

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ  
УЗБЕКИСТАН  
ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АБУ  
РАЙХАНА БЕРУНИ**

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

**МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО.**

к выполнению лабораторных работ по курсу  
« Электротехнические материалы »

Ташкент – 2005

В методическом руководстве содержатся 4 работ по  
различным  
разделам курса " Электротехнические материалы ".  
Руководство предназначено для студентов ЭЭ, ЭЭЭ.

Составители: Ахмедов А.Ш.  
Курбанбаева Д.У.

Кафедра «Электротехника, электромеханика и  
электротехнология»

## Электропроводность изолирующих материалов.

Любой реальный диэлектрик под действием сил электрического поля проводит электрический ток, хотя его проводимость в нормальных условиях на десятки порядков меньше, чем проводимость проводниковых материалов.

Природа проводимости диэлектриков также отличается от проводников, у которых электронная проводимость. У диэлектриков же, в основном ионная проводимость. Электронная проводимость проявляется, в основном, в сильных электрических полях.

Проводимость диэлектриков обеспечивается некоторым количеством свободных зарядов. Природа появления этих свободных зарядов различна в зависимости от агрегатного состояния материала вследствие диссоциации собственных молекул или молекул полярных примесей. В газах свободные заряды возникают за счет ионизационных явлений под действием внешних ионизирующих факторов, таких как космические лучи, ультрафиолетовое излучение Солнца и др.

Проводимость, вызванная движением свободных зарядов через толщу (объем) материала называется сквозной или объемной проводимостью.

Твердые диэлектрики, помимо сквозной проводимости, характеризуются поверхностной проводимостью. Поверхностная проводимость возникает вследствие осаждения на диэлектрике влаги из атмосферного воздуха. Эта влага, невидимым слоем покрывающая поверхность диэлектрика, и проводит электрический ток.

Поэтому для оценки истинной проводимости твердых диэлектрических материалов необходимо учитывать обе составляющие проводимости – объемную и поверхностную.

Для сравнительной оценки различных материалов используют удельное объемное сопротивление -  $\rho$  и удельное поверхностное сопротивление –  $\rho_s$ .

Сопротивление диэлектрика протеканию сквозного (объемного) тока зависит от геометрических размеров образца материала и от свойств этого материала. Эта зависимость выражается формулой:

$$R = \rho \frac{h}{S} \text{ [Ом]}$$

где  $R$  – сопротивление образца;

$h$  – длина пути тока;

$S$  – площадь сечения, через которое протекает ток сквозной (объемной) проводимости;

$\rho$  - коэффициент пропорциональности.

Если  $h$  выражено в /м/,  $S$  – в /м<sup>2</sup>/,  $R$  – в /Ом/, то  $\rho$  будет иметь размерность /Ом·м/. Вообще  $\rho$  физического смысла не имеет, это просто коэффициент пропорциональности между геометрическими размерами образца диэлектрика и его сопротивлением. Но величина этого коэффициента зависит от свойств материала, из которого изготовлен образец, т.к. у одинаковых по геометрическим размерам образцов, изготовленных из различных материалов, сопротивление будет разным.

Следовательно, величина  $\rho$  является такой характеристикой, по которой можно сравнивать различные диэлектрики между собой.

Искусственно можно придать некоторый физический смысл величине  $\rho$ . Если  $h = 1\text{м}$ ,  $S = 1\text{м}^2$ , то тогда  $\rho$  будет численно равно  $R$ . Т.е. можно сказать, что  $\rho$  - численно равно сопротивлению образца диэлектрика, имеющего вид куба с ребром 1м.

Сопротивление диэлектрика протеканию поверхностного тока ( $R_s$ ) определяется следующей формулой.

$$R_s = \rho_s \frac{a}{b}$$

где  $a$  – длина пути поверхностного тока;

$b$  - ширина этого пути

$\rho_s$  - коэффициент пропорциональности.

Если  $a = 1\text{м}$ ,  $b = 1\text{м}$ , то  $\rho_s$  будет численно равно  $R_s$ .

Для измерения поверхностной проводимости диэлектриков в лабораторной практике часто используется метод непосредственного отклонения.

Сущность его заключается в следующем:

Образец диэлектрика включается с помощью электродов в цепь постоянного тока. При этом измеряется падение напряжения на образце "И" и ток проводимости "I" (объемный или поверхностный). Ток I измеряется непосредственно. В качестве измерителя тока используется магнитоэлектрический зеркальный гальванометр.

Сопротивление находится по закону Ома:

$$R = \frac{U}{I}$$

Далее, зная геометрические размеры образца (длину пути тока, сечение, ширину пути тока), находят удельные сопротивления по формулам:

$$R = \frac{I}{I} = \rho \frac{h}{S} \quad \text{или} \quad R_s = \frac{I}{I} = \rho_s \frac{a}{B}$$

Откуда

$$\rho = \frac{I \cdot S}{I \cdot h} \quad \text{или} \quad \rho_s = \frac{I \cdot a}{I \cdot b}$$

Для работы используется так называемая трехэлектродная схема включения образца, позволяющая отдельно измерять объемную поверхностную проводимости.

На рисунке 1 показан образец с электродами.

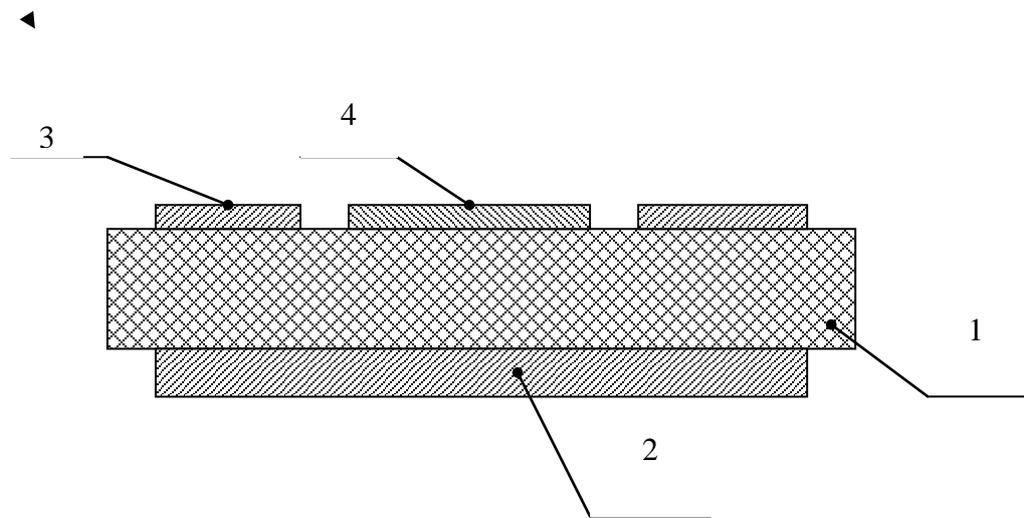


Рис. 1

- 1 – образец (пластинка твердого диэлектрика);
- 2 – нижний электрод;
- 3 – охранный электрод;
- 4 – внутренний электрод.

На рисунке 2 показана принципиальная схема измерения объемной проводимости.

На рисунке 3 показана принципиальная схема измерения поверхностной проводимости.

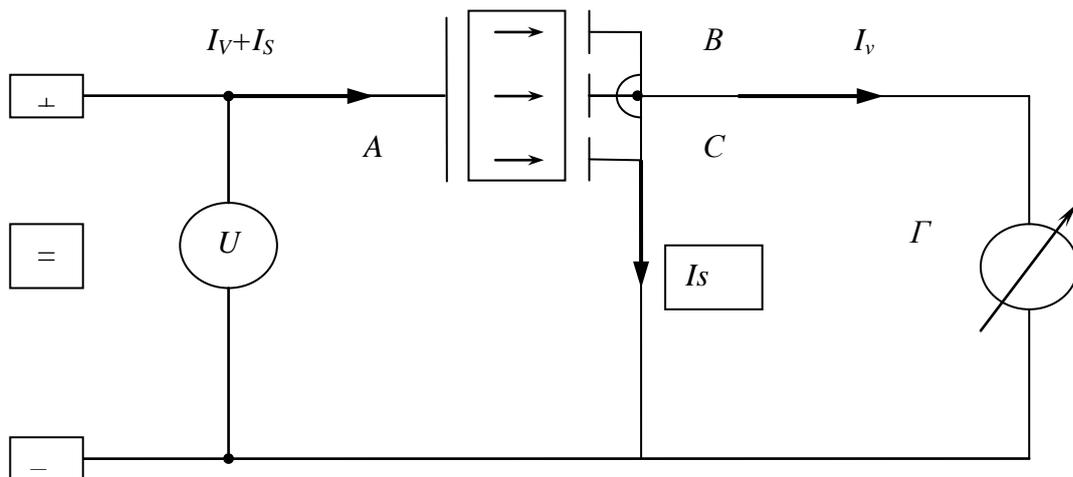


Рис. 2

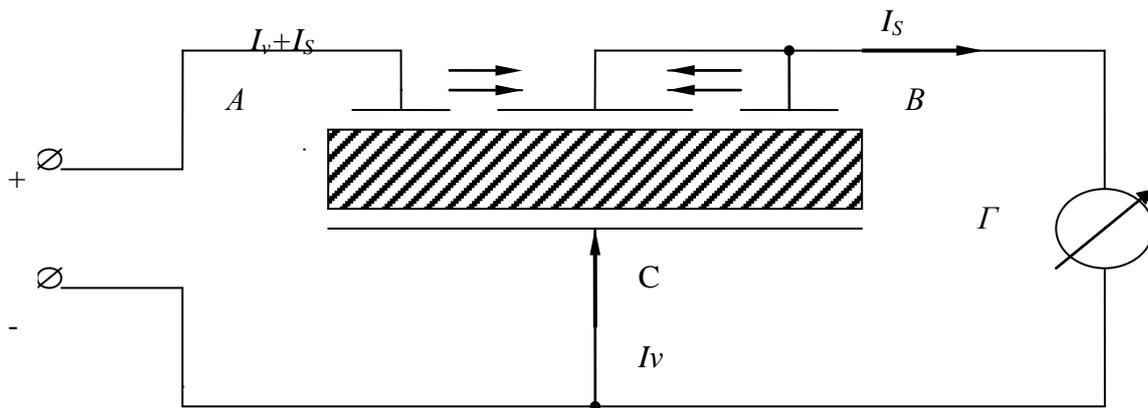


Рис.3

Электроды на поверхность диэлектрика для обеспечения хорошего контакта наклеиваются или наносятся путем распыления тонкого слоя металла в вакууме.

Измерительная схема показана на рисунке 4.

Шунт предназначен для расширения пределов измерения гальванометра.

Сопротивление  $R_0$  предназначено для градуировки гальванометра и для ограничения тока в цепи гальванометра.

Работа на установке.

1. Градуирование гальванометра (определение динамической постоянной по току  $Cd$  /A/ дел/).

1.1. Замкнуть накоротко зажимы А и В с помощью проводника.

1.2. Включить питание выпрямителя и установить напряжение по вольтметру равное 100В.

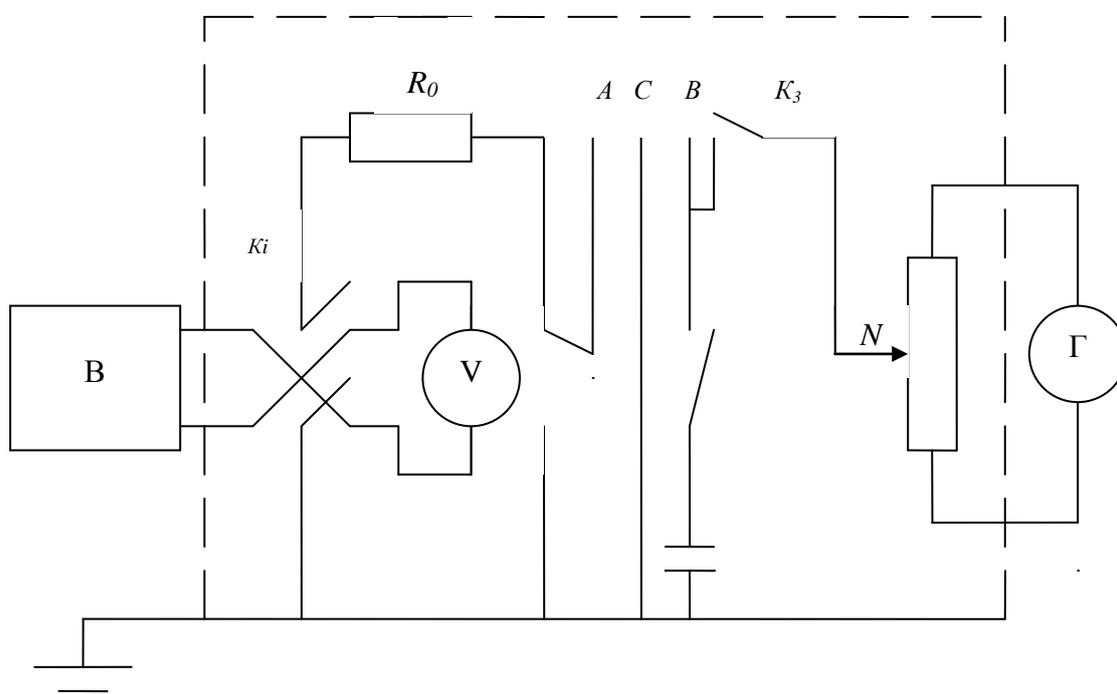


Рис. 4

- $\Gamma$  – зеркальный гальванометр;
- $N$  – универсальный шунт;
- $A, B, C$  – зажимы для подключения образца;
- $R_0$  – образцовое и защитное сопротивление;
- $K_1$  – переключатель полярности напряжения;
- $K_2$  – переключатель для включения напряжения;
- $K_3$  – кнопка включения гальванометра;
- $B$  – выпрямитель;
- $V$  – вольтметр.

1.3. Шунт поставить в положение  $n = 10000$

- 1.4. Включить освещение гальванометра.
- 1.5. Нажать кнопку  $K_3$  и удерживая ее нажатом положении рафиксировать отклонение зайчика по шкале гальванометра ( $d_1$ ).  
При этом кнопка  $K_2$  должна быть в положении " I ".
- 1.6. Отпустить кнопку  $K_3$ , ключом  $K_1^\circ$  поменять полярность и повторить пункт 1.5. (получить  $d_2$ ).

Примечание:

1. Если отклонение светового зайчика меньше 20 мм, то шунт поставить в следующее положение.
2. При измерений на шунтовых числах 10 000 и 1000 при замыкании кнопки  $K_3$  ранее установленное напряжение снижается из-за большего потребления схемы. Поэтому необходимо в этом случае устанавливать заданное напряжение при нажатой кнопке  $K_3$ .
3. Измерение удельного объемного сопротивления материала во влажном и воздушно-сухом состоянии .
  - 2.1 Подключить образец материала в воздушно-сухом состоянии с помощью электродов к зажимам А,В,С. При этом в соответствии с рисунком 2 электрод 4 подсоединяем к точке В. Электрод 3 – к точке С, Электрод 2- к точке А.
  - 2.2. Установить универсальный шунт в положение  $n=10000$ .
  - 2.3. Установить напряжение 100 В.
  - 2.4. Произвести отсчет отклонения аналогично п.п. 1.5;1.6.
  - 2.5. Взять образец материала во влажном состоянии из эксикатора и повторить измерения п.п.2.1-2.4.
3. Измерения удельного поверхностного сопротивления материала в воздушно-сухом и влажном состоянии.

Произвести подключение в соответствии с рисунками 1 и 3.  
Повторить п.п.2.2-2.5

Расчетные формулы

1. Формула расчета удельного объемного сопротивления

$$\rho = \frac{U \cdot S}{C_d \cdot \alpha \cdot n \cdot h} \quad [\text{Ом} \cdot \text{см}]$$

2. Формула расчета удельного поверхностного сопротивления

$$\rho_s = \frac{U \cdot \pi (d_2 + d_1)}{C_d \cdot \alpha \cdot n (d_2 - d_1)} \quad [\text{Ом}]$$

Таблица результатов измерения и расчетов

№ п/п	Величина	Измерения воздушно-сухом	Измерения влажном	Измерения
-------	----------	--------------------------	-------------------	-----------

1	2	состоянии		состоянии		$C_d$
		$\rho$	$\rho_s$	$\rho$	$\rho_s$	
		3	4	5	6	7
1.	Напряжение, $U$ , В					
2.	Шунтовое число, $n$					
3.	Отклонение гальванометра:					
	$\alpha_1$ , дел					
	$\alpha_2$ , дел					
4.	Площадь внутреннего электрода, $S$ , см <sup>2</sup>					
5.	Диаметр внутреннего электрода, $d$ , см					
6.	Толщина, $h$ , см					
7.	Диаметр охранного электрода, $d_2$ , см					
8.	Образцовое сопротивление, $R_0$ , Ом					
9.	$\rho$ , Ом·см					
10.	$\rho_s$ , Ом					
11.	Динамическая постоянная $C_d$ , $\frac{A}{дел}$					

### Требования к отчету

Отчет о работе должен содержать:

1. Принципиальную схему испытательной установки.
2. Краткое изложение сущности испытания.
3. Результаты наблюдений в виде таблицы, а также расчетные формулы.

### Контрольные вопросы

1. Дайте объяснение сущности метода непосредственного отклонения для измерения проводимости.
2. Покажите путь измеряемого тока в образце при определении  $\rho$  и  $\rho_s$ .
3. Какова природа проводимости диэлектриков?
4. Почему возникает поверхностная проводимость?
5. Как влияет влажность на поверхностное сопротивление различных диэлектриков?

6. Как влияет влажность на сквозную проводимость различных диэлектриков?
7. Для чего в схеме предусмотрено образцовое и защитное сопротивление?
8. Почему измерение проводимости диэлектриков проводится при постоянном напряжении?
9. Для чего предназначен шунт в измерительной схеме?
10. Решите задачу: Найти сопротивление образца диэлектрика в виде прямоугольной пластинки с размерами  $30 \times 40 \times 2$  /см/.  
Электрическое поле направлено перпендикулярно плоскости  $30 \times 40$ ,  $\rho = 10^{10}$  Ом·см,  $\rho_s = 10^9$  Ом.

## Диэлектрические потери и диэлектрическая проницаемость.

В диэлектриках, находящихся в электрическом поле, происходит рассеяние энергии (диэлектрические потери), в результате чего диэлектрики нагреваются. Это рассеяние энергии наблюдается как при постоянном, так и при переменном напряжениях.

При постоянном напряжении через диэлектрик протекает только ток сквозной проводимости, и качество диэлектрика в этом случае может быть охарактеризовано величинами удельных объемного и поверхностного сопротивлений.

При переменном напряжении, помимо потерь, вызываемых протеканием токов проводимости, в диэлектрике возникают потери за счет замедленной поляризации.

В технических диэлектриках могут быть дополнительные потери при наличии посторонних полупроводящих примесей (влаги, окислы железа, углерод и т.д.) и за счет ионизации газовых включений внутри диэлектрика в случае высоких напряжений.

Если конденсатор с данным диэлектриком включить в цепь переменного напряжения, то в цепи потечет ток. Этот ток можно рассматривать как сумму трех токов:

1. Ток емкостной проводимости или ток смещения, не сопровождающийся потерями энергии  $I_{co}$ .
2. Ток абсорбции за счет замедленных видов поляризации, сопровождающихся потерями  $I_{abc}$ .
3. Ток сквозной проводимости за счет наличия в диэлектрике свободных зарядов  $I_{np}$

Учитывая эти три тока, диэлектрик можно представить в виде эквивалентной схемы замещения, состоящей из трех ветвей (рис. 5). В этой схеме по сопротивлению  $R$  протекает ток сквозной проводимости; ток  $I_{co}$  протекает через емкость  $C_o$  и через ветвь, содержащую  $C$  и  $C_{abc}$ , протекают токи замедленной поляризации. Здесь  $c$  оказывает замедляющее действие при зарядке  $C_{abc}$ .

В практике исследований и расчетов пользуются более простыми схемами замещения диэлектрика, параллельной или последовательной.

На рисунке 6 показаны обе схемы и соответствующие им векторные диаграммы.

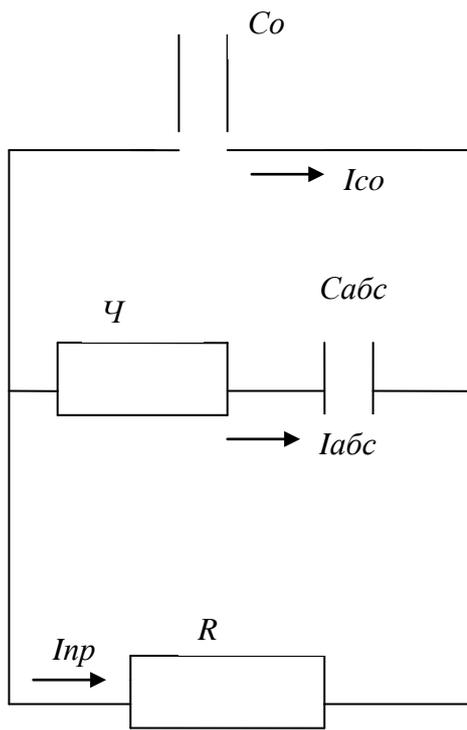
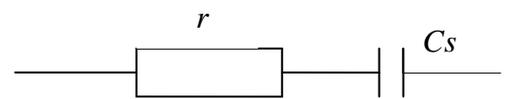
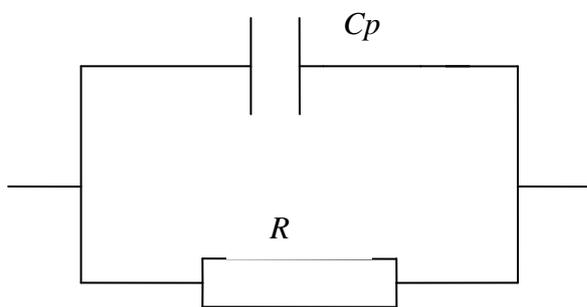


Рис. 5



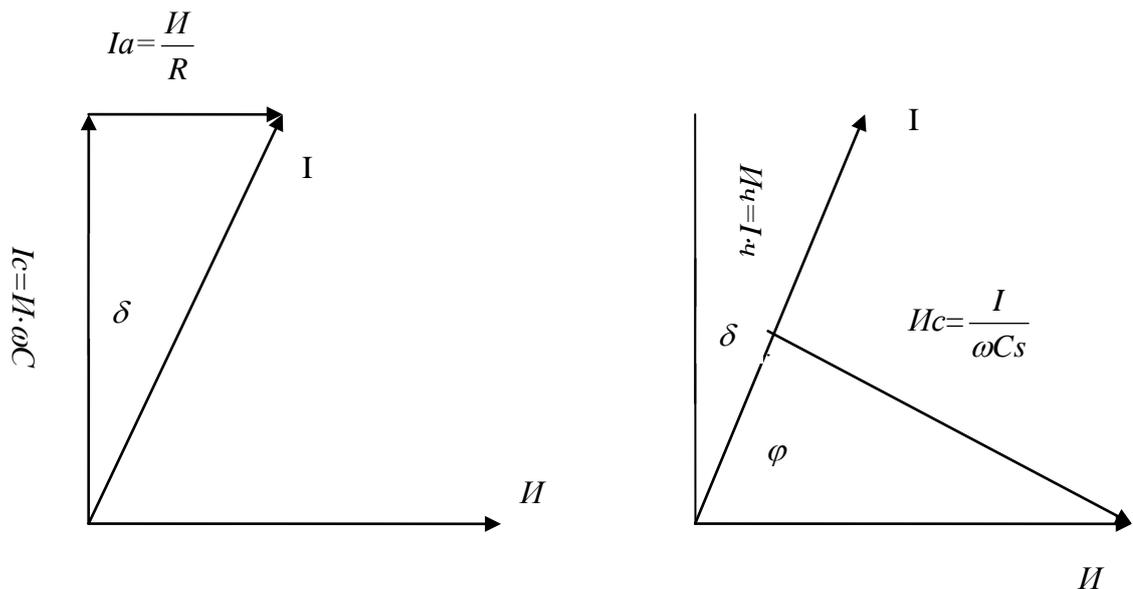


Рис. 6

Из векторных диаграмм видно, что активная мощность, теряемая в параллельной схеме –  $P = I^2 \omega C_p \operatorname{tg} \delta$ , а в последователь-

$$\text{ной - } P = \frac{I^2 \omega \operatorname{tg} \delta C_s}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}$$

Практически, мощность, рассчитанная по обеим формулам, одинакова и равна

$$P = I^2 \omega C \operatorname{tg} \delta$$

Удельная мощность диэлектрических потерь

$$P_{y\partial} = E^2 \frac{\xi \cdot f \cdot \operatorname{tg} \delta}{1,8 \cdot 10^{12}} \quad \frac{\text{Вт}}{\text{см}^3}$$

Из этих формул видно, что потери энергии в диэлектрике пропорциональны  $\operatorname{tg} \delta$ , поэтому угол "  $\delta$  " называют углом диэлектрических потерь.

Как видно из векторных диаграмм для параллельной схемы замещения  $\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{R \omega C_p}$ , а для последовательной  $\operatorname{tg} \delta = \omega C_s$

Величины "  $\operatorname{tg} \delta$  " для различных диэлектриков колеблются в широких пределах.

Определение угла диэлектрических потерь может производиться при промышленной, звуковой и радиочастотах. Тот или другой метод измерений выбирается в зависимости от частоты, при которой должен работать данный диэлектрик. При измерениях на промышленной и

звуковой частотах пользуются мостовыми схемами, при высоких же частотах (порядка  $10^6$  Гц) наибольшим распространением пользуются резонансные методы.

Принципиальная схема высоковольтного моста для определения диэлектрических потерь показана на рисунке 7.

Векторные диаграммы для правой и левой половины, а также совмещенная диаграмма при равновесии моста приведены на рисунке 8.

Как известно, при равновесии моста соблюдаются следующие условия:  $z_1 \cdot z_4 = z_2 \cdot z_3$  и  $\varphi_1 - \varphi_3 = \varphi_2 - \varphi_4$

где,  $\varphi_1$ ;  $\varphi_2$ ;  $\varphi_3$ ;  $\varphi_4$ -углы сдвига фаз в соответствующих ветвях моста.

Сопротивления плеч моста имеют следующие значения:

$$z_1 = r_x + \frac{1}{j\omega C_x} ; z_2 = \frac{1}{j\omega C_0} ; z_3 = R_3 ; z_4 = \frac{R_4}{1 + j\omega C_4 R_4}$$

### ИЗМЕРЕНИЕ $tg\delta$ И ЁМКОСТЬ ОБРАЗЦА

При испытании твердых листовых материалов используется система из трех электродов (рис. 10).

К нижнему электроду подводится высокое напряжение, верхний электрод присоединен к измерительной диагонали, а охранный кольцо заземляется. Мост питается повышающим трансформатором типа НОМ – 10, коэффициент трансформации которого равен 100.

После уравнивания моста, т.е. после подбора значения сопротивления  $R_3$  емкости  $C_4$ , когда ток в диагонали гальванометра равен нулю, тангенс угла диэлектрических потерь образца определяется по формуле:

$$tg\delta = 2 \pi f C_4 R_4 \cdot 10^{-6}$$

где  $f$  - частота в Гц;  
 $C_4$  – в мкФ  $R_4$  - в Омах.

Значение  $R_4$  составляет  $10^4/\pi$  и потому при  $f = 50$  Гц численно  $tg = C_4$ , если  $C_4$  в мкФ.

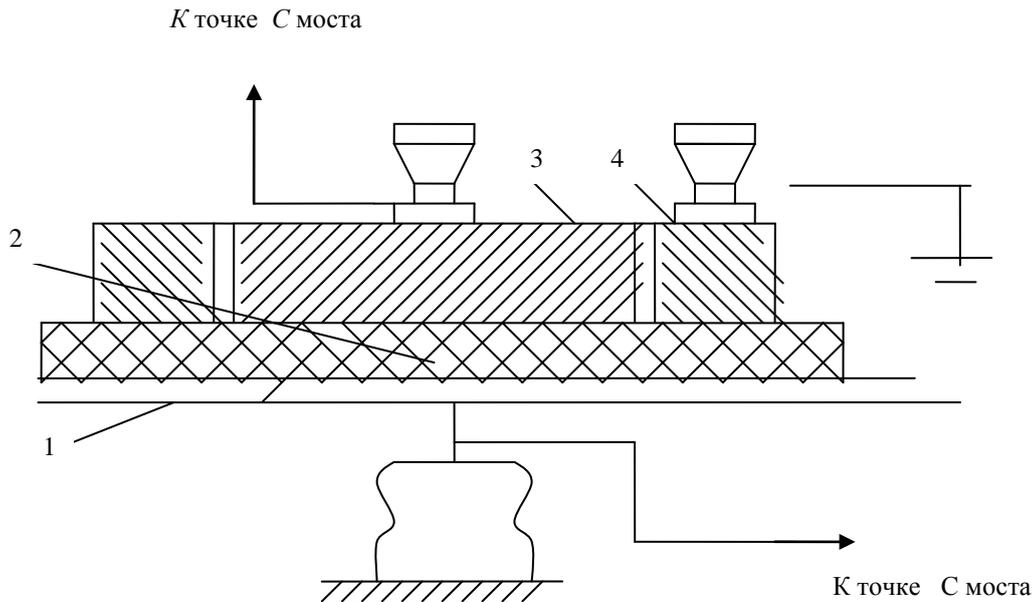


Рис. 10

- 1 – высоковольтный электрод;
- 2 – исследуемый диэлектрик;
- 3 – верхний электрод;
- 4 – охранный кольцо.

Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  определяется из значения емкости образца, вычисленной по результатам измерений. Как было показано выше, емкость испытуемого образца

$$C_x = C_0 \frac{R_4}{R_3}$$

здесь  $C_0 = 98$  пФ.

Так как емкость плоского конденсатора

$$C_x = \frac{ES}{3,6\pi h} (nФ)$$

то

$$\epsilon = \frac{11,3C_x \cdot h}{S}$$

где  $h$  - толщина диэлектрика в см;

$S$  - площадь, охватываемая верхним электродом.

Если используется круглый электрод с диаметром  $d$ , то удобно пользоваться формулой:

$$\mathcal{E} = \frac{14,4Cx \cdot h}{d^2}$$

В случае проведения измерений емкости цилиндрического конденсатора для расчета используется формула:

$$\mathcal{E} = \frac{El}{1,8l \frac{d_2}{d_1}}$$

При измерениях  $\operatorname{tg} \delta$  и  $\mathcal{E}$  весьма важно обеспечить плотное прилегание электродов к поверхностям диэлектрика. При неплотном контакте электродов в прослойке воздуха может возникнуть ионизация, что приведет к возрастанию  $\operatorname{tg} \delta$  при высоких испытательных напряжениях, а диэлектрическая проницаемость  $\mathcal{E}$  окажется значительно уменьшенной в сравнении с действительной.

#### а) Порядок измерений.

1. Подключить испытуемый образец с помощью электродов.
2. Проверить схему. Выполнить все требования правил работы с высоким напряжением.
3. Установить лимб емкости "  $C_a$  " в положение, указанное преподавателем.
4. Установить рукоятку регулировки усиления усилителя и рукоятку регулировки чувствительности гальванометра в положение минимума. Включить в штепсельные розетки вилки питания усилителя и защитного напряжения, а также освещения гальванометра.
5. Установить переключатель " Основ. мост. Экраны " в среднее положение, а рукоятку автотрансформатора, регулирующего напряжение на зажимах первичной обмотки высоковольтного трансформатора в нулевое положение.
6. Доложить преподавателю о готовности к работе и, получив от него разрешение, включить питание схемы.  
Плавно повышать напряжение на зажимах высоковольтного трансформатора до величины, требуемой условиями испытания исследуемого объекта, одновременно наблюдая за основными разрядниками моста. Если возникнет свечение разрядника немедленно выключить питание схемы.
8. Установить переключатель в положение "Основной мост" и перевести рукоятку усиления в среднее положение. Поочередным вращением рукояток декад  $R_3$  и рукояток  $C_4$  ( на панели  $\operatorname{tg} \delta$ ) добиться



## ОТЧЕТ О РАБОТЕ

Отчет о работе должен содержать:

1. Принципиальную схему высоковольтного моста.
2. Краткое изложение сущности применяемого метода испытания с пояснением в виде векторных диаграмм.
3. Результаты наблюдений и вычислений в виде таблицы, а также формулы, по которым производились расчеты.
4. Описание материалов, с которыми ознакомились в работе.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое  $tg\delta$  ?
2. Объясните назначение трехэлектродной схемы включения образца.
3. Дайте объяснение принципа работы моста Р- 525.
4. Что называется диэлектрическими потерями ?
5. От чего возникают диэлектрические потери ?

## Исследование электрической прочности трансформаторного масла

Трансформаторное масло является продуктом переработки нефти путем ее перегонки и последующей очистки полученной фракции.

Полученное масло служит охлаждающей и электроизоляционной средой для силовых трансформаторов, а также для целей дугогашения в масляных выключателях и заливки некоторых низковольтных устройств.

В процессе эксплуатации масло претерпевает глубокие изменения, которые обычно характеризуются понятием "старения", заключающиеся в изменении его химических и электрофизических свойств. В результате старения ухудшаются электроизоляционные свойства, из которых одним из основных показателей является электрическая прочность:

$$E_{np} = \frac{U_{np}}{h}$$

Пробивное напряжение весьма чувствительно к примесям, которые обычно присутствуют в технических маслах. Наиболее вероятными примесями могут быть: вода в эмульсионном и растворенном состоянии, мельчайшие волокна, источником которых может явиться волокнистая изоляция, в контакте с которой обычно работает масло, частицы углерода в виде сажи, пузырьки газов и нерастворимые продукты старения.

Частицы примесей, находящиеся в масле, способны под воздействием поля образовывать цепочки между электродами, что облегчает развитие разряда и тем самым снижает пробивное напряжение.

Наличие примесей в масле по-разному сказывается на прочности при испытаниях в равномерном и неравномерном электрических полях.

Если испытывается масло совершенно свободное от примесей, то, естественно, электрическая прочность при испытаниях в равномерном поле будет выше, чем при неравномерном. Объясняется это тем, что при неравномерном поле электрическое разрушение диэлектрика начинается в области, где напряженность резко повышена. В равномерном поле таких областей не может быть.

Совершенно иная картина может сложиться, если испытывается масло, содержащее примеси. В этом случае вероятность образования замыкающих мостиков между электродами при равномерном поле значительно выше, чем при неравномерном. За счет этого пробивное напряжение загрязненного масла в равномерном поле будет значительно снижено по сравнению с чистым маслом, испытанным том

же промежутке, а результаты, полученные при неравномерном поле, существенно не меняются.

В результате прочность масла в равномерном поле окажется ниже, чем при неравномерном, т.е. совершенно противоположно тому, что обнаруживалось при испытаниях чистой жидкости. Это снижение прочности в равномерном поле особенно резко проявляется при малых расстояниях между электродами, т.е. пока размеры включений соизмеримы с длиной промежутка.

Из сказанного становится ясно, почему для оценки электрической прочности масел применяются разрядники с плоскими или сферическими (с большим радиусом) электродами. Такие электроды обеспечивают равномерность поля, и это дает возможность выявить наличие загрязнений в масле.

Если бы испытание велось при электродах игла-игла или игла-плоскость, или между сферами с малым радиусом, то поле было бы резко неравномерным, влияние примесей было мало заметным и результаты оказались бы завышенными.

## **ПРОГРАММА ИСПЫТАНИЙ**

1. Снятие кривой зависимости пробивного напряжения от расстояния для плоских электродов.

2. Снятие кривой зависимости пробивного напряжения от расстояния для электродов: игла-плоскость или игла-игла.

Пробивное напряжение считать для пунктов 1 и 2 по амплитудному значению напряжения.

Исследование зависимости электрической прочности масла от формы электродов и длины разрядного промежутка производится на специальном стенде со сменными электродами и микрометрическим устройством для измерения расстояния между ними. Электрическая схема установки приведена на рисунке 11.

Электроды подключаются к выводам вторичной обмотки высоковольтного трансформатора. Измерение напряжения производится с помощью вольтметра, подключенного к выводам первичной обмотки трансформатора.

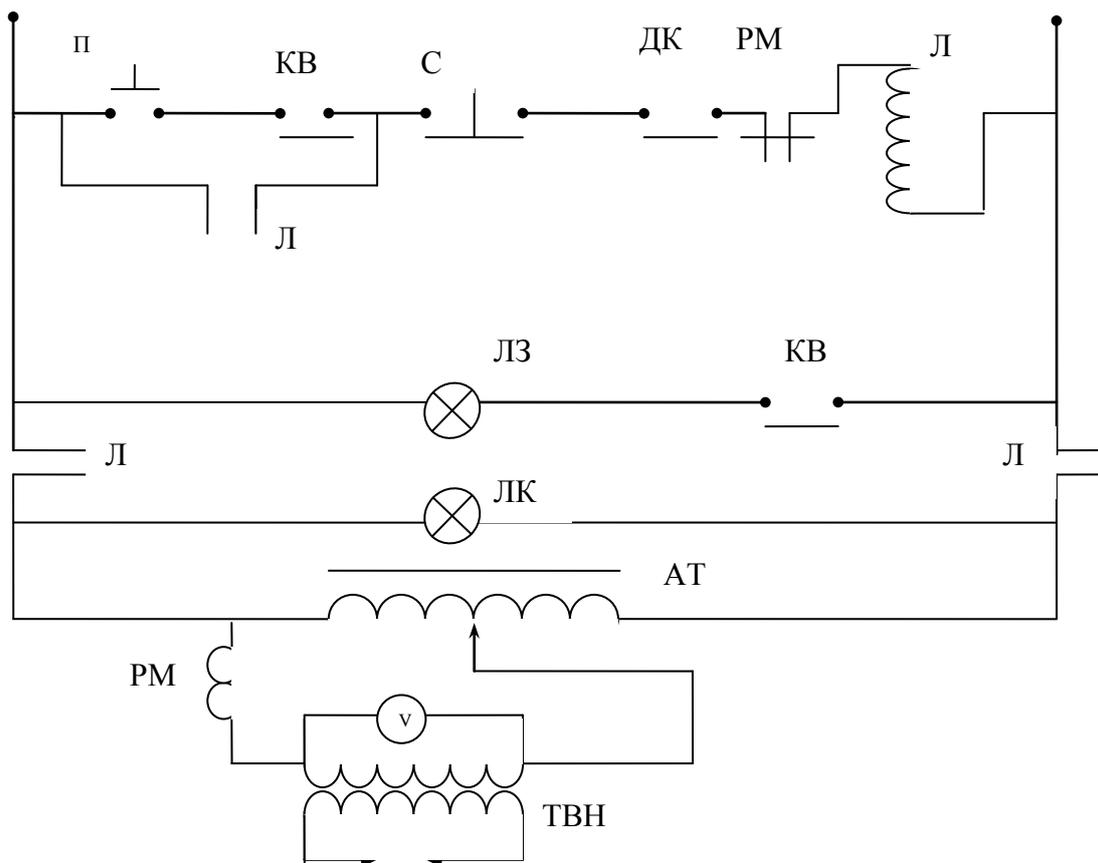


Рис. 11. Схема испытательной установки.

- П – кнопка "пуск";
- КВ – контакты конечного выключателя;
- С – кнопка "стоп";
- ДК – дверной контакт;
- РМ – реле максимальное;
- Л – линейный контактор;
- ЛЗ – сигнальная лампа зеленая;
- ЛК – сигнальная лампа красная;
- АТ – регулятор напряжения;
- ТВН – трансформатор высокого напряжения.

После установки на руль рукоятки регулирующего устройства включается питание высоковольтного трансформатора и с помощью регулятора напряжение плавно повышается до наступления пробоя.

Для каждой пары электродов снимается по пять-шесть точек. Значение пробивного напряжения для каждой точки получается как среднее из трех измерений.

Соответствующие расстояния между электродами задаются преподавателем.

Таблица результатов наблюдений и вычислений.

Тип электродов	Расстояние между электродами, м	Первичное напряжение				Пробивное напряжение, кВ		Средняя электрическая прочность, кВт/м	
		1	2	3	Ср.	Эфф.	Макс.	Эфф.	Макс.

$$U_{np} = U_1 \cdot k$$

$$U_{npmax} = \sqrt{2} \cdot U_{np}$$

$$E_{np} = \frac{U_{np}}{h}$$

$k$  - коэффициент трансформации высоковольтного трансформатора.

Отчет о работе:

Отчет о работе должен содержать:

1. Принципиальную схему испытательной установки.
2. Краткое изложение сущности применяемого метода испытания.
3. Результаты наблюдений и вычислений ( в виде записи, таблицы и кривых  $U_{np} = (h)$ ;  $E_{np} = (h)$  для разных типов электродов).
4. В Отчете должна быть критическая оценка полученных данных.

Контрольные вопросы.

1. Объяснить зависимость  $U_{np} = (h)$  для электродов плоскость-плоскость.
2. Объяснить зависимость  $U_{np} = (h)$  для электродов игла-плоскость.
3. Сопоставьте зависимости;  $E_{np} = (h)$  для электродов плоскость-плоскость и игла-плоскость и дайте объяснение.
4. От чего зависит электрическая прочность жидких диэлектриков?

## **Определение истинной электрической прочности твердых диэлектриков**

Электрическая прочность является одной из основных характеристик изолирующих материалов. Всякий диэлектрик, находясь в электрическом поле, теряет изолирующие свойства, если сила электрического поля (напряженность поля) достигает некоторого критического значения.

Это явление носит название пробоя диэлектрика или нарушения его электрической прочности. Электрическое напряжение, при котором происходит пробой диэлектрика, называется пробивным напряжением, а напряженность поля – пробивной напряженностью. Величина пробивного напряжения является мерой электрической прочности изоляционной конструкции (слоя изоляции, образца, промежутка между электродами), а мерой электрической прочности материала служит пробивная напряженность электрического поля, т.е. величина пробивного напряжения, отнесенная к расстоянию между электродами

Пробой твердых тел может называться электрическими и тепловыми процессами, возникающими под действием поля.

Явление электрического пробоя твердых тел сводится к нарушению упругих связей между зарядами, смещающимися при приложении электрического поля.

Величина пробивного напряжения зависит от формы электрического поля. В однородном поле пробивная напряженность достигает предельного значения для данного материала.

Тепловой пробой является следствием уменьшения активного сопротивления диэлектрика под влиянием нагрева в электрическом поле, что приводит к росту активного тока, дальнейшему увеличению нагрева диэлектрика, вплоть до его разрушения.

На величину пробивного напряжения при тепловом пробое в сильной степени влияет отвод тепла от диэлектрика, находящего под напряжением. Вследствие этого пробивная напряженность диэлектрика будет падать с ростом его толщины, так как отвод тепла при увеличении толщины будет ухудшаться.

При испытании на пробой может определяться истинная или средняя электрическая прочность.

Истинная электрическая прочность получается при равномерном поле между электродами, а если поле неравномерно, то в результате получится средняя электрическая прочность.

Если лист испытуемого изоляционного материала поместить между плоскими электродами и повышать напряжение до пробоя, то вероятнее всего пробой произойдет у края электрода, т.е. там, где из-за неравномерности поля повышена напряженность. Для того, чтобы получить значение истинной электрической прочности необходимо

устранить краевой пробой. Это легко достигается путем утолщения диэлектрика у краев. Тогда, несмотря на сохраняющуюся неравномерность поля, напряженность у краев снижается и пробой произойдет в средней тонкой части там, где поле равномерно.

Таким образом для получения значений средней электрической прочности, образцы листовых изоляционных материалов помещают между цилиндрическими электродами с закругленными краями и доводят напряжение до пробоя.

## **Исследование зависимости электрической прочности твердых диэлектриков от толщины**

В технических диэлектриках всегда содержится некоторое количество дефектов – газовые включения в виде пор различного размера, микротрещины, возникающие вследствие механических напряжений и другие включения инородных материалов, нарушающих однородность структуры.

Кроме того целый композиционных электроизоляционных материалов специально изготавливаются из смеси двух и более разнородных диэлектриков.

Поэтому возможность определения истинной электрической прочности того или иного материала связана с возможностью получения достаточно однородных диэлектриков, что практически трудно осуществить. Даже для таких твердых диэлектриков как фарфор и стекло нельзя обеспечить одинаковую степень однородности при разных толщинах изоляционного слоя. Более толстые слои, как правило, имеют большее количество дефектов. Поэтому электрическая прочность сказывается зависимой от толщины образца и месте пробоя.

Для стекол, например, независимость от толщины при испытаниях в однородном электрическом поле удается получить только для очень тонких образцов в пределах от 0,05 до 0,2-0,5мм, когда число дефектов невелико.

При создании высоковольтной изоляции приходится считаться с тем, что необходимую электрическую прочность для большой толщины монолитного диэлектрика получить не удастся. Поэтому учитывая, что более тонкие слои диэлектрика имеют повышенную электрическую прочность, стремятся сделать изоляцию многослойной. А необходимую толщину получают за счет большого числа слоев. При этом прочностные характеристики изоляции получаются значительно выше, т.к., во-первых, тонкие слои сами по себе имеют повышенную электрическую прочность, а во-вторых, дефекты в отдельных слоях не совпадают; слабые участки перекрываются электрически более прочными участками.

Характерным примером использования этого принципа является конструкция бумажно-пропитанной изоляции различных высоковольтных устройств: кабелей, конденсаторов и др.

Для иллюстрации зависимости электрической прочности неоднородных диэлектриков от толщины (числа слоев) в данной работе проводится снятие зависимости  $E_{пр} = f(h)$  пропитанной конденсаторной бумаги.

#### Подготовка образцов и проведение испытаний.

1. Нарезать из конденсаторной бумаги листочки с примерным размером 10 x 10 см.
2. Сложить их в пачки с числом слоев 1, 2, 3, 4, 6, 9, 12.
3. Поместить первую подготовленную пачку между плоскими электродами в испытательную клетку и подсоединить их к выводам испытательного трансформатора.
4. Установить переключатель диапазонов измерения вольтметра в положение 75в.
5. Пустить схему нажатием кнопки "пуск".
6. Плавным вращением рукоятки регулятора напряжения РН поднять напряжение до пробоя. В момент пробоя зафиксировать показания вольтметра.

#### Описание установки.

Схема испытательной установки показана на рисунке 14.

Трансформатор высокого напряжения установлен на вертикальной стойке. Шина высокого напряжения от высоковольтного вывода трансформатора спускается в испытательную клетку, дверца которой заблокирована блокировочным контактом ДК. При открывании клетки происходит автоматическое снятие напряжения с первичной обмотки трансформатора.

Регулятор напряжения РН и схема управления находятся в блоке под клеткой. На лицевой панели этого блока находятся кнопки "пуск", "стоп", вольтметр, измеряющий напряжение на первичной обмотке ТВН, переключатель пределов измерения вольтметра, рукоятка регулятора РН и сигнальные лампы.

В схеме предусмотрена блокировка от включения из ненулевого положения регулятора (контакты КВ, замыкающиеся при полностью выведенном положении регулятора РН). В момент пробоя происходит автоматическое отключение ТВН с помощью блокировочных контактов реле максимального тока РМ.

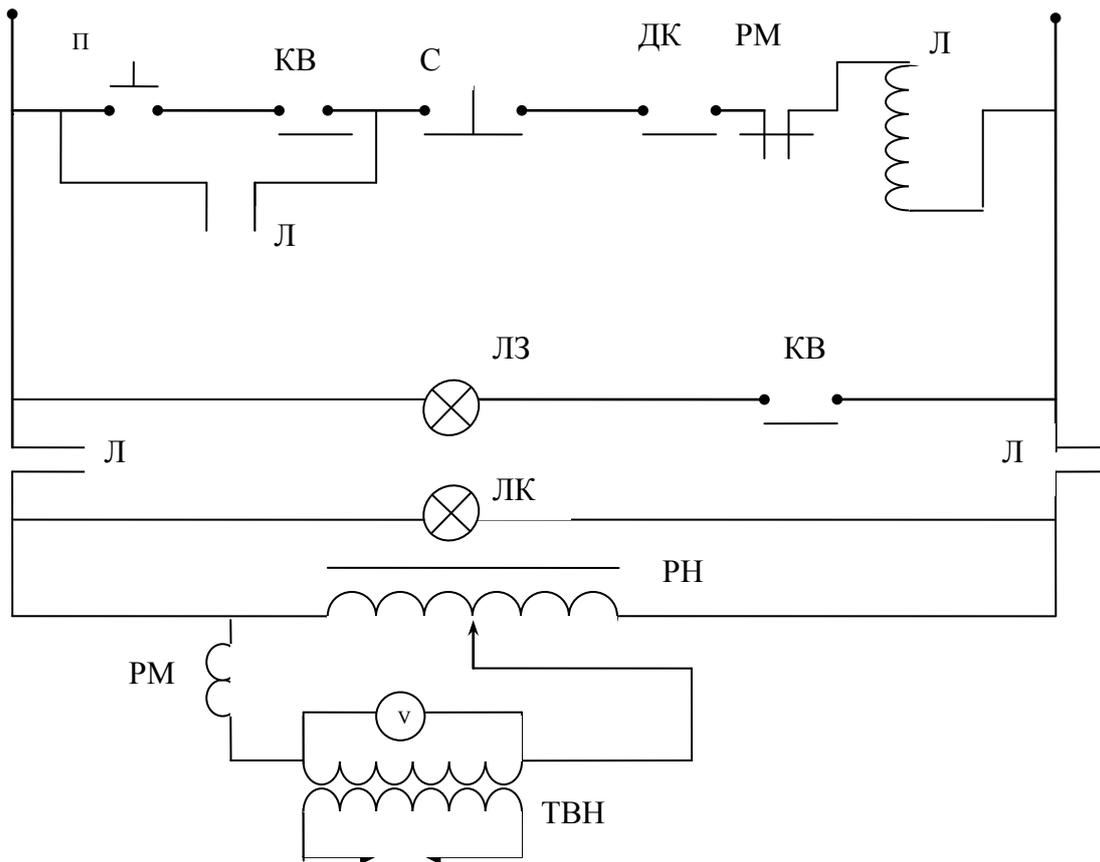


Рис. 14

- П - кнопка "пуск";  
 КВ - контакты конечного выключателя;  
 С - кнопка "стоп";  
 ДК- дверной контакт;  
 РМ- реле максимальное;  
 Л - линейный контактор;  
 ЛЗ- сигнальная лампа зеленая;  
 ЛК- сигнальная лампа красная;  
 АТ- регулятор напряжения;  
 ТВН- трансформатор высокого напряжения.

#### Расчетные формулы.

1. Пробивное напряжение:

$$U_{пр} = U_1 \cdot K \quad U_{пр \max} = U_{пр} \cdot \sqrt{2}$$

где  $U_1$  – первичное напряжения, измеряемое вольтметром;  
 $K$  – коэффициент трансформации трансформатора.

2. Электрическая прочность:

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{h} \quad E_{пр} = E_{пр} \cdot \sqrt{2}$$

$$h = \Delta_1 \cdot n$$

где  $n$  – число слоев в пачек;

$\Delta_1$  – толщина одного листа

Данные вычислений и измерений заносятся в таблицу.

$h$ мм	$U_1$ В	$U_{пр}$ кВ	$E_{пр}$ кВ/мм	$U_{пр\ max}$ кВ	$E_{пр\ max}$ кВ/мм

По результатам опытов строятся зависимости  $U_{пр.\max} = f(h)$  и  $E_{пр.\max} = f(h)$ .

#### Требования к отчету

Отчет о работе должен содержать:

1. Принципиальную схему испытательной установки.
2. Краткое изложение сущности примененного метода испытания.
3. Результаты измерений и вычислений в виде таблицы, а также расчетные формулы.
4. Описание материалов, с которыми студент познакомился в работе.

#### Контрольные вопросы

1. Дайте объяснение зависимости  $E_{пр.\max} = f(h)$ .
2. Что такое истинная электрическая прочность диэлектрика?
3. Что такое средняя электрическая прочность диэлектрика?
4. Как зависит электрическая прочность однородных диэлектриков от однородности электрического поля?
5. Как зависит электрическая прочность неоднородных диэлектриков от однородности поля?