

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации  
ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет»

**А.А. Василенко**

**ПРАКТИКУМ ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИМ  
МАТЕРИАЛАМ**

Красноярск 2018

**ББК 31.23**

**В 19**

*Рецензенты:*

*Д.А. Иванов, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроснабжения и электротехники ФГБОУ ВО «Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского»*

*Г.С. Тимофеев, кандидат технических наук, начальник службы электрических режимов ПО ЦУС филиала ПАО «МРСК Сибири» – «Красноярскэнерго»*

**В 19 Василенко, А.А.**

**Практикум по электротехническим материалам / А.А. Василенко; Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2018. – 40 с.**

Представлены лабораторные работы, предусмотренные программой курса. Приведены методики проведения лабораторных работ, описания схем лабораторных установок и методика проведения расчетов по полученным результатам. Даны рекомендации по оформлению отчетов по лабораторным работам. Приведены данные для выполнения индивидуальной контрольной работы, состоящей из трех контрольных заданий.

Предназначено для студентов Института инженерных систем и энергетики, обучающихся по специальности 4.35.02.08 – «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства».

**ББК 31.23**

© Василенко А.А., 2018

© ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет», 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Лабораторная работа № 1. Исследование электропроводности диэлектриков .....	6
Лабораторная работа № 2. Определение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь электроизоляционных материалов.....	14
Лабораторная работа № 3. Электрическая прочность твердых диэлектриков.....	21
Лабораторная работа № 4. Исследование статистических закономерностей пробоя трансформаторного масла.....	26
Индивидуальная контрольная работа.....	31
Контрольное задание № 1.....	32
Контрольное задание № 2.....	34
Контрольное задание № 3.....	36
Заключение.....	38
Рекомендуемая литература.....	39

## **ВВЕДЕНИЕ**

Дисциплина «Материаловедение. Электротехнические материалы» изучает основные физические явления, происходящие в материалах при воздействии на них электромагнитных полей и различных факторов; виды электротехнических материалов и возможности их применения в основных видах электроэнергетического оборудования.

### **Задачи изучения дисциплины**

В результате изучения дисциплины студент должен решить задачи по анализу классификации современных материалов, применяемых в электротехнических устройствах, взаимосвязи их состава, строения, основных свойств материалов с процессами, происходящими в них при воздействии электрического, магнитного полей и температуры, состава рабочей среды и других факторов, что является необходимой основой их рационального применения; по приобретению навыков испытания материалов и определения их основных характеристик.

Дисциплина нацелена на формирование профессиональных компетенций:

ПК 1.1 – выполнять монтаж электрооборудования и автоматических систем управления;

ПК 1.2 – выполнять монтаж и эксплуатацию осветительных и электронагревательных установок;

ПК 1.3 – поддерживать режимы работы и заданные параметры электрифицированных и автоматизированных систем управления технологическими процессами;

ПК 2.1 – выполнять мероприятия по бесперебойному электроснабжению сельскохозяйственных организаций;

ПК 2.2 – выполнять монтаж воздушных линий электропередачи и трансформаторных подстанций;

ПК 2.3 – обеспечивать электробезопасность;

ПК 3.1 – осуществлять техническое обслуживание электрооборудования и автоматизированных систем сельскохозяйственной техники;

ПК 3.2 – диагностировать неисправности и осуществлять текущий и капитальный ремонт электрооборудования и автоматизированных систем сельскохозяйственной техники;

ПК 3.3 – осуществлять надзор и контроль за состоянием и эксплуатацией электрооборудования и автоматизированных систем сельскохозяйственной техники;

ПК 4.1 – участвовать в планировании основных показателей в области обеспечения работоспособности электрического хозяйства сельскохозяйственных потребителей и автоматизированных систем сельскохозяйственной техники;

ПК 4.2 – планировать выполнение работ исполнителями;

ПК 4.3 – организовывать работу трудового коллектива.

В результате изучения дисциплины студент должен

**знать:**

- современные способы получения материалов и изделий из них с заданным уровнем эксплуатационных свойств;
- строение и свойства материалов;
- сущность явлений, происходящих в материалах в условиях эксплуатации изделий;

**уметь:**

- оценивать и прогнозировать состояние материалов и причин отказов деталей под воздействием на них различных эксплуатационных факторов;
- выбирать рациональный способ получения заготовок, исходя из заданных эксплуатационных свойств;

**владеть:**

- методикой выбора конструкционных материалов для изготовления элементов машин и механизмов.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы – изучение основных закономерностей прохождения тока через диэлектрик и ознакомление с методами определения его удельного объемного и удельного поверхностного сопротивлений.

### Основные положения

Под действием постоянного напряжения через технический диэлектрик протекает ток утечки

$$I_{аб} = I_{ск} + I_{ут} \quad (1)$$

где  $I_{ск}$  и  $I_{аб}$  – 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 (рис. 1).

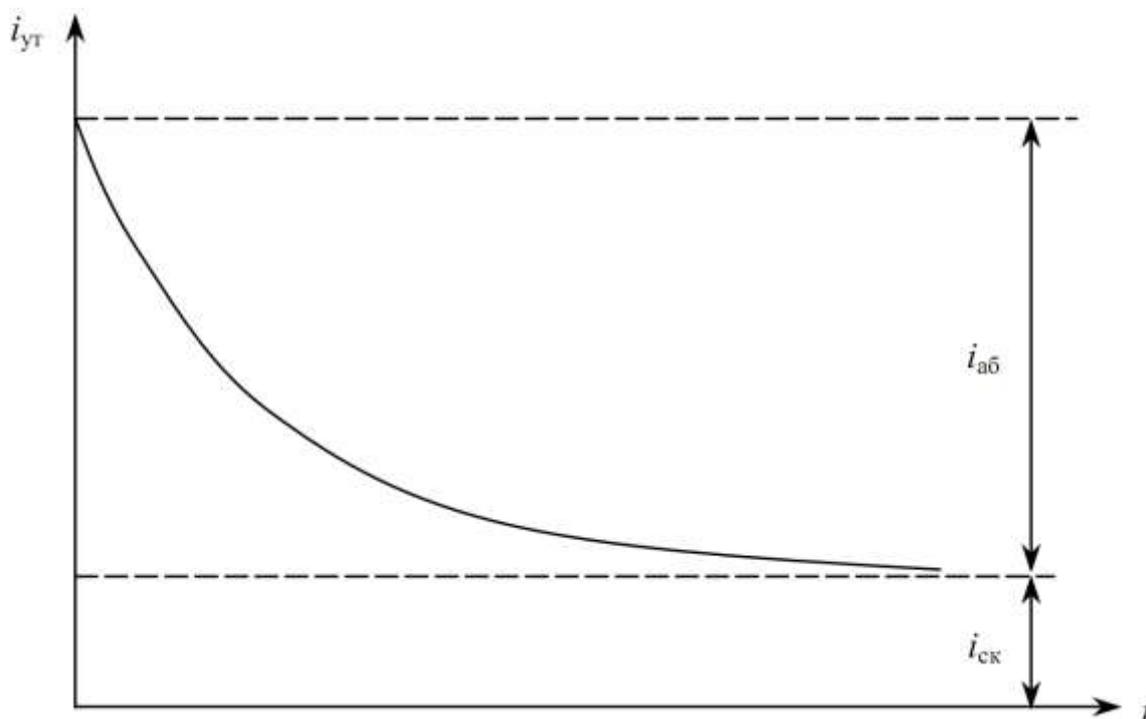


Рис. 1. Зависимость тока утечки через диэлектрик от времени

Сквозной ток возникает в диэлектриках за счет наличия небольшого числа свободных ионов, электронов или коллоидных частиц.

Для твердых диэлектриков как абсорбционный, так и сквозной токи имеют две составляющие. Так, например, для сквозного тока

$$I_{ск} = I_V + I_S, \quad (2)$$

где  $I_V$  и  $I_S$  – соответственно объемный и поверхностный токи, А.

Если объемный ток обусловлен наличием свободных зарядов в объеме диэлектрика, то поверхностный ток – наличием водорастворимых загрязнений и пленки влаги на поверхности диэлектрика (см. рис. 2).

Плотность объемного тока в однородном и изотропном диэлектрике определяется из выражения

$$j_V = \gamma_V E = E/\rho_V, \quad (3)$$

где  $\gamma_V$  – удельная объемная проводимость диэлектрика, См/м;

$E$  – напряженность электрического поля, В/м.

$\rho_V$  – удельное объемное сопротивление диэлектрика, Ом·м;

Объемное 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 отдельного измерения объемного  $I_V$  и поверхностного  $I_S$  токов применяется, в соответствии с ГОСТ 6433.2-80, трехэлектродная система (рис. 3, а).

В случае плоского образца на обе его стороны наносятся напыленные или прижимные электроды. С одной стороны расположены кольцевой 2 и измерительный 1 электроды, с другой – дисковый электрод 3 (см. рис. 3, а). При измерении объемного 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 объемный ток  $I_V$ .

Удельное объемное сопротивление диэлектрика

$$\rho_V = R_V S/t = US/I_V t), \quad (4)$$

где  $R_V$  – объемное сопротивление, Ом;

$S$  – площадь измерительного электрода, м<sup>2</sup>;

$t$  – толщина образца диэлектрика, м;

$U$  – измерительное напряжение, В;

$I_V$  – объемный ток, А.

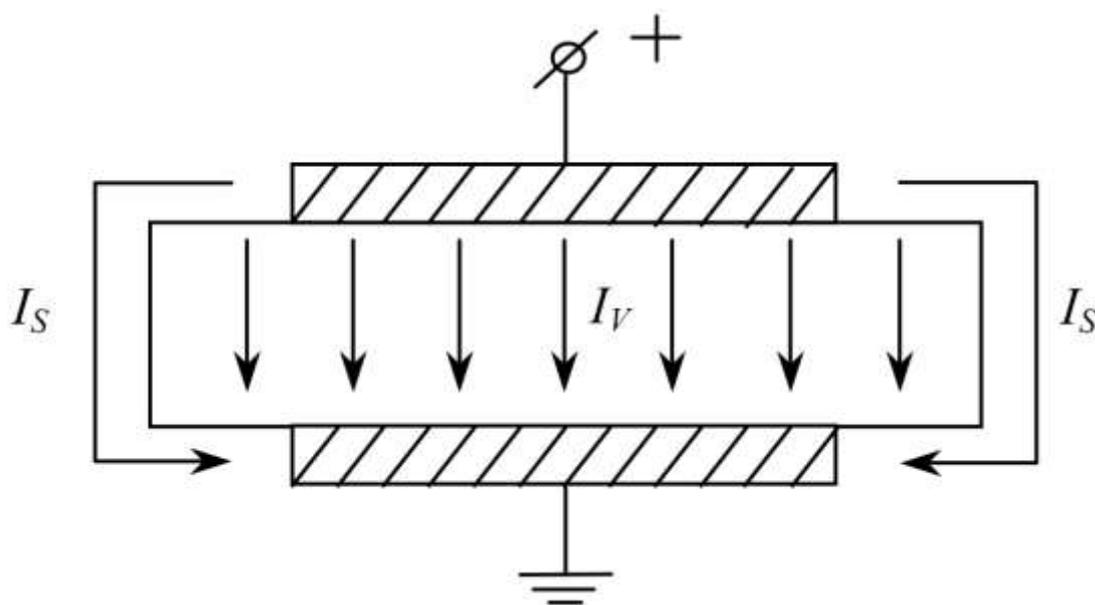


Рис. 2. Протекание объемного  $I_V$  и поверхностного

$I_S$  токов через диэлектрик

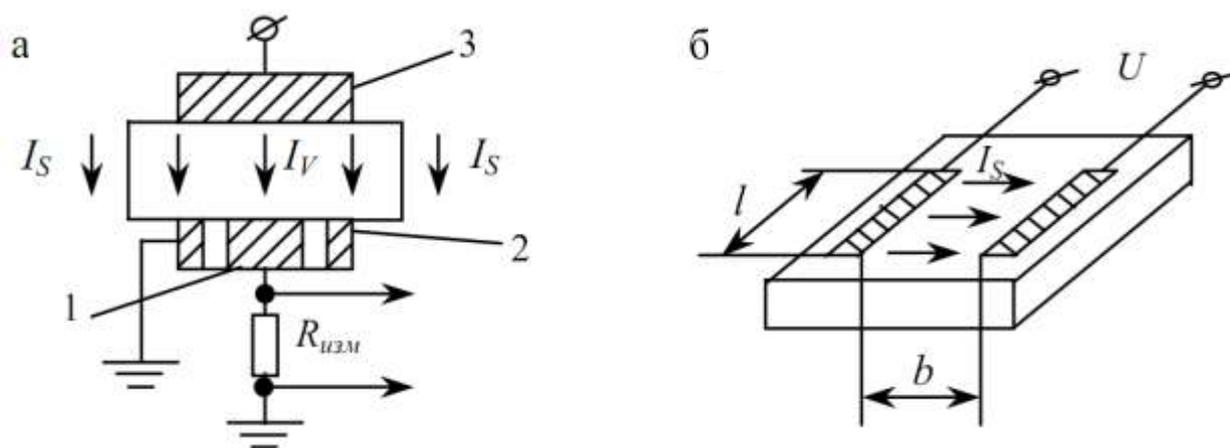


Рис. 3. Электродные системы

*а* – трехэлектродная система для измерения объемного и поверхностного сопротивлений; *б* – двухэлектродная система для измерения поверхностного сопротивления

При измерении поверхностного сопротивления также применяется система из двух электродов, нанесенных на одну сторону плоского образца (см. рис. 3, б). Электроды имеют форму двух параллельных полос, расположенных на расстоянии  $b$ .

Удельное поверхностное сопротивление

$$\rho_S = R_S l / b = U l \square I_S b, \quad (5)$$

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 учета поверхностной проводимости для тела любой формы и размеров можно ввести понятие *приведенной длины*  $\Lambda$ .

Приведенная длина диэлектрика  $\Lambda$  имеет размерность длины и однозначно определяет соотношение параметров тела (электрической проводимости  $G$ , См, электрического сопротивления,  $R$ , Ом, и электрической емкости  $C$ , Ф) между электродами и характеристик материала.

Так, электрическая проводимость тела равна

$$G = \gamma \cdot \Lambda, \quad (6)$$

электрическое сопротивление

$$R = \rho / \Lambda, \quad (7)$$

емкость

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \Lambda. \quad (8)$$

Для тела длиной  $h$ , м, и сечением  $S$ , м<sup>2</sup>, произвольной конфигурации, но постоянным по всей длине тела (например, проволока или жила кабеля, диэлектрик плоского конденсатора), электрическое сопротивление

$$R = \rho \cdot h / S, \quad (9)$$

следовательно, приведенная длина этого тела определяется по выражению

$$\Lambda = S / h. \quad (10)$$

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 соединенных сопротивлений  $dR$  бесконечно тонких слоев, имеющих толщину  $dx$  и радиус  $x$ . Сопротивление такого слоя составляет

$$dR = \rho \cdot dx / (2\pi \cdot x). \quad (11)$$

Интегрируя в пределах от  $x = r_1$  до  $x = r_2$ , получаем сопротивление

$$R = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\rho}{2\pi \cdot l} \cdot \frac{dx}{x} = \frac{\rho}{2\pi \cdot l} \ln \frac{r_2}{r_1} . \quad (12)$$

Следовательно, в этом случае приведенная длина

$$\Lambda = 2\pi \cdot l / (\ln r_2 / r_1). \quad (13)$$

### Описание лабораторной установки

Лабораторная установка предназначена для измерения удельного объемного и удельного поверхностного сопротивлений твердых диэлектриков. Установка включает в себя термостат 3, тераомметр и измерительную ячейку 1 с образцом твердого диэлектрика 2 (см. рис. 4).

Тераомметр Е6-13А предназначен для измерения объемного и поверхностного сопротивлений в пределах от  $10^2$  до  $10^{13}$  Ом. Измерительное напряжение 100 В. Образец твердого диэлектрика 2 помещается в измерительную ячейку 1, имеющую трехэлектродную систему.

### Порядок выполнения работы

Поместить заданный образец твердого диэлектрика в измерительную ячейку. Измерительную ячейку подключить проводниками к тераомметру в соответствии со схемой рисунка 5.

Включить тераомметр и установить такой предел измерения, на котором можно измерить сопротивление (желательно использовать правую часть шкалы) при температуре окружающей среды.

В процессе поляризации сопротивление диэлектрика может значительно возрасти. Поэтому измерение сопротивления производится через 1 мин после подачи напряжения на образец.

Увеличивая температуру, произвести измерения объемных и поверхностных сопротивлений образца. Результаты измерений  $R_V$  и  $R_S$  записать в таблицу 1.

Поместить второй образец материала в измерительную ячейку и повторить измерения.

Таблица 1 – Результаты измерений и расчетов

Образец 1, $b =$					Образец 2, $b =$				
Измерено			Вычислено		Измерено			Вычислено	
$t$	$R_V$	$R_S$	$\rho_V$	$\rho_S$	$t$	$R_V$	$R_S$	$\rho_V$	$\rho_S$
$^{\circ}\text{C}$	Ом	Ом	Ом м	Ом	$^{\circ}\text{C}$	Ом	Ом	Ом м	Ом

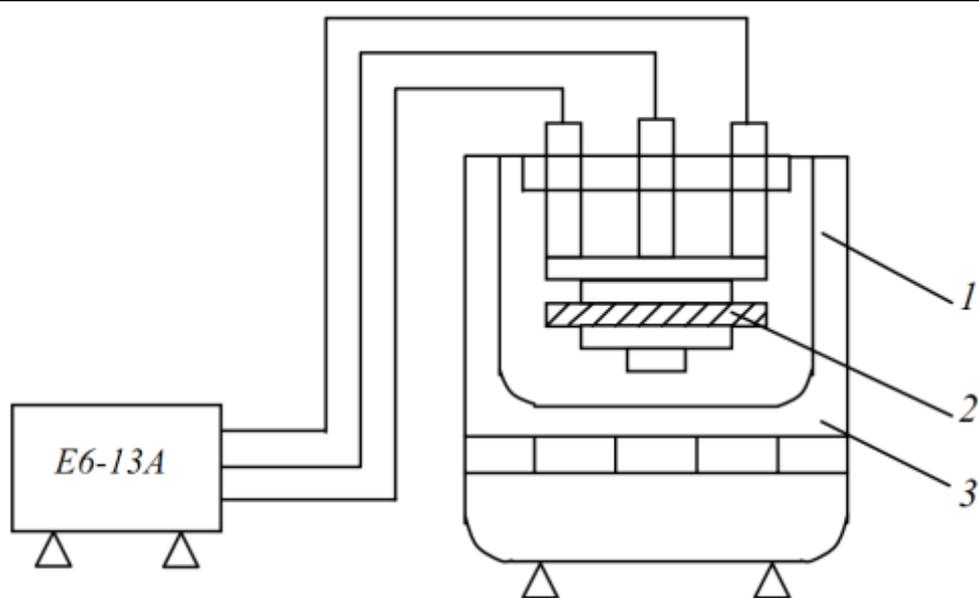


Рис. 4. Блок-схема лабораторной установки

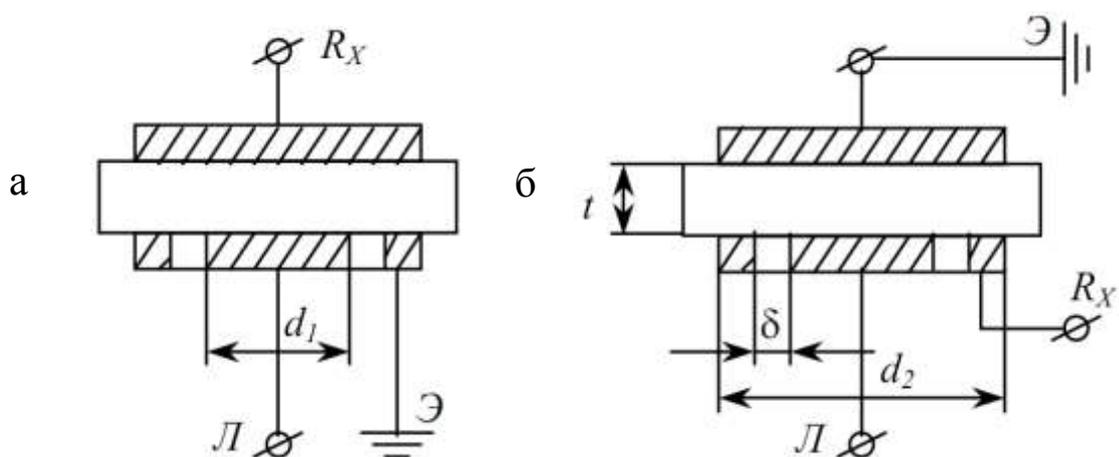


Рис. 5. Схема присоединения электродов к тераомметру:

$a$  – при измерении  $R_V$ ;  $b$  – при измерении  $R_S$

Рассчитать удельное объемное сопротивление

$$\rho_V = 0,785 R_V d_{cp}^2 / b \quad (14)$$

и удельное поверхностное сопротивление

$$\rho_S = \pi d_{cp} R_S / \delta, \quad (15)$$

где  $R_V$  и  $R_S$  – соответственно объемное и поверхностное сопротивления, Ом;

$d_{cp} = (d_1 + d_2) / 2$  – 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;

$d_1 = 25$  мм;  $d_2 = 29$  мм.

### Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- название и цель работы;
- схему присоединения электродов к тераомметру;
- расчетные формулы;
- таблицу с результатами измерений и расчетов;
- графики зависимости удельных объемных и поверхностных сопротивлений диэлектриков от температуры;
- анализ полученных результатов и выводы по работе.

### Контрольные вопросы

1. Причины возникновения абсорбционного и сквозного токов в диэлектриках.
2. Объемный и поверхностный токи, объемное и поверхностное сопротивления.
3. Виды электропроводности газообразных диэлектриков.
4. Электропроводимость жидких диэлектриков. Зависимость электропроводности от напряженности электрического поля.

5. Электропроводимость твердых диэлектриков различного состава.
6. Зависимость электропроводности от температуры, напряжения и влажности окружающей среды.
7. Влияние влажности среды на поверхностное сопротивление гидрофильных и гидрофобных диэлектриков.
8. Методы измерения  $\rho_V$  и  $\rho_S$ . Двух- и трехэлектродные системы.
9. Способы повышения удельного поверхностного сопротивления диэлектриков.
10. Причина учета поверхностного сопротивления только для твердых диэлектриков.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ТАНГЕНСА УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Цель работы:* определить диэлектрическую проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь твердых электроизоляционных материалов с помощью мостовой схемы.

#### Общие сведения

Важнейшим свойством диэлектриков является способность их к поляризации под действием приложенного электрического напряжения. Процесс поляризации представляет собой ограниченное смещение связанных зарядов в веществе или ориентацию дипольных молекул. Интенсивность процессов поляризации, протекающих в диэлектриках под действием приложенного напряжения, характеризуют относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r$ . Эта величина представляет собой отношение заряда  $Q$  при некотором напряжении на конденсаторе, изготовленном из данного диэлектрика, к заряду  $Q_0$ , который можно было бы получить в конденсаторе тех же размеров и при том же напряжении, если бы между электродами находился вакуум.

$$\epsilon_r = \frac{Q}{Q_0} = \frac{Q_0 + Q_d}{Q_0} = 1 + \frac{Q_d}{Q_0}, \quad (16)$$

где  $Q_d$  – заряд, обусловленный поляризацией вещества, разделяющего электроды.

Диэлектрическими потерями называют активную мощность, рассеиваемую в диэлектрике при воздействии на него электрического поля и вызывающую нагрев диэлектрика. Нагрев диэлектриков приводит к ускорению процессов старения и снижению их электрической прочности.

Образец материала с диэлектрическими потерями можно представить в виде эквивалентной схемы замещения (см. рис. 6).

*Углом диэлектрических потерь* называют угол  $\delta$ , дополняющий до  $90^\circ$  угол сдвига фаз  $\varphi$  между током  $I$ , протекающим через диэлектрик, и приложенным к нему напряжением  $U$  (см. рис. 6). Чем больше

рассеиваемая в диэлектрике мощность, переходящая в тепло, тем больше угол диэлектрических потерь  $\delta$  и его функция  $\operatorname{tg}\delta$ .

Мощность диэлектрических потерь в схеме (рис. 6) определяется формулой

$$P_{\delta} = U \cdot I_a. \quad (17)$$

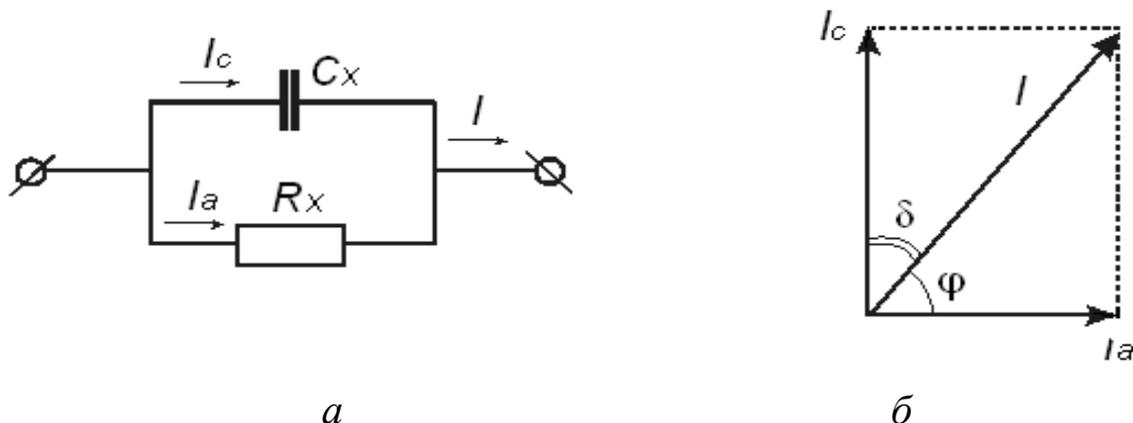


Рис. 6. Эквивалентная схема замещения и векторная диаграмма диэлектрика с потерями

Учитывая, что активный ток  $I_a = U/R_x$ , формулу (17) можно записать в виде

$$P_{\delta} = U^2 / R_x. \quad (18)$$

Согласно векторной диаграмме,

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{I_a}{I_c} = \frac{U / R_x}{U \omega C_x} = \frac{1}{\omega R_x C_x}, \quad (19)$$

где  $\omega = 2\pi f$  – круговая (циклическая) частота тока.

Выразив из (19)  $R_x$  и подставив его в (18), можно получить формулу, связывающую диэлектрические потери с величиной  $\operatorname{tg}\delta$ .

$$P_{\delta} = U^2 \cdot \omega \cdot C_x \cdot \operatorname{tg}\delta. \quad (20)$$

Тангенс угла диэлектрических потерь ( $\operatorname{tg}\delta$ ) и диэлектрическую проницаемость ( $\epsilon_r$ ) определяют на промышленной частоте ( $f = 50$  Гц) с помощью мостовых схем (рис. 7).

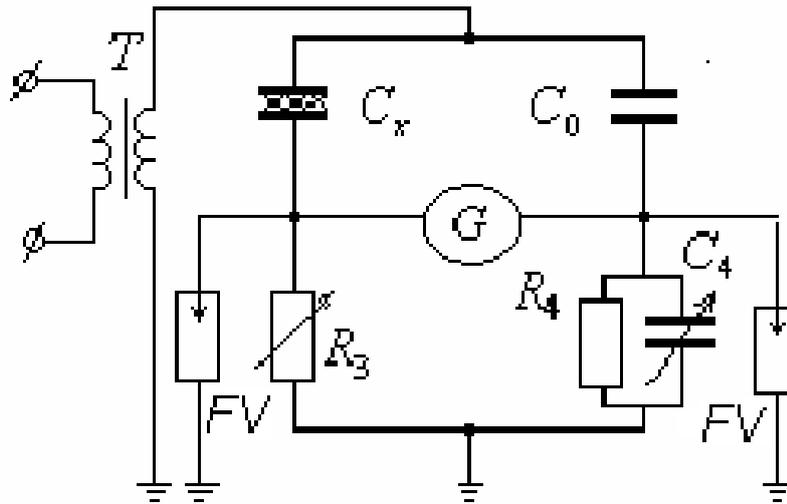


Рис. 7. Принципиальная схема высоковольтного моста для измерения  $\epsilon$  и  $\operatorname{tg}\delta$ :  
*T* – повышающий трансформатор; *FV* – разрядники;  $C_x$  – испытуемый образец;  $C_o$  – образцовый конденсатор; *G* – индикатор равновесия моста

Если в схеме (рис. 7) ток, протекающий через индикатор *G*, равен нулю, то такой мост называют уравновешенным. Для уравновешенного моста произведения полных сопротивлений противоположных плеч равны между собой

$$Z_x \cdot Z_4 = Z_o \cdot Z_3. \quad (21)$$

Это равенство называют условием равновесия моста. Из него легко можно определить параметры испытуемого образца, включенного в плечо *x* по параметрам остальных плеч. Например, емкость образца определится выражением

$$C_x = C_o \frac{R_4}{R_3}, \quad (22)$$

а тангенс угла диэлектрических потерь

$$\operatorname{tg}\delta = \omega \cdot C_4 \cdot R_4. \quad (23)$$

Величину  $\epsilon_r$  определяют исходя из формулы плоского конденсатора

$$C_x = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_o \frac{S}{h}, \quad (24)$$

где  $\varepsilon_o = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная;

$S$  – площадь электрода;

$h$  – толщина образца.

Из формулы (24) при круглом электроде диаметром  $D$ , см,

$$\varepsilon_r = 14,4 \frac{C_x h}{D^2}, \quad (25)$$

где  $C_x$  – емкость, пФ.

### **Общие сведения и описание некоторых электроизоляционных материалов**

*Диэлектрики* – это материалы, противодействующие электрическому полю, обладающие большим сопротивлением и не пропускающие электрический ток.

К диэлектрикам также относятся группы материалов: полимеры, волокнистые пропитанные материалы, слоистые пластики, стекло, керамика, материалы на основе слюды и др.

*Полимеры* применяют в производстве многих изделий электротехнической промышленности. Одним из наиболее применяемых материалов этой группы является поливинилхлорид (винипласт). Этот материал устойчив к действию влаги, обладает высокой стойкостью ко многим растворителям и химически активным веществам, обладает малой нагревостойкостью.

Применяют *винипласт* для изоляции защитных оболочек, кабельных изделий, изоляции проводов в различных электрических машинах и аппаратах, работающих при промышленных частотах, в трубчатых разрядниках. Это хороший дугогасящий материал.

*Конденсаторная бумага* является наиболее тонким и высококачественным электроизоляционным видом бумаги. В пропитанном виде образует диэлектрик бумажных конденсаторов. Выпускают двух видов: *кон* – обычная и *силкон* – бумага для силовых конденсаторов. Кабельную бумагу применяют для изоляции силовых кабелей низкого и высокого напряжения.

*Картон* имеет весьма многостороннее применение в трансформаторостроении, машино- и аппаратостроении, применяется в качестве пазовой изоляции вращающихся электрических машин, изоляции магнитопроводов аппаратов. Изготавливается как для работы в воздухе, так и для работы в трансформаторном масле.

*Гетинакс* получают посредством горячей прессовки бумаги, пропитанной бакелитовой смолой. Его используют для изготовления электроизоляционных деталей электрических машин, аппаратов и приборов как низкого, так и высокого напряжения. Слоистая структура гетинакса, как и других слоистых пластиков, приводит к заметной анизотропии свойств в направлениях, перпендикулярных и параллельных слоям. Дугостойкость гетинакса, как и других пластиков, на фенолформальдегидном (бакелитовом) связующем веществе невелика.

*Текстолит* – слоистый прессованный материал, состоящий из двух или более слоев ткани, пропитанной фенолформальдегидной смолой. Текстолит, по сравнению с гетинаксом, обладает повышенным сопротивлением к истиранию и применяется лишь в отдельных случаях для изделий, подвергающихся ударным нагрузкам или работающим на истирание.

*Стеклотекстолит* – слоистый прессованный материал, состоящий из двух или более слоев стеклоткани, пропитанной различными терморезистивными связующими термовеществами. Это наиболее нагревостойкий, влагостойкий и механически прочный слоистый пластик.

*Стекло* – неорганическое аморфное вещество. Используют в качестве диэлектрика конденсаторов и в качестве изоляторов высокого напряжения.

*Органическое стекло* (полиэтилметакрилат) применяют в производстве, когда не требуется большая нагревостойкость, но нужны высокие электроизоляционные свойства, химостойкость, влагостойкость. Как газогенерирующий материал обладает хорошими дугогасящими свойствами.

*Миканит* – материал, получаемый склеиванием между собой пластинок щипаной слюды различными смолами или лаками. Используется для изоляции между коллекторными пластинками электрических машин.

*Фарфор* – материал, получаемый из глины после температурного обжига. Из него изготавливают самые разнообразные электрические изоляторы (линейные, станционные, аппаратные). Фарфор стоек к

воздействию атмосферных осадков, химических веществ, слабо подвержен старению.

### Описание испытательной установки

Значения  $tg\delta$ , емкости и диэлектрической проницаемости образцов электроизоляционных материалов измеряют с помощью лабораторного моста Р-5026 или переносного моста МД-16. Источником переменного испытательного напряжения до 10 кВ служит трансформатор напряжения НОМ-10. Измеряемый диэлектрик или конденсатор  $C_x$  соединяют в схеме моста с образцовым конденсатором  $C_0$  (50 пФ), магазином сопротивлений  $R_3$  и магазином емкостей  $C_4$  (см. рис. 7). В диагональ моста включают нулевой индикатор, в который входят электронный усилитель и гальванометр.

Регулировкой величины сопротивления  $R_3$  и емкости  $C_4$  уравнивают мост. Величина  $R_4$  выбрана такой, чтобы при частоте  $f = 50$  Гц,  $tg\delta$  был равен  $C_4$ . Это соответствует  $R_4 = 10\,000/\pi = 3\,183$  Ом.

### Порядок выполнения работы

1. Установить испытуемый образец между электродами испытательной установки. Выйти за ограждение и только после этого подключить испытуемый образец к схеме.

2. Установить регулятор чувствительности гальванометра в положение минимума.

3. Включить в сеть мостовую схему.

4. Рукояткой регулятора чувствительности добиться расширения световой полоски гальванометра.

5. Поочередно вращая рукоятки декад  $R_3$  и  $tg\delta$ , уменьшить световую полоску гальванометра насколько это возможно.

6. Постепенно увеличивая чувствительность, добиться уравнивания моста с помощью рукояток  $R_3$  и  $tg\delta$  при максимальной чувствительности гальванометра.

7. После окончательного уравнивания моста снять показания  $R_3$  и  $tg\delta$ .

8. Все данные занести в таблицу 2.

9. Рассчитать  $C_x$ ,  $\varepsilon_r$  и  $P_d$  соответственно по формулам (24), (25) и (20).

Таблица 2 – Результаты измерений и расчетов

Материал	$h$ , см	$D$ , см	$tg\delta$	$R_3$ , Ом	$U$ , В	$C_x$ , пФ	$\epsilon_r$	$P_\delta$ , Вт

### Контрольные вопросы

1. Что такое относительная диэлектрическая проницаемость, какие процессы в диэлектрике она характеризует? Как численно определяется?
2. Что такое диэлектрические потери,  $tg\delta$  и какие процессы в диэлектрике они характеризуют?
3. Чем опасны активные потери мощности в диэлектрике?
4. Какими электрическими элементами замещается диэлектрик с потерями?
5. Каковы условия равновесия мостовой схемы?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

### ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

*Цель работы:* ознакомиться с порядком испытаний твердых диэлектриков на электрическую прочность, определить влияние толщины диэлектрика на его электрическую прочность.

#### Общие сведения

При увеличении напряжения, приложенного к изоляции в электрической установке, может произойти электрический пробой. В результате пробоя диэлектрик оказывается непригодным к дальнейшему применению (теряет электроизоляционные свойства материала). Напряжение, при котором происходит пробой, называют пробивным и обозначают  $U_{пр}$ .

Основной характеристикой электроизоляционного материала служит электрическая прочность  $E_{пр}$ , под которой понимают способность электроизоляционных материалов противостоять электрическому пробую. Электрическую прочность характеризуют величиной минимальной напряженности однородного электрического поля, приводящей к пробую

$$E_{пр} = U_{пр} / h, \quad (26)$$

где  $h$  – толщина диэлектрика в месте пробоя, см.

В эксплуатационных условиях поле чаще всего не является однородным, поэтому на практике находят электрическую прочность на образцах в условиях неоднородного поля. Полученное значение называют *средней пробивной напряженностью*. Эта величина существенно зависит от структуры твердых диэлектриков, толщины образца и его площади, от свойств окружающей среды и других факторов. Поэтому для средней напряженности необходимо указывать такие условия, при которых проводили испытания.

При испытаниях постоянным током за пробивное принимается постоянное напряжение на образце в момент пробоя, при переменном

синусоидальном – указывается амплитудное значение пробивного напряжения  $U_{пр\ max} = \sqrt{2} U_{пр}$ .

Пробой твердых диэлектриков может быть вызван электрическими или тепловыми процессами, возникающими под действием поля. Он зависит от характера электрического поля (постоянное, переменное, импульсное), частоты (высокой или низкой), наличия в диэлектрике дефектов, условий охлаждения, времени воздействия напряжения.

Электрический пробой вызван процессами ударной ионизации электронами, разгоняемыми приложенным электрическим полем. Электроны, достигшие определенной критической скорости, производят разрушение молекул диэлектрика, отрывая от них новые свободные электроны. Чисто электрический пробой имеет место, когда исключено влияние электропроводности и диэлектрических потерь, обуславливающих нагрев материала.

Тепловой пробой является следствием разогрева диэлектрика, вызванного диэлектрическими потерями, при приложении электрического поля. При этом происходит разогрев до температур, соответствующих расплавлению и обугливанию материала.

Одним из широко распространенных твердых диэлектриков является бумага конденсаторная (толщина 5–30 мкм) и кабельная (толщина 15–240 мкм). Бумагу используют, главным образом, для изоляции кабелей, конденсаторов и электрических аппаратов. Для производства бумаги применяют древесную целлюлозу, которая имеет волокнистую структуру. Это обуславливает наличие большой пористости, объем пор непитанной бумаги достигает до 40–50 %.

Для увеличения электрической прочности бумаги ее пропитывают изоляционными маслами. При пропитке жидкий диэлектрик заполняет поры, увеличивая, таким образом, электрическую прочность.

На электрическую прочность тонкой конденсаторной бумаги оказывают большое влияние проводящие включения (частицы угольной пыли, металлов или их соединений), число которых может достигать до 600–1 000 на 1 м<sup>2</sup> бумаги. Такие частицы занимают всю толщину листа и поэтому электрическую прочность образца, который состоит из двух листов, определяют практически одним листом. При

увеличении числа слоев бумаги каждый новый слой перекрывает включения других слоев, вероятность совпадения включений в слоях уменьшается и пробивная напряженность растет (рис. 8, а).

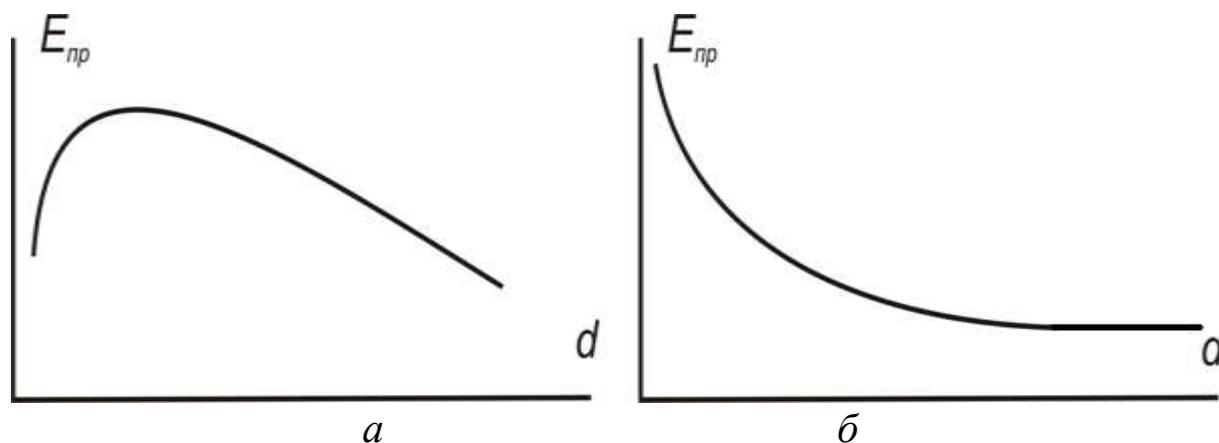


Рис. 8. Зависимости электрической прочности от толщины образца:  
а – для конденсаторной бумаги; б – для кабельной бумаги

Далее с увеличением толщины образца усиливается неоднородность структуры, возрастает количество слабых мест, газовых включений и снижается электрическая прочность как в однородном, так и в неоднородном полях.

В зависимости электрической прочности для кабельной бумаги отсутствует возрастающая часть, так как вследствие большой толщины кабельной бумаги наличие там проводящих частиц, которые шунтируют весь лист, маловероятно (рис. 8, б).

### Описание испытательной установки

Электрическую прочность твердого диэлектрика определяют при воздействии переменного напряжения, источником которого служит установка высокого напряжения (см. рис. 9).

Изменение подводимого напряжения осуществляют регулятором напряжения. Испытуемый образец включают последовательно с резистором  $R_3$ , который служит для ограничения тока в цепи при пробое образца диэлектрика.

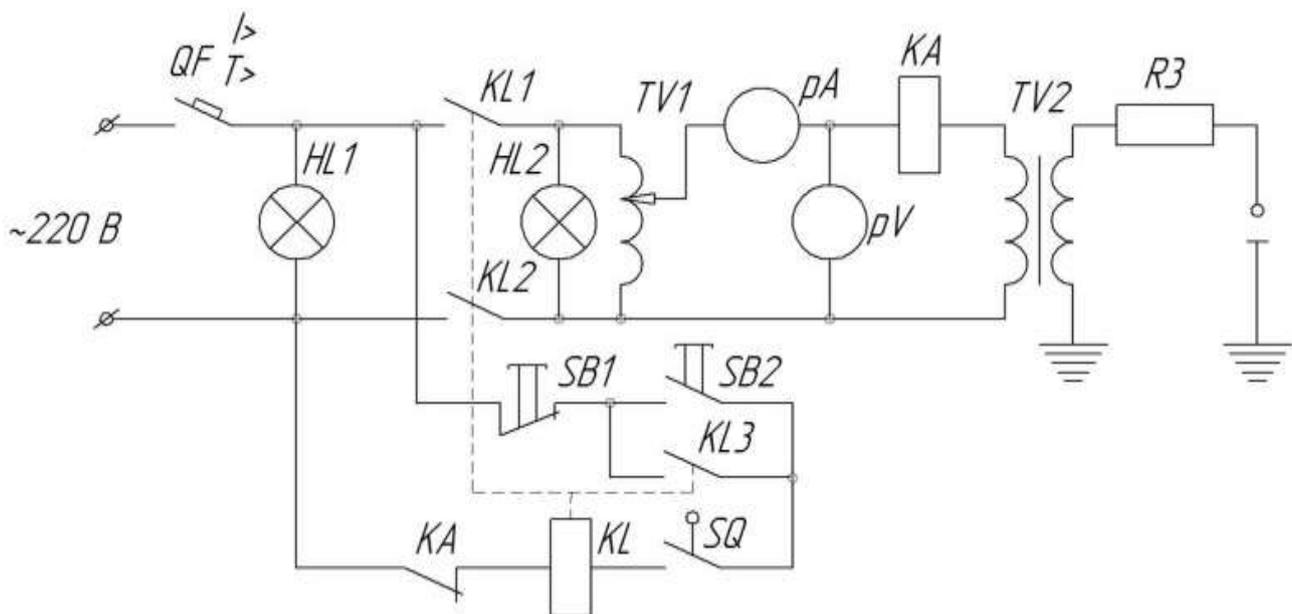


Рис. 9. Принципиальная схема испытательной установки на переменном напряжении: *TV1* – повышающий трансформатор; *TV2* – регулятор напряжения; *HL<sub>1</sub>*, *HL<sub>2</sub>* – сигнальные лампы; *KA* – реле тока; *SQ* – блокировка; *R<sub>3</sub>* – защитное сопротивление; *KL* – промежуточное реле

### Порядок выполнения работы

1. Заготовить образцы конденсаторной бумаги. Количество слов и число образцов задается преподавателем.
2. Замерить толщину всех образцов с помощью микрометра.
3. Замерить пробивное напряжение образца. При испытаниях напряжение плавно повышать до пробоя. Величину амплитудного пробивного напряжения определяют по показаниям вольтметра, установленного на стороне низкого напряжения трансформатора, и коэффициенту трансформации по формуле

$$U_{np\ max} = \sqrt{2} \ k_T \ U_{1\ ср}, \quad (27)$$

где  $k_T$  – коэффициент трансформации испытательного трансформатора.

4. Определить амплитудное значение средней пробивной напряженности по формуле

$$E_{np\ max} = U_{np\ max} / h_{ср}. \quad (28)$$

5. Результаты занести в таблицу 3.

Таблица 3 – Результаты измерений и расчетов

№ п/п	Толщина образца, мм	$U_1$ , В	$U_{пр\ max}$ , кВ	$E_{пр\ max}$ , кВ/мм
1				
.....				

6. По данным таблицы 3 построить зависимости амплитудных значений среднего пробивного напряжения и средней пробивной напряженности от толщины диэлектрика.

### Контрольные вопросы

1. Что такое электрическая прочность диэлектриков?
2. Объяснить причину снижения электрической прочности диэлектрика с увеличением толщины.
3. Объяснить работу схемы испытательной установки.
4. Какими процессами в диэлектрике вызван электрический пробой?
5. Виды пробоя твердого диэлектрика.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНО- СТЕЙ ПРОБОЯ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

*Цель работы:* научиться определять электрическую прочность трансформаторного масла с применением теории вероятностей.

### Общие сведения

Для повышения электрической прочности изоляции трансформаторов, кабелей и бумажных конденсаторов применяют жидкие диэлектрики (трансформаторное и конденсаторное масла, совол, октол, кремний-органические жидкости).

Трансформаторное масло используют как диэлектрик в различной высоковольтной аппаратуре. В трансформаторах масло является также охлаждающей средой, в масляных выключателях – дугогасящей средой. Масло характеризуется достаточно высокой электрической прочностью (12–20 кВ/мм), малыми диэлектрическими потерями, удовлетворительной теплопроводностью. Оно, как и другие жидкие диэлектрики, способно восстанавливать свою электрическую прочность после пробоя. Это масло можно очищать и сушить, тем самым восстанавливая его электроизоляционные свойства.

Трансформаторное масло стареет (окисляется) под влиянием кислорода воздуха, высокой температуры и солнечного света. Масло обладает гигроскопичностью, понижающей его электрическую прочность.

Одной из наиболее важных электрических характеристик жидких диэлектриков является их электрическая прочность, характеризуемая средним значением пробивной напряженности

$$E_{\text{пр ср}} = U_{\text{пр ср}} / h, \quad (29)$$

где  $U_{\text{пр ср}}$  – среднее пробивное напряжение, полученное из серии пробоев;

$h$  – толщина испытываемого слоя жидкого диэлектрика.

Величина пробивного напряжения зависит от формы и размеров электродов, расстояния между ними, давления и температуры жидкого диэлектрика, характера приложенного напряжения, степени загрязнения водой, волокнами и другими примесями. Снижение элек-

троизоляционных свойств жидкого диэлектрика может привести к аварии в электрической установке, поэтому для обеспечения нормальной работы аппаратуры периодически проверяют качество диэлектрика и, в первую очередь, его электрическую прочность.

Для жидких диэлектриков при определении пробивного напряжения характерна плохая воспроизводимость результатов. Пробои технически чистого масла подчиняются статистическим законам. При различии отдельных значений электрической прочности среднее и минимальное значения для масла одинаковой степени частоты, полученные из большого числа опытов, представляют собой стабильные воспроизводимые величины. Экспериментальными исследованиями установлено, что плохая воспроизводимость результатов в основном объясняется наличием примесей, оказывающих большое влияние на процесс пробоя жидких диэлектриков. Так, например, технически чистое трансформаторное масло имеет разброс значений пробивного напряжения 30–50 %, а то же масло, но предварительно обработанное центрифугой, – 5–10 %.

Наибольший разброс имеет место в однородных полях. При воздействии приложенного напряжения в масле происходит поляризация, а затем и ориентация частиц примесей по электрическому полю. При этом между электродами образуются проводящие мостики, снижающие электрическую прочность.

Несмотря на наличие случайных факторов, определяющих дискретные значения пробивного напряжения трансформаторного масла, при большом числе испытаний одних и тех же образцов среднее пробивное напряжение и разброс являются стабильными величинами для одного и того же масла и могут с достаточной точностью служить характеристикой жидкого диэлектрика.

Из опытных данных среднее значение пробивного напряжения определяют по формуле

$$U_{\text{нрсп}} = \frac{\sum_{i=1}^k U_{\text{нр}i} \cdot n_i}{n}, \quad (30)$$

где  $U_{\text{нр}i}$  – дискретное значение пробивного напряжения;

$n_i$  – число пробоев при напряжении  $U_{\text{нр}i}$ ;

$n$  – полное число испытаний.

Если определить относительное число пробоев с пробивным напряжением

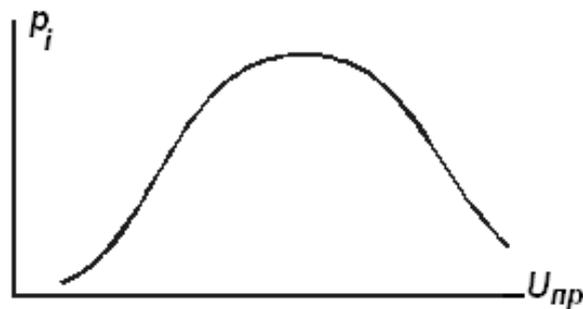
$$\rho_i = n_i / n, \quad (31)$$

то при достаточно большом  $n$   $\rho_i$  приблизительно будет равно вероятности пробоя диэлектрика при напряжении  $U_{пр i}$ . Зависимость  $\rho_i = f(U)$  называется дифференциальной функцией распределения вероятностей пробивного напряжения (рис. 10).

С помощью дифференциальной кривой распределения вероятностей можно определить вероятность пробоя в данном интервале напряжений.

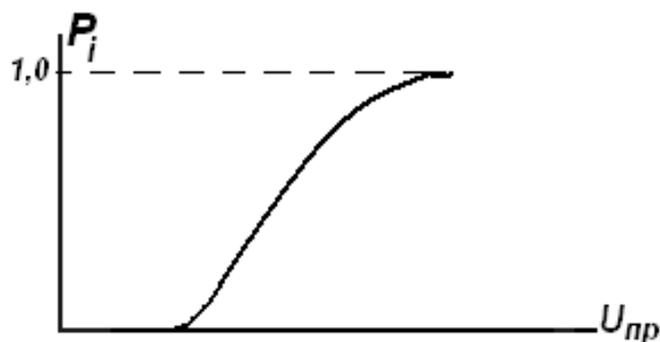
Вероятность пробоя диэлектрика при напряжении, равном или меньшем  $U_{пр i}$ , определяют по формуле

$$P_i = \frac{\sum_{i=1}^k n_i}{n}. \quad (32)$$



*Рис. 10. Дифференциальная кривая распределения вероятностей пробивного напряжения*

Зависимость  $P_i = f(U)$  называют функцией распределения вероятностей пробивных напряжений, а ее график – интегральной кривой распределения вероятностей (рис. 11).



*Рис. 11. Интегральная кривая распределения вероятности пробивного напряжения*

Разброс пробивных напряжений относительно среднего значения характеризуется абсолютной величиной среднего квадратичного отклонения

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^k (U_{np.i} - U_{np.cр})^2 \cdot n_i} / n \quad (33)$$

или относительной, в процентах от среднего пробивного напряжения

$$\sigma_{\%} = \frac{\sigma}{U_{np.cр}} \cdot 100 \% \quad (34)$$

### Описание испытательной установки

Электрическую прочность трансформаторного масла определяют на специальных аппаратах испытания АИИ-70, АИМ-90 или с помощью установок, собранных на базе испытательных трансформаторов (рис. 12).

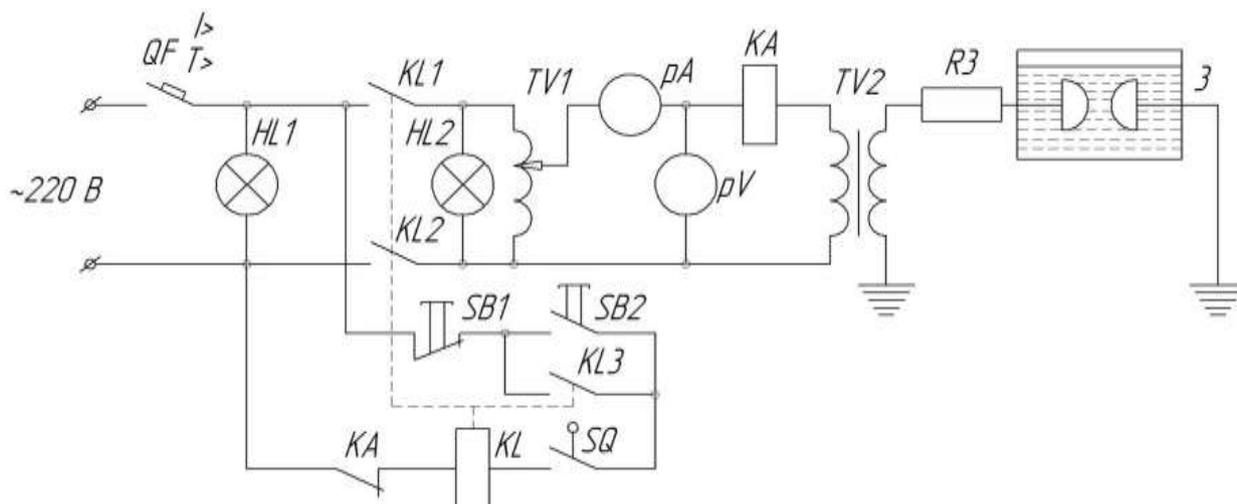


Рис. 12. Принципиальная схема испытательной установки на переменном напряжении: TV1 – испытательный трансформатор; TV2 – регулятор напряжения; HL1, HL2 – сигнальные лампы; КА – реле тока; SQ – блокировка; R<sub>3</sub> – защитное сопротивление; KL – промежуточное реле; Z – ячейка с испытуемой жидкостью

Ячейка с испытуемой жидкостью представляет собой сосуд емкостью 500 см<sup>3</sup> с двумя сферическими латунными электродами радиусом 25 мм. Зазор между электродами должен составлять 2,5 мм.

Испытывают масло при плавном подъеме напряжения до пробоя. После каждого пробоя из зазора между электродами удаляют частицы сажи.

### Порядок выполнения работы

1. Произвести 50 пробоев масла в стандартном разряднике.
2. Результаты измерений расположить в порядке возрастания от минимального значения  $U_{np}$  до максимального (вариационный ряд). Этот вариационный ряд  $U_{np}$  разбить на равные интервалы, число которых обычно выбирают равным 8–12.
3. Определить число пробоев  $n_i$ , попадающее в каждый интервал пробивных напряжений.
4. Суммировать  $n_i$  каждого интервала со всеми значениями предыдущих интервалов (определить  $\Sigma n_i$ ).
5. По формулам (31) и (32) определить  $\rho_i$  и  $P_i$  для каждого интервала  $U_{np}$ .
6. Результаты расчетов по предыдущим пунктам представить в виде таблицы 4.

Таблица 4 – Результаты измерений и расчетов

№ п/п	$U_{np i}$ , кВ	$n_i$	$\Sigma n_i$	$\rho_i$	$P_i$

7. По результатам, приведенным в таблице 4, построить дифференциальную и интегральную кривые распределения вероятностей пробивного напряжения.
8. Определить  $U_{np ср}$ ,  $E_{np ср}$ ,  $\sigma$  и  $\sigma\%$  по соответствующим формулам (30), (29), (33) и (34).
9. С помощью полученных значений  $E_{np ср}$  и  $\sigma\%$  сделать вывод о качестве испытанного трансформаторного масла.

### Контрольные вопросы

1. Каков характер пробоя трансформаторного масла?
2. От чего зависит электрическая прочность трансформаторного масла?
3. Какова причина статистического разброса пробивных напряжений трансформаторного масла?
4. Что такое  $\sigma$  и каковы единицы его измерения?
5. Что можно определить с помощью дифференциальной и интегральной кривых вероятностей?

# ИНДИВИДУАЛЬНАЯ КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

## Выбор варианта индивидуальной контрольной работы

Номер варианта контрольной работы определяется по двум последним цифрам номера зачетки студента (таблица 5).

Таблица 5 – Определение варианта контрольной работы студента

Предпоследняя цифра номера	Последняя цифра номера									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	7	4	8	11	13	17	21	25	3	5
1	2	6	1	4	3	10	15	2	14	19
2	1	24	16	5	23	20	22	12	18	9
3	13	17	21	12	8	4	5	1	15	3
4	24	22	9	18	10	14	2	16	3	5
5	20	2	12	25	19	23	6	1	4	7
6	4	14	18	7	3	2	2	3	9	25
7	8	19	9	15	5	16	20	21	6	11
8	11	1	17	1	6	15	12	5	23	2
9	13	24	5	10	3	4	8	13	17	22

**Пример выбора задания:** номер зачетной книжки – 12эт052. Шифр задания – 52. Номер варианта контрольной работы – 12 (по табл. 5).

## Указания по выполнению контрольной работы

Контрольные задания выполняются в стандартной ученической тетради (12 листов).

На титульном листе тетради должны быть указаны: наименование дисциплины, по которой выполняется контрольное задание; фамилия, имя, отчество автора работы и номер его зачетной книжки; год и дата выполнения задания.

Рисунки и графики должны быть выполнены в соответствии с требованиями соответствующих стандартов на миллиметровой бумаге с применением чертежного инструмента и вклеены в тетрадь. Надписи на чертежах должны быть выполнены стандартным шрифтом.

## Контрольное задание № 1

Диэлектрик плоского конденсатора состоит из  $n$  слоев с соответствующими толщинами  $d_i$ , диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_i$ , проводимостью  $\gamma_i$ . Этот диэлектрик подключен под напряжение величинной  $U$ . Постройте график распределения напряженностей в слоях при постоянном и переменном напряжениях. Оцените электрическую прочность конструкции. Исходные данные приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Варианты заданий

Номер вар.	$n$	$\epsilon_1$	$\gamma_1, 1/\text{Ом}\cdot\text{м}$	$d_1, \text{см}$	$E_{\text{пр}1}, \text{кВ/мм}$	$\epsilon_2$	$\gamma_2, 1/\text{Ом}\cdot\text{м}$	$d_2, \text{см}$	$E_{\text{пр}2}, \text{кВ/мм}$	$\epsilon_3$	$\gamma_3, 1/\text{Ом}\cdot\text{м}$	$d_3, \text{см}$	$E_{\text{пр}3}, \text{кВ/мм}$	$U, \text{кВ}$
1	2	1	$1 \cdot 10^{-14}$	1	3	2,5	$2 \cdot 10^{-15}$	3	50					20
2	2	2,6	$1 \cdot 10^{-10}$	2	60	10	$1 \cdot 10^{-14}$	2	10					40
3	3	5	$2 \cdot 10^{-16}$	1	25	1	$1 \cdot 10^{-13}$	5	3	5	$1 \cdot 10^{-13}$	2	25	50
4	3	6	$3 \cdot 10^{-16}$	1	20	1	$2 \cdot 10^{-14}$	3	3	6	$2 \cdot 10^{-14}$	3	20	4
5	3	8	$1 \cdot 10^{-13}$	0,1	70	4	$1 \cdot 10^{-12}$	0,3	40	8	$1 \cdot 10^{-14}$	1	70	0,7
6	2	1	$1 \cdot 10^{-12}$	0,5	3	6	$2 \cdot 10^{-15}$	0,1	20					0,5
7	3	2	$1 \cdot 10^{-15}$	0,2	30	2,5	$3 \cdot 10^{-13}$	1	45	2	$3 \cdot 10^{-13}$	4	30	10
8	3	9	$1 \cdot 10^{-17}$	0,3	15	2	$3 \cdot 10^{-10}$	1,5	40	9	$3 \cdot 10^{-10}$	3	15	12
9	2	3,3	$2 \cdot 10^{-13}$	0,3	35	2,1	$3 \cdot 10^{-10}$	1,2	25					8
10	2	3,5	$3 \cdot 10^{-11}$	0,6	25	6	$5 \cdot 10^{-10}$	0,3	15					6
11	3	2,6	$1 \cdot 10^{-14}$	1	3	2,5	$1 \cdot 10^{-13}$	3	50	9	$1 \cdot 10^{-13}$	3	25	40
12	3	1	$1 \cdot 10^{-10}$	2	60	10	$2 \cdot 10^{-15}$	2	3	2	$2 \cdot 10^{-14}$	1	30	4
13	2	1,6	$2 \cdot 10^{-16}$	1	25	3	$1 \cdot 10^{-14}$	5	4					50
14	2	2,6	$3 \cdot 10^{-16}$	1	20	1	$1 \cdot 10^{-13}$	3	10					60
15	3	5	$1 \cdot 10^{-13}$	0,1	70	4	$2 \cdot 10^{-14}$	0,3	50	6	$1 \cdot 10^{-14}$	1	45	10
16	3	6	$1 \cdot 10^{-12}$	0,5	3	6	$1 \cdot 10^{-12}$	0,1	10	5	$2 \cdot 10^{-13}$	3	20	0,7
17	3	8	$1 \cdot 10^{-15}$	0,2	30	2,5	$2 \cdot 10^{-15}$	1	3	8	$3 \cdot 10^{-10}$	4	35	12
18	2	1	$1 \cdot 10^{-17}$	0,3	15	2	$3 \cdot 10^{-13}$	1,5	3					15
19	2	2	$2 \cdot 10^{-13}$	0,3	35	2,1	$3 \cdot 10^{-10}$	1,2	40					40
20	2	9	$3 \cdot 10^{-11}$	0,6	25	6	$3 \cdot 10^{-10}$	0,3	20					60
21	3	3,3	$1 \cdot 10^{-10}$	0,3	60	2,1	$5 \cdot 10^{-10}$	3	45	5	$1 \cdot 10^{-13}$	2	70	0,5
22	2	3,5	$2 \cdot 10^{-16}$	0,3	25	6	$1 \cdot 10^{-13}$	0,3	40					20
23	2	2,6	$3 \cdot 10^{-16}$	0,6	20	2,5	$3 \cdot 10^{-10}$	0,1	25					30
24	2	1	$1 \cdot 10^{-13}$	1	70	10	$5 \cdot 10^{-10}$	1	15					40
25	2	1,5	$1 \cdot 10^{-12}$	2	3	5	$1 \cdot 10^{-13}$	1,5	25					10

В многослойных диэлектриках, включенных под переменное напряжение, напряженность электрического поля распределяется по слоям обратно пропорционально их диэлектрической проницаемости.

Так, для диэлектрика, состоящего из двух слоев (рис. 13), напряженности электрического поля в обоих слоях определяются из следующих выражений:

$$E_1 = \varepsilon_2 \cdot U / (d_2 \varepsilon_1 + d_1 \varepsilon_2); \quad (35)$$

$$E_2 = \varepsilon_1 \cdot U / (d_1 \varepsilon_2 + d_2 \varepsilon_1), \quad (36)$$

где  $U$  – полное напряжение между электродами.

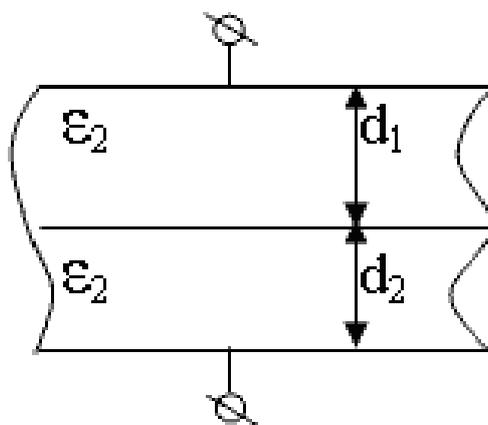


Рис. 13. Двухслойный диэлектрик

В общем случае для многослойного плоского конденсатора напряженности в слоях и напряжение на них определяют по следующим формулам:

$$E_j = U / \varepsilon_j \sum_{j=1}^n (d_j / \varepsilon_j); \quad (37)$$

$$U_j = E_j d_j, \quad (38)$$

где  $n$  – число слоев.

Для расчета установившегося поля в многослойной изоляции, работающей под постоянным напряжением, в предыдущие формулы следует вместо значения  $\varepsilon$  подставлять соответствующие значения объемной удельной проводимости  $\gamma$  материалов соответствующих слоев.

Для оценки электрической прочности конструкции необходимо построить ступенчатый график распределения напряженностей по слоям диэлектрика при заданном напряжении, на котором по оси абсцисс последовательно, одно за другим, откладываются значения толщины слоев диэлектрика, по оси ординат – величина напряженности для соответствующего слоя. Количество ступеней соответствует количеству слоев конструкции. Графики для постоянного и переменного напряжения строятся отдельно. После построения графиков необходимо проанализировать полученный результат и написать вывод с информацией о том, выдержит данная конструкция приложенное к ней напряжение или нет.

## Контрольное задание № 2

Твердый диэлектрик с объемным удельным сопротивлением  $\rho_v$  и удельным поверхностным сопротивлением  $\rho_s$  имеет форму и размеры, указанные в таблице 7 и на рисунке 14. Он установлен между электродами, на которых поддерживается постоянное напряжение  $U$ . Определить ток, протекающий через диэлектрик, и потери мощности в нем.

Ток, протекающий через объем, определяется

$$I_v = U/R_v. \quad (39)$$

Ток, протекающий по поверхности диэлектрика

$$I_s = U/R_s. \quad (40)$$

Суммарный ток утечки

$$I = I_v + I_s. \quad (41)$$

Потери мощности в диэлектрике

$$P = I \cdot U. \quad (42)$$

Удельное объемное сопротивление

$$\rho_v = R_v \cdot S/h. \quad (43)$$

Удельное поверхностное сопротивление

$$\rho_s = R_s \cdot d/l, \quad (44)$$

где  $d$  – периметр,  $l = h$ .

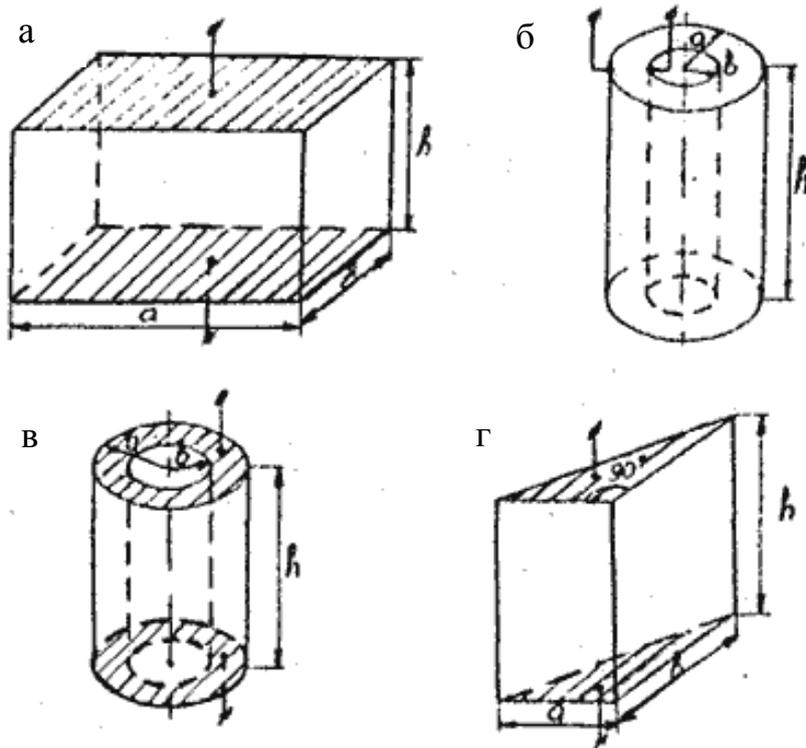


Рис. 14. Формы диэлектриков:

*а, в, г – электродами являются нижняя и верхняя поверхности фигур;  
б – электродами являются внутренняя и внешняя поверхности цилиндра.*

Таблица 7 – Варианты заданий

Номер вар.	Форма	а, мм	б, мм	h, мм	$\rho_v$ , Ом·м	$\rho_s$ , Ом	U, кВ
1	2	3	4	5	6	7	8
1	а	20	20	20	$3 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^9$	2,0
2	б	80	15	25	$2 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^{14}$	0,8
3	в	25	10	15	$3 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^{11}$	1,5
4	Г	35	20	10	$4 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^{13}$	3,0
5	а	125	15	30	$5 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{15}$	5,0
6	б	30	5	20	$3 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{14}$	4,0
7	в	115	20	35	$1 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^{12}$	2,5
8	Г	50	25	15	$1 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^{11}$	3,5
9	а	35	30	5	$8 \cdot 10^{10}$	$1 \cdot 10^{12}$	0,5
10	б	40	5	25	$5 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^{11}$	4,5
11	в	20	10	15	$3 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^9$	5,0
12	Г	80	15	25	$4 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^{14}$	4,0
13	а	35	5	30	$5 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{11}$	2,5
14	б	25	20	25	$3 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{13}$	2,0
15	в	125	15	30	$3 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{15}$	0,8

1	2	3	4	5	6	7	8
16	г	30	10	15	$1 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^{14}$	1,5
17	а	115	20	25	$1 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^{12}$	3,0
18	б	120	5	15	$8 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{11}$	0,5
19	в	50	5	15	$3 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^{12}$	4,5
20	г	35	25	35	$2 \cdot 10^{12}$	$3 \cdot 10^{11}$	5,0
21	а	20	10	25	$3 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^{11}$	0,5
22	б	50	5	10	$4 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^{13}$	4,5
23	а	20	15	15	$5 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{15}$	5,0
24	б	120	15	35	$3 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{14}$	4,0
25	а	115	10	20	$3 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{12}$	1,5

### Контрольное задание № 3

Определить потери мощности в голом проводе из указанного в таблице металла длиной  $l$  и сечением  $S$  при температурах провода  $-20^\circ\text{C}$  и  $+60^\circ\text{C}$ , если величина тока в проводе равна  $I$ .

Температурный коэффициент удельного сопротивления металлов ( $\text{K}^{-1}$ )

$$\text{TK}_\rho = \alpha_\rho = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dT}. \quad (45)$$

Согласно выводам электронной теории металлов, значения  $\alpha_\rho$  чистых металлов в твердом состоянии должны быть близки к температурному коэффициенту расширения идеальных газов, т. е.  $1:273 \approx 0,0037 \text{ K}^{-1}$ .

При изменении температуры в узких диапазонах на практике принимают

$$\rho_2 = \rho_1 [1 + \alpha_\rho (T_2 - T_1)], \quad (46)$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – удельные сопротивления проводникового материала при температурах  $T_1$  и  $T_2$  соответственно;

$\alpha_\rho$  – средний температурный коэффициент удельного сопротивления данного материала в диапазоне температур от  $T_1$  до  $T_2$ .

Таблица 8 – Варианты заданий

Номер вар.	Металл	$\ell$ , м	$S$ , мм <sup>2</sup>	$I$ , А	$\rho$ , мкОм·м при +20 °С	$\alpha_p$
1	Медь	100	16	75	0,0172	0,0043
2	Сталь	200	20	80	0,098	0,006
3	Вольфрам	50	0,04	5	0,055	0,0046
4	Алюминий	150	70	90	0,028	0,0042
5	Медь	80	10	110	0,0172	0,0043
6	Сталь	170	15	120	0,098	0,006
7	Алюминий	120	35	150	0,028	0,0042
8	Вольфрам	70	0,06	10	0,055	0,0046
9	Медь	140	25	200	0,0172	0,0043
10	Сталь	135	35	100	0,098	0,006
11	Никель	10	0,5	20	0,073	0,0065
12	Бериллий	100	1,0	40	0,04	0,0060
13	Медь	200	20	60	0,0172	0,0043
14	Алюминий	110	10	30	0,028	0,0042
15	Вольфрам	0,7	0,1	3	0,055	0,0046
16	Сталь	90	2,5	50	0,098	0,006
17	Алюминий	120	35	150	0,028	0,0042
18	Медь	80	20	75	0,0172	0,0043
19	Сталь	30	10	80	0,098	0,006
20	Вольфрам	100	0,3	5	0,055	0,0046
21	Алюминий	90	10	90	0,028	0,0042
22	Никель	100	1,0	20	0,073	0,0065
23	Бериллий	30	1,5	40	0,04	0,0060
24	Медь	250	10	60	0,0172	0,0043
25	Алюминий	70	20	30	0,028	0,0042

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уважаемые студенты, закончив изучение теоретического материала предмета «Электротехнические материалы» и выполнив работы в лаборатории, вы освоили всю основную часть данной дисциплины, изучающей основные физические явления, происходящие в материалах при воздействии на них электромагнитных полей и различных факторов, а также научились определять виды электротехнических материалов и возможности их применения в основных видах электроэнергетического оборудования. Вы получили необходимую практическую подготовку. Производство электротехнических изделий не стоит на месте. На сегодняшний день номенклатура в этой области довольно обширна. Поэтому знать, а самое главное правильно применять такие материалы является основной задачей квалифицированного специалиста. Хорошо, если вам удастся решить ваши будущие производственные задачи с помощью полученных знаний и умений. Неплохо, если вам придется обратиться к специальной литературе или системе Internet, где вы найдете готовое решение или подсказку к решению поставленной перед вами задачи. Но не исключено, что вам самим придется ставить и решать задачи по выбору подходящих материалов для электрооборудования. Если в решении этих задач практикум окажет вам какую-нибудь помощь, автор будет считать свою работу не напрасной. А пока остается только пожелать вам всяческих успехов.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Колесов, С.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов / С.Н. Колесов, И.С. Колесов. – М.: Высшая школа, 2004. – 519 с.
2. Журавлева, Л.В. Электроматериаловедение / Л.В. Журавлева. – М.: Академия, 2000. – 312 с.
3. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – М.: НЦ ЭНАС, 1999. – 80 с.
4. Тимофеев, С.А. Технология конструкционных материалов и материаловедение: электротехнические материалы: учеб. пособие / С.А. Тимофеев; Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2007. – 158 с.
5. Воропаев, В.В. Электроматериаловедение: метод. указания / В.В. Воропаев. – Тверь: Лилия Принт, 2008. – 42 с.

# **ПРАКТИКУМ ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИМ МАТЕРИАЛАМ**

**Василенко Александр Александрович**

*Редактор И.В. Пантелеева*

Санитарно-эпидемиологическое заключение № 24.49.04.953.П. 000381.09.03 от 25.09.2003 г.

Подписано в печать 20.02.2018. Формат 60×90/16. Бумага тип. № 1.

Печать – ризограф. Усл. печ. л. 2,75. Тираж 60 экз. Заказ № 43

Редакционно-издательский центр Красноярского государственного аграрного университета  
660017, Красноярск, ул. Ленина, 117