форма и правила оформления отчета по лабораторной работе

Каждый студент, выполнивший лабораторную работу, должен оформить отчет и предоставить его преподавателю.

Отчет должен содержать:

1. Название и цель работы.
2. Приборы и материалы, применяемые в лабораторной работе.
3. Таблицы экспериментальных и расчетных данных.
5. Выводы по результатам работы, в которых должна быть дана оценка исследуемых явлений, подтверждение в выполнении законов, объяснение характера кривых.

Отчет должен иметь титульный лист с указанием Ф.И.О. студента, номера группы и даты выполнения работы.

5. Контрольные вопросы

1. Теория электротеплового пробоя жидкого диэлектрика.
2. Теория электрического пробоя жидких диэлектриков.
3. Последовательность развития электротеплового пробоя трансформаторного масла.
4. Зависимость электрической прочности трансформаторного масла от его электропроводности.
5. Зависимость электрической прочности трансформаторного масла от наличия нерастворимых примесей.
6. Зависимость электрической прочности трансформаторного масла от растворимых примесей.
7. Влияние эмульгированной влаги на электрическую прочность трансформаторного масла.
8. Зависимость пробивного напряжения трансформаторного масла от температуры.

9. Порядок проведения испытаний электрической прочности жидких диэлектриков на аппарате АИМ-90.

10. Устройство ячейки для испытания электрической прочности жидких диэлектриков.

11. Для какой цели проводится несколько пробоев на одном и том же образце жидкого диэлектрика.

12. Зачем необходимо рассчитывать среднеквадратичную ошибку пробивного напряжения трансформаторного масла.

13. Основные факторы, влияющие на электрическую прочность трансформаторного масла.

14. В оборудовании какого класса напряжения может быть применено трансформаторное масло, исследованное в лабораторной работе.

Лабораторная работа №2
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ
ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы – Формирование у студента компетенций ПК-37, ПК-40, ПК-47. Для этого следует ознакомиться с порядком испытания твердых диэлектриков на электрическую прочность и получить навыки в определении электрической прочности различных материалов, процессе выполнения работы ознакомиться со значениями электрической прочности наиболее распространённых электроизоляционных материалов.

1. Теоретическое обоснование.

При увеличении напряжения, приложенного к изоляции в технической установке, может произойти электрический пробой изоляции. Через диэлектрик проходит ток очень большой величины, в диэлектрике образуется проводящий канал с малым электрическим сопротивлением. В результате пробоя диэлектрик оказывается непригодным к дальнейшему применению. Способность электроизоляционных материалов противостоять пробоем называется электрической прочностью $E_{пр}$.

Различают три вида пробоя твердых диэлектриков:

- 1) электрический пробой диэлектриков;
- 2) тепловой (электротепловой) пробой диэлектриков;
- 3) электрохимический пробой диэлектриков.

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 макроскопически однородных диэлектриков.

Этот вид пробоя 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 зависит от температуры.

Электрический пробой по своей природе является чисто электронным процессом, когда из немногих начальных электронов в твердом теле создается электронная лавина. Электроны рассеивают энергию своего движения, накопленную в электрическом поле, возбуждая упругие колебания кристаллической решетки. Электроны, достигшие определенной критической скорости, производят отщепление новых электронов, и стационарное состояние нарушается, т. е. возникает ударная ионизация электронами в твердом теле.

Чисто электрический пробой имеет место, когда исключено влияние электропроводности и диэлектрических потерь, обуславливающих нагрев материала, а также отсутствует ионизация газовых включений. Для однородного поля и полной однородности структуры материала напряженность поля при электрическом пробое может служить мерой электрической прочности вещества. Такие условия удается наблюдать для монокристаллов щелочно-галогидных соединений и некоторых органических полимеров, а так же при воздействии импульсных напряжений.

Для однородных материалов наблюдается заметная разница между значениями пробивного напряжения в однородном и неоднородном полях.

Электрический пробой неоднородных диэлектриков. Такой пробой характерен для технических диэлектриков, содержащих газовые включения, и так же, как и электрический пробой однородного диэлектрика, весьма быстро развивается.

Пробивные напряжения для неоднородных диэлектриков, находящихся во внешнем однородном или неоднородном поле, как правило, невысоки 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. Иногда на опыте можно наблюдать, 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.

Таблица 2.1 – Электрическая прочность некоторых твердых диэлектриков в однородном поле при частоте 50 Гц

Материал	Упр, МВ/м
Стекло	100 – 300
Каменная соль	100 – 150
Слюда	100 – 200
Пропитанная бумага	100 – 300
Органические пленки (полистирол, фторопласт)	100 – 200
Керамика	10 – 30
Микалекс	10 – 15
Пластические массы с наполнителем (фенолформальдегидные, аминопласты)	8 – 15
Пористая керамика	3 – 5
Дерево	4 – 5
Непропитанная кабельная бумага	3 – 7

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 механизма теплового 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.

Высокой электрической прочностью характеризуются диэлектрики, имеющие плотную структуру и не содержащие газовых включений. К ним относятся: слюда, бумага, тщательно пропитанная жидким диэлектриком, стекла (таблица. 2.1).

Величина электрической прочности твердых диэлектриков зависит от их структуры, толщины, окружающей температуры и других факторов. Электрическая прочность ряда электроизоляционных материалов может быть повышена пропиткой их маслами, лаками или компаундами. Для обеспечения надежности работы электрических установок рабочее напряжение электроизоляционных материалов должно быть значительно ниже пробивного напряжения $U_{пр}$. Как правило, определение прочности диэлектриков производится в однородных электрических полях. Однако при практическом использовании диэлектриков, как правило, встречаются неоднородные электрические поля.

Цилиндрический конденсатор даёт нам простейший пример неравномерного электрического поля. Согласно (2.1) максимальная напряжённость имеет место в точках, расположенных в непосредственной близости от внутренней обкладки (при $x = r_1$), а минимальная – в непосредственной близости от внешней (при $x = r_2$).

$$E = \frac{U}{x \ln(r_2/r_1)}, \quad (2.1)$$

где U – напряжение между обкладками, В; r_1 и r_2 – соответственно радиусы внутренней и внешней обкладок, м; x – расстояние от оси цилиндрического конденсатора, м.

В плоском конденсаторе, содержащем два (или более) различных диэлектрика, соединенных параллельно, поле равномерно, и его напряжённость также определяется формулой (1.2).

Рассмотрим теперь конденсатор с различными диэлектрическими материалами, слои которых соединены последовательно друг с другом (слоистый диэлектрик). Напряжённость поля в каждом из последовательно соединённых слоёв уже неодинакова. Она будет обратно пропорциональна диэлектрической проницаемости материала данного слоя. Электрическое смещение D в плоском конденсаторе постоянно во всем объёме диэлектрика; обозначая для двухслойного плоского конденсатора E_1 и E_2 – напряжённости в слоях 1 и 2 и ε_{r1} и ε_{r2} – относительные диэлектрические проницаемости материала этих слоёв, имеем

$$D = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{r1} \cdot E_1 = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{r2} \cdot E_2, \text{ откуда } \varepsilon_{r1} \cdot E_1 = \varepsilon_{r2} \cdot E_2 \quad (2.2)$$

Рассчитаем значения напряжённости поля в слоях двухслойного плоского конденсатора. Обозначим h_1 и h_2 – толщины слоёв и U_1 и U_2 – напряжения на них, получим при последовательном соединении слоёв

$$U = U_1 + U_2 = E_1 h_1 + E_2 h_2, \quad (2.3)$$

где U – полное напряжение на конденсаторе, В.

Решение системы уравнений (2.2) и (2.3) даёт значения напряжённости поля в обоих слоях

$$E_1 = \varepsilon_{r2} \frac{U}{h_1 \cdot \varepsilon_{r2} + h_2 \cdot \varepsilon_{r1}}; \quad E_2 = \varepsilon_{r1} \frac{U}{h_1 \cdot \varepsilon_{r2} + h_2 \cdot \varepsilon_{r1}}. \quad (2.4)$$

В общем случае плоского многослойного (m слоёв) конденсатора (2.5)

$$E_k = \frac{U}{\varepsilon \sum_{i=1}^m h_i / \varepsilon_{ri}}. \quad (2.5)$$

Для многослойного цилиндрического конденсатора (общий случай m слоёв) напряжённость на расстоянии x от оси (в k -м слое) (2.6)

$$E_k = \frac{U}{\varepsilon \cdot x \sum_{i=1}^m \frac{\ln(r_{2i}/r_{1i})}{\varepsilon_{ri}}}, \quad (2.6)$$

где r_{2i} , и r_{1i} – соответственно внешний и внутренний радиусы i -го слоя, м.

Как видно из (2.5) и (2.6), в отличие от случая многослойного плоского конденсатора порядок расположения материалов в слоях цилиндрического

конденсатора существенно влияет на напряжённость поля в отдельных слоях. Для того чтобы получить наиболее выгодное распределение (получение более низких максимальных значений напряжённостей), нужно стремиться во внутренние слои многослойного цилиндрического конденсатора помещать диэлектрики с большей ε_r («градиентирование изоляции», применяемое, например, в технике силовых кабелей высокого напряжения).

Вышеприведённые формулы для расчёта E_k справедливы для работы многокомпонентной изоляции при переменном напряжении. Для расчёта установившихся (через достаточно большое время после включения напряжения) напряжённостей электрического поля в многокомпонентной изоляции, работающей при постоянном напряжении, в эти формулы вместо значений ε_{ri} компонентов нужно подставлять значения удельной объёмной проводимости $\gamma_{Vi} = 1/\rho_{Vi}$, соответствующих компонентов. Это объясняется тем, что вместо условия непрерывности вектора электрического смещения $D = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{ri} \cdot E_i$ в основу расчёта для случая постоянного напряжения должно быть положено условие непрерывности вектора плотности тока сквозной проводимости $j_{скв} = E_i \cdot \gamma_{Vi}$.

Следует иметь в виду, что в многослойном диэлектрике отношение диэлектрических проницаемостей слоёв, как правило, не соответствует отношению их удельных проводимостей, в связи с чем распределение напряжённости электрического поля по толщине изоляции при напряжении постоянного и переменного тока будет различным. Кроме того, распределение напряжённости в изоляции при напряжении переменного тока значительно меньше зависит от перепада температур в изоляции, чем при напряжении постоянного тока, так как ε_r значительно меньше зависит от температуры, чем $\gamma(\rho)$ диэлектрика.

При измерении пробивного напряжения приходится учитывать статистический характер пробоя твердых диэлектриков, при котором по одному измерению невозможно сказать, каким будет следующее значение пробивного напряжения, поэтому проводят серию пробоев и на их основе вычисляют среднее арифметическое пробивного напряжения

$$U_{np.cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{np.i} \quad (2.7)$$

и среднюю квадратическую ошибку (среднего пробивного напряжения)

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (U_{np.i} - U_{np.cp})^2}, \quad (2.8)$$

где $U_{np.i}$ – величина пробивного напряжения при i -том пробое, n – число пробоев.

2 Аппаратура, оборудование и материалы

В ходе лабораторной работы используются аппараты АИД-70/50, АИМ-90Ц, а также образцы твердых диэлектрических материалов.

2.1 Устройство и работа лабораторной установки

Аппарат АИД-70/50 выполнен в виде двух переносных блоков, соединенных кабелем: блока высокого напряжения (БВН) и блока управления (БУ). Конструкция блоков представлена на рисунках 2.1 и 2.2.

БВН включает в себя: трансформатор высоковольтный, выключатель высоковольтный, резистор высоковольтный, выпрямительные столбы, помещённые в бак, заполненный трансформаторным маслом.

Уровень трансформаторного масла находится на расстоянии (15 ± 5) мм от наружной плоскости гетинаксовой панели БВН. Герметизация бака блока высокого напряжения осуществляется с помощью силиконовой прокладки.

Испытательное напряжение из бака выводится через проходной высоковольтный изолятор, к которому подсоединяется испытываемый объект.

Под кожухом БВН находится электромагнит механизма заземлителя, конденсаторы и разрядники.

На кожухе БВН закреплена табличка «Аппарат АИД-70/50. Блок высокого напряжения. Зав. №... » (номер состоит из 6-ти цифр: две первые - заводской номер аппарата, четыре последние - год выпуска).

БУ включает в себя регулятор испытательного напряжения, разъёмы для подсоединения сетевого кабеля и кабелей блока высокого напряжения, компенсационный трансформатор, предохранители, пускатели и другие элементы электрической схемы, расположенные в блоке и на печатной плате.

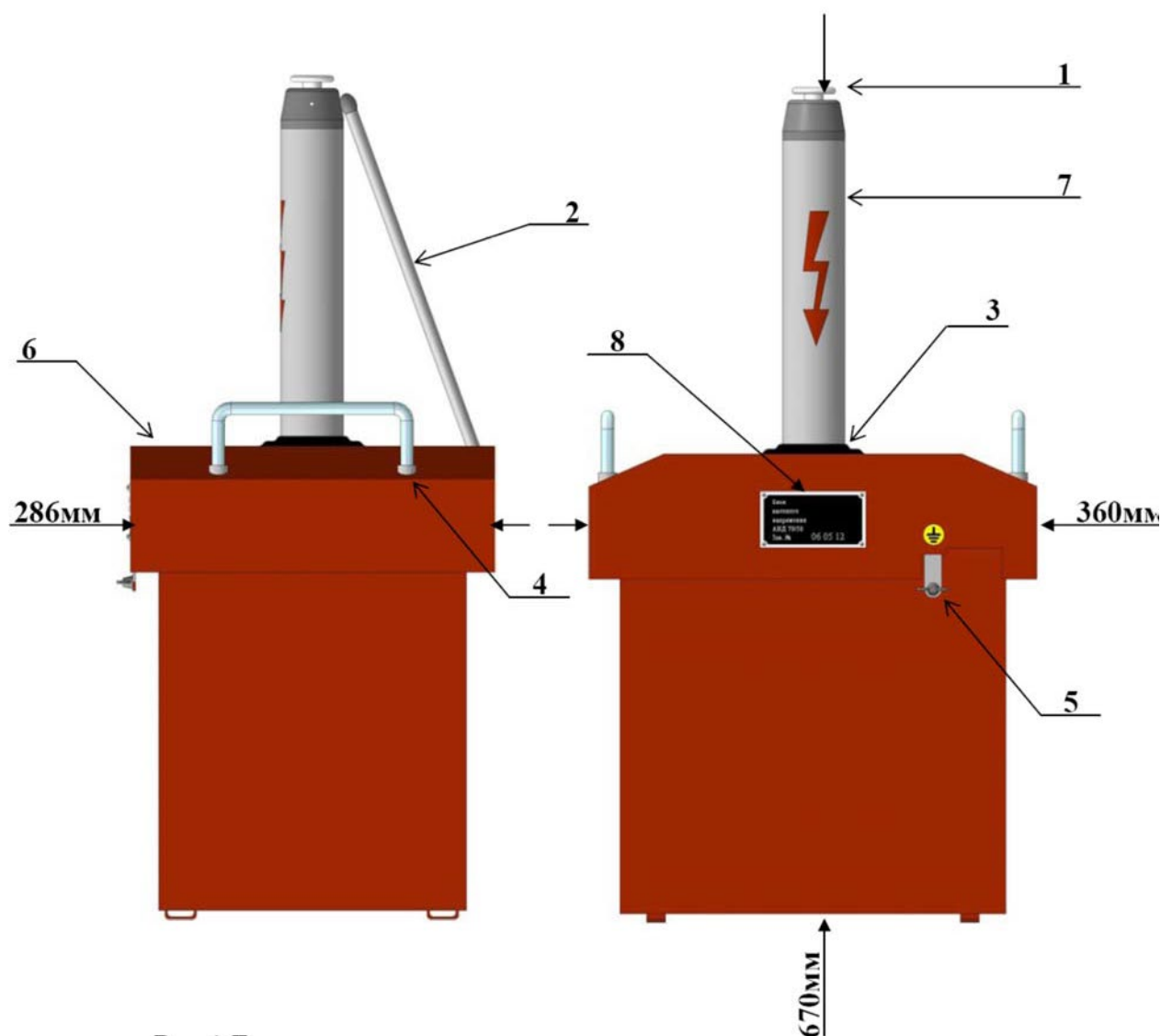


Рисунок 2.1 – Блок высокого напряжения

На рисунке 2.1 приняты следующие обозначения: 1 – зажим для присоединения испытываемого объекта; 2 – штанга механизма короткозамыкателя; 3 – уплотнительное кольцо; 4 – болт крепления ручки кожуха; 5 – клемма заземления; 6 – кожух; 7 – проходной высоковольтный изолятор; 8 – шильдик блока высокого напряжения.

На лицевой панели БУ (рисунок 2.2) расположены измерительные приборы,

сигнальные лампы, ручка регулятора напряжения, кнопки включения и отключения испытательного напряжения, тумблер переключения градуировки киловольтметра при работе на выпрямленном напряжении, переключатель вида испытательного напряжения и включения аппарата в сеть.

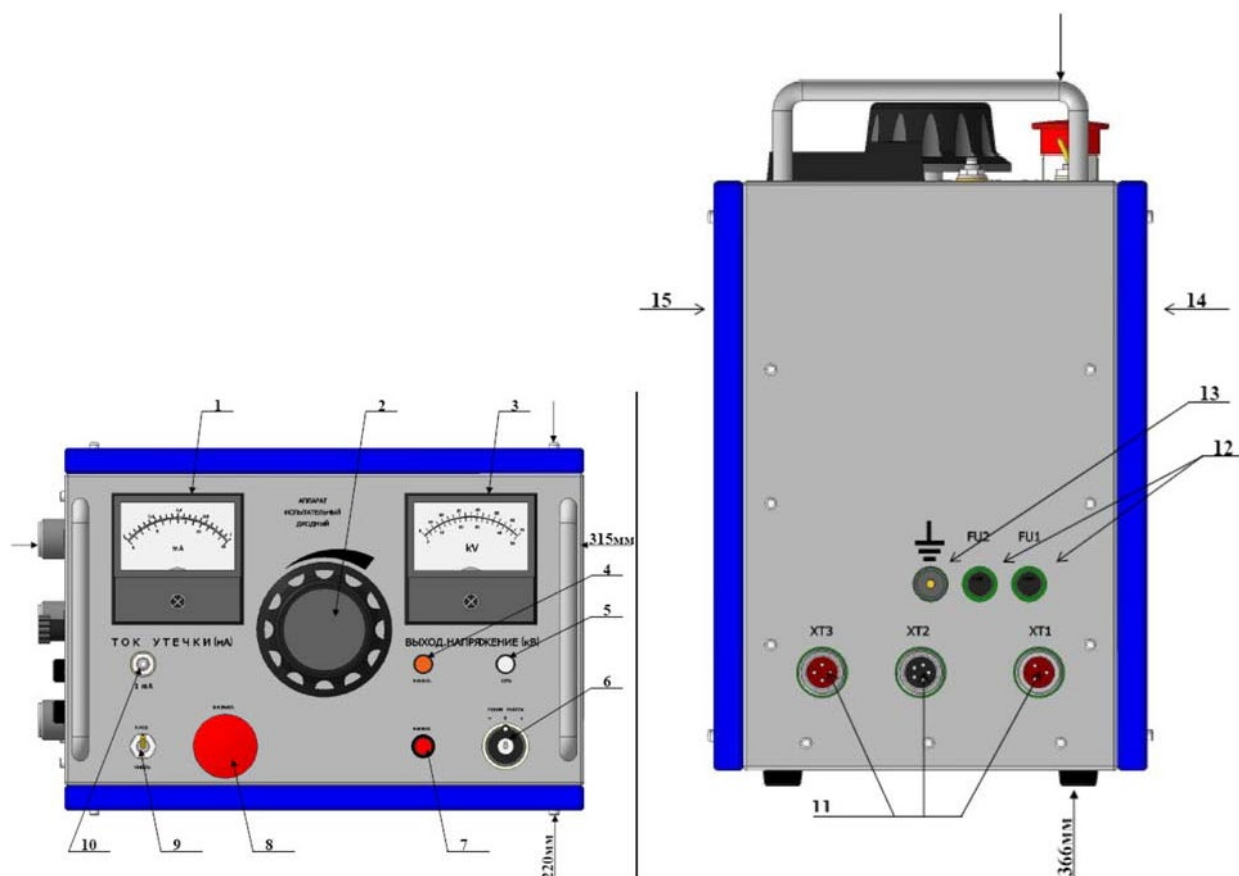


Рисунок 2.2 – Блок управления:

На рисунке 2.2 приняты следующие обозначения: 1 – миллиамперметр измерения тока утечки в мА; 2 – ручка регулятора испытательного напряжения; 3 – киловольтметр измерения выходного напряжения в кВ; 4 – красная сигнальная лампа (включение испытательного напряжения); 5 – зеленая сигнальная лампа (включение сети); 6 – переключатель со спецключом для переключения вида испытательного напряжения и для включения аппарата в сеть; 7 – кнопка включения испытательного напряжения; 8 – кнопка выключения испытательного напряжения; 9 – кнопка переключения градуировки киловольтметра; 10 – кнопка переключения диапазона миллиамперметра – 1мА; 11 – разъёмы подключения; 12 – предохранители; 13 –

клемма заземления; 14 – крышка нижняя; 15 – крышка верхняя.

На боковой панели БУ расположены разъемы для подключения сети и БВН, предохранители и клемма заземления.

2.2 Принцип работы

Работа и взаимодействие элементов аппарата осуществляется следующим образом. Напряжение питающей сети подводится к БУ посредством сетевого кабеля, снабженного разъемом, далее через предохранители подается на пускатель и переключатель 6 (рисунок 2.2).

При установке переключателя 6 в положение « ~ » или « – » срабатывает пускатель и электромагнит заземлителя БВН, при этом загорается зеленая сигнальная лампа 6 (рисунок 2.2). Выключатель высоковольтный БВН срабатывает только при установке переключателя 6 в положение «~». В этом случае выпрямительные столбы БВН шунтируются, и на выходе БВН появляется переменное напряжение.

Включение испытательного напряжения производится нажатием кнопки 7, при условии, что щетка регулятора напряжения находится в нулевом положении. Пускатель срабатывает, и питание подается на первичную обмотку трансформатора БВН, при этом загорается красная сигнальная лампа 4.

Величина испытательного напряжения устанавливается при помощи ручки регулятора напряжения 2, а контролируется киловольтметром РА2 в кВ. При работе на выпрямленном напряжении ток нагрузки измеряется миллиамперметром 1 в мА.

При работе на выпрямленном напряжении ток нагрузки измеряется миллиамперметром на пределах 1 мА и 15 мА (на пределе 1 мА – при нажатой кнопке 10 "1мА").

Резистор высоковольтный в БВН служит для измерения испытательного напряжения. Измерительный прибор 3 (киловольтметр) имеет две шкалы:

- нижнюю – 50 кВ – для измерения переменного напряжения,
- верхнюю – 70 кВ – для измерения выпрямленного напряжения.

Киловольтметр градуируется:

- при работе источника испытательного напряжения на переменном напряжении – подстроечным резистором $R5$ " $U_{\sim}$ ";
- при работе на выпрямленном напряжении на холостом ходу – подстроечным резистором $R4$ " U_{xx} ";
- при испытании на выпрямленном напряжении устройств с ёмкостной нагрузкой (силовых кабелей) – подстроечным резистором $R3$ " $U_{\text{каб}}$ "

Пояснение: короткозамыкатель - коммутационный электрический аппарат, предназначенный для создания искусственного короткого замыкания в электрической цепи (ГОСТ 17703-72).

Резисторы $R3 - R5$ расположены на основной печатной плате, закреплённой на левой боковине БУ.

При работе аппарата на выпрямленном напряжении необходимо строго следить за положением тумблера 9 "Х.ХОД-КАБЕЛЬ" (для правильного измерения испытательного напряжения и во избежание выхода из строя БВН за счёт превышения предельного значения напряжения, равного 70 кВ).

В случае подключения на выпрямленное напряжение ёмкостной нагрузки (например, силовой кабель или иного объекта, имеющего ёмкость более 750 пФ) переключатель 9 должен находиться в положении "КАБЕЛЬ".

При испытании изоляции диэлектриков переключатель 9 должен находиться в положении "Х.ХОД".

Реле К3 (режим выпрямленного напряжения) служит для переключения резисторов, шунтирующих измерительный прибор 1, резисторов, шунтирующих обмотку реле К4, а также для шунтирования измерительного прибора 1 при работе источника на переменном напряжении.

Для защиты аппарата от токов перегрузки служит реле К4.

При работе источника на выпрямленном напряжении реле К4 срабатывает при токах нагрузки, находящихся в пределах от 13 до 14 мА, а при работе на переменном напряжении – при токах нагрузки в пределах от 45 до 46 мА.

По окончании испытания силового кабеля, для снятия остаточного заряда, ручка регулятора напряжения БУ переводиться в крайне положение вращением против

часовой стрелки, и при снижении напряжения на испытываемом объекте до 0,5... 1 кВ (во избежание повреждения вторичной обмотки трансформатора БВН), аппарат отключается кнопкой 8 "ВЫКЛ". При этом отключается пускатель блока управления и срабатывает высоковольтный выключатель блока высокого напряжения. Отсутствие остаточного заряда можно контролировать киловольтметром 3.

При отключении аппарата от сети переключателем 6, заземлитель РЕ блока высокого напряжения касается высоковольтного вывода лока высокого напряжения. Таким образом, происходит наложение заземления на испытываемый объект и источник испытательного напряжения.

2.3 Указания по мерам безопасности

Все лица, работающие по эксплуатации и техническому обслуживанию аппарата, должны быть предварительно обучены безопасным методам работы на данном аппарате, и знать в соответствующем объёме "Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей" и "Правила безопасной эксплуатации электроустановок потребителей" (ПТЭЭП и ПБЭЭП).

Рабочее место персонала должно соответствовать требованиям пожарной безопасности по ГОСТ 12.1.004-76.

Прежде чем приступить к работе на аппарате, необходимо:

- удалить блок управления от БВН на расстояние не менее 3 м;
- надёжно заземлить блок управления и БВН с помощью прилагаемых к аппарату гибких медных проводов сечением 6 мм², с кольцевыми наконечниками с одной стороны и зажимами типа «крокодил» – с другой. Каждый блок должен заземляться на шину заземления отдельным проводником.

Рекомендуется в соответствии с ПТБ оградить рабочее место и вывесить предупреждающие плакаты. При необходимости следует организовать надзор во время работы аппарата.

ЗАПРЕЩАЕТСЯ:

- работа без заземления;

- последовательное соединение блоков по заземлению;
- работа на аппарате с неисправными заземлителем и сетевой сигнализацией;
- находиться ближе 3 м от БВН в момент включения аппарата в сеть, а также при включенном испытательном напряжении.

Прежде чем отсоединить испытуемый объект от БВН, необходимо **обязательно** убедиться в том, что:

- стрелка киловольтметра находится на отметке шкалы "0";
- с аппарата снято сетевое напряжение;
- заземлитель БВН касается высоковольтного вывода. Рекомендуется дополнительно использовать разрядную высоковольтную штангу для наложения заземления на объект испытаний.

2.4 Порядок работы на аппарате АИД 70/50

Прежде чем приступить к работе на аппарате, необходимо: установить БВН вблизи испытуемого объекта; установить блок управления на расстоянии не менее 3 м от БВН и соединить блоки соединительными кабелями. Рабочее положение блока управления - вертикальное (лицевая панель блока управления - горизонтальна!). В том случае, если блок управления будет установлен горизонтально, погрешность показаний измерительных приборов может превышать 3%; надёжно заземлить блок управления и БВН гибкими медными проводами сечением 6 мм, прилагаемыми к аппарату.

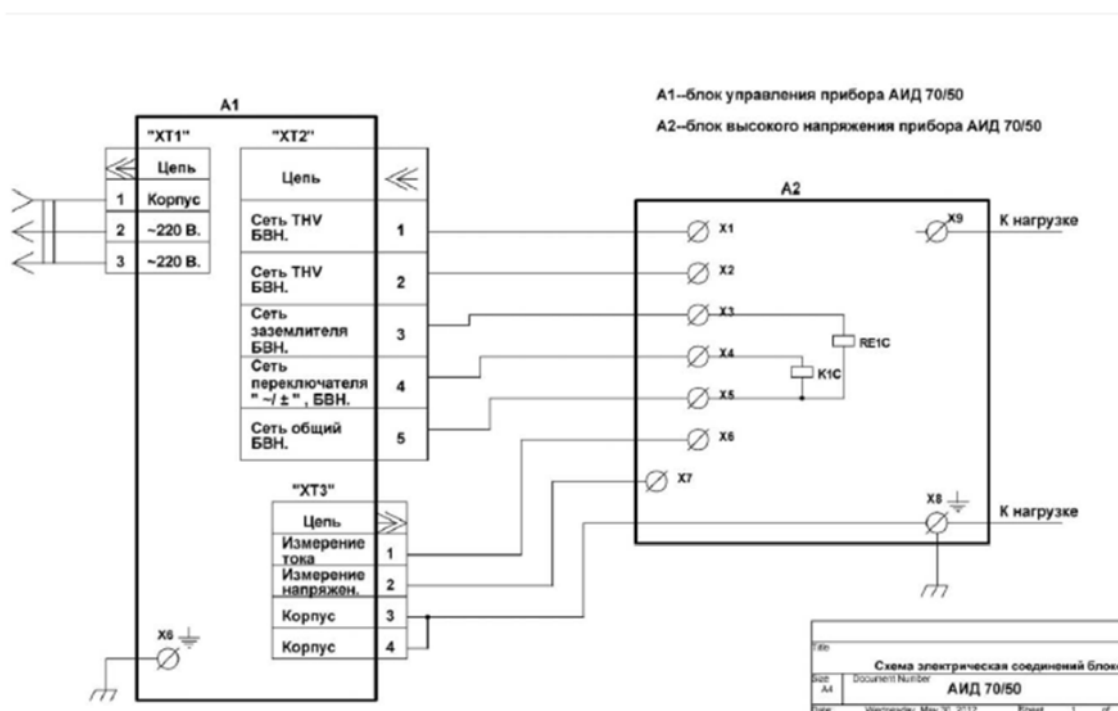


Рисунок 2.3 – Схема электрическая принципиальная соединения
БВН и БУ аппарата АИД-70/50

РАБОТА БЕЗ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ЗАПРЕЩАЕТСЯ!

Подключить объект испытаний к высоковольтному выводу (посредством прилагаемого высоковольтного кабеля с зажимом "крокодил") и клемме заземления БВН; подключить сетевой кабель к блоку управления и к сети.

Лица, присутствующие при испытании, должны быть удалены от БВН на расстояние не менее 3 м. Вставить спецключ от аппарата в переключатель 0 -" блока управления, и включить необходимый вид испытательного напряжения. При этом должна загореться зелёная сигнальная лампочка «Сеть».

При работе на выпрямленном напряжении (ключ переключателя в положении « – ») во избежание выхода из строя БВН, а также для правильного измерения величины испытательного напряжения, строго следить за положением тумблера «Х. ХОД-КАБЕЛЬ».

Вращая ручку регулятора испытательного напряжения против движения часовой стрелки, установить её в исходное положение до упора.

Включить испытательное напряжение кнопкой «ВКЛ» при этом должна загореться красная лампочка «Высокое Вкл.».

Вращая ручку регулятора испытательного напряжения по часовой стрелке и наблюдая за показаниями киловольтметра, установить необходимую величину испытательного напряжения.

При испытании ёмкостных объектов необходимо помнить, что после прекращения вращения ручки регулятора напряжения испытательное напряжение на объекте увеличивается (стрелка киловольтметра продолжает отклоняться) по мере заряда ёмкости.

В таких случаях подъём напряжения надо осуществлять медленно и плавно, не допуская превышения нормативной величины испытательного напряжения на объекте и не допуская превышения наибольшего рабочего напряжения аппарата, равного 70 кВ.

При работе на выпрямленном испытательном напряжении измерение тока нагрузки величиной до 1 мА следует производить миллиамперметром аппарата при нажатой кнопке «1 мА».

По окончании испытания переменным напряжением установить регулятор испытательного напряжения в исходное положение, вращая ручку против часовой стрелки до упора. Отключить кнопкой "ВЫКЛ" испытательное напряжение и только после этого отключить аппарат от сети спецключом, установив его в положение «0».

После окончания испытания емкостного объекта, необходимо установить регулятор испытательного напряжения в исходное положение, вращая ручку против часовой стрелки до упора, и дождаться снижения напряжения на испытуемом объекте до 0,5 – 1 кВ. Контроль над снятием остаточного ёмкостного заряда с испытуемого объекта необходимо осуществлять, наблюдая за показанием киловольтметра аппарата. Только после снижения напряжения до 0,5 – 1 кВ нужно нажать кнопку «ВЫКЛ» и затем отключить аппарат от сети, установив переключатель 6 БУ в положение «0». Стрелка киловольтметра должна стоять на числовой отметке шкалы «0».

При испытании емкостных объектов, величина емкости которых более 0,02 мкФ (20 нФ), остаточный емкостной заряд необходимо снимать только с помощью разрядной штанги с ограничительным сопротивлением. Применение разрядной штанги исключает выход из строя вторичной обмотки высоковольтного трансформатора.

Прежде чем отсоединить испытуемый объект от источника, необходимо визуально убедиться в том, что штанга заземлителя источника касается высоковольтного вывода. Рекомендуется дополнительно наложить заземление с помощью разрядной штанги.

2.5 Работа на аппарате АИМ-90Ц

Работа на аппарате аналогична тому, что описано в предыдущей лабораторной работе, в пунктах 2.3 – 2.6. При этом используются сменные ячейки с установленными в них образцами диэлектрических материалов.

3 Указания по технике безопасности

1. К работе на стендах допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности при выполнении работ в лабораториях кафедры «Теоретической и общей электротехники» и ознакомившиеся с настоящими методическими указаниями. Прохождение инструктажа по технике безопасности фиксируется преподавателем в специальном журнале.

2. Лабораторная работа должна выполняться не менее чем двумя студентами.

3. Перед началом работы необходимо убедиться в надежном заземлении корпуса аппарата.

4. Замену образца диэлектрика производят после отключения аппарата сетевым выключателем.

5. По окончании испытания или при перерыве в работе установку отключают от напряжения питания.

4. Порядок выполнения работы

4.1 Исследование электрической прочности твёрдого диэлектрика

Пробой твёрдых диэлектриков производится в специальной измерительной ячейке, снабженной прижимными электродами. Чтобы исключить перекрытие между электродами, твёрдые диэлектрики испытывают на пробой в жидком диэлектрике.

Вначале подготавливают образцы размером 50х50 мм в необходимом количестве. Исходные данные для расчёта количества образцов. Испытуемые образцы твёрдых диэлектриков задаются преподавателем. Толщина образца измеряется и записывается в таблицу. 2.1.

Испытания на пробой, выполняются в порядке, $E_{пр}$ по формуле (1.1), среднеквадратическое отклонение и среднее значение пробивного напряжения по формулам (2.7) и (2.8) и полученные результаты заносятся в таблицу. 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты исследования твердого диэлектрика

Твердый диэлектрик _____, $d =$ _____ мм Скорость подъема напряжения _____ кВ/с, окружающая среда _____							
Величина	Опыт №1						
№ пробоя	1	2	3	4	5	$U_{пр\ ср}$, кВ	
$U_{пр}$, кВ						σ , кВ	
$E_{пр}$, кВ/мм						$E_{пр\ ср}$, кВ	
Величина	Опыт №2						
№ пробоя	1	2	3	4	5	$U_{пр\ ср}$, кВ	
$U_{пр}$, кВ						σ , кВ	
$E_{пр}$, кВ/мм						$E_{пр\ ср}$, кВ	

4.2 Содержание, форма и правила оформления отчета по лабораторной работе

Каждый студент, выполнивший лабораторную работу, должен оформить отчет и предоставить его преподавателю.

Отчет должен содержать:

1. Название и цель работы.
2. Приборы и материалы, применяемые в лабораторной работе.
3. Таблицы экспериментальных и расчетных данных.
5. Выводы по результатам работы, в которых должна быть дана оценка исследуемых явлений, подтверждение в выполнении законов, объяснение характера кривых.

Отчет должен иметь титульный лист с указанием Ф.И.О. студента, номера группы и даты выполнения работы.

5. Контрольные вопросы

1. Импульсный (электрический пробой) твердых диэлектриков.
2. Электротепловой пробой твердых диэлектриков.
3. Ионизационный (электрохимический) твердых пробой диэлектриков.
4. Влияние строения диэлектриков на их электрическую прочность.
5. Влияние полярности молекул диэлектрика на его электрическую прочность.
6. Влияние температуры диэлектрика на его электрическую прочность.
7. Зависимость электрической прочности твердых диэлектриков от времени приложения напряжения.
8. Зависимость электрической прочности твердых диэлектриков от их толщины.
9. Системы электродов для испытания электрической прочности диэлектриков.
10. Температурная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков.
11. Факторы, влияющие на развитие электротеплового пробоя
12. Факторы, влияющие на развитие ионизационного пробоя.

13. К какому классу твердых диэлектриков относится полиэтилен.
14. К какому классу твердых диэлектриков относится резина.
15. К какому классу относится диэлектрик текстолит.
16. К какому классу твердых диэлектриков относится стеклолакоткань.

Лабораторная работа №3
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ТВЕРДЫХ
ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: Формирование у студента компетенций ПК-6, ПК-37 ПК-44, ПК-45. Для этого целесообразно изучить механизмы поляризации и диэлектрические потери в электроизоляционных материалах, приборы для измерения ёмкости и тангенса угла диэлектрических потерь изделий.

1. Теоретическое обоснование

В диэлектрике, помещённом в электрическое поле, происходит процесс поляризации. Явление поляризации диэлектрика вызывается смещением электрических зарядов на ограниченные расстояния под действием сил внешнего и внутреннего электрических полей. Поляризация бывает безынерционная (электронная, ионная), не сопровождающаяся потерями энергии, и инерционная (релаксационная), вызванная такими перемещениями электронов, ионов и дипольных молекул, которые сопровождаются значительными потерями энергии в диэлектрике.

На переменном напряжении с угловой частотой ток I через конденсатор с идеальным диэлектриком (т.е. без потерь) опережает по фазе напряжение U на угол $\pi/2$. Наличие диэлектрических потерь в конденсаторе с реальным диэлектриком приводит к тому, что ток опережает напряжение на угол $\varphi < \pi/2$ (рисунок 3.1).

Угол δ , дополняющий угол сдвига фаз между током и напряжением до $\pi/2$ называется углом диэлектрических потерь.

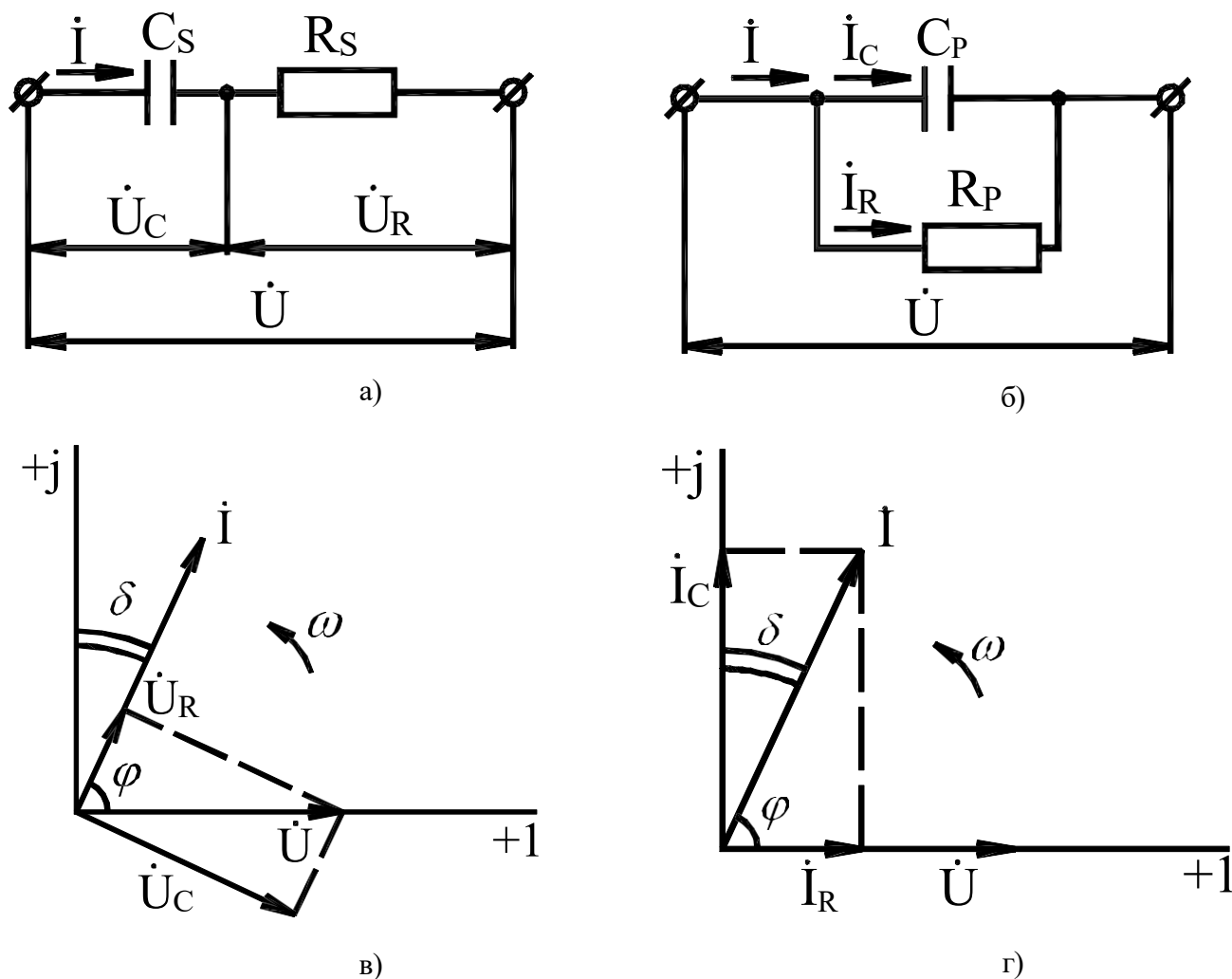


Рисунок 3.1 – Последовательная и параллельная схемы замещения диэлектрика с потерями и их векторные диаграммы

Рассмотрим наиболее распространённые эквивалентные схемы замещения диэлектрика с потерями: последовательную (рисунок 3.1, а) и параллельную (рисунок 3.1, б). В последовательной схеме замещения сумма активной U_R и реактивной U_C составляющих напряжения даёт приложенное напряжение U .

Здесь

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{U_R}{U_C} = \frac{IR_s}{I/(\omega C_s)} = \omega C_s R_s, \quad (3.1)$$

а мощность диэлектрических потерь

$$P_a = \frac{U^2 \omega C_s \operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}. \quad (3.2)$$

В параллельной схеме замещения сумма активной I_R и реактивной I_C составляющих тока даёт ток через диэлектрик I .

Здесь

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{U/R_P}{U\omega C_P} = \frac{1}{\omega C_P R_P}. \quad (3.3)$$

а мощность диэлектрических потерь

$$P_a = U^2 \omega C_P \operatorname{tg} \delta. \quad (3.4)$$

Поскольку $C_S \approx C_P \approx C$, а $\operatorname{tg} \delta \ll 1$, то для обеих схем замещения

$$P_a = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta. \quad (3.5)$$

Если потери в конденсаторе с диэлектриком обусловлены главным образом сопротивлением подводящих проводов с сопротивлением самих электродов, то для анализа используется последовательная схема замещения. В этом случае диэлектрические потери

$$P_a = U^2 \omega C_P \operatorname{tg} \delta = U^2 \omega^2 C^2 R_s \quad (3.6)$$

возрастают пропорционально квадрату частоты.

Если потери в диэлектрике обусловлены высокой сквозной проводимостью, то используют параллельную схему замещения. В этом случае диэлектрические потери

$$P_a = U^2 \omega C_P \operatorname{tg} \delta = \frac{U^2}{R_P} \quad (3.7)$$

не зависят от частоты.

Основные методы определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь материалов: мостовые ($10^{-2} \dots 10^3$ Гц), резонансные ($10^3 \dots 10^8$ Гц) и волновые ($10^9 \dots 10^{10}$ Гц).

2. Аппаратура, оборудование и материалы

Лабораторная установка создана на базе высоковольтного автоматического моста переменного тока СА-7100-3 (рисунок. 3.2), объектом исследований являются различные образцы твердых диэлектриков.

2.1 Устройство и работа лабораторной установки

Основные составные части моста СА-7100-3 и выполняемые ими функции.

Структурная схема моста приведена на рисунке 3.2.

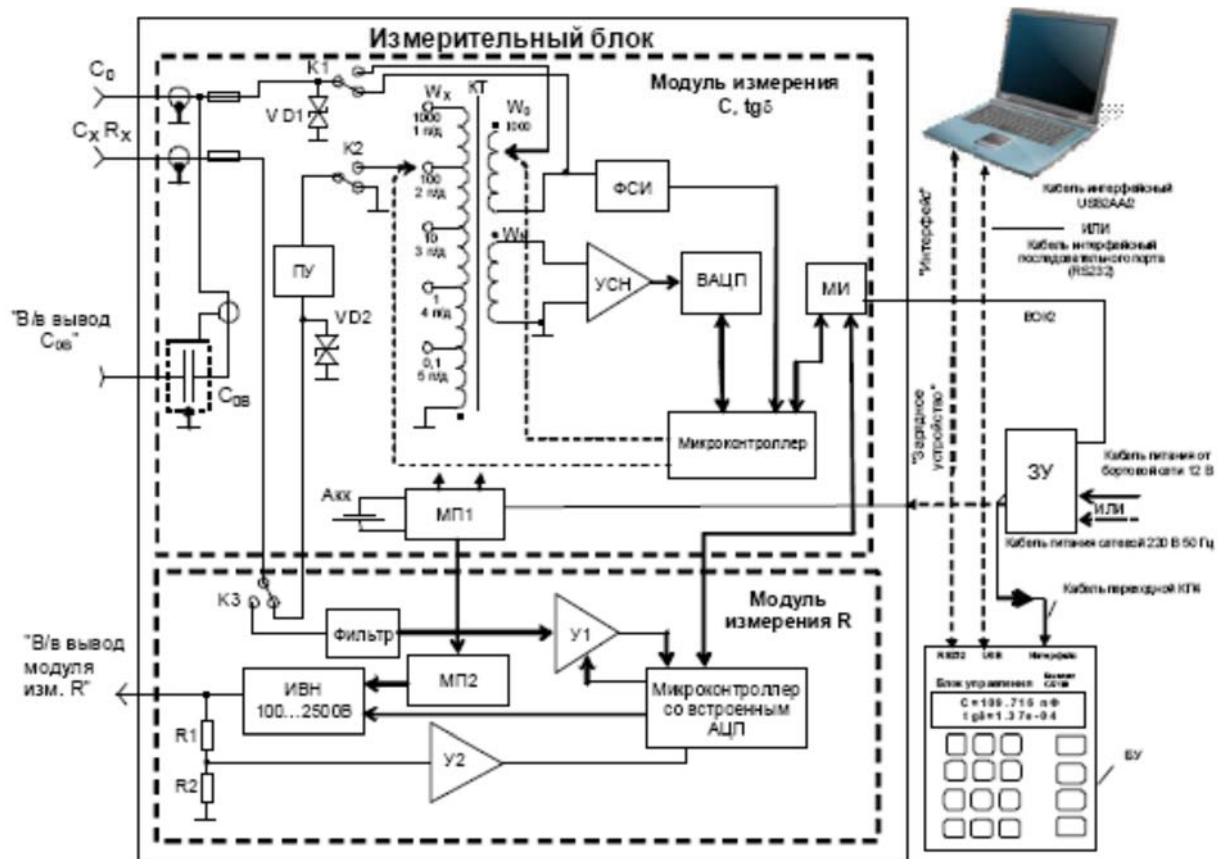


Рисунок 3.2 – Структурная схема моста СА-7100-3

На рисунке 3.2 приняты следующие обозначения: КТ – компаратор токов; ФСИ – формирователь синхроимпульсов; УСН – усилитель сигнала неравновесия; ВАЦП – вектормерный аналого-цифровой преобразователь; ПУ – пороговое устройство; МИ – модуль интерфейса; МП1, МП2 – модули питания; АКК – свинцово-кислотный аккумулятор; ЗУ – зарядное устройство; У1 – усилитель с переменным коэффициентом усиления; У2 – усилитель; ИВН – источник высокого напряжения; «Высоковольтный вывод C_0 » – высоковольтный вывод встроенного эталонного конденсатора; «Высоковольтный вывод модуля изм. R » – высоковольтный вывод модуля измерения R ; C_0 – разъем для подключения внешнего эталонного

конденсатора; C_x – разъем для подключения объекта измерения.

БУ (Блок управления) предназначен для управления процессом измерения, а также для диалога оператора с Мостом.

ЗУ (Зарядное устройство) обеспечивает формирование питающего напряжения *БУ*, преобразование электрических сигналов в оптические, а также используется для заряда аккумулятора.

БУ и *ЗУ* размещаются на рабочем месте оператора, а Блок измерительный располагается в огражденной высоковольтной зоне.

Связь *БУ*, *ЗУ* и Блока измерительного осуществляется через полностью диэлектрический волоконно-оптический кабель, что позволяет обеспечить безопасность персонала. В *БУ* предусмотрены последовательные интерфейсные порты для связи с ПК (RS232 и USB). При использовании Моста с ПК расширяются диалоговые возможности прибора, а также возможности по сохранению и дальнейшей обработке результатов измерений стандартными программами.

МИ (модуль интерфейса) осуществляет функцию преобразования оптических сигналов в электрические.

МП1 (модуль питания) служит для формирования питающих напряжений модуля измерения C , $tg\delta$, а также обеспечивает контроль заряда аккумулятора.

КТ (компаратор токов), внешний эталонный конденсатор (C_0) (или встроенный эталонный конденсатор $C_{0в}$) и объект измерения (C_x) образуют мостовую схему измерения.

УСН (усилитель сигнала неравновесия) усиливает сигнал неравновесия до уровня, необходимого для эффективной работы ВАЦП.

ВАЦП (вектормерный аналого-цифровой преобразователь) представляет собой комбинацию двух синхронных детекторов с взаимно квадратурными опорными колебаниями и двух АЦП, подключенных к их выходам. Значения кодов, считываемых микроконтроллером с указанных АЦП, пропорциональны соответствующим квадратурным составляющим сигнала неравновесия.

Микроконтроллер осуществляет преобразование команд, поступающих из *БУ*, в сигналы управления узлами модуля измерения C , $tg\delta$, а также передает в *БУ* через

ВОК2 (волоконно-оптический кабель) значения кодов, вырабатываемых АЦП, информацию о перегрузке входных цепей по току и о разряде аккумулятора.

КТ содержит обмотки W_X и W_0 , через которые протекают сравниваемые токи (ток эталонного конденсатора и ток объекта измерения) и обмотку W_N , которая служит для выделения сигнала неравновесия. В зависимости от выбранного поддиапазона измерения ток объекта измерения (1 п/д-5 п/д) поступает на один из выводов обмотки W_X (на рисунке показано положение переключателя поддиапазонов, соответствующее 2 п/д измерения). 5 п/д реализован с помощью дополнительного двухступенчатого трансформатора тока, который не показан на схеме. Число витков обмотки W_0 может меняться от 1 до 1000. Изменением количества витков этой обмотки осуществляется уравнивание мостовой цепи в пределах поддиапазона измерения.

ФСИ (формирователь синхроимпульсов) вырабатывает импульсы, синхронные с измерительным сигналом. Период данных импульсов измеряется с помощью микроконтроллера. Благодаря этому формируемые им опорные колебания для синхронных детекторов ВАЦП когерентны с токами, сравниваемыми КТ.

Стабилитроны VD1, VD2, коммутаторы K1 и K2, а также предохранители предназначены для защиты измерительной цепи от перегрузок по току. Коммутатор K3 обеспечивает переключение сигнала от измеряемого объекта, в зависимости от режима работы (измерение C , $\operatorname{tg} \delta$ или измерение R).

ПУ (пороговое устройство) обеспечивает отключение Блока измерительного при превышении допустимого значения силы тока в канале C_X .

Фильтр повышает помехозащищенность схемы, фильтруя помехи промышленной сети.

Усилитель с переменным коэффициентом усиления У1 усиливает измеряемый сигнал до уровня, необходимого для эффективной работы АЦП (аналого-цифровой преобразователь).

Усилитель У2 совместно с делителем R1, R2 обеспечивает необходимый уровень измеряемого напряжения для АЦП.

ИВН (источник высокого напряжения) вырабатывает высокое напряжение

постоянного тока, уровень которого регулирует микроконтроллер.

Модуль питания МП2 обеспечивает питание цепей модуля измерения R.

Микроконтроллер со встроенным АЦП осуществляет преобразование команд, поступающих из БУ, в сигналы управления узлами модуля измерения R, аналого-цифровое преобразование измеряемых сигналов и передачу полученных кодов в БУ через ВСК2.

Основой процесса измерения $C, tg\delta$ является вариационный метод. Используемая в модуле измерения $C, tg\delta$ разновидность вариационного метода измерения предусматривает изменение (вариацию) измеряемой величины (отношения токов) на известное с необходимой точностью значение. Разность значений измеряемой величины до и после вариации используется в качестве калибровочного сигнала. Вычисления, необходимые для получения результата, осуществляет процессор, размещенный в Блоке управления.

Процесс измерения $C, tg\delta$ можно условно разделить на следующие основные этапы:

- 1) выбор чувствительности и измерение рабочего напряжения;
- 2) выбор п/д;
- 3) уравнивание измерительной цепи в пределах п/д;
- 4) измерение значения остаточного сигнала неравновесия и "нулей" прибора (при отключенных с помощью коммутаторов K1 и K2 сравниваемых токах);
- 5) вычисление результата измерения по равновесным значениям декадных коммутаторов и значению остаточного сигнала неравновесия;
- 6) коррекция результата с учетом влияния сопротивлений подводящих проводов, обмоток и коммутаторов в цепи объекта измерения и эталонного конденсатора.

Выбор чувствительности осуществляется изменением коэффициента передачи УСН. Смена п/д осуществляется переключением числа витков обмотки W_x , а уравнивание в пределах п/д - переключением витков обмотки W_0 . После уравнивания с помощью ВАЦП измеряется остаточный сигнал неравновесия.

Используя результат этого измерения, равновесные значения числа витков обмоток КТ, а также значения емкости и тангенса угла потерь C_0 , БУ производит

вычисление и выводит на экран значения емкости и тангенса угла потерь объекта измерения и действующего значения первой гармоники рабочего напряжения и его частоты.

В основе процесса измерения R лежит метод вольтметра-амперметра, т.е. значение сопротивления рассчитывается, исходя из результатов измерений приложенного напряжения и тока, протекающего через объект измерения.

Процесс измерения сопротивления с помощью модуля измерения R включает следующие основные этапы:

- 1) измерение "нулей" модуля измерения R ;
- 2) установка постоянного напряжения, прикладываемого к объекту при измерении сопротивления, U_R ;
- 3) выбор п/д;
- 4) измерение тока и напряжения;
- 5) расчет сопротивления.

Смена п/д осуществляется переключением коэффициента усиления усилителя $У1$.

БУ выполняет расчет результата и вывод на экран значения сопротивления и значения напряжения, при котором производилось измерение.

2.2 Дополнительные устройства

Расширитель диапазона СА7150 (далее – Расширитель СА7150) предназначен для расширения диапазона измерения емкости Моста за счет прецизионного преобразования тока в цепи объекта измерения (6-7 п/д). Подключение к объекту измерения происходит по четырехзажимной схеме.

Устройство согласования автоматизированное СА7140 совместно с Мостом осуществляет дифференциальный контроль изоляции объектов (например, трансформаторов тока), находящихся под рабочим напряжением, а также выполняет контроль параметров защитных резисторов устройств присоединения. Процесс измерения полностью автоматизирован.

Коммутатор высоковольтный СА7161 (далее – Коммутатор СА7161) предназначен для переключения вариантов измерительных схем ("прямая" - "инверсная"), а также для переключения режимов измерений " C , $tg\delta$ " $\leftrightarrow$ " R " в измерительной цепи Моста СА7100-3.

Источник переменного рабочего напряжения (далее – ИПРН) предназначен для формирования рабочего напряжения при измерении тангенса угла потерь и емкости. ИПРН обеспечивает преобразование сетевого напряжения 220 В 50 Гц в напряжение от 1 до 10 кВ. Также ИПРН выполняет поворот фазы рабочего напряжения на 180° при реализации метода "двух отсчетов".

Устройство тестирующее СА7135 (далее – Устройство СА7135) предназначено для проверки работоспособности Моста в ручном и автоматическом режимах. В состав Устройства СА7135 входят 16 мер емкости и 2 меры сопротивления. При подключении Устройства СА7135 к Мосту на входах Моста имитируются необходимые измерительные сигналы, которые обеспечивают проверку работоспособности Моста.

ИПРН, Блок измерительный и Коммутатор СА7161 для удобства транспортирования на малые расстояния может быть размещен на тележке.

2.3 Конструкция моста

Базовый комплект моста состоит из:

- Блока измерительного;
- Блока управления (БУ);
- Зарядного устройства (ЗУ).

На рисунке 3.3 показан внешний вид передней панели и верхней стенки Блока измерительного, а на рисунке 3.4 – внешний вид БУ.

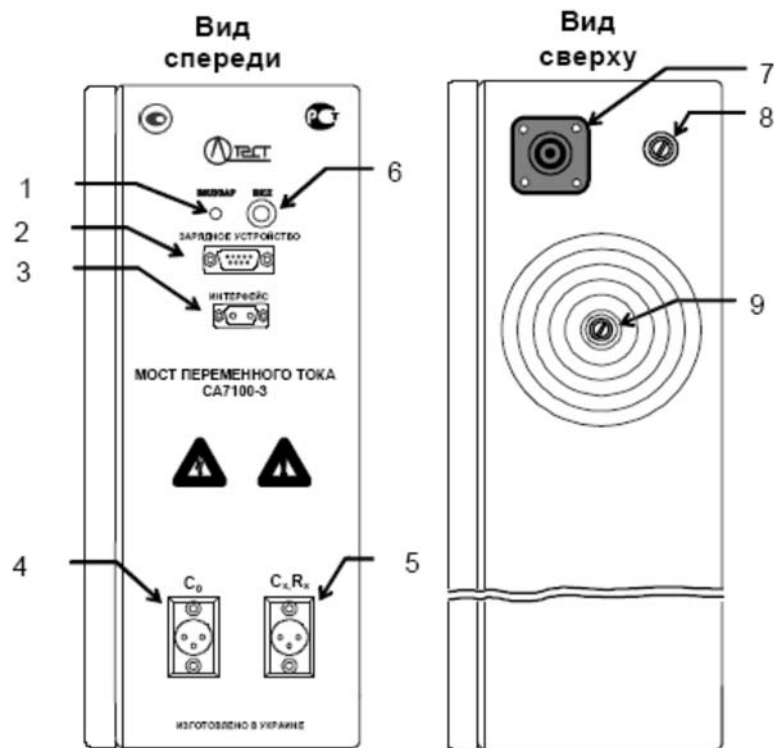


Рисунок 3.3 – Внешний вид передней панели и верхней стенки Блока измерительного.

На рисунке 3.3 приняты следующие обозначения: 1 – индикатор включения питания Блока измерительного и контроля заряда аккумулятора; 2 – разъем для подключения внешних устройств (устройства CA7135, коммутатора CA7161 и т.п.) или ЗУ при заряде аккумулятора; 3 – разъем для подключения ВОК2 или ВОК1 при наличии ИПРН; 4 – разъем для подключения внешнего эталонного конденсатора; 5 – разъем для подключения объекта измерения; 6 – кнопка включения питания; 7 – высоковольтный вывод модуля измерения R (Мост CA7100-3); 8 – корпусной зажим; 9 – высоковольтный вывод встроенного эталонного конденсатора (мосты CA7100-2, CA7100-3).

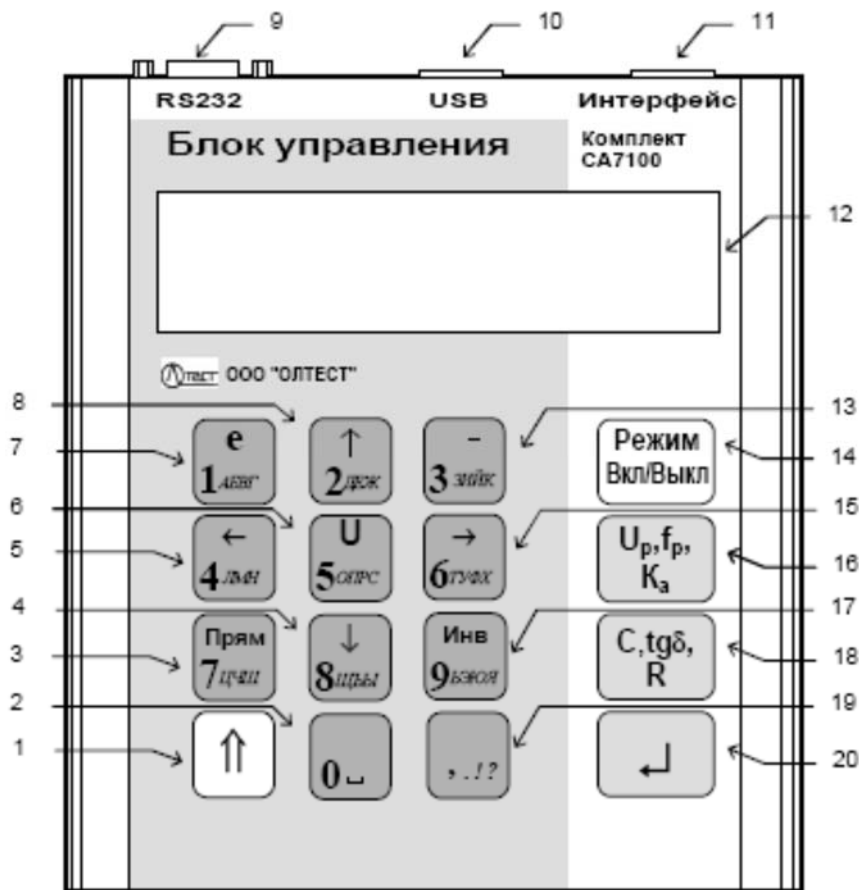


Рисунок 3.4 – Внешний вид БУ

На рисунке 3.4 приняты следующие обозначения: 1 – кнопка для включения регистра (для кнопок с двойным назначением); 2 – кнопка для ввода символов "О" и "i_1"; 3 – кнопка для включения «прямой» схемы измерений и ввода символов "7", "Ц", "Ч", "Ш"; 4 – кнопка для ввода символов "8", "Щ", "Ъ", "Ы" и для перемещения курсора; 5 – кнопка для ввода символов "4", "Л", "М", "Н" и для перемещения курсора; 6 – кнопка для ввода символов "5", "О", "П", "Р", "С" и выбора величины устанавливаемого переменного напряжения при измерении C и $\text{tg}\delta$ или постоянного напряжения при измерении R ; 7 – кнопка для ввода символов "1", "А", "Б", "В", "Г" и для ввода основания степени (e); 8 – кнопка для ввода символов "2", "Д", "Е", "Ж" и для перемещения курсора; 9 – разъем RS232 для подсоединения ПК; 10 – разъем USB для подсоединения ПК; 11 – разъем для подключения ЗУ; 12 – двухстрочный ЖК-индикатор для вывода информации; 13 – кнопка для ввода символов "3", "З", "И", "Й", "К" и для ввода знака "-"; 14 – кнопка для включения/выключения моста и переключения режимов; 15 – кнопка для ввода символов "6", "Г", "У", "Ф", "Х" и для

перемещения курсора; 16 – кнопка для включения режима измерения напряжения U_P , частоты f_P и коэффициента абсорбции K_a ; 17 – для включения «инверсной» схемы измерений и ввода символов "9", "Ъ", "Э", "Ю", "Я"; 18 – кнопка для измерения C , $tg\delta$ и R ; 19 – кнопка для ввода знаков препинания ",", ".", "!", "?"; 20 – кнопка для входа в меню и подтверждения ввода.

2.4 Подготовка моста к работе и включение питания

1. Соединить составные части моста в соответствии с рисунком 3.5 (таблица 3.1), для этого:

1) присоединить корпусной зажим Блока измерительного и в/в вывод эталонного конденсатора к защитному заземлению;

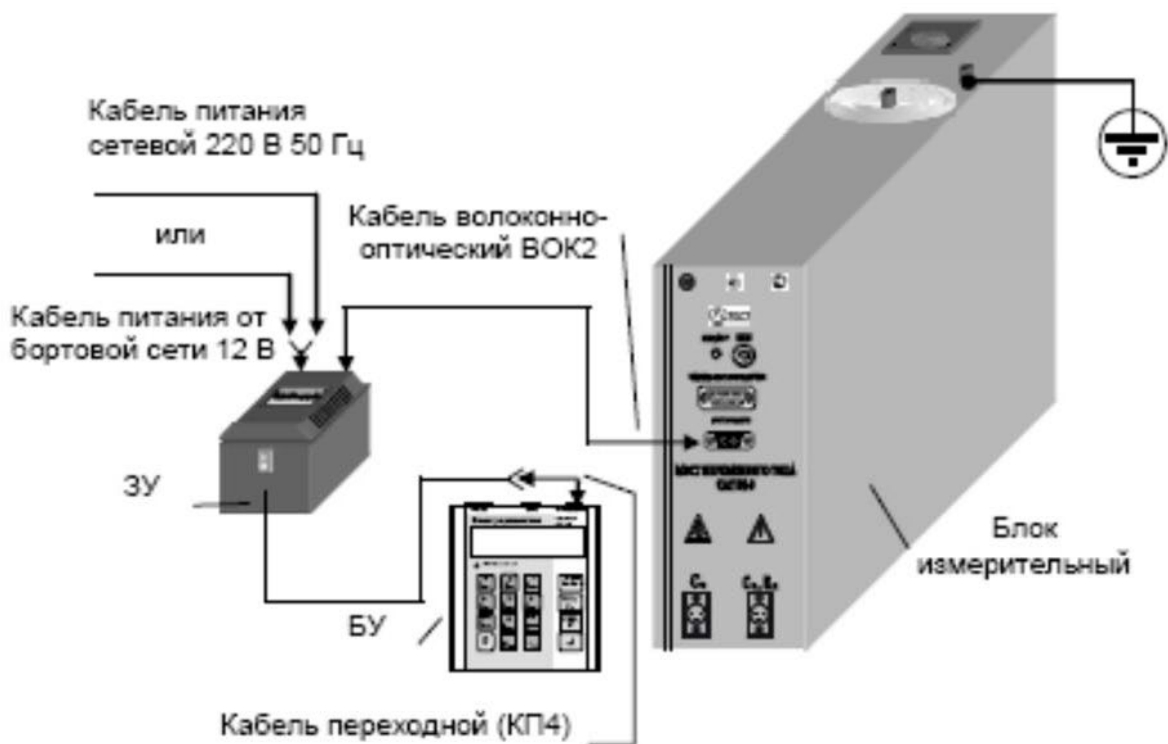


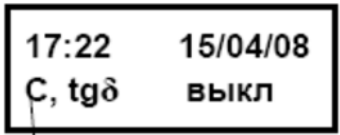
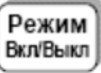
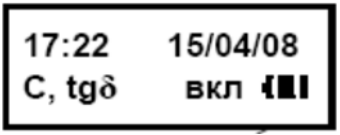
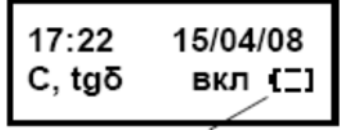
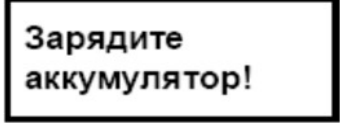
Рисунок 3.5 – Схема соединения блоков моста

2) подключить ЗУ к БУ, присоединив кабель ЗУ к кабелю переходному (КП4), а кабель переходной к разъему БУ "Интерфейс". Не проводить это подсоединение при включенном ЗУ!

3) соединить ЗУ с Блоком измерительным, используя волоконно-оптический

кабель (BOK2), подключив его разъемы к разъему ЗУ "БОК" и разъему Блока измерительного "Интерфейс", соответственно.

Таблица 3.1 – Действия по включению моста СА-7100-3

№ п/п	Действия	Вид экрана БУ
1	Включить питание БУ. <i>При питании от сети 220 В 50 Гц:</i> 1) подключить к ЗУ кабель питания 220 В 50 Гц и установить выключатель "I/O", размещенный на ЗУ, в положение "О"; включить кабель питания сетевой в сеть 220 В 50 Гц;	
2	Включить питание БУ от сети 220 В 50 Гц, установив выключатель "I/O" в положение "I", выключатель должен подсветиться.	 Информация о включенном режиме измерения ("C,tgδ" или "R").После включения Моста устанавливается режим последнего сеанса работы.
2	Включить Мост, для чего на БУ нажать кнопку  <i>Состояние заряда аккумулятора. В данном случае аккумулятор заряжен.</i>	После включения Моста на экране появится основное окно:  Состояние заряда аккумулятора. В данном случае аккумулятор заряжен
3	При появлении на экране БУ одного из сообщений о разряде аккумулятора произвести заряд аккумулятора в соответствии с указаниями раздела 2.4.	 Символ мигает! Аккумулятор разряжен. Работа возможна в течение не менее 20 минут. Зарядите аккумулятор!  Аккумулятор полностью разряжен. Мост не включается.
4	Убедиться в правильности установки даты и времени. Если требуется корректировка, то выполнить указания раздела 2.4	

5	Выбрать формат отображения $tg\delta$ (в относительных единицах или в процентах) в соответствии с указаниями раздела 2.4.	
6	Мост готов к работе. Для предотвращения неоправданного разряда аккумулятора предусмотрено его автоматическое отключение, если в течение 25 минут не производились измерения.	

Заряд аккумулятора можно проводить только при температуре окружающей среды от 0 до +40 °С, как от сети 220 В 50 Гц, так и от бортовой сети автомобиля 12 В.

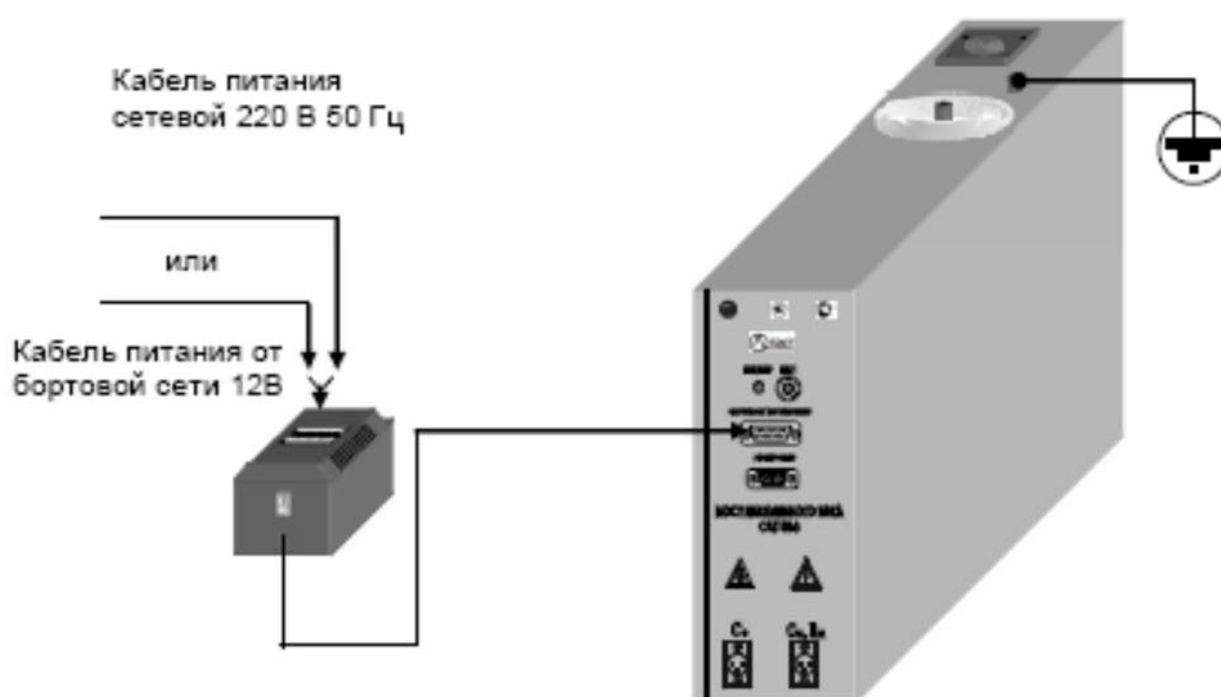


Рисунок 3.6 – Схема включения моста при зарядке аккумулятора

Таблица 3.2 – Действия по заряду аккумулятора моста СА-7100-3

№ п/п	Действия	Вид индикатора на Блоке измерительном
----------	----------	--

1	Собрать схему для заряда аккумулятора в соответствии с рисунком 3. Присоединить корпусной зажим Блока измерительного и в/в вывод эталонного конденсатора к защитному заземлению; присоединить кабель ЗУ к разъему "ЗАРЯДНОЕ УСТРОЙСТВО" Блока измерительного. Не проводить это подсоединение при включенном ЗУ! подключить к ЗУ кабель питания сетевой 220 В 50 Гц и установить переключатель "I/O" в положение "О"; включить кабель питания сетевой 220 В 50 Гц в розетку сети 220 В 50 Гц.	
2	Начать заряд аккумулятора, установив выключатель "I/O" в положение "I"	Индикатор "ВКЛ/ЗАР" на передней панели Блока измерительного начнет мигать.
3	Время заряда полностью разряженного аккумулятора – 7 часов. Используемый в Мосте свинцово-кислотный аккумулятор не обладает эффектом памяти, который присущ щелочным аккумуляторам, и не требует специальных режимов для его обслуживания.	Прекращение мигания индикатора "ВКЛ/ЗАР" свидетельствует о полном заряде аккумулятора. При этом подача тока от ЗУ автоматически прекращается, что исключает возможность перезаряда аккумулятора и выход его из строя.
4	Отключить ЗУ от сети, для чего: установить выключатель "I/O" в положение "О"; отключить кабель питания сетевой от сети 220 В 50 Гц.	
5	Отключить ЗУ от Блока измерительного.	

Таблица 3.3 – Действия установке даты и времени

№ п/п	Действия	Вид экрана БУ
----------	----------	---------------

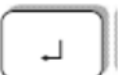
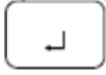
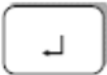
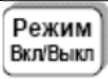
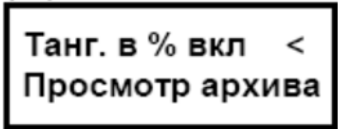
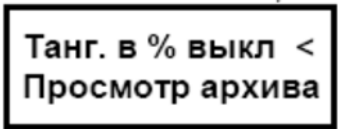
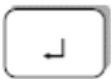
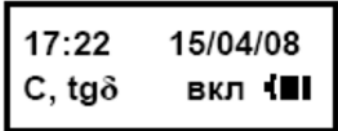
1	Войти в меню режимов и выбрать режим "Дата/Время": нажать кнопку  Используя кнопки  и  установить курсор на строку "Дата/Время".	Назв. объекта Дата / Время <
2	Включить режим "Дата/Время". для чего нажать кнопку 	Дата: 15/04/07 Время: 17:22:05
3	Ввести текущие дату и время: установить курсор на строку "Дата" или "Время", используя кнопки   или  ; ввести дату и время, используя кнопки   (после ввода цифры курсор автоматически перемещается на соседнее знакоместо, перемещение осуществляется циклически).	
4	Для возврата в основное окно на БУ нажать кнопку 	17:22 15/04/08 С, tgδ вкл {■}

Таблица 3.4 – Выбор формата отображения $tg\delta$

№ п/п	Действия	Вид экрана БУ
1	Войти в меню режимов и выбрать режим выбора формата (в относительных единицах или в процентах) отображения $tg\delta$: нажать кнопку  Используя кнопки  и  установить курсор на строку "Танг. в % выкл".	Танг. в % выкл < Просмотр архива
№ п/п	Действия	Вид экрана БУ
2	Выбрать формат отображения, для	Включен формат отображения

	чего нажать кнопку 	в процентах.  Включен формат отображения в относительных единицах. 
3	Для возврата в основное окно на БУ нажать кнопку 	

2.5 Работа с мостом при управлении от блока управления

Внимание! Для обеспечения безопасности персонала при подготовительных операциях к проведению измерений корпусной зажим и высоковольтный вывод эталонного конденсатора Блока измерительного должны быть соединены с защитным заземлением!

Измерение C и $tg\delta$ объекта при использовании встроенного эталонного конденсатора. Номинальное значение емкости встроенного эталонного конденсатора указано в руководстве по эксплуатации и равно 27,804 пФ.

Подключение оборудования для проведения измерений C и $tg\delta$. Подготовить мост к работе в соответствии с разделом 2.4.

Вставить заглушку экранирующую в разъем "C₀" Блока измерительного. Подключить оборудование для проведения измерений с помощью Моста по "прямой" (нормальной) или "инверсной" (перевернутой) схемам (рисунок 3.7, а, б) для этого: соединить высоковольтный вывод встроенного эталонного конденсатора и корпусной зажим моста с выходами вторичной обмотки испытательного трансформатора, если применяются кабели собственного изготовления, то их изоляция должна быть рассчитана на рабочее напряжение 10 кВ; соединить Мост и объект измерения.

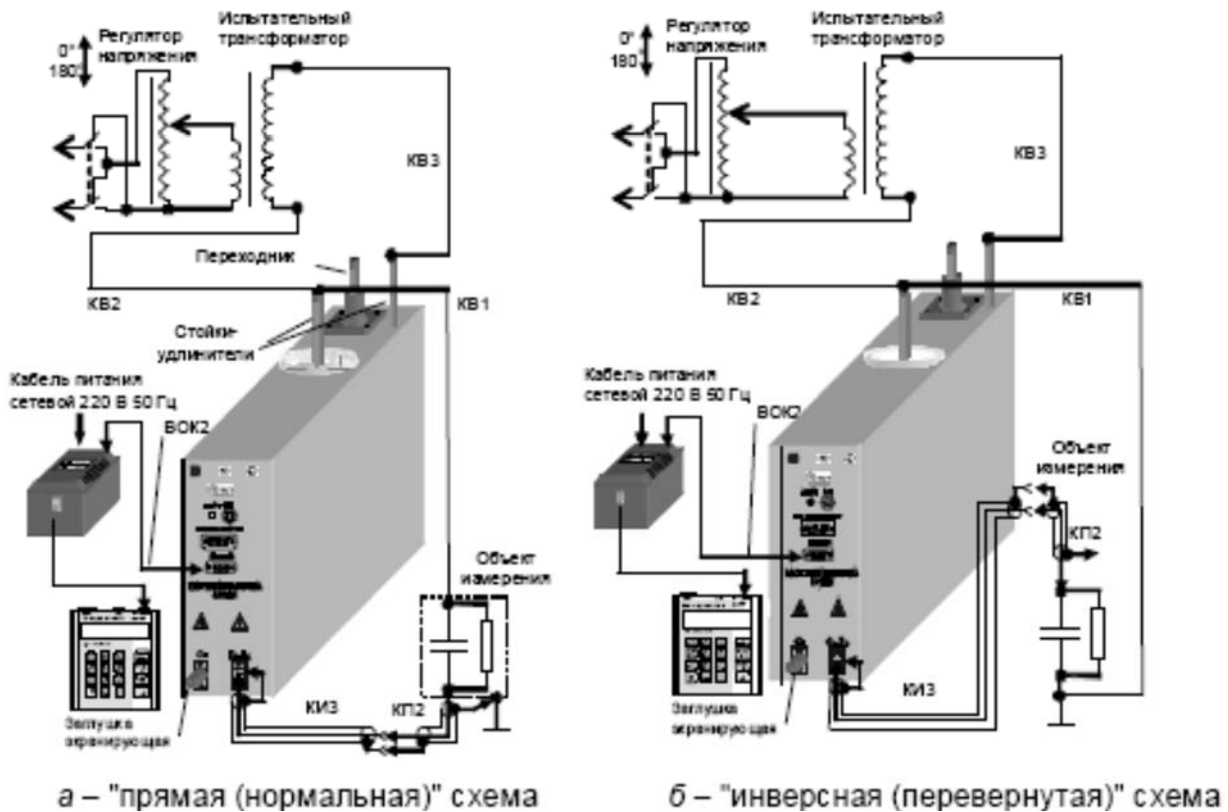


Рисунок 3.7 – Схема соединений моста СА-7100-3

при проведении измерений C и $tg\delta$

ВНИМАНИЕ! При измерении C и $tg\delta$ вывод модуля измерения R должен быть отключен от измерительной схемы! Невыполнение этого требования может привести к выходу из строя моста!

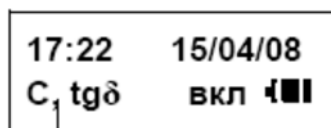
При измерениях по "перевернутой" схеме установить мост на изолирующую подставку, причем подставка должна быть рассчитана на рабочее напряжение.

Включение моста.

Включить питание в соответствии с п.2 таблицы 3.1 раздела 2.4.

Включить Мост, для чего нажать кнопку , появится один из вариантов основного окна на экране БУ:

Для СА7100-1, СА7100-2, СА7100-3

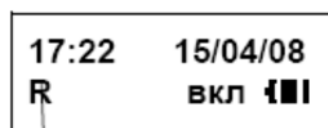


Установлен

режим измерения C и $tg\delta$

Для СА7100-3

или



Установлен

режим измерения R

Если в мосту СА7100-3 режим измерения C и $tg\delta$ не установлен, то установить

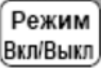
его, для чего нажать  + 

Таблица 3.5 – Измерение C и $tg\delta$ при отсутствии токов влияния

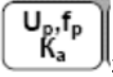
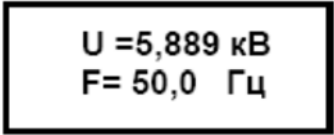
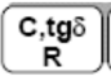
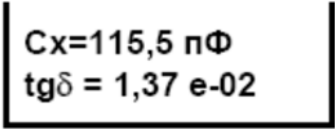
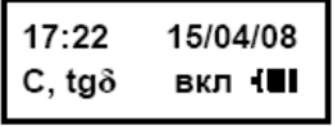
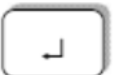
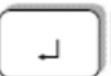
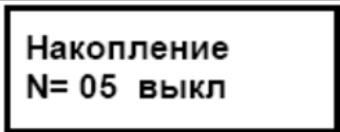
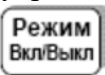
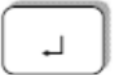
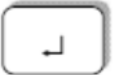
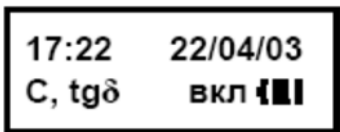
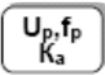
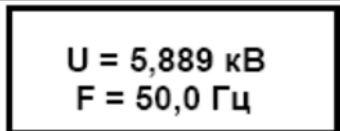
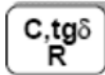
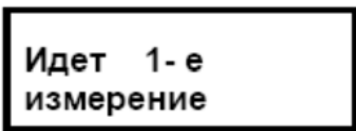
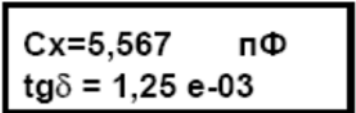
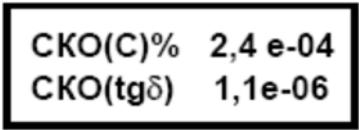
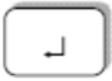
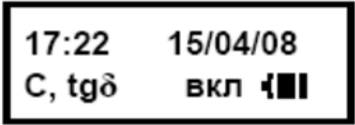
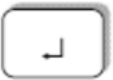
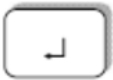
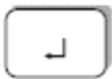
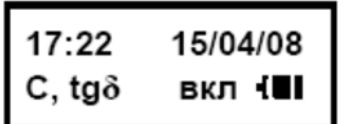
№ п/п	Действия	Вид экрана БУ
1	Отсоединить корпусной зажим Блока измерительного и высоковольтный вывод эталонного конденсатора от защитного заземления.	
2	Установить рабочее напряжение: нажать кнопку  ; отрегулировать рабочее напряжение, контролируя его значение и частоту по показаниям Моста на экране БУ.	Например: 
3	Измерить параметры объекта C и $tg\delta$: - нажать кнопку  ; - по окончании измерения на экране БУ появятся параметры объекта. Для проведения повторных измерений параметров C и $tg\delta$ этого же объекта повторить п.2 данной таблицы.	 
4	Для возврата в основное окно на БУ нажать кнопку 	

Таблица 3.6 – Измерение C и $tg\delta$ при отсутствии токов влияния в режиме накопления результатов

№ п/п	Действия	Вид экрана БУ
1	Войти в меню режимов и выбрать режим накопления: нажать кнопку  Используя кнопки  и  установить курсор на строку "Накопление".	
2	Войти в окно установок режима накопления, для чего нажать кнопку 	
3	Включить режим накопления и ввести число усредняемых измерений N: нажать кнопку  и ввести N (не менее 2 и не более 50), нажимая кнопки  и  и  По окончании ввода нажать кнопку 	 
4	Отсоединить корпусной зажим Блока измерительного и высоковольтный вывод эталонного конденсатора от защитного заземления.	
5	Установить рабочее напряжение: нажать кнопку  отрегулировать рабочее напряжение, контролируя его значение и частоту на экране БУ	
6	Измерить усредненные параметры объекта C и $tg\delta$: нажать кнопку  по окончании измерения на экране БУ появятся параметры объекта.	 Номер измерения будет меняться синхронно с прохождением каждого последующего измерения из запущенной серии. 

7	Отобразить статистические характеристики проведенной серии измерений, для чего нажать кнопку . Для возврата в предыдущее окно нажать кнопку . На экране появятся значения среднеквадратических отклонений емкости $СКО(C)$, в %, и тангенса $СКО(tg\delta)$.	
8	Для проведения повторных измерений параметров C и $tg\delta$ этого же объекта, повторить п.п. 5-6 данной таблицы.	
9	Закончить измерения, для чего на БУ нажать кнопку .	
10	Выключить режим накопления, если последующие измерения будут выполняться без накопления: Войти в меню режимов и выбрать режим накопления: нажать кнопку . Используя кнопки  и , установить курсор на строку "Накопление". нажать кнопку , а затем .	 
11	Для возврата в основное окно на БУ нажать кнопку .	

Измерение C и $tg\delta$ объекта при использовании внешнего эталонного конденсатора. Подключение оборудования для проведения измерений:

- 1) Подготовить Мост к работе в соответствии с разделом 2.4.
- 2) Собрать схему подключения оборудования для проведения измерений C и $tg\delta$ с помощью Моста по "прямой" (нормальной) или "инверсной" (перевернутой) схемам в соответствии с рисунком 3.8, а, б.

ВНИМАНИЕ! При измерении C и $tg\delta$ высоковольтного вывода модуля измерения $R11$ должен быть отключен от измерительной схемы! Невыполнение этого требования может привести к выходу из строя моста!

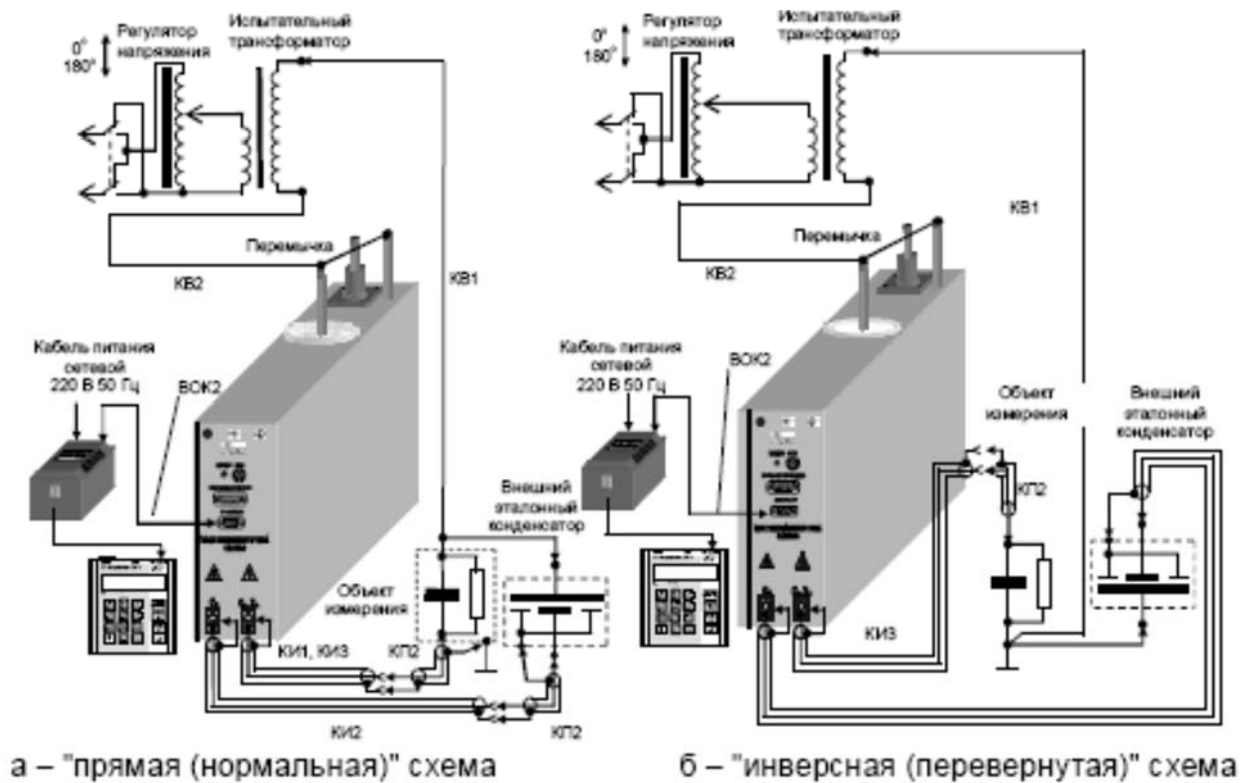


Рисунок 3.8 – Схема включения моста при использовании внешнего эталонного конденсатора

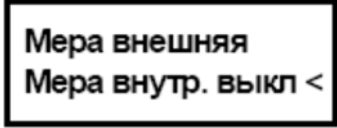
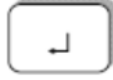
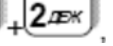
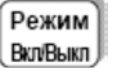
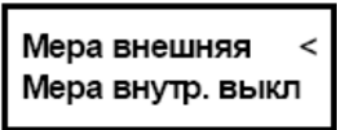
При проведении измерений по "перевернутой" схеме для подключения внешнего эталонного конденсатора рекомендуется использовать кабели из комплекта моста, а также кабели собственного изготовления. На рисунке 3.8 кабели собственного изготовления не поименованы. При этом внешняя изоляция измерительного экранированного кабеля собственного изготовления должна быть рассчитана на рабочее напряжение.

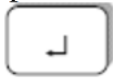
Соединить в/в вывод встроенного эталонного конденсатора с корпусным зажимом моста с помощью перемычки, входящей в комплект моста.

При измерениях по "перевернутой" схеме установить мост и эталонный конденсатор на изолирующие подставки, причем подставки должны быть рассчитаны на рабочее напряжение. Включить мост, выполнив указания раздела 2.4

При наличии в составе измерительной схемы коммутатора СА7161 это требование выполняется автоматически.

Таблица 3.9 – Ввод параметров внешнего эталонного конденсатора

№ п/п	Действия	Вид экрана БУ
1	Войти в меню режимов и установить режим ввода параметров эталонного конденсатора C_0: нажать кнопку  Используя кнопки  и  установить курсор на строку "Ввод C_0"; нажать кнопку 	
2	Отключить режим встроенного эталонного конденсатора, для чего: Используя кнопки  и  установить курсор на строку "Мера внутр. вкл"; нажать кнопку 	
3	Ввести паспортные параметры внешнего эталонного конденсатора используя кнопки установить курсор на строку "Мера внешняя"; нажать кнопку  перемещение курсора знакоместа: по строкам –  +  +  по знакоместам –  +  +  и  +  +  ввод значений: ВВОД 0–9 –   ввод "запятой" –  -ВВОД "-" –  +  -ввод "e" –  +  удаление предыдущего символа – 	

4	Для возврата в основное окно на БУ нажать кнопку 	17:22 15/04/08 C, tgδ вкл 
---	---	--

Измерение C и $tg\delta$ при использовании ИПРН. ИПРН предназначен для формирования рабочего напряжения при измерении тангенса угла потерь и емкости путем преобразования напряжения сети 220 В 50 Гц в напряжение от 1 до 10 кВ. Также ИПРН выполняет поворот фазы рабочего напряжения на 180° при реализации метода "двух отсчетов" (режим смены фаз).

Управление работой ИПРН осуществляется при помощи БУ Моста, что позволяет полностью автоматизировать процесс измерения тангенса угла потерь и емкости.

ИПРН может использоваться только в режиме измерений при использовании встроенного эталонного конденсатора.

Общий вид ИПРН показан на рисунке 3.9

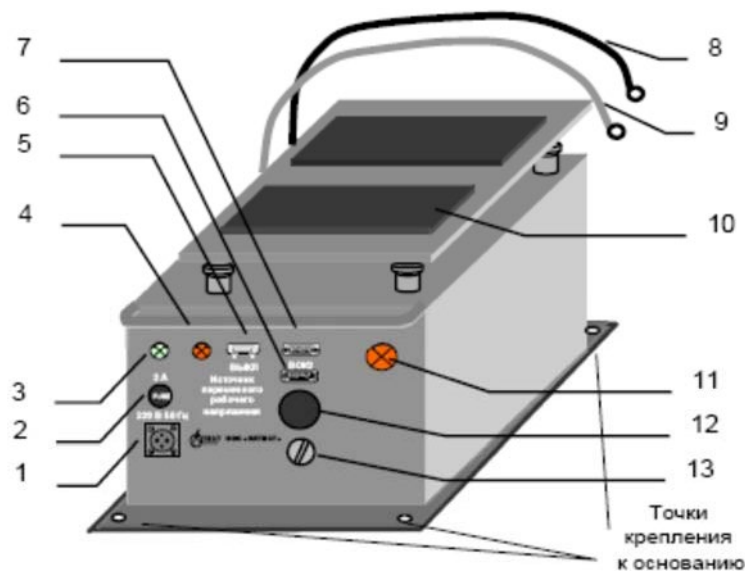


Рисунок 3.9 – Внешний вид ИПРН

На рисунке 3.9 приняты следующие обозначения: 1 – разъем для подключения кабеля питания ИПРН; 2 – предохранитель 2 А; 3 – индикатор "СЕТЬ" (включение питания ИПРН); 4 – индикатор "ОШИБКА" (загорается при неисправном

предохранителе 2 А); 5 – выключатель питания ИПРН; 6 – разъем для подключения кабеля волоконно-оптического ВОК1, идущего от Блока измерительного; 7 – разъем для подключения кабеля волоконно-оптического ВОК2, идущего от ЗУ; 8 – кабель для подключения к корпусному зажиму Блока измерительного; 9 – кабель для подключения к высоковольтному выводу встроенного эталонного конденсатора Блока измерительного; 10 – место для установки Моста в сумке укладочной; 11 – индикатор включения рабочего напряжения; 12 – устройство для подачи звукового сигнала при включении/выключении рабочего напряжения; 13 – зажим защитного заземления

Подключение оборудования и включение ИПРН.

Внимание! Подключение ИПРН выполнять только при отключенном кабеле питания ИПРН от сети 220 В 50 Гц!

Собрать схему, приведенную на рисунке 3.10.

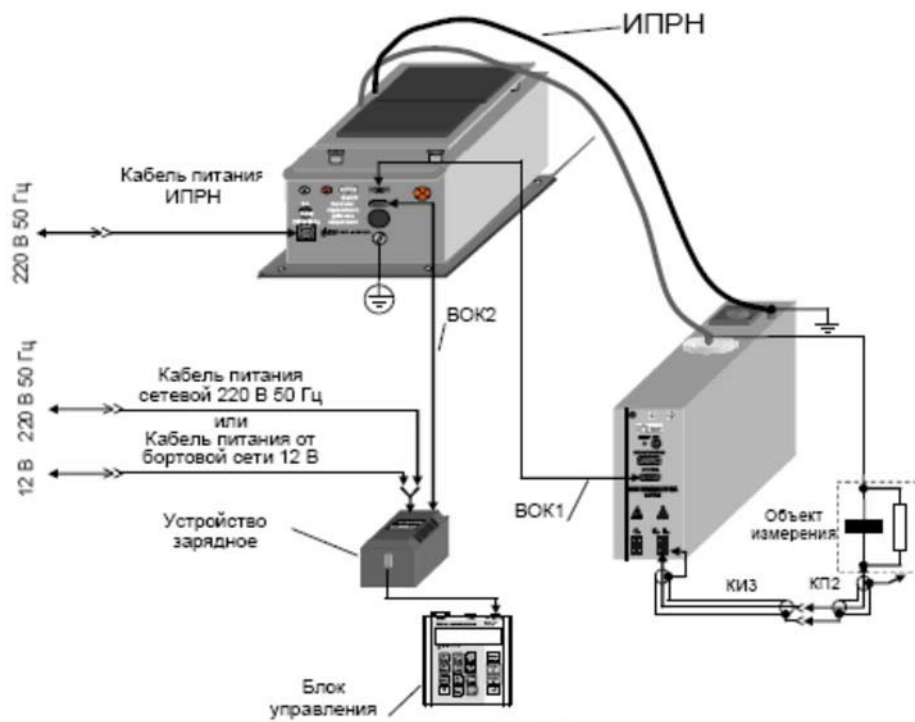
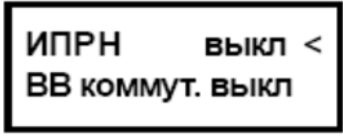
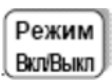
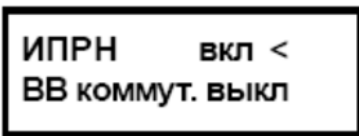


Рисунок 3.10 – Схема подключения ИПРН к мосту СА-7100-3

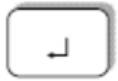
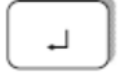
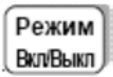
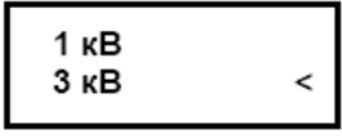
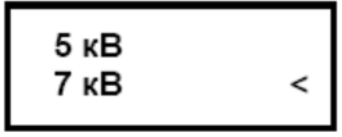
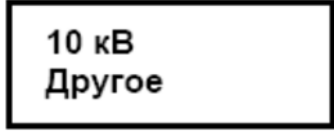
Включить Мост и установить режим измерения C и $tg\delta$ в соответствии с разделом 2.5. Подключить кабель питания ИПРН к сети 220 В 50 Гц.

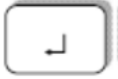
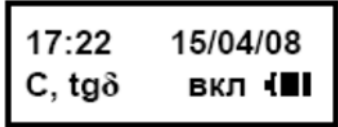
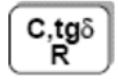
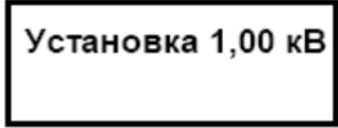
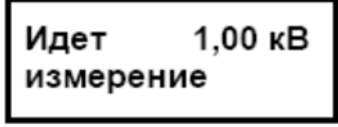
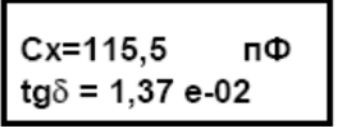
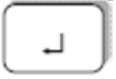
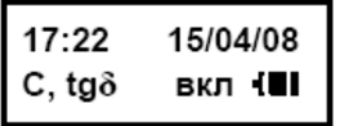
Таблица 3.10 – Включение ИРПН

№ п/п	Действия	Вид экрана БУ
1	Войти в меню режимов и установить режим ввода параметров эталонного конденсатора C_0: нажать кнопку  Используя кнопки  и  установить курсор на строку "ИПРН выкл".	
2	Включить ИПРН, для чего нажать кнопку .	

Измерения рекомендуется проводить в режиме накопления результатов при числе усредняемых значений $N = 5$.

Таблица 3.11 – Установка рабочего напряжения с помощью ИРПН

№ п/п	Действия	Вид экрана БУ
1	Выбрать значение рабочего напряжения, при котором будет выполняться измерение C и $tg\delta$. По умолчанию после включения ИПРН устанавливается значение рабочего напряжения равное 1 кВ.	
2	Для установки другого значения необходимо: нажать кнопку  Используя кнопки  и  выбрать значение напряжения. Можно выбрать фиксированные значения напряжения или с помощью пункта меню "Другое" ввести любое значение напряжения в диапазоне от 1 до 10 кВ. Если выбран пункт меню "Другое", нажать кнопку  и с помощью кнопок  и  ввести необходимое значение напряжения, в вольтах: перемещение курсора знакоместа  +  и  +  удаление предыдущего символа 	   

3	Для подтверждения выбора значения напряжения нажать кнопку 	
4	Измерить параметры объекта C и $tg\delta$: нажать кнопку 	 
5	По окончании измерения на экране БУ появятся параметры объекта.	
6	Для проведения повторных измерений параметров этого же объекта повторить п.4 данной таблицы.	
7	Для возврата в основное окно на БУ нажать кнопку 	

Измерение R объекта.

В этом режиме могут быть измерены:

1. сопротивление изоляции постоянному току R ;

2 сопротивление изоляции постоянному току R_{T1} , измеренное через время $T1$ после подачи постоянного напряжения U , и сопротивление изоляции постоянному току R_{T2} , измеренное через время $T2$ после подачи постоянного напряжения U .

По умолчанию $T1=15$ сек, $T2=60$ сек. Значения $T1$ и $T2$ могут быть установлены пользователем в диапазоне от 15 до 600 с, причем $T2$ должно быть больше $T1$.

По результатам измерений автоматически рассчитывается коэффициент абсорбции K_a

Подключение оборудования для проведения измерения R . Подготовить мост к работе в соответствии с разделом 2.4.

Внимание! В условиях большой напряженности электромагнитного поля вывод кабеля высоковольтного (КВ1), который подключается к объекту измерения, должен быть во время подключения соединен с защитным заземлением!

Собрать схему подключения оборудования для проведения измерения R с помощью моста в соответствии с рисунком 3.11.

ВНИМАНИЕ! К высоковольтному выводу модуля измерения R должен быть подключен только объект измерения, как показано на рисунке 3.11. На этот вывод категорически запрещена подача переменного напряжения относительно корпуса прибора. Невыполнение этого требования приведет к выходу из строя моста!

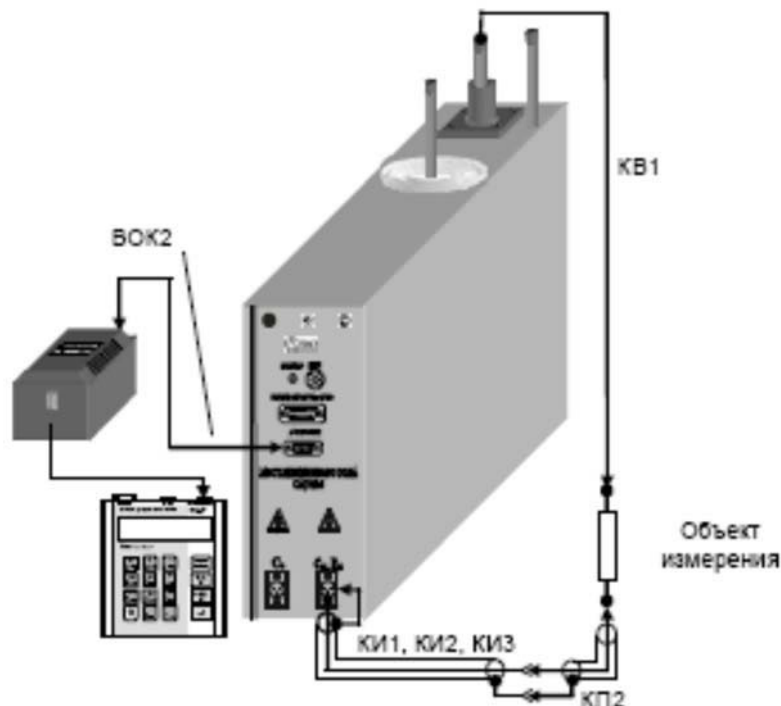
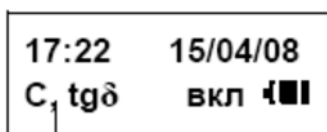


Рисунок 3.11 – Схема включения моста для измерения R .

2) Включить Мост, для чего нажать кнопку . Появится один из вариантов основного окна на экране БУ:

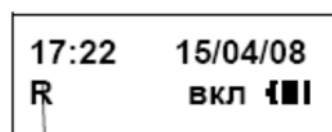
Для СА7100-1, СА7100-2, СА7100-3



Установлен
режим измерения C и $\text{tg}\delta$

Для СА7100-3

ИЛИ



Установлен
режим измерения R

Если в мосту СА7100-3 режим измерения R не установлен, то установить его,

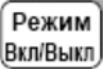
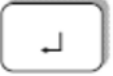
для чего нажать  + 

Таблица 3.12 – Измерения сопротивления объекта

№ п/п	Действия	Вид экрана БУ
1	Выбрать значение напряжение U, при котором будет произведено измерение R. По умолчанию, после включения Моста устанавливается значение 2500 В. Для выбора другого значения необходимо: Войти в режим выбора значения напряжения, при котором будет произведено измерение R, для чего нажать кнопку . Используя кнопки  и  установить выбранное значение напряжения.	
2	Можно выбрать фиксированные значения напряжения или с помощью пункта меню "Другое" ввести любое значение напряжения в диапазоне от 100 до 2500 В. Если выбран пункт меню "Другое", нажать кнопку  и с помощью кнопок  -  ввести необходимое значение напряжения, в вольтах: перемещение курсора знакоместа  +  и  +  удаление предыдущего символа 	 
3	Отсоединить корпусной зажим Блока измерительного и в/в вывод эталонного конденсатора от защитного заземления.	
4	Для установки напряжения нажать 	

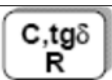
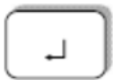
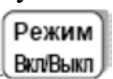
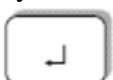
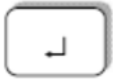
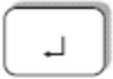
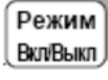
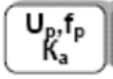
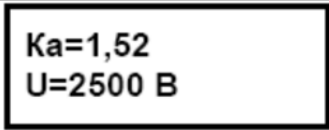
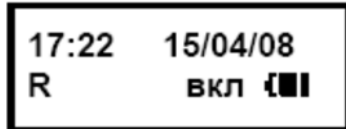
№ п/п	Действия	Вид экрана БУ
5	Измерить R , для чего нажать кнопку 	Идет измерение сопротивления $R=1,510\text{ГОм}$ $U=2500\text{В}$
6	Результат измерения R можно отобразить в мегаомах, для чего: нажать кнопку  Используя кнопки  и  установить курсор на строку "Рез. в МОм выкл"; нажать кнопку 	Запуск теста Рез. МОм выкл. < Запуск теста Рез. МОм вкл. <
7	Для возврата в основное окно нажать 	17:22 15/04/08 R вкл 

Таблица 3.13 – Измерение R с расчетом коэффициента абсорбции K_a

№ п/п	Действия	Вид экрана БУ
1	Установить напряжение, при котором будет произведено измерение R в соответствии с п.1 таблицы 3.12.	
2	Войти в меню режимов и выбрать режим выбора времени T_1 и T_2 измерения R: нажать кнопку  Используя кнопки  и  установить курсор на строку "Выбор T_1, T_2"; нажать кнопку 	Выбор T_1, T_2 < Выбор U

№ п/п	Действия	Вид экрана БУ
3	Установить отсчеты времени T1 и T2 измерения R, для чего: используя кнопки  и  установить курсор на нужный вариант; нажать кнопку  Можно выбрать фиксированные значения отсчетов времени или с помощью пункта меню "Другое" ввести любое значение в диапазоне от 15 до 600с, причем T2 должно быть больше T1. Если выбран пункт меню "Другое". нажать кнопку  перемещение курсора знакоместа: по строкам –  + , по знакоместам –  +  и  +  ввод значений: ВВОД 0–9 –   удаление предыдущего символа – 	T1=15с, T2=60с < T1=30с, T2=60с T1=60с, T2=600с < Другое T1=60 с < T2=600с
4	Для ввода заданных значений J нажать кнопку 	17:22 15/04/08 R вкл 
5	Отсоединить корпусной зажим Блока измерительного и высоковольтный вывод эталонного конденсатора от защитного заземления.	
6	Измерить значения R_{T1}, R_{T2} и K_a, для чего нажать 	Идет измерение сопротивления R=1,015 Гом U=2500 В T=43с

№ п/п	Действия	Вид экрана БУ
7	Просмотреть результаты измерения используя кнопки  и 	
8	Для возврата в основное окно нажать 	

Автоматическое коммутирование режимов измерений " C , $\text{tg}\delta$ " $\leftrightarrow$ " R " в измерительной цепи моста и схем измерений (Коммутатор СА7161).

В условиях большой напряженности электромагнитного поля для обеспечения устойчивой работы Моста корпусной зажим Блока измерительного во время коммутации должен быть соединен с защитным заземлением!

Коммутатор СА7161 предназначен для автоматического переключения вариантов измерительных схем ("прямая" - "инверсная") мостов СА7100-2 и СА7100-3, а также переключения режимов измерений " C , $\text{tg}\delta$ " $\leftrightarrow$ " R " Моста СА7100-3, установленных в передвижной лаборатории. Коммутатор СА7161 может использоваться только в режиме измерений при использовании встроенного конденсатора.

Обязательным условием применения Коммутатора СА7161 является использование в измерительной цепи испытательного трансформатора, допускающего заземление любого из выводов высоковольтной обмотки (например, НОМ-10).

В Коммутатор СА7161 встроен датчик температуры, который обеспечивает измерение температуры окружающего воздуха при работе Коммутатора совместно с мостом СА7100-3. Рабочее напряжение Коммутатора СА7161 - не более 10 кВ. В состав Коммутатора СА7161, структурная схема которого показана на рисунке 3.12, входят: ключ К1 для переключения режимов измерения " C , $\text{tg}\delta$ " $\leftrightarrow$ " R " моста; сдвоенный ключ К2, обеспечивающий коммутацию схем.

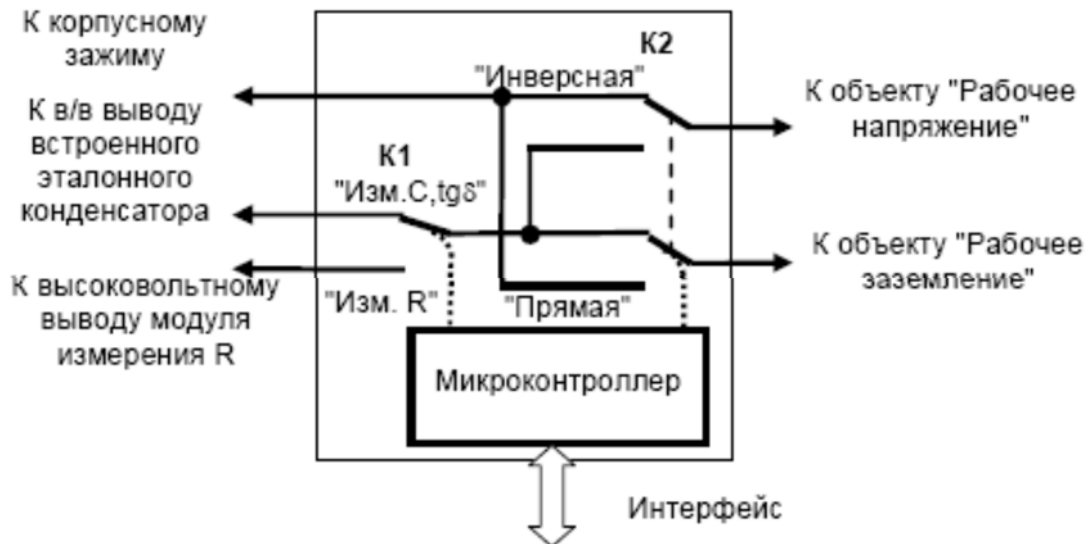


Рисунок 3.12 – Схема высоковольтного коммутатора СА7161

Управление переключением осуществляется микроконтроллером по командам БУ Мостов СА7100-2 и СА7100-3. Связь Коммутатора СА7161 с БУ осуществляется через интерфейсный кабель, подключаемый к входу "Зарядное устройство" Блока измерительного Моста.

Подготовка к работе коммутатора СА7161. Подключить разъемы Коммутатора к соответствующим входам Блока измерительного (рисунок 3.14). Подключение Коммутатора выполнять при отключенном рабочем напряжении и выключенном мосте. Установить Блок измерительный Моста и Коммутатор СА7161 на изолирующие подставки и подключить кабель высоковольтный (КВ4) к высоковольтному разъему "Рабочее напряжение" коммутатора (5, рисунок 3.13), а кабель высоковольтный (КВ5) к высоковольтному разъему. "Рабочее заземление" коммутатора (6, рисунок 3.13.) к рабочему заземлению измерительной схемы. первым использованием. Коммутатор необходимо включить.

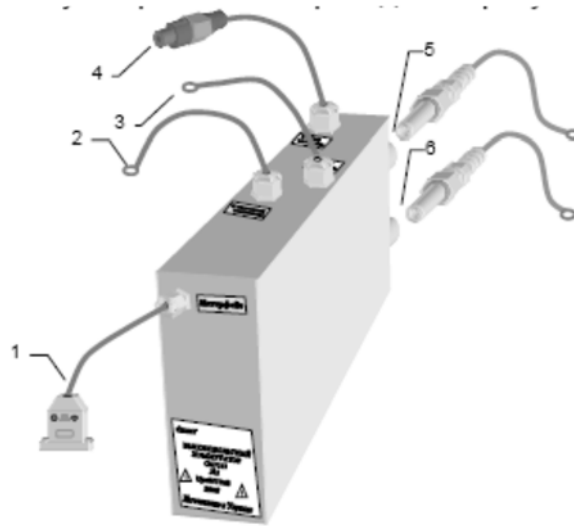


Рисунок 3.13 – Внешний вид коомутатора СА7161

На рисунке 3.13 приняты следующие обозначения: 1 – кабель интерфейсный с разъемом, подключаемым к входу "Зарядное устройство" Блока измерительного Моста; 2 – кабель с кольцевым наконечником, подключаемый к высоковольтному выводу встроенного эталонного конденсатора Блока измерительного Моста; 3 – кабель с кольцевым наконечником, подключаемый к корпусному зажиму Блока измерительного Моста; 4 – кабель с разъемом, подключаемым к высоковольтному выводу модуля измерения R Блока измерительного Моста; 5 – высоковольтный разъем "Рабочее напряжение" и кабель высоковольтный (КВ4) с кольцевым наконечником; 6 – высоковольтный разъем "Рабочее заземление" и кабель высоковольтный (КВ5) с кольцевым наконечником

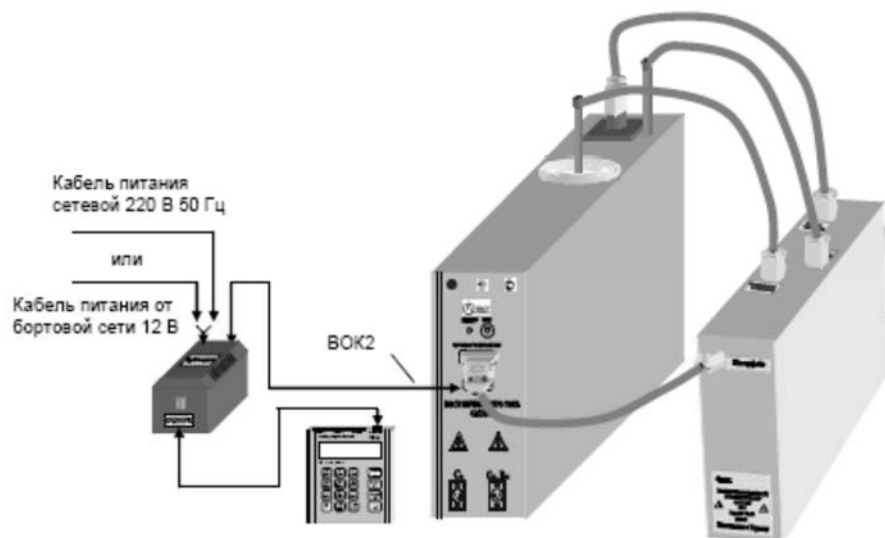
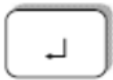
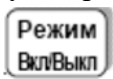
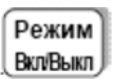
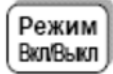


Рисунок 3.14 – Схема соединения моста и коммутатора СА7161

Таблица 3.14 – Включение Коммутатора СА7161

№ п/п	Действия	Вид экрана БУ
1	Включить питание Моста в соответствии с разделом 2.4.	17:22 15/04/08 C, tgδ выкл {■ ■ ■} 17:22 15/04/08 R выкл {■ ■ ■}
2	Войти в меню режимов и выбрать режим включения Коммутатора, для чего на клавиатуре БУ: нажать кнопку  Используя кнопки  и  установить курсор на строку "ВВ. комут. вкл"	ИПРН выкл ВВ коммут.вкл< ВВ коммут.вкл<
3	Включить Коммутатор, для чего нажать кнопку .	ИПРН выкл ВВ коммут.вкл< ВВ коммут.вкл<
4	Для возврата в основное окно нажать 	17:22 15/04/08 C, tgδ выкл {■ ■ ■} 17:22 15/04/08 R вкл {■ ■ ■}
5	Включить Мост, для чего нажать кнопку  Дальнейшие действия выполнять в соответствии с п.2.4. При включении Моста устанавливается "инверсная" схема измерений.	17:22 15/04/08 C, tgδ вкл {■ ■ ■} И 17:22 15/04/08 R вкл {■ ■ ■} И

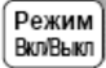
Коммутация измерительной схемы моста СА7100-3 при измерениях C , $tg\delta$ или R выполняется коммутатором СА7161 автоматически при переключении режимов

измерений " $C, \operatorname{tg} \delta$ " $\leftrightarrow$ " R " нажатием кнопок  + .

При повторном использовании мостов СА7100-2 и СА7100-3 установки предыдущего сеанса работы сохраняются и, соответственно, коммутатор остается включенным.

Переключение схемы измерения. Переключение схемы измерения мостов СА7100-2 и СА7100-3 должно производиться при отключенном рабочем напряжении!

Таблица 3.15 – Переключение схем измерений

№ п/п	Действия	Вид экрана БУ
1	Включить питание Моста в соответствии с п.2.4, а затем включить мост, для чего нажать  "П" - "прямая" схема измерений; "И" - "инверсная" схема измерений.	17:22 15/04/08 $C, \operatorname{tg} \delta$ вкл  И 17:22 15/04/08 R вкл  И
2	Включить "прямую" схему измерений, для чего нажать кнопку  , находясь в основном окне.	17:22 15/04/08 $C, \operatorname{tg} \delta$ вкл  П 17:22 15/04/08 R вкл  П
3	Включить "инверсную" схему измерений, для чего нажать кнопку  , находясь в основном окне.	17:22 15/04/08 $C, \operatorname{tg} \delta$ вкл  И 17:22 15/04/08 R вкл  И

3 Указания по технике безопасности

1. К работе на стендах допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности при выполнении работ в лабораториях кафедры «Автоматизированных электроэнергетических сетей и электроснабжения» и

ознакомившиеся с настоящими методическими указаниями. Прохождение инструктажа по технике безопасности фиксируется преподавателем в специальном журнале.

2. Лабораторная работа должна выполняться не менее чем двумя студентами.

3. Перед началом работы необходимо убедиться в надежном заземлении корпуса аппарата.

4. Замену образца диэлектрика производят после отключения аппарата сетевым выключателем.

5. По окончании испытания или при перерыве в работе установку отключают от напряжения питания.

4. Порядок выполнения работы

4.1 Исследование диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости твёрдого диэлектрика

Измерение тангенса угла диэлектрических потерь твёрдых диэлектриков производится в специальной измерительной трехэлектродной ячейке (рисунок 3.15), снабженной прижимными электродами. Чтобы исключить перекрытие между электродами, **рабочее напряжение на ячейке не должно превышать 2 кВ.**

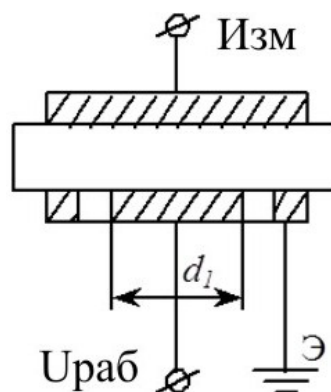


Рисунок 3.15 – Измерительная ячейка.

Вначале подготавливают образцы твердых диэлектриков необходимого размера. Испытуемые образцы твердых диэлектриков задаются преподавателем. Толщина образца измеряется и записывается в таблицу. 3.16.

Таблица 3.16 – Результаты исследования твердого диэлектрика

Схема измерения _____ мм Частота _____ Гц, C_B _____ Пф					
Материал	Ураб, кВ	$tg\delta$	C	ε	d , мм

Измерение тангенса угла диэлектрических потерь и емкости измерительной ячейки, заполненной исследуемым твердым диэлектриком, выполняются в следующем порядке:

1. Подключить измерительную ячейку к мосту СА7100 – 3 следующим образом: зажим «Ураб» подключается к выводу «Рабочее напряжение» коммутатора СА7161, зажим «Изм» подключается к красному зажиму кабеля переходного КП2 из комплекта моста, зажим «Э» подключается к черному зажиму кабеля переходного КП2.

2. Измерить значения $tg\delta$ и C ячейки, заполненной твердым диэлектриком, полученные результаты заносятся в таблицу. 3.16

3. На основании полученных результатов построить зависимости $tg\delta$ от напряженности поля в образцах. Рассчитать удельную диэлектрическую проницаемость материалов по формулам:

$$\varepsilon = \frac{C_x}{C_B} \quad \text{при } tg \delta < 0.1 \quad (3.7)$$

$$\varepsilon = \frac{C_x}{C_B \cdot (1 + tg^2 \delta)} \quad \text{при } tg \delta > 0.1 \quad (3.8)$$

где C_B – емкость конденсатора без диэлектрика.

По результатам таблицы 3.16 построить зависимость $f = tg\delta(U_{раб})$.

4.2 Содержание, форма и правила оформления отчета по лабораторной работе

Каждый студент, выполнивший лабораторную работу, должен оформить отчет и предоставить его преподавателю.

Отчет должен содержать:

1. Название и цель работы.
2. Приборы и материалы, применяемые в лабораторной работе.
3. Таблицы экспериментальных и расчетных данных.
5. Выводы по результатам работы, в которых должна быть дана оценка исследуемых явлений, подтверждение в выполнении законов, объяснение характера кривых.

Отчет должен иметь титульный лист с указанием Ф.И.О. студента, номера группы и даты выполнения работы.

5. Контрольные вопросы

1. Классификация и основные виды поляризации в диэлектрике.
2. Определение диэлектрических потерь и причины их возникновения.
3. Обобщённая схема замещения реального диэлектрика. Виды поляризации.
4. Параллельная схема замещения диэлектрика с потерями. Область применения и её векторная диаграмма.
5. Последовательная схема замещения диэлектрика с потерями. Область применения и её векторная диаграмма.
6. Диэлектрические потери в газах. Причины возникновения.
7. Диэлектрические потери в неполярных и полярных жидких диэлектриках.
8. Диэлектрические потери в твёрдых диэлектриках ионного строения.
9. Диэлектрические потери в твёрдых полярных диэлектриках молекулярного строения.
10. Диэлектрические потери в твёрдых неполярных диэлектриках молекулярного строения.

11. Диэлектрические потери в полярных и неполярных полимерных диэлектриках.
12. Зависимость диэлектрической проницаемости полярных диэлектриков от температуры и частоты электрического поля.
13. Диэлектрическая проницаемость композиционных материалов.
14. Диэлектрическая проницаемость газов.
15. Диэлектрическая проницаемость твердых диэлектриков ионного строения.
16. Диэлектрическая проницаемость полимерных диэлектриков.

Лабораторная работа №4

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО И ОБЪЕМНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: Формирование у студента компетенций ПК-44, ПК-45. Для этого необходимым является изучение основных закономерностей прохождения тока через диэлектрик и ознакомление с методами определения его удельного объёмного и удельного поверхностного сопротивлений.

1. Теоретическое обоснование

Под действием постоянного напряжения через технический диэлектрик протекает ток утечки

$$I_{\text{ут}} = I_{\text{ск}} + I_{\text{аб}}, \quad (4.1)$$

где $I_{\text{ск}}$ и $I_{\text{аб}}$ - соответственно сквозной и абсорбционный токи, А.

Абсорбционные токи возникают в диэлектриках в результате поляризационных процессов смещения связанных зарядов. По окончании поляризации абсорбционный ток спадает до нуля, а ток утечки становится равным сквозному току (рисунок 4.1).

Сквозной ток возникает в диэлектриках за счёт наличия небольшого числа свободных ионов, электронов или коллоидных частиц.

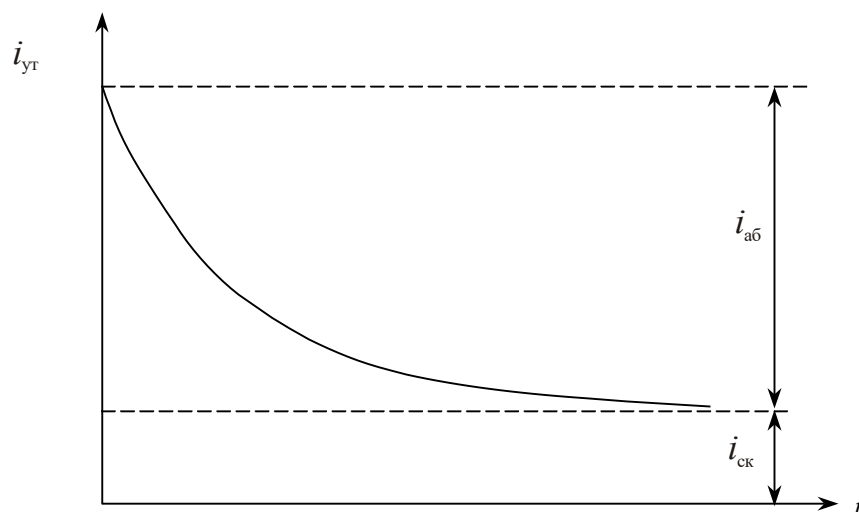


Рисунок 4.1 – Зависимость тока утечки через диэлектрик от времени

Для твёрдых диэлектриков как абсорбционный, так и сквозной токи имеют две составляющие. Так, например, для сквозного тока

$$I_{\text{ск}} = I_V + I_S, \quad (4.2)$$

где I_V и I_S – соответственно объёмный и поверхностный токи, А.

Если объёмный ток обусловлен наличием свободных зарядов в объёме диэлектрика, то поверхностный ток – наличием водорастворимых загрязнений и плёнки влаги на поверхности диэлектрика (рисунок 4.2).

Плотность объёмного тока в однородном и изотропном диэлектрике определяется из выражения

$$j_V = \gamma_V \cdot E = E / \rho_V, \quad (4.3)$$

где γ_V – удельная объёмная проводимость диэлектрика, См/м; ρ_V – удельное объёмное сопротивление диэлектрика, Ом · м ; E – напряжённость электрического поля, В/м.

Объёмное и поверхностное сопротивления диэлектриков, как правило, весьма высоки, поэтому для их определения используются чувствительные гальванометры, электрометры и тераомметры, позволяющие измерять токи до $10^{-17} \dots 10^{-15}$ А. На практике для раздельного измерения объёмного I_V и поверхностного I_S токов применяется, в соответствии с ГОСТ 6433.2-80, трёхэлектродная система (рисунок 4.3, а).

В случае плоского образца на обе его стороны наносятся напылённые или прижимные электроды. С одной стороны расположены кольцевой 2 и измерительный 1 электроды, с другой – дисковый электрод 3 (рисунок 4.3, а).

При измерении объёмного сопротивления потенциал измерительного электрода 1 оказывается чуть выше потенциала кольцевого электрода 2, поэтому поверхностный ток I_S полностью отводится на кольцевой электрод. На измерительный электрод, таким образом, попадает только объёмный ток I_V .

Удельное объёмное сопротивление диэлектрика

$$\rho_V = R_V \cdot S / a = U \cdot S / (I_V \cdot a), \quad (14.4)$$

где R_V – объёмное сопротивление, Ом; S – площадь измерительного электрода, м²; a – толщина образца диэлектрика, м; U – измерительное напряжение, В; I_V – объёмный ток, А.

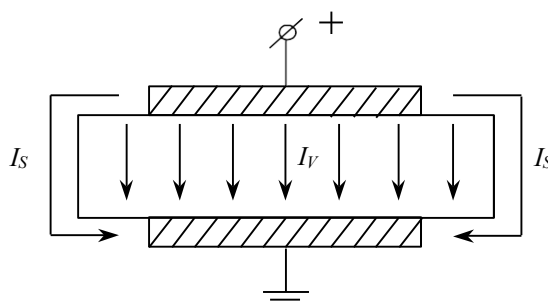


Рисунок 4.2 – Протекание объёмного I_V и поверхностного I_S токов через диэлектрик

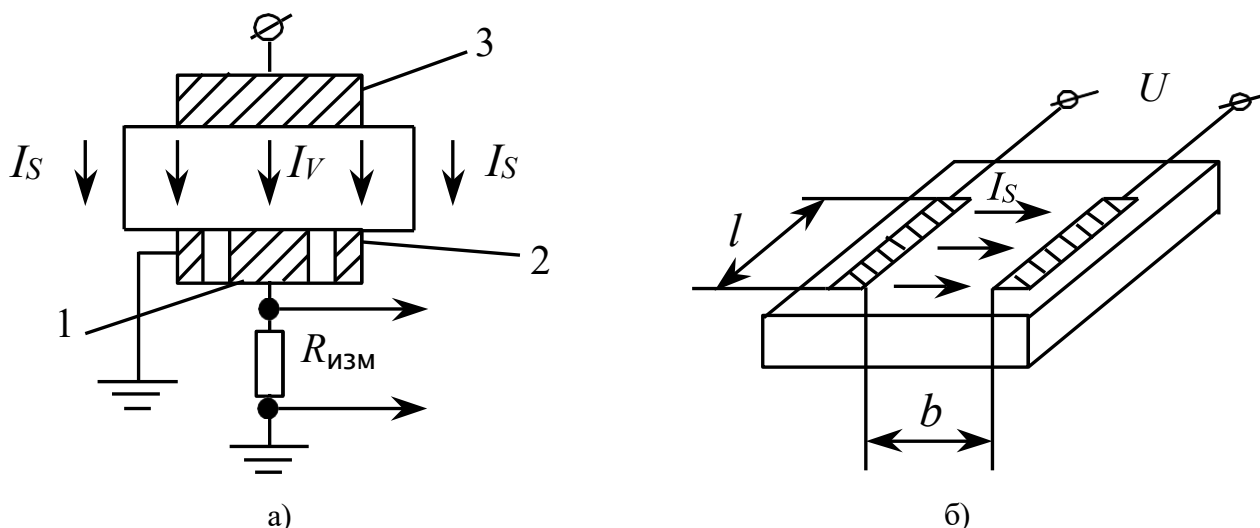


Рисунок 4.3 – Электродные системы: а) трёхэлектродная система для измерения объёмного и поверхностного сопротивлений; б) двухэлектродная система для измерения поверхностного сопротивления

При измерении поверхностного сопротивления также применяется система из двух электродов, нанесённых на одну сторону плоского образца (рисунок 4.3, б). Электроды имеют форму двух параллельных полос, расположенных на расстоянии b .

Удельное поверхностное сопротивление

$$\rho_S = R_S \cdot l/b = U \cdot l/(I_S \cdot b), \quad (4.5)$$

где U – измерительное напряжение, В; I_S – поверхностный ток, А; l – длина электрода, м; b – расстояние между электродами, м.

Если допустить, что приложенные к диэлектрику электроды обладают достаточно малым сопротивлением и диэлектрик является однородным, то без учёта поверхностной проводимости для тела любой формы и размеров можно ввести понятие приведённой длины Λ .

Приведённая длина диэлектрика Λ имеет размерность длины и однозначно определяет соотношение параметров тела (электрической проводимости G , См; электрического сопротивления R , Ом и электрической ёмкости C , Ф между электродами и характеристик материала.

Так, электрическая проводимость тела равна

$$G = \gamma \cdot \Lambda, \quad (4.6)$$

электрическое сопротивление

$$R = \rho \cdot \Lambda, \quad (4.7)$$

ёмкость

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \Lambda, \quad (4.8)$$

Для тела длиной h , м и сечением S , м² произвольной конфигурации, но постоянным по всей длине тела (например, проволока или жила кабеля, диэлектрик плоского конденсатора), электрическое сопротивление

$$R = \rho \cdot h/S. \quad (4.9)$$

следовательно, приведённая длина этого тела определятся по выражению

$$\Lambda = S/h. \quad (4.10)$$

Весьма важен случай, когда тело имеет форму трубы, на внешнюю и внутреннюю стороны которой нанесены электроды (например, диэлектрик цилиндрического конденсатора, изоляция одножильного коаксиального кабеля). Обозначив осевую длину электрода через l , а внутренний и внешний радиусы трубы соответственно через r_1 и r_2 , можем найти сопротивление между электродами, рассмотрев его как результирующее сопротивление последовательно соединённых сопротивлений dR бесконечно тонких слоёв, имеющих толщину dx и радиус x . Сопротивление такого слоя составляет:

$$dR = \rho \cdot dx / (2\pi \cdot x). \quad (4.11)$$

Интегрируя в пределах от $x = r_1$ до $x = r_2$, получаем сопротивление

$$R = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\rho}{2\pi \cdot l} \cdot \frac{dx}{x} = \frac{\rho}{2\pi \cdot l} \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (4.12)$$

Следовательно, в этом случае приведённая длина

$$\Lambda = 2\pi \cdot l \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (4.13)$$

2 Описание лабораторной установки

Лабораторная установка создана на базе высоковольтного автоматического моста переменного тока СА-7100-3.

2.1 Устройство и работа лабораторной установки

Лабораторная установка предназначена для измерения удельного объёмного и удельного поверхностного сопротивлений твёрдых диэлектриков. Установка включает в себя мост СА-7100-3 который позволяет измерять сопротивление от 10^5 до 10^{12} Ом по методу амперметра-вольтметра, и измерительную ячейку с образцом твёрдого диэлектрика (рисунок 4.4).

Порядок работы с постом СА-7100-3 подробно описан в лабораторной работе №3, пункты 2.4-2.5.

3 Указания по технике безопасности

1. К работе на стендах допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности при выполнении работ в лабораториях кафедры «Автоматизированных электроэнергетических сетей и электроснабжения» и ознакомившиеся с настоящими методическими указаниями. Прохождение инструктажа по технике безопасности фиксируется преподавателем в специальном журнале.

2. Лабораторная работа должна выполняться не менее чем двумя студентами.
3. Перед началом работы необходимо убедиться в надежном заземлении корпуса аппарата.
4. Замену образца диэлектрика производят после отключения аппарата сетевым выключателем.
5. По окончании испытания или при перерыве в работе установку отключают от напряжения питания.

4. Порядок выполнения работы

4.1 Исследование поверхностного и объемного сопротивления твёрдого диэлектрика. Поместить диэлектрик в измерительную ячейку. Включить мост для измерения сопротивления (п. 2.5 лабораторная работа № 3), прямая схема измерений.

При измерении объемного сопротивления R_V (рисунок 4.4, а) зажим «Л» подключается к выводу «Рабочее напряжение» коммутатора СА7161, зажим «Rx» подключается к красному зажиму кабеля переходного КП2 из комплекта моста, зажим «Э» подключается к черному зажиму кабеля переходного КП2. Установить заданное преподавателем напряжение для измерения R и времена T_1 и T_2 измерения сопротивлений согласно пункту 2.5 лабораторной работы №3.

При измерении поверхностного сопротивления R_S (рисунок 4.4, б) Зажим «Л» подключается к выводу «Рабочее напряжение» коммутатора СА7161, зажим «Rx» подключается к красному зажиму кабеля переходного КП2 из комплекта моста, зажим «Э» подключается к черному зажиму кабеля переходного КП2.

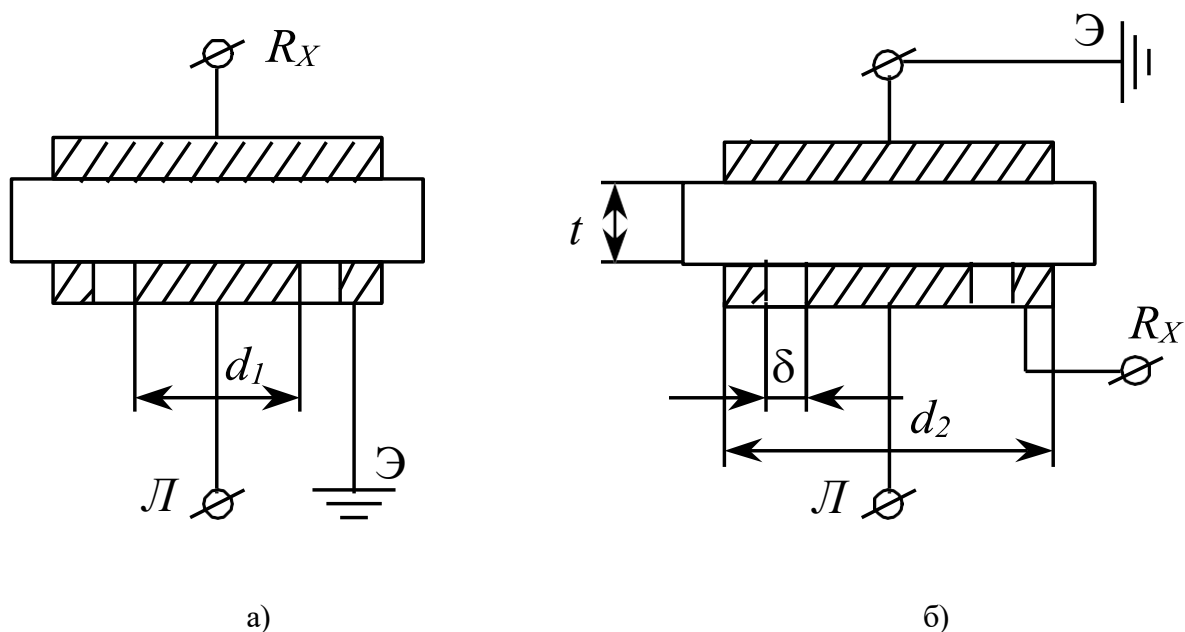


Рисунок 4.4 – Измерительная ячейка и ее включение:

- а) при измерении объемного сопротивления,
 б) при измерении поверхностного сопротивления.

Таблица 4.1 – Результаты измерений сопротивлений твердого диэлектрика

Материал _____, $d =$ ____ мм, $T_1 =$ ____ с, $T_2 =$ ____ с							
Измерено						Вычислено	
U, В	R_V , Ом	R_S , Ом	K_a	R_{T1} , Ом	R_{T2} , Ом	ρ_V , Ом	ρ_S , Ом

Коэффициент абсорбции K_a рассчитывается только для объемного сопротивления.

Провести исследования тока абсорбции для одного из образцов твердого диэлектрика. Для этого произвести измерения сопротивления в диапазоне времен от 10 до 600 секунд после подачи измерительного напряжения. Задавать последовательно времена T_1 и T_2 на мосте, плано изменяя их в заданном диапазоне, коэффициент абсорбции при этом не учитывать. Затем рассчитать ток через диэлектрик по формуле:

$$I_{Vi} = U / R_{Ti}, \quad (14.14)$$

где U – измерительное напряжение, R_{Ti} – сопротивление спустя время T_i после подачи измерительного напряжения

Таблица 4.2 – Результаты исследования тока абсорбции твердого диэлектрика

Материал _____, $d =$ _____ мм,								
U, В	R_{T1} , Ом	R_{T2} , Ом	R_{T3} , Ом	R_{T4} , Ом	R_{T5} , Ом	R_{T6} , Ом	R_{T7} , Ом	R_{T8} , Ом

По результатам таблицы 4.2 построить зависимость тока через диэлектрик от времени. За установившийся ток принять значение при $T_8=600$ с. По результатам таблицы 4.1 сделать вывод о зависимости объемного сопротивления диэлектрика от напряженности поля в нем.

Рассчитать удельное объёмное сопротивление

$$\rho_V = 0,785 R_V d_{cp}^2 / b \quad (4.15)$$

и удельное поверхностное сопротивление

$$\rho_S = \pi d_{cp} R_S / \delta, \quad (4.16)$$

где R_V и R_S – соответственно объёмное и поверхностное сопротивления, Ом;
 $d_{\text{ср}} = (d_1 + d_2) / 2$ – средний диаметр, м; d_1 – диаметр измерительного электрода, м;
 b – толщина образца, м; $\delta = (d_2 - d_1) / 2$ – ширина зазора между измерительным и кольцевым электродами, м; $d_1 = 78$ мм; $d_2 = 80$ мм.

4.2 Содержание, форма и правила оформления отчета по лабораторной работе

Каждый студент, выполнивший лабораторную работу, должен оформить отчет и предоставить его преподавателю.

Отчет должен содержать:

1. Название и цель работы.
2. Приборы и материалы, применяемые в лабораторной работе.
3. Таблицы экспериментальных и расчетных данных.

5. Выводы по результатам работы, в которых должна быть дана оценка исследуемых явлений, подтверждение в выполнении законов, объяснение характера кривых.

Отчет должен иметь титульный лист с указанием Ф.И.О. студента, номера группы и даты выполнения работы.

5. Контрольные вопросы

1. Электрический ток, электропроводность, электрическое сопротивление.
2. Условие протекания тока проводимости через вещество.
3. Электропроводность твердых диэлектриков ионного строения.
4. Основы зонной теории. Применение зонной теории к строению и свойствам диэлектриков.
5. Электропроводность газов.
6. Электропроводность жидких диэлектриков.
7. Электропроводность твердых диэлектриков молекулярного строения.
8. Поверхностная электропроводность.
9. Методы измерений удельных сопротивлений.
10. Порядок работы с измерительным мостом СА-7100-3 при измерении сопротивления.
11. Понятие токов абсорбции и методов их измерения.
12. Миграционная поляризация диэлектриков.
13. Распределение постоянного и переменного электрических полей внутри неоднородного (двухслойного) диэлектрика.
14. Особенности электропроводности твердых полимерных диэлектриков.
15. Влияние различных факторов на электропроводность газообразных и твердых диэлектриков.
16. Влияние различных факторов на электропроводность жидких диэлектриков.

Лабораторная работа №5
ПРОБОЙ ГАЗОВ В ОДНОРОДНОМ И НЕОДНОРОДНОМ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ. ВЛИЯНИЕ БАРЬЕРОВ.

Цель работы: изучить особенности пробоя газообразных диэлектриков в однородном и неоднородном электрическом поле.

В газах наблюдается только электрический пробой.

В газообразных диэлектриках есть некоторое количество свободных ионов и электронов, которые под действием электрического поля начинают перемещаться к аноду. Важная роль при пробое, особенно в начальной стадии, принадлежит электронам как частицам, имеющим намного большую подвижность, чем ионы. Электрон при соударении с молекулой передает ей часть своей энергии, после этого возможны два варианта событий, которые упрощенно можно описать так :

1. молекула ионизируется, испуская электрон, таким образом, двигаются (разгоняясь в поле) два электрона, которые могут ионизировать две другие молекулы и теперь уже движутся четыре свободных электрона, которые могут ионизировать следующие четыре молекулы — в результате наблюдается ударная ионизация приводящая к возникновению электронной лавины;

2. молекула переходит в возбужденное состояние и отдает избыточную энергию в форме излучения — фотона, который может ионизировать другую молекулу, таким образом, происходит фотонная ионизация приводящая к возникновению канала с повышенной проводимостью (стримера).

Фотоны, двигаясь со скоростью света ($3 \cdot 10^8$ м/с), опережают электронные лавины и «столкнувшись» с нейтральными молекулами, ионизируют их, давая начало новым электронным («дочерним») лавинам.

Основная и дочерние лавины, двигаясь к аноду, растут, догоняют друг друга, сливаются и образуют электроотрицательный стример — цепочку электронных лавин, слившихся в единое целое. Также образуется поток из положительных ионов, который движется в обратном направлении, образуя электроположительный стример. Подходя к катоду, положительные ионы, ударяясь о его поверхность,

образуют светящееся катодное пятно, излучающее «вторичные» электроны. Положительный стример, заполняясь вторичными электронами и электронами, образующимися в результате электронной ударной ионизации и фотоионизации, превращается в сквозной канал газоразрядной плазмы. Электропроводность этого канала очень высока, и по нему устремляется ток короткого замыкания $I_{кз}$.

На рисунке 1 представлена схема, поясняющая развитие электрического пробоя, где лавины условно показаны в виде заштрихованных конусов, а волнистыми линиями изображены пути фотонов. Начала волнистых линий исходят из атомов, которые были возбуждены, ударом электрона и вслед за тем испустили фотон.

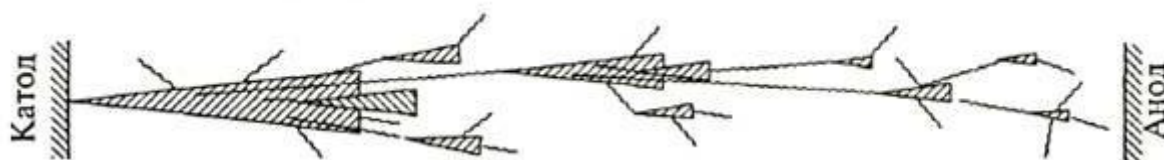


Рисунок 5.1. Схематическое изображение электронной лавины и образования электроотрицательного стримера при пробое газа

Образование плазменного газоразрядного канала (рисунок 2) фактически и есть пробой газов. Возникновение $I_{кз}$ — следствие пробоя. В зависимости от величины $I_{кз}$ пробой проявляется в виде искры или электрической дуги.

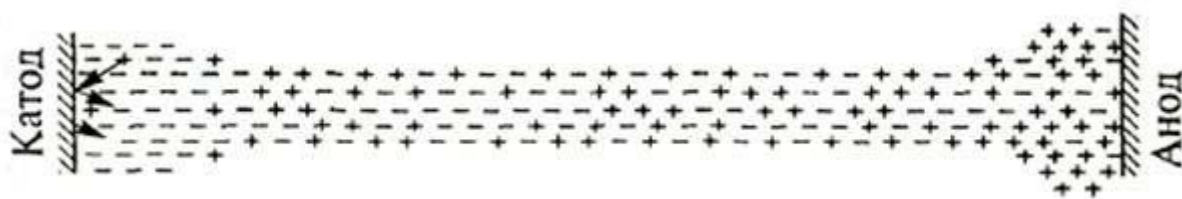


Рисунок 5.2. Схематическое изображение образования газоразрядного плазменного канала

Для пробоя газа в постоянном однородном поле характерна зависимость $E_{пр}$ от давления (рисунок 3.а). При значениях давления выше нормального газ сжимается и, следовательно, уменьшается средняя длина свободного пробега электрона. Поэтому для выполнения условия возможности пробоя необходимо повысить напряженность электрического поля E . При разряде газа средняя длина свободного пробега

электрона возрастает, и при этом электроны могут приобрести добавочную энергию даже при меньшем значении напряженности поля. В области высокого вакуума $E_{пр}$ возрастает, так как в результате сильного разряжения газа уменьшается число молекул в единице объема и снижается вероятность столкновения электронов с молекулами. Давление 0.1 МПа соответствует нормальному атмосферному давлению.

$E_{пр}$ воздуха в однородном поле растет, как показано на рисунке 3 б), с уменьшением расстояния между электродами из-за уменьшения вероятности столкновения электронов с молекулами газа. Рост электрической прочности в данном случае вызван трудностью формирования разряда из-за малого расстояния между электродами.

Пробивное напряжение газов существенно снижается в неоднородных полях, например, для воздуха при $d=1$ см от 30 кВ до 9 кВ.

При давлениях, больших атмосферного, увеличивается плотность воздуха, следовательно, расстояние между молекулами становится меньше, что приводит к уменьшению длины свободного пробега электрона и дополнительной энергии, которую он приобретает до столкновения с молекулой. Поэтому электрическая прочность газов увеличивается при повышении давления, что делает эффективным использование сжатых газов в качестве изоляции в электрооборудовании (например, элегаза в высоковольтных выключателях).

При уменьшении давления вначале происходит уменьшение электрической прочности, что связано с увеличением длины свободного пробега электронов и, следовательно, увеличением их кинетической энергии, т.е. улучшаются условия возникновения ударной ионизации, а тем самым и условия пробоя.

При дальнейшем снижении давления и высокой степени разряжения $E_{пр}$ начинает возрастать. Это увеличение электрической прочности объясняется уменьшением числа молекул газа в единице объема и снижением вероятности столкновений электронов с молекулами.

Как же обстоят дела с электрической прочностью вакуума?. На первый взгляд кажется, что пробой вакуума не возможен, так как вакуум не содержит свободных

носителей заряда, то есть является идеальным изоляционным материалом. В действительности, при достаточно большой напряженности электрического поля происходит пробой вакуума, что объясняется тем, что электрическое поле может вызвать холодную эмиссию электронов с поверхности металлических электродов. Поэтому электрическая прочность вакуума зависит от материала, из которого изготовлены электроды, и от состояния их поверхности. Высокие электроизоляционные свойства вакуума используются в вакуумных конденсаторах и вакуумных выключателях.

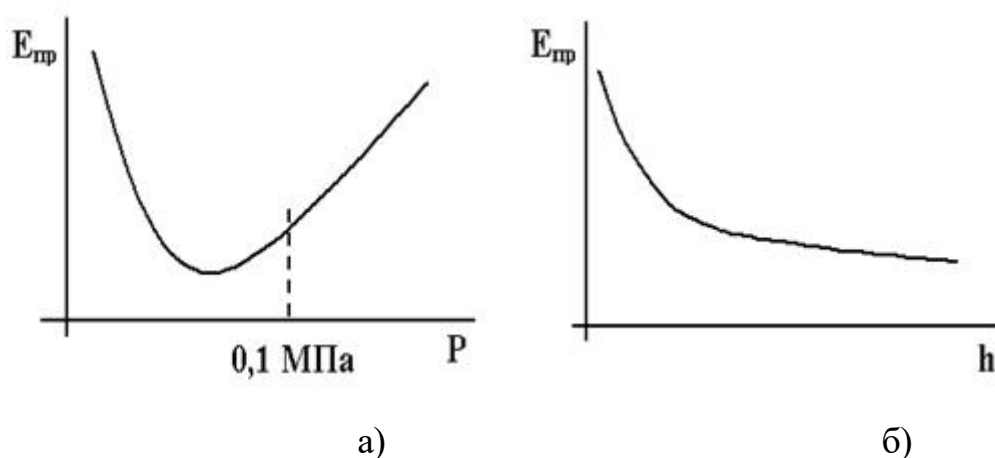


Рисунок 5.3. Зависимость электрической прочности газа от давления

Закон Пашена. Закон Пашена показывает зависимость $U_{пр}$ газообразных диэлектриков в конкретной конструкции от произведения давления P газа на расстояние h между электродами (рис. 4). Закон устанавливает, что каждому газу соответствует свое минимальное значение пробивного напряжения $U_{пр.мин}$ в зависимости от произведения Ph . Для газов, состоящих из двух- и многоатомных молекул, $U_{пр.мин}$ лежит в пределах от 280 В (H_2) до 420 В (CO_2). На частоте 50 Гц у неионизированного воздуха в однородном электрическом поле $U_{пр.мин} \sim 326$ В. У инертных газов (газов, состоящих из одноатомных молекул) $U_{пр.мин}$, ниже, чем у газов из многоатомных молекул (например, у чистого аргона $U_{пр.мин} \approx 195$ В, а у аргона с примесью паров натрия ~ 95 В, у неона с парами натрия ~ 85 В). Поэтому для снижения $U_{пр.мин}$ инертных газов, используемых в газоразрядных приборах,

электроды изготавливают (или хотя бы их покрывают) из металлов с присадками щелочных или щелочноземельных металлов, обладающих малой работой выхода электронов.

В неоднородном поле на $U_{пр}$ влияет также полярность электродов. Так, для электродов с малым радиусом кривизны $U_{пр}$ при положительной полярности оказываются ниже, чем при отрицательной. Это связано с образованием положительного объемного заряда у острия в результате развития коронного разряда, что приводит к возрастанию напряженности поля в остальной части промежутка.

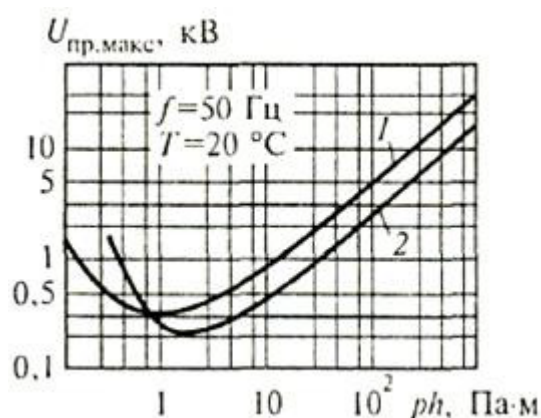


Рисунок 5.4. Зависимость пробивного напряжения $U_{пр.макс}$ воздуха (1) и неона (2) от произведения давления газа P на расстояние между электродами h

При достаточно высоких частотах свободные электроны успевают сместиться на большие расстояния и достигают электродов. Ионы с большой массой за время полупериода колебаний не успевают сместиться на значительные расстояния и концентрация положительных ионов в межэлектродном пространстве растет, приводя к появлению так называемого «объемного заряда». Поэтому, начиная с частот, превышающих десятки килогерц вероятность столкновения ионов с молекулами возрастает и электрическая прочность газов уменьшается (рисунок 5). Дальнейший рост частоты электрического поля приводит к тому, что за время полупериода не только положительные ионы не успевают сместиться на значительные расстояния, но и электроны не успевают вылететь из межэлектродного пространства. Вероятность рекомбинации заряженных частиц растет и их концентрация падает. Кроме того, снижение времени полупериода требует увеличения силы, действующей на ионы, чтобы кинетической энергии хватило для

ионизации молекул. Поэтому при частотах, превышающих один мегагерц, электрическая прочность газов возрастает.

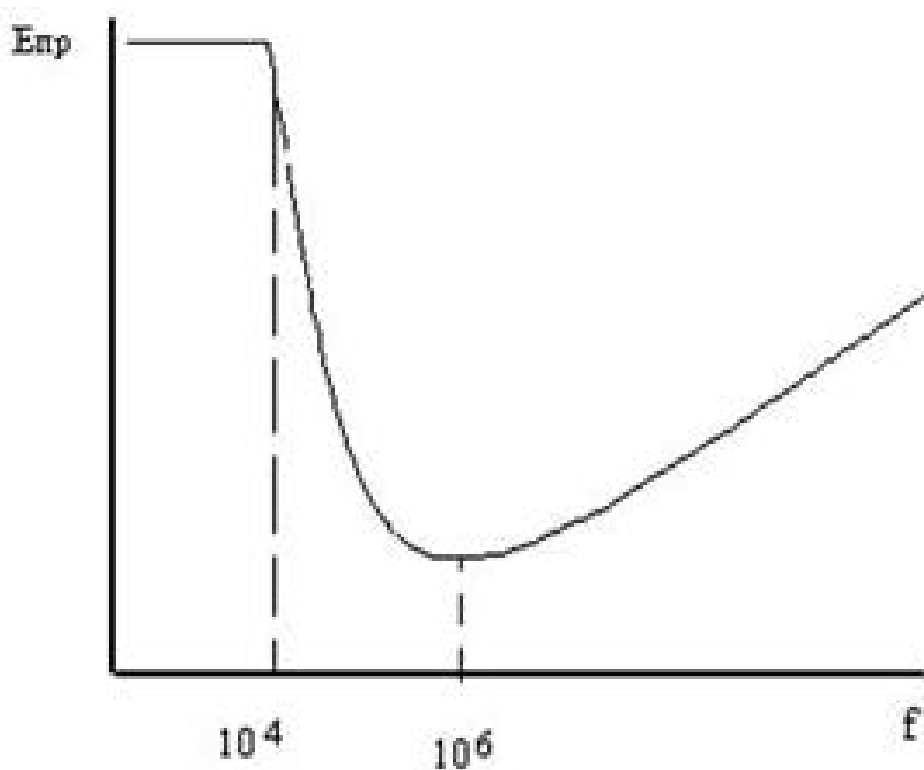


Рисунок 5.5 Зависимость электрической прочности газа от частоты электрического поля

Пробоем газа (воздуха) в **неоднородном поле** предшествует **коронный разряд** или корона, являющийся неполным пробоем. Корона возникает при напряжении U_k , которое ниже, чем $U_{пр}$ ($U_k < U_{пр}$), вблизи электрода с малым радиусом кривизны, на заостренных металлических краях и т.п.; она наблюдается в виде прерывистого голубоватого свечения и сопровождается характерным звуком (жужжанием или потрескиванием). С повышением напряжения коронный разряд переходит в **искровой** и затем при достаточной мощности источника напряжения — в **дуговой разряд**.

В случае электродов типа **стержень-плоскость**, создающих резко неоднородное поле, $U_{пр}$ газов будет наименьшим при положительной полярности стержня и наибольшим — при отрицательной полярности стержня (рисунок 6). Объясняется это следующим. Как отмечено выше, пробоем воздушного промежутка

предшествует коронный разряд. Образующиеся при этом электроны, имея большую (в ~ 1000 раз) подвижность, чем положительные ионы, быстро уходят из коронирующего слоя, и возникает объемный положительный заряд. Образовавшийся около острия электрода объемный положительный заряд по-разному влияет на величину напряжения воздушного промежутка. Если на электроде в виде стержня будет положительный потенциал, то объемный положительный заряд приведет к увеличению напряженности поля во внешней области короны, и пробой произойдет при более низком значении $U_{пр}$. Если на стержне будет отрицательный потенциал, тогда объемный положительный заряд уменьшит напряженность поля во внешней области короны, и пробой воздушного промежутка наступит при большем значении $U_{пр}$. С уменьшением длительности импульса (повышением частоты напряжения) различие между значениями $U_{пр}$ в зависимости от полярности стержня уменьшается. Величина $U_{пр}$ при пробое газа при высоких частотах в неоднородном поле (в отличие от пробоя в однородном поле) значительно ниже, чем $U_{пр}$ при постоянном напряжении или напряжении промышленной частоты.

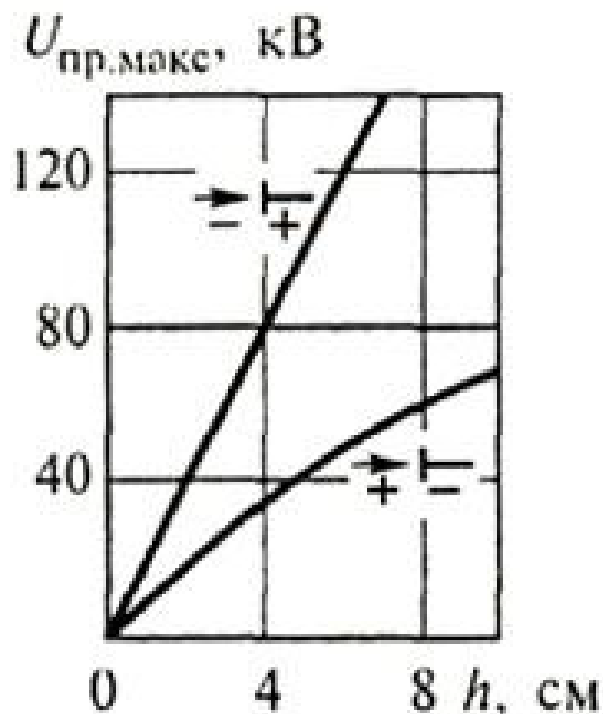


Рисунок 5.6. Зависимость пробивного напряжения $U_{пр}$ воздуха от расстояния h между электродами (поле неоднородное)

В неоднородных полях с увеличением влажности воздуха пробивное напряжение U_{np} возрастает. Это можно объяснить повышенной способностью молекул воды захватывать свободные электроны и превращаться в малоподвижные отрицательные ионы. В результате число ионизирующих электронов в межэлектродном пространстве уменьшается, поэтому разрядное напряжение" возрастает. Приблизительно можно считать, что при увеличении абсолютной влажности воздуха в два раза U_{np} при частоте 50 Гц возрастает на 10%.

Порядок работы на аппарате АИД 70/50

Прежде чем приступить к работе на аппарате, необходимо: установить БВН вблизи испытуемого объекта; установить блок управления на расстоянии не менее 3 м от БВН и соединить блоки соединительными кабелями. Рабочее положение блока управления - вертикальное (лицевая панель блока управления - горизонтальна!). В том случае, если блок управления будет установлен горизонтально, погрешность показаний измерительных приборов может превышать 3%; надёжно заземлить блок управления и БВН гибкими медными проводами сечением 6 мм, прилагаемыми к аппарату.

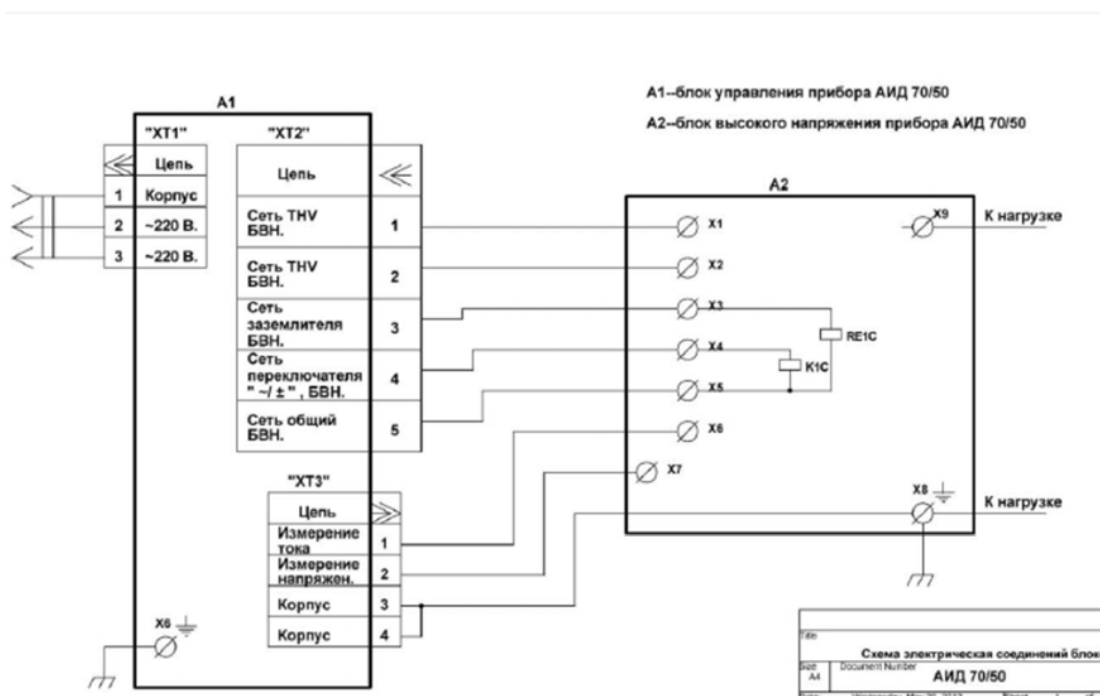


Рисунок 5.7 – Схема электрическая принципиальная соединения БВН и БУ аппарата АИД-70/50

РАБОТА БЕЗ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ЗАПРЕЩАЕТСЯ!

Подключить объект испытаний к высоковольтному выводу (посредством прилагаемого высоковольтного кабеля с зажимом "крокодил") и клемме заземления БВН; подключить сетевой кабель к блоку управления и к сети.

Лица, присутствующие при испытании, должны быть удалены от БВН на расстояние не менее 3 м. Вставить спецключ от аппарата в переключатель 0 -" блока управления, и включить необходимый вид испытательного напряжения. При этом должна загореться зелёная сигнальная лампочка «Сеть».

При работе на выпрямленном напряжении (ключ переключателя в положении « – ») во избежание выхода из строя БВН, а также для правильного измерения величины испытательного напряжения, строго следить за положением тумблера «Х. ХОД-КАБЕЛЬ».

Вращая ручку регулятора испытательного напряжения против движения часовой стрелки, установить её в исходное положение до упора.

Включить испытательное напряжение кнопкой «ВКЛ» при этом должна загореться красная лампочка «Высокое Вкл.».

Вращая ручку регулятора испытательного напряжения по часовой стрелке и наблюдая за показаниями киловольтметра, установить необходимую величину испытательного напряжения.

При испытании ёмкостных объектов необходимо помнить, что после прекращения вращения ручки регулятора напряжения испытательное напряжение на объекте увеличивается (стрелка киловольтметра продолжает отклоняться) по мере заряда ёмкости.

В таких случаях подъём напряжения надо осуществлять медленно и плавно, не допуская превышения нормативной величины испытательного напряжения на объекте и не допуская превышения наибольшего рабочего напряжения аппарата,

равного 70 кВ.

При работе на выпрямленном испытательном напряжении измерение тока нагрузки величиной до 1 мА следует производить миллиамперметром аппарата при нажатой кнопке «1 мА».

По окончании испытания переменным напряжением установить регулятор испытательного напряжения в исходное положение, вращая ручку против часовой стрелки до упора. Отключить кнопкой "ВЫКЛ" испытательное напряжение и только после этого отключить аппарат от сети спецключом, установив его в положение «0».

После окончания испытания емкостного объекта, необходимо установить регулятор испытательного напряжения в исходное положение, вращая ручку против часовой стрелки до упора, и дождаться снижения напряжения на испытуемом объекте до 0,5 – 1 кВ. Контроль над снятием остаточного ёмкостного заряда с испытуемого объекта необходимо осуществлять, наблюдая за показанием киловольтметра аппарата. Только после снижения напряжения до 0,5 – 1 кВ нужно нажать кнопку «ВЫКЛ» и затем отключить аппарат от сети, установив переключатель 6 БУ в положение «0». Стрелка киловольтметра должна стоять на числовой отметке шкалы «0».

При испытании емкостных объектов, величина емкости которых более 0,02 мкФ (20 нФ), остаточный емкостной заряд необходимо снимать только с помощью разрядной штанги с ограничительным сопротивлением. Применение разрядной штанги исключает выход из строя вторичной обмотки высоковольтного трансформатора.

Прежде чем отсоединить испытуемый объект от источника, необходимо визуально убедиться в том, что штанга заземлителя источника касается высоковольтного вывода. Рекомендуется дополнительно наложить заземление с помощью разрядной штанги.

Указания по технике безопасности

1. К работе на стендах допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности при выполнении работ в лабораториях кафедры

3. Перед началом работы необходимо убедиться в надежном заземлении корпуса аппарата.

4. Изменение параметров пробоа производят после отключения аппарата сетевым выключателем.

5. По окончании испытания или при перерыве в работе установку отключают от напряжения питания.

1. Подключить к электродам стенда плоские металлические тарелки

2. Выставив на стенде расстояние между электродами 5 мм в однородном поле (плоскость – плоскость) включить стенд и, плавно поднимая напряжения добиться пробоя межэлектродного промежутка при постоянном напряжении. Значение пробивного напряжения занести в таблицу 5.1.

3. Переключить режим работы стенда на переменное напряжение и повторить пункт 2. Занести значение пробивного напряжения в таблицу.

4. Отключив стенд увеличить расстояние между электродами, как указано в таблице 5.1

5. Повторить пункты 2 и 3.

Таблица 5.1. – Пробой газа в однородном электрическом поле

h, мм	5 мм	10 мм	20 мм	30 мм	40 мм	50 мм
Постоянное напряжение						
U _{пр} , кВ						
E _{пр} , кВ/мм						
Переменное напряжение						

$U_{\text{пр}}, \text{кВ}$						
$E_{\text{пр}}, \text{кВ/мм}$						

6. Рассчитать значение электрической прочности газового промежутка для каждого эксперимента и занести в таблицу 5.1.

7. По результатам измерений и расчетов построить график зависимости $U_{\text{пр}}$ и $E_{\text{пр}}$ от расстояния между электродами для однородного и неоднородного электрического поля. Построить графики зависимости $E = f(h)$. Сделать выводы.

8. После заполнения таблицы 5.1., заменить на положительном электроде стержень, создав резко неоднородное электрическое поле и повторить пункты 2-5 для случая неоднородного электрического поля.

9. Занести полученные данные в таблицу 5.2 и также провести необходимые расчеты и построить зависимости по пунктам 6 и 7.

Таблица 5.2. – Пробой газа в неоднородном электрическом поле

$h, \text{мм}$	5 мм	10 мм	20 мм	30 мм	40 мм	50 мм
Однородное поле						
$U_{\text{пр}}, \text{кВ}$						
$E_{\text{пр}}, \text{кВ/мм}$						
Неоднородное поле						
$U_{\text{пр}}, \text{кВ}$						
$E_{\text{пр}}, \text{кВ/мм}$						

10. После проведения необходимых расчетов и построения графиков установить барьер из твердого тонкого диэлектрика (лист бумаги) поочередно у положительного и отрицательного электродов и произвести пробой промежутка на постоянном и переменном напряжениях.

11. Сравнить полученные значения пробивного напряжения с данными из таблиц 5.1 и 5.2. Сделать выводы.

Содержание, форма и правила оформления отчета по лабораторной работе

Каждый студент, выполнивший лабораторную работу, должен оформить отчет и предоставить его преподавателю.

Отчет должен содержать:

1. Название и цель работы.
2. Приборы и материалы, применяемые в лабораторной работе.
3. Таблицы экспериментальных и расчетных данных.
4. Графики полученных зависимостей.

5. Выводы по результатам работы, в которых должна быть дана оценка исследуемых явлений, подтверждение в выполнении законов, объяснение характера кривых.

Отчет должен иметь титульный лист с указанием Ф.И.О. студента, номера группы и даты выполнения работы.

Контрольные вопросы:

- 1) В чем состоит принцип ионизационного пробоя газов?;
- 2) Что такое электрический стример, как он образуется?;
- 3) Что такое коронный разряд, как он образуется?
- 4) Что такое однородное и неоднородное электрическое поле?;
- 5) Как влияют барьеры из плотных диэлектриков на пробой газов?
- 6) От каких параметров зависит электрическая прочность газов?
- 7) В чем состоит суть закона Пашена?;
- 8) Что такое холодная эмиссия электронов, чем она отличается от термической эмиссии?
- 9) Как влияет давление на электрическую прочность газов?
- 10) Как влияет температура на электрическую прочность газов?
- 11) Где применяются газ в качестве диэлектрика и какие?

- 12) Как зависит электрическая прочность газов от расстояния между электродами, почему?
- 13) Что выше электрическая прочность вакуума или воздуха, почему?
- 14) Как влияет полярность в резко неоднородном электрическом поле на пробивное напряжение?
- 15) Почему электрическая прочность газов меньше, чем у плотных диэлектриков?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

Цель: Измерить удельные электрические сопротивления проводников, исследовать их зависимость от температуры, получить температурные коэффициенты

1 Теоретическая часть

Почему одни вещества, например, плохо проводят электрический ток, а другие (металлы) - наоборот, являются очень хорошими проводниками? Даже на этот фундаментальный вопрос классическая теория электропроводности не в состоянии

ответить. Действительно, в любом твердом теле атомы столь сильно взаимодействуют друг с другом, что их валентные электроны коллективизированы, то есть они в состоянии переходить от одного атома к другому и как бы блуждать по твердому телу. Выход из затруднений нужно искать в квантовой природе электронов.

Во-первых, электроны в атомах и в твердом теле в состоянии принимать не любые значения энергии, а лишь некоторый дискретный ряд значений. На оси энергии их изображают в виде системы энергетических уровней. Конкретный вид системы уровней (их расположение) зависит от вида атомов и от рода твердого тела.

Во-вторых, электроны подчиняются некоторому принципу запрета (принципу запрета Паули): в системе электронов (например, в электронной оболочке атома или в системе электронов твердого тела) в каждом квантовом состоянии может находиться не более одного электрона.

Обычно одному энергетическому уровню соответствуют два квантовых состояния электрона (с противоположно направленными собственными моментами - импульса спинами). Поэтому принцип запрета Паули можно сформулировать еще и так: на каждом энергетическом уровне может находиться не более двух электронов. Наконец, следует учесть, что система электронов (в атоме или в твердом теле) стремится занять состояние с минимальной в данных условиях энергией. Поэтому нужно иметь в виду, что заполнение начинается снизу: сначала заполняются свободные уровни, соответствующие малым значениям энергии. Энергетические уровни атома располагаются группами, как показано на рисунке 5.1. Каждой группе уровней соответствует свой слой электронной оболочки атома. Нас будет интересовать самый верхний слой валентных электронов атомов. Допустим, что вначале атомы твердого тела находятся на больших расстояниях друг от друга, а затем сближаются и компонуются, образуя твердое тело. Что при этом происходит с энергетическими уровнями атомов? Вследствие взаимодействия электронных оболочек атомов при их сближении отдельные уровни, во - первых, смещаются, во - вторых, расщепляются. Каждый уровень расщепляется на N (N - число атомов в твердом теле) очень близких подуровней, так что каждый уровень превращается в полосу (называемую зоной) тесно расположенных подуровней (рисунок 6.1).

Теперь можно ответить на вопрос: почему металлы хорошо проводят электрический ток, а другие вещества являются или полупроводниками (плохими проводниками) или диэлектриками?

У металлов зона валентных электронов (она называется валентной зоной) не полностью заполнена электронами (рисунок 6.2). Когда металлическое твердое тело попадает в электрическое поле, электроны валентной зоны в состоянии воспринять дополнительную энергию от поля (обычно эта дополнительная энергия очень мала), т.к. в зоне валентных электронов имеются свободные подуровни и электроны на них могут перейти.

Иная картина наблюдается для диэлектриков. В этих веществах вся валентная зона подуровней оказывается полностью занятой электронами. Электроны, попадая в электрическое поле, не в состоянии воспринять энергию от поля, т. к. их валентная зона заполнена полностью. Между этой зоной и зоной со свободными уровнями (ЗП) находится широкая зона энергии которую электроны под действием поля не могут преодолеть (рисунок 6.2.).

Наконец, нужно найти место полупроводникам. Полупроводники отличаются от диэлектриков лишь количественно, а не качественно. У них валентная зона заполнена полностью, а запретная зона сравнительно узка. Она составляет от 0,5 до 1,5 электронвольт (эВ). (Электронвольт называется та энергия, которую приобретает электрон, проходя разность потенциалов в один вольт.) По сравнению с "тепловой энергией" электрона в "электронном газе" эта энергия все же велика ("тепловая энергия" электронов составляет 0,01 эВ). Поэтому если вследствие теплового движения электроны попадают в верхнюю свободную зону, лежащую над валентной зоной (эта зона называется зоной проводимости), то их количество невелико. Этим и объясняется тот факт, что полупроводники хотя и проводят электрический ток, но проводят его плохо (мало носителей тока!). Остановимся теперь более подробно на металлах, а затем на полупроводниках. Металлы. Какое же принципиальное изменение в теорию "электронного газа" вносит квантовая теория? Нетрудно понять, что закон Больцмана, действительно, неприменим к электронам

проводимости металла. Это особенно наглядно видно, если рассмотреть состояние электронов при температуре, близкой к абсолютному нулю.

Проводниковые материалы обладают способностью проводить электрический ток и характеризуются весьма малым удельным электрическим сопротивлением. К ним относятся материалы с низкой проводимостью, материалы с высокой проводимостью, сверхпроводники и криопроводники.

Различие между проводниками, диэлектриками и полупроводниками наиболее наглядно иллюстрируется с помощью энергетических диаграмм зонной теории твердого тела. Как известно, электрон в изолированном атоме может находиться лишь на строго определенных дискретных энергетических уровнях (состояниях). Энергетические уровни отделены друг от друга значениями энергии, которых электрон в данном атоме иметь не может.

Часть энергетических уровней заполнена электронами в нормальном, невозбужденном состоянии атома, на других электроны могут находиться только тогда, когда атом подвергнется внешнему энергетическому воздействию, т.е. когда он возбужден. Стремясь перейти в устойчивое состояние, атом излучает избыток энергии в момент перехода электронов с возбужденных уровней на уровни, где его энергия минимальна.

При образовании кристалла благодаря сближению одинаковых атомов на расстояния близкие к расстоянию между атомами в кристаллической решетке, начинает проявляться взаимодействие атомов между собой. В этом случае все энергетические уровни (заполненные электронами и незаполненные) расщепляются. Таким образом, из отдельных энергетических уровней уединенных атомов в твердом теле образуется зона энергетических уровней. Уровней в зоне столько, сколько атомов в данном кристаллическом теле. При этом энергетические зоны, соответствующие внутренним электронам, более узки, чем зоны, соответствующие внешним электронам. Объясняется это тем, что внутренние электроны более тесно связаны с атомами и влияние на них соседних атомов соответственно слабее.

Если в зоне не все энергетические уровни заняты электронами, то электроны могут, повышая свою энергию за счет энергии внешних воздействий, переходить на более

высокие свободные уровни. Такие электроны, находящиеся называются **свободными** электронами в твердом теле. Если к кристаллу приложено электрическое поле, изменению энергии свободных электронов соответствует направленное перемещение их в пространстве, т.е. свободные электроны обуславливают протекание электрического тока.

Энергетические зоны, образованные совокупностью энергетических уровней, называют **зонами разрешенных значений энергии или разрешенными зонами**. Разрешенные зоны обычно отделены друг от друга запрещенными зонами, т.е. промежутками значений энергии, которыми электрон в данном кристалле обладать не может.

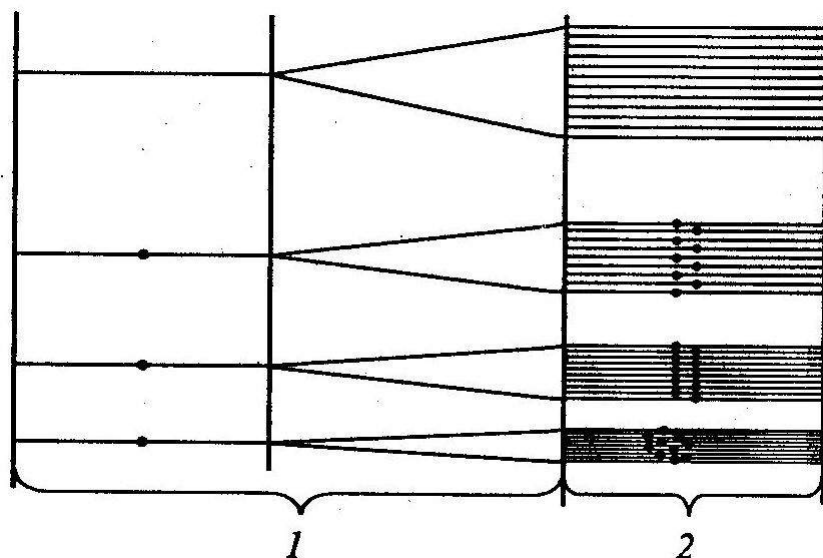


Рисунок 6.1 - Схема расположения энергетических уровней уединенного атома (слева) и неметаллического твердого тела (справа) 1 – нормальный энергетический уровень атома; 2 – уровни возбужденного состояния атома.

Разрешенные зоны, соответствующие внутренним электронным орбитам в атомах твердого тела, обычно полностью заполнены электронами и поэтому не рассматриваются при изучении электрических свойств твердых тел. Электрический ток в твердых телах может быть обусловлен электронами, перемещающимися в зоне, соответствующей валентной электронной оболочке, - **валентной зоне**, или электронами в разрешенной зоне, расположенной над валентной - **в зоне проводимости**.

У проводников и твердых диэлектриков валентная зона при температуре абсолютного нуля и в темноте полностью заполнена электронами, а отделенная от нее запрещенной зоной зона проводимости полностью свободна (рисунок 5.2).

У полупроводников ширина запрещенной зоны обычно меньше 3 эВ. При отсутствии в полупроводнике свободных электронов приложенное к нему электрическое поле не вызывает тока. Если электрон в валентной зоне приобретает (тепловым, оптическим или иным способом) достаточную энергию для преодоления запрещенной зоны, то он оказывается в зоне проводимости. Среди электронов в валентной зоне образовалось вакантное место. Если приложено внешнее электрическое поле, то одни из электронов (в валентной зоне) в соседнем атоме приобретает достаточную энергию чтобы занять вакантное место, оставив прежнее место вакантным; Таким образом, соседний электрон при воздействии внешнего поля заполняет вновь созданную вакансию, т.е. начинается непрерывный процесс.

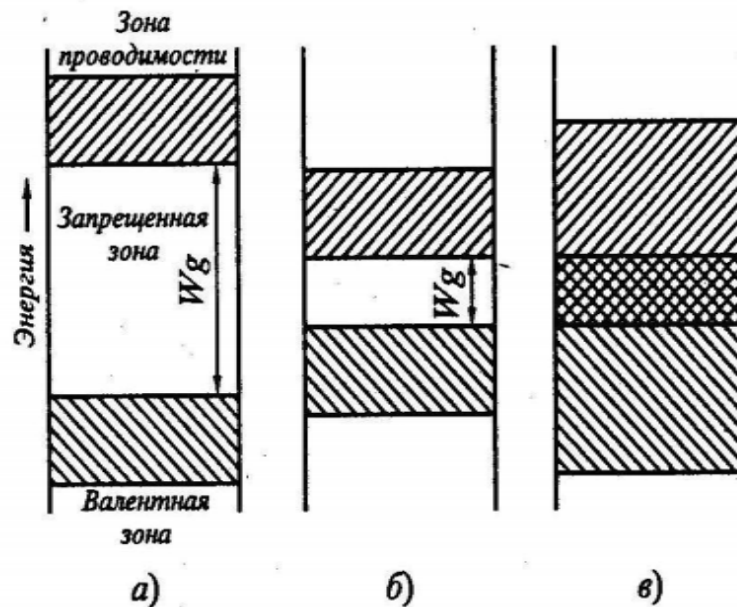


Рисунок 562 – Энергетические зоны в изоляторе (а), полупроводнике (б) и металле (в)

Этот процесс можно рассматривать как движение вакантного места в валентной зоне, которое обычно называют дыркой. Следует отметить, что дырка - это не просто отсутствие электрона, это отсутствие электрона в полной в других отношениях ковалентной связи между атомами кристалла. Ковалентная связь образуется между электронами соседних атомов, каждый из которых владеет этими электронами совместно с другими атомами. Все электроны в валентной зоне - это электроны, участвующие в ковалентных связях.

Проводниками называются вещества, внутри которых в случае электростатического равновесия электрическое поле равно нулю, т.е. нескомпенсированные заряды проводников локализуются в бесконечно тонком поверхностном слое, а если электрическое поле отлично от нуля, то в проводнике возникает электрический ток.

В качестве проводниковых материалов могут использоваться твердые тела, жидкости и газы. Среди твердых проводниковых материалов наиболее часто в электротехнике применяются металлы и сплавы.

По удельному электрическому сопротивлению металлические проводниковые материалы можно разделить на две основные группы: металлы высокой проводимости, у которых при нормальной температуре $\rho < 0,05 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$; металлы и сплавы с высоким сопротивлением, имеющие при тех же условиях $\rho > 0,3 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$. Проводниковые материалы первой группы применяются в основном для изготовления обмоточных и монтажных проводов, жил кабелей различного назначения, шин и т.д. Проводниковые материалы второй группы используются при производстве резисторов, электронагревательных приборов, нитей ламп накаливания и т.п.

Особую группу составляют криопроводники и сверхпроводники – материалы, которые обладают ничтожно малым удельным электрическим сопротивлением при температурах, близких к абсолютному нулю.

К жидким проводникам относятся, как правило, расплавленные металлы и различные электролиты. Большинство металлов имеют достаточно высокую температуру плавления и поэтому являются жидкими проводниками при повышенных температурах. Среди металлов только ртуть, имеющая температуру плавления примерно $-39 \text{ }^{\circ}\text{C}$, может быть использована как жидкий проводник при нормальной температуре.

В связи с тем, что механизм электропроводности в металлах, как в твердом, так и в жидком состоянии обусловлен направленным движением свободных электронов под воздействием электрического поля, их принято называть *проводниками с электронной проводимостью* или *проводниками первого рода*. В проводниках

второго рода или электролитах, к которым относятся растворы, (в том числе водные) кислот, щелочей и солей, прохождение тока связано с переносом вместе с электрическими зарядами ионов вещества в соответствии с законами Фарадея. При этом состав электролита постепенно изменяется, и на электродах выделяются продукты электролиза. Ионные кристаллы в расплавленном состоянии также являются проводниками второго рода.

Газы и пары, в том числе и пары металлов, при низких значениях напряженности электрического поля не являются проводниками. При достижении некоторого критического значения напряженности электрического поля, обуславливающего начало ударной и фотоионизации, газ становится проводником с электронной и ионной электропроводностью. Если газ сильно ионизирован, то при равенстве в единице объема числа отрицательно заряженных электронов и положительных ионов наблюдается особое состояние вещества, получившее название *плазма*.

К электрическим характеристикам проводниковых материалов можно отнести: удельную проводимость или обратную ей величину – удельное сопротивление; контактную разность потенциалов и термоэлектродвижущую силу (термоЭДС); работу выхода электронов из металла.

Для различных металлов скорости хаотического теплового движения электронов (при определенной температуре) примерно одинаковы, как и концентрация свободных электронов. Поэтому значение удельной проводимости в основном зависит от средней длины свободного пробега электронов в данном проводнике, которая определяется структурой проводника.

Тепловая скорость определяется структурой проводникового материала. Например, для чистых металлов с наиболее правильной кристаллической решеткой значения удельного сопротивления являются минимальными. И наоборот, наличие примесей и дефектов в решетке приводит к увеличению удельного сопротивления.

Указанные явления находят свое подтверждение и с точки зрения волновой природы электронов. Электронные волны, распространяясь в проводниковом материале, частично теряют свою энергию из-за дефектов кристаллической решетки

проводника, размеры которых соизмеримы с четвертью длины электронной волны. Так как длина волны в металлическом проводнике 0,5 нм ($0,5 \cdot 10^{-9}$ м), то имеющиеся в нем даже микродефекты создают значительное рассеяние энергии, что приводит к уменьшению подвижности электронов и, следовательно, к снижению проводимости.

Все чистые металлы характеризуются большими значениями проводимости, чем металлы с примесями, искажающими кристаллическую решетку. Это относится и к сплавам.

Хотя, как известно, электроэнергия передается не по проводникам, а по диэлектрическому пространству между проводниками, тем не менее, проводники необходимы для направления потоков этой энергии.

Как известно в любом теле при приложении напряжения должен протекать ток в соответствии с выражением, определяющим плотность тока:

$$J = \sum n_i q_i v_i \quad (6.1)$$

здесь n_i - концентрация носителей заряда i -ого сорта, q_i - значение заряда, v_i - скорость заряда. Для металлов носителями заряда являются электроны. Примерное количество электронов в металле составляет около 10^{22} 1/см³. Если оценить концентрацию атомов типичного металла, то она составит примерно те же значения. Это означает, что все атомы ионизованы и электроны не принадлежат каждому атому, а обобществлены во всем кристалле. Классическая теория металлов рассматривала электроны как идеальный газ, частицы которого сталкиваются с дефектами решетки, колебаниями атомов, за счет чего их скорость остается ограниченной в электрическом поле. До столкновения электрон должен ускоряться в течение времени τ . Можно показать, что длина свободного пробега, из классической механики, составит

$$\lambda = \frac{e \cdot E}{2m} \cdot \tau^2 \quad (6.2)$$

Заряд, который протекает через единичную площадку в течение времени τ заполняет цилиндр длиной l с плотностью n . Приравняв $l \cdot n$ произведению плотности тока на длительность t , получим

$$J = \frac{e^2 \cdot n \cdot E}{2 \cdot m} \cdot \tau \quad (6.3)$$

Из этого выражения следует закон Ома для металлов, выражение для удельной электропроводности будет иметь вид:

$$\sigma = \frac{e^2 \cdot n \cdot \tau}{2 \cdot m} \quad (6.4)$$

Если те же операции провести для переноса тепла электронным газом, то значение удельной теплопроводности k составит:

$$k = \frac{3 \cdot k^2 \cdot n \cdot \tau \cdot T}{2 \cdot m} \quad (6.5)$$

Здесь k - постоянная Больцмана, T - температура. Отсюда можно получить, что известная из практики закономерность, что чем больше электропроводность металла, тем больше его теплопроводность имеет под собой теоретическое обоснование. Действительно, поделив выражение (1.5) на (1.4) и дополнительно разделив на T получим, т.н. число Лоренца

$$L = k / (\sigma \cdot T) = 3(k / e)^2 \quad (6.6)$$

т.е. теплопроводность и электропроводность пропорциональны друг другу. Действительно, измеренные числа Лоренца для разных металлов слабо отличаются друг от друга.

Экспериментальные значения объемного удельного сопротивления металлов по порядку величины составляют $(10^{-8} - 10^{-7}) \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$

Для практики важно, что электропроводность металлов зависит от температуры. Экспериментально установлено в ряде случаев, что эта зависимость близка к линейной зависимости. Обычно ее приводят в виде температурной зависимости удельного сопротивления.

$$r(T) = r(T_0)(1 + \text{TKr}(T - T_0)) \quad (6.7)$$

Здесь $r(T_0)$ - удельное сопротивление при определенной температуре T_0 , обычно это 20°C . TKr - температурный коэффициент удельного сопротивления. Он имеет размерность $1/\text{K}$ (или $1/^\circ\text{C}$), для металлов TKr всегда положителен.

2. Описание экспериментальной установки

Для выполнения работы используется специально созданная установка. в которой сопротивление проводников определяется по методу “амперметра-вольтметра” а нагрев осуществляется рабочим током. Схема установки представлена на рисунке 1.1.

Измерение температуры производится с помощью термодатчика, закрепляемого на исследуемом проводнике.

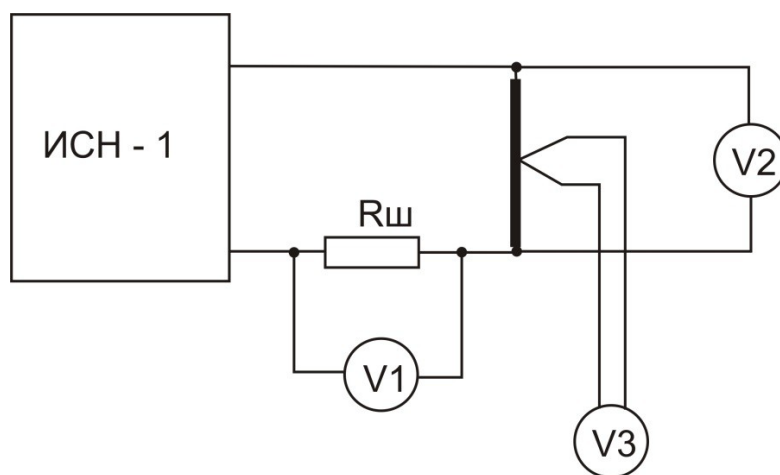


Рисунок 6.1 – Схема экспериментальной установки. V1 – измеряет ток, V2 – напряжение, V3 – температуру образца.

3. Порядок выполнения работы

1. Подключить исследуемый проводник к выводам ИСН-1 «Общ» и «0-50 А», переключатель режима работы установить в положение 0-50 А постоянного тока. Дать прибору прогреться в течении 15 мин.

2. Непосредственно на выводы исследуемого проводника прикрепить зажимы для измерения напряжения на нем. Термодатчик закрепить на середине исследуемого образца.

3. Установить ток порядка $I=5\text{А}$, измерить температуру и напряжение на исследуемом образце.

4. Рукояткой увеличения тока повышать ток через проводник. При определенных значениях тока, заданных преподавателем, выдержать проводник в течении времени порядка 5 минут до стабилизации показаний термодатчика. Результаты измерений занести в таблицу 6.1.

5. Построить приближенные графики зависимости удельного сопротивления от температуры для каждого материала.

Таблица 6.1 – Результаты измерений и расчетов

Наименование материала	Температура проводника, К	Ток, протекающий через проводник I, А	Сопротивление $R_{пр}$, Ом	Диаметр провода, м	Длина провода	Падение напряжения на проводнике U, В	Удельное сопротивление материала ρ_{mat} , Ом·м

5. Обработка результатов измерений

1. Для каждого измерения:

Рассчитать напряжение, используя закон Ома:

$$U = R_{np} / I \quad (6.8)$$

где I – ток через образец, А; U – напряжение на нем, В.

Затем рассчитать удельное объемное сопротивление материала проводника

$$\rho_{mat} = \frac{R_{np} \cdot S}{l} \quad (6.9)$$

где l – длина образца, м, S – площадь поперечного сечения m^2 .

Значения ρ_{mat} и R_{np} занести в таблицу 1.

2. Рассчитать температурный коэффициент сопротивление материала – TKr :

$$TKr = \frac{\frac{r(T)}{r(T_0)} - 1}{(T - T_0)} \quad (6.10)$$

где $r(T_0)$ – сопротивление проводника при токе $I=5A$, T_0 – температура проводника при данном токе; $r(T)$ – сопротивление при температуре T .

В результате получится несколько значений TKr (количество измерений минус одно), значение которых занести в таблицу 1.1. Затем рассчитать среднее значение TKr :

$$TKr = \frac{TKr_1 + TKr_2 + \dots + TKr_n}{n} \quad (6.11)$$

Где n – количество рассчитанных значений TKr :

6. Оформление отчета. Отчет должен содержать: измеренные значения токов, напряжений и температуры проводников, рассчитанные значения сопротивлений проводников, удельных сопротивлений материалов проводников, а так же рассчитанные значения TKr проводников; выводы по проделанной работе.

7.

5. Содержание, форма и правила оформления отчета по лабораторной работе.

Каждый студент, выполнивший лабораторную работу, должен оформить отчет и предоставить его преподавателю.

Отчет должен содержать:

1. Название и цель работы.
2. Приборы и материалы, применяемые в лабораторной работе.
3. Таблицы экспериментальных и расчетных данных.

5. Выводы по результатам работы, в которых должна быть дана оценка исследуемых явлений, подтверждение в выполнении законов, объяснение характера кривых.

Отчет должен иметь титульный лист с указанием Ф.И.О. студента, номера группы и даты выполнения работы.

Контрольные вопросы:

- 1) Чем обусловлен электрический ток в металлах?

- 2) Как зависит сопротивление металла от температуры?
- 3) Что такое удельное сопротивление проводника?
- 4) Что такое температурный коэффициент сопротивления?
- 5) От каких молекулярных параметров зависит проводимость металла?
- 6) Что такое длина свободного пробега электрона?
- 7) Какие молекулярные параметры определяют ток в проводнике?
- 8) Как температура влияет на свободный пробег электрона?
- 9) Как взаимосвязаны электропроводность и теплопроводность металлов?
- 10) Что такое свободные заряды и откуда они берутся в металле?
- 11) Назовите основные металлы, применяемые в качестве проводниковых

материалов в электротехнике и области их применения.

- 12) Назовите металл с самым низким удельным сопротивлением.
- 13) Что определяет концентрацию свободных электронов в металле?
- 14) Что такое электрический ток?
- 15) Какова вольт-амперная характеристика металла при постоянной

температуре?

- 16) Назовите металлы с самым низким удельным сопротивлением.
- 17) Что такое положительный ТКС и отрицательный ТКС?