

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ (МИИТ)

Кафедра «Электротехника, метрология и электроэнергетика»

Г.С. КАСАТКИН, В.В. ФЕДОТОВ

ПРОБОЙ ЖИДКИХ И ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

*Методические указания
к лабораторным работам*

МОСКВА - 2006

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ (МИИТ)

Кафедра «Электротехника, метрология
и электроэнергетика»

Г.С. КАСАТКИН, В.В. ФЕДОТОВ

ПРОБОЙ ЖИДКИХ И ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Рекомендовано редакционно-издательским советом университета
в качестве методических указаний

Москва - 2006

УДК 621.315.5
К-28

Касаткин Г.С., Федотов В.В. Пробой жидких и твердых диэлектриков: Методические указания к лабораторной работе. - М.: МИИТ, 2006. – 20с.

Приведены теоретические сведения об особенностях пробоя жидких и твердых диэлектриков и методике проведения их испытаний на электрическую прочность, необходимые для лучшего усвоения дисциплины «Электротехнические материалы»

© **Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ), 2006**

СОДЕРЖАНИЕ

РАБОТА 1. ПРОБОЙ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ	3
1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ	3
2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ	3
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ	11
4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	13
РАБОТА 2. ПРОБОЙ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ	13
1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ	13
2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ	13
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ	17
4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	19
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	19

Учебно - методическое издание

Касаткин Георгий Сергеевич, Федотов Виктор Васильевич

ПРОБОЙ ЖИДКИХ И ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Методические указания к лабораторной работе

Подписано к печати:
усл.-печ.л. 1,5
Заказ:

Формат: 60x84/16
Тираж 100 экз.
Изд. № 102-06

127994, Москва, ул.Образцова , 15
Типография МИИТа

РАБОТА 1

ПРОБОЙ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Определение электрической прочности трансформаторного масла, степени его однородности и номинального напряжения трансформатора, в котором испытанное масло может быть использовано.

2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1. Особенности пробоя жидких диэлектриков

Нефтяные электроизоляционные масла (трансформаторное, конденсаторное и кабельное) являются основными жидкими диэлектриками, которые используются в современных электротехнических устройствах.

Нефтяные масла служат для повышения электрической прочности и охлаждения обмоток силовых трансформаторов, изоляции конденсаторов и кабелей, а также других аппаратов.

Электрическая прочность жидкого диэлектрика является его важнейшей характеристикой. Наименьшие допустимые значения электрической прочности трансформаторного масла установлены «Правилами технической эксплуатации электростанции» (ПТЭ) и [1].

Электрическая прочность жидких диэлектриков (величина пробивного напряжения $U_{пр}$) зависит от их химического состава и содержащихся в них примесей.

По своему химическому составу нефтяные масла представляют собой смеси различных углеводородов и являются нейтральными или слабополярными диэлектриками.

В тщательно очищенных от примесей нефтяных маслах пробой происходит в результате ударной ионизации молекул масел. При пробое масла, так же как и при газовом разряде, резко возрастает ток. После пробоя нефтяное масло восстанавливает свои изоляционные свойства, но его качество, как правило, ухудшается.

Электрическая прочность - $U_{пр}$ трансформаторного масла (как и любого другого жидкого диэлектрика) резко снижается при наличии в нём влаги, газовых включений и механических примесей.

Наибольшее влияние на величину $U_{пр}$ масла оказывает находящаяся в нем в виде мелких капель вода. Капли воды

распределяются обычно по всему объему масла и не смешиваются с ним (такая смесь двух жидкостей называется эмульсией). Вода является сильно полярной жидкостью ($\epsilon=88$), а очищенное трансформаторное масло - нейтральной ($\epsilon=2,2\div 2,4$). При подаче напряжения полярные молекулы (диполи) воды поляризуются, т.е. ориентируются по направлению вектора электрического поля и образуют внутри масла цепочки с повышенной проводимостью, по которым и происходит электрический пробой.

При наличии всего 0,01% влаги в общем объеме масла его электрическая прочность уменьшается примерно в 3 раза [2].

При наличии в масле газовых включений (пузырьков) в них быстро развиваются ионизационные процессы, так как газы имеют значительно меньшую электрическую прочность по сравнению с жидкими диэлектриками. Ионизация газовых включений способствует увеличению их размеров и местному перегреву масла. Это приводит к образованию газового канала внутри масла, по которому и происходит пробой. Заметно снижают электрическую прочность трансформаторного масла находящиеся в нём механические примеси в виде металлических частиц, сажи или обрывков волокон изоляции обмоток. Последние образуются в результате старения и разрушения хлопчатобумажной изоляции витков обмоток. Волокна этой изоляции отслаиваются и впитывают влагу, находящуюся в масле. Куски таких пропитанных влагой волокон перекрывают изоляционные масляные промежутки и образуют каналы, по которым происходит пробой.

С целью повышения электрической прочности масло подвергают осушке (для удаления влаги), дегазации (для удаления газовых включений) и очистке от механических примесей в специальных маслоочистительных установках [3].

В процессе эксплуатации под воздействием электрического поля, нагрева и кислорода воздуха в масле образуются загрязняющие его продукты — кислоты и смолы. Масло стареет, снижается его электрическая прочность. При снижении электрической прочности масла оно резко теряет свои изоляционные качества, снижая тем самым надежность электрического аппарата, в который оно залито. Чтобы избежать аварии, масло, подготовленное для заливки в трансформатор или другой аппарат, а также масло, находящееся в эксплуатации, необходимо испытывать. Одним из важных испытаний трансформаторного масла является определение его основного электрического параметра — электрической прочности $E_{пр}$. Рассмотрим методику определения электрической прочности масла.

2.2. Описание испытательной установки

Испытания трансформаторного масла на электрическую прочность проводятся согласно методике, изложенной в ГОСТ 6581-75* "Материалы электроизоляционные жидкие. Методы электрических испытаний".

Отобранные пробы масла проходят испытания в заводских стандартных испытательных установках типа АИМ-90. Принципиальная электрическая схема этой установки изображена на рис.1.1.

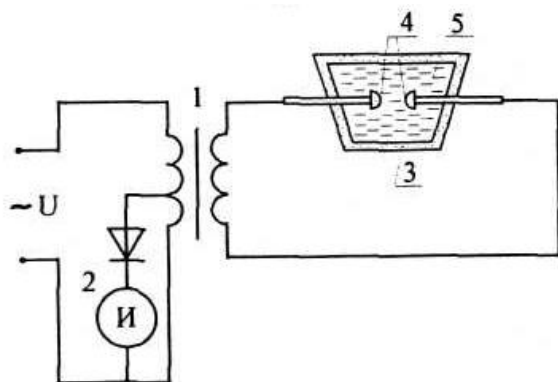


Рис.1.1. Принципиальная схема установки АИМ-90

На этом рисунке следующие обозначения:

1 - высоковольтный трансформатор с номинальным напряжением 90 кВ;

2 - магнитоэлектрический прибор, по показаниям которого определяется величина высокого напряжения (1 ма соответствует 10 кВ);

3 - измерительная ячейка - сосуд из специального изоляционного материала;

4 - латунные электроды в виде дисков диаметром 25 мм с закругленными краями;

5 - испытуемое трансформаторное масло, объем которого должен соответствовать верхним уровням, указанным на стенках измерительной ячейки.

Испытания проводят при расстоянии между электродами 4, равном 2,5 мм. Установка АИМ-90 снабжена электроприводом для

автоматического регулирования (подъема) напряжения с определенной постоянной скоростью, равной 2 кВ/с, и устройством защиты от перегрузок, возникающих при пробоях масла [1].

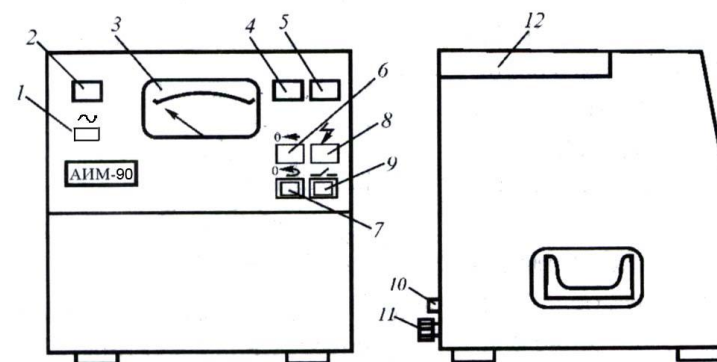


Рис.1.2. Конструкция аппарата АИМ-90 для испытания масла

На лицевой панели аппарата (рис. 1.2) расположены:

- выключатель цепи **1** со специальным ключом, измерительный прибор **3**;

- световая сигнализация (зеленая **2** — включение сети, желтая **4** — готовность схемы аппарата к включению высокого напряжения, красная **5** — включено высокое напряжение);

- кнопка **8** включения высокого напряжения (\downarrow);

- кнопка **6** разового возврата стрелки прибора в нулевое положение после пробоя масла ($0 \leftarrow$);

- кнопка **7** автоматического возврата стрелки в нулевое положение после пробоя диэлектрика ($0 \rightleftarrows$);

- кнопка **9** прерывания подъема высокого напряжения.

На задней стороне аппарата расположены: дверца, обеспечивающая доступ к предохранителям, газовому разряднику, и клемма для подсоединения контрольного вольтметра; штепсельный разъем **10** для присоединения кабеля питания аппарата к сети; клемма заземления **11** для присоединения провода заземления к контуру заземления.

Поскольку электрическая прочность трансформаторного масла зависит от большого числа факторов, для получения достоверных результатов производят n повторных испытаний масла в одних и тех же условиях (обычно $n > 6$).

2.3. Статистическая обработка результатов испытаний

Последовательность статистической обработки результатов испытаний электрической прочности жидких диэлектриков изложена в [4] и состоит в следующем:

- вычисляют среднее арифметическое значение пробивного напряжения результатов испытаний

$$\bar{U}_{\text{пр}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} U_{\text{пр}i}, \quad (1.1)$$

где n - число пробоев жидкого диэлектрика, проведенных в одних и тех же условиях;

$U_{\text{пр}i}$ - значение пробивного напряжения отдельного пробоя;

- определяют среднее квадратическое отклонение (СКО) σ , характеризующее разброс пробивных напряжений $U_{\text{пр}i}$ относительно $\bar{U}_{\text{пр}}$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{i=n} (U_{\text{пр}i} - \bar{U}_{\text{пр}})^2}; \quad (1.2)$$

- разбивают весь диапазон полученных значений пробивных напряжений на ряд (k) небольших одинаковых интервалов $\Delta U_{\text{пр}}$. Количество интервалов " k " целесообразно принимать равным \sqrt{n} так, например, при числе пробоев $n=25$ $k=5$, величина интервала определяется как разность максимального ($U_{\text{пр}max}$) и минимального ($U_{\text{пр}min}$) значений, отнесенная к количеству принятых интервалов " k " т.е.

$$\Delta U_{\text{пр}} = \frac{(U_{\text{пр}max} - U_{\text{пр}min})}{k};$$

- находят число m пробивных напряжений, которые укладываются в каждый принятый интервал $\Delta U_{\text{пр}}$, т.е. первому интервалу $\Delta U_{\text{пр}1}$ ($U_{\text{пр}max1} \div U_{\text{пр}min1}$) будет соответствовать m_1 пробивных напряжений, второму интервалу $\Delta U_{\text{пр}2}$ ($U_{\text{пр}max2} \div U_{\text{пр}min2}$) m_2 пробивных напряжений, " k " интервалу $\Delta U_{\text{пр}k}$ ($U_{\text{пр}maxk} \div U_{\text{пр}mink}$) m_k пробивных напряжений. Сумма всех значений m_k должна равняться общему числу пробоев n ;

- определяют для каждого " k " интервала $\Delta U_{\text{пр}}$ вероятность P_k (в процентах) того, что пробой произойдет при величине напряжения, укладывающейся в пределы k -ГО интервала

$$P_k = \frac{m_k}{n} \cdot 100 \% ; \quad (1.3)$$

- строят ступенчатый график зависимости $P_k = f(U_{\text{пр}k})$, называемый гистограммой. Примерный вид гистограммы изображен на рис. 1.3. Плавная кривая 1 на этом рисунке, проведенная через средние точки гистограммы, представляет собой кривую распределения плотности вероятностей P_k . дифференциального закона распределения;

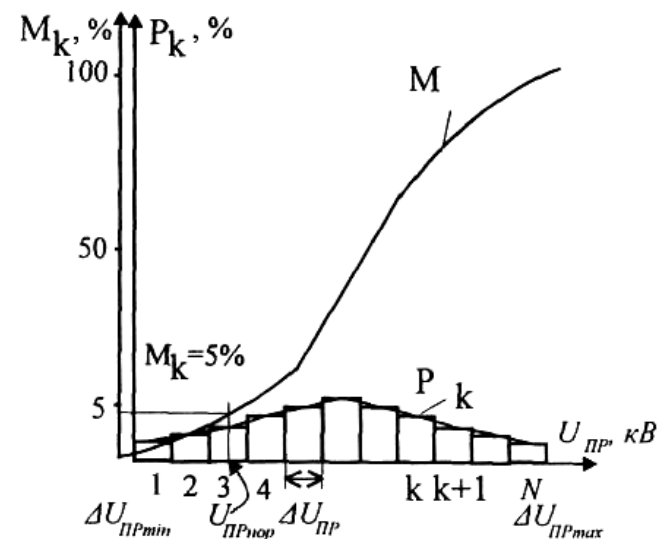


Рис.1.3. Дифференциальная (P_k) и интегральная (M_k) кривые

- вычисляют для каждого интервала интегральную вероятность M_k .

В первом интервале $\Delta U_{\text{пр}1}$ ($U_{\text{пр}max1} \div U_{\text{пр}min1}$) $M_1 = P_1$, во втором $\Delta U_{\text{пр}2}$ ($U_{\text{пр}max2} \div U_{\text{пр}min2}$) $M_2 = P_1 + P_2$ и в последнем - $M_k = 100\%$.

Кривая зависимость $M_k = f(U_{\text{пр}k})$ называется интегральной кривой распределения вероятностей;

- вычисляют коэффициент вариации $K_{\text{вар}}$ (в процентах) по формуле:

$$K_{\text{вар}} = \frac{\sigma}{\bar{U}_{\text{пр}}} \cdot 100 \% \quad (1.4)$$

Коэффициент вариации характеризует степень однородности строения жидкого диэлектрика. При величине $K_{\text{вар}} < 15\%$ жидкий диэлектрик относится к группе более однородных диэлектриков, а при $K_{\text{вар}} > 15\%$ - к группе менее однородных;

- определяют пороговое пробивное напряжение $U_{\text{прпор}}$ испытанного жидкого диэлектрика, т.е. наиболее низкую величину пробивного напряжения, выше которой происходит большое число пробоев. Эта величина может служить критерием оценки электрической прочности жидкого диэлектрика. За $U_{\text{прпор}}$ принимают величину $U_{\text{пр}}$, соответствующую $M_{\text{пор}} = M_k = 5\%$. Вероятность появления пробоев, величины пробивных напряжений которых $U_{\text{пр}}$ меньше $U_{\text{прпор}}$, составляет менее 5%.

Описанный порядок проведения испытаний диэлектриков целесообразен при сравнительно большом их числе n (несколько десятков и более).

При небольшом числе испытаний жидких диэлектриков на электрическую прочность, т.е. при наличии весьма ограниченной статистики критерий оценки электрической прочности определяется упрощенно, без построения кривых рис.1.2, согласно ГОСТ 6581-75*. Этим стандартом предписано проводить 6 испытаний жидкого диэлектрика с 5 минутными интервалами между пробоями.

Величина среднего арифметического значения пробивного напряжения $\bar{U}_{\text{пр}}$ результатов этих испытаний должна отвечать требованию:

$$\bar{U}_{\text{пр}} \geq \frac{5\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1.5)$$

Значение σ (СКО) определяется по формуле (1.2), $n=6$.

Если $\bar{U}_{\text{пр}} < \frac{5\sigma}{\sqrt{n}}$ производят замену испытанной пробы жид-

кого диэлектрика на новую, взятую из того же сосуда и после осторожного помешивания жидкости стеклянной палочкой проводят еще 6 испытаний. Значения $U_{\text{пр}}$, σ и неравенство (1.5) оценивают при

величине $n=12$. При невыполнении и в этом случае неравенства (1.5) качество жидкого диэлектрика признаётся неудовлетворительным из-за большой неоднородности его состава.

Полученные в итоге обработки результатов испытаний на пробой трансформаторного масла величины $U_{\text{прпор}}$ (по методике [4]) или $\bar{U}_{\text{пр}}$ (по ГОСТ 6581-75*) сравниваются с допустимыми значениями пробивного напряжения $U_{\text{прдоп}}$ при толщине слоя масла $a=2,5$ мм.

На основании такого сравнения можно определить номинальное рабочее напряжение $U_{\text{ном}}$ трансформатора, в котором может быть использовано испытанное масло с позиции его электрической прочности.

В табл.1.1. приведены допустимые значения $U_{\text{прдоп}}$ масла, соответствующие различным номинальным рабочим напряжениям $U_{\text{ном}}$ трансформаторов [1].

Таблица 1.1

Допустимые величины пробивных напряжений трансформаторных масел

$U_{\text{ном}}$ трансформатора, кВ	≤ 15	$>15 \leq 35$	$>60 \leq 150$	220-500	750
$U_{\text{прдоп}}$, кВ/2,5 мм свежее масло	25-30	30-35	40-45	60-65	65-70
$U_{\text{прдоп}}$, кВ/2,5 мм эксплуатационное масло	20	25	35	45	55

Величины $U_{\text{прдоп}}$ в этой таблице, взятой из справочника [1], даны для свежего и эксплуатационного трансформаторного масла.

Согласно приведенным в [1] нормам допустимое содержание влаги и газа в % от общего объема свежего масла не должно превышать 0,001% и 1%, а в случае эксплуатационного масла - 0,002% и 2% соответственно для трансформаторов всех указанных в табл.1.1 номинальных рабочих напряжений.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ

3.1. Ознакомиться с испытательной установкой АИМ-90 и поместить в нее измерительную ячейку, заполненную трансформаторным маслом.

3.2. Провести 25 пробоев трансформаторного масла. Первые шесть пробоев с 5 минутными интервалами, а последующие 19 - сразу после каждого возврата указателя в нулевое положение.

3.3. Результаты испытаний занести в табл.1.2.

Таблица 1.2

Результаты 25 пробоев трансформаторного масла, находившегося в эксплуатации

<i>n</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
<i>U</i> _{пр} , кВ													
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25

*U*_{прmax} = _____ кВ *U*_{прmin} = _____ кВ

3.4. Итоги обработки результатов первых шести пробоев записать в табл.1.3.

Таблица 1.3

Итоги статистической обработки результатов испытаний трансформаторного масла для первых 6 пробоев

$\bar{U}_{пр}$, кВ	σ , кВ	$\frac{5\sigma}{\sqrt{6}} = \frac{5\sigma}{2,4}$, кВ

$$\bar{U}_{пр} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 U_{прi}; \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{5} \sum_{i=1}^6 (U_{прi} - \bar{U}_{пр})^2}$$

Если выполняется неравенство $\bar{U}_{пр} \geq \frac{5\sigma}{\sqrt{6}}$, то качество

испытанного трансформаторного масла следует (согласно ГОСТ 6581-75*) считать удовлетворительным, а его электрическую прочность можно принять равной величине $\bar{U}_{пр}$.

3.5. Провести уточненную оценку электрической прочности трансформаторного масла путём статистической обработки данных всех 25 испытаний, записать итоги обработки в табл.1.4 и построить зависимости так, как это показано на рис.1.2.

Таблица 1.4

Итоги статистической обработки результатов уточнённой оценки электрической прочности трансформаторного масла

$\bar{U}_{пр} = \frac{1}{25} \sum_{i=1}^{25} U_{прi}$, кВ					
$\sigma = \sqrt{\frac{1}{24} \sum_{i=1}^{25} (U_{прi} - \bar{U}_{пр})^2}$, кВ					
Номер интервала - <i>k</i>	1	2	3	4	5
Границы интервала (<i>U</i> _{прmin<i>k</i>} - <i>U</i> _{прmax<i>k</i>}), кВ					
Число пробоев <i>m_k</i> в интервале <i>k</i>					
<i>P_k</i> = (<i>m_k</i> /25) · 100, %					
<i>M_k</i> = <i>M_{k-1}</i> + <i>P_k</i> , %					
<i>K</i> _{вар} = $\frac{\sigma}{\bar{U}_{пр}} \cdot 100$, %					
<i>U</i> _{прпор} , кВ					

$$\Delta U_{пр} = (U_{прmax} - U_{прmin})/5, \text{ кВ}$$

3.6. Сделать заключение о степени однородности состава испытанного трансформаторного масла по полученной величине коэффициента вариации *K*_{вар} (см. пункт 1.2.3).

3.7. На основании сравнения значения порогового пробивного напряжения *U*_{прпор} с допустимыми величинами пробивного напряжения *U*_{прдоп} эксплуатационного масла (табл.1.1) сделать вывод о номинальном напряжении трансформатора, в котором может быть использовано испытанное масло.

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1.4.1. Какие основные жидкие диэлектрики и для какой цели используются в электротехнических установках?

1.4.2. Каков механизм пробоя жидкого диэлектрика и какие факторы влияют на его электрическую прочность?

1.4.3. Что представляет собой установка для испытаний жидкого диэлектрика на пробой?

1.4.4. Как определяется качество жидкого диэлектрика по ГОСТ 6581-75*?

1.4.5. Какова последовательность статистической обработки результатов многократных испытаний на пробой жидких диэлектриков?

1.4.6. Как определяется по итогам испытаний степень однородности трансформаторного масла и номинальное напряжение трансформатора, в котором оно может быть использовано?

РАБОТА 2 ПРОБОЙ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение особенностей электрического и теплового пробоев твердых диэлектриков.

2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1. Основные виды пробоя твердых диэлектриков и их особенности

Твердые диэлектрики очень широко применяются в качестве изолирующих материалов в электротехнических устройствах (электрических машинах, кабелях, конденсаторах, трансформаторах, и др.). Наибольшее распространение получили органические твердые диэлектрики на основе целлюлозы: электроизоляционная бумага и картон; гетинакс (получается путем горячего прессования бумаги, пропитанной бакелитом - специальной смолой); текстолит (изготавливается путем горячего прессования хлопчатобумажной ткани с бакелитом); неорганические твердые диэлектрики на основе стекла, слюды и асбеста, а также полимеры (полиэтилен, фторопласт и др.). При пробое твердых диэлектриков, в отличие от пробоя газообразных и жидких диэлектриков, происходит необратимый процесс их разрушения, т.е. не происходит восстановления электрической прочности после снятия напряжения.

Различают три вида пробоя твердых диэлектриков: электрический, тепловой и электрохимический [2].

Последний вид пробоя происходит, в основном, в условиях повышенной температуры и влажности воздуха. В этих условиях

происходят электрохимические процессы старения изоляционных материалов, приводящие к необратимому уменьшению сопротивления изоляции и в итоге - к её пробую. Процесс старения носит длительный характер.

Электрический пробой однородных твердых диэлектриков происходит под действием ударной ионизации их молекул или в результате неупругого смещения (т.е. без возврата на прежнее место) связанных зарядов диэлектрика под действием внешнего электрического поля.

Опыт показывает, что пробивное напряжение изоляции зависит от ее толщины (т. е. от расстояния между электродами a): чем толще слой данного электроизоляционного материала, тем выше его пробивное напряжение. В то же время слои одной и той же толщины из разных электроизоляционных материалов имеют различные значения пробивных напряжений. Это дает основание для введения параметра электроизоляционного материала, определяющего его способность противостоять пробую – *электрической прочности* $E_{пр}$.

Для простейшего случая равномерного электрического поля в диэлектрике можно принять: $E_{пр} = U_{пр} / a$, откуда $U_{пр} = E_{пр} a$.

Электрическая прочность диэлектрика может рассматриваться как пробивная напряженность электрического поля, т. е. та величина напряженности поля в диэлектрике, при достижении которой (в данном месте) происходит его пробой. Чаще всего, говоря об электрической прочности электроизоляционного материала, имеют в виду среднюю пробивную напряженность, т. е. отношение пробивного напряжения к толщине слоя электроизоляционного материала, (для электрического поля, приближающегося к равномерному).

Определяя $U_{пр}$ в вольтах, а a в метрах, мы получаем основную единицу СИ для $E_{пр}$ – вольт на метр (В/м). На практике весьма распространены и такие единицы, как кВ/мм, кВ/см, В/мкм и др. Легко видеть, что единица кВ/мм (или равная ей единица В/мкм) может быть представлена как единица СИ – МВ/м.

Большое число инородных включений значительно снижает электрическую прочность твердых диэлектриков.

Электрическая прочность однородных твердых диэлектриков, находящихся в однородном поле, максимальна и достигает 100кВ/мм

Наименьшую электрическую прочность имеют твердые диэлектрики с большим числом газовых включений, находящиеся в резконеоднородном поле.

Наиболее однородными твердыми диэлектриками являются стекло, слюда и материалы на их основе.

Электрический пробой развивается быстро за время $t \leq 10^{-5}$ с.

Тепловой (электротепловой) пробой происходит в результате нагрева диэлектрика за счет протекающих через него токов, т.е. за счет диэлектрических потерь, вызываемых этими токами. На постоянном напряжении диэлектрические потери создаются в диэлектрике протекающим через него сквозным (объемным) током утечки. На переменном напряжении к этим потерям добавляются диэлектрические потери, вызываемые током абсорбции - током замедленных видов поляризации. Поэтому потери на переменном напряжении в одном и том же диэлектрике больше, чем на постоянном, если величины этих напряжений и условия, в которых находится диэлектрик, одинаковы.

Диэлектрические потери, а, следовательно, и выделяемая в диэлектрике тепловая мощность $P_{\text{выд}}$, растут с увеличением приложенного напряжения. Наряду с выделяемой в диэлектрике тепловой мощностью $P_{\text{выд}}$, диэлектрик отводит (рассеивает) в окружающую среду тепловую мощность $P_{\text{отв}}$. Если $P_{\text{выд}}$ превысит $P_{\text{отв}}$, будет происходить интенсивный разогрев диэлектрика, что приведет в итоге к его тепловому пробую.

Тепловой пробой твердого диэлектрика чаще всего происходит в случае его высокой проводимости, т.е. больших токов утечки. Это характерно для дефектной изоляции, имеющей значительное количество газовых и других инородных включений.

Для снижения вероятности теплового пробоя необходимо устранять дефекты изоляции (путем её качественной пропитки специальными изоляционными составами), а также увеличивать величину отводимой тепловой мощности, за счет увеличения поверхности (площади) диэлектрика, отводящей тепло, применения газового обдува или жидкостного охлаждения.

Различия между электрическим и тепловым пробоями сводятся к следующему:

- пробивное напряжение $U_{\text{пр}}$ электрического пробоя не зависит от времени действия напряжения и температуры окружающей среды, а теплового - существенно зависит;
- величина $U_{\text{пр}}$ при электрическом пробое определяется амплитудным значением напряжения, а при тепловом - действующим;
- электрический пробой происходит в местах наибольшей напряженности электрического поля, а тепловой - в местах наихудшего теплоотвода;
- канал электрического пробоя мало заметен, канал теплового пробоя ярко выражен, в месте пробоя диэлектрик обугливается.

2.2. Установка для проведения испытаний и обработка их результатов

Испытания на пробой твердых диэлектриков проводятся на специальной установке, принципиальная схема которой изображена на рис.2.1.

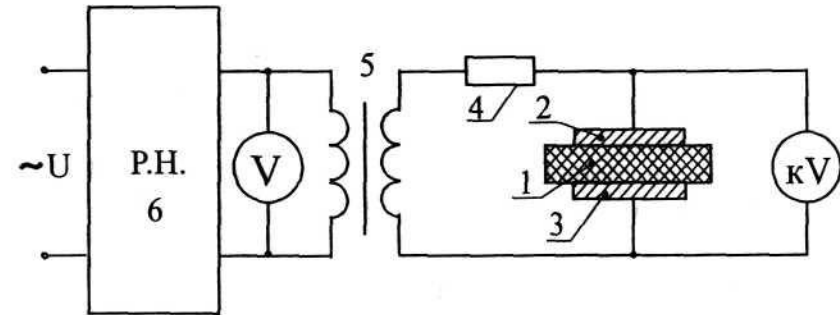


Рис.2.1. Схема испытательной установки

На этом рисунке приняты следующие обозначения:

- 1 - испытуемый твердый диэлектрик;
- 2 и 3 - верхний и нижний металлические электроды;
- 4 - защитный резистор, ограничивающий ток при пробое диэлектрика;
- 5 - однофазный высоковольтный трансформатор;
- 6 - регулятор напряжения. Напряжение на первичной обмотке трансформатора измеряется с помощью вольтметра V , а на испытуемом твердом диэлектрике киловольтметром - $кV$ электростатической системы.

Испытуемый твердый диэлектрик должен достаточно далеко выходить за края электродов (2 и 3) установки, чтобы исключить возможность его поверхностного перекрытия по воздуху.

С увеличением толщины твердого диэлектрика возрастает степень его неоднородности из-за роста числа газовых и других включений. Это приводит к некоторому снижению его электрической прочности и к заметному разбросу величин пробивных напряжений.

С целью получения достоверных значений электрической прочности проводят несколько пробоев твердого диэлектрика при одной и той же его толщине. Проведение большого числа испытаний требует значительного времени и большого количества образцов, так как, в отличие от газов и жидких диэлектриков, электрическая

прочность твердого диэлектрика не восстанавливается после снятия напряжения. Поэтому при испытаниях на пробой твердых диэлектриков ограничиваются небольшим числом опытов - n .

Последовательность статистической обработки такова [4]:

- рассчитывают по формулам (1.1) и (1.2) (см. работу 1) среднее арифметическое значение пробивного напряжения $\bar{U}_{пр}$ результатов испытаний и среднее квадратическое отклонение (СКО) - σ (характеризующее разброс пробивных напряжений $U_{прi}$ - относительно $\bar{U}_{пр}$);

- определяют границы доверительного интервала $\Delta U_{дов}$, за пределы которого с заданной (доверительной) вероятностью $P_{дов}$ не выходят значения пробивных напряжений

$$\Delta U_{дов} = \pm t_p \cdot \sigma, \quad (2.1)$$

где t_p - коэффициент Стьюдента, учитывающий ограниченность числа испытаний.

Для принимаемой обычно доверительной вероятности $P_{дов} = 0,9973$ и числе испытаний $n=6$ величина коэффициента Стьюдента $t_p = 5,5$. Итоги обработки результатов испытаний записывают в виде:

$$\bar{U}_{пр} \pm \Delta U_{дов}.$$

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ

3.1. Ознакомиться со схемой испытательной установки рис.2.1.

3.2. Положить испытуемый твердый диэлектрик – конденсаторную бумагу между электродами 2 и 3 (рис.2.1). Для предотвращения возможности перекрытия по поверхности, бумага должна достаточно далеко выходить за края электродов.

3.3. С помощью рукоятки, расположенной на боковой стороне киловольтметра, установить в окне прибора шкалу с пределом измерения 7,5; 15 или 30 кВ в зависимости от предполагаемой величины измеряемого напряжения, а с помощью высоковольтного ввода, расположенного на задней панели прибора, - соответствующий предел измерения.

3.4. Плавно повышая напряжение поворотом рукоятки автотрансформатора, отсчитывать напряжение по киловольтметру. В момент пробоя необходимо зафиксировать пробивное напряжение и

быстро снять его нажатием на кнопку "СТОП" автоматического пускателя (А.П.), чтобы диэлектрик не успел загореться.

3.5. Произвести опыты при различных толщинах " a " конденсаторной бумаги, указанных руководителем занятий. Для каждой из указанных толщин бумаги провести по 6 испытаний.

3.6. Для каждой серии из 6 испытаний (для каждой толщины " a " бумаги) рассчитать среднее арифметическое пробивных напряжений $\bar{U}_{пр}$ - (формула 1.1), среднее квадратическое отклонение σ (формула 1.2) и границы доверительного интервала $\Delta U_{дов}$ (формула 2.1), а также среднее значение пробивной напряженности

$$\bar{E}_{пр} = \frac{\bar{U}_{пр}}{a}$$

3.7. Результаты измерений и их обработки записать в табл.2.1.

Таблица 2.1

Результаты электрического пробоя диэлектрика

a , мм	$U_{пр1}$, кВ	$U_{пр2}$, кВ	$U_{пр3}$, кВ	$U_{пр4}$, кВ	$U_{пр5}$, кВ	$U_{пр6}$, кВ	$\bar{U}_{пр}$, кВ	$\Delta U_{дов}$, кВ	$\bar{U}_{пр} \pm \Delta U_{дов}$, кВ	$\bar{E}_{пр}$, кВ/мм

3.8. Отключить киловольтметр от схемы и поместить между электродами установки конденсаторную бумагу, указанной руководителем занятий толщины " a ".

3.9. Повышая напряжение, пробить диэлектрик и измерить напряжение U_1 по вольтметру V на первичной стороне высоковольтного трансформатора 5 (см. рис.2.1). Значение пробивного напряжения на высоковольтной обмотке трансформатора определяется по формуле:

$$U_{пр} = kU_1, \quad (2.2)$$

где k - коэффициент трансформации (для трансформатора НОМ-18 $k=180$).

3.10. Передвинуть бумагу так, чтобы между электродами оказался непробитый участок и, не включая кнопку "ПУСК" автоматического пускателя (АП), установить с помощью автотрансформатора напряжение по вольтметру V на 2 - 4 В ниже, чем полученное в предыдущем опыте.

3.11. Нажать на кнопку "ПУСК" АП и определить по электросекундомеру время t , прошедшее от момента подачи напряжения на диэлектрик до его пробоя.

3.12. Повторить опыты несколько раз, понижая напряжение на 2 - 4 В до тех пор, пока отсчитываемое время t не составит 60 - 90 с.

3.13. Полученные результаты измерений записать в табл.2.2.

Таблица 2.2

Результаты теплового пробоя диэлектрика

t, c	U_1, B	$U_{пр}, B$

3.14. По данным табл. 2.1 и 2.2 построить зависимости:
 $U_{пр} = f(a)$, $E_{пр} = f(a)$, $U_{пр} = f(t)$.

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

4.1. Каковы основные виды пробоев твердого диэлектрика и каковы особенности электрохимического пробоя?

4.2. Каковы характерные черты электрического пробоя твердого диэлектрика?

4.3. За счет чего происходит разогрев диэлектрика при тепловом пробое и каковы его особенности?

4.4. Как и почему зависит пробивное напряжение от толщины диэлектрика и времени его действия?

4.5. Как производится статистическая обработка результатов испытаний на пробой диэлектрика при ограниченном числе опытов?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Объем и нормы испытаний электрооборудования / Под ред. Б.А.Алексеева и др. 6-ое изд. - М.:НЦ ЭНАС 1998 . - 256 с.

2. А.С.Серябряков Электротехническое материаловедение. Электроизоляционные материалы: Учебное пособие для вузов ж.д. транспорта. – М.: Маршрут, 2005. - 280 с.

3. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения /Под редакцией И.А. Баумштейна и С.А. Бажанова. - М.: Энергоатомиздат, 1989. -768 с.

4. Д.М.Казарновский, Б.М.Тареев, Испытание электроизоляционных материалов и изделий. - Л.: Энергия, 1980. - 216 с.